

鱼嘴两江大桥缆索病害综合处治（吊索更换和主缆维护部分）

一阶段施工图设计

第一册 共两册

设计图纸



中交公路规划设计院有限公司

二零二五年三月

鱼嘴两江大桥缆索病害综合处治（吊索更换和主缆维护部分）

一阶段施工图设计

设计单位：中交公路规划设计院有限公司

项目负责人：李庆择 

工程设计等级及编号：工程设计综合甲级

分项负责人：要荆荆 

证书编号，A111008611

参加人员：陈明 要荆荆 李庆择

主管总经理：邬都



主管总工：李淮华



设计说明

1. 项目概况

鱼嘴两江大桥是 G5001 重庆绕城高速东段跨越长江的一座特大型桥梁工程。桥位起于广阳镇葵花山庄，在长江南岸石盘凼附近跨越长江，于长江北岸的师母滩登陆，止于鱼嘴镇的下果园，全长 1440.0m，桥梁中心桩号 K50+740。桥面横向布置为：0.5m（防撞护栏）+3.0m（紧急停车道）+12.0m（主行车道）+2.0m（中央分隔带）+12.0m（主行车道）+3.0m（紧急停车道）+0.5m（防撞护栏）。



图 1.1-1 鱼嘴两江大桥立面照

主桥为 616.0m 单跨双铰筒支钢箱梁悬索桥，江津岸（南岸）引桥为 $6 \times 35.0\text{m} + 6 \times 35.0\text{m}$ 预应力混凝土等截面连续箱梁，鱼嘴岸（北岸）引桥为 $4 \times 56.0\text{m} + 3 \times 56.0\text{m}$ 预应力混凝土等截面连续箱梁。南桥塔采用钢筋混凝土多层门式框架，塔柱为变壁厚矩形单箱单室结构，设两道横梁。每根塔柱底设 9 根 $\phi 2.5\text{m}$ 的灌注桩。北桥塔采用钢筋混凝土多层门式框架，塔柱为变壁厚矩形单箱单室结构，为抵抗船舶撞击的影响，在高程 203m 以下塔柱为实心，并在下塔柱增设一道底横梁，共三

道横梁。每根塔柱底设 9 根 $\phi 3.0\text{m}$ 的灌注桩。北桥塔实心段及底横梁采用抗渗纤维混凝土。主缆采用预制平行钢丝股法（PPWS）。每根主缆为 65 股，每股含 127 根 $\phi 5.2\text{mm}$ 镀锌高强钢丝，空隙率在索夹处取 17%，索夹外取 19%，相应主缆外径分别为 519.0mm、525.0mm。加劲梁采用扁平流线型钢箱梁，正交异性板桥面，梁高 3.0m，全宽 36.8m（含风嘴）。

南引桥下部基础采用单排 2 根 $\phi 1.7\text{m}$ 钻孔灌注桩基础，6 号桥墩落在南锚体上；墩身为矩形实体墩。北引桥下部基础采用双排 4 根 $\phi 1.8\text{m}$ 钻孔灌注桩基础，17 号桥墩落在北锚体上；墩身为空心矩形截面。支座采用盆式橡胶支座。

鱼嘴两江大桥桥面于 2022 年 7 月进行重新铺装，铺装后为 2.5cm 热拌环氧沥青混合料 EA10+3.0cm 高弹改性沥青 SMA10，桥面设双向纵坡， $i_1=1\%$ ， $i_2=1.3\%$ ，中跨处于 $R=26782.711\text{m}$ 的凸竖曲线上。引桥和两岸桥台各设 1 道伸缩缝，6 号、12 号、13 号、17 号墩顶各设 1 道伸缩缝 64RBDXG-1200。

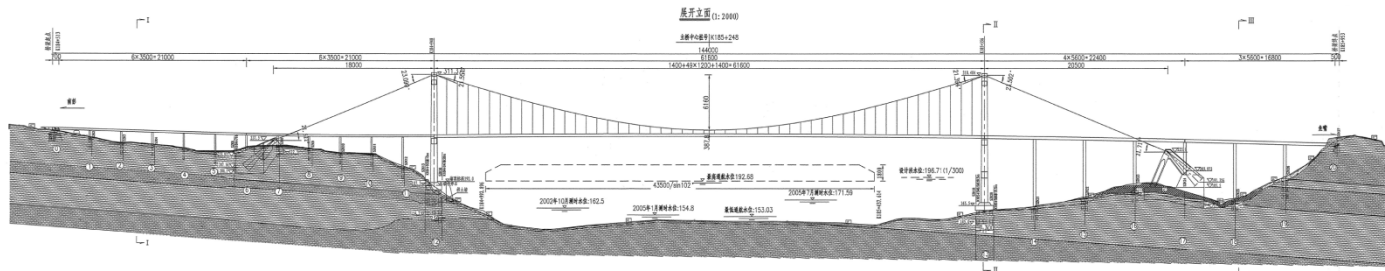


图 1.1-2 鱼嘴两江大桥桥型布置图（单位：cm）

1.1. 结构形式

1、缆索系统

1) 主缆

主缆共两根，由平行钢丝索股组成。采用强度 1670MPa 的镀锌高强钢丝，钢丝直径为 5.20mm。主缆施工采用预制平行钢丝索股法（PPWS 法），每根主缆为 65 股，每股含 127 根钢丝，排列成近

似正六边形。主缆外径分别为 519mm（索夹处）、525mm（索夹外）。主缆安全系数为 2.5。

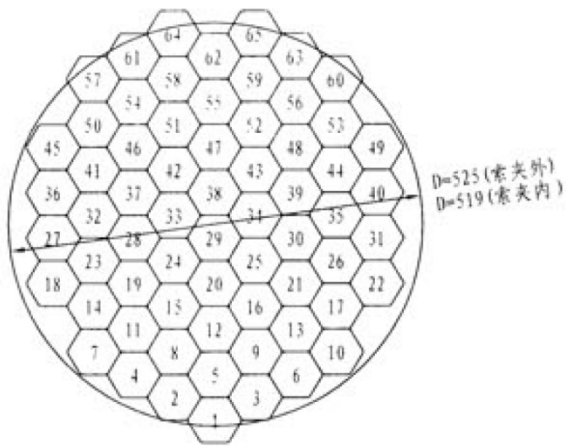


图 1.1-1 主缆截面图

2) 吊索

索夹分为上下两半，用螺杆夹紧相连。索夹采用铸钢铸造，螺杆用合金钢。每个吊点由 2 根吊索组成，上下端均为销接式。吊索采用预制平行钢丝束股（PWS），外包 PE 材料进行防护。吊索上下锚头均采用叉形热铸锚。锚杯内浇铸锌铜合金。叉形耳板与锚杯用螺纹联接。

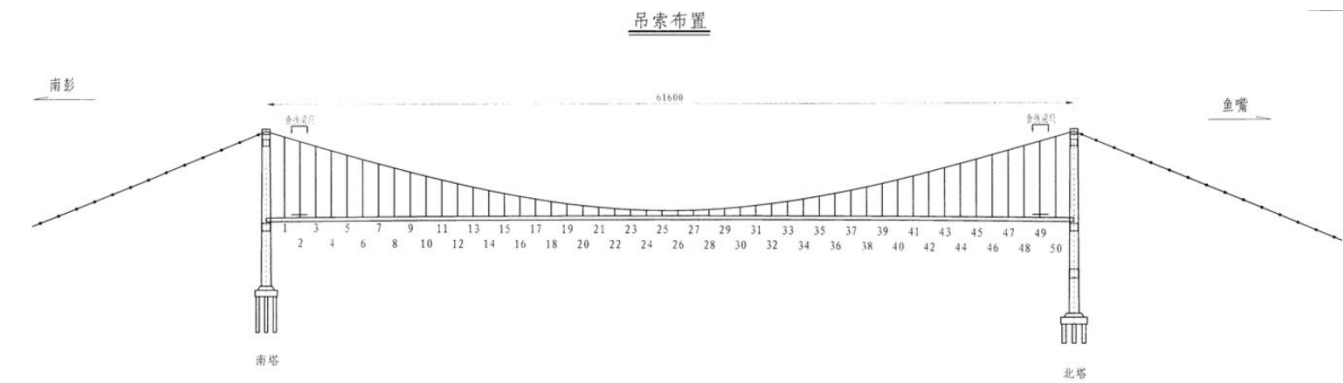


图 1.1-2 吊索布置图（单位：cm）

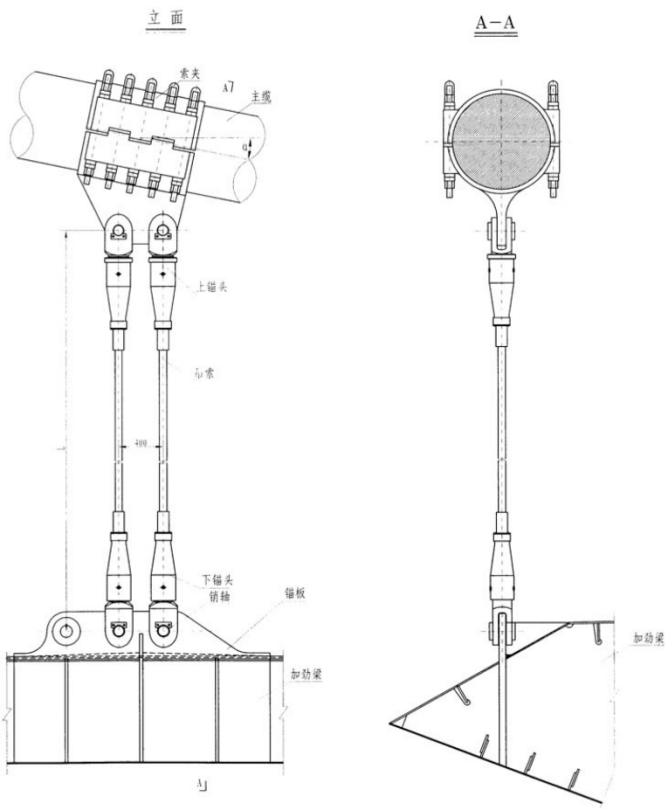


图 1.1-3 吊索一般构造图

3) 索夹

索夹壁厚均为 35mm，除中跨安装吊索的索夹外，还有夹紧边跨主缆的索夹和安装缆套的索火。由于主缆倾角不同，所需夹紧力不同，索夹长度和螺杆数量均不相同，将相近长度的索夹并为 5 组。同一组索夹耳板孔眼位置略有变化，以适应吊索与主缆交角的变化。为使两只销孔保持水平并避免索长受力偏心，销孔对称于通过索夹中心的垂直线。索夹均采用上、下分开的形式。下两半索夹用螺杆相连销紧，接缝处嵌填橡胶防水条防水。索夹螺杆做成缩腰形，以免在螺纹处断裂。

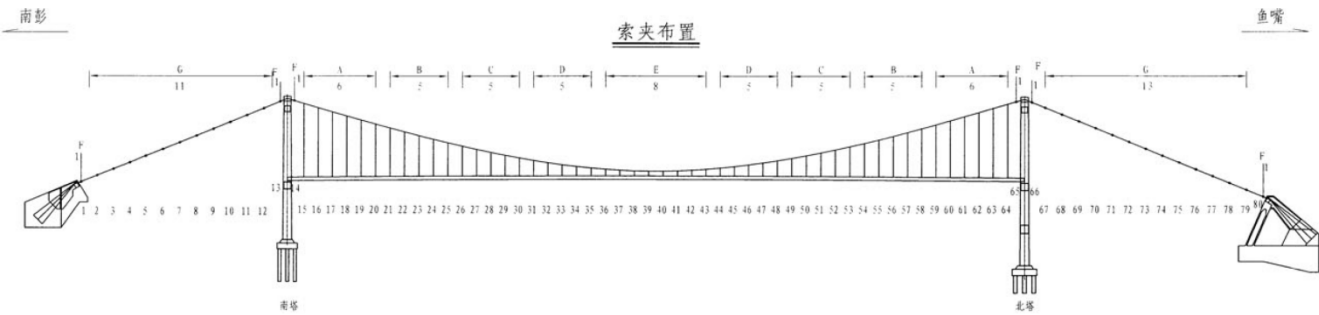


图 1.1-4 索夹分类及布置图

2、加劲梁

主桥加劲梁采用正交异性板流线型扁平钢箱梁，梁高 3.0m, 宽（含风嘴）36.8m; 顶板厚 14mm, U 形加劲肋厚 8mm; 底板厚 10mm, 其 U 形加劲肋厚 6mm; 吊耳板厚 60mm。钢箱梁标准梁段长 12m, 内设 4 道实体式横隔板，为加强桥面板刚度，减小桥面板变形对铺装层的不利影响，横隔板间距确定为 3.0m。吊索处横隔板厚 10mm（承力板为 30mm），其余横隔板厚 8mm。在端梁段有永久竖向支座处的横隔板厚度为 20mm，端横隔板厚度为 20mm。根据构造需要，端梁段局部设纵隔板 2 道。支座处横隔板上设置起顶加劲构造，以备更换支座时使用。结合吊索的设计方案，钢箱梁与吊索的连接采用销接式锚板。

根据加劲梁的长度、梁段运输条件、吊装能力等因素，全桥钢箱梁单元制造划分成 50 个梁段，梁段间连接采取全断面焊接的连接形式。梁段长度 12m（标准段）、12.5m（中央段）、18.39m（端梁段）。单元梁段最大重量为 330.1t（端梁段）。

全桥梁段划分成 27 个吊装段，即跨中吊装段（1 个）、标准吊装段（22 个）、合拢段（2 个）、端部吊装段（2 个），其中标准吊装段为 24m，即两个标准梁段焊接而成。跨中吊装段由两个中央段焊接而成，长度 25m，合拢段为标准梁段，长 12m。最大吊装重量 366.1 吨（跨中吊装段）。

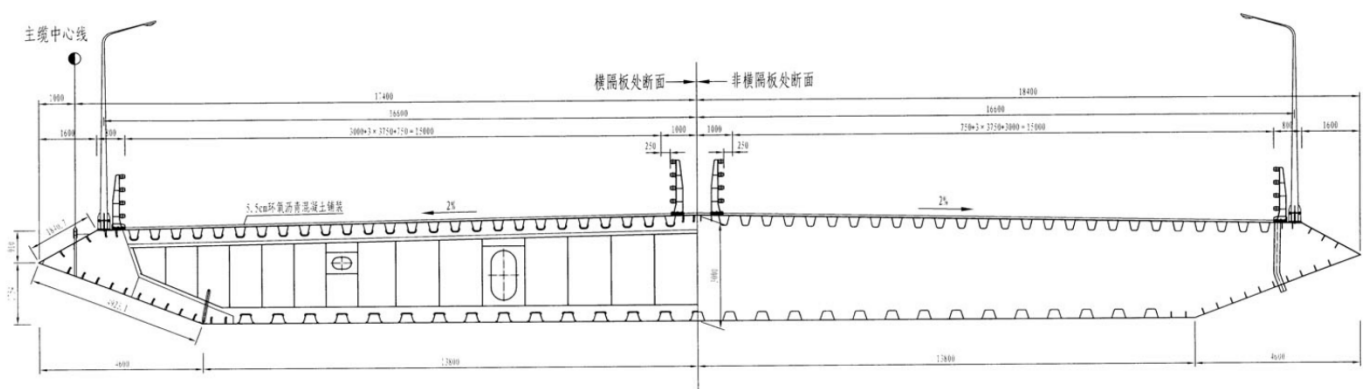


图 1.1-5 加劲梁标准断面（单位：mm）

3、索塔

1) 南塔

南塔是由塔柱、横梁组成的门式框架结构。塔柱为普通钢筋砼结构，横梁为预应力砼结构。主要承受由索鞍传下的垂直荷载及出活载、风载、温度差等所产生的顺桥向和横桥向荷载。南塔有两个塔柱，二道横梁。南塔除塔根部 3 米和塔顶部 4 米实心段外余均为钢筋砼空心箱形截面。横梁为预应力空心箱型截面，塔柱高度为 118.972m。南塔塔柱横桥向尺寸全高为 5.2m，顺桥向尺寸由塔

项的 6m 以 7/1000 的坡率线性增大到塔柱底的 7.666m。塔柱壁顺桥向厚度分别为 0.6、0.8，横桥向厚度为 0.6、0.8m。横梁附近变壁厚。

上横梁的高度为 5.5m，宽度 5.05m。下横梁高度为 7.5m，宽度 5.95m。横梁的预应力锚头均埋于塔身内，用混凝土加封，上横梁设 24 束 12 ϕ 15.2mm 预应力钢束，下横梁设 48 束 15 ϕ 15.2mm 预应力钢束。

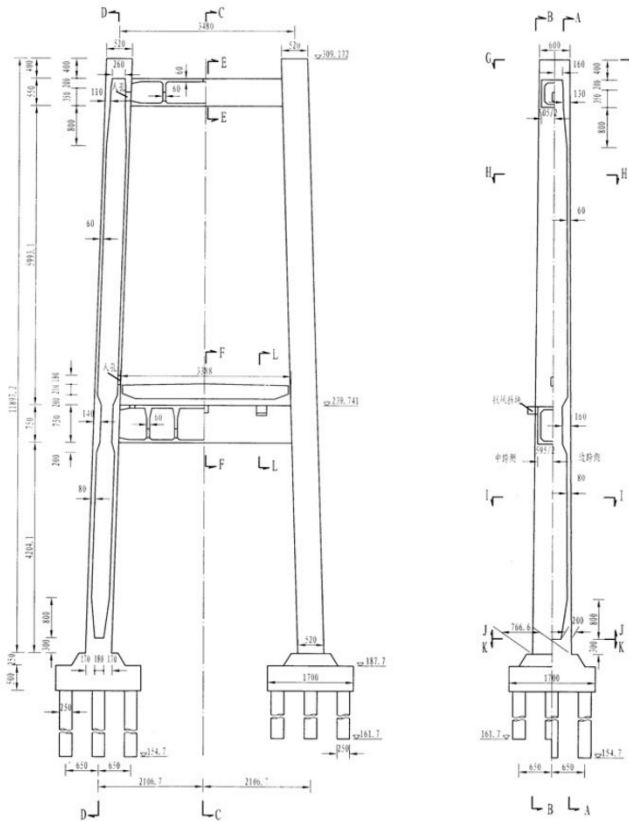


图 1.1-6 南塔构造示意图

2) 北塔

北塔有两个塔柱，三道横梁。北塔高程+203m 以上塔柱为钢筋砼空心箱形截面，以下为实心矩形截面。横梁为预应力空心箱型截面，塔柱高度为 139.704m。北塔塔柱横桥向尺寸全高为 5.2m，顺桥向尺寸由塔顶的 6m 以 7/1000 的坡率线性增大到塔柱底的 7.956m。塔柱壁顺桥向厚度分别为 0.6、0.8, 横桥向厚度为 0.6、0.8m。横梁附近变壁厚。

上横梁的高度为 5.5m, 宽度 5.05m。下横梁高度为 7.5m, 宽度 5.95m。底横梁高度 7m, 宽度 6.4m。底横梁中跨侧腹板中央高度处设有一道水平加劲肋。横梁的预应力锚头均埋于塔身内, 用混凝土加封。上横梁设 24 束 12 ϕ 15.2mm 预应力钢束, 下横梁和底横梁各设 48 束 15 ϕ 15.2mm 预应力钢束。底横梁钢束在塔柱部分为无粘接，在横梁内为有粘接。

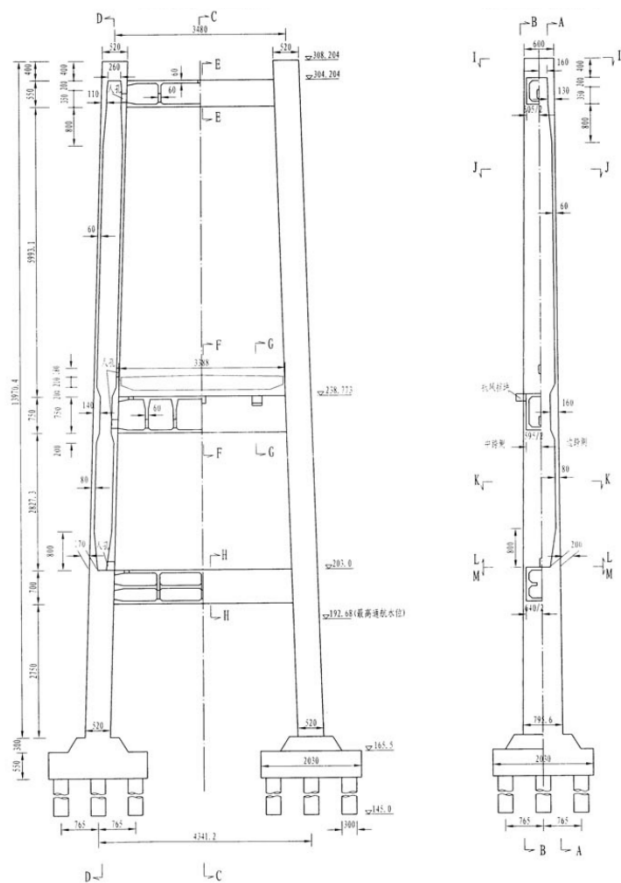


图 1.1-7 北塔构造示意图

4、支座及伸缩缝

梁端设有竖向支座和横向抗风支座，竖向支座的额定承载力抗压为 3000kN，抗拉为 1000kN，横向抗风支座的额定承载力为 2000kN。支座的允许位移量为±550mm。箱梁两端均设置伸缩缝，伸缩总量为 600mm（包括了引桥的伸缩量）。

1.2. 设计标准

- 1、桥梁等级：六车道高速公路特大桥。
- 2、车辆荷载等级：公路-I 级。
- 3、地震烈度：100 年超越概率 2%的基岩地震水平向峰值加速度为 107.8gal（相当于基本烈度 VI 度）。
- 4、设计车速：100km/h。
- 5、桥面净宽：双向六车道，净宽 2×15m, 中间带：0.75+2.0+0.75=3.5m, 行车道：2×3×

- 3.75=22.5m, 右侧硬路肩：2×3=6m, 护栏：2×0.5=1.0m。
- 6、设计水位：1/300 频率洪水位 196.71m（黄海）。
- 7、桥面纵坡：≤1.3%，桥面横坡：=2%。
- 8、通航技术标准：
通航等级：内河 I-（2）级；
通航水位：设计最高通航水位：192.68m（黄海高程），设计最低通航水位：153.03m（黄海高程）；
通航净空：净高：最高通航水位以上不小于 18 米，净宽：单孔双向通航净宽不小于 435.0m。
- 9、设计基本风速：桥位区 10m 高度处 100 年一遇 10 分钟平均最大风速 27.5m/s。
- 10、船舶撞击荷载：横桥向 19.0MN，顺桥向 9.5MN。
- 11、设计基准期：100 年。

1.3. 吊索典型病害检测情况

2023 年 12 月重庆市交通工程质量检测有限公司对鱼嘴两江大桥进行了定期检测，发现存在索夹锈蚀起皮、吊索防护套与下锚头连接处螺栓断裂、螺栓缺失等病害。

表 1.3-1 索夹、吊索检测结果表

序号	病害位置	病害类型	病害描述	评定标度
1	L50#索夹	锈蚀起皮	L50#索夹涂层锈蚀起皮，面积 0.1×0.1m ²	2
2	R50#索夹	锈蚀起皮	R50#索夹涂层锈蚀起皮，面积 0.3×0.1m ²	2
3	吊索	防护套破坏	R25-1#吊索防护套与下锚头连接处 3 颗螺栓断裂	2
4	吊索	防护套破坏	R24-1#吊索防护套与下锚头连接处 3 颗螺栓断裂，1 颗螺栓缺失	2
5	吊索	防护套破坏	L23-2#吊索防护套与下锚头连接处 1 颗螺栓断裂	2

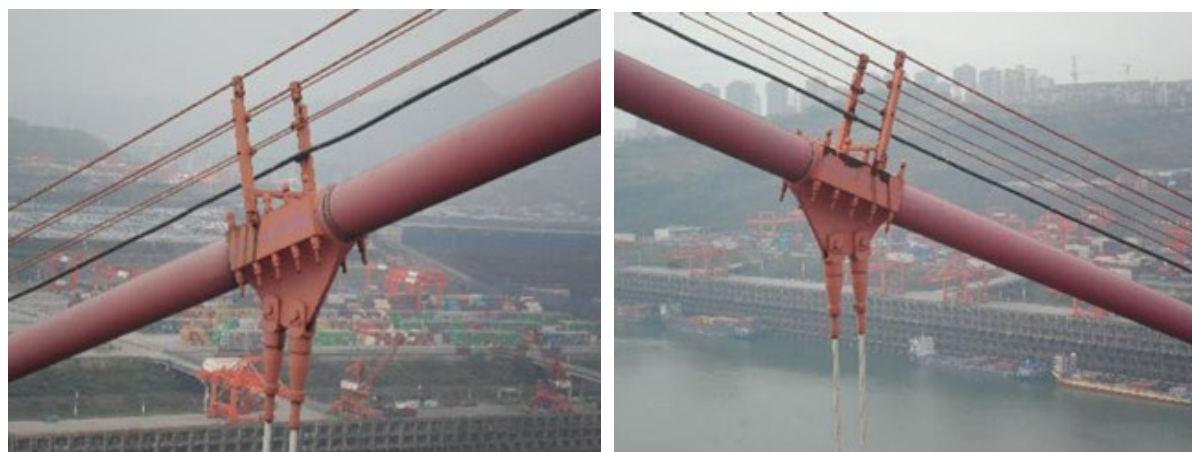


图 1.3-1 索夹涂层锈蚀起皮



图 1.3-2 防护套与锚头连接处螺栓断裂或缺失

2024 年 5 月重庆市交通工程质量检测有限公司对鱼嘴两江大桥进行专项管养维护的过程中发现索夹多处涂层脱落、螺栓轻微锈蚀。有 8 处吊索螺栓断裂，1 处钢护筒和吊杆连接处锈蚀。



图 1.3-3 索夹涂层脱落

图 1.3-4 索夹螺栓锈蚀



图 1.3-5 防护套与下锚头连接处螺栓断裂



图 1.3-6 防护套与吊杆连接处锈蚀

2024 年 9 月重庆市交通工程质量检测有限公司发现桥梁上游侧 26 号吊索存在断丝现象，同时临近的 24、25 及 27 号吊索有滑移现象。并选取了右幅 24#吊索、25 吊索、27#吊索、28#吊索，左幅 24#吊索、25 吊索、26 吊索、27#吊索、28#吊索对吊索内部钢丝锈蚀断丝情况进行检测。检测结果发现 24#、26-1#吊索大部分钢丝都存在锈蚀的现象。

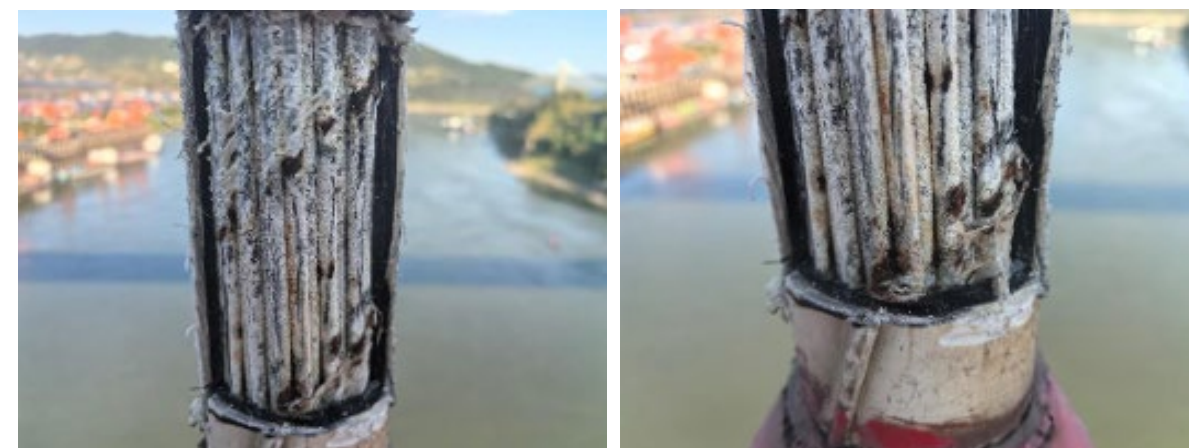


图 1.3-7 下游侧 26-1#吊索平行钢丝锈蚀

2024 年 12 月重庆市交通工程质量检测有限公司对鱼嘴两江大桥专项检查中发现左幅主缆存在 2 处索夹滑移、主缆保护层开裂，右幅主缆存在 7 处索夹滑移、主缆保护层开裂。对左侧 35 对吊索，右侧 34 对吊索进行了索力检测，与 2023 年吊索索力检测结果相比，左侧偏差在-4.36%~5.56%，右侧偏差在-7.46%~6.21%之间。

表 1.3-2 主缆索夹滑移病害汇总表

序号	病害位置	病害类型	病害描述	评定标度
1	L50#索夹	滑移、主缆开裂	L50#索夹滑移 48mm，主缆保护层开裂	4
2	L7#索夹	滑移、主缆开裂	L7#索夹滑移 24mm，主缆保护层开裂	4
3	R2#索夹	滑移、主缆开裂	R2#索夹滑移 2mm，主缆保护层开裂	3
4	R38#索夹	滑移、主缆开裂	R38#索夹滑移 18mm，主缆保护层开裂	4
5	R39#索夹	滑移、主缆开裂	R39#索夹滑移 28mm，主缆保护层开裂	4
6	R42#索夹	滑移、主缆开裂	R42#索夹滑移 3mm，主缆保护层开裂	3
7	R43#索夹	滑移、主缆开裂	R43#索夹滑移 17mm，主缆保护层开裂	4
8	R47#索夹	滑移、主缆开裂	R47#索夹滑移 36mm，主缆保护层开裂	4
9	R50#索夹	滑移、主缆开裂	R50#索夹滑移 22mm，主缆保护层开裂	4



图 1.3-8 索夹滑移及保护层开裂

根据运营期对索夹的检测及专项检查资料，现阶段鱼嘴大桥索夹存在的主要病害为九处索夹滑移，并引起了对应位置主缆的防护层开裂。

1.4. 吊索维修历程

查阅鱼嘴两江大桥运营期养护资料，2024 年发现桥梁上游侧 26 号吊索存在断丝现象，同时临近的 24、25 及 27 号吊索有滑移现象。大桥于 2024 年对 60 根吊索采用三吊点法方案进行了更换处治，同时对部分吊索的 PE 护套进行了修复。全桥吊索已更换编号如下表。

表 1.4-1 已更换的 60 根吊索编号

吊索编号											
Y9-1	Y9-2	Y10-1	Y10-2	Y21-1	Y21-2	Y22-1	Y22-2	Y23-1	Y23-2	Y24-1	Y24-2
Y25-1	Y25-2	Y26-1	Y26-2	Y27-1	Y27-2	Y28-1	Y28-2	Y29-1	Y29-2	Y30-1	Y30-2
Y31-1	Y31-2	Y32-1	Y32-2	Y36-1	Y36-2	Y38-1	Y38-2	Y43-1	Y43-2	Z18-1	Z18-2
Z19-1	Z19-2	Z20-1	Z20-2	Z21-1	Z21-2	Z22-1	Z22-2	Z23-1	Z23-2	Z24-1	Z24-2
Z25-1	Z25-2	Z26-1	Z26-2	Z27-1	Z27-2	Z28-1	Z28-2	Z29-1	Z29-2	Z30-1	Z30-2

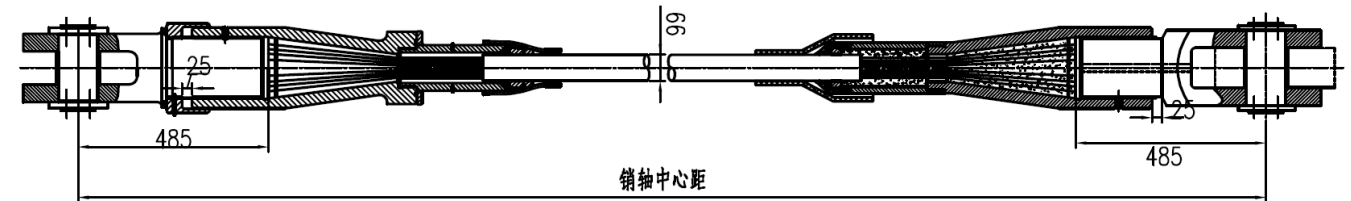


图 1.4-1 更换后的新吊索构造图（mm）

1.5. 吊索维修必要性

2024 年 9 月鱼嘴大桥发现上游个别吊索存在大面积断丝情况，及时采取了相应临时应急安全保障措施后，紧急对上游侧其他 98 根吊索锈蚀状况进行无损检测。检测结果表明：存在严重腐蚀的吊索 1 根，其内部钢丝评定标度为 V 级，存在较为严重腐蚀的吊索 3 根，其内部钢丝评定标度为 IV 级，存在中度腐蚀的吊索 23 根，其内部钢丝评定标度为 III 级。存在轻度腐蚀的吊索 58 根，其内部钢丝评定标度为 II 级。同时，全桥吊索下锚头存在不同程度的老化、钢丝锈蚀等影响结构安全运营的病害。

结合鱼嘴大桥日常车流量大、重车占比较高的特点，大桥通车运营至今已逾 16 年，吊索已接近规范建议使用年限，为了保障大桥后续安全可靠通行，消除潜在运营风险。结合现阶段吊索病害情况，有必要对大桥剩余吊索进行更换处治。

2. 项目工作内容及重难点

2.1. 主要工作内容

按照本项目的合同要求，“根据招标人要求完成重庆高速公路集团有限公司中渝营运分公司2025 年鱼嘴两江大桥缆索病害综合处治工程（剩余 140 根吊索更换）施工图及施工图预算（含设计变更）、施工、交竣工验收及缺陷责任期各阶段的设计服务工作”。查阅鱼嘴大桥运营期相关检测资料，并结合大桥管理单位的实际需求，本项目的¹主要工作内容有以下三方面。

- 1、鱼嘴两江大桥缆索病害综合处治工程（剩余 140 根吊索更换）施工图及施工图预算（含设计变更）；
- 2、索夹滑移病害处治方案
- 3、智慧吊索设计及监测

2.2. 项目重难点

本项目主要是针对主缆和吊索病害进行综合处治，主要工作内容是吊索更换方案设计、索夹滑移病害处治以及智慧吊索设计。根据项目实际特点和工作内容，主要重难点如下。

- 1、近塔区长吊索更换方案设计
- 近塔区长吊索更换受到梁端边界构造等的约束，近塔区域吊索的更换采用常规的多吊点更换存在一定的制约，需要结合大桥实际情况，设计合理可靠、安全经济的吊索更换方案。
- 2、普通非近塔区吊索更换方案设计
- 全桥剩余待更换吊索中普通非近塔区域吊索占比较高，分析验证多吊点更换方案的可行性是保障换索过程安全有序的重要前提。
- 3、索夹滑移病害处治
- 根据鱼嘴大桥运营期的检测资料，现阶段大桥存在九处索夹滑移病害，并引起了滑移处的主缆防护层开裂，一定程度的影响了主缆的耐久性。结合鱼嘴大桥的结构特征，分析索夹滑移对大桥宏观力学参数的影响，并结合现有工程案例和技术条件给出合理可行的处治方案。

3. 设计依据

3.1. 行业规范

本项目开展主要参考依据及规范如下。

- 1）《公路工程技术标准》（JTG B01—2003）（建设期规范）
- 2）《公路工程技术标准》（JTG B01—2014）
- 3）《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60—2015）
- 4）《钢结构设计标准》（GB50017-2017）
- 5）《公路桥涵施工技术规范》（JTJ/T 3650-2020）
- 6）《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60—2004）（建设期规范）
- 7）《悬索桥吊索用钢丝绳》（GB/T 38818-2020）
- 8）《悬索桥吊索》（GB/T 39133-2020）
- 9）《公路悬索桥吊索》（JT/T 449-2021）
- 10）《公路悬索桥设计规范》（JTG/T D65-05-2015）
- 11）《重要用途钢丝绳》（GB 8918-2006）
- 12）《钢丝绳吊索使用和维护》（GB/T 39480-2020）
- 13）《一般用途钢丝绳吊索特性和技术条件》（GB/T 16762-2020）
- 14）《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722-2023）
- 15）《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》（GB/T 17101-2019）
- 16）《公路缆索结构体系桥梁养护技术规范》（JTG/T 5122-2021）
- 17）《钢结构焊接规范》（GB 50661-2011）
- 18）《钢结构工程施工及验收规范》（GB 50205-2020）
- 19）《公路养护技术标准》JTG 5110-2023
- 20）《公路工程质量检验评定标准》JTG F80/1-2017
- 21）其它相关现行技术标准和设计规范

3.2. 运营期管养资料

- 1）《2023 年 G5001 绕城东段鱼嘴两江大桥（K50+740）定期检查报告》
- 2）《鱼嘴两江大桥应急处治项目方案设计》
- 3）《重庆中渝高速公路有限公司外环江津长江大桥、鱼嘴两江大桥 2024 年特殊结构桥梁专项管养维护项目检测报告》
- 4）《重庆绕城高速公路鱼嘴两江大桥钢桥面铺装翻修工程_施工图设计》
- 5）《重庆绕城高速鱼嘴两江大桥缆索应急抢险项目施工图设计》
- 6）鱼嘴大桥设计图纸资料

3.3. 施工图设计专家意见执行情况

2025 年 1 月 19 日下午，重庆高速公路集团有限公司中渝营运分公司组织召开了 2025 年鱼嘴两江大桥缆索病害综合处治工程施工图设计专家评审会。会议认为，设计单位提供的设计方案合理，提交的设计文件内容较齐全，资料较完整，达到施工图设计文件深度要求，经细化完善后可用于指导施工，同意通过评审。设计单位应根据以下意见对其施工图设计进一步修改完善，并在规定时间内提交正式的施工图设计，以便及时开展下一步的工作。

重庆高速公路集团有限公司中渝营运分公司纪要

渝高速中渝纪要〔2025〕6 号

重庆高速公路集团有限公司中渝营运分公司
关于 2025 年鱼嘴两江大桥缆索病害综合处治
工程施工图设计专家评审会的纪要

2025 年 1 月 19 日下午，重庆高速公路集团有限公司中渝营运分公司组织召开了 2025 年鱼嘴两江大桥缆索病害综合处治工程施工图设计专家评审会。参加会议的有特邀专家、重庆高速公路集团有限公司中渝营运分公司、北京中咨路捷工程咨询有限公司及中交公路规划设计院有限公司相关人员。与会专家审阅了 2025 年鱼嘴两江大桥缆索病害综合处治工程施工图设计文件，听取了设计单位中交公路规划设计院有限公司关于 2025 年鱼嘴两

江大桥缆索病害综合处治施工图设计的汇报，经讨论，会议形成一致意见，纪要如下：

- 一、会议认为，设计单位提供的设计方案合理，提交的设计文件内容较齐全，资料较完整，达到施工图设计文件深度要求，经细化完善后可用于指导施工，同意通过评审。
- 二、会议提出，设计单位应根据以下意见对其施工图设计进一步修改完善，并在规定时间内提交正式的施工图设计，以便及时开展下一步的工作。

1. 结合现场索夹实际情况，进一步核实叉耳设计尺寸；
2. 补充换索涉及的原材料送检要求；
3. 补充细化现场施工动火、焊接及防腐等要求；
4. 补充完善索夹滑移处治施工工艺图；
5. 按照实际需求合理增加智慧吊索数量；
6. 完善交通组织方案；
7. 进一步核实材料工程量及定额套用。

参会人员名单

特邀专家：吴海军、汪 宏、彭 强、李 雨
中渝公司：段 羽、曾宗建、钟 奎
中交公路规划设计院有限公司：李红松、陈 明、刘渝刚
北京中咨路捷工程咨询有限公司：王新宇、刘 洋

图 3.3-1 施工图设计专家评审会议纪要

设计单位中交公路规划设计院有限公司对专家意见进行了认真分析和研究，按照专家意见及建议内容对设计说明和图纸进行了修改完善，具体执行情况如下：

- 评审意见 1：结合现场索夹实际情况，进一步核实叉耳设计尺寸；
- 执行情况 1：执行专家意见。施工图设计说明第 8.3.4 节已补充。
- 评审意见 2：补充换索涉及的原材料送检要求；
- 执行情况 2：执行专家意见。第 7.6 节已补充关于原材料送检要求。
- 评审意见 3：补充细化现场施工动火、焊接及防腐等要求；
- 执行情况 3：执行专家意见。施工图设计说明第 8.2.3 节、第 8.3.3 节对现场焊接施工工序、焊接要求及防腐要求已作相关补充。
- 评审意见 4：补充完善索夹滑移处治施工工艺图；
- 执行情况 4：执行专家意见。第 6.3 节已完善。
- 评审意见 5：按照实际需求合理增加智慧吊索数量；
- 执行情况 5：执行专家意见。第 5.3 节已细化完善。
- 评审意见 6：完善交通组织方案；
- 执行情况 6：执行专家意见。第 10 节已完善。
- 评审意见 7：进一步核实材料工程量及定额套用。
- 执行情况 7：执行专家意见。设计施工图已按实际情况完善工程量及定额套用。

2025 年 3 月 5 日，集团营运板块变更委员会在高速集团 701 会议室组织召开了中渝公司鱼嘴两江大桥缆索病害处治施工图设计审查会，与会人员审阅了相关施工图设计文件，充分听取了设计单位汇报，经讨论，形成一致意见。设计单位提交的的中渝公司鱼嘴两江大桥缆索病害处治施工图设计内容齐全，总体满足施工图设计要求，经修改完善报市交通局审查后可作为下一步施工工作指导依据。

- 评审意见 1：建议补充说明最近一次桥梁定期检查、专项检查结论，补充说明吊索更换的原因。
- 执行情况 1：执行专家意见。第 1.5 结已补充。
- 评审意见 2：建议补充本次吊索更换设计与原桥梁吊索各性能参数的对比说明及吊索更换施工工艺升级改造措施。

执行情况 2: 执行专家意见。第 7.2 节已补充。

评审意见 3: 建议补充说明吊索更换施工工期计划。

执行情况 3: 执行专家意见。第 8.4 节已补充。

评审意见 4: 建议补充新增吊耳焊接施工工艺及验收标准要求。

执行情况 4: 执行专家意见。第 8.2.3 节已补充。

评审意见 5: 建议补充吊索更换后的相关验收标准及要求。

执行情况 5: 执行专家意见。第 7.6 节已补充。

重庆高速公路集团有限公司纪要

纪要〔2025〕31 号

重庆高速公路集团有限公司 关于中渝公司鱼嘴两江大桥缆索病害处治 施工图设计审查会的纪要

2025年3月5日，集团营运板块变更委员会在高速集团701会议室组织召开了中渝公司鱼嘴两江大桥缆索病害处治施工图设计审查会，与会人员审阅了相关施工图设计文件，充分听取了设计单位汇报，经讨论，形成一致意见，现纪要如下：

一、设计单位提交的的中渝公司鱼嘴两江大桥缆索病害处治施工图设计内容齐全，总体满足施工图设计要求，经修改完善报市交通局审查后可作为下一步施工工作指导依据。

图 3.3-2 施工图设计专家评审会议纪要

2025 年 4 月 3 日，重庆市交通运输委员会在 710 会议室组织召开了 2025 年鱼嘴两江大桥缆索病害（吊索更换和主缆维护）综合处治施工图设计的专家评审会。参会单位有重庆市交通运输委管养处、重庆市交通行政执法总队、重庆市交通工程造价站、重庆高速公路路网管理有限公司、重庆高速公路集团有限公司中渝营运分公司、浙江省交通规划设计研究院。与会专家审阅了施工图设计文件，听取了设计单位中交公路规划设计院有限公司的汇报，经讨论形成如下意见：

评审意见 1: 完善更换的新吊索设计相关资料；

二、设计文件修改意见

1. 建议补充说明最近一次桥梁定期检查、专项检查结论，补充说明吊索更换的原因。
2. 建议补充本次吊索更换设计与原桥梁吊索各性能参数的对比说明及吊索更换施工工艺升级改进措施。
3. 建议补充说明吊索更换施工工期计划。
4. 建议补充新增吊耳焊接施工工艺及验收标准要求。
5. 建议补充吊索更换后的相关验收标准及要求。

三、预算文件修改意见

1. 建议梳理设计工程量。一是构成实体的工程量，二是措施材料工程量、回收材料工程、措施台班等。如临时吊索工具吊杆的重量及材质。
2. 建议核实主要材料价格。部分材料单价无计价依据，目前单价采用直接输入，无单价来源，需补充完善。如新吊索材料价格、吊索（单点、三点、五点）张拉费用的支撑依据。
3. 建议正确套用并调整定额。根据吊索张拉方案和临时锚具的套数，正确计算张拉放松次数。
4. 建议修改细化交通组织方案，根据交通组织方式、工期等合理计算交通组织费用

执行情况 1: 执行专家意见。施工图设计说明第 7.2.1 节已补充。

评审意见 2: 细化换索过程结构监测要求；

执行情况 2: 执行专家意见。施工图设计说明第 9 节已调整监测点位数量。

评审意见 3: 补充处治工程质量验收要求；

执行情况 3: 执行专家意见。施工图设计说明第 10 节已补充相关内容。

评审意见 4: 完善超危大工程施工管理要求；

执行情况 4: 执行专家意见。施工图设计说明第 11 节已补充相关内容。

评审意见 5: 核实交通组织及措施费，噪声污染费单列；

执行情况 5: 执行专家意见。预算文件中已核实调整相关费用内容。

2025 年鱼嘴两江大桥缆索病害（吊索更换和主缆维护）

综合处治施工图设计专家评审意见

2025 年 4 月 3 日，重庆市交通运输委员会在 710 会议室组织召开了 2025 年鱼嘴两江大桥缆索病害（吊索更换和主缆维护）综合处治施工图设计的专家评审会。参会单位有重庆市交通运输委管养处、重庆市交通行政执法总队、重庆市交通工程造价站、重庆高速公路路网管理有限公司、重庆高速公路集团有限公司中渝营运分公司、浙江省交通规划设计研究院。与会专家审阅了施工图设计文件，听取了设计单位中交公路规划设计院有限公司的汇报，经讨论形成如下意见：

一、设计单位提供的设计文件内容较全面，设计深度达到施工图设计要求，修改完善后可用于指导施工。

二、建议

- （1）完善更换的新吊索设计相关资料；
- （2）细化换索过程结构监测要求；
- （3）补充处治工程质量验收要求；
- （4）完善超危大工程施工管理要求；
- （5）核实交通组织及措施费，噪声污染费单列。

专家组：

2025 年 4 月 3 日

图 3.3-3 施工图设计专家评审会意见

4. 吊索更换方案设计

4.1. 吊索更换整体思路

4.1.1. 吊杆更换常见方案

调研国内外多座大跨径悬索桥吊索更换工程案例及吊索更换相关理论研究文献资料，吊索更换目前采用比较多的是多吊点更换方案，利用临时吊索将旧索索力卸载至无应力状态拆卸并安装。更换吊索根据吊点张拉的数量，比较常用的有单吊点、三吊点和五吊点更换三种方案。

4.1.1.1. 单吊点更换

单吊点更换方案是依据吊点位置的临时吊索张拉来卸载待旧吊索的索力，待旧索索力完全卸载后将其拆除并更换新索。单吊点更换吊索主要是利用旧索所在吊点的备用换索孔，通过安装并张拉单吊点的临时吊索来完成旧索的拆除和新索的安装。由于该方法采用单个吊点临时索张拉卸载旧索索力，其临时吊索的张拉值相对较大。因此，常用于悬索桥跨中区域吊索的更换。保障行车安全，常见的做法是采用分级张拉临时吊索、分级卸载更换吊索的方式来实现吊索的拆除，一般张拉卸载分级次数可能达到十级。

采用单吊点更换吊索的换索效率较慢，要实现不中断交通的快速换索难度较大，且对近塔处的边吊索更换时，通过临时吊索卸载更换吊索索力的传力效率较低。

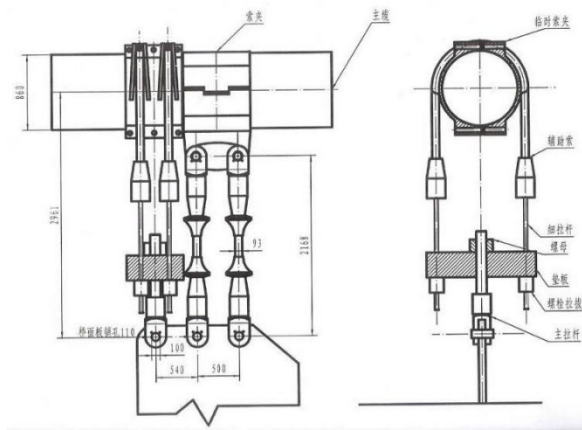


图 4.1-1 单吊点张拉方案示意

4.1.1.2. 三吊点更换

三吊点的换索思路与单吊点的换索基本相同，所不同的是采用三个吊点的临时索张拉来完成旧索的索力卸载，实现旧索的拆除和新索的安装。相较单吊点更换方式，由于三吊点利用了更换吊索临近两个吊点的临时吊索，因此单根临时吊索的张拉荷载值相对较小。该方法适用于主缆相对刚度较大，临时吊索传力效率较低的中长吊索的更换。

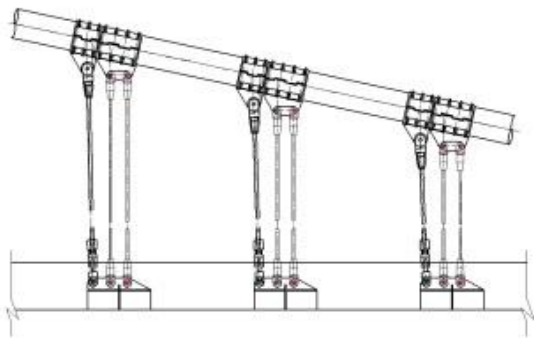


图 4.1-2 三吊点张拉方案示意图

4.1.1.3. 五吊点更换

五吊点更换吊索方案主要是依靠更换吊索临近两根吊点的临时吊索，通过同时张拉五个吊点的临时吊索，将待更换吊索的索力卸载掉，实现旧索的拆除和新索的安装。由于采用五个吊点张拉，单个吊点的临时吊索索力相较前两种方法更小，该法适用于临近主塔区域的吊索更换，该位置缆、梁相对刚度较大，张拉吊索较少时，单根临时吊索的张拉值可能较大。由于靠近主塔，对结构的扰动要求也更高，因此通过五吊点张拉减小单个吊点张拉对结构的扰动，由于每换一根吊索均需要同步张拉前后临近的两个吊点，其换索效率相对较低。

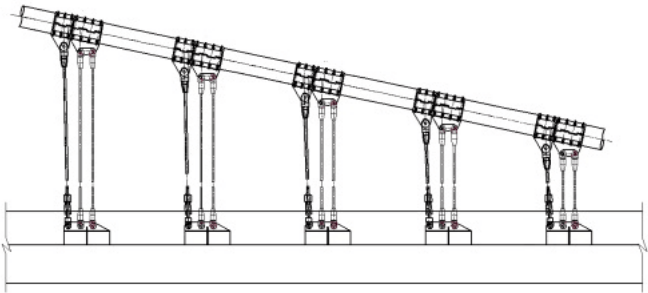


图 4.1-3 五吊点张拉方案示意图

4.1.2. 本次拟更换的吊索编号

鱼嘴两江大桥采用单跨吊悬索桥结构形式，全桥共计 50 个吊点，每个吊点为双吊索设计。查阅鱼嘴两江大桥养护资料，2024 年鱼嘴大桥对 60 根吊索采用三吊点方案进行了更换处治，涉及更换的吊索主要为跨中区域范围，本次吊索更换范围为剩下的 140 根吊索。

表 4.1-1 已更换吊索编号汇总表

吊索编号											
Y9-1	Y9-2	Y10-1	Y10-2	Y21-1	Y21-2	Y22-1	Y22-2	Y23-1	Y23-2	Y24-1	Y24-2
Y25-1	Y25-2	Y26-1	Y26-2	Y27-1	Y27-2	Y28-1	Y28-2	Y29-1	Y29-2	Y30-1	Y30-2
Y31-1	Y31-2	Y32-1	Y32-2	Y36-1	Y36-2	Y38-1	Y38-2	Y43-1	Y43-2	Z18-1	Z18-2
Z19-1	Z19-2	Z20-1	Z20-2	Z21-1	Z21-2	Z22-1	Z22-2	Z23-1	Z23-2	Z24-1	Z24-2
Z25-1	Z25-2	Z26-1	Z26-2	Z27-1	Z27-2	Z28-1	Z28-2	Z29-1	Z29-2	Z30-1	Z30-2

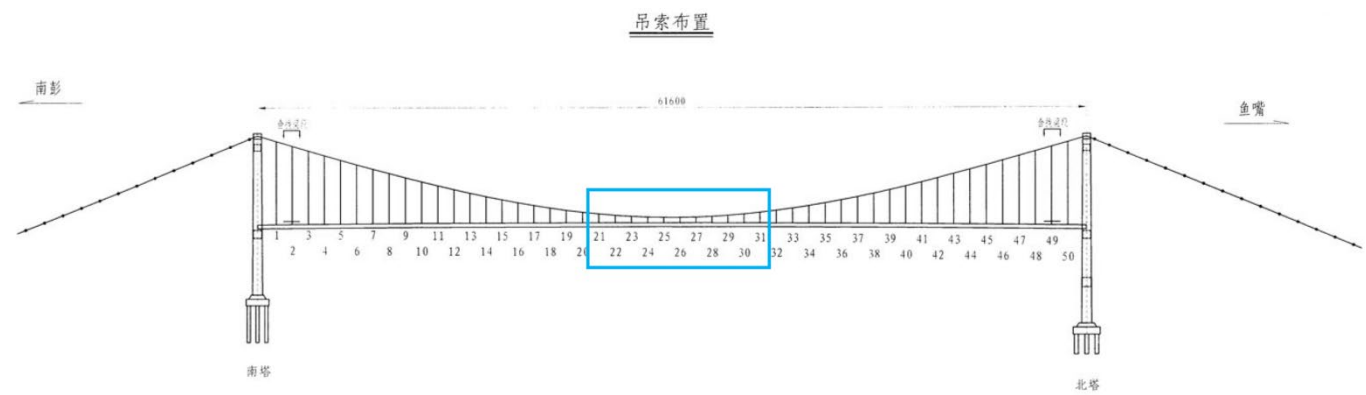


图 4.1-4 已更换吊索主要分布范围示意图

本次拟更换的剩下吊索如下表所示。

表 4.1-2 本次更换吊索编号汇总表

本次拟更换吊索编号										
右幅	1N	1S	2N	2S	3N	3S	4N	4S	5N	5S
	6N	6S	7N	7S	8N	8S	11N	11S	12N	12S
	13N	13S	14N	14S	15N	15S	16N	16S	17N	17S
	18N	18S	19N	19S	20N	20S	33N	33S	34N	34S
	35N	35S	37N	37S	39N	39S	40N	40S	41N	41S
	42N	42S	44N	44S	45N	45S	46N	46S	47N	47S
	48N	48S	49N	49S	50N	50S	/	/	/	/
左幅	1N	1S	2N	2S	3N	3S	4N	4S	5N	5S
	6N	6S	7N	7S	8N	8S	9N	9S	10N	10S
	11N	11S	12N	12S	13N	13S	14N	14S	15N	15S

	16S	16S	17N	17S	31N	31S	32N	32S	33N	33S
	34N	34S	35N	35S	36N	36S	37N	37S	38N	38S
	39N	39S	40N	40S	41N	41S	42N	42S	43N	43S
	44N	44S	45N	45S	46N	46S	47N	47S	48N	48S
	49N	49S	50N	50S	/	/	/	/	/	/

4.1.3. 吊索更换整体思路

目前较为常用的吊索更换方案为多吊点更换，考虑到鱼嘴大桥为单跨吊形式，其边吊索更换时多吊点没有支撑体系，更换方案难以采用多吊点方式。本次针对全桥剩下 140 根吊索的更换，按照吊索所在位置，考虑吊索更换的实际情况和技术可行性，将吊索分为如下三类分别进行更换方案设计。

- 1、第一类吊索：普通吊索，该类吊索对应的吊点编号为 9#-20#及 31#-42#；
- 2、第二类吊索：中长吊索，该类吊索对应吊点编号为 5#-8#、43#-46#；
- 3、第三类吊索：边吊索，该类吊索对应的编号为 1#-4#、47#-50#。

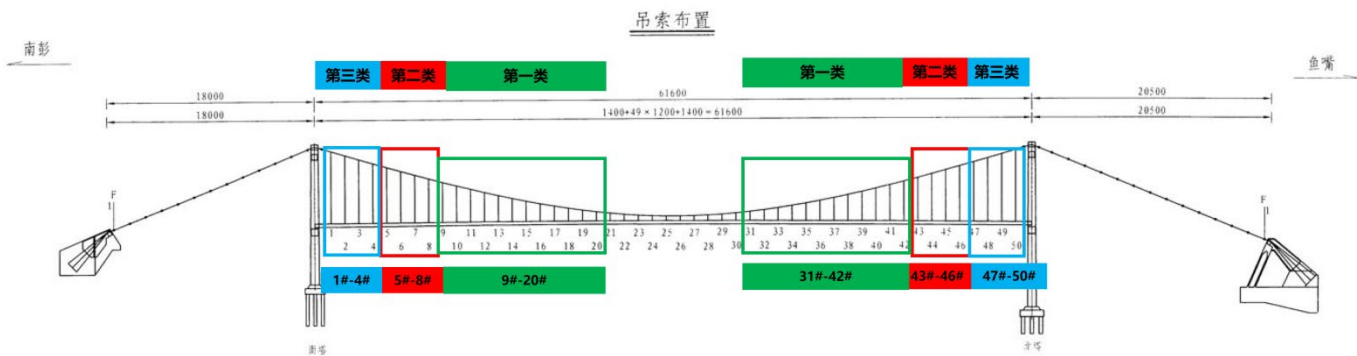


图 4.1-5 剩余未更换吊索类别分布示意图

本次针对普通吊索 9#-20#及 31#-42#吊索采用三吊点的进行更换；对于中长吊索更换，结合前期更换的 60 根吊索的实施情况，根据换索实施经验和有限元分析结果，为保障换索过程的安全可靠，本次单根临时吊索张拉力控制在 150t，通过计算，5#-8#、43#-46#吊索采用五吊点更换方案实施吊索的更换；边吊索的更换需要考虑换索过程对梁端约束装置的影响，本次采用无应力切割的方式对其进行更换，经过计算分析，此类吊索编号为 1#-4#、47#-50#。鱼嘴大桥剩余吊索更换方案汇总表如下。

表 4.1-3 鱼嘴大桥剩余吊索（140 根）更换方案汇总表

吊索类别	本次更换吊点编号	吊点数量（含左右幅）	更换方案
第三类	1	2	无应力切割
	2	2	无应力切割
	3	2	无应力切割
	4	2	无应力切割
第二类	5	2	五吊点更换
	6	2	五吊点更换
	7	2	五吊点更换
	8	2	五吊点更换
第一类	9	1（左幅）	三吊点更换
	10	1（左幅）	三吊点更换
	11	2	三吊点更换
	12	2	三吊点更换
	13	2	三吊点更换
	14	2	三吊点更换
	15	2	三吊点更换
	16	2	三吊点更换
	17	2	三吊点更换
	18	1（右幅）	三吊点更换
	19	1（右幅）	三吊点更换
	20	1（右幅）	三吊点更换
	31	1（左幅）	三吊点更换
	32	1（左幅）	三吊点更换
	33	2	三吊点更换
	34	2	三吊点更换
	35	2	三吊点更换
	36	1（左幅）	三吊点更换
	37	2	三吊点更换
	38	1（左幅）	三吊点更换
	39	2	三吊点更换
	40	2	三吊点更换
	41	2	三吊点更换
	42	2	三吊点更换
第二类	43	1（左幅）	五吊点更换
	44	2	五吊点更换
	45	2	五吊点更换
	46	2	五吊点更换
第三类	47	2	无应力切割
	48	2	无应力切割

	49	2	无应力切割
	50	2	无应力切割

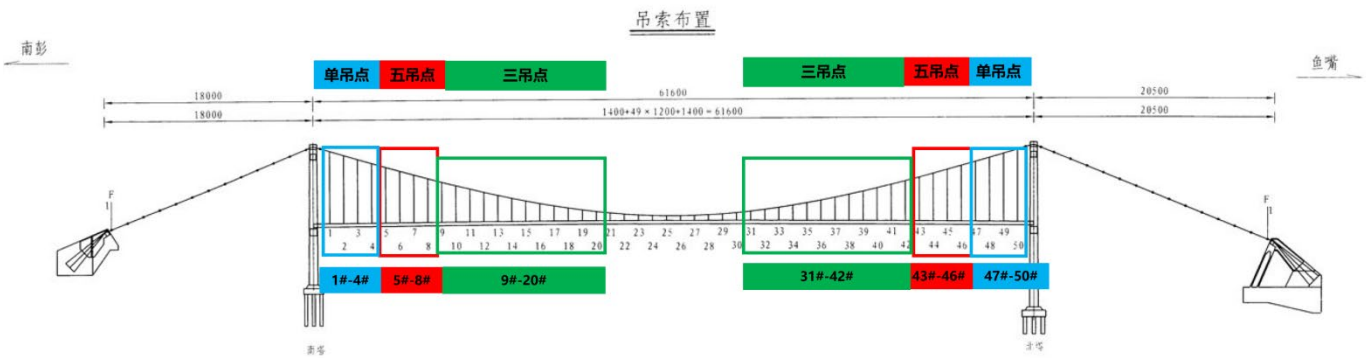


图 4.1-6 鱼嘴大桥剩余吊索更换方案分布图

4.1.3.1. 普通吊索（9#-20#及 31#-42#吊索）——第一类吊索

非近塔普通吊点的缆、两竖向刚度有一定程度的减小，采用常规的三吊点更换吊索可以将临时吊索张拉值控制在合理安全的范围内，针对此类吊索，本次采用三点法进行更换。

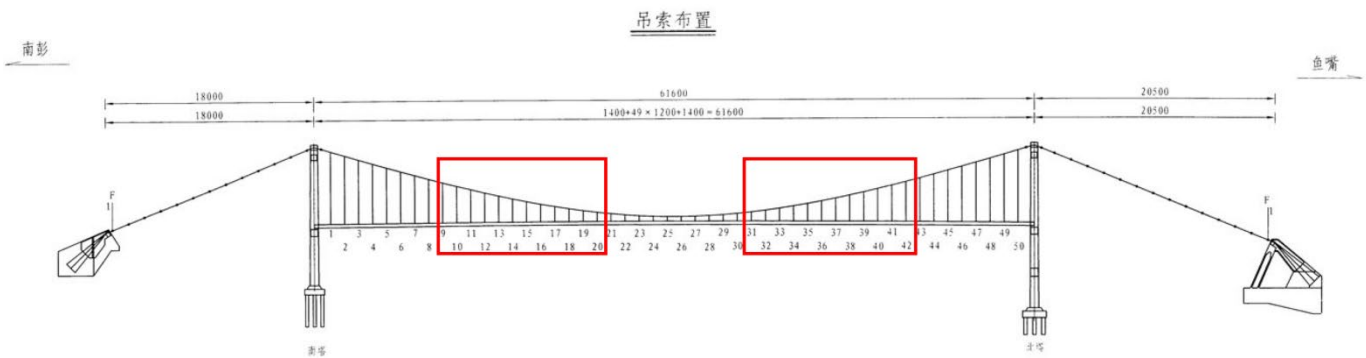


图 4.1-7 剩余未更换的普通吊索分布示意图（三吊点更换）

4.1.3.2. 中长吊索（5#-8#及 43#-46#吊索）——第二类吊索

针对普通中长吊索上下吊点的缆、梁竖向刚度较高，经计算，采用三吊点更换时，临时吊索张拉值较大，此类吊索更换采用五吊点法更换，即在待更换吊索前后相邻两个吊点安装张拉临时吊索，每次更换同步张拉五个吊点以实现待更换吊索索力的卸载及索体的拆除。

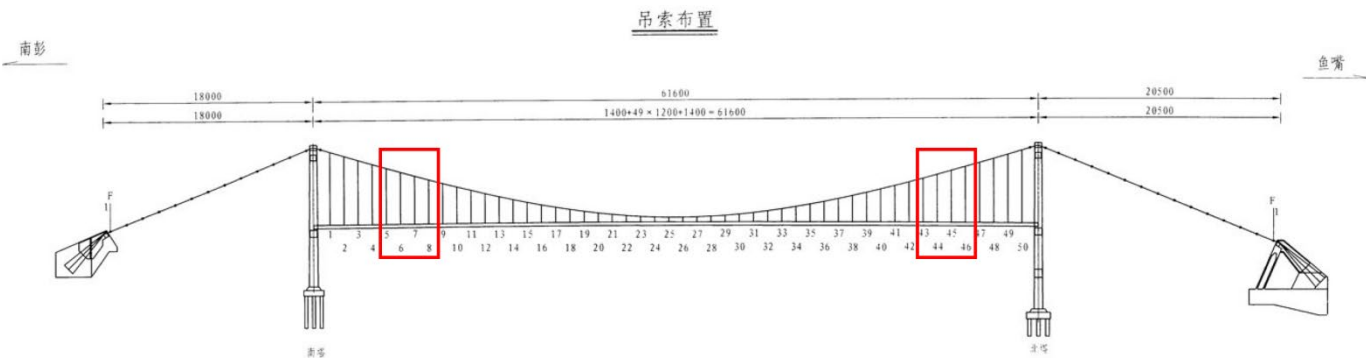


图 4.1-8 剩余未更换的非中长吊索分布示意图（五吊点更换）

4.1.3.3. 边吊索（1#-4#及 47#-50#吊索）—第三类吊索

近塔小范围内的缆、梁相对竖向刚度较大，采用临时吊索直接张拉方式换索时，临时吊索张拉力过大，对缆和梁的线形影响较大，同时对近塔位置的边界约束装置存在一定的风险。因此，近塔吊索无法采用常规的直接张拉临时吊索更换方案，结合鱼嘴大桥实际受力特性，通过计算分析，保守对近塔 1-4#吊点及 47-50#的吊点的吊索采用新增吊索孔的无应力切割方式进行更换。本报告后文所指的边吊索为 1#-4#吊点及 47#-50#吊点的吊索。

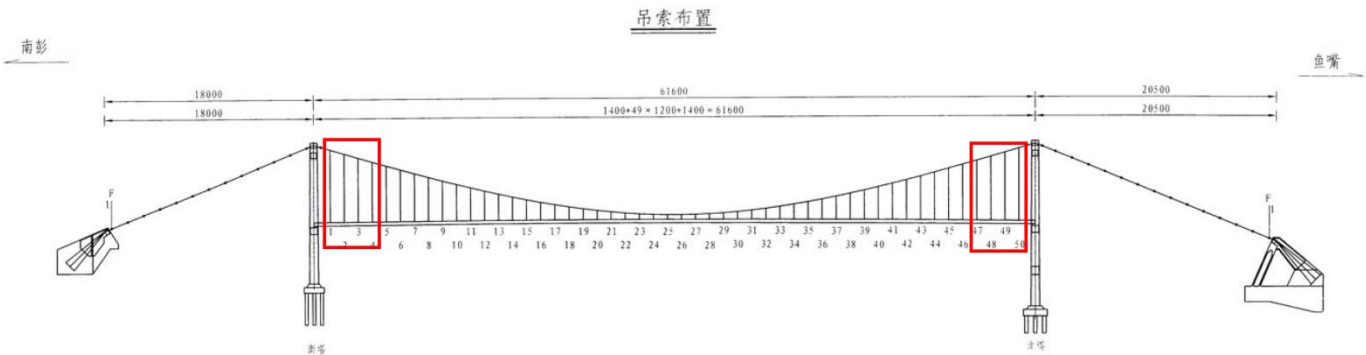


图 4.1-9 近塔吊索（单吊点无应力切割更换）

4.2. 普通吊索（第一类吊索）更换方案

调研国内多座大跨径悬索桥吊索更换典型案例，结合鱼嘴大桥前期换索工作成果，根据鱼嘴大桥实际结构特征和换索需求，本次拟对非近塔普通吊索采用常规的三吊点更换，通过安装待更换吊

点在内的临近前后两个吊点的临时吊索，每次更换吊索同步张拉三个吊点的临时索张拉来完成旧索的索力卸载，实现旧索的拆除和新索的安装。相较单吊点更换方式，由于三吊点利用了更换吊索临近两个吊点的临时吊索，因此单根临时吊索的张拉荷载值相对较小。

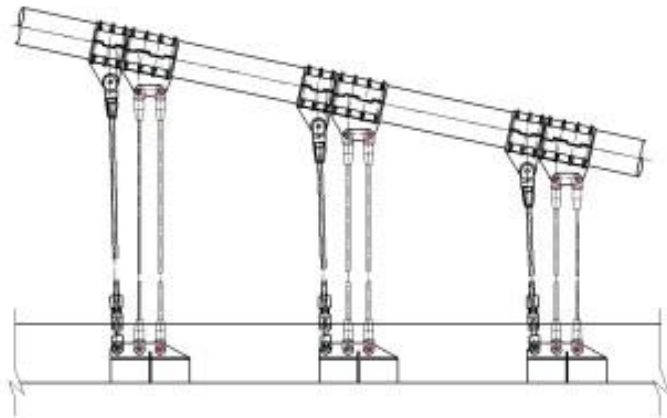


图 4.2-1 普通吊索的三吊点张拉方案示意图

本次采用三吊点更换的吊索主要为全桥剩余的非近塔区域的中长吊索，三吊点更换方案吊索分布如下图所示。

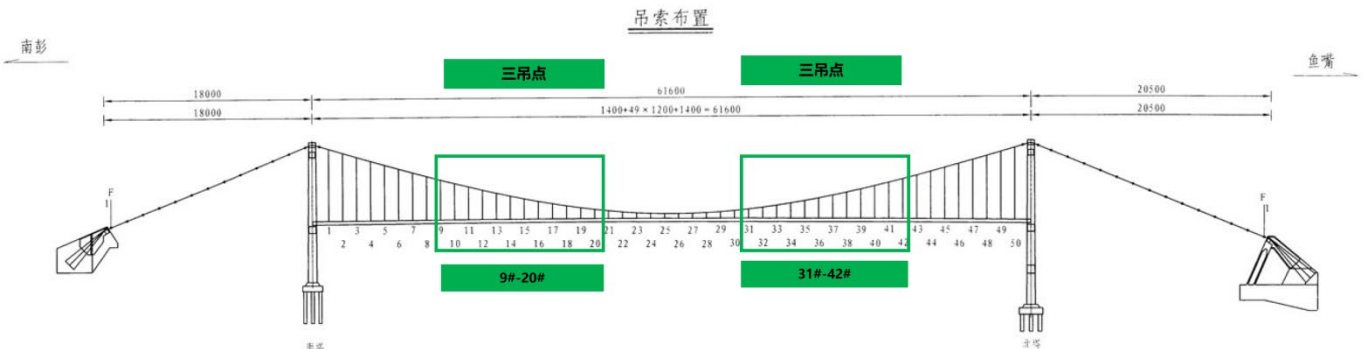


图 4.2-2 三吊点更换方案吊索分布图

4.2.1. 三吊点换索整体计算

从悬索桥受力特性来看，距离主塔越近，主缆和加劲梁竖向刚度相对越大，临时吊索卸载旧索索力的效率越低。沿纵向靠近跨中区域主缆与加劲梁竖向刚度逐渐减小，临时吊索的卸载效率同步提高。，本次针对普通吊索（9#-20#及 31#-42#吊索）采用三吊点更换。理论上 9#（或 42#）吊点更换时临时索的张拉力最大。因此，本节建立 9#吊索三吊点更换有限元对该方案的整体可行性进行分析验证。

4.2.1.1. 有限元模型

整体有限元模型的材料参数、几何特性及边界条件均与上文相同，对 9#吊点吊索更换时，分别对 8#、9#及 10#临时索进行张拉。鱼嘴大桥吊索锚拉板采用单备用孔设计形式，每个吊索仅能张拉一根临时吊索。有限元模型中按照结构实际形式布置临时吊索并张拉。

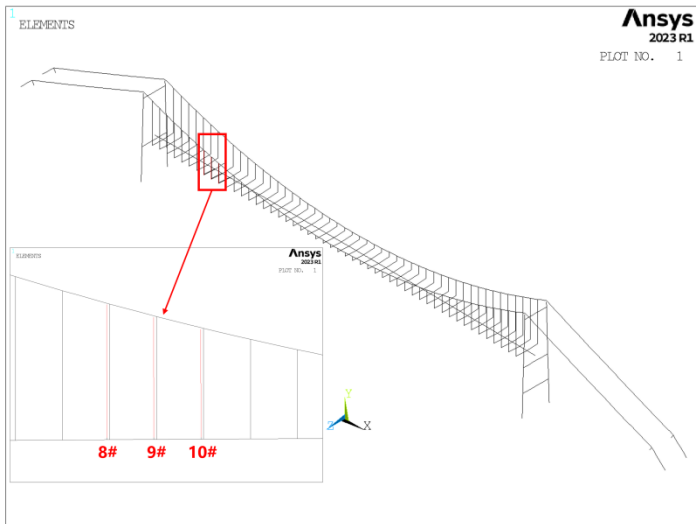


图 4.2-3 9#吊索三吊点更换有限元计算模型

采用三吊点施工需要临时封闭吊索更换侧的两个行车道，以保障换索施工操作空间，有限元模型中活载按照换索期间的 4 车道布载，考虑到悬索桥的几何非线性特性，按照吊索索力影响线分布以最不利布载形式施加车道荷载后计算恒载与最不利活载索力。

有限元模型采用如下三个典型施工阶段。

- 1) 成桥恒载阶段
- 2) 最不利活载状态
- 3) 安装并张拉三根临时吊索

主要分析指标为临时索张拉前后主缆、加劲梁及吊索内力及位移等宏观力学指标。

4.2.1.2. 分析结果

1、缆梁相对竖向位移

根据计算结果可知，张拉临时吊索完全卸载 9#吊点吊索索力后，主缆竖向位移变化最大值为-75mm（向下），位于 9#吊点处；加劲梁最大竖向位移为 4mm（向上），位于 9#吊点位置。采用三吊

点更换 9#吊索时，缆、梁相对竖向位移变化最大值为 79mm（缆、梁相对距离减小）。

2、加劲梁梁端转角

9#吊索是距离梁端最近的非近塔普通吊索，采用三吊点更换时临时吊索张拉值较大，从计算分析结果来看，张拉临时索完全卸载 9#吊点索力后，梁端转角变化量为 0.0022°，9#吊索采用三吊点更换对梁端位移影响较小。

3、临时吊索张拉值

三吊点的核心思路是通过张拉待更换吊点临近前后各一根临时吊索来完全卸载旧索索力，通过计算，9#吊索采用三吊点更换时，临时吊索最大张拉值为 1486.4 kN，位于 8#吊点临时索。

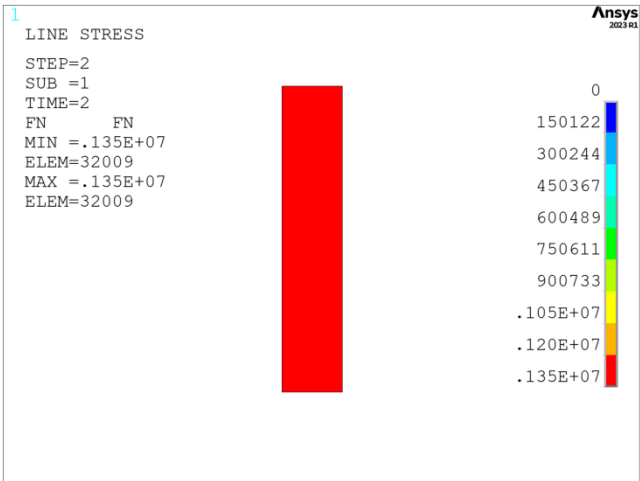


图 4.2-4 初始状态待更换吊索索力（单位：N）

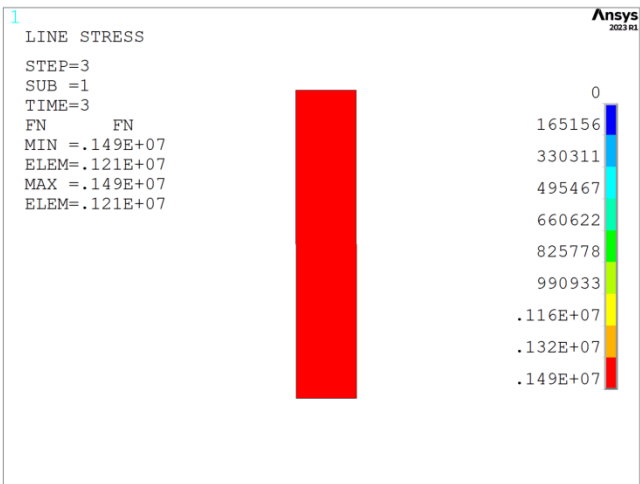


图 4.2-5 临时吊索张拉后 9#吊点临时吊索索力（单位：N）



图 4.2-6 临时吊索张拉后待更换吊索索力为无应力状态

从上述临时吊索张拉值可以看出，采用三点法对 9#吊索更换时，8#、9#及 10#吊点临时吊索索力均在 1500KN 以内。根据分析表明，随着吊索逐渐远离主塔，临时吊索对旧索索力的卸载效率逐步提高，靠近跨中范围的吊索采用三点法更换时，临时吊索张拉值较 9#吊索更换时更小，均能保证临时吊索的张拉值在可控范围内。

4、换索过程关键受力参数变化情况

综上所述，对 9#吊索采用三吊点更换时，换索前后各个关键力学参数的变化情况如下表所示。

表 4.2-1 9#吊点吊索更换过程关键参数变化汇总表

考察关键参数		换索典型施工步	
		成桥状态（含活载）	张拉临时吊索
同一吊点两根吊索索力之和（KN）	8#吊点吊索索力	1349.1	187.1
	9#吊点吊索索力	1351.1	0
	10#吊点吊索索力	1348.3	166.1
缆、梁相对竖向位移（m）	8#吊点主缆位移	-0.388	-0.457
	8#吊点加劲梁位移	-0.398	-0.394
	9#吊点主缆位移	-0.421	-0.496
	9#吊点加劲梁位移	-0.431	-0.427
	10#吊点主缆位移	-0.450	-0.512
	10#吊点加劲梁位移	-0.458	-0.455
梁端转角（°）	加劲梁梁端转角	-0.2854	-0.2875
临时吊索张拉值	8#吊点临时索索力	0.0	1486.4
	9#吊点临时索索力	0.0	1485.0
	10#吊点临时索索力	0.0	1476.6

根据上述整体计算结果，结合三吊点更换吊索的工程实践经验及鱼嘴大桥前期吊索更换的工作

成果，鱼嘴大桥非近塔区域的普通吊索采用三吊点方案更换整体上是可行的。

4.2.2. 换索局部强度验算

在上述五吊点更换方案整体分析的基础上，对换索过程中最不利受力状态下的板件强度进行验算。从整体分析结果可知，9#吊索五吊点更换时临时吊索最大张拉值为 1486.4 KN。建立标准梁段局部有限元模型，吊耳孔张拉荷载取值 1500 KN，张拉荷载施加示意图如下。

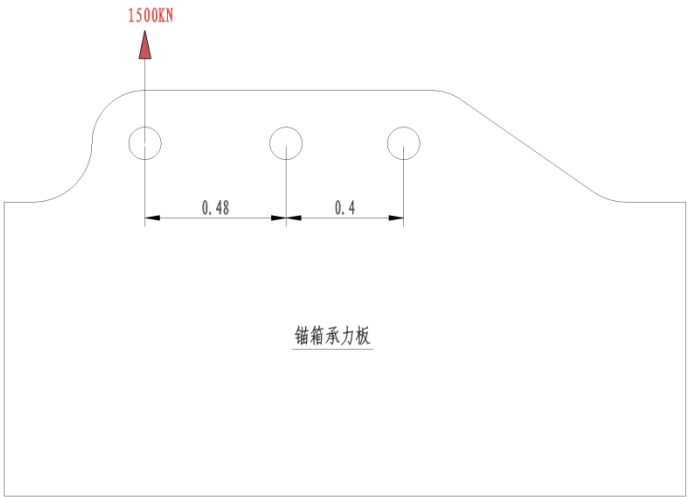


图 4.2-7 单个吊点最不利张拉荷载施加示意图

在最大临时吊索张拉荷载作用下各板件的变形和应力分布如下图所示。

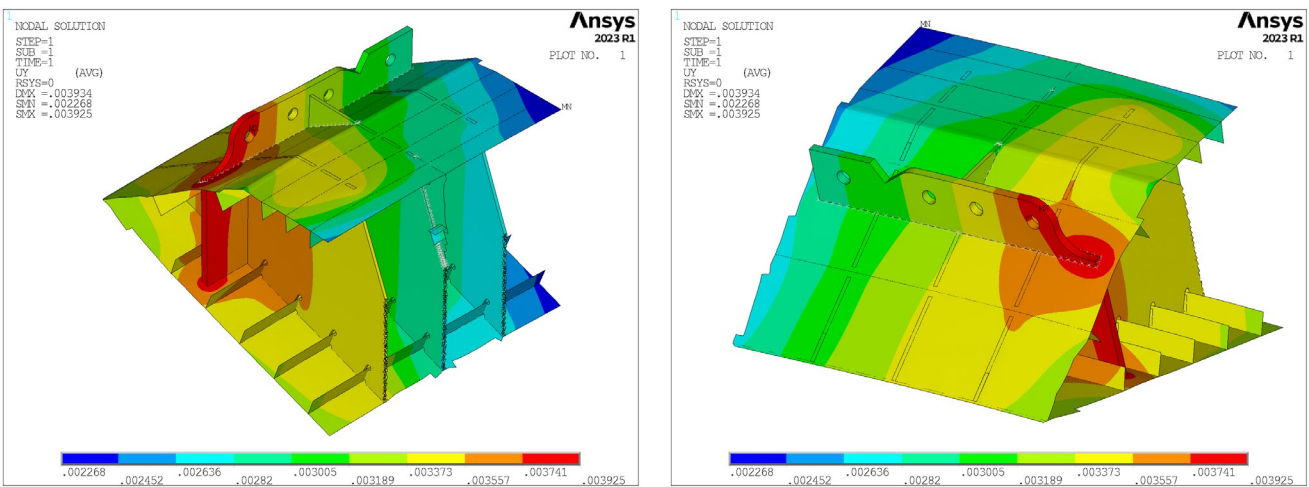


图 4.2-8 9#吊索更换时板件变形（单位：m）

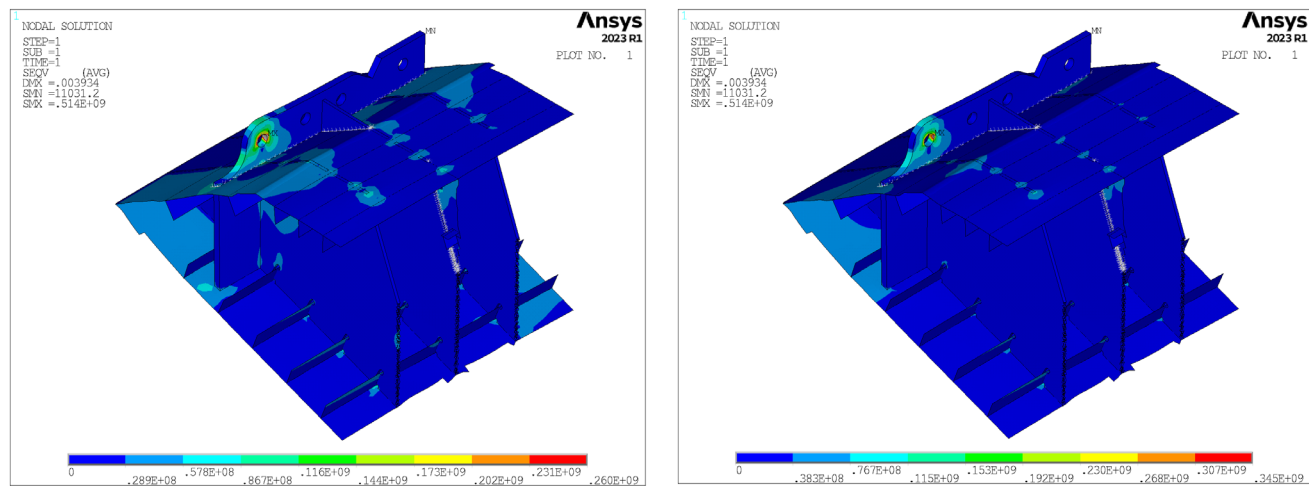


图 4.2-9 9#吊索更换时板件 MISES 应力分布（单位：Pa）

从计算结果可知，在最大临时吊索张拉荷载作用下，吊索加劲梁各板件除吊索孔附近存在局部应力集中外，其他区域 MISES 应力基本都在 125MPa 以内，最大变形 3.9mm，从板件的局部变形和应力状态，9#吊点采用上述的三吊点更换方案，各板件强度能够满足规范要求（260 MPa），锚拉板的最大应力均在 345 MPa 以内。

本节分别从整体和局部两方面，分析了三吊点方案更换 9#吊索的可行性，以换索过程的宏观力学参数变化情况和局部板件的强度验证了普通吊索采用三吊点更换方案是可行的，9#吊索更换过程中，对梁端边界构造影响较小，临时吊索张拉值最大为 1486.4 kN，旧索卸载至无应力状态时各板件均能满足强度要求。采用三点法更换 9#吊索是可行的。

从主缆、加劲梁竖向刚度的纵向变化特性，其他远离主塔区域的第一类吊索（10#-20#及 31#-41#）采用三吊点更换时，临时吊索张拉荷载较 9#吊索更换偏小。临时吊索最大张拉荷载下，加劲梁锚拉板强度满足安全要求。因此，从换索受力、板件强度等方面可知，采用三吊点对第一类吊索（9#-20#及 31#-42#）进行更换是可行的。

4.3. 中长吊索（第二类）更换方案

中长吊索 5#-8#及 43#-46#靠近梁端，且缆、梁竖向刚度较大，为了尽量降低换索对原结构的扰动，结合鱼嘴大桥结构形式，本次拟对 5#-8#及 43#-46#中长吊索采用五点法进行更换。即更换 5#-8#及 43#-46#吊索时，分别在吊索前后相邻两个吊点位置张拉临时吊索。

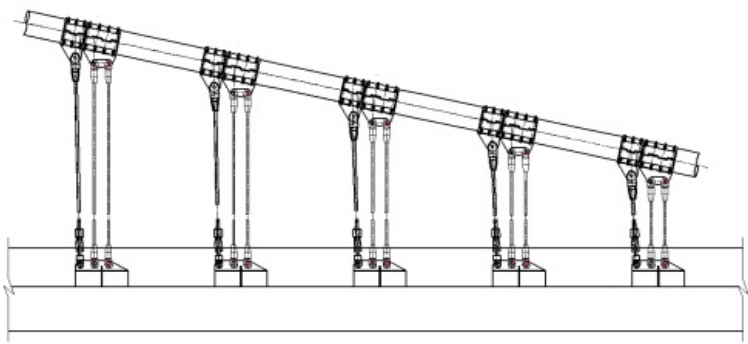


图 4.3-1 五吊点张拉方案示意图

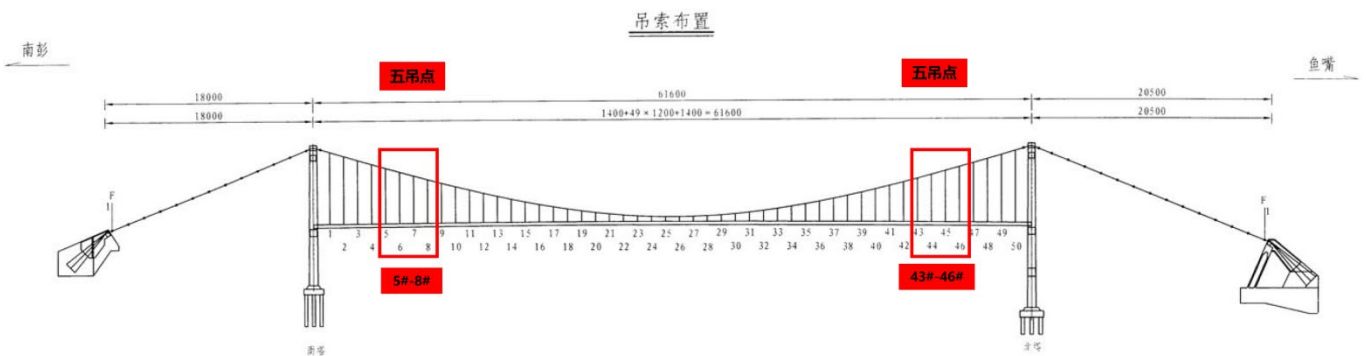


图 4.3-2 中长吊索五吊点更换方案吊索分布图

4.3.1. 五吊点换索整体计算

五点法更换吊索相对三点法更换，其主要优势是降低了换索过程对结构的扰动，结合鱼嘴大桥前期换索经验和现场实施情况，本次采用五点法更换时控制单个临时吊索张拉值在 150t 以内，以保障现场换索实施的安全。

4.3.1.1. 有限元模型

建立整体有限元分析模型，分别在 3#、4#、5#、6#及 7#吊点位置张拉临时吊索。材料属性、边界及荷载与上节三吊点中的保持一致。

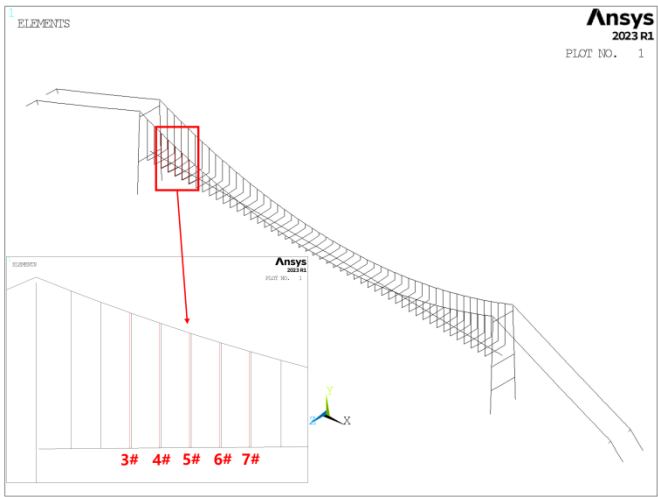


图 4.3-3 五点法更换 5#吊索有限元模型

有限元分析模型采用如下三个典型施工阶段。

- 1) 成桥恒载阶段
- 2) 最不利活载状态
- 3) 安装并张拉三根临时吊索

主要分析对象为临时索张拉前后主缆、加劲梁及吊索内力及位移等宏观力学指标。

4.3.1.2. 分析结果

1、缆梁相对竖向位移

根据计算结果可知，张拉临时吊索完全卸载 5#吊点吊索索力后，主缆竖向位移变化最大值为-95mm（向下），位于 4#吊点处；加劲梁最大竖向位移为 13mm（向上），位于 4#吊点位置。采用五吊点更换 5#吊索时，缆、梁相对竖向位移变化最大值为 95mm（缆、梁相对距离减小）。

2、加劲梁梁段转角

5#吊索是距离梁端最近的第二类长吊索，采用五吊点更换时临时吊索张拉值较大，从计算分析结果来看，张拉临时索完全卸载 5#吊点索力后，梁端转角变化量为 0.015°，5#吊索采用五吊点更换对梁端位移影响较小。

3、临时吊索张拉值

五吊点的核心思路是通过张拉待更换吊点临近前后各两根临时吊索来完全卸载旧索索力，通过计算，5#吊索采用五吊点更换时，临时吊索最大张拉值为 1376.3 KN，位于 5#吊点临时索。

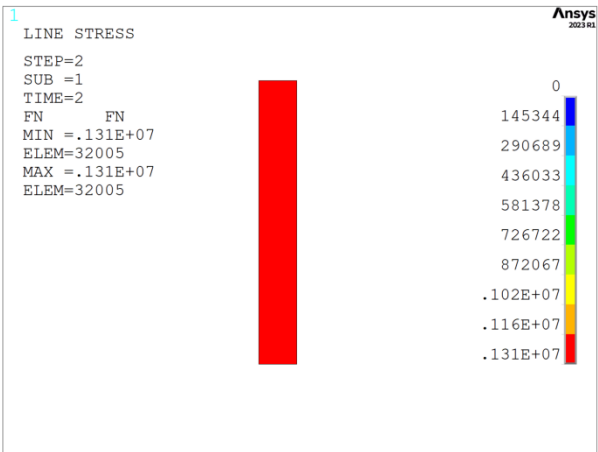


图 4.3-4 初始状态待更换吊索索力（单位：N）

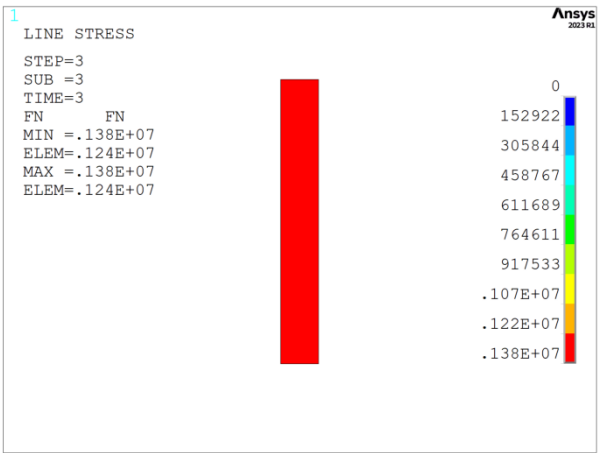


图 4.3-5 临时吊索张拉后 5#吊点临时吊索索力（单位：N）



图 4.3-6 临时吊索张拉后待更换吊索索力为无应力状态

4、换索过程关键受力参数变化情况

综上所述，对 5#吊索采用五吊点更换时，换索前后各个关键力学参数的变化情况如下表所示。

表 4.3-1 5#吊点吊索更换过程关键参数变化汇总表

序号	考察关键参数		换索典型施工步	
			成桥状态（含活载）	张拉临时吊索
1	同一吊点两根吊索索力之和（KN）	3#吊点吊索索力	1314.4	326.1
2		4#吊点吊索索力	1312.6	78.6
3		5#吊点吊索索力	1308.1	0.0
4		6#吊点吊索索力	1311.7	41.8
5		7#吊点吊索索力	1306.1	265.3
6	缆、梁相对竖向位移（m）	3#吊点主缆位移	-0.106	-0.187
7		3#吊点加劲梁位移	-0.119	-0.107
8		4#吊点主缆位移	-0.142	-0.237
9		4#吊点加劲梁位移	-0.154	-0.141
10		5#吊点主缆位移	-0.177	-0.271
11		5#吊点加劲梁位移	-0.188	-0.175
12		6#吊点主缆位移	-0.210	-0.294
13		6#吊点加劲梁位移	-0.220	-0.208
14		7#吊点主缆位移	-0.241	-0.307
15		7#吊点加劲梁位移	-0.251	-0.241
16	梁端转角（°）	加劲梁梁端转角	-0.1994	-0.1842
17	临时吊索张拉值	3#吊点临时索索力	0.0	1321.1
18		4#吊点临时索索力	0.0	1341.5
19		5#吊点临时索索力	0.0	1376.3
20		6#吊点临时索索力	0.0	1338.8

21		7#吊点临时索索力	0.0	1316.5
----	--	-----------	-----	--------

根据上述分析结果可知，采用五吊点对 5#吊索进行更换是可行的，换索过程对梁端边界构造及临时拉索张拉值都是在可控范围内的，结合上文对第一类吊索进行的板件局部分析结果，五吊点临时吊索张拉荷载均在 1500 KN 以内，板件的强度满足换索安全需求，此处不再赘述。

本节对 5#吊点采用五点法换索方案进行了分析计算，结算结果表明五点法可以满足 5#吊点换索需求。从悬索桥受力特性和刚度分布情况来看，6#-8#及 44#-46#吊索采用五点法更换时临时吊索张拉值及对原结构的扰动较 5#吊索更换时偏小。因此，采用五点法更换第二类吊索（5#-8#及 43#-46#）是可行的。

4.4. 边吊索（第三类）更换方案

4.4.1. 近塔吊索更换重难点

鱼嘴两江大桥为单跨吊筒支悬索桥，近塔侧设置行程 600mm 的伸缩缝与引桥连接，梁端设置竖向支座与横向抗风支座。针对近塔侧吊索的更换必须考虑近塔边界构造对吊索更换的影响，普通吊索更换一般采用多吊点反力装置的方式进行，通过张拉临时索索力至原吊索索力值来卸载原吊索内力，从而拆除原吊索。近塔侧长吊索更换需要保障主塔约束装置不受较大的影响，同时在吊索更换期间不中断交通，需要减小吊索更换整个过程中对梁端约束装置的扰动。据此分析，本部分的重难点主要有以下几方面：

- 1、换索过程应减小对边界约束装置的影响；
- 2、更换时加劲梁及主缆的变形控制；
- 3、边吊索更换难以采用多吊点方案；
- 4、大桥交通压力大，吊索更换施工无法进行交通封闭，增大了吊索更换难度；
- 5、为保证吊索更换前后桥梁结构受力基本保持不变，更换后新索的索力及无应力长度控制；
- 6、大桥前期已应急更换发过一批吊索（60 根），考虑到大桥实际需求，本次待更换的 140 根吊索施工工期紧张，对换索效率要求高。

由于换索过程中不中断交通，为保障换索期间的各构件安全可靠，边吊索更换需要更大的安全储备，更细致的换索方案，更完善的应急预案。基于上述难点，在调研分析、梳理总结常规换索方

案的基础上，边吊索谨慎选择了吊索更换方法、合理制定了近塔吊索更换施工方案。

4.4.2. 换索方案概述

对于近塔吊索的特殊性，结合鱼嘴两江大桥的实际特征，本次对近塔吊索采用双吊耳孔的无应力切割方式进行。该换索方案对缆、梁的扰动较小，可实现不中断交通更换边吊索的同时还能提高换索效率，一次更换一个吊点的两根吊索。

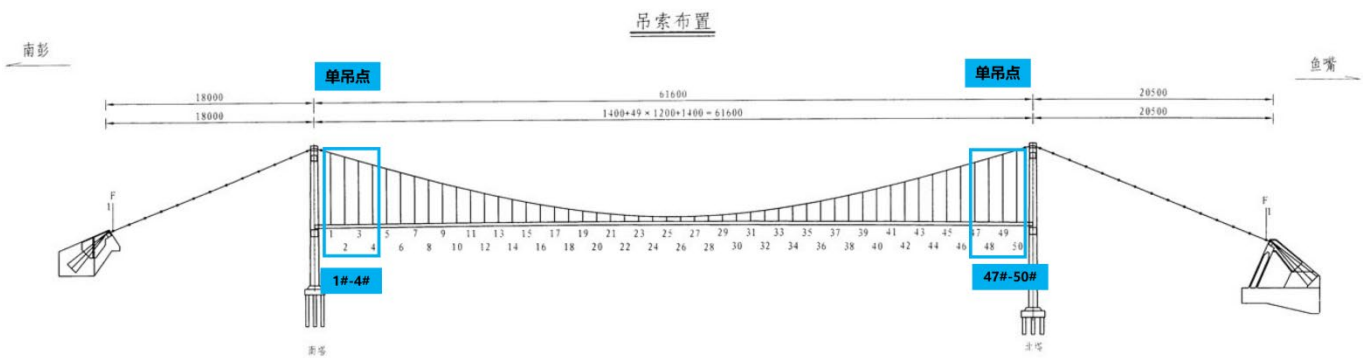


图 4.4-1 无应力切割更换吊索分布示意图

1、换索步骤

针对鱼嘴大桥近塔吊索实际情况，考虑换索过程中对边界约束装置和加劲梁的影响，采用双吊耳和两套独立的张拉设备对旧索进行拆除和安装新索，整体的换索主要步骤如下。

- (1) 按照图纸要求增加新的吊耳孔，与原备用吊耳孔组成双吊耳孔；
- (2) 在对应主缆位置安装临时索夹；
- (3) 在旧索索体下部安装临时拉索张拉反力架装置，安装并张拉临时吊索至计算值；
- (4) 在旧索索体中部安装临时拉杆装置；
- (5) 张拉索体中部临时拉杆至计算值，卸载临时拉杆间旧索索体至无应力状态；
- (6) 采用专用设备同时切割两根旧索，将旧索索力转移至临时拉杆及临时吊索上；
- (7) 控制临时拉杆装置上的千斤顶行程，放张临时拉杆，卸载旧索下端及上端索体索力至无应力状态；
- (8) 采用专用拆卸设备，分别拆除旧索下端和上端销轴，完全拆卸旧索；
- (9) 采用吊机等设备将新索上端叉耳与索夹对齐，完成新索上端安装。在新索下端与临时索张拉反力梁间安装千斤顶；

- (10) 利用临时索张拉反力梁设备张拉顶推新索下锚杯至耳板，安装销轴，完成新索的安装；
- (11) 拆除临时索及张拉设备，完成整个吊索的更换。

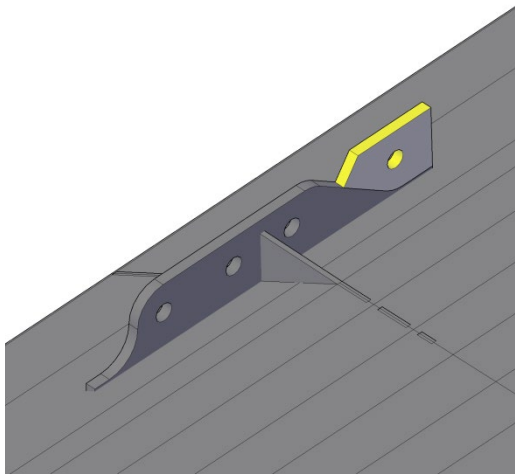


图 4.4-2 新增临时吊索吊耳孔

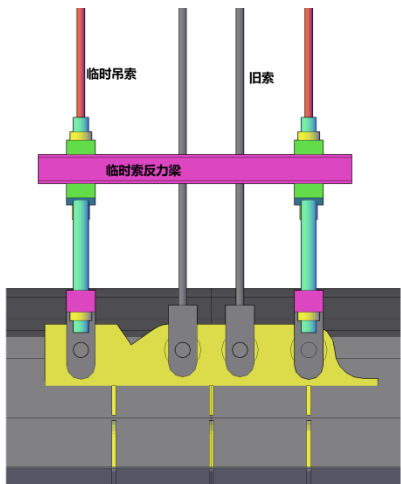


图 4.4-3 安装临时索及反力装置

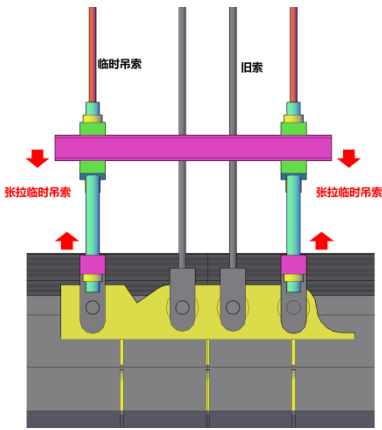


图 4.4-4 张拉临时索至计算值

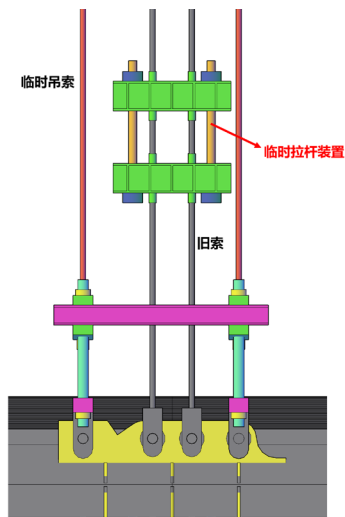


图 4.4-5 旧索安装临时拉杆

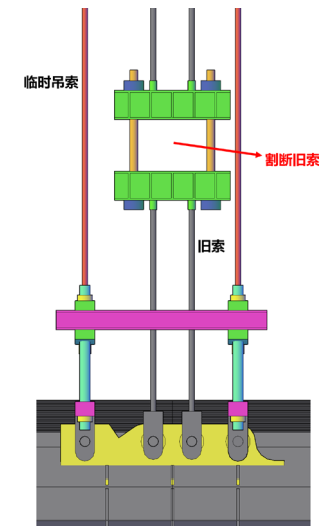


图 4.4-6 采用切割工具割断旧索

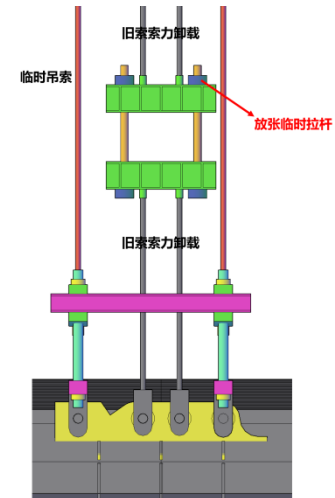


图 4.4-7 缓慢放张临时拉杆，卸载旧索全部索力

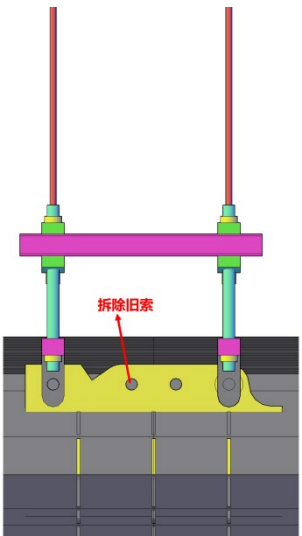


图 4.4-8 拆除旧索

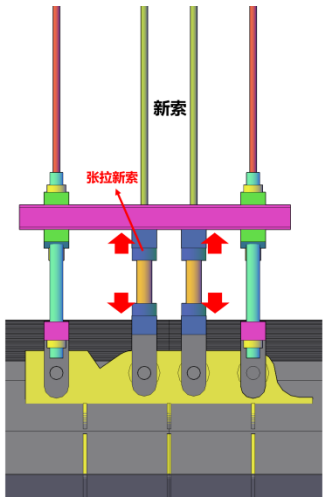


图 4.4-9 挂新索并在下锚头张拉新索至耳孔位置安装销轴

本方案换索流程如下图所示。

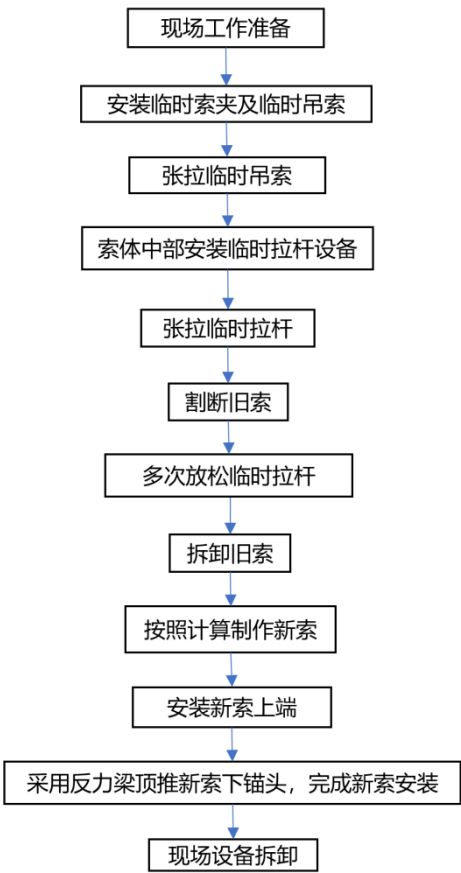


图 4.4-10 换索主要流程示意图

2、构造形式

查阅原桥设计图纸，在永久吊耳孔一侧设计了一个用于更换吊索的备用吊耳孔，为提高换索过程可靠性和换索效率。本方案拟借助原锚箱耳板，采用新增吊耳孔实现双孔更换边吊索。原耳板一侧为三角斜坡弧形构造，拟在该位置采用新增锚箱耳板的构造实现新增吊耳孔，新孔与原吊耳孔保持竖向同高，新孔纵桥向间距优先满足开孔的构造和板件的强度要求。新增锚箱耳板与原耳板采用对接焊缝连接，新增吊耳孔构造及与原耳板的连接如下图所示。

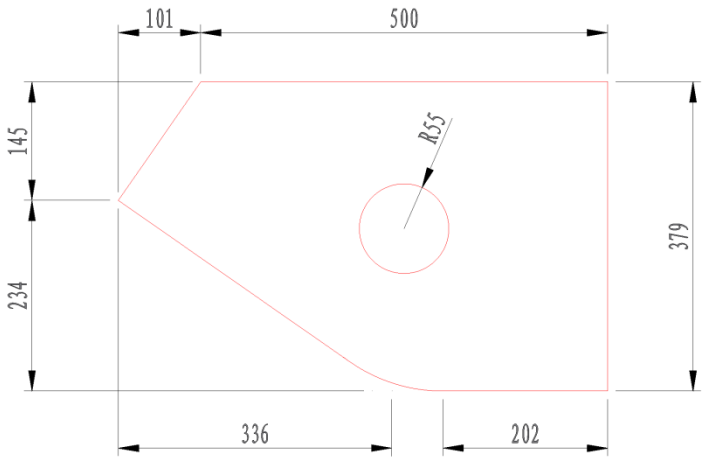


图 4.4-11 新增吊耳构造板件尺寸（单位：mm）

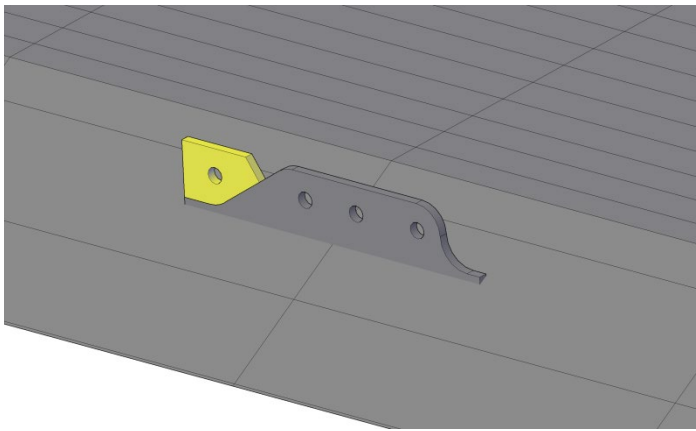


图 4.4-12 新增抗拉板与原吊板件连接示意图

4.4.3. 方案可行性分析

鱼嘴大桥交通量较大，吊杆更换期间中断交通对社会影响大，换索成本较高。本方案主要从鱼嘴两江大桥实际情况出发，通过换索工程的模拟，对鱼嘴大桥吊杆更换进行整体和局部计算来分析吊杆更换方案的可行性和安全性。主要分析近塔长吊杆更换过程对原结构的影响（如梁段支座、伸缩缝等）、更换方案中相关构件是否满足换索安全要求等。

4.4.3.1. 换索整体计算

4.4.3.1.1. 计算思路

根据近塔吊索的实际情况，需要考虑换索过程对边界约束装置的影响，在满足换索过程安全可

靠的前提下，还需保障换索期间对主塔位置的伸缩缝和支座不受损伤，避免换索引起的结构性安全风险。根据上述换索方案，在临时索张拉时需要考虑加劲梁的位移和竖向支座的受力状态，由于悬索桥结构的高度非线性特性，加劲梁的位移不仅仅由自身刚度决定，还受主缆的影响。因此，需要根据计算来确定临时索的张拉值，该张拉值的上限对应换索过程中支座处于拉压临界值，伸缩缝不发生竖向错动，还需保证临时索吊耳孔的强度必须满足安全要求。

近塔 1#吊索上下吊点对应的缆、梁刚度相对最大，且端梁段的长度较长，为分析吊索更换过程典型宏观受力参数的变化情况，选取典型吊索编号 1#吊点进行分析计算，其他非 1#吊点的近塔吊索（2-4#吊点及 47-50#吊点）可行性分析与 1#吊点相似，本部分不再赘述，相关换索参数参见本报告附录。

悬索桥作为高度几何非线性的一种大跨径柔性桥型，从受力角度来看，边吊索更换时通过张拉临时吊索来卸载旧索索力效率相对较低。因此，上述采用了在旧索索体上安装临时张拉装置，张拉临时索后，利用旧索上的临时张拉装置对旧索进行二次张拉，二次张拉直接作用于旧索索体本身，传力路径更为高效。本方案为无应力切割旧索，采用两个张拉装置和工装设计可以有效保障拆索过程的安全高效。为确保方案安全性，采用如下分析路线对换索可行性进行了详细的分析计算。

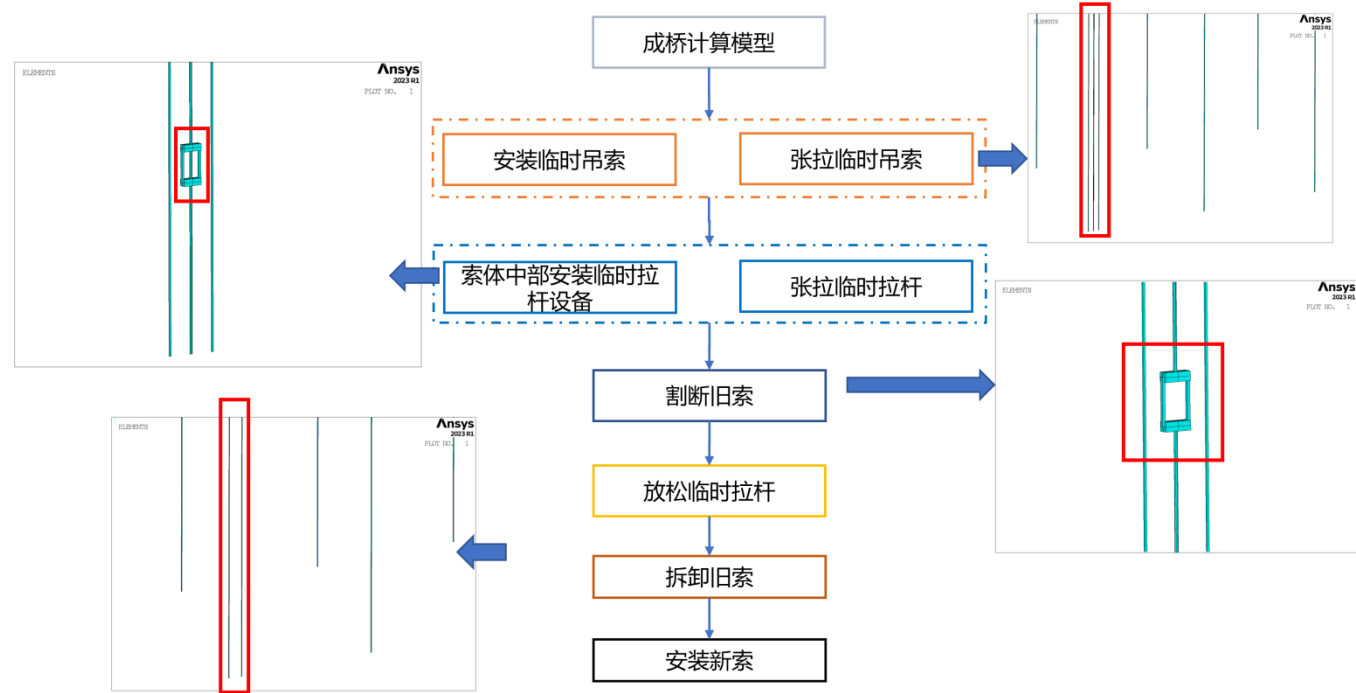


图 4.4-13 换索施工分析技术路线

4.4.3.1.2. 整体有限元模型

1、计算方法

通过对大型通用有限元计算程序 ANSYS 的二次开发，利用其优秀的前后处理及求解平台，完成大跨度悬索桥在 ANSYS 中的精细分析，同时完成线形及内力的求解。在针对非线性活载的计算问题上，本次计算参考了唐茂林博士的论文《大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发》，采用了相同的计算原理建立鱼嘴大桥单吊索鱼骨梁整体模型。如图所示为本次计算结构离散图，主梁及索塔采用 beam188 单元，吊杆采用 link10 只受拉单元，主缆采用 link10 单元，通过加密单元划分模拟其索的特性。

恒载的求解过程总体上是缆索迭代找形过程，通过找形分析，使得成桥状态全桥几何状态与设计状态一致，主要是：缆跨、矢高、吊杆竖直、主梁线形等。

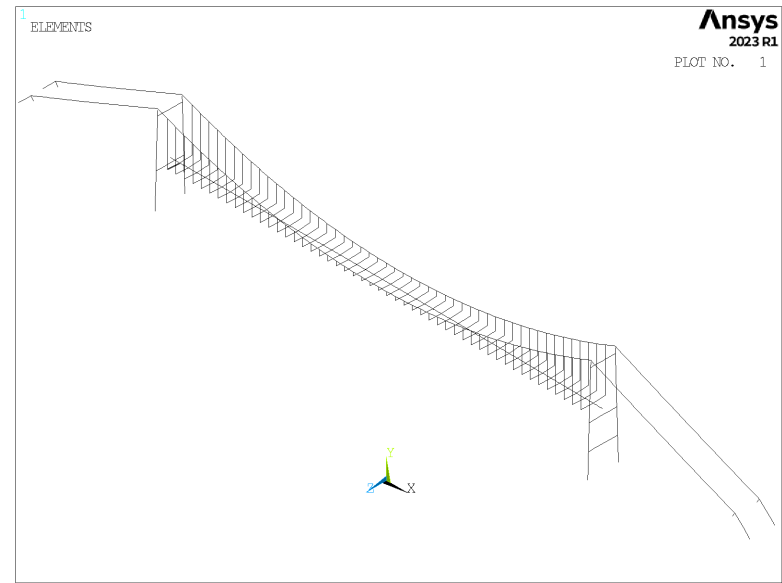


图 4.4-14 鱼嘴两江大桥吊索更换整体有限元模型

2、材料参数

按照鱼嘴大桥设计资料，各构件材料特性根据规范或者研究文献进行取值，见下表。

表 4.4-1 结构材料参数表

材料	弹性模量 (KPA)	剪切模量/弹性模量	等效容重 (KN/M³)	等效质量密度 (T/M³)	线膨胀系数 (10 ⁻⁵ /°C)
主缆	2.00E+08	0.3857	79.78	8.1358	1.20
平行钢丝吊索	2.00E+08	0.3857	84.72	8.6393	1.20
桥塔 C50	3.45E+07	0.40	25.50	2.6000	1.00
钢梁 Q345D	2.06E+08	0.3857	101.80	10.3814	1.20

3、截面几何特性

1) 主缆

主缆由平行钢丝索股组成，采用强度 1670MPa 的镀锌高强钢丝，钢丝直径为 5.20mm。主缆施工采用预制平行钢丝索股法（PPWS 法），每根主缆为 65 股，每股含 127 根钢丝

主缆横截面面积： $65 \times 127 \times 5.2^2 \times \pi \times 10^{-6} \div 4 = 0.175312m^2$ ；

2) 吊索

本桥只在中跨设吊索，吊索采用 76-φ5.0mm 镀锌高强平行钢丝吊索，钢丝标准抗拉强度不小于 1670MPa。每一吊点均设置 2 根吊索，上下吊点均为销接式连接。

单个吊点吊索横截面面积： $2 \times 76 \times 5.0^2 \times \pi \times 10^{-6} \div 4 = 0.00298451m^2$ ；

3) 加劲梁

加劲梁采用正交异性板流线型扁平钢箱梁，梁高 3.0m,宽（含风嘴）36.8m；顶板厚 14mm，U 形加劲肋厚 8mm；底板厚 10mm，其 U 形加劲肋厚 6mm；吊耳板厚 60mm。钢箱梁标准梁段长 12m，内设 4 道实体式横隔板，为加强桥面板刚度，减小桥面板变形对铺装层的不利影响，横隔板间距确定为 3.0m。吊索处横隔板厚 10mm（承力板为 30mm），其余横隔板厚 8mm。在端梁段有永久竖向支座处的横隔板厚度为 20mm，端横隔板厚度为 20mm。根据构造需要，端梁段局部设纵隔板 2 道。支座处横隔板上设置起顶加劲构造，以备更换支座时使用。结合吊索的设计方案，钢箱梁与吊索的连接采用销接式锚板。

加劲梁标准截面几何特性计算结果见下图。

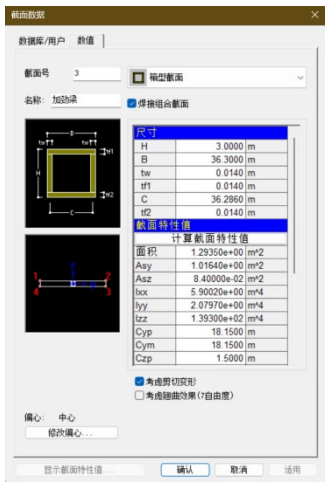


图 4.4-15 加劲梁标准截面几何特性计算结果（单位：m）

4) 索塔

南塔是由塔柱、横梁组成的门式框架结构。塔柱为普通钢筋砼结构，横梁为预应力砼结构。主要承受由索鞍传下的垂直荷载及出活载、风载、温度差等所产生的顺桥向和横桥向荷载。南塔有两个塔柱，二道横梁，塔柱高度为 118.972m。北塔有两个塔柱，三道横梁。横梁为预应力空心箱型截面，塔柱高度为 139.704m。北塔塔柱横桥向尺寸全高为 5.2m。

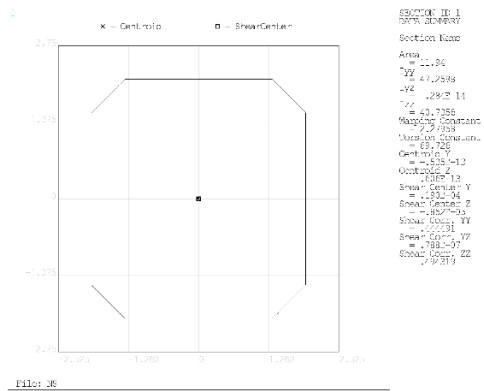


图 4.4-16 上横梁截面几何特性计算结果（单位：m）

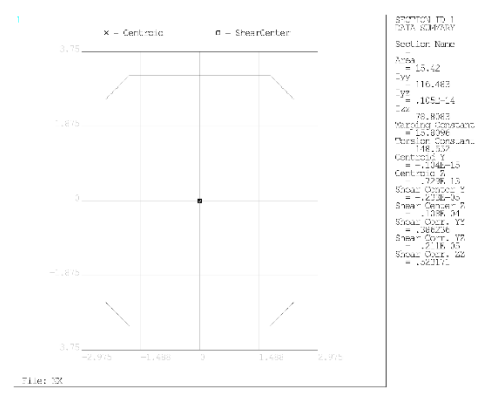


图 4.4-17 下横梁截面几何特性计算结果（单位：m）

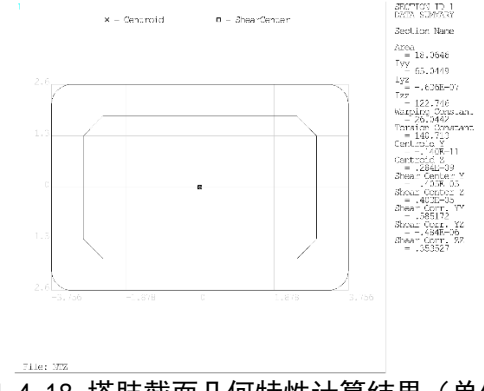


图 4.4-18 塔肢截面几何特性计算结果（单位：m）

4、边界条件

- 塔柱：在承台处固结；
- 加劲梁：约束加劲梁梁端的竖向和横向位移；
- 主缆：锚固点处固结。
- 加劲梁与吊索：刚臂连接
- 主缆与塔顶：主从连接

5、恒载

1) 一期恒载

计算模型中，吊索、主缆、加劲梁等结构采用材料容重考虑一期恒载，吊索锚头、索夹等按集中荷载考虑，全桥索夹共 7 类，各类索夹质量以大桥设计资料中给定值取用。

图 4.4-3 索夹处结构重量表

序号	类型	重量（kg）
1	索夹 A	1802.803
2	索夹 B	1510.876
3	索夹 C	1196.355
4	索夹 D	949.622
5	索夹 E	922.799
6	索夹 F	888.296
7	索夹 G	482.867
10	单个吊索锚头	147

2) 二期恒载

二期恒载主要为桥面铺装、检修道铺装、防撞护栏、检修道护栏等附属设施，本次计算采用的二期恒载数据取自鱼嘴两江大桥设计资料，二期恒载为 5.298t/m。

6、活载

针对边吊索的更换，由于采用不中断交通的方式进行，在考虑上述恒载的基础上以影响线形式计算活载非线性效应，按照活载最不利工况下吊索索力值进行逐步卸载旧索索力。活载按照现行规范《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015 ）中车道荷载公路I级取值。

鱼嘴大桥采用双向 6 车道设计标准，根据规范要求活载施加需要对纵向及横向进行折减，计算时按照单车道加载并考虑偏心系数，各计算参数取值如下。

①纵向折减系数取：0.95

②横向折减系数取：0.55

③活载偏心系数取：1.08

计算活载对应的均布荷载为： $q=10.5\times0.95\times0.55\times1.08\times6=35.55\text{ kN/m}$ ；

对应的集中荷载为： $f=360\times0.95\times0.55\times1.08\times6=1218.89\text{ kN}$ 。

在 1#边吊索索力最不利活载工况下，1#边吊索各阶段的索力值（双吊点索力值之和）如下表所示（本表中 1#吊索索力指 1#吊点处的 1N#和 1S#吊索索力之和）。

表 4.4-2 边吊索恒载+最不利活载索力值（kN）

序号	工况	1#吊索索力
1	成桥状态恒载	1257.1
2	活载	141.9
3	恒载+活载	1399.0

4.4.3.1.3. 换索典型施工阶段模拟

1、换索典型施工阶段

本换索方案实施难点主要在旧索的拆除，新索的安装与常规方法较为类似，可以通过临时索下端的反力装置直接张拉顶推新索下锚头实现新索的安装，新索的索力主要是通过无应力长度和加劲梁线形来控制。因此，本次分析主要是对拆索过程进行详细模拟分析，拆索实施时涉及的典型换索施工阶段如下。

- 1) 成桥
- 2) 边吊索活载效应
- 3) 安装并张拉临时吊索
- 4) 安装并张拉临时拉杆装置
- 5) 切割待更换中部索索体
- 6) 放松临时拉杆装置
- 7) 拆除旧索上下端索体
- 8) 安装并张拉新索

2、临时吊索模拟

为模拟临时索的张拉及旧索索力卸载过程，完成上述成桥阶段整体模型后，根据本次分析研究对象，在南彭侧边吊索（编号 1N#吊索）临近位置增加临时索安装、张拉、临时工装张拉及旧索索力卸载施工步，临时索采用只受拉桁架单元 link10 模拟。考虑临时工装与原旧索节点自由度协调及临时拉杆张拉传力因素，分析的临时工装反力梁采用 beam188 单元、张拉杆采用只受拉桁架单元 link10。各吊索几何参数、材料属性与原设计保持一致。

为保持与现场施工情况吻合，在活载施加后的位置上安装临时吊索，采用降温法模拟临时索张拉。

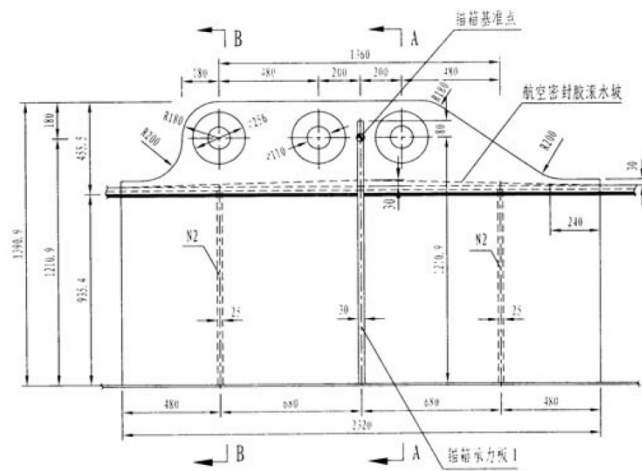


图 4.4-19 原设计吊点示意图（单位：cm）

临时索材料及几何参数参考原桥该吊点位置的旧索取用，即 1#及 50#临时吊索采用平行钢丝索股，索股由 76 根直径 5.0mm 镀锌高强钢丝构成。临时吊索材料属性分别为：弹性模量 206GPa；泊松比 0.31；密度 7850kg/m³。

有限元模型中临时索位置按照原桥预留吊耳孔取用，新增临时换索孔按照设计图纸取用。两根临时吊索中心距原吊点中心距分别为 0.68m 和 0.91m，分别在原吊索南北两侧各建立一根临时吊索。

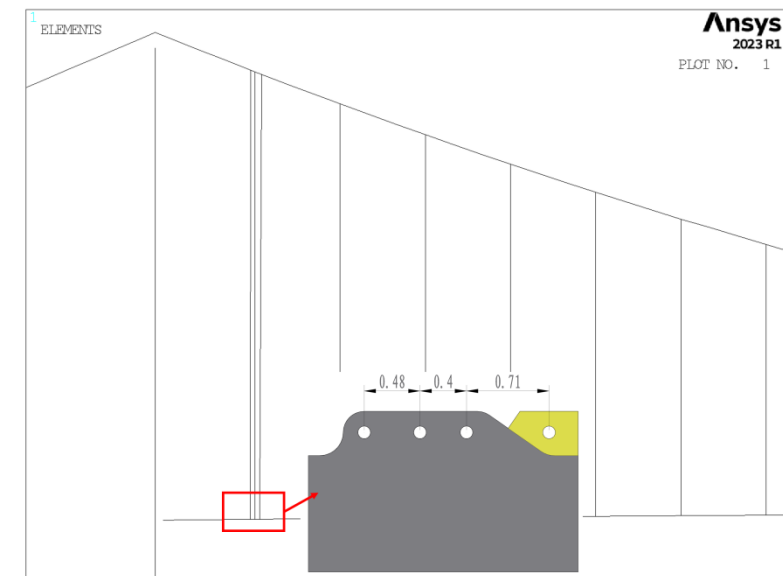


图 4.4-20 新增换索孔后的临时吊索布置示意图（单位：m）

3、索体中部张拉装置模拟

为减小拆索过程中对原桥各构件的影响，保障换索期间大桥安全通行，提高旧索卸载效率，降低换索成本。本次利用临时吊索的基础上，通过计算分析及传力机理在旧索索体增加临时张拉工装，待临时吊索张拉一定索力后在索体上安装临时张拉工装，提高旧索索力卸载效率。

考虑到施工便利性索体中部的临时张拉工装设备距下吊点 3m，张拉需要的临时拉杆偏保守按照距吊索 0.3m 考虑。

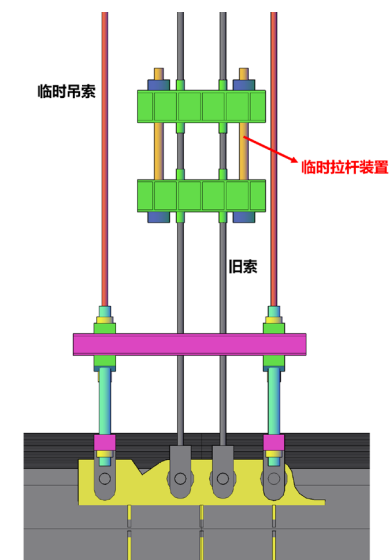


图 4.4-21 旧索索体临时张拉工装示意图

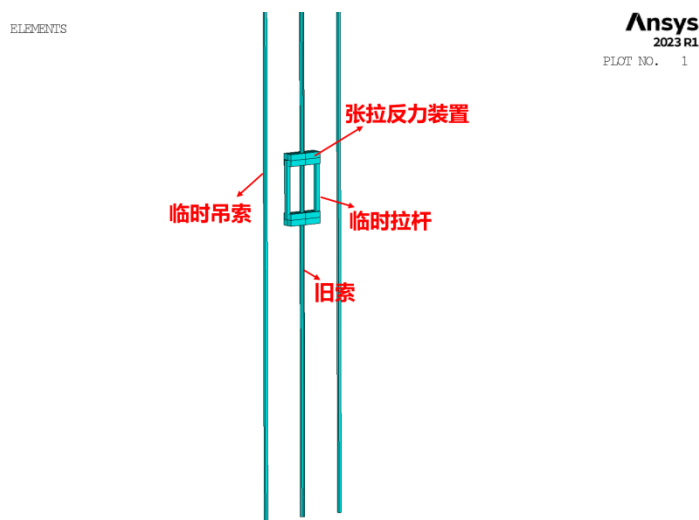


图 4.4-22 旧索索体中部临时工装有限元模拟示意图

4、换索张拉及放张荷载

本次采用不中断交通更换近塔吊索方案借助两套辅助换索设备，临时吊索及临时拉杆工装是换索的关键工装，上述换索思路涉及临时吊索张拉、临时拉杆张拉，为了降低对原结构的扰动，采用两次放张临时拉杆卸载旧索索力。各个张拉及放张的荷载情况如下。计算模型中按照实际受力机理对换索过程采用多施工步进行模拟。换索期间张拉、放张荷载情况如下表。

表 4.4-3 换索荷载张拉及放张汇总表（kN）

换索张拉放张情况	荷载值
张拉临时吊索	301.2
张拉临时拉杆	559.2
第一次放松临时拉杆	312.8
第二次放松临时拉杆	246.4
新索张拉值	1400

（1）临时吊索张拉荷载

根据对国内外多座大跨径悬索桥吊杆更换实施经验，计算分析大桥整体受力特性，通过张拉临时吊索来完全卸载旧索索力效率较低。在索体中部设置临时张拉工装后，可有效提高索力传递效率。鱼嘴两江大桥吊索索距 12m，整体上的吊索索力相对不大，综合考虑，本次拟对单根临时吊索一次张拉控制值为 301.2kN。

（2）临时拉杆张拉荷载

位于索体上的临时张拉装置不仅起到较小旧索切割引起的振动冲击，根据分析，张拉临时拉杆对旧索索力的卸载效率较临时吊索更高，通过张拉临时拉杆对旧索索力进行二次卸载，进一步释放旧索的剩余索力。本次在张拉临时吊索后，安装并张拉索体处的临时拉杆装置，卸载旧索索力至无应力状态，由于悬索桥的较强的几何非线性特点，通过试算，两根临时拉杆第一次均张拉至 559.2 kN 时，旧索索力可完全卸载至无应力状态，为后续旧索提供切割基础。

（3）临时拉杆放张内力值

在临时拉杆张拉后，临时拉杆间的索体索力完全被卸载，采用专用的切割设备切割掉该部分索体。通过分次放张临时拉杆来实现旧索上下部分索体索力的转移和卸载。为尽量减少放张临时拉杆对结构的扰动，保障换索期间的行车安全，经过多次试算，采用两次放张临时拉杆可以完全卸载掉旧索上下部分索体的剩余内力，第一次放张临时拉杆内力值 312.8kN，第二次将临时拉杆剩余内力值完全放张（246.4 kN 左右），在经过两次放张后，旧索索力被完全卸载，原索力全部转移至临时吊索上。

（4）新索安装及张拉

通过两次放张临时拉杆，旧索索力上下部分索体索力被完全卸载掉，拆掉旧索上下部分索体，安装并张拉新索。新索的安装借助临时吊索下端反力装置，对新索张拉一定索力后拆掉临时装置，完成边吊索的更换。新索张拉建议根据现场情况采用多级张拉的方式逐步将缆和梁的线形拉回至拆除前的初始状态，通过计算将新索索力张拉至拆除前旧索索力，并采用旧索的无应力索长，在新索张拉后缆、梁线形回归至旧索拆卸前状态。根据上述计算，新索的张拉值为 1400KN。模型中采用荷载形式模拟新索的张拉。

5、换索计算分析参数

本换索方案涉及临时吊索张拉、多次放张临时拉杆，且存在两套换索辅助装置。因此，计算中需要根据实际换索过程准确模拟各个施工步的受力情况和传力机理。从缆、梁竖向位移、临时吊索索力、临时拉杆索力、旧索索力及梁端支反力等几个大方面分析各个施工步关键参数的变化情况，换索过程需要分析的关键参数如下。

- （1）临时吊索索力（单根）
- （2）临时拉杆轴力（单根）
- （3）旧索下部索力（非临时拉杆间索体）
- （4）旧索上部索力（非临时拉杆间索体）

- (5) 旧索临时拉杆间索体索力
- (6) 旧索上吊点位移
- (7) 旧索下吊点位移
- (8) 梁端竖向支反力
- (9) 梁端转角

4.4.3.1.4. 换索分析结果

1、梁端支反力

通过试算，在保障梁端支座换索期间保持受压状态的情况下，采用上述的换索方案可以保障梁段支座不发生受拉的情况，整个换索过程支座始终处于受压的状态，支座最小压力发生在旧索切割阶段，最小压力值为 2178.1 kN，最大压力发生在旧索索力完全卸载阶段（临时拉杆二次放张阶段），最大压力值为 2546.3 kN。换索过程中，支反力最大变化量为 212.0 kN，且始终处于受压状态，因此，换索对梁端支反力较小。

表 4. 4-4 1#边吊索更换典型阶段支座反力值（kN）

换索施工阶段	成桥状态（含活载）	张拉临时吊索	第一次张拉临时拉杆	切割旧索	第一次放松临时拉杆	第二次放松临时拉杆	安装新索并拆除临时索
支座反力值	2390.7	2211.7	2178.3	2178.1	2390.1	2546.3	2405.8
支反力变化	/	-179.0	-33.4	-0.2	212.0	156.2	-140.5

2、梁端转角

边吊索靠近梁端，传统的多吊点换索方案没有临时支撑体系，本次采用单吊点无应力切割的方式更换边吊索，相对常规的多吊点换索方案，临时吊索张拉值相对减小较多。换索期间交通处于半开放状态（部分车道封闭），为保障行车安全和换索对边界条件的影响，结合整体分析模型分析了边吊索更换过程梁端转角的变化情况。计算结果如下表。

表 4. 4-5 1#边吊索更换典型阶段梁端转角（°）

换索施工阶段	成桥状态（含活载）	张拉临时吊索	第一次张拉临时拉杆	切割旧索	第一次放松临时拉杆	第二次放松临时拉杆	安装新索并拆除临时索
梁端转角	-0.378	-0.375	-0.375	-0.375	-0.380	-0.383	-0.379
梁端转角变化	/	0.002	0.001	0.000	-0.005	-0.003	0.004

从计算结果可知，整个换索过程梁端转角变化较小，最大变化量仅为 0.005° 发生在第一次放松临时拉杆阶段。整个换索过程对梁端转角变形影响较小。

3、待更换永久吊索换索过程受力分析

通过对换索过程典型施工阶段的模拟分析，可以得到旧索在各个阶段的索力变化情况，1#索在更换时在主要施工步的索力值变化如下。

① 初始状态

在临时索未张拉，旧索初始状态（含最不利活载）的索力值为 1406.2 kN。

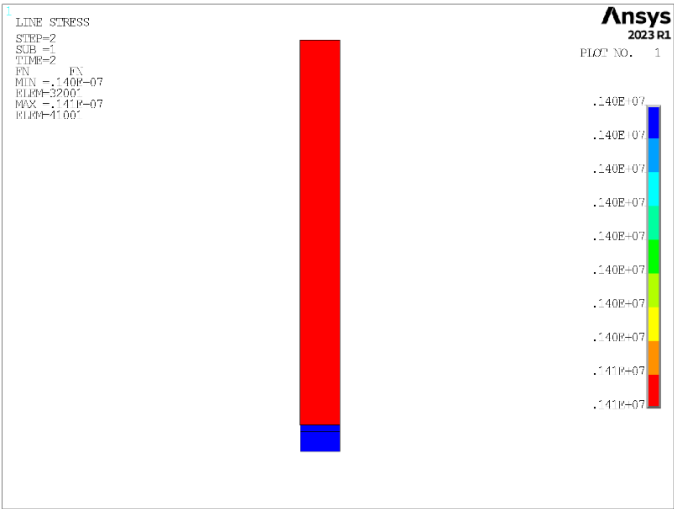


图 4. 4-23 旧索初始状态索力值（单位：N）

② 张拉临时索

临时索张拉 301.2 kN 后，旧索索力被卸载掉一部分，此时剩余索力值为 1155.4 kN，整根吊索索力基本均匀分布。

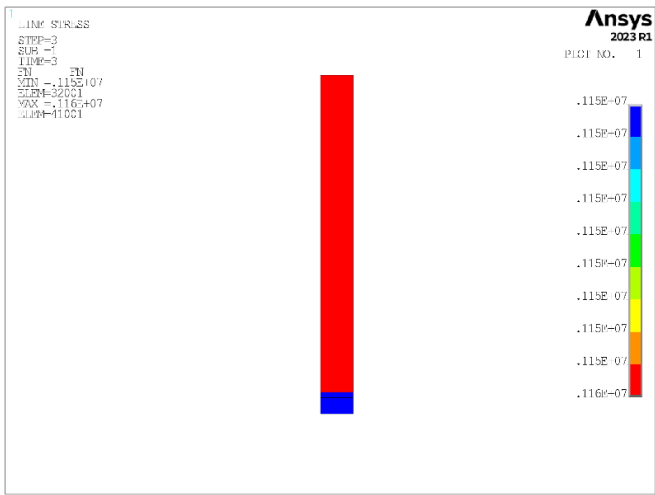


图 4.4-24 张拉临时吊索后旧索剩余索力值（单位：N）

③ 安装并张拉临时拉杆

临时索张拉后，开始安装索体位置的临时拉杆装置，对临时拉杆张拉 559.2kN 后，被临时拉杆夹紧的索体部分索力被全部卸载，该部分索力处于无应力状态，拉杆上部索体索力变为 1128.4kN、下部索体索力为 1114.5 kN。旧索索力沿索长分布如下图所示。

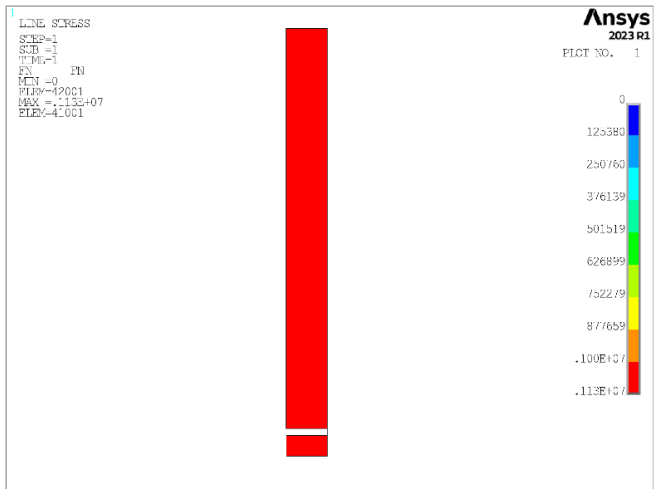


图 4.4-25 张拉临时拉杆后旧索索力值分布情况（单位：N）

④ 切割旧索

在临时拉杆夹紧段索体处于无应力状态后，采用专用切割设备割断该部分索体，此时剩余的上部分索体索力值为 1128.4kN、下部分索体索力值为 1114.7 kN。本阶段在旧索处于无应力状态后，切割旧索对临时拉杆以外的索体索力影响不大。

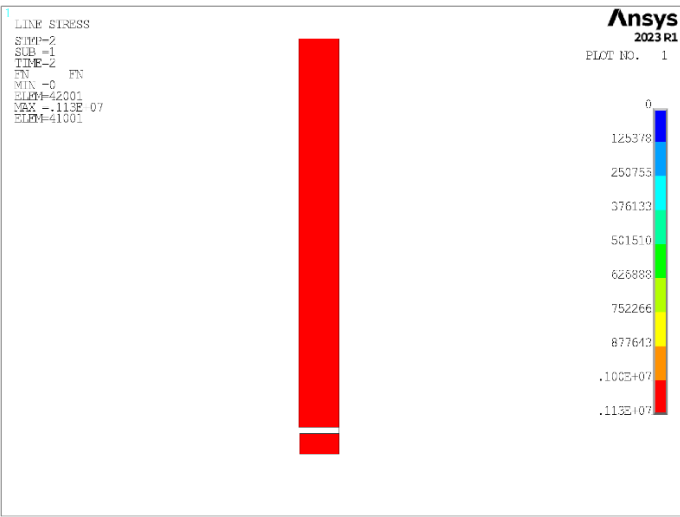


图 4.4-26 旧索中部切割后索力分布情况（单位：N）

⑤ 第一次放松临时拉杆

切断临时拉杆间的旧索索体后，采用分次放张的思路对旧索上下部分的索体进行索力卸载，为减少临时拉杆放张对结构其余构件的影响。通过试算，第一次放松临时拉杆 312.8 kN 的力，此时旧索上部分的索力为 502.8 kN、下部旧索索力为 489.1kN。

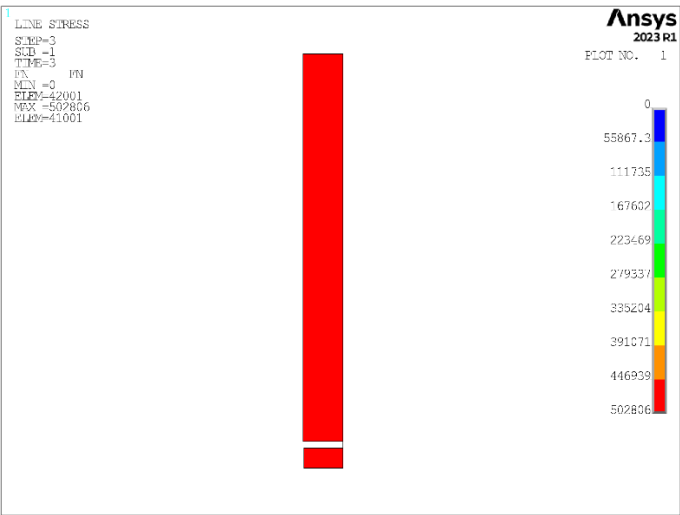


图 4.4-27 第一次放张临时拉杆后，旧索索力分布情况（单位：N）

⑥ 第二次放松临时拉杆

通过计算，第一次放张临时拉杆引起的主缆竖向位移小于 3.0cm，引起的加劲梁位移小于 0.3cm。在二次张拉临时吊索后，二次放张临时拉杆剩余全部内力，将旧索索力完全卸载掉，提供后续拆索基础。



图 4.4-28 第二次放张临时拉杆后旧索索力分布情况（单位：N）

从上述旧索索力各个阶段的变化情况可以看出，采用临时吊索和临时拉杆两套换索设备，通过两次张拉临时吊索、一次张拉临时拉杆及两次放张临时拉杆可以逐步将旧索索力完全转移至临时吊索上，从而实现对旧索的不中断交通更换。

4、换索各阶段缆、梁变形及相对位移分析

由于换索期间不能完全中断交通，通过分析换索各典型施工步中缆、梁的竖向位移，可以评判换索对缆、梁的扰动以及对行车的影响。从计算结果来看，主缆竖向位移变化最大的施工步为临时索张拉阶段，主缆最大竖向位移为 26.5mm（向下）；加劲梁位移变化最大的施工步为第一次放松临时拉杆阶段，加劲梁最大竖向位移为 2.4mm（向下）。

从换索过程中缆、梁相对位移来看，二者相对竖向位移变化最大的施工阶段是第一次松临时拉杆阶段，缆梁相对位移变化最大值为 28.9mm（相对距离减少）。换索各阶段主缆、缆梁、加劲梁位移变换情况如下表所示。

表 4.4-6 换索各典型阶段缆、梁位移变化汇总表（mm）

缆梁位移	张拉临时吊索	张拉临时拉杆	切割旧索	第一次放松临时拉杆	第二次放松临时拉杆	安装新索并拆除临时索
主缆竖向位移	-24.1	-4.6	0.0	26.5	21.4	-20.2
加劲梁竖向位移	2.1	0.2	0.0	-2.4	-2.3	2.2
缆梁相对位移	26.2	4.8	0.0	-28.9	-23.7	22.4

注：表中数据绝对位移值：“-”代表向下，相对位移值：“-”代表缆梁相对距离变大。

5、换索各阶段关键参数变化情况汇总

通过上述的分析计算，对方案一换索各个阶段从支反力、旧索内力变化及缆梁竖向位移变化情况三方面进行了考察。计算结果表明：

- ①支反力在整个换索过程变化量最大值为 212kN，且始终处于受压状态，换索对支座影响较小；
- ②换索过程中梁端转角位移较小，换索对梁端伸缩缝影响较小；
- ③通过临时吊索张、临时拉杆张拉、两次放张临时拉杆可将旧索索力完全卸载，在提高换索效率的同时降低了换索对原结构的扰动，保障行车安全；
- ④换索过程中，主缆最大竖向位移量为 26.5mm、加劲梁最大竖向位移量小于 0.5cm，在两次临时拉杆放张阶段，缆、梁相对位移变化都在 3cm 以内，上述边吊索更换方案对缆、梁的影响都是可控的；
- ⑤从索力和变位来看，旧索索力被完全卸载后，临时吊索索力小于原旧索索力，在新索张拉至设计值后，缆、梁的线形基本均回到了成桥状态（含活载）。

表 4.4-7 换索各阶段关键参数变化情况汇总表（KN、mm、°）

考察关键参数		换索典型施工步						
		成桥状态 (含活载)	张拉临时吊索	张拉临时拉杆	切割旧索	第一次放松临时拉杆	第二次放松临时拉杆	安装新索并拆除临时索
内力 (KN)	临时索索力 (单根)	0.0	301.2	347.9	347.9	476.0	581.4	0.0
	临时拉杆轴力 (单根)	0.0	0.0	559.2	559.2	246.4	0.0	0.0
	旧索上部索力 (非临时拉杆间索体)	1406.2	1155.4	1128.4	1128.4	502.8	0.0	0.0
	旧索下部索力 (非临时拉杆间索体)	1399.0	1148.2	1114.5	1114.7	489.1	0.0	0.0
	旧索临时拉杆间索体索力	1399.4	1148.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
位移 (mm)	旧索上吊点位移	-68.0	-92.1	-96.7	-96.7	-70.2	-48.8	-69.0

	旧索下吊点位移	-83.5	-81.4	-81.2	-81.2	-83.6	-85.9	-83.7
支座反力(KN)	梁端竖向支反力	2390.7	2211.7	2178.3	2178.1	2390.1	2546.3	2405.8
梁端转角(°)	梁端竖向转角	-0.378	-0.375	-0.375	-0.375	-0.380	-0.383	-0.379

4.4.3.2. 换索局部强度验算

4.4.3.2.1. 分析方法

采用上述的换索方案，在原吊索耳板位置新增抗拉板件，实现双吊索换索。为保证换索过程能安全有序开展，需要对吊索临近区域的新增板件及原板件的强度进行验算。在各板件能够满足要求的基础上，由于新增板件与原耳板采用的是焊缝连接，因此，还需要对焊缝连接强度进行验算，保障结构安全。本部分的计算分析主要涉及母材强度计算和焊缝连接强度验算。

采用有限元分析手段对母材强度进行验算，查阅鱼嘴两江大桥设计资料，主梁主要受力板件采用 Q345D 钢，根据规范《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64-2015）中要求的设计强度值验算母材强度。对于焊缝连接强度的验算采用规范《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64—2015）中关于焊缝强度设计值的规定。

4.4.3.2.2. 有限元模型

根据上述换索方案的基本思路及新增板件的构造形式，采用大型通用有限元软件 ANSYS 对主梁换索构造进行相关计算分析。选取标准梁段作为分析对象，利用加劲梁横向对称性，建立横向半宽的标准梁段三维有限元模型，纵向上考虑边界条件施加影响后，模型整体尺寸 19400mm（横向宽）×14000mm（纵向长）×3000mm（高）。对吊索临近板件采用实体单元模拟、其他区域板件采用壳单元模拟，实体单元与壳单元采用绑定连接，局部模型中各板件的几何尺寸均按照加劲梁设计参数取值。换索受力分析有限元局部模型如下图所示。

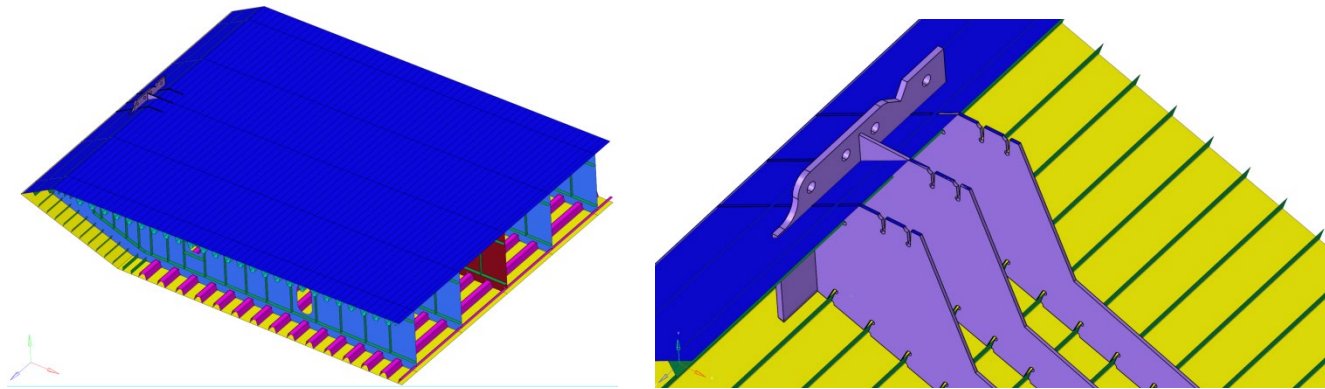


图 4.4-29 新增吊耳孔局部有限元模型

4.4.3.2.3. 荷载

吊索耳板受力范围较为局部，建立横向半宽标准梁段节段有限元模型用于分析吊索更换时各板件的基本受力状态，以判断换索过程的安全性。结合上述的整体计算结果可知，在恒载和最不利活载工况下，1#吊点两根吊索索力之和小于 1600KN，本次分析偏保守计算，取单个吊点的吊索索力之和为 2000KN。

①吊索索力：根据上文的整体计算结果，考虑到临时索后续的张拉情况，计算时取三个典型工况，各工况下吊索索力均偏最不利取值。

工况 1：两个旧索吊耳孔、备用吊耳孔及新增吊耳孔均承受 500KN 索力；

工况 2：两个旧索吊耳孔各承受 1000KN 索力；

工况 3：两个临时吊耳孔各承受 1000KN 索力。

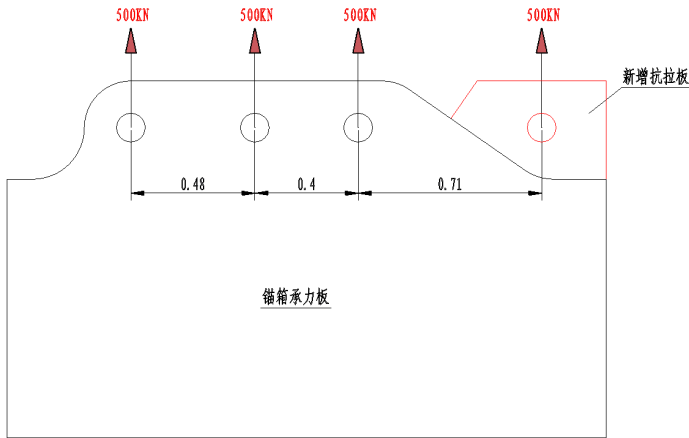


图 4.4-30 锚箱承力板工况一加载示意图（单位：m）

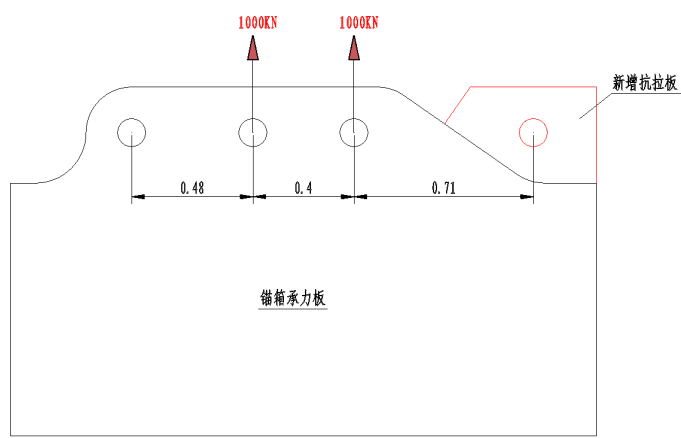


图 4.4-31 锚箱承力板工况二加载示意图（单位：m）

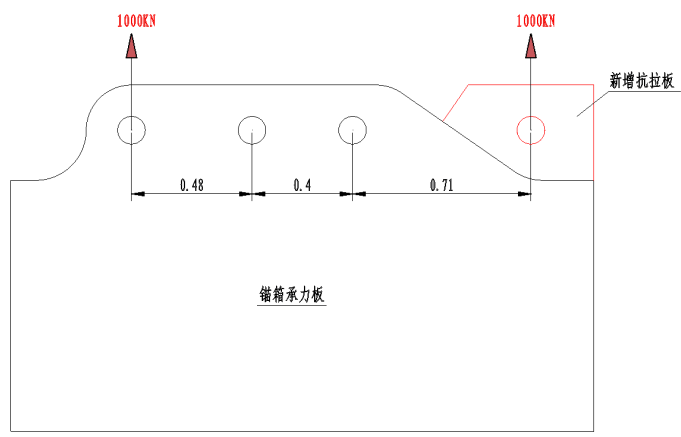


图 4.4-32 锚箱承力板工况三加载示意图（单位：m）

- 索力以节点力的形式施加在吊耳孔节点上。
- ②铺装：鱼嘴两江大桥铺装采用 5.5cm 沥青混凝土，容重取 25 kN/m³。铺装荷载以节点力形式施加在顶板上。
- ③自重：自重系数取 9.806 N/kg。

4.4.3.2.4. 材料属性

- 鱼嘴两江大桥加劲梁主要受力板件采用 Q345D 钢，有限元模型采用的材料属性如下：
- （1）弹性模量：206 GPa
 - （2）泊松比：0.31
 - （3）线膨胀系数：1.2×10⁻⁵
 - （4）钢材密度：7850 kg/m³

4.4.3.2.5. 板件强度验算

上述从换索受力的宏观力学参数分析了双吊耳孔无应力切割更换吊索的可行性，鱼嘴两江大桥下吊点采用单备用换索孔的设计构造，本方案在下吊点位置增设了临时吊耳孔。对上述三个典型换索工况时的局部受力分析，对吊点局部各板件的强度进行验算。

1、工况一计算结果

在工况一下，1#吊点最大竖向变形为 5.2mm，承拉板局部范围各板件非应力集中区域的 MISES 应力均处于 90MPa 以内，该工况下各板件的强度满足要求，安全储备较高。

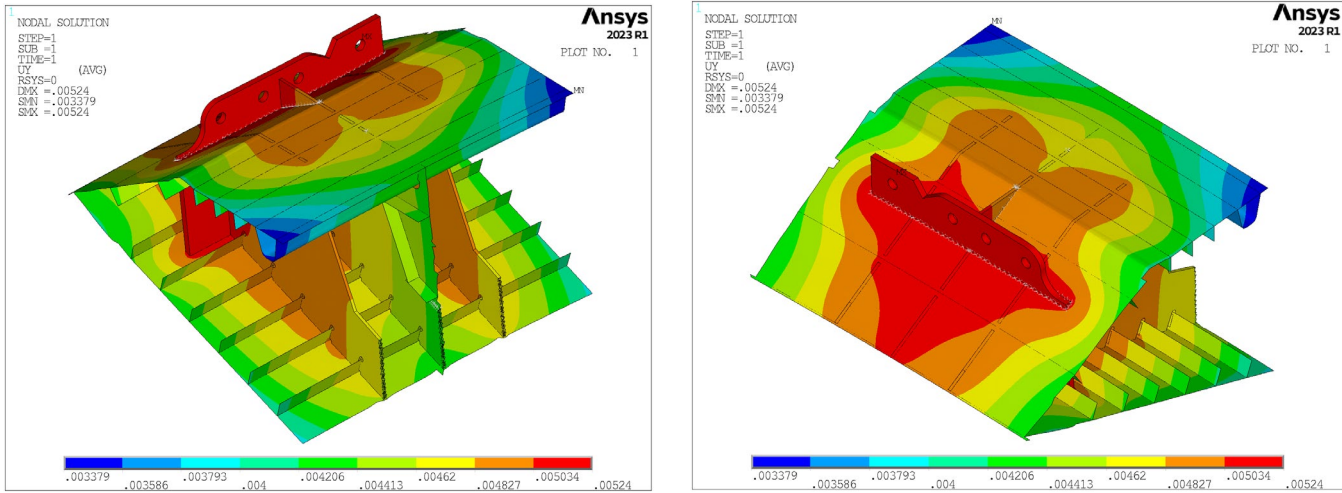


图 4.4-33 1#吊点承力板区域工况一竖向变形（单位：mm）

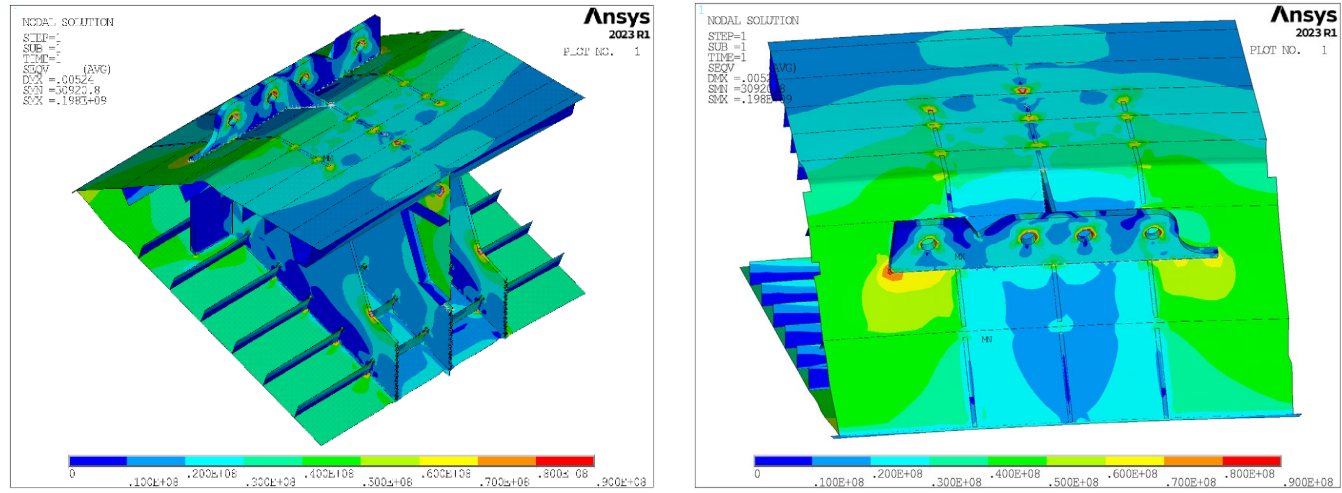


图 4.4-34 1#吊点承力板区域工况一各板件 MISES 应力（单位：Pa）

2、工况二计算结果

在工况二下，1#吊点最大竖向变形为 5.3mm，承拉板局部范围各板件非应力集中区域的 MISES

应力均处于 110MPa 以内，该工况下各板件的强度满足要求，安全储备较高。

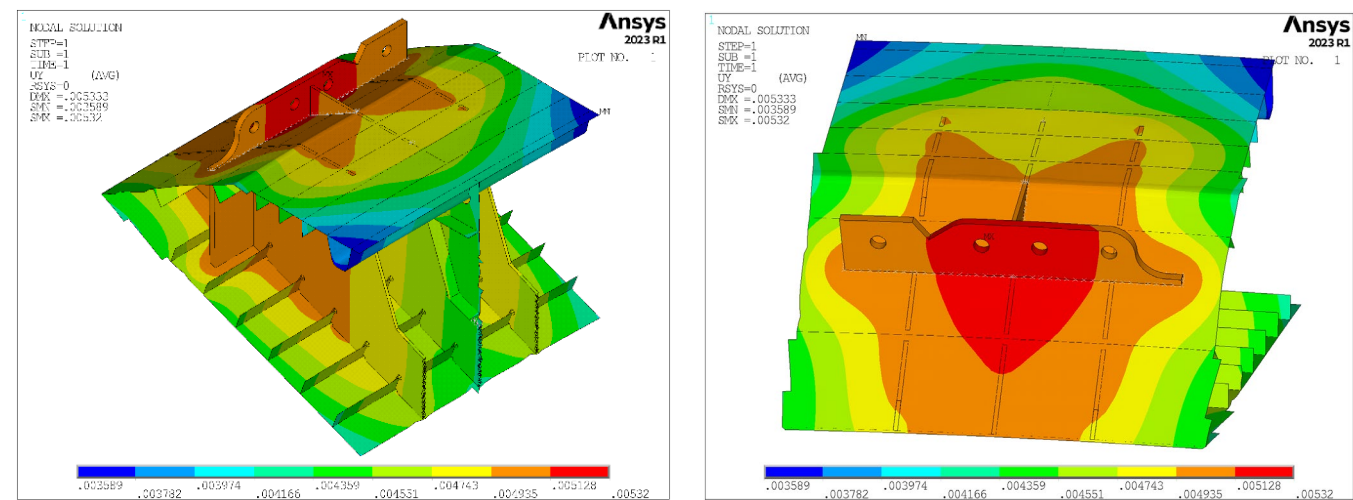


图 4.4-35 1#吊点承力板区域工况二竖向变形（单位：mm）

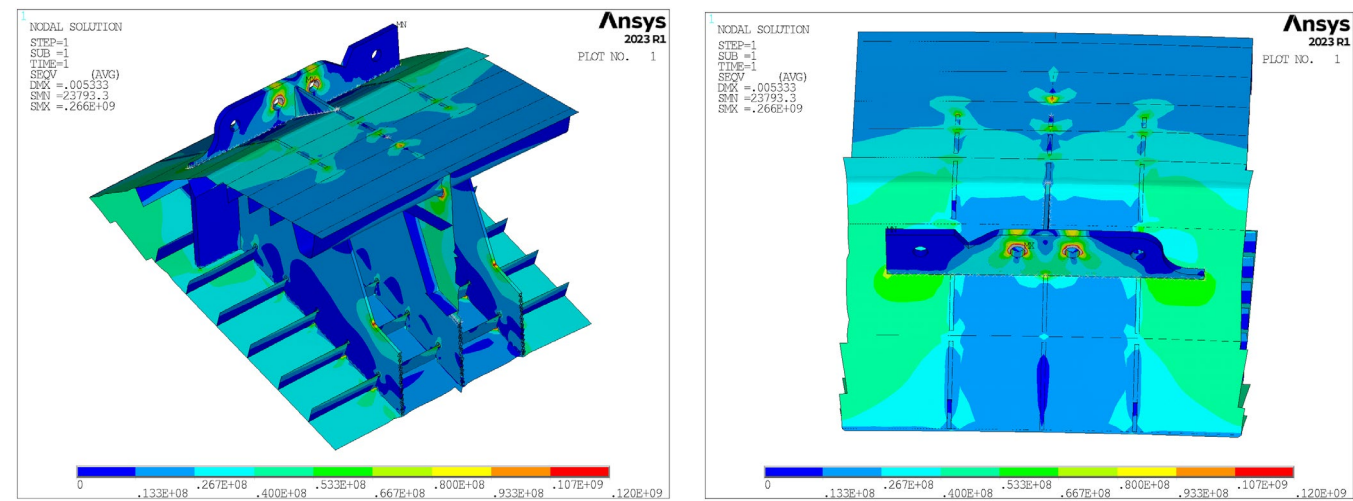


图 4.4-36 1#吊点承力板区域工况二各板件 MISES 应力（单位：Pa）

3、工况三计算结果

在工况三下，1#吊点最大竖向变形为 5.4mm，承拉板局部范围各板件非应力集中区域的 MISES 应力均处于 110MPa 以内，该工况下各板件的强度满足要求，安全储备较高。

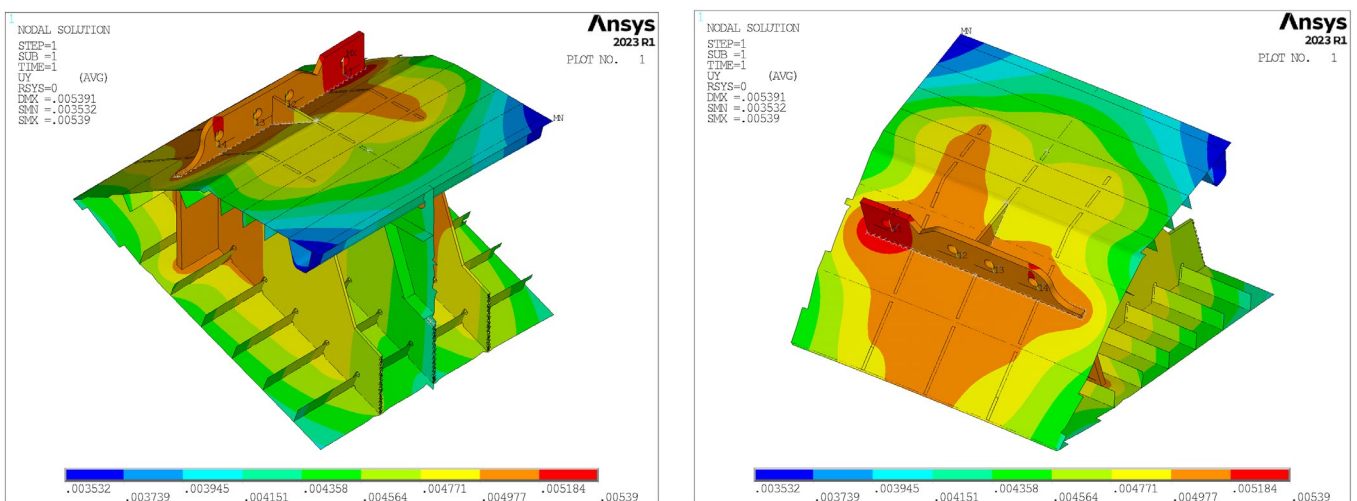


图 4.4-37 1#吊点承力板区域工况三竖向变形（单位：mm）

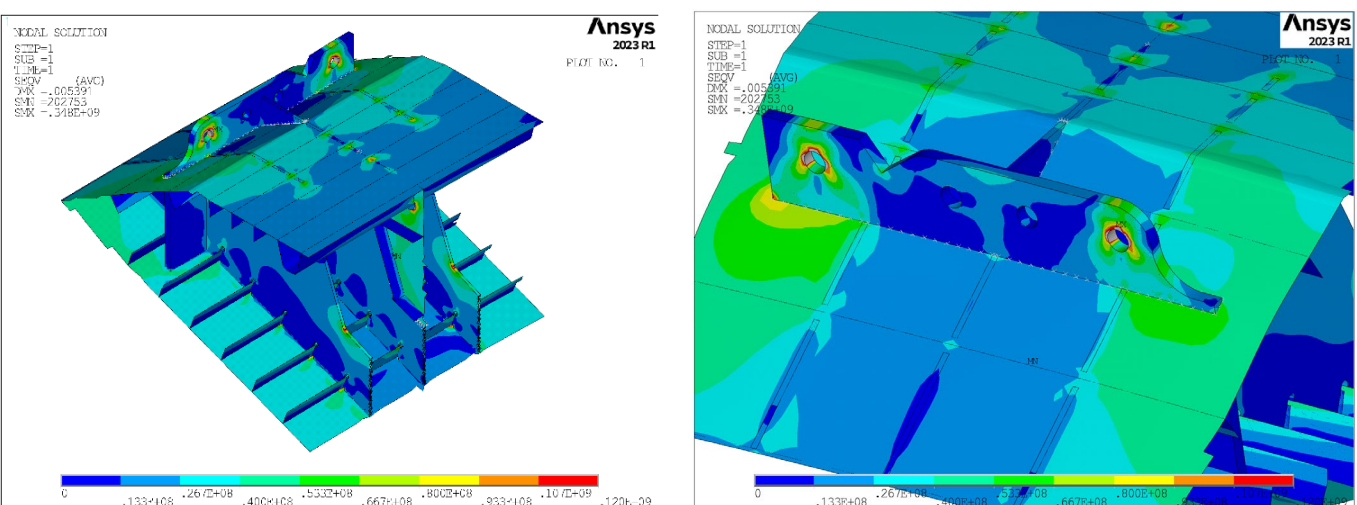


图 4.4-38 1#吊点承力板区域工况三各板件 MISES 应力（单位：Pa）

从上述对换 1#吊点换索过程中最不利荷载下锚板区域各板件的强度计算情况来看，各板件均能满足强度要求，非应力集中区域的 MISES 应力均在 110MPa 以内，满足 Q345D 钢材的设计强度（260MPa）。

4.4.3.2.6. 焊缝连接强度验算

新增抗拉板与原耳板采用全熔透对接焊缝，保障构造的可靠性。根据原结构承力板和下锚头的构造形式和几何尺寸。考虑现场焊接施工质量影响，对焊缝计算厚度进行折减，结构重要性系数取 1.1。计算过程如下。

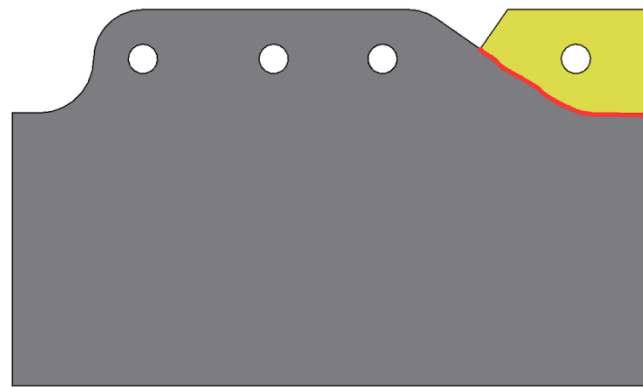


图 4.4-39 新增吊耳孔焊缝连接强度验算示意图

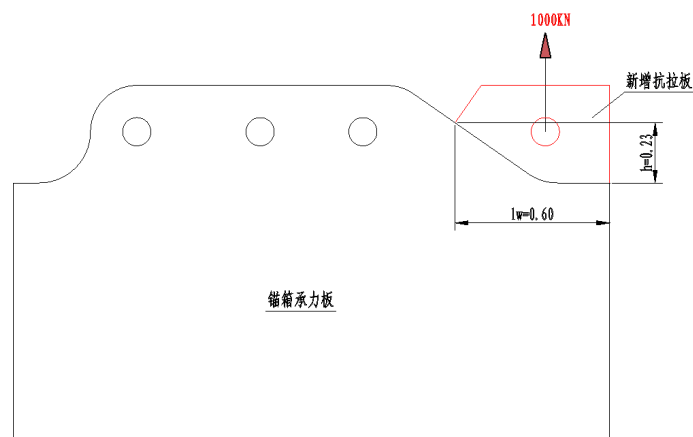


图 4.4-40 焊缝强度验算力学简图 (单位: m)

焊缝强度验算采用规范《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015)中的相关规定,分解验算对接焊缝的抗拉、抗剪及弯剪换算应力。其中,抗拉验算时保守取焊缝长度为水平投影长度;抗剪验算时偏保守取焊缝的竖向投影长度,且剪力取外部荷载值;弯剪换算应力取抗拉抗剪的最不利值组合计算。焊缝强度验算几何参数如下。

- (1) $t=42\text{mm}$
- (2) $l_w=600\text{mm}$
- (3) $h=233$
- (4) $Q=1000\text{ KN}$
- (5) $F=1000\text{ KN}$
- (6) $\gamma_0=1.1$

由此计算得到焊缝应力为:

$$\textcircled{1} \text{抗拉强度验算: } \gamma_0 \sigma = \frac{\gamma_0 F}{t l_w} = 43.7 \text{ MPa} < f_{td}^w = 260 \text{ MPa}$$

$$\textcircled{2} \text{抗剪强度验算: } \gamma_0 \tau = \frac{\gamma_0 Q}{t h} = 112.4 \text{ MPa} < f_{vd}^w = 150 \text{ MPa}$$

$$\textcircled{3} \text{弯剪换算应力验算: } \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 181.4 \text{ MPa} < f_{td}^w = 260 \text{ MPa}$$

根据新增耳板连接焊缝的计算结果可知,单根临时索吊耳孔在承受 1000kN 时,换索新增板件与加劲梁原有板件的连接强度仍有相当的富余度,整个换索方案临时吊耳孔的新增构造能够满足实施过程中的连接强度要求。

通过上述采用有限元建模分析母材强度和焊缝连接强度的验算结果可知,采用新增吊耳孔无应力切割方案更换吊索,母材板件和焊缝连接均满足相关规范的强度要求,且安全富余度较大。

4.4.3.3. 小结

本节通过建立换索多施工步分析模型计算了边吊索更换换索方案的整体安全性,采用局部有限元模型分析了换索期间钢锚箱的局部安全及临时构造的可靠性。根据计算结果,采用双吊索无应力切割更换边吊索整体上安全可靠,相关构件的安全裕度较高,能够满足边吊索的安全需求。

从整体计算及局部分析两方面能够得到如下结论:

- 1、支反力在整个换索过程变化量最大值为 21.2t,且始终处于受压状态,梁端最大转角变化量为 0.005° ,换索对梁端边界影响较小;
- 2、通过临时吊索张拉、索体中部临时拉杆张拉及放张可将旧索索力完全卸载至无应力状态,在提高换索效率的同时降低了换索对原结构的扰动,保障行车安全;
- 3、换索过程中,主缆最大竖向位移量小于 3cm、加劲梁最大竖向位移量小于 0.5cm,在两次临时拉杆放张阶段,缆、梁相对位移变化都在 3cm 以内,无应力切割更换边吊索的换索思路对缆、梁的扰动较小;
- 4、从索力和变位来看,旧索拆除后,采用原索的无应力索长,通过将新索张拉至原索索力值(计算值),缆、梁线形回到了换索前的状态;
- 5、按照换索过程各阶段最不利受力情况计算得到的钢锚箱应力较小,主要均分布在 110 MPa 以内,远小于板件的设计强度(Q345D 钢强度设计值 260MPa),各板件应力状态能够满足安全要求;
- 6、针对临时吊索新增耳孔构造的计算分析,最不利情况下连接焊缝的抗拉强度、抗剪强度及弯剪应力均满足安全要求,换索新增板件与加劲梁原有板件的连接强度仍有相当的富余度。

4.4.4. 换索关键参数设计

上述从换索的整体和局部两大方面对本换索方案的安全性进行了详细计算分析，可以看出该方案整体安全可靠，对缆、梁扰动较小，可以满足不中断交通的时间需求。为保障换索各个临时构件的安全，对换索过程涉及的临时索夹、索夹下滑力、螺杆预紧力及临时索的设计进行计算分析和验证。

4.4.4.1. 临时吊索设计

根据上述对整个换索过程各个阶段的受力和传力分析可以看出，通过两套辅助换索装置可以将旧索索力逐步转换至临时索上，从而实现旧索的拆除和更换，该方案传力路径明确、换索效率较高，对结构的整体扰动相对较小，可以实现不中断交通换索的目标。从计算结果可知，换索阶段临时吊索最大索力发生在旧索索力完全被卸载的阶段，此时单根临时索的最大索力值为 581.4 kN。结合原桥旧索和前期已更换的新索设计参数和型号，为保持与现有吊索的协调，提高吊索制造效率，临时吊索吊索采用规格为 ϕ 5.3mm-73、公称抗拉强度 1860MPa 的镀锌铝合金高强钢丝，其技术指标符合《桥梁索缆用热镀锌或锌铝合金钢丝》（GB/T17101-2019）的规定。根据上述的整体计算结果对换索期间临时吊索的强度计算如下。

计算荷载：对计算荷载偏不利取值，单根临时吊索索力 800kN；
单根临时吊索截面积： $73 \times 5.3^2 \times \pi \times 10^{-6} \div 4 = 1.61 \times 10^{-3} m^2$ ；
根据换索整体计算结果，采用上述荷载及材料参数计算得到换索期间临时吊索的最大应力值为：
 $\sigma = F/A = 496.7 \text{ MPa}$

换索过程中临时吊索最小安全系数为： $\gamma = \sigma / [\sigma] = 3.74 > 1.8$ 。因此，采用该方案对边吊索进行更换，临时吊索采用 73 根直径 5.3mm 镀锌高强钢丝能够满足规范要求。

4.4.4.2. 临时吊索下滑力

通过整体计算，提取换索过程中主缆倾角最大对应的阶段为临时索第一次张拉，此时单根临时吊索索力为 301.1kN，此时主缆最大倾角为 21.8° ，临时吊索索力偏不利取值 500kN。

索夹下滑力计算如下：

$$T = T_h \times \sin \phi = 185.7 \text{ KN}$$

其中： T_h —吊杆拉力

ϕ —为索夹在主缆上的安装倾角。

计算得到换索阶段临时吊索最大下滑力为 185.7 kN。

4.4.4.3. 索夹螺杆预紧力

查阅设计期资料，本次临时吊索索夹采用旧索索夹相同型号，单个旧索索夹上 5 颗高强螺栓，单颗高强螺栓设计预紧力为 570 kN，计算取单颗高强螺栓的预紧力值为 400kN，旧索索夹总的预紧力为：

$$Q = n \times q = 2000 \text{ kN}$$

式中： n —高强螺栓数；

Q —索夹上高强螺栓的总设计夹紧力

经计算，本换索方案采用的临时索夹单个螺杆预紧力为 570 kN。

4.4.4.4. 临时索夹设计

采用本换索方案，临时索最大索力值为 581.4kN，该索力值小于旧索索力。因此，为提高换索效率，同时考虑后续换索需求，第一类吊索更换时临时吊索索夹采用旧索相同型号的索夹。

大桥旧索索夹对应的抗滑摩阻力按照下述公式计算：

$$F = m \times u \times Q = 840 \text{ kN}$$

式中： Q —索夹上高强螺栓的总设计夹紧力

m —与主缆在索夹内的紧固程度及索夹内壁压力分布状态有关的系数，偏安全时取 2.8；

u —摩擦系数，取 0.15。

索夹抗滑移安全系数为： $\gamma = F/T = 4.52 > 3$ 。索夹抗滑安全系数满足安全要求。

经计算，第一类吊索更换时临时吊索索夹采用旧索索夹相同型号，即 A 类型索夹。索夹单颗高强螺杆预紧力设计值为 570 kN，其抗滑摩阻力为 1680kN，索夹抗滑安全系数为 4.52，能够满足换索期间的抗滑要求。

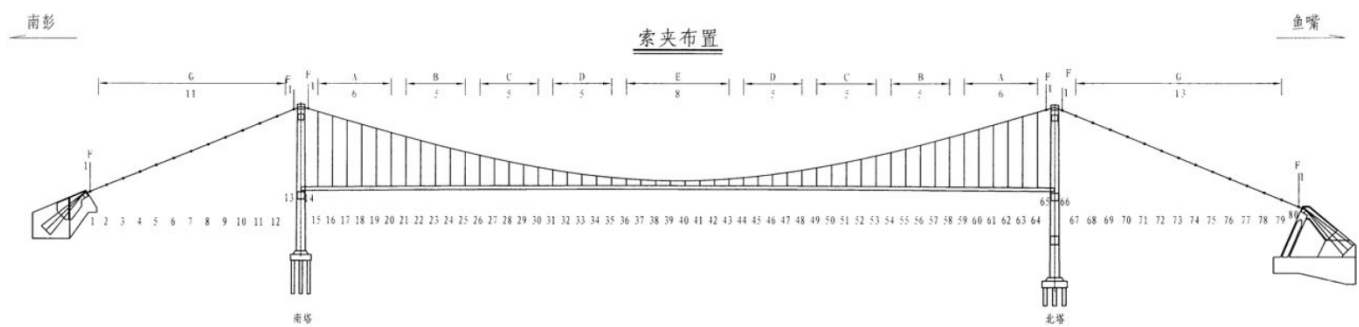


图 4.4-41 原桥旧索索夹型号分布情况

4.4.4.5. 临时拉杆设计

1、临时拉杆规格

根据上述的计算分析结果，采用两套换索工装的双吊耳孔更换吊索方案，旧索素体上的临时拉杆在整个换索过程中最大拉力均在 80t 以内，考虑到旧索割断时对临时拉杆的冲击影响，偏保守的按照单根临时拉杆内力 100t 控制，换索阶段属于短暂工况阶段，相应的换索工装构件安全系数可以取 1.7。据此，双吊耳孔更换吊索方案中的临时拉杆采用由 $\phi 5.3\text{mm}-73$ 、公称抗拉强度 1860MPa 高强钢丝索股。由此对换索过程中的临时拉杆安全验算如下。

$$F_0 = A\sigma = 2995.5 \text{ KN}$$

$$\gamma_0 = \frac{F_0}{T} = 2.996 > 1.7$$

经验算，临时拉杆采用 $\phi 5.3\text{mm}-73$ 高强钢丝索股，强度级别为 1870MPa 时，可以满足换索过程中的安全要求，安全系数为 2.996。

2、临时拉杆长度

临时拉杆作为换索关键工装之一，不仅要考虑换索过程的安全性，还需要考虑施工时的可实施性和操作空间。从安全角度出发主要是对临时拉杆换索期间最大内力对应的变形进行验算，而施工可操作性主要是换索设备的操作高度。综合安全性及施工设备操作高度，临时拉杆长度取 1m。此时按照换索过程临时拉杆的最大内力对应的拉杆变形量不足 2mm，可以保障旧索卸载至无应力状态后，临时拉杆自身的变形较小。

2、临时拉杆安装位置

采用双吊耳孔单吊点更换吊索方案，换索过程涉及到两套换索工装，考虑到本方案可用于全桥其他非边吊索的更换，同时结合两套换索工装的施工操作空间。通过对不同高度的临时拉杆对换索

过程的影响分析结果，临时拉杆所在的高度对换索影响较小，从传力的角度来看，临时拉杆安装在不同的高度只会对旧索上下部分索体各自的伸长变形有影响，但由于最终都会将旧索上下部分索体的内力全部卸载掉，所以旧索上下部分各自分摊多少比例的形变量对索力卸载是没有影响的。

临时索张拉工装位于吊索下锚头，并直接与临时吊索下端叉形耳板相连。为减少换索工装占用的空间，提高本方案在全桥其他非边吊索处的适用性，临时拉杆安装时应尽可能与临时吊索张拉工装靠近，换索时现场可根据实际情况安装临时拉杆，以保障两套换索工作均有足够的施工空间。

3、临时拉杆支架验算

通过上述计算分析，各换索阶段临时拉杆张拉荷载和内力最大值均在 800kN 以内，通过验算，采用高度 350mm，宽度 200mm 的双拼工字钢作为临时拉杆的张拉反力支架，反力支架的应力和变形验算过程如下。

- ①计算荷载：1000 kN
- ②截面特性： $I=365697632 \text{ mm}^4$
- ③最大弯矩： $M=200 \text{ KN} \cdot \text{m}$
- ④弹性模量：206 GPa

(1) 最大应力验算, 经过验算，临时拉杆在换索过程中最大应力为 95.7MPa，小于钢材设计强度。

$$\sigma = M_y / I = 95.7 \text{ MPa} < 270 \text{ MPa}$$

(2) 最大形变量验算，按照最不利荷载对换索过程中的变形验算，经验算，临时拉杆反力架在换索过程中的最大下挠量小于 1mm，满足换索需求。

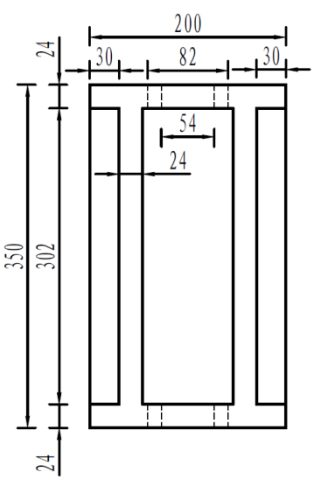


图 4.4-42 临时拉杆反力架截面构造示意图 (mm)

4.5. 本章小结

本次根据鱼嘴大桥实际结构形式，对现有未更换的剩余吊索进行了方案设计。按照吊索分布位置分别对第一类（9#-20#及 31#-42#吊索）、第二类吊索（5#-8#、43#-46#吊索）及第三类吊索（1#-4#、47#-50#吊索）进行了更换方案可行性分析。本章采用整体计算和局部计算对三类吊索的更换进行了详细计算分析，从吊索整体可行性、板件强度及连接强度等方面进行了验算，在早期更换的一批吊索实施成果基础上，为保障换索安全对临时吊索张拉力进行了控制。主要得到了以下几点结论。

- 1、第一类吊索更换方案（9#-20#及 31#-42#）
- 1）经计算，9#吊索采用三吊点更换时，临时吊索最大张拉值为 1486.4 KN，从临时吊索张拉值几板件局部强度来看，采用三吊点更换 9#吊索是可行的；
- 2）本次对 9#-20#及 31#-42#吊索采用三吊点进行更换可以满足换索实施需求。
- 2、第二类吊索更换方案（5#-8#、43#-46#）
- 1）经计算，采用 5 吊点更换 5#吊索，临时吊索最大张拉值为 1376.3 KN，各板件局部强度满足安全要求。
- 2）采用五吊点更换 5#-8#、43#-46#吊索可以满足换索实施需求。
- 3、第三类吊索更换方案（1#-4#、47#-50#）
- 1）支反力在整个换索过程变化量最大值为 21.2t，且始终处于受压状态，梁端最大转角变化量为 0.005°，换索对梁端边界影响较小；
- 2）通过临时吊索张拉、索体中部临时拉杆张拉及放张可将旧索索力完全卸载至无应力状态，在提高换索效率的同时降低了换索对原结构的扰动，保障行车安全；
- 3）换索过程中，主缆最大竖向位移量小于 3cm、加劲梁最大竖向位移量小于 0.5cm，在两次临时拉杆放张阶段，缆、梁相对位移变化都在 3cm 以内，无应力切割更换边吊索的换索思路对缆、梁的扰动较小；
- 4）从索力和变位来看，旧索拆除后，采用原索的无应力索长，通过将新索张拉至原索索力值（计算值），缆、梁线形回到了换索前的状态；
- 5）按照换索过程各阶段最不利受力情况计算得到的钢锚箱应力较小，主要均分布在 110 MPa 以内，远小于板件的设计强度（Q345D 钢强度设计值 260MPa），各板件应力状态能够满足安全要求；

6）针对临时吊索新增耳孔构造的计算分析，最不利情况下连接焊缝的抗拉强度、抗剪强度及弯剪应力均满足安全要求，换索新增板件与加劲梁原有板件的连接强度仍有相当的富余度。

5. 智慧吊索设计及监测方案

随着我国经济的迅猛增长和基础设施建设的持续加强，公路桥梁建设实现了飞速和全面的发展。早在 2009 年，我国的公路桥梁数量便已位居全球首位。近年来，我国公路桥梁的建设速度依然保持高位，每年新增桥梁数量在 2 万至 3 万座之间，这无疑标志着我国已成为当之无愧的桥梁建设大国。然而，我们也必须正视一个问题，即当前公路桥梁发展中普遍存在的“重建设、轻养护”现象。频繁发生的桥梁坍塌事故警醒我们，桥梁运营期间的健康监测与维护工作至关重要，这是确保桥梁安全、延长使用寿命的关键所在。

吊索是悬索桥结构中连接加劲梁与主缆的关键受力构件，主要由柔性高强度钢丝制成。然而，由于材料特性、外界环境及施工条件的影响，吊索容易遭受雨水等腐蚀介质的侵入，从而引发钢丝腐蚀问题。此外，在车辆、风等动力荷载的持续作用下，吊索钢丝将承受反复的循环荷载，进而导致疲劳损伤。这些因素共同作用，使得吊索的实际使用寿命往往低于预期设计年限。因此采用智能吊索监测系统对悬索桥吊索的受力状态、索体钢丝的服役环境进行长期监测，并对吊索剩余性能进行评估是确保吊索服役安全的重要手段。这一技术的应用，将有效提升桥梁安全管理的智能化水平，为预防潜在风险提供科学依据。

5.1. 监测技术原理

智能吊索采用光纤传感技术和温湿度传感技术，将光纤光栅应变传感器、微型温湿度传感器内置于吊索内部，实现对吊索钢丝应变、索体内部温度和湿度等参数的监测，为后续吊索的管养提供数据支撑。

5.1.1. 光纤光栅传感技术

光纤光栅传感技术是一种基于光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating, FBG）的传感技术，它利用光在光纤中传播时产生的反射和透射特性来感测外界物理量的变化。光纤光栅传感器具有灵敏度

高、抗干扰能力强、耐腐蚀、体积小、可远程监测等优点，广泛应用于结构健康监测、航空航天、石油化工、生物医学等领域。

光纤光栅传感器的基本原理是，当光纤受到外界物理量的影响（如温度、应力、压力等）时，其内部的光栅周期会发生变化，从而导致反射光的波长发生变化。通过检测反射光波长的微小变化，可以精确地获取外界物理量的信息。

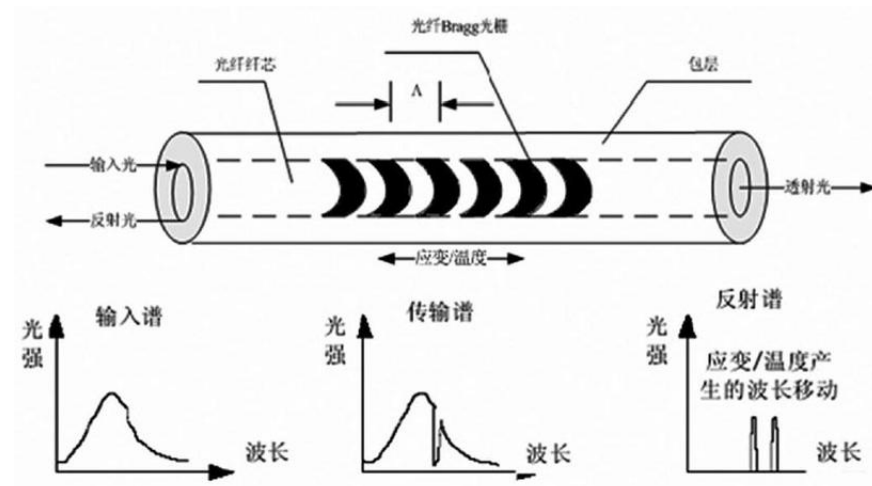


图 5.1-1 光纤光栅传感器结构与传输光谱示意图

5.2. 实施方案

5.2.1. 传感器安装

智能吊索传感器的安装是将光纤光栅应变、微型温湿度传感器分别布置于吊索外层钢丝（或紧贴外层钢丝放置），如下图所示。在吊索锚头灌锚完成后，在连接筒灌注填料前，将所有传感器进行封装及对延长线进行排布，再完成后续连接筒填料灌注，以及外漏延长线的保护。每根智能吊索沿着外层钢丝均匀布置 3 处光纤光栅应变传感器，1 处微型温湿度传感器。

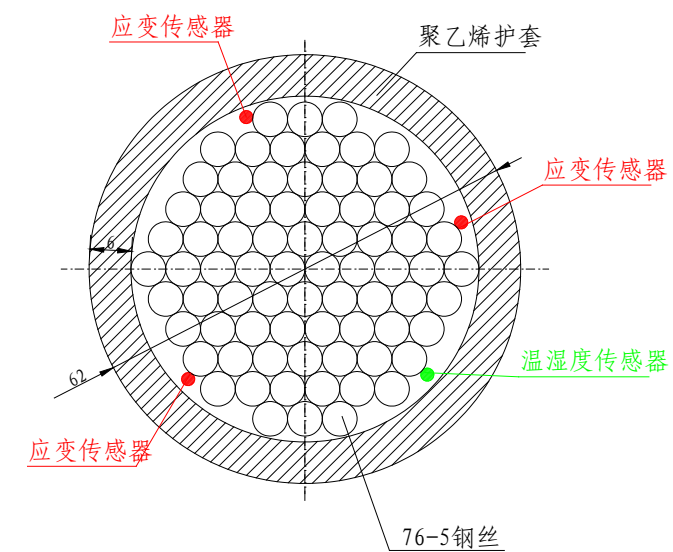


图 5.2-1 分布式感测光缆的安装示意图

5.2.2. 智能吊索制备

智能吊索的制作采用在吊索的生产过程中，将光纤光栅应变传感器及微型温湿度传感器埋植于索体内部，并从吊索锚固端的预埋钢管内引出信号线缆，从插耳中心孔穿出，完成智能吊索的制备，实现吊索的应力应变、温度和湿度等的自感知，如下图所示。

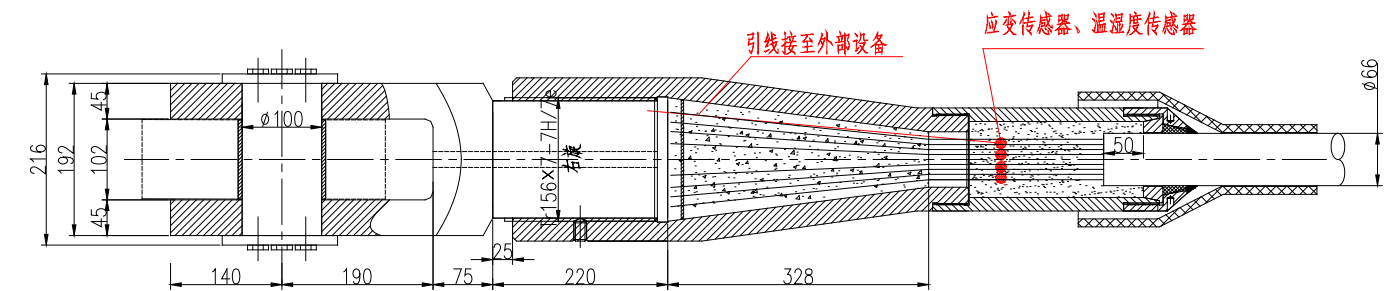


图 5.2-2 智能吊索内部传感器示意图

5.2.3. 系统组网

所有传感器的信号均通过延长线引至桥面，在将信号传送至桥头或监控中心进行数据集成。

5.3. 智慧索实施

借助本次对全桥剩余 140 根吊索更换契机，拟在新索中引入智能缆索，实现对吊索索力和内部钢丝温湿度的智能化监测，保障大桥安全可靠运营。

考虑到后期大桥运营阶段对智慧吊索的维护成本，以及安装智慧吊索的目的和必要性。本次可以借助吊索更换契机引入智慧吊索，通过智慧吊索对吊索索力实时监测，与大桥原有健康监测系统实现双预警校核机制。查阅相关文献资料，现阶段智慧吊索相关技术参数仍有待进一步研究，在工程结构中全面使用仍需时间验证。

综上所述，结合鱼嘴大桥结构形式，可对部分具有代表性的吊索采用智慧吊索，根据吊索的受力特征，选取右幅边吊索 1#吊索（两根吊索）、右幅中长吊索 10#吊索（两根吊索）及右幅短吊索 20#吊索（两根吊索）替换为智能吊索，全桥智慧索设置总数为 6 根。根据上述对智能吊索监测方法的描述，新索制造时按设计要求制作并引入相应的智能监测装置，安装后接入大桥健康监测系统或独立的智能缆索系统，实现吊索索力和内部钢丝所处温湿度的长期监测，并实现对吊索剩余性能长期评估确保吊索服役安全。

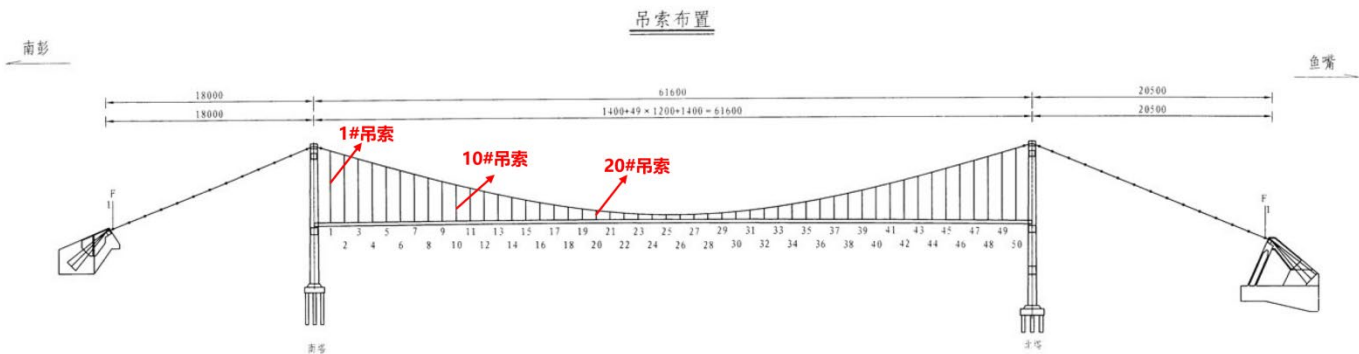


图 5.3-1 智能吊索实施示意图

5.4. 传感器技术指标

本次用于鱼嘴大桥智慧吊索传感器的相关指标参数如下表所示。

1、光纤光栅应变传感器

表 5.4-1 光纤光栅应变传感器技术指标

技术指标	技术参数
波长范围	1460nm~1620nm
量程	>5000 μ ε
定制中心波长偏差	±0.2nm
反射率	≥70%
3dB 带宽	0.4nm
栅区长度	5mm
边模抑制比	≥15dB
抗拉强度	≥150kpsi
工作温度	-40℃~300℃

2、光纤光栅解调仪

表 5.4-2 光纤光栅解调仪技术指标表

技术指标	技术参数
波长分辨率	1pm
波长重复性	≤5pm
扫描频率	100Hz
动态范围	40dB
通道光谱	带全光谱功能
通信接口	Ethernet/4G
工作温度	0℃~50℃

3、微型温湿度传感器

表 5.4-3 微型温湿度传感器技术指标

技术指标	技术参数	
精度	湿度	±1.8%RH（典型值）
	温度	±0.2℃（典型值）
分辨率	湿度	±0.01%RH
	温度	0.01℃
测量范围	-40℃~+125℃，0%RH~98%RH	
工作温度	-40~+85℃	
工作湿度	0~98%RH	

6. 索夹病害处治

6.1. 全桥索夹病害情况

查阅鱼嘴大桥近几年检测及专项检查资料，索夹存在较为典型的病害主要是索夹滑移及引起的主缆同步开裂。本次主要针对索夹滑移及引起的主缆开裂进行维修处治，全桥需要处治的索夹病害数量为 9 处。

表 6.1-1 鱼嘴大桥索夹典型病害

序号	病害位置	病害类型病害描述	评定标度
1	L50#索夹滑移、主缆开裂 L50#	索夹滑移 48mm，主缆保护层开裂	4
2	L7#索夹滑移、主缆开裂 L7#	索夹滑移 24mm，主缆保护层开裂	4
3	R2#索夹滑移、主缆开裂 R2#	索夹滑移 2mm，主缆保护层开裂	3
4	R38#索夹滑移、主缆开裂 R38#	索夹滑移 18mm，主缆保护层开裂	4
5	R39#索夹滑移、主缆开裂 R39#	索夹滑移 28mm，主缆保护层开裂	4
6	R42#索夹滑移、主缆开裂 R42#	索夹滑移 3mm，主缆保护层开裂	3
7	R43#索夹滑移、主缆开裂 R43#	索夹滑移 17mm，主缆保护层开裂	4
8	R47#索夹滑移、主缆开裂 R47#	索夹滑移 36mm，主缆保护层开裂	4
9	R50#索夹滑移、主缆开裂 R50#	索夹滑移 22mm，主缆保护层开裂	4

6.2. 索夹病害影响分析

6.2.1. 分析思路

从 2024 年鱼嘴大桥索夹检测情况来看，索夹主要存在滑移病害，并引起主缆对应位置的开裂，根据检测报告，索夹最大滑移量为 48mm，位于 L50#索夹。为分析索夹滑移对结构的影响，建立鱼嘴大桥整体模型，分别对索夹滑移前后的宏观力学参数进行对比分析。索夹滑移分析模型中采用检测报告中的最大滑移量数据作为分析参数。

6.2.2. 有限元模型

本节建立有限元模型分析索夹滑移影响，分别建立 50#索夹和 38#索夹滑移有限元模型，在索夹初始设计位置的基础上，按照索夹实际滑移情况，在滑移后的位置上建立分析模型，50#及 38#索夹滑移量均取 50mm。

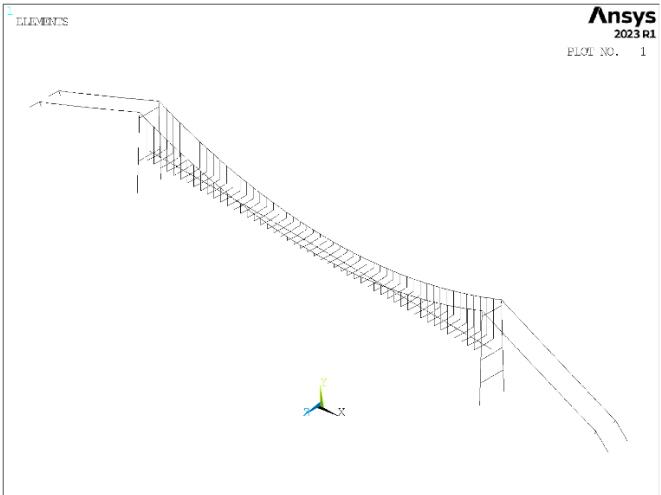
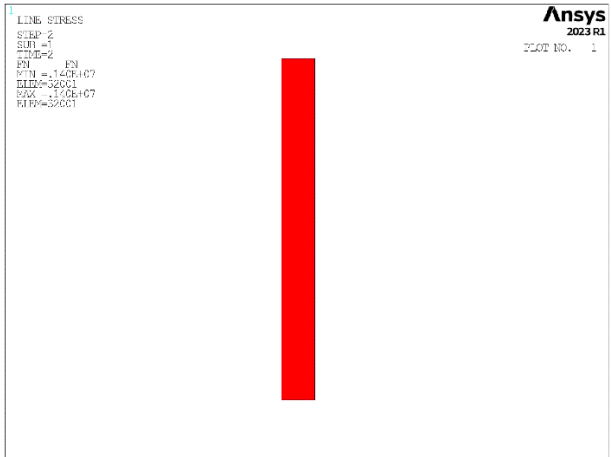


图 6.2-1 索夹滑移后有限元模型

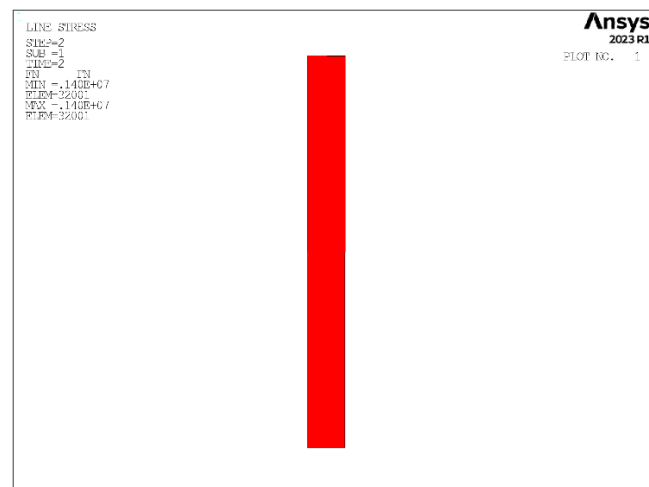
索夹滑移前后的整体分析模型采用的荷载、边界条件及材料属性等参数均与上文的成桥整体模型相同。

6.2.3. 索夹滑移影响

从索夹滑移前后的吊索索力、主缆内力、主缆倾角变化可知，50#索夹及 38#索夹滑移 50mm 后对吊索索力、主缆内力及主缆倾角的影响几乎可以忽略，索夹滑移对大桥的宏观受力影响较小。



a) 50#索夹滑移前吊索索力（单位：N）



b) 50#索夹滑移后吊索索力 (单位: N)

图 6.2-2 索夹滑移前后吊索索力

6.3. 索夹病害处治方案

根据上述对索夹滑移的影响分析结果,索夹滑移对结构的力学参数影响较小,但索夹滑移导致索夹与主缆防护出现裂隙,可能导致主缆钢丝加快腐蚀。因此,为防止索夹进一步滑移对结构产生不利影响,针对现阶段索夹滑移病害,借鉴目前国内其他桥梁的养护经验,本次针对鱼嘴大桥索夹滑移的处治主要分为两步,首先是对全桥存在滑移的9处索夹(共计936个索夹螺杆)进行螺杆力紧固,然后根据主缆防护层破损开裂情况对相应主缆进行防护层修复。待索夹滑移修复后建议后续对索夹滑移进行持续检测。

6.3.1. 索夹滑移修复

索夹滑移对结构的宏观受力影响较小,本次采用紧固索夹螺杆力的处治方式防止螺杆力的进一步下滑。针对主缆索夹滑移的维修方法一般是定期采用高强螺栓的施拧工具补足高强度拉杆的预拉力,使索夹与主缆的夹紧程度保持恒定,并使高强度拉杆的预拉力达到并保持设计值。

索夹螺杆力张拉时,采用千斤顶对索夹螺杆进行张拉。在张拉过程中,采用超声波测量仪对螺杆长度进行测试。由于螺母的约束作用,在螺杆上端所受拉力不断增大的过程中,螺杆长度(反映为超声波的声时值)会在张拉力为F时发生突变。F即为索夹螺杆预紧力。测试完螺杆的预紧力后,如果预紧力不足即可进行补张。补张采用千斤顶进行。补张完成后,可通过超声波测试仪测量补

张完成后的索夹螺杆预紧力。

借助本次换索契机,对鱼嘴大桥全桥索夹螺杆进行紧固,索夹螺杆紧固力按照原设计值恢复,每根螺杆力恢复至57t。

6.3.2. 主缆开裂修复

索夹滑移造成索夹与主缆接触面的主缆防护层破损开裂,降低了主缆耐久性,在完成索夹螺杆力紧固相关工作后,需对主缆防护层进行修复处治。

采用圆形缠丝+缠包带对主缆开裂区域进行处治修复。缠包带施工分为3个阶段,分别为:①环缝、直缝密封;②缠带及加热;③防滑层及颜色修补。3个阶段在梁段索夹距离内按顺序施工,不可交叉。

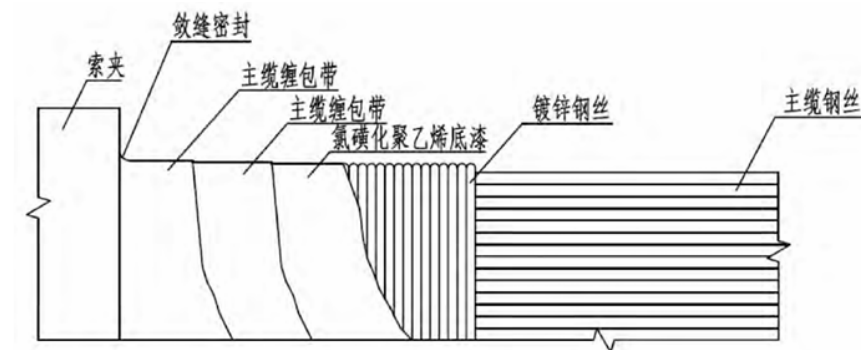


图 6.3-1 主缆缠包带纵向设计图

(1) 敛缝密封

对于直缝的密封较为简单,首先对密封处进行清洗;然后用方形塞橡胶填充至索夹(缆套筒)端面,最后刷涂一层聚氨酯面漆。方形塞橡胶用来填充索夹端部对缝的豁口,使索夹端部平齐。面漆是最后一道工序,为了防止色差,可以与整个主缆防护施工的最后一道工序,即防滑层及颜色修补工序一同进行。

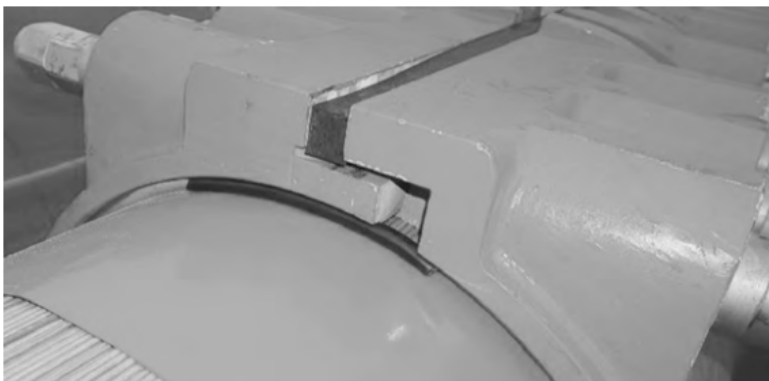


图 6.3-2 索夹直缝处封堵对缝

对于环缝的密封施工工艺如下图所示：



图 6.3-3 索夹环缝施工流程图

首先进行密封处的清理，缠带前需要用空压机将索夹内和缠带密封胶接触的部位吹干燥，保证后续密封胶的施工质量。然后手动缠起始带，并将起始带向内塞进索夹内，随后用密封橡胶进行填充并用工具塞入密封圈，紧接着进行外层胶涂装，对外部进行封闭。为保证质量，涂胶和密封圈的安装一般在相同时间进行。外层胶达到最佳强度后再进行最后面漆的施工。

(2) 缠带施工及加热

缠包带缠绕安装采用专用缠绕机进行作业。推动缠绕机与主缆平行进行缠绕缠包带操作，直至缠包带发生重叠。缠绕完成两圈后，开始一边缠绕，一边将缠包带朝着主索上方移动，并后逐渐形成重叠。叠合率采用 48%~49% 范围。按重叠度和张紧度的要求调整后，在一个索夹间距内从下至上开始缠绕弹性缠包带，此方向主要保证重叠时，每个重叠面均被覆盖。

缠绕重叠率不符合要求时，应反转缠绕机收回已经缠绕的部分，重新操作。缠绕机和索夹、气夹发生干涉时，可以采用手动方式进行操作，保证缠绕之后的缠包层表面平滑，不能出现胀鼓或松弛的现象。

缠包带需要搭接时，需要保证搭接面不能形成局部的积水可能，所以最佳搭接位置为主缆侧面（主缆顶部成 90° 角）。施工工序为：保持缠包带的张力，摊开剩余的带子，剪断缠包带以使连接处与主缆顶部成 90° 角；然后用连接胶带在背部将未固定的末端粘好。然后开始缠绕新卷，缠绕新卷时要有一个 50mm 的叠层，叠层的暴露端需方向向下。新卷缠绕 3 圈左右后，拆下重叠部位的固

定胶带，避免热熔后保证重叠层受热不均匀带来的质量问题。

缠完后的缠包带之间互相独立，需要使用加热器将缠包带热熔后硫化交联成整体。加热器是柔性气压抱紧的设计，能够适应主缆表面的不圆度，如下图所示：

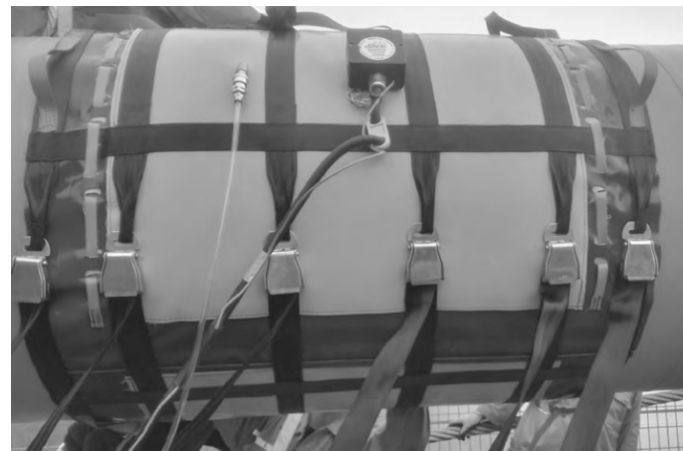


图 6.3-4 硫化交联缠包带加热示意图

采用加热器对缠包带进行加热，①首先将加热器扣在要硫化交联的部分的缠包带上，使用张紧带使得加热器保持一定的力度；②然后将加热器的一个热电偶插头插入控制器即可。接通控制器的电源，并将控制器的初始温度设置为 120℃（实际的使用温度根据实际施工时缠包带硫化交联的程度进行调节）；③打开加热器开关，经过一段时间，使加热器达到预定温度（通过现场试验使定时器和温度设置调整到不需过度加热而可获得最佳溶合效果的状态）；④当正在硫化交联的一段缠包带完成后，会有蜂鸣提示。加热器工作状态，通过定时器按钮来开启定时器。当加热器达到 95℃ 时就开启定时器，定时器最初设定为 6min，过 3min 把加热器转动 1/4 圈，然后再进行溶合，如果 6min 粘合不好，可以相应增加时间和温度；⑤用记号笔在主缆缠包带未加热区做记号，这样可以直观知道下一段硫化时加热套移动距离，如控制箱上的定时器所示加热 6 min 后，松开加热器向前移至下一个做记号的位置。⑥当还剩两个左右加热器长度的材料要硫化交联时，测量所剩加热器末端到索夹距离，如小于两个加热器距离，则先加热索夹部分再返回完成整个硫化交联工作；⑦主缆缠包带被熔合后，需要 10~15min 的自然冷却时间；⑧因为缠包带的顶部 30cm 需要防滑层最后硫化粘合，加热硫化需要单独控制

(3) 防滑层及颜色修补

选用与缠包带相同材料的防滑带，并采用促进硫化的黏合剂将防滑带粘在主缆表面，自然条件下，会发生缓慢硫化反应，从而让防滑层和缠包带成为一体。

最后，对主缆局部的颜色进行修补，主要是索夹环缝、索夹端部、缠包带接续位置等，消除局

部颜色差异。防滑层及颜色修补工序应在主缆全部施工的最后，以形成完美的交工效果。

7. 主要材料

7.1. 焊条

焊丝性能应符合《GB/T14957 熔化焊用钢丝》的要求。焊缝等级应满足《钢结构焊接规范》（GB 50661-2011）的要求，焊缝采用满焊，焊缝强度不应低于母材强度。

7.2. 新更换吊索

为使全桥更换后的吊索美观协调，剩余 140 根吊索更换后的永久吊索采用与早期更换的 60 根新索构造及材质一致。永久吊索要求如下。

（1）吊索采用规格为 $\Phi 5.3\text{mm}$ -73、公称抗拉强度 1860MPa 的高强镀锌铝合金钢丝，其技术指标符合《桥梁索缆用热镀锌或锌铝合金钢丝》（GB/T17101-2019）的规定，具体指标见下表 7.1；索股外包覆双层 HDPE 护套，护套材料技术指标符合《桥梁索缆用高密度聚乙烯护套料》（CJ/T297-2016）的规定，外层颜色采用国 RAL 际色卡标准，颜色代号为：9016。具体指标见下表。

表 7.2-1 高强锌铝合金镀层钢丝技术要求表

项 目		钢丝性能	试 验 及 检 验 方 法
直径	直径及公差	5.3±0.06m m	用精度为 1/100mm 的量具，量测同一断面处的最大和最小直径，两者的平均值为钢丝直径，两者之差为不圆度。
	不圆度	≤0.06mm	
机械性能	抗拉强度	$\sigma_b \geq 1860\text{MPa}$	试件两端夹固，钳口间距 350m,启动拉伸试验机缓慢加载至试件破坏，若从夹固处破断或有异常时需重做检验。考虑钢丝直径偏差影响，按下式计算实测抗拉强度：实测抗拉强=实测破断拉力/实测面积。
	屈服强度	$\sigma_{0.2} \geq 1660\text{MPa}$	试件两端夹固，钳口间距 350mm,启动拉伸试验机缓慢张拉至试件破坏，按实测面积得到应力-应变图，在应力应变图上与 0.2% 残余应变对应的应力值即为屈服强度。
	松弛率	≤2.5%	按 GB/T17101-2019 标准进行检查，初始应力相当于公称抗拉强度的 70%,1000 小时后的应力损失不大于 2.5%。
	断后延伸率	≥4.0%	试件及试验方法同上，标定距离为 250mm,加载直至破坏.重合破断后的试件，测定标定点之间的伸长值，按下式计算延伸率：延伸率=标定点之间的伸长量（mm）/250（m）
	弹性模量	（2.0±0.1）	试件及加载方式同屈服强度，在 70%屈服强度内确定应力应变

		× 105MPa	之间的关系（低应力状态）。
	反复弯曲数	≥5 次	取试件一段做 180°弯曲试验，弯曲圆弧半径为 3d,反复弯曲 5 次后，试件表面不得产生任何折损现象。
	缠绕性能	≥8 圈	取试件一段在 3 倍钢丝直径的试验芯杆上紧密卷绕 8 圈后不得发生任何折损或开裂现象。
镀层质量	镀层方式	锌铝合金	
	镀层附着量	≥260g/m²	试件长 30-60cm,称其重量（精确至 0.01g）,再泡入含锑（Sb）的盐酸液中，镀层溶化后再称其重量，两次重量之差即为镀层附着量，附着面积按镀层溶化后的实测平均直径计。
	硫酸铜试验	≥2 次	按 G32972-1991 标准，每次取一段试件，设置于硫酸铜溶液中 45s，迅速取出并立即用净水冲洗，以棉花擦干后钢丝表面不得发生挂铜现象。
	镀层附着性能	≥8 圈	将试件按规定圈数紧密缠绕在直径为 5d 的芯杆上，缠绕≥8 圈后试件镀锌层应附着牢固，不发生用裸手指能够擦掉的开裂、起皮、剥落现象。
	表观质量	优良	钢丝的表观质量应光滑、均匀、无疤点、裂纹、毛刺、机械损失、油污，锈斑及有害附着物。
	锌纯度	99.95%	
直 线 性	钢丝自由翘头 高度	≤15cm	5m 长钢丝在自由状态下，置于平面上时，端部上翘值不得大于 15cm。
	自由弯曲直径	≥8m	
	钢丝长度		每盘钢丝（含抽丝盘条）中均不得存有任何形式的接头，并留有一定余量供检测取用。

表 7.2-2 平行钢丝吊索原材料—高密度聚乙烯护套料主要技术要求

序号	项 目	单位	指标	
			H 型	C 型
1	密度	g/cm³	0.940～0.955	
2	熔体质量流动速率	g/10 min	≤0.45	
3	拉伸断裂应力	MPa	≥25	
4	拉伸屈服应力	MPa	≥15	
5	断裂标称应变	%	≥400	
6	拉伸弹性模量	MPa	≥500	
7	弯曲弹性模量	MPa	<1000	
8	简支梁缺口冲击强度	kJ/m²	≥50	
9	邵氏硬度	—	≥50	

10	耐环境应力开裂 Fo>5000 h	—	通过	
11	脆化温度<-76 ℃	—	通过	
12	耐热应力开裂 F。 >96 h	—	通过	
13	200 ℃氧化诱导期	min	≥ 60	
14	耐荧光紫外老化 3000 h 拉伸断裂应力变化率 断裂标称应变变化率	%	± 25	
		%	± 25	
15	耐光色牢度	级	—	≥ 7
16	炭黑分散	级	≤ 3	—
17	炭黑含量	%	2.5 $\pm$ 0.3	—

（2）锚杯

吊索锚杯采用 ZG20Mn 铸钢铸造，应符合《大型低合金钢铸件技术条件》（JB/T6402-2018）的规定。毛坯调质处理，成品硬度 150～190HB，喷砂（Sa2. 5）表处后电弧喷锌，锌层厚度不小于 100 μ m。

锚具内铸体为锌铜合金，合金成分为 Zn-2：（98 $\pm$ 0. 2%），Cu-2：（2 $\pm$ 0. 2%），其中 Zn-2 为《锌锭》（GB/T470-2008）的 Zn99. 99；Cu-2 为《阴极铜》（GB/T467-2010）的 1 号标准铜。

（3）叉耳及销轴

叉形耳板采用 40Cr，材料化学成分及机械性能符合《合金结构钢》（GB/T3077-2015）的要求。毛坯调质处理，成品硬度 270～320HB，喷砂（Sa3. 0）表处后电弧喷锌，锌层厚度不小于 100 μ m。销轴采用 40CrNiMoA 合金钢，材料化学成分及机械性能均应符合《合金结构钢》（GB/T3077-2015）的规定。毛坯调质处理，成品硬度 HRC30～35，加工完成后表面一级光亮镀硬铬，厚度 20～40 μ m。

（4）衬套

衬套采用铸造铜合金 ZQSn5Pb5Zn5+SL1 材质，原材料化学成分及机械性能符合设《铸造铜及铜合金》（GB/T1176）。

7.2.1. 新更换吊索与原设计对比

原设计吊索索股采用 ϕ 5. 0mm-76 的镀锌高强钢丝，公称抗拉强度 1670MPa，吊索索股外包 PE 套防护。吊索锚杯采用 2G310-570 铸钢铸造，锚杯内浇注由 98%锌和 2%铜组成的锌铜合金。吊索耳

板采用 35 号锻钢。销轴用 40CrNiMoA 合金钢。

本次更换拉索设计采用吊索规格为 ϕ 5. 3mm-73、公称抗拉强度 1860MPa 的高强镀锌铝合金钢丝，吊索索股外包覆双层 HDPE 护套。吊索锚杯采用 ZG20Mn 铸钢铸造，锚杯内浇注由 98%锌和 2%铜组成的锌铜合金。吊索耳板采用 40Cr。销轴采用 40CrNiMoA 合金钢。

表 7. 2-3 新更换吊索与原设计对比表

项目	明细		
	原吊索	新更换吊索	性能提升
吊索钢丝	公称抗拉强度 1670MPa 的 ϕ 5. 0mm-76 镀锌高强钢丝	公称抗拉强度 1860MPa 的 ϕ 5. 3mm-73 高强镀锌铝合金钢丝	新更换吊索为高强镀锌铝合金属丝，相较原设计镀锌高强钢丝，其表面镀层耐腐蚀性更好。
吊索 PE 护套	双层 PE	双层 HDPE	新更换吊索 HDPE 材料相较 2009 年 PE 材料其耐久性更好，使用寿命更长。
吊索锚杯	ZG310-570 铸钢	ZG20Mn 铸钢	新更换吊索锚杯采用 ZG20Mn 铸钢铸造，其铸造性能优于原吊索 ZG310-570
吊索耳板	35 号锻钢	40Cr	新更换吊索耳板材料为 40Cr，其机械性能较 35 号锻钢更好。
吊索防雨密封罩	无	热熔 HDPE 防雨密封罩	新更换吊索采用热熔 HDPE 防雨密封罩，为全封闭防雨密封罩，可有效避免雨水渗入索体。
销轴衬套	衬套采用 DU 复合材料	衬套采用 ZQSn5Pb5Zn5+SL1 材质	新更换吊索衬套具有较高的力学性能、减磨性能和耐蚀性，易切削加工，钎焊和焊接性能好。

7.3. 主缆圆形钢丝

主缆采用镀锌圆形钢丝材料缠丝，其性能要求应满足《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》（GB/T 17101-2019）相关规定。

表 7. 3-1 镀锌钢丝性能指标

项目	性能参数
钢丝直径	4mm+0. 09mm；4mm-0. 07mm
抗拉强度	≥ 365 MPa
延申率	$\geq 12\%$ （试样标距 100mm）

锌层含量	300g/m2
弹性模量	(2.0±0.1) ×105MPa
反复弯曲	≥5 次
镀层均匀性	≥5 次（每次 60s）硫酸铜溶液试验

7.4. 主缆缠包带

钢丝外采用 2 层缠包带对主缆进行缠绕，设计叠加率 52%，形成双层构造，缠包带需加热充分硫化。缠包带采用氯磺化聚乙烯复合带，3 层结构（氯磺化聚乙烯+纤维加强层+氯磺化聚乙烯），其材料性能应满足《高分子防水材料 第 1 部分：片材》（GB 18173.1-2012）相关规范要求。

表 7.4-1 主缆缠包带材料参数

序号	项目		指标	参考标准
1	厚度		1.20±0.10	GB 18173.1-2012 复合片硫化橡胶类 FL
2	拉伸强度/（N/cm）	常温（23℃）	≥180	
		常温（60℃）	≥120	
3	拉断伸长率（%）	常温（23℃）	≥20	
		常温（60℃）	≥15	
4	抗撕裂强度（N/mm）		≥50	
5	不透水性（0.3MPa，30min）		无渗漏	
6	低温弯折（-40℃）		无裂纹	
7	加热收缩量（mm）		4±2	
8	臭氧老化（40℃×168h，臭氧浓度：200PPM）		无裂纹	
9	粘结剥离强度（片材与片材）（130℃×3min）	标准试验条件（N/mm）	≥5	GB/T 531.1
		浸水保持率（23℃×168h）	≥90%	
10	硬度，邵氏 A		85±5	HG/T 3827
11	含胶率		≥50%	GB/T 10707
12	阻燃型（特殊型号）		FV0	

7.5. 密封胶

密封胶物理性能应满足《硅酮和改性硅酮建筑密封胶》（GB/T 14683-2017）相关规定，其性能指标见下表：

表 7.5-1 硅酮建筑密封胶的理化性能

序号	项目		技术指标							
			50LM	50HM	35LM	35HM	25LM	25HM	20LM	20HM
1	密度/（g/cm3）		规定值±0.1							
2	下垂度/mm		≤3							
3	表干时间 ^a /h		≤3							
4	挤出性/（ml/min）		≥150							
5	适用期 ^b		供需双方商定							
6	弹性恢复率/%		≥80							
7	拉伸模量 /MPa	23℃ -20℃	≤0.4 和≤ 0.6	>0.4 或>0.6	≤0.4 和≤ 0.6	>0.4 或>0.6	≤0.4 和≤ 0.6	>0.4 或>0.6	≤0.4 和≤ 0.6	>0.4 或>0.6
8	定伸粘结性		无破坏							
9	浸水后定伸粘结性		无破坏							
10	冷拉-热压后粘结性		无破坏							
11	紫外线辐照后粘结性 ^c		无破坏							
12	浸水光照后粘结性 ^d		无破坏							
13	质量损失率/%		≤8							
14	烷烃增塑剂 ^e		不得检出							
a：允许采用供需双方商定的其他指标值。 b：仅适用于多组分产品。 c：仅适用于 Gn 类产品。 d：仅适用于 Gw 类产品。 e：仅适用于 Gw 类产品。										

7.6. 原材料送检要求

本次换索实施涉及的上述原材料，在实施进场前应满足上文中相关原材料的基本指标，对于表中没有覆盖的指标应满足文中相应规范的要求。

8. 施工工序及要求

8.1. 吊索更换顺序

本次针对鱼嘴大桥剩余 140 根吊索进行了换索方案设计，根据吊索位置不同将其分为三类，根

据吊索实际受力形式分别采用了不同的换索方案。为保障换索工作的有序进行,同时减小实施难度,提高换索效率,保障换索过程安全可靠,顺利在预定工期内完成本工程,换索实施采用左右幅对称同步更换。本次换索采用如下换索顺序。

1) 首先对第一类吊索(9#-20#及31#-42#吊索)采用三点法进行更换,并由跨中向主塔侧逐步更换,即按照20#-19#-18#-...-9#、31#-30#-29#-...-42#的顺序实施换索;

2) 完成第一类吊索更换后对第二类吊索(5#-8#及43#-46#吊索)采用五点法进行更换,并按照8#-7#-6#-5#、43#-44#-45#-46#的顺序实施换索;

3) 完成5#及46#吊点换索后,保留3#、4#及47#、48#吊点临时索,并安装1#、2#吊点临时吊索。按照设计要求一次按照4#-3#-2#-1#、47#-48#-49#-50#的顺序一次完成换索。对1#-4#及47#-50#吊索时,安装并张拉非更换位置的临时吊索至10t,如更换4#(或47#)吊索时,保留3#、5#吊点临时吊索,将非更换吊点位置的临时吊索其卸载至10t,同时安装1#、2#吊点临时吊索并张拉至10t。

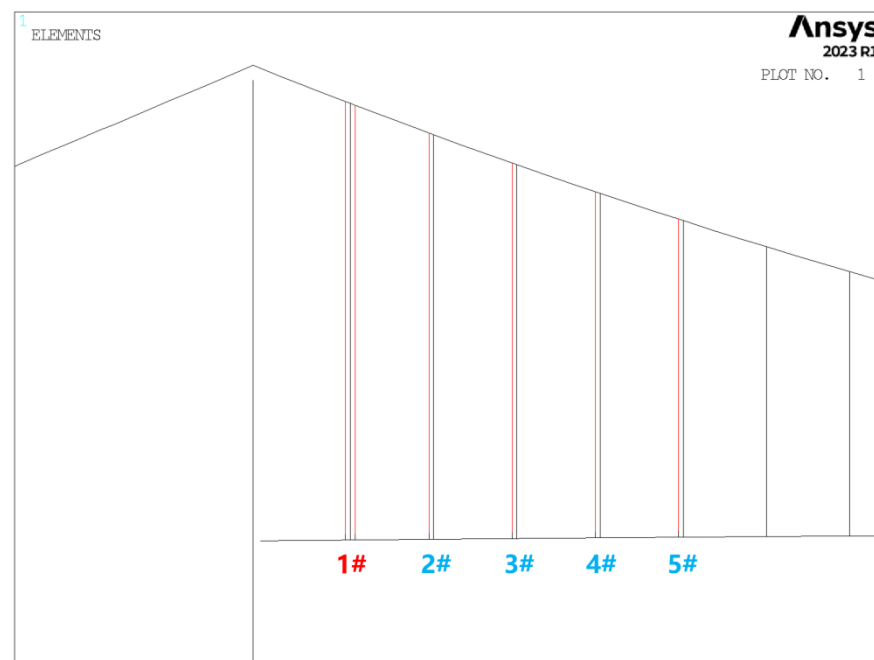


图 8.1-1 1#吊点更换临时吊索安装示意图(红色为临时吊索)

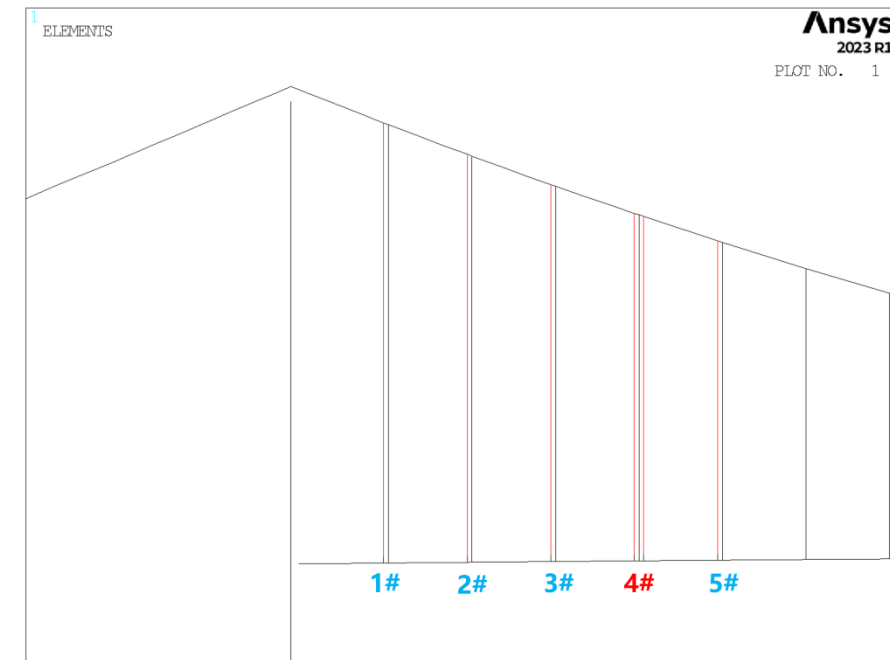


图 8.1-2 4#吊点更换临时吊索安装示意图(红色为临时吊索)

8.2. 主要施工工序

8.2.1. 多点法更换吊索施工

本次对鱼嘴大桥9#-20#、31#-42#采用三吊点更换方案,5#-8#及43#-46#吊索采用五吊点更换方案。三吊点更换即是对所更换的吊索前后临近两各吊点安装并张拉临时吊索,每更换一个吊点的吊索需同步张拉三各吊点的临时吊索。五吊点更换即是在更换吊索前后相邻两各吊点张拉临时吊索,每次更换一个吊点的临时吊索,需同步张拉五个吊点的临时吊索。多吊点主要施工工序如下。

1、施工挂篮

对于离桥面较高的吊索,考虑施工的安全性和便捷性,采用移动式平台作为吊索更换的主缆端施工平台。

①施工挂篮的安装

施工挂篮在桥面拼装完成后,利用汽吊进行安装。

②挂篮就位

挂篮就位后,接通挂篮电源,将牵引钢丝绳一端系于挂篮上方索夹上,利用挂篮上安装的电动绞车,拖拽挂篮缓慢移动至工作位置,将挂篮固定在主缆上,防止挂篮移动或侧翻。

2、临时索夹安装

①卷扬机就位：将 5T 卷扬机布置于人行检修道上，卷扬机四脚焊接限位板，保证卷扬机牢靠，为了防止钢丝绳污染主缆，卷扬机钢丝绳采用镀锌钢丝绳。

②临时索夹安装：用卷扬机将临时索夹吊运至施工平台位置。再利用手拉葫芦将索夹掉起，解除卷扬机钢丝绳，利用手拉葫芦调整索夹位置，将索夹吊装至安装位置临时固定。

③临时索夹预紧：利用螺栓拉伸器对索夹螺栓进行紧固，防止索夹滑移。采用液压螺栓拉伸器对永久索夹螺栓预紧力进行补充，使索夹螺栓预紧力不低于 50t，满足吊索更换过程中索夹抗滑移要求。

④永久索夹复紧：利用铜丝刷去除索夹螺栓上的油漆及其他涂装材料，根据设计要求将螺栓拉伸至 57t。

3、临时吊索安装

①临时索上叉耳安装：利用卷扬机将临时索叉耳段吊至安装位置，利用手拉葫芦调整，完成叉耳销轴的安装。

②临时索下叉耳安装：通过汽车吊吊起转换工装安装在梁面叉耳板上，安装张拉杆，将转换装置与临时吊索下锚头连接，完成临时索安装。

4、新吊索更换

①根据监控指令要求，同步启动油泵千斤顶，分级张拉临时吊索，并配合监控单位对各监测点进行观测，确保换索过程平稳有序，发现异常及时报告，排查隐患后继续施工。

②在临时吊索张拉过程中，观测待更换吊索的情况，并不断敲击下耳板中销轴，根据待更换吊索弯曲状况以及销轴声音判断待更换吊索索力状况，直至敲出下端销轴或使待更换吊索达到可拆卸状态。

③提升旧索，将旧索上耳板中的销轴敲出，先用汽吊取出旧索下锚头，卷扬机吊住上锚头，缓慢下放卷扬机，并利用汽吊辅助旧索，下放至桥面应急车道内。

④处理耳板连接处密封胶，取出销轴衬套，检查耳板叉耳孔有无损伤，测量销孔直径，确保衬套符合安装要求。利用工装安装新衬套。利用卷扬机汽吊新索上叉耳，至挂篮位置，再利用手拉葫芦，调整位置后完成上叉耳的安装，下叉耳的安装，利用汽吊辅助完成。

8.2.2. 近塔吊索更换施工

根据上文新增吊耳孔的双孔换索方案思路，由于边吊索所在梁段与梁端伸缩缝及支座距离较近，伸缩缝的变形对加劲梁竖向位移较为敏感。因此，在整个换索过程中要始终控制加劲梁的竖向位移和梁端转角，以免造成梁端伸缩缝及其他边界约束装置的损坏。基于这个原则，本次换索采用索体局部张拉、切割旧索的基本思路进行，以保证梁端伸缩缝及支座处于安全状态。结合上述双孔换索方案的步骤，整个换索过程分为如下几个主要阶段。

1、锚箱耳板构造处理

由于鱼嘴大桥钢箱梁锚箱预留换索孔仅有一个，欲采用较为保守的双孔换索方案需要再吊索更换实施前，对现状耳板进行一定的构造连接处理。各受力板件的构造连接处理如下。

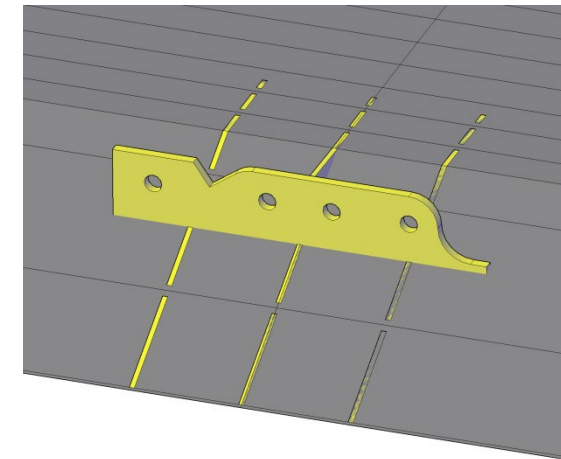


图 8.2-1 新增吊耳孔够构造示意图

2、安装临时索夹

在需安装临时索夹位置下方设置转向滑轮，转向滑轮也需和桥面安全栏杆底座固定牢靠。用卷扬机将临时索夹吊运至施工平台位置，再利用手拉葫芦将索夹吊起，解除卷扬机钢丝绳，调整索夹位置，将索夹吊装至安装位置临时固定。

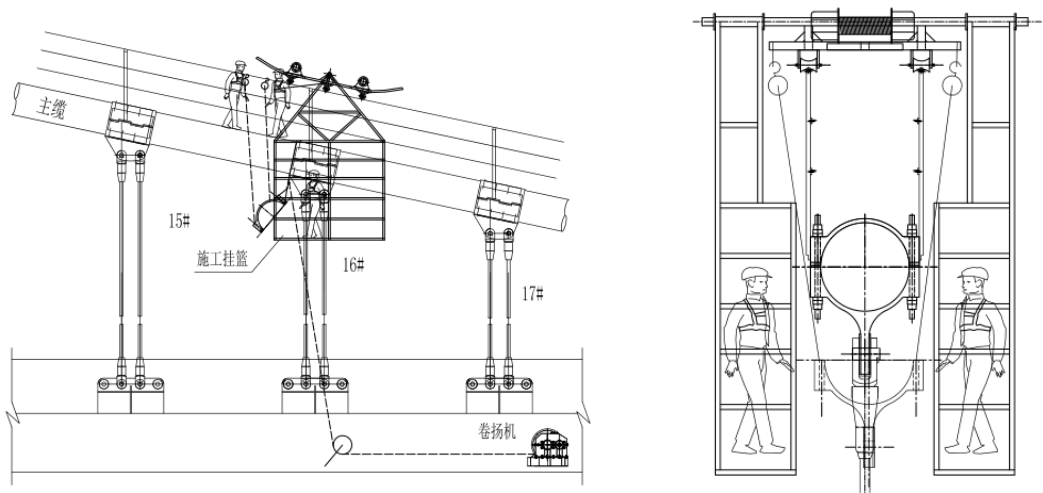


图 8.2-2 索夹就位

利用螺栓拉伸器对索夹螺栓进行紧固，防止索夹滑移。采用液压螺栓拉伸器对永久索夹螺栓预紧力进行补充，使索夹螺栓预紧力不低于设计预紧力，满足吊索更换过程中索夹抗滑移要求。



图 8.2-3 索夹预紧工作图

3、安装临时吊索

为保障换索各阶段能够有效安全实施，在完成 5#、46#吊索更换后，保留 3#、4#及 47#、48#吊点位置的临时吊索，并安装 1#、2#及 47#、48#临时吊索。

通过汽吊将临时吊索放入放索盘中，放出上端叉耳，利用卷扬机将临时索叉耳段吊至安装位置，利用手拉葫芦调整，完成叉耳销轴的安装。汽车吊吊起转换工装安装在梁面叉耳板上，安装张拉杆，将转换装置与临时吊索下锚头连接，完成临时索安装。安装临时吊索张拉千斤顶，并连接油泵，做好张拉准备。

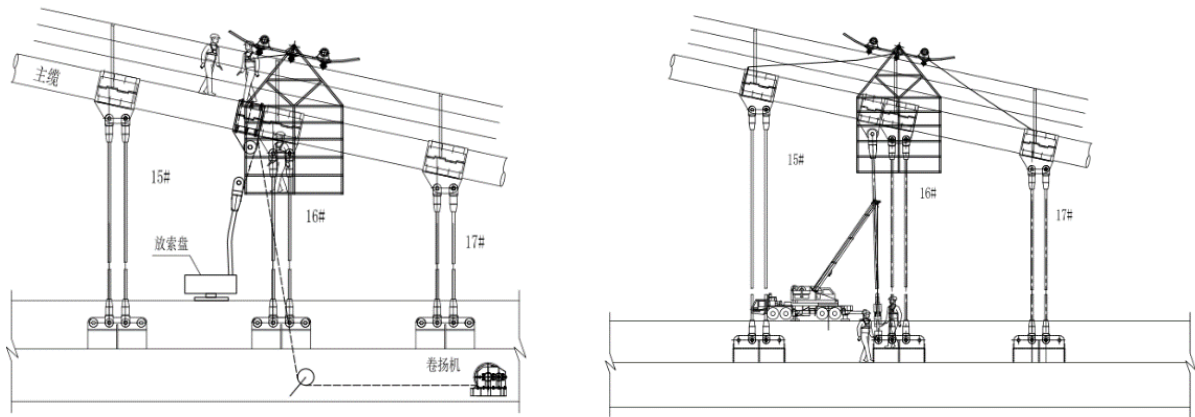


图 8.2-4 临时吊杆及转换工装安装

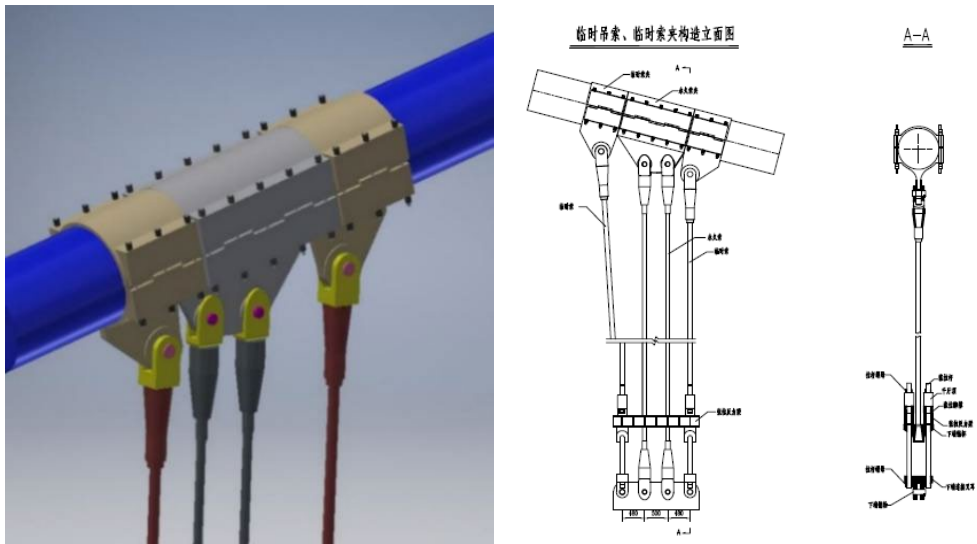


图 8.2-5 临时吊索安装完成状态图

4、张拉临时吊索至计算值

接通油泵和千斤顶的油管，检查精密压力表是否与千斤顶相符，在未张拉之前，可以在空载的情况下活动两个行程，确保千斤顶在张拉时无任何问题。张拉千斤顶和油压表必须在张拉前进行标定，根据拉索张拉力进行张拉。根据监控指令要求，同步启动油泵千斤顶，将临时索一次张拉至计算值。并配合监控单位对各监测点进行观测，确保换索过程平稳有序，发现异常及时报告，排查隐患后继续施工。

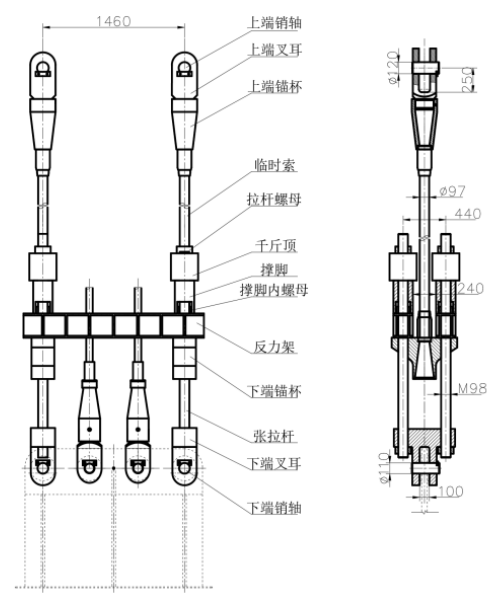


图 8.2-6 临时拉索张拉反力梁装置

5、旧索安装临时拉杆

临时索张拉值预定索力值后，利用专用设备，将临时拉杆与旧索牢固连接，临时拉杆采用双拉杆形式，以保障拉杆的轴向刚度，减少后续割索时对加劲梁的影响。

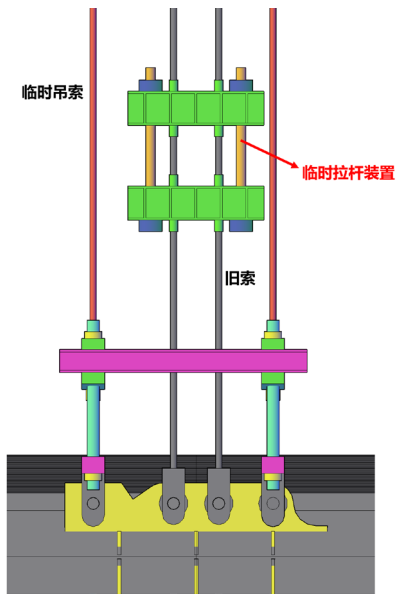


图 8.2-7 旧索临时拉杆安装

6、张拉临时拉杆装置

根据上述的计算分析和整体换索思路，在索体中下部安装临时张拉装置后，对临时拉杆张拉至计算值，此时临时拉杆间的索体处于无应力状态。

7、切割旧索

旧索的拆除采用割断法，利用临时吊索、临时拉杆以及专用切割工具来割断旧索。旧吊索拉杆区段索体的全部索力转移至临时拉杆。为下一步拆除旧索做好准备。

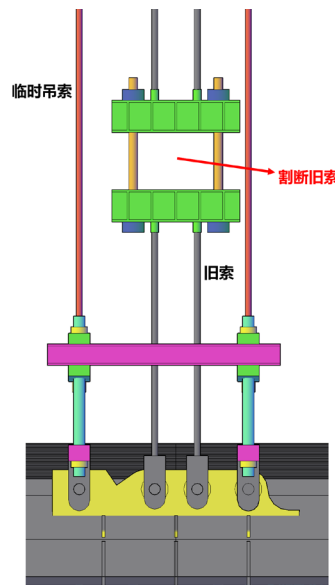


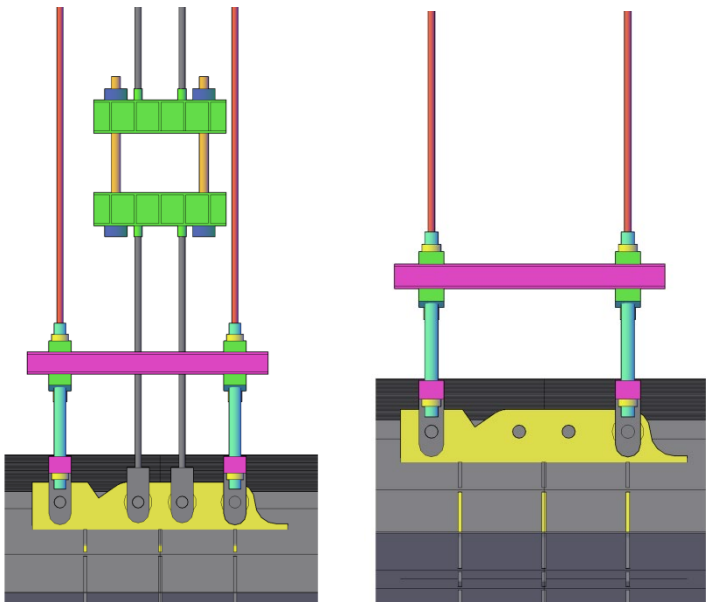
图 8.2-8 切割临时拉杆间的旧索

8、放松临时拉杆装置

通过对临时拉杆逐渐放张来实现旧索索力逐步转移至临时吊索上，为尽量减少临时拉杆放张对结构的扰动，现场实施应控制放张速率。

9、拆除旧索

旧索割断后，剩余索力转移至临时拉杆，通过调整临时拉杆上端螺栓使拉杆和上下端旧索索体中的内力全部转移至临时吊索，此时旧索索体内力被完全卸载，通过拆卸工具将旧索下端销轴和上端叉耳拆除，完成旧索的拆除工作。



a) 放松临时拉杆 b) 拆除旧索
图 8.2-9 旧索拆除

11、安装新索

利用临时索上的反力梁装置以及安装在新索下锚头上的千斤顶实现新索的安装。新索安装步骤如下：

①利用卷扬机汽吊起吊新索上叉耳，至挂篮位置，再利用手拉葫芦，调整上叉耳的位置，上叉耳销轴孔与索夹销轴孔处于同心位置时，安装销轴及挡板，完成上叉耳的安装。



a) 上锚头就位 b) 上锚头安装

图 8.2-10 新索上端叉耳安装

②利用汽吊将下叉耳起吊至高出换索工装反力架的位置，使下叉耳垂直通过两个反力架中间直至安装位置。

③下叉耳的安装需要利用新索下端千斤顶来张拉安装，安装好顶推工装，用千斤顶顶推反力架，

将力施加给下端锚杯来拽拉新索，使得叉形耳板销轴孔与梁端锚板销轴孔处于同心位置时，安装上销轴，完成下叉耳的安装。

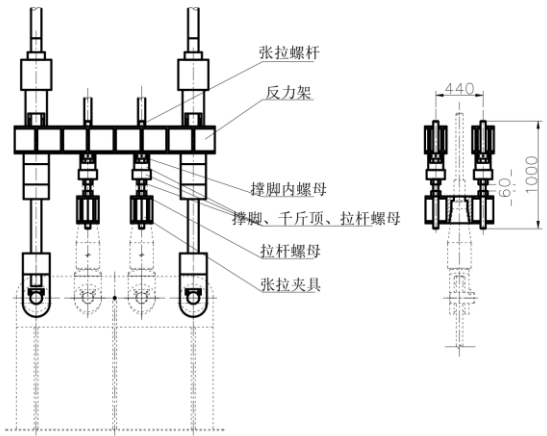
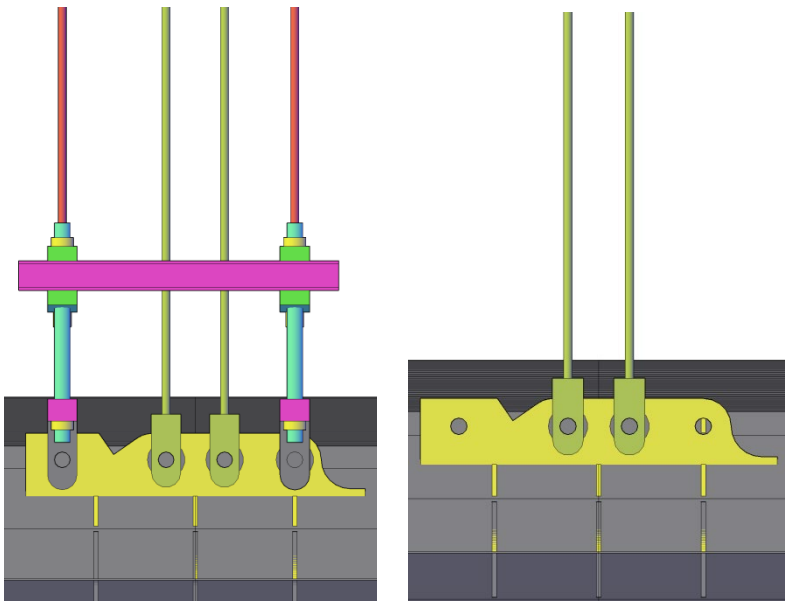


图 8.2-11 新索安装张拉装置



a) 新索安装 b) 临时索拆除

图 8.2-12 完成吊索更换

④新吊索换完后，临时吊索卸压，并松开主拉杆上的螺母，重复上述操作，直至新索完全张紧。

⑤配合监控单位测量新吊杆上下耳板孔距离以及新吊索索力，若同设计要求偏差较大，需进行调整，直至满足要求。

8.2.3. 焊接施工

边吊索（1#-4#、47#-50#吊索）采用无应力切割方案更换，现场涉及新增吊耳构造板件的焊接，下吊点锚拉板板厚达到 60mm，采用对接焊缝连接时，需对双边采用开坡口熔透焊接，焊接施工为带应力作业。焊接采用在锚拉板两侧采用“S 形”绕边焊，保障焊缝质量，即对内侧焊接一段后焊接一段外侧。

（1）表面打磨
用砂轮清除坡口及焊缝两侧 30mm 范围内的油漆、油污及杂物，见钢材金属。焊前 15 分钟以内用火焰清除水份，至少两遍，钢板温度 100℃~150℃。

（2）坡口加工
用炭弧气刨法开坡口，再用硬质合金磨头打磨匀顺。
坡口断面应尽可能小，但坡口角度应≥30°。
坡口形式：可选 N 型坡口。

（3）焊接
钢板清理、开坡口后即刻焊接，间隔不得超过 1 小时。
雨雪天、环境相对湿度＞80%、环境温度＜5℃等天气不得焊接施工。
焊工应能熟练掌握直线运条、摆幅式运条、螺旋式运条等技能，焊接出质量合格的焊缝。
焊接方法原则上采用小线距量气体保护焊，推荐选用 $\phi 1.2 \sim \phi 1.6\text{mm}$ 实心焊丝富氩气体（80%氩气+20%CO2 气）保护焊。

预热及后热，当环境温度>10℃时，预热 100℃；当环境温度≤10℃时，预热 120℃，预热范围以焊接线为中心线 300mm 范围内，采用电阻丝预热。预热温度以起弧施焊是距焊缝中心线 30mm 处实测温度为准。

后热采火焰加热法。应焊后即刻进行，后热温度约 100℃~150℃。
焊后进行外观和内部无损检测，确保焊缝质量。

8.3. 施工要求

8.3.1. 索体中部夹具安装

边吊索（1#-4#、47#-50#吊索）采用两套换索工装无应力切割换索，在临时吊索张拉后，需要在索体中部安装并张拉临时拉杆装置。索体中部张拉装置是本方案实施的关键，为保障临时拉杆装置与索体有效锚固，在安装临时拉杆装置前需向将待更换旧索 PE 护套剥除，将张拉装置安装至旧索钢丝索体上，并有效锚固。

8.3.2. 耳板焊接热应力消除

鱼嘴大两江大桥下吊点擦用单备用换索孔构造，近塔吊索的更换采用新增吊耳孔孔无应力切割的方式实施更换，在锚板位置焊接钢板保障临时吊索张拉，由于锚板较厚，为消除焊接热应力，保障板件连接的可靠性和耐久性，在焊接前、焊接过程中、焊接后应采用预热及焊后锤击等措施消除热应力。

预热及后热，当环境温度>10℃时，预热 100℃；当环境温度≤10℃时，预热 120℃，预热范围以焊接线为中心线 300mm 范围内，采用电阻丝预热。预热温度以起弧施焊是距焊缝中心线 30mm 处实测温度为准。

在焊缝冷却过程中用锤子敲打，使之发生塑性变形，释放部分内应力。焊后应按专业工程师意见进行修磨和超声波锤击焊趾，以利提高疲劳抗力。

焊后进行外观和内部无损检测，确保焊缝质量。

8.3.3. 防腐要求

本次针对 1#-4#、47#-50#吊索采用无应力切割方式更换，下吊点锚拉板处新增一个吊耳孔，新增板件与原锚拉板采用焊接方式连接，待换索实施完成后，新增吊耳孔可作为永久构件用于后续吊索更换维修。施工对过程中对下吊点各板件涂装有损伤的地方，在施工完成后需按照原设计涂装进行恢复。

对其他有因换索施工引起的结构涂层破坏等因素，应对其按照原设计状态进行复原。

8.3.4. 吊点叉耳设计尺寸

查阅鱼嘴两江大桥设计文件资料及运营养护资料，鱼嘴大桥各吊点叉耳实际尺寸与设计尺寸存在细微差异，为保障各吊点新索安装顺畅可靠，新索制造前需对现场各吊点待换吊索叉耳尺寸进行实地测量，本方案图纸中的叉耳尺寸可依测量结果作适当调整，对调整后的数据资料应经业主单位、设计单位及监理单位核实并同意后方可进行新索制造。

8.3.5. 误差控制要求

桥梁施工过程中，施工监测与施工跟踪计算值之间的误差限值宜符合下表规定。

表 8.3-1 误差限值

项 目		误差限值
吊索索力		±10%
主缆基准索架设后线形（高程）	主跨跨中	跨径的±1/20000
	边跨跨中	主跨跨中的 2 倍
上下游基准索股高差		10mm
主缆形成过程中基准索和其他观测索股线形（高程）		-5mm，+10mm
结构应力（钢箱梁）	计算值不大于 10MPa	±10.0MPa
	计算值大于 10MPa	±10%，且不超过±20.0MPa

8.3.6. 其他

- 1、吊索更换时，锚头拆除过程严禁使用热切割等方式对销轴实施破坏性拆卸；
- 2、其它未尽事宜，由业主、监理单位、设计单位和施工单位协商解决。

8.4. 施工工期

根据本项目工作内容和现场实施条件，结合前期第一批吊索处治工作开展情况，本次针对剩余 140 跟吊索的更换，施工工期暂定 90 天。

8.5. 注意事项

- 1) 施工单位应认真阅读设计说明和设计图纸，领会设计意图，对设计图中各部位尺寸、标高、工程数量进行认真复查，发现问题应及时与设计单位联系。在未核实确认前，施工单位不得进行吊杆生产或其他材料的采购和施工。
- 2) 设计交底、竣工验收时需通知设计单位到场，施工关键工况或工艺需通知设计单位到场。
- 3) 施工前应详细收集相关资料，除本设计文件外，应仔细核查检测报告、原桥设计文件、原桥竣工图纸，注意各类构件可能对施工造成影响的组件位置。施工单位应进行详细施工组织设计，并由业主组织专家进行评审后，方可实施。
- 4) 为保证施工安全、结构安全及工作的顺利开展，在施工前必须对施工机具、临时设备及其它保障措施进行详细检查、核对，在确保万无一失后方可施工。
- 5) 本项目存在现场带应力焊接，施工时应注意作业人员各方面的防护、施工用电、用火等的安全。
- 6) 应注意支架、吊架的稳定，高空及水上施工时应系好安全绳，确保施工安全。桥面如需预留临时通道，则施工单位应做好临边防护，防止车辆坠河。
- 7) 施工中对易燃、易爆、有毒、有害、有腐蚀性的物质应进行集中管理，统一排放，采用的结构用胶等材料均应对人体无毒害作用，施工人员应根据使用加固材料采取相应的劳动保护措施。
- 8) 施工单位对施工过程中可能出现的各种安全、环保隐患应制定各项应急预案。
- 9) 本次设计是根据检测报告进行的，检测并不能反映所有的病害类型。业主在后期的养护中如发现检测报告和本设计图纸中未涉及的病害类型或既有病害有所发展，应引起高度重视并及时处治。
- 10) 应选择具有相应施工监控资质和相关施工监控经验的单位对本项目的施工过程进行监控，确保施工过程安全，达到设计目标。
- 11) 应选择具有相应施工资质和相关施工经验的单位进行本项目的施工。
- 12) 严格按照施工计划分阶段进行两车道、四车道通行限制。

其它未尽事宜，按交通部部标准《公路桥涵施工技术规范》（JTJ/T 3650-2020）、《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T J23-2008）的有关规定执行。

9. 换索工装张拉控制及监测

针对换索过程中的核心力学参数，为保障换索过程的安全及换索前后缆、梁线形及吊索索力保持一致。本项目施工监控严格依据《公路桥梁施工监控技术规程》（JTG/T 3650-01-2022）、《公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG 5220-2020）执行。具体如下：

监测参数至少应包括下列内容：

1、吊点高程

采用单吊点更换时，至少对待更换吊索吊点、同侧周边 3 个吊点及对侧吊点的高程进行监测；采用三吊点更换时，至少对待更换吊索吊点、同侧周边 5 个吊点及对侧吊点的高程进行监测；采用 5 吊点更换时，至少对待更换吊索吊点、同侧周边 7 个吊点及对侧吊点的高程进行监测。

2、吊索索力

采用单吊点更换时，至少对待更换吊点的吊索、同侧周边 3 个吊点的吊索及对侧吊点的吊索索力进行监测；采用三吊点更换时，至少对待更换吊点的吊索、同侧周边 5 个吊点的吊索及对侧吊点的吊索索力进行监测；采用五吊点更换时，至少对待更换吊点的吊索、同侧周边 7 个吊点的吊索及对侧吊点的吊索索力进行监测

3、主缆高程

采用单吊点更换时，至少对待更换吊索吊点、同侧周边 3 个吊点及对侧吊点对应的主缆高程进行监测；采用三吊点更换时，至少对待更换吊索吊点、同侧周边 5 个吊点及对侧吊点对应的主缆高程进行监测；采用五吊点更换时，至少对待更换吊索吊点、同侧周边 7 个吊点及对侧吊点对应的主缆高程进行监测。

4、主梁应力

对待更换吊索对应的主梁截面的应力在吊索更换期间进行监测。

5、吊索更换前后桥梁状态复核

吊索更换前和更换完成后，应分别对全桥的桥面线形、主缆线形和吊索索力进行测量，并分析对比其变化情况。

10. 施工质量管理要求

本工程应切实贯彻“以人为本，强调人与自然的和谐发展”的设计理念，尽量减少对正常交通的影响，尽量减小对沿线居民的影响，同时加强施工期间安全保障措施，保障通行居民及施工人员的安全。

在施工单位充分理解设计单位的设计意图的前提下，对施工期间交通组织及安全保障措施的建议如下：

1）施工单位应严格按照《中华人民共和国公路法》、《道路交通安全法》、《公路安全保护条例》、《道路交通标志和标线》（GB5768）、《公路养护安全作业规程》（JTG H30-2015）等法律法规和相关规定，结合桥位区域实际情况，提前编制交通组织设计，应获得相关管理部门的审批和同意方可开始施工。

在施工过程中，施工单位应严格按照上述法律法规和交通组织设计，加强交通组织管理，并接受业主和相关管理部门的监督，以确保施工及交通转换期间的车辆及人员安全。

2）为确保现有公路交通畅通，应设立一个交通维护组以维持正常交通秩序，并随时清理公路上可能意外产生的障碍物。全线各阶段施工作业中，做到统一组织、协调管理。

3）施工范围内用于引导、提示车辆通行的施工标志其间距和标志摆放路段的延伸长度应保证全天 24 小时均符合规范要求，并保持完整、清洁、反光效果明显。同时，建议在施工现场按不低于 100 米/人、每个道路路口不低于 1 人的原则 24 小时配备施工现场安全管理人员，负责施工现场的标志清洁、调整、更换、疏导等安全管理工作。

4）在施工前必须对施工机具、临时设备相应的保障措施进行详细检查、核对，在确保万无一失后方可施工。

5）施工单位对施工过程中可能出现的各种安全、环保隐患应制定各项应急预案。

6）施工时应注意作业人员各方面的防护，施工期间，应充分设置高空作业防坠设施、钢丝密布网、防护棚、防护围挡、顶棚等，以免施工机具或施工弃渣坠落引起安全事故，保障桥面人员以及高空作业人员的安全，防止施工机具或施工弃渣坠落造成水源环境受到污染。

质量保证体系：

1）本次病害处治所用材料基本性能指标严格按照《公路桥涵施工技术规范》（JTJ/T 3650-2020）、《钢结构工程施工质量验收标准》（GB 50205-2020）等技术标准进行检查、验收。

- 2) 专业施工队伍应熟悉钢结构施工、焊接等施工工艺，并具有相应的工程经验。
- 3) 必须对工序质量以及施工完成后工程质量进行检验、评定，基本要求如下：

(1) 各工序施工质量由工长负责指导、监督，每道工序完成后经技术员检查合格后才能进行下道工序，否则必须返工至合格为止。各种工艺施工前后，还要由技术人员请业主代表或监理人员检查，做工程数量与质量签认。

(2) 应严格按有关规范进行隐蔽工程检验与验收，若施工质量不能满足相关条款要求时，应立即采取补救措施或返工。

(3) 必要时可对锚栓等材料进行现场抽样检验。

(4) 实测项目应参照《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1-2017）的相关规定进行检验评定。

11. 超危大工程施工管理要求

本项目作为超危大工程项目，要求对施工过程进行严格管理和控制，以保证工程安全、质量和进度。

- 1.安全管理要求

施工单位需要制定完善的安全生产管理制度，明确安全责任人员，建立安全检查和监管机制，保障施工过程中人员和设备的安全。
- 2.质量控制要求

专项施工方案中应包括严格的质量控制措施。施工单位需要制定详细的质量检查标准和程序，确保每个施工环节都符合工程质量标准，提高工程质量。
- 3.进度计划要求

专项施工方案应包括详细的施工进度计划和工期控制措施，确保工程按时完成，避免延误导致的额外成本和风险
- 4.环境保护要求

专项施工方案应包括环境保护措施。施工单位需要制定合理的环保方案，减少施工对环境的影响，保护周边生态环境。
- 5.资金预算要求

专项施工方案中应包括详细的资金预算和成本控制措施。施工单位需要合理安排资金使用，控制成本，确保工程按预算完成。

12. 交通组织

本工程应切实贯彻“以人为本，强调人与自然的和谐发展”的设计理念，尽量减少对正常交通的影响，尽量减小对沿线居民的影响，同时加强施工期间安全保障措施，保障通行居民及施工人员的安全。

本次吊索更换交通组织如下：吊索更换期间，封闭换索侧两车道，采用双向四车道通行。全部吊索更换完成后，经荷载试验评估，桥梁恢复交通。（交通组织设计由业主另行委托单位完成）在施工单位充分理解设计单位的设计意图的前提下，对施工期间交通组织及安全保障措施的建议如下：

- 1) 施工单位应严格按照《中华人民共和国公路法》、《道路交通安全法》、《公路安全保护条例》、《道路交通标志和标线》（GB5768）、《公路养护安全作业规程》（JTG H30-2015）等法律法规和相关规定，结合桥位区域实际情况，提前编制交通组织设计，应获得相关管理部门的审批和同意方可开始施工。
- 在施工过程中，施工单位应严格按照上述法律法规和交通组织设计，加强交通组织管理，并接受业主和相关管理部门的监督，以确保施工及交通转换期间的车辆及人员安全。
- 2) 为确保现有公路交通畅通，应设立一个交通维护组以维持正常交通秩序，并随时清理公路上可能意外产生的障碍物。全线各阶段施工作业中，做到统一组织、协调管理。
- 3) 施工范围内用于引导、提示车辆通行的施工标志其间距和标志摆放路段的延伸长度应保证全天24 小时均符合规范要求，并保持完整、清洁、反光效果明显。同时，建议在施工现场按不低于100 米/人、每个道路路口不低于1 人的原则24 小时配备施工现场安全管理人员，负责施工现场的标志清洁、调整、更换、疏导等安全管理工作。
- 4) 在施工前必须对施工机具、临时设备相应的保障措施进行详细检查、核对，在确保万无一失后方可施工。
- 5) 施工单位对施工过程中可能出现的各种安全、环保隐患应制定各项应急预案。
- 6) 施工时应注意作业人员各方面的防护，施工期间，应充分设置高空作业防坠设施、钢丝密

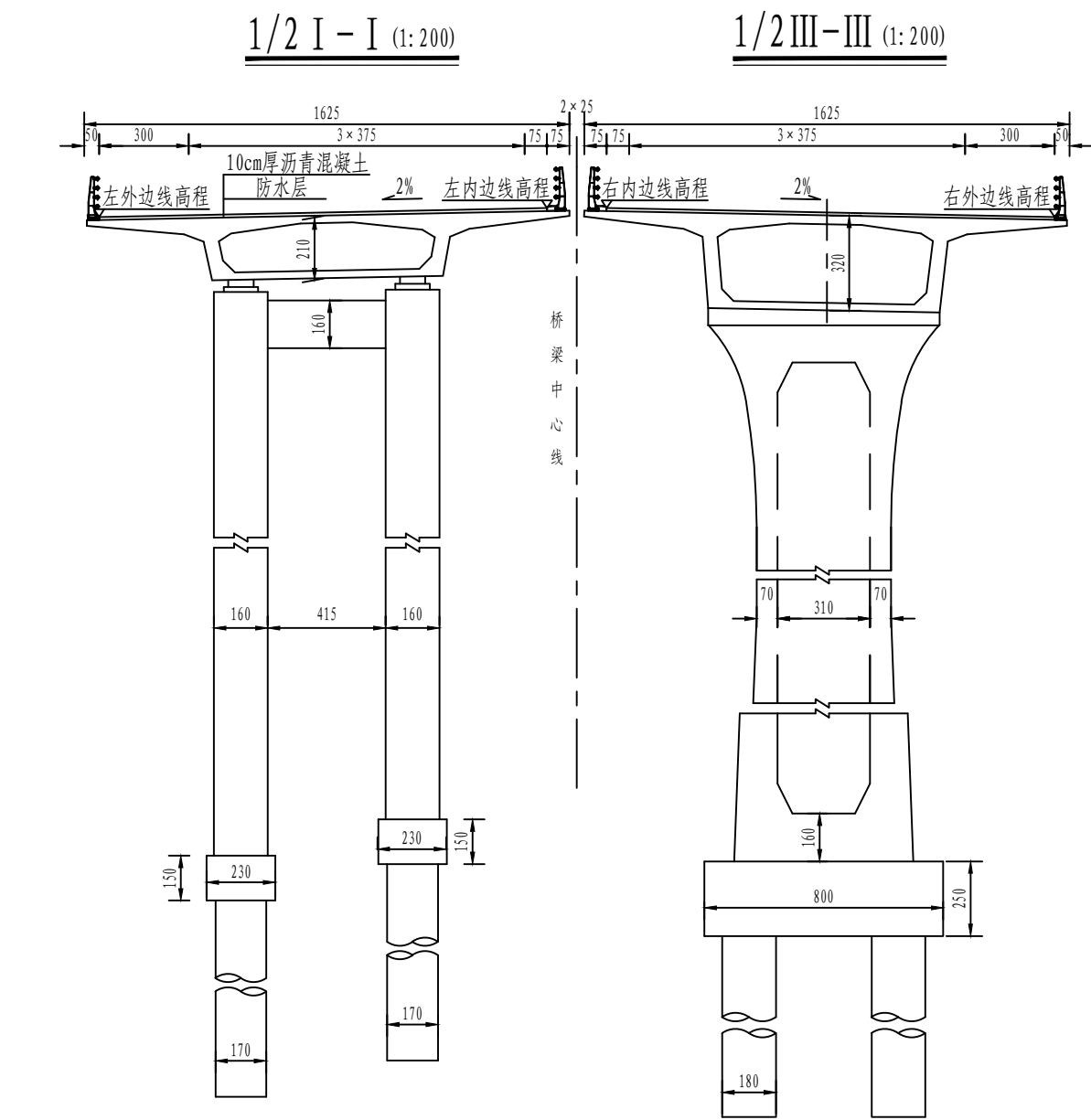
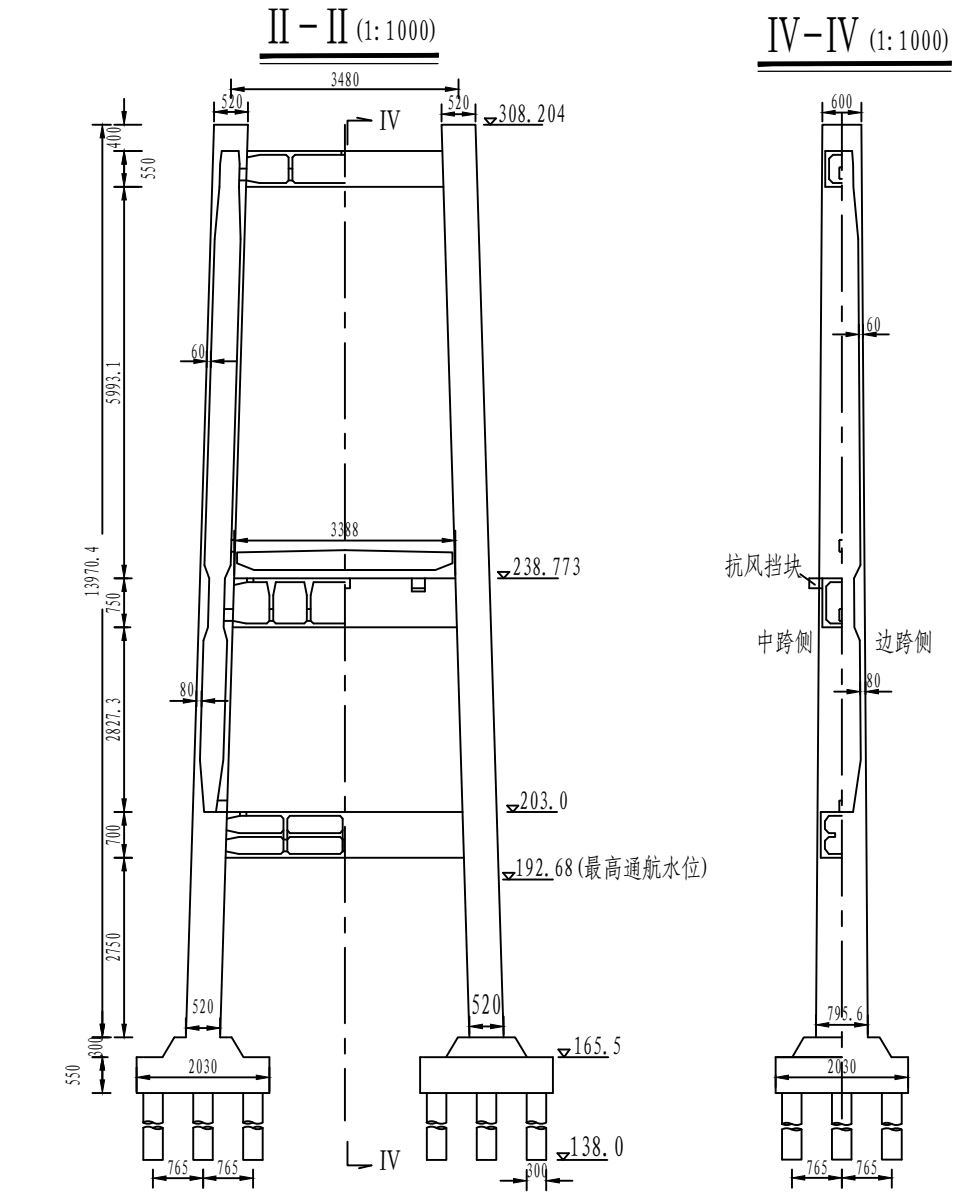
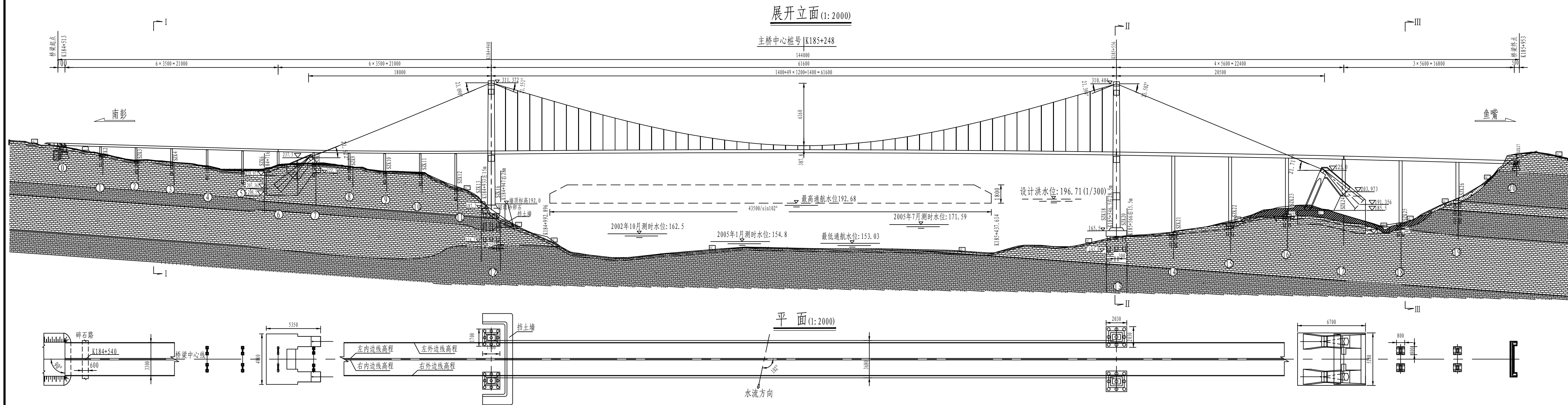
布网、防护棚、防护围挡、顶棚等，以免施工机具或施工弃渣坠落引起安全事故，保障桥面人员以及高空作业人员的安全，防止施工机具或施工弃渣坠落造成水源环境受到污染。

13. 建议及其他

- 1、全桥吊索更换施工完成后，建议选择具有相应检测资质的单位进行桥梁荷载试验，保障大桥后期运营安全。
- 2、针对重点病害适当加大桥梁后期运营阶段的检测频率，确保桥梁安全。

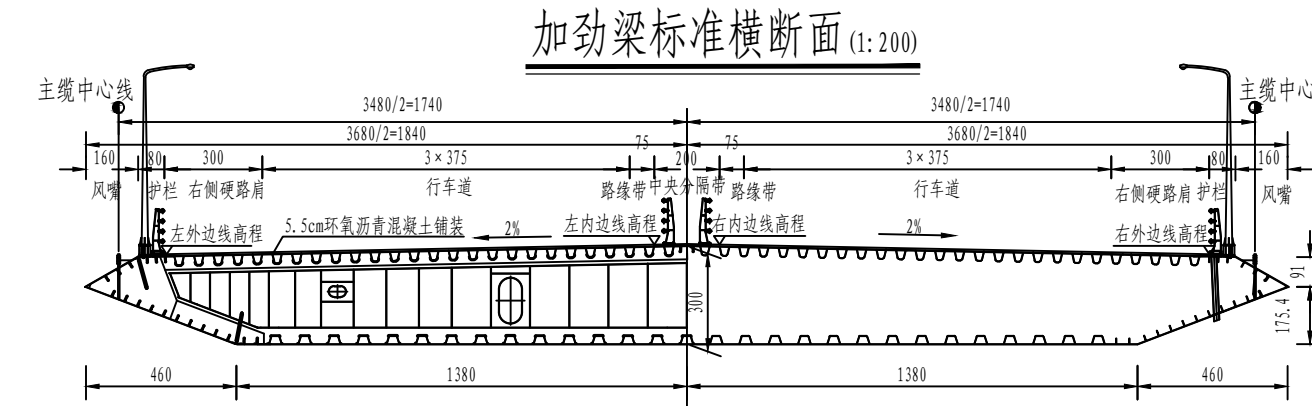
主要工程材料数量表

项目	材料	单位	吊索更换
新吊索	φ 5. 3mm-73高强镀锌铝合金钢丝	kg	66884. 41
上吊耳	Q355B钢材	套	140
下吊耳	Q355B钢材	套	140
HDPE热熔防雨密封罩	/	套	140
新吊索销轴	45#钢	套	280
第一类更换方案的临时吊索	φ 5. 3mm-73高强镀锌铝合金钢丝	kg	4415. 7
第二类更换方案的临时吊索		kg	3438. 80
第三类更换方案的临时吊索		kg	9775. 90
临时索夹	ZG20SiMn铸钢	kg	18028. 0
临时吊索上吊耳	Cr40	套	48
临时吊索下吊耳	Cr40	套	48
临时吊索销轴	40CrNiMoA	套	20
临时拉杆装置	Q345低碳钢	kg	964. 84
双吊耳孔反力梁	Q345低碳钢	kg	1140. 0
新增耳孔钢板	Q345低碳钢	kg	1550. 56
索夹滑移处治	φ 4mm-镀锌钢丝	kg	108. 53
	氯磺化聚乙烯复合缠包带	m	205. 8
全桥索夹螺杆紧固	/	套	936
登高车	/	台班	18
施工吊篮	/	套	2
施工过程监测	/	项	1

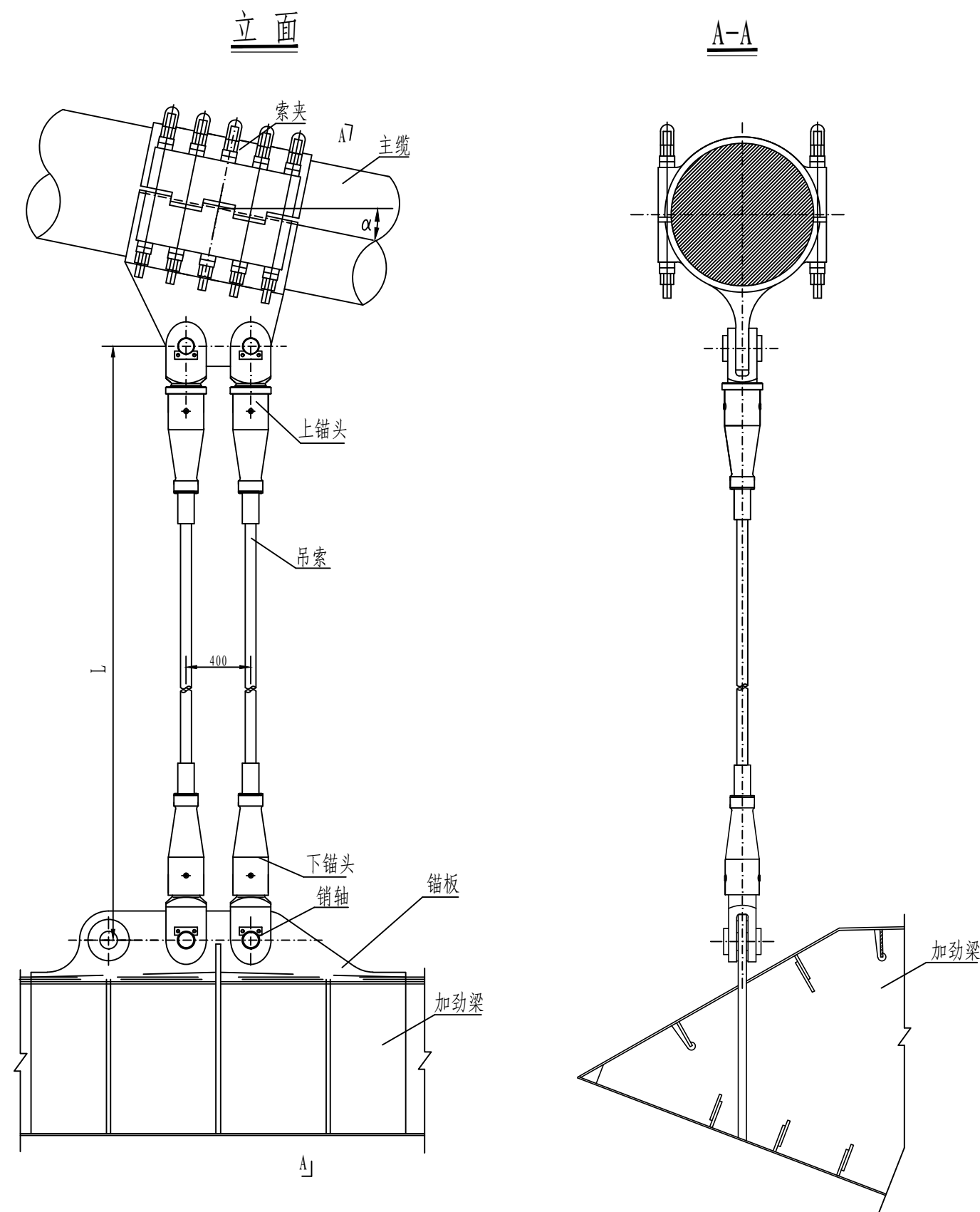


说明:

1. 本图尺寸除标高、里程以米计外, 余均以厘米计。
2. 桥梁设计荷载: 公路 - I 级。
3. 桥型方案: 主桥为180+616+205m单跨钢箱梁悬索桥, 主缆矢跨比1:10, 加劲梁高为3m, 吊索标准间距12m; 桥塔采用门式框架结构, 塔柱为钢筋混凝土结构, 横系梁为预应力空心薄壁结构, 塔基采用承台加桩基础; 南岸及北岸均采用重力式锚碇; 南岸引桥采用两联 $6 \times 35\text{m}$ 连续箱梁, 方柱式墩, 桩基础, 北岸引桥采用一联 $4 \times 36\text{m}$ 和一联 $3 \times 36\text{m}$ 连续刚构, 承台加桩基础; U形桥台, 扩大基础。
4. 主要施工方法: 主缆采用PPWS方法施工; 钢箱梁分节段在工厂制造, 船运至桥下, 载重吊机吊梁段至安装位置, 由跨中向两侧至塔附近吊装合龙; 桥塔采用液压爬模或翻模法施工; 南锚和北锚采用明挖施工; 南岸引桥采用移动模架或满堂支架逐孔现浇施工, 北岸引桥采用挂篮悬浇施工。
5. 桥位区地层横向上差别较大, 南岸引桥下部左、右幅设计不同, 南塔桩基长度亦不相同, 本图仅绘出左幅位置, 墩台基础设计高程参见相应的一般构造图。
6. 0号台后设8m搭板, 20号台不设搭板。

[illegible]

吊索构造示意

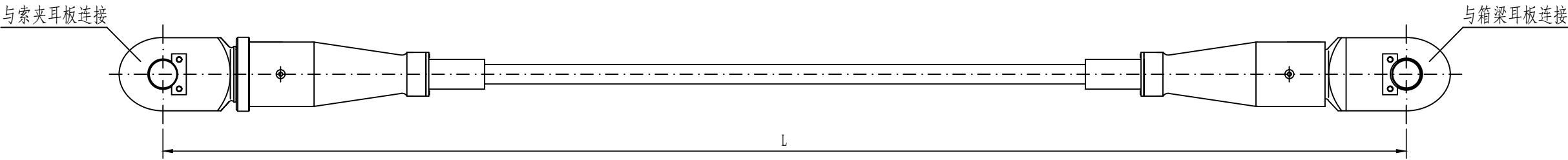


吊索形状长度及索夹角度

吊索编号	L (m)	α (度)	吊索编号	L (m)	α (度)	吊索编号	L (m)	α (度)
1	61.2103	21.057	18	9.0504	6.731	35	12.2677	8.307
2	56.6015	20.251	19	7.7114	5.851	36	14.1801	9.180
3	52.1712	19.461	20	6.5638	4.969	37	16.2844	10.049
4	47.9358	18.654	21	5.6074	4.085	38	18.5809	10.914
5	43.8952	17.837	22	4.8621	3.199	39	21.0700	11.775
6	40.0499	17.012	23	4.2880	2.311	40	23.7310	12.633
7	36.4199	16.181	24	3.9051	1.423	41	26.6056	13.486
8	32.9630	15.345	25	3.7133	0.534	42	29.6734	14.334
9	29.6999	14.504	26	3.7125	0.355	43	32.9349	15.177
10	26.6303	13.656	27	3.9028	1.244	44	36.3900	16.014
11	23.7540	12.804	28	4.2842	2.132	45	40.0182	16.846
12	21.0914	11.948	29	4.8566	3.020	46	43.8617	17.673
13	18.6007	11.088	30	5.6003	3.906	47	47.9005	18.492
14	16.3026	10.223	31	6.5551	4.791	48	52.1341	19.300
15	14.1965	9.355	32	7.7012	5.673	49	56.5626	20.091
16	12.2826	8.483	33	9.0387	6.554	50	61.1695	20.899
17	10.5809	7.608	34	10.5675	7.431			

附注:

1. 本图尺寸除注明外, 均以毫米计。
2. 每个吊点由2根吊索组成, 上下均为销接式, 为 $\Phi 5.2-73$ 。
吊索PE护套表面缠丝或表面麻坑以防止风雨振。
3. 吊索用钢丝技术标准应符合中国国家标准GB/T18365-2001要求。
4. 吊索编号见《吊索布置图》。
5. 表中吊索长L为成桥状态同一吊点两吊索的平均长度。

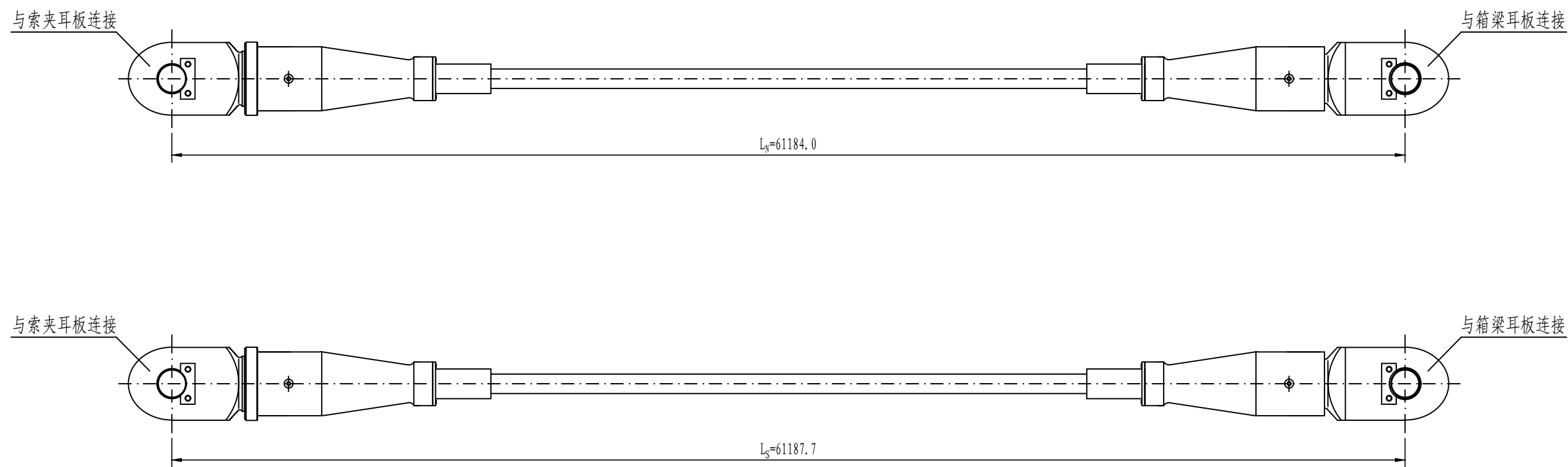


吊索编号	方向S		方向N	
	L (mm)	总成重量 (kg)	L (mm)	总成重量 (kg)
1	61187.7	1129.3	61184	1129.2
2	56594.3	1068.6	56590.6	1068.5
3	52164.3	1010	52160.9	1010
4	47929.3	954.1	47926.1	954
5	43889.3	900.7	43886.2	900.7
6	40044.4	849.9	40041.5	849.9
7	36414.9	801.9	36412.1	801.9
8	32958.2	756.3	32955.7	756.2
9	29695.3	713.1	29693.0	713.1
10	26625.9	672.6	26623.7	672.5
11	23749.6	634.6	23747.6	634.5
12	21087.0	599.4	21085.2	599.4
13	18596.2	566.5	18594.6	566.5
14	16298.0	536.1	16296.6	536.1
15	14191.9	508.3	14190.6	508.3
16	12277.8	483.0	12276.7	483.0
17	10576.0	460.5	10575.1	460.5

吊索编号	方向S		方向N	
	L (mm)	总成重量 (kg)	L (mm)	总成重量 (kg)
18	9045.4	440.3	9044.7	440.3
19	7706.3	422.6	7705.7	422.6
20	6558.6	407.4	6558.2	407.4
31	6549	407.3	6550.5	407.3
32	7695	422.4	7696.7	422.4
33	9032.4	440.1	9034.3	440.1
34	10561.1	460.3	10563.2	460.3
35	12261.2	482.8	12263.5	482.8
36	14173.5	508.0	14176.0	508.1
37	16280.4	535.8	16277.7	535.9
38	18574.2	566.2	18577.0	566.2
39	21063.1	599.1	21066.1	599.1
40	23723.9	634.2	23727.1	634.3
41	26598.3	672.2	26601.7	672.3
42	29665.9	712.7	29669.4	712.8
43	32926.9	755.8	32930.7	755.9
44	36381.6	801.5	36385.5	801.5

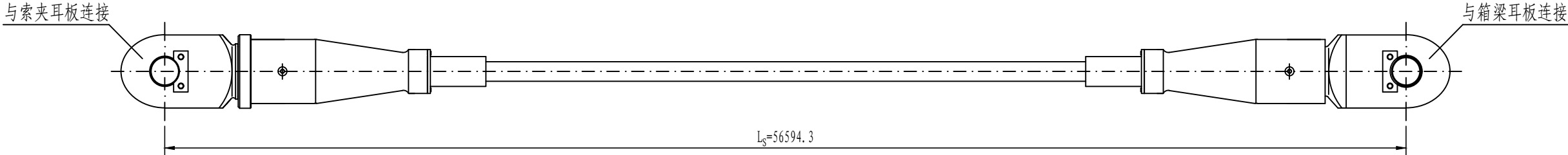
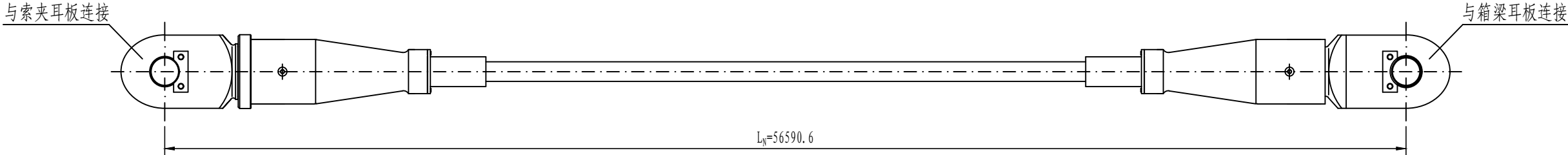
吊索编号	方向S		方向N	
	L (mm)	总成重量 (kg)	L (mm)	总成重量 (kg)
45	40009.2	849.4	40013.3	849.5
46	43852.1	900.2	43856.3	900.3
47	47890.2	953.6	47894.7	953.6
48	52123.2	1009.5	52127.8	1009.6
49	56551.1	1068.0	56555.9	1068.1
50	61142.5	1128.7	61147.5	1128.8

- 注：
- 1. 本图尺寸以毫米计。
 - 2. 本图中L表示吊索锚头销孔中心之间无应力长度。
 - 3. 表中方向N和S分别表示同一索夹处的北侧和南侧吊索。



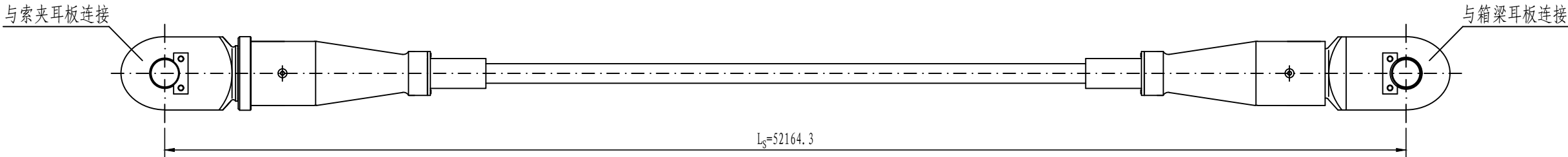
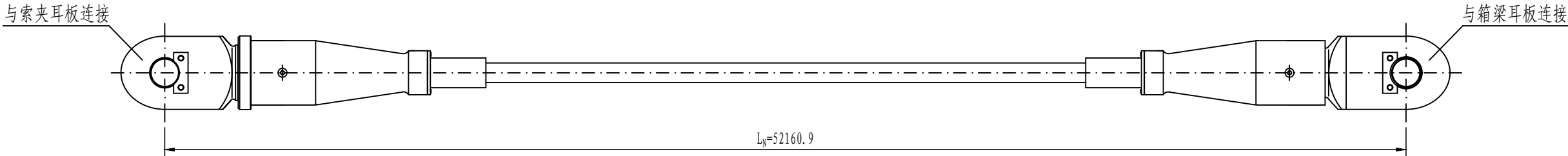
注:

1. 本图尺寸以毫米计。
2. Z1表示左幅1#索夹, Y1表示右幅1#索夹。
3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度, L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



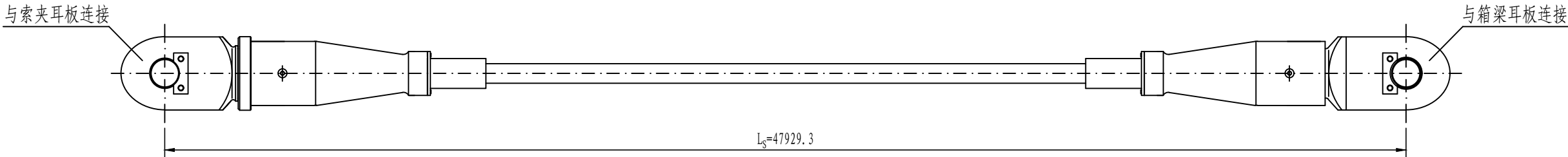
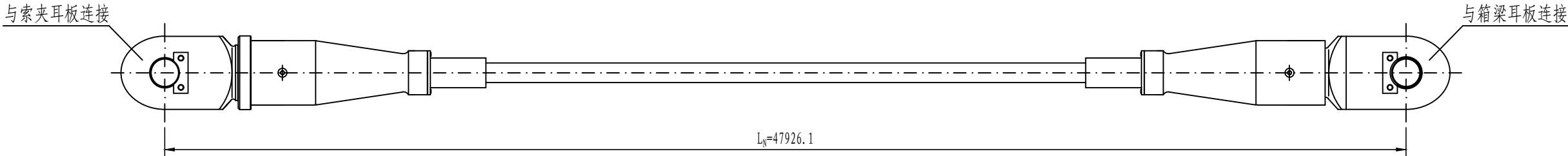
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z2表示左幅2#索夹，Y2表示右幅2#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



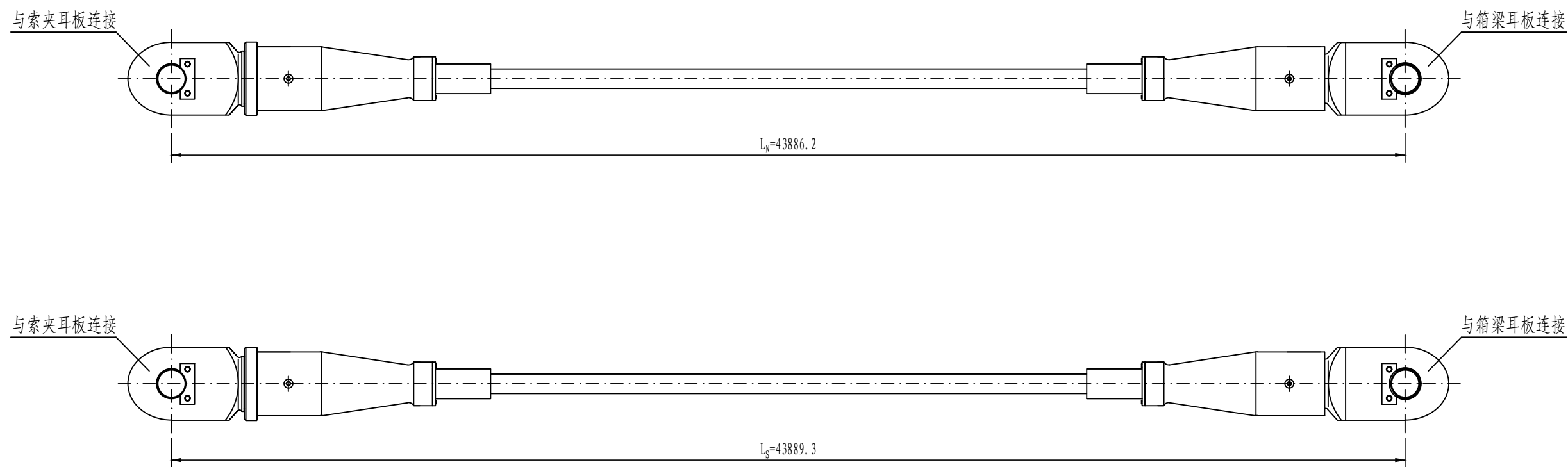
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z3表示左幅3#索夹, Y3表示右幅3#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度, L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



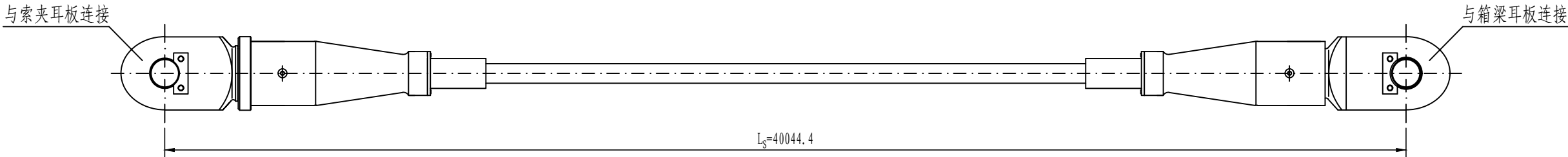
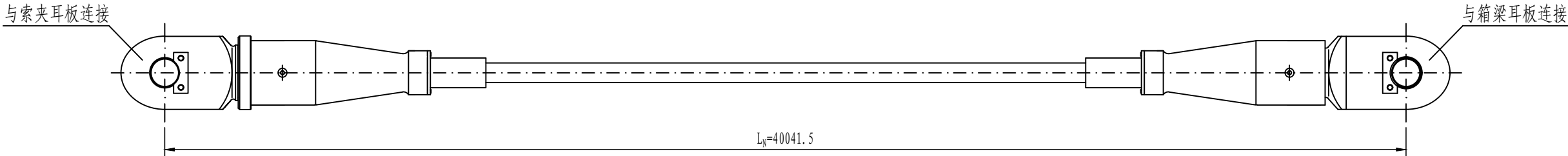
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z4表示左幅4#索夹，Y4表示右幅4#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



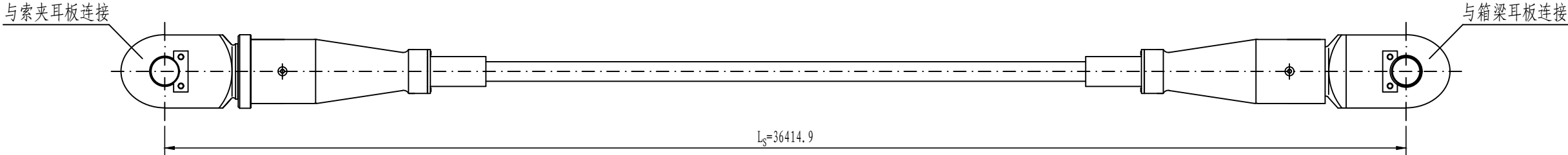
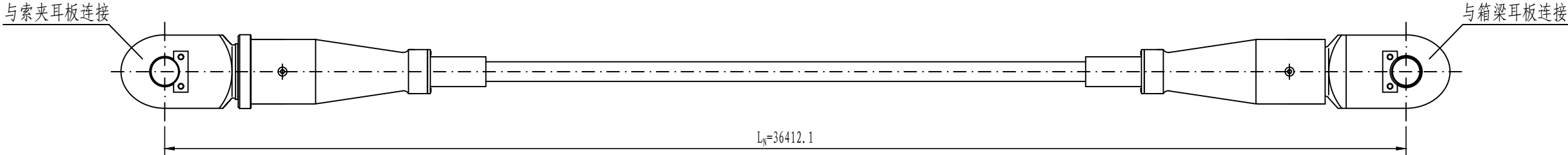
注:

1. 本图尺寸以毫米计。
2. Z5表示左幅5#索夹, Y5表示右幅5#索夹。
3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度, L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



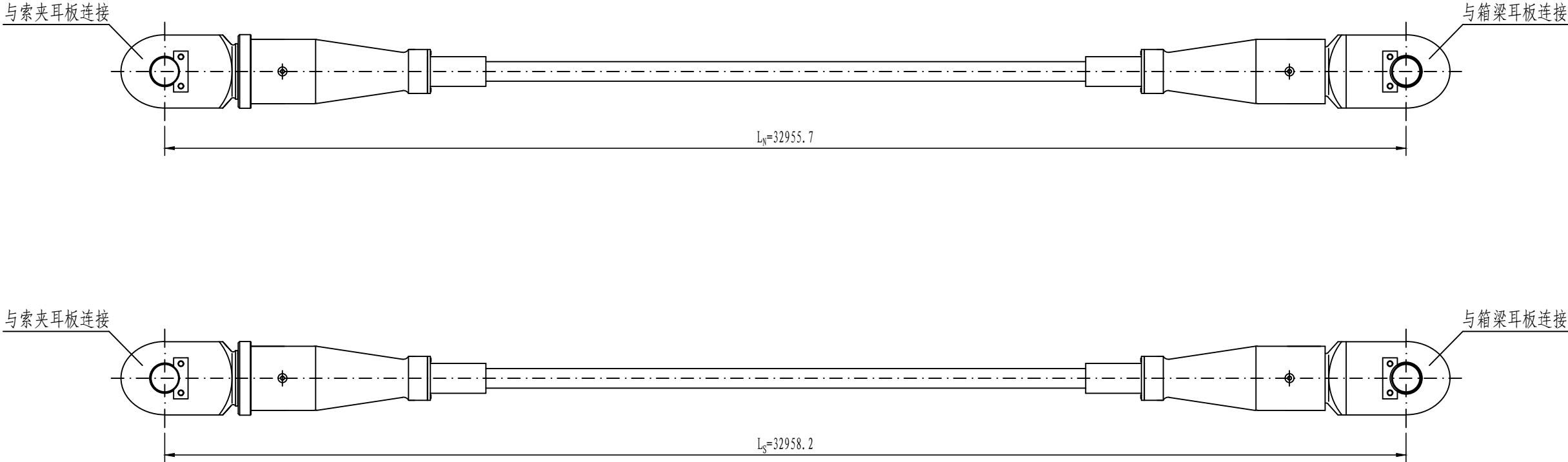
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z6表示左幅6#索夹，Y6表示右幅6#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



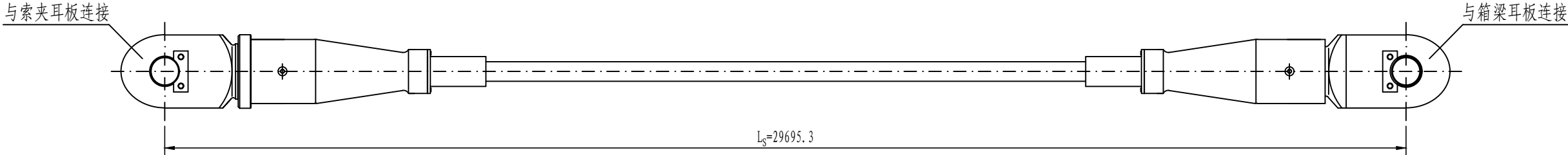
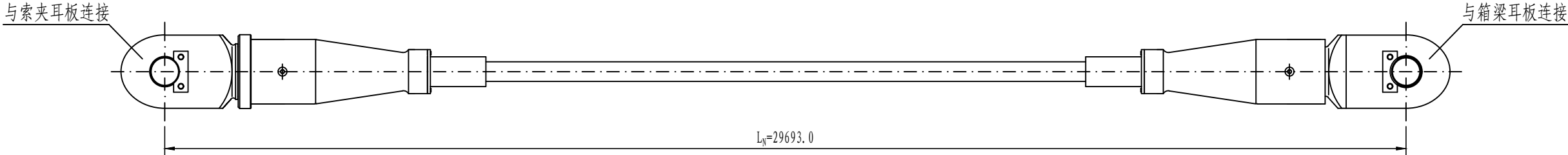
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z7表示左幅7#索夹，Y7表示右幅7#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



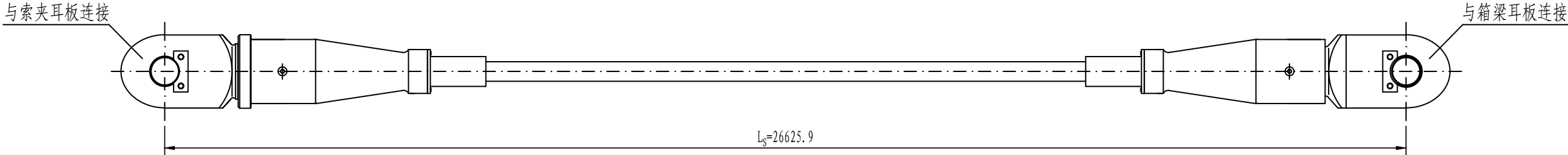
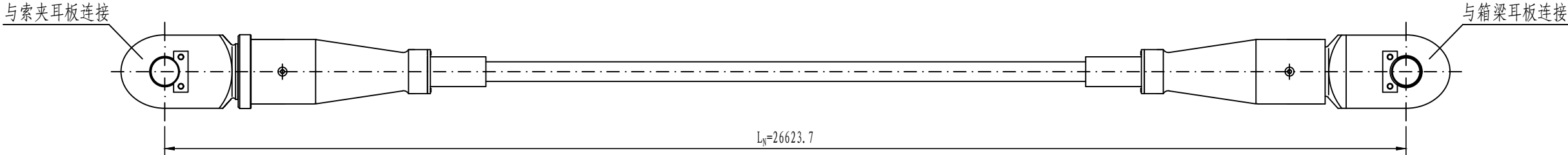
注:

1. 本图尺寸以毫米计。
2. Z8表示左幅8#索夹，Y8表示右幅8#索夹。
3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



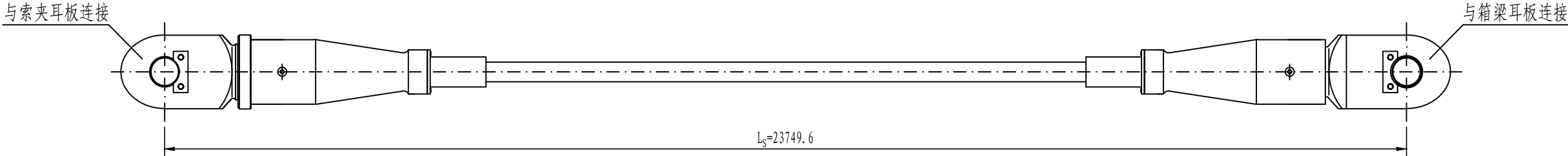
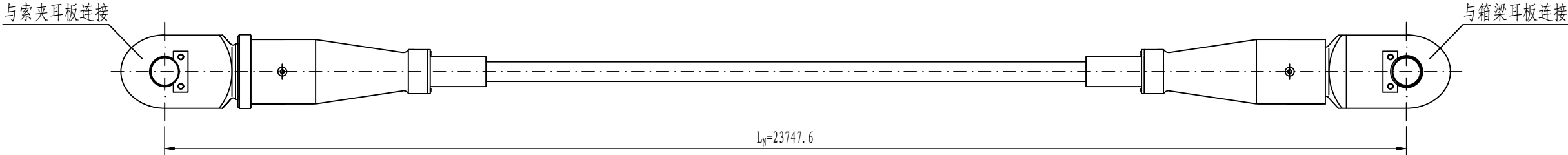
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z9表示左幅9#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



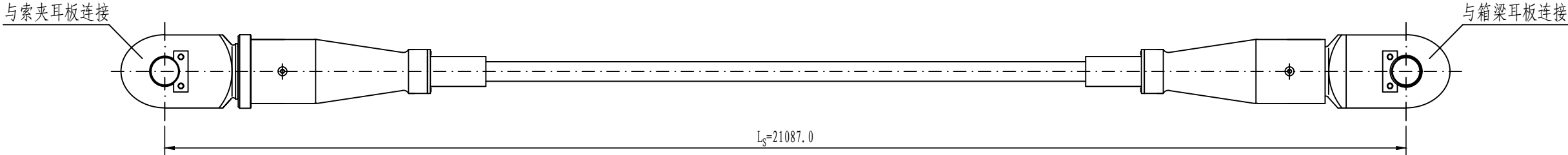
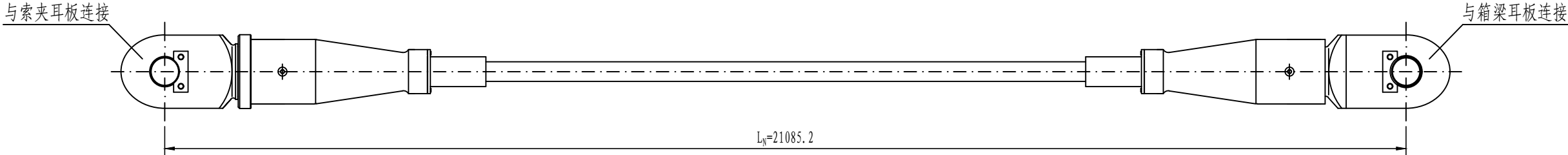
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z10表示左幅10#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



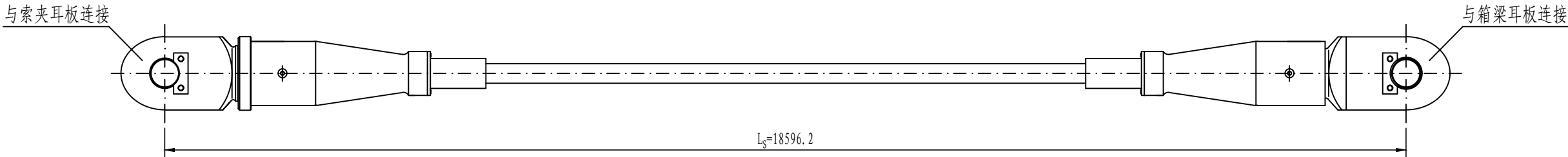
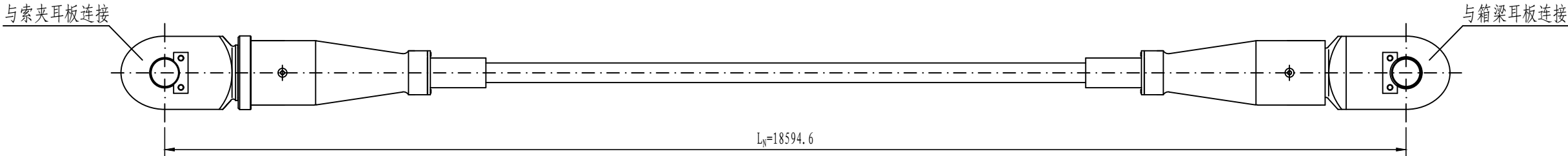
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z11表示左幅11#索夹, Y11表示右幅11#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度, L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



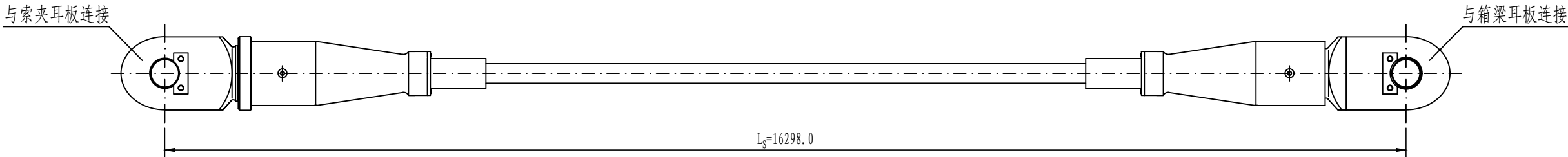
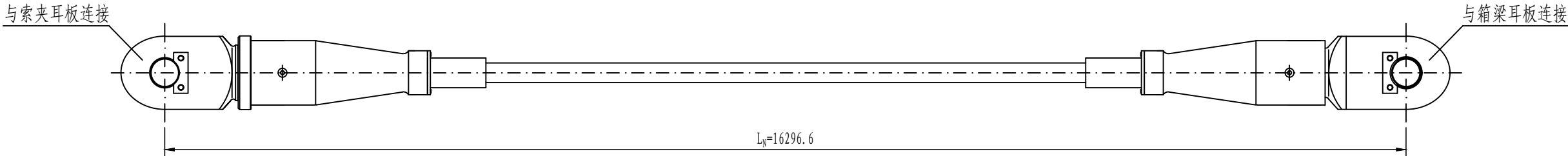
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z12表示左幅12#索夹，Y12表示右幅12#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



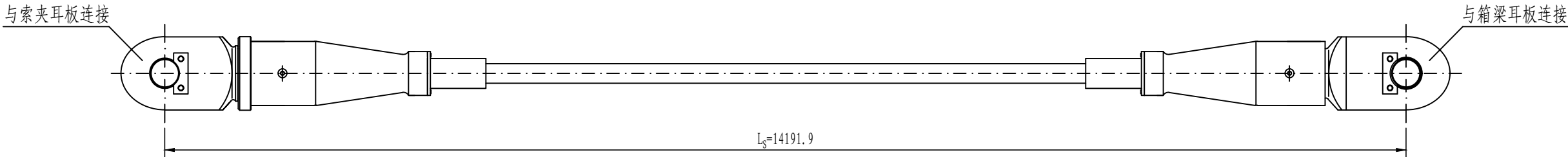
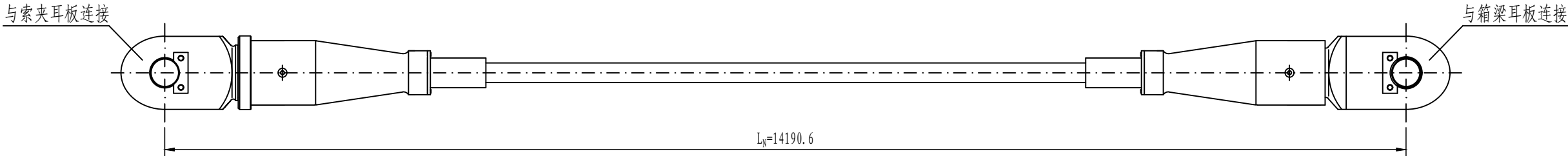
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z13表示左幅13#索夹，Y13表示右幅13#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



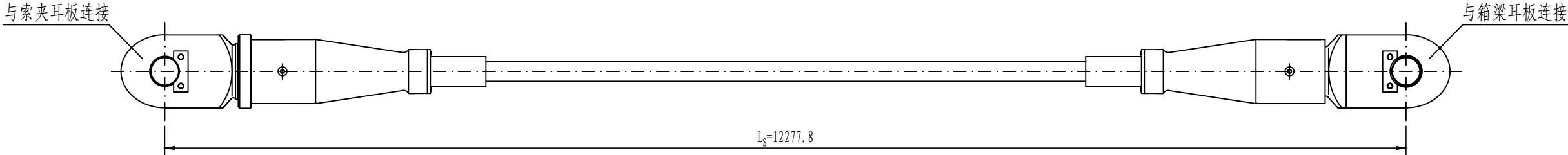
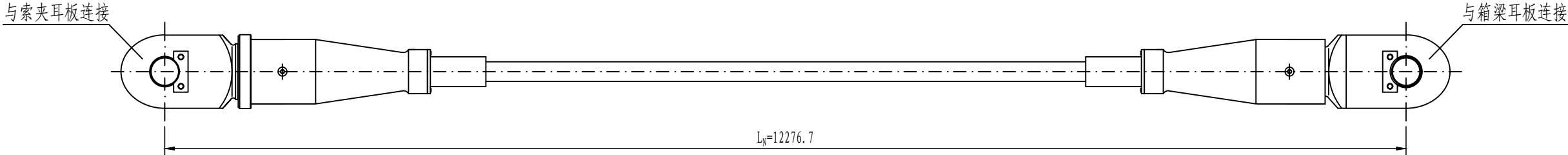
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z14表示左幅14#索夹，Y14表示右幅14#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



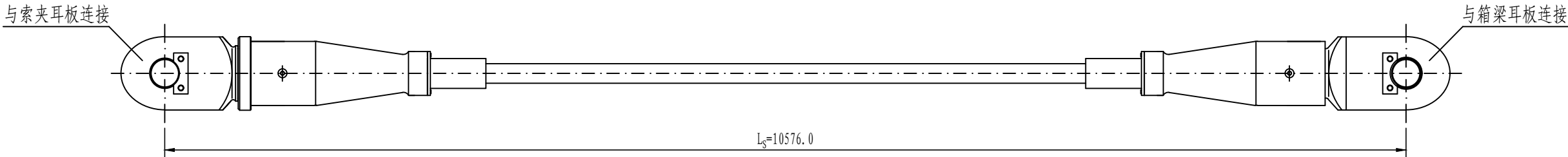
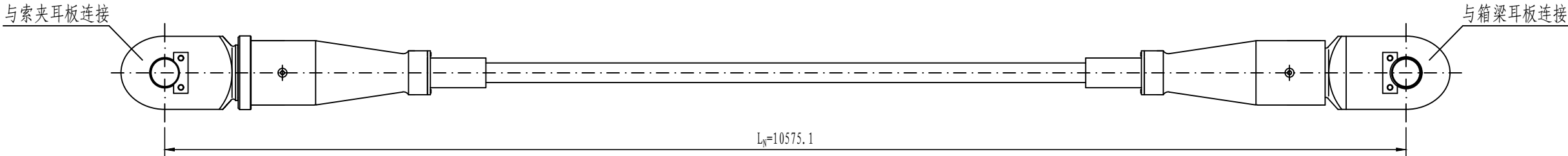
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z15表示左幅15#索夹, Y15表示右幅15#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度, L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



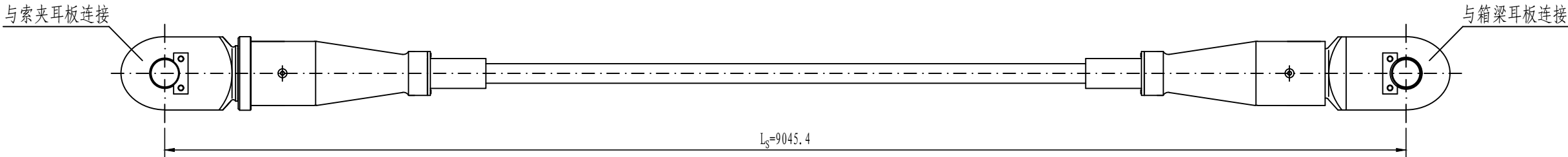
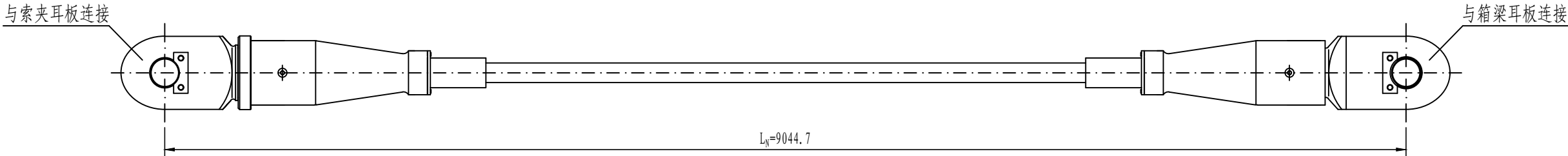
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z16表示左幅16#索夹, Y16表示右幅16#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度, L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



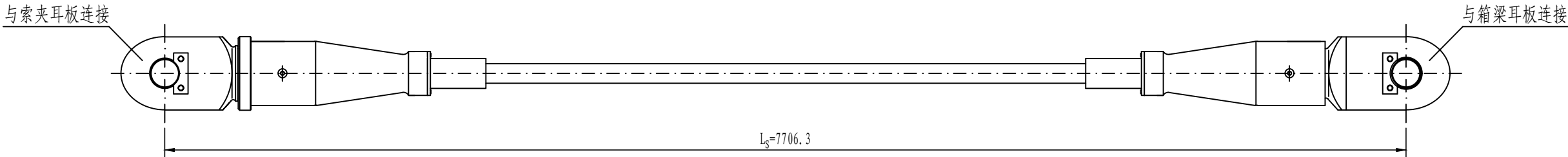
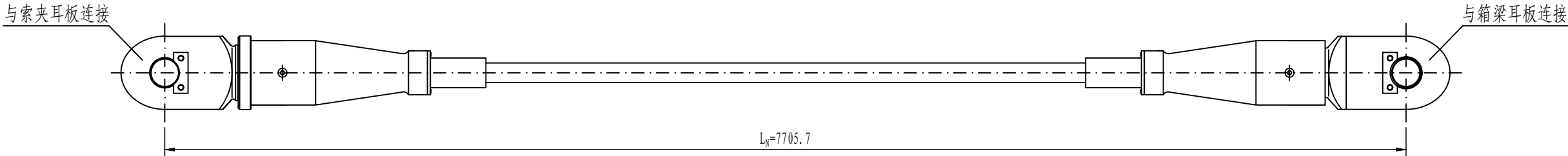
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z17表示左幅17#索夹，Y17表示右幅17#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



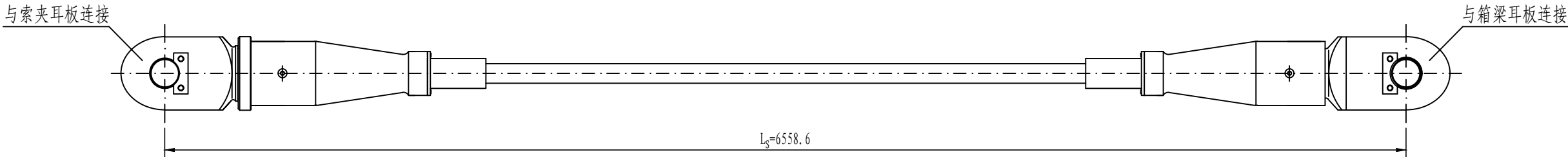
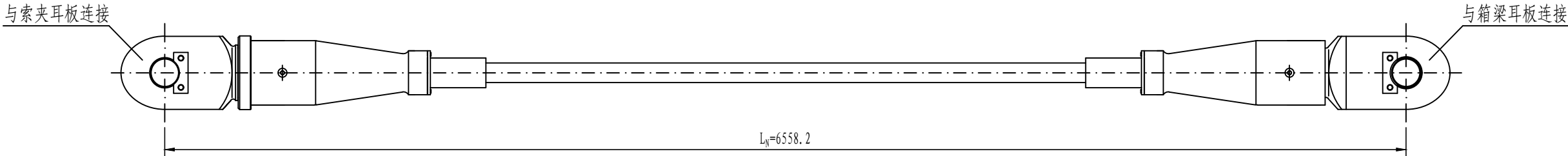
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Y18表示右幅18#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



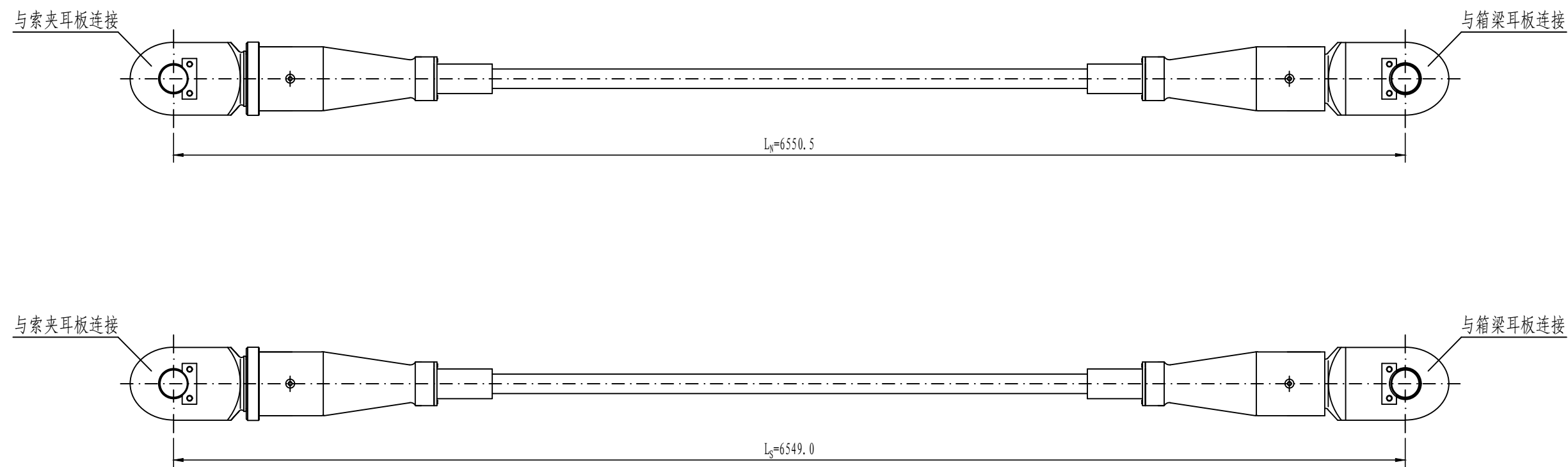
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Y19表示右幅19#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



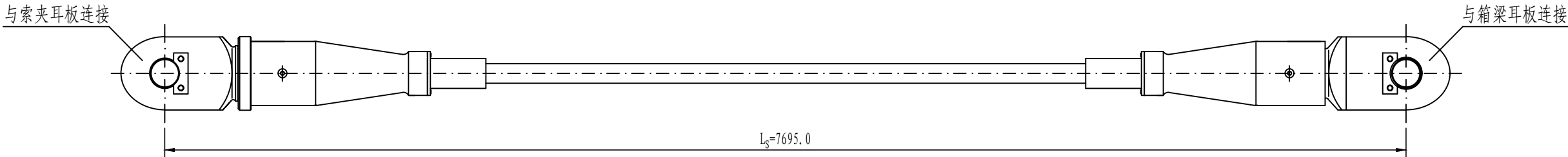
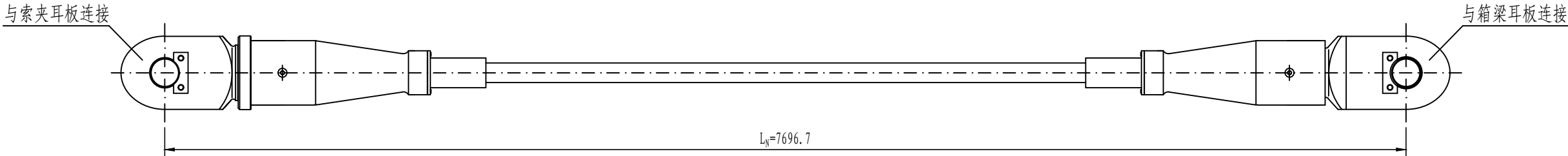
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Y20表示右幅20#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



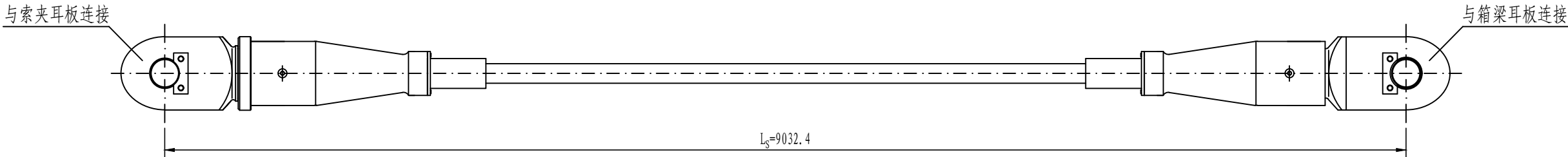
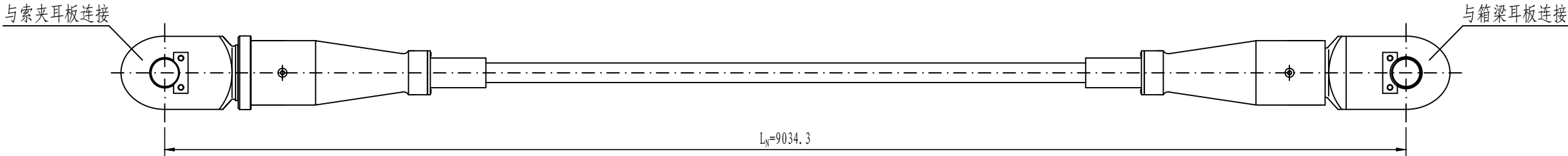
注:

1. 本图尺寸以毫米计。
2. Z31表示左幅31#索夹, Y31表示右幅31#索夹。
3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度, L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



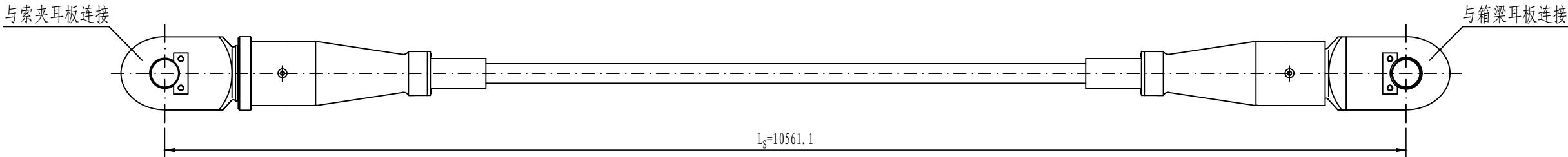
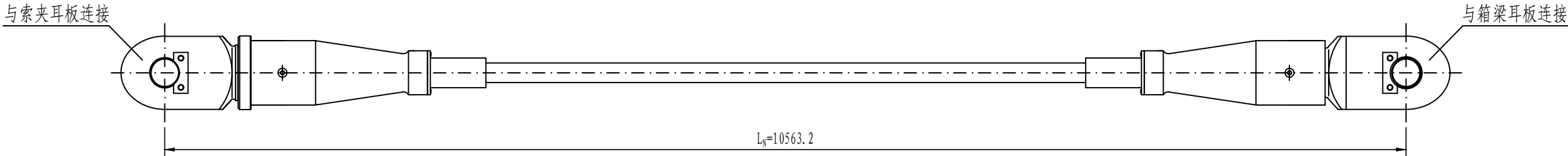
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z32表示左幅32#索夹，Y32表示右幅32#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



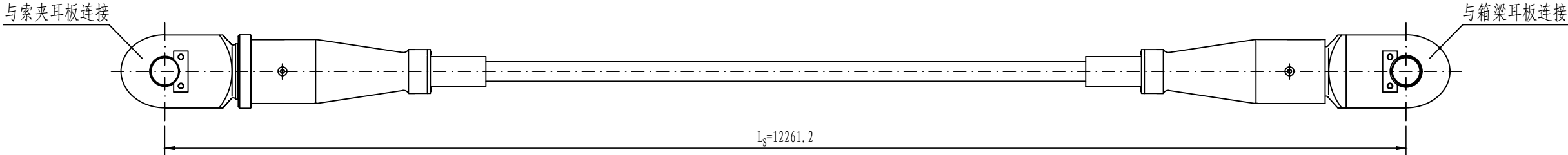
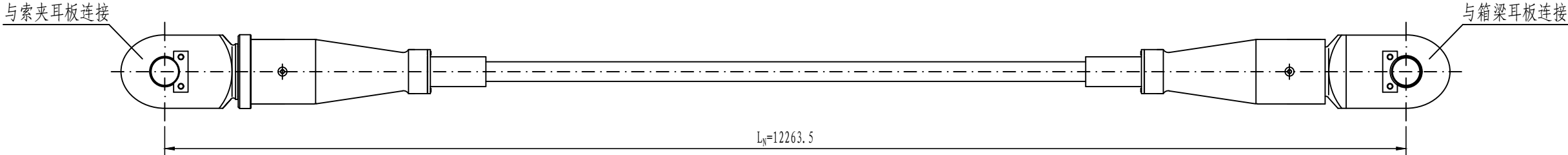
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z33表示左幅33#索夹，Y33表示右幅33#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



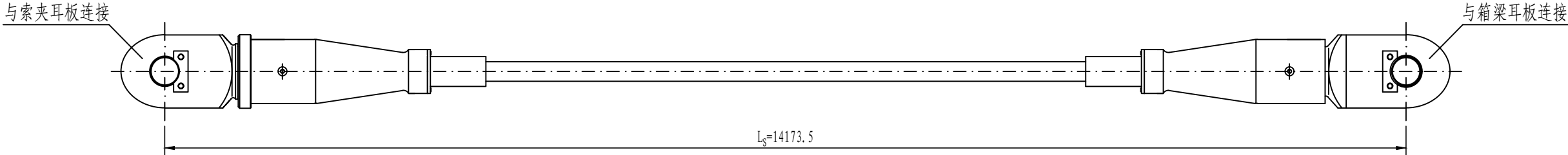
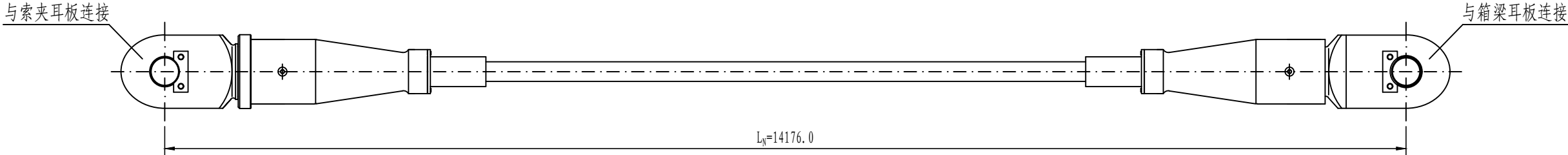
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z34表示左幅34#索夹，Y34表示右幅34#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



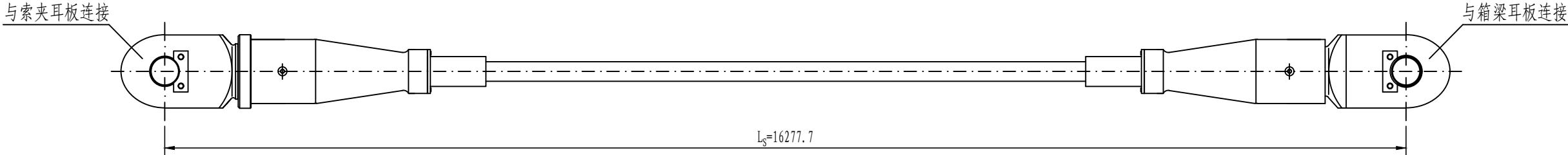
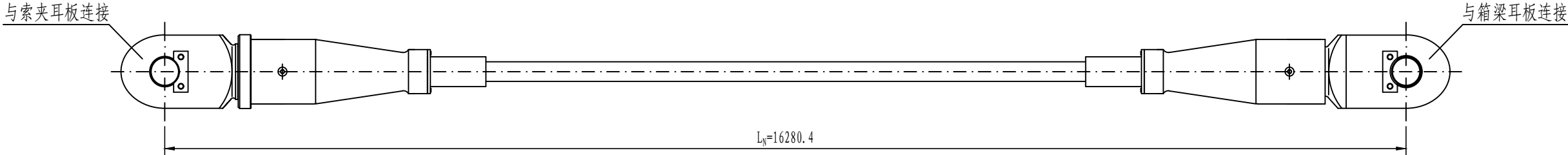
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z35表示左幅35#索夹，Y35表示右幅35#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



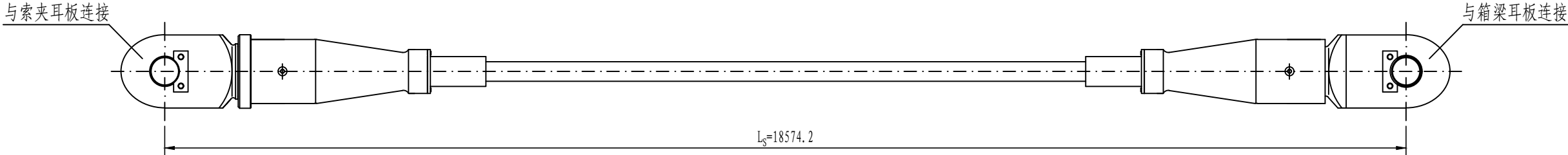
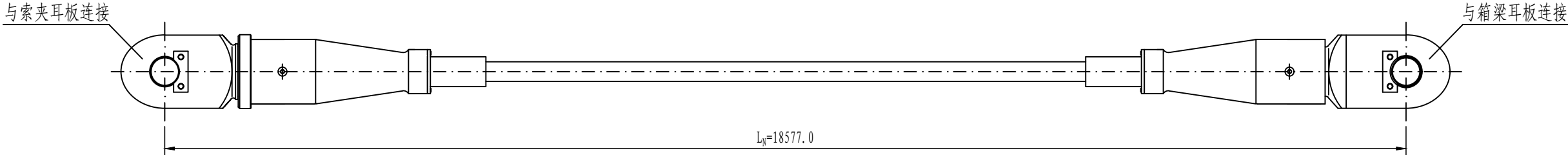
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z36表示左幅36#索夹，Y36表示右幅36#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



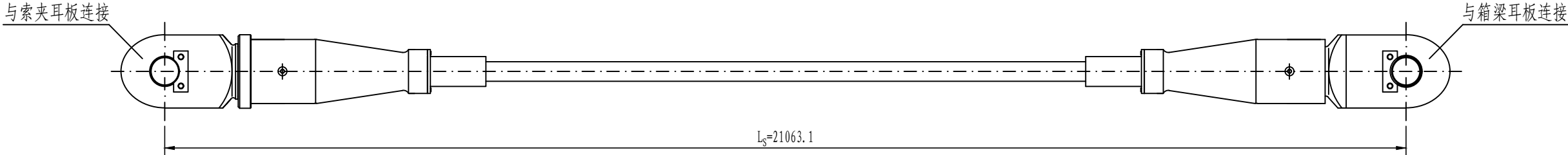
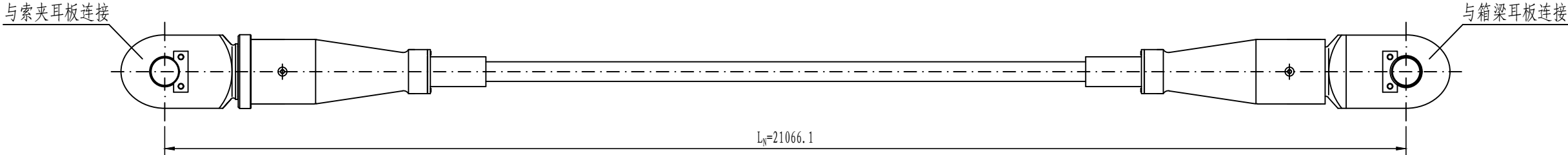
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z37表示左幅37#索夹，Y37表示右幅37#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



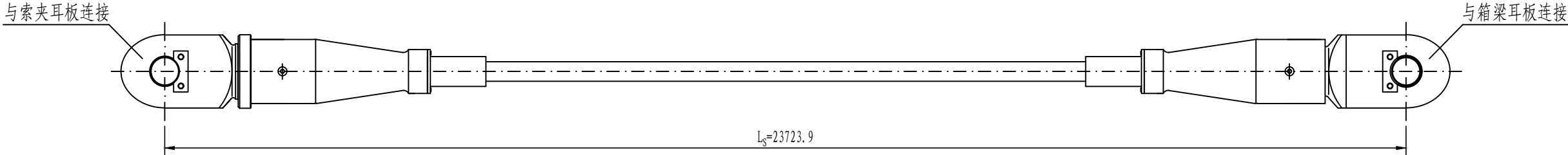
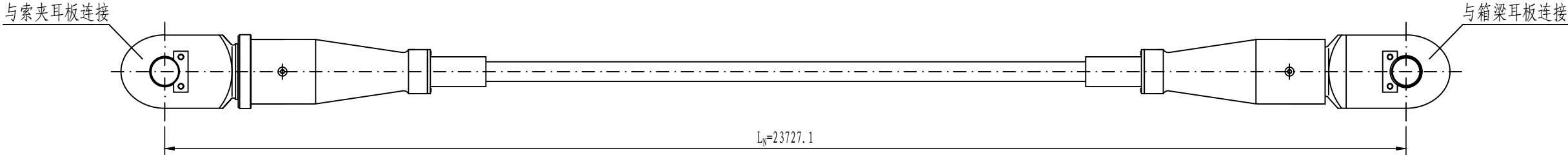
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z38表示左幅38#索夹，Y38表示右幅38#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



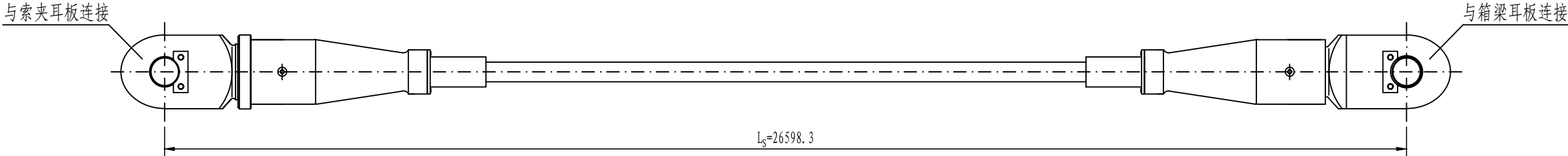
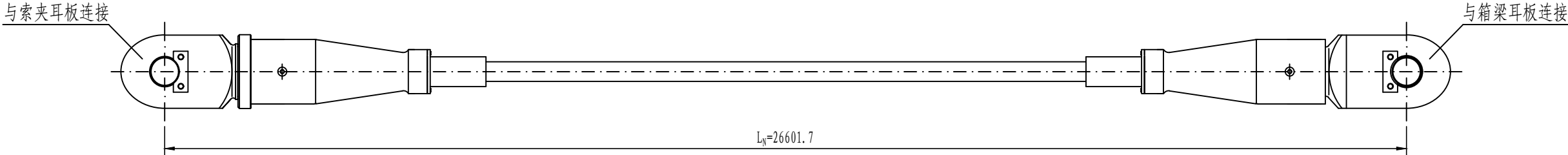
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z39表示左幅39#索夹，Y39表示右幅39#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



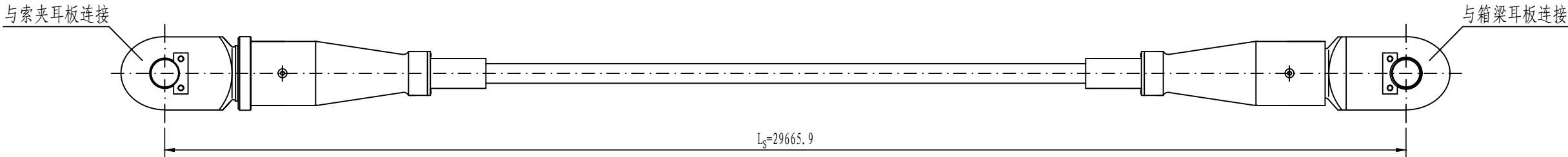
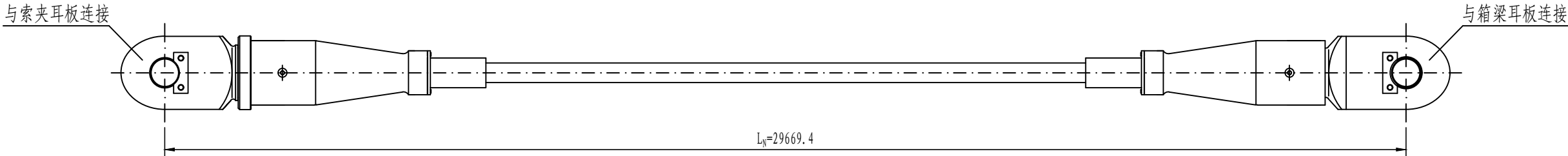
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z40表示左幅40#索夹，Y40表示右幅40#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



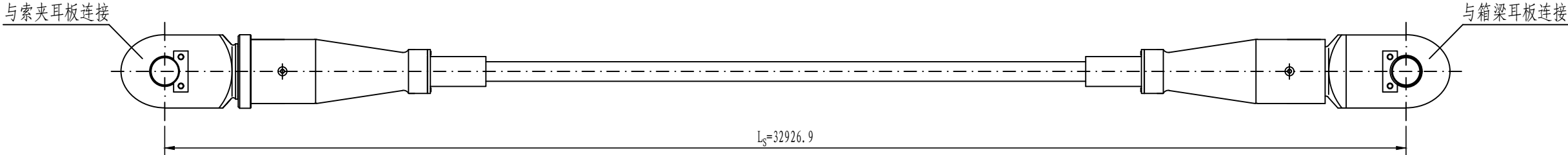
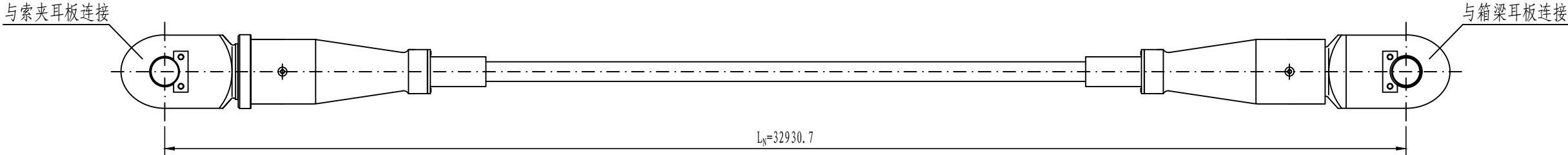
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z41表示左幅41#索夹, Y41表示右幅41#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度, L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



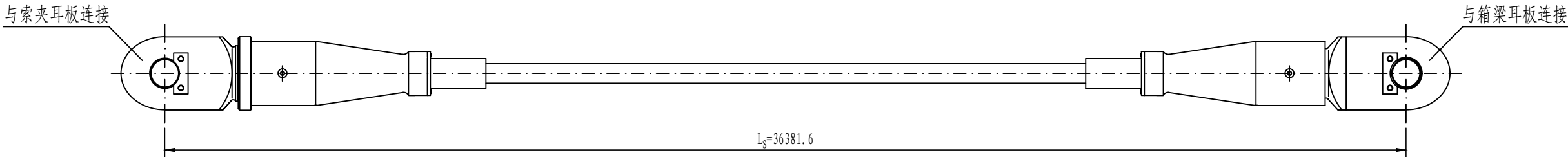
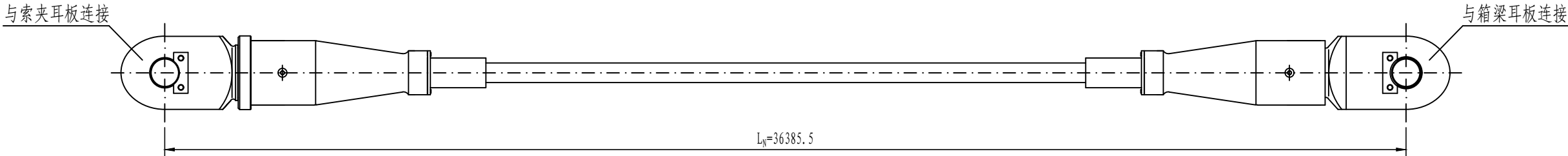
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z42表示左幅42#索夹，Y42表示右幅42#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



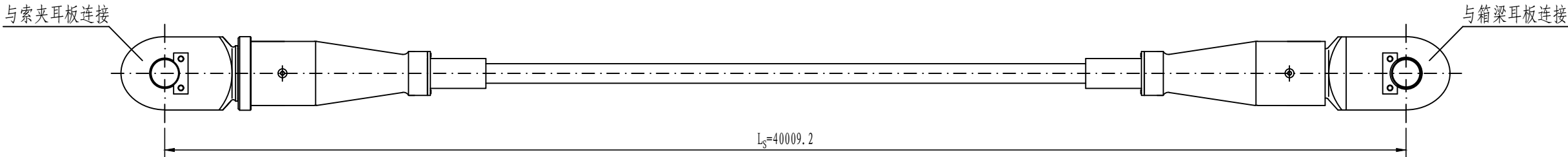
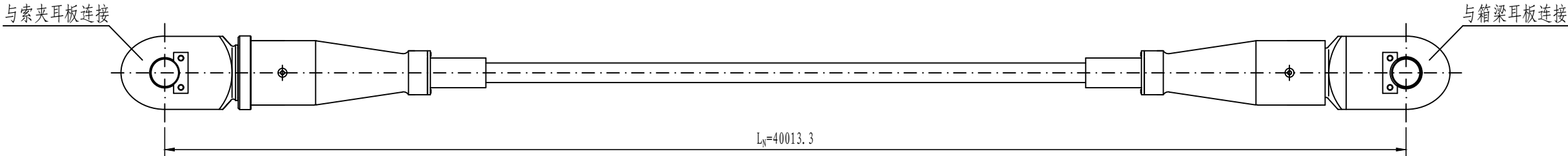
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z43表示左幅43#索夹，Y43表示右幅43#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



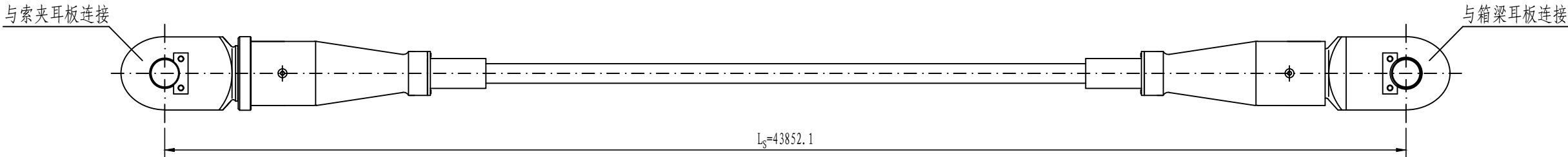
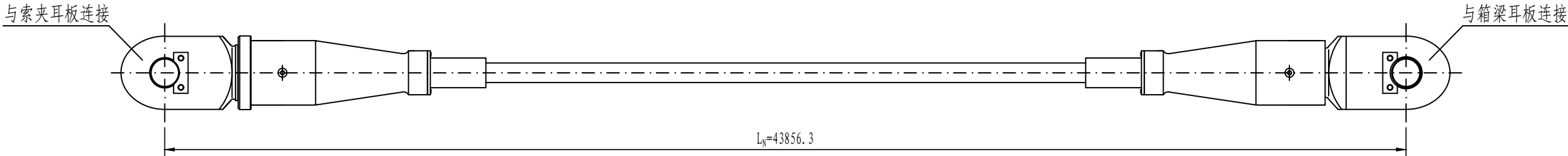
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z44表示左幅44#索夹，Y44表示右幅44#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



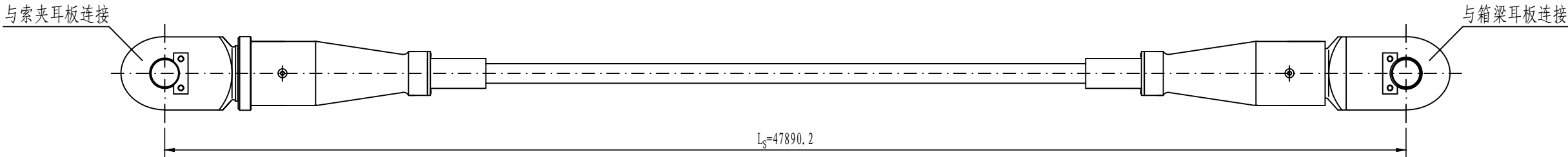
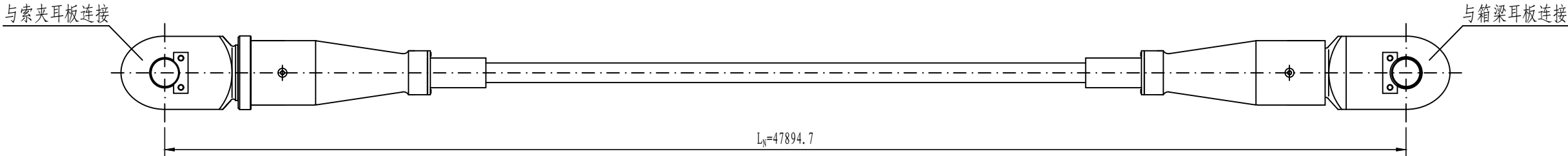
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z45表示左幅45#索夹，Y45表示右幅45#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



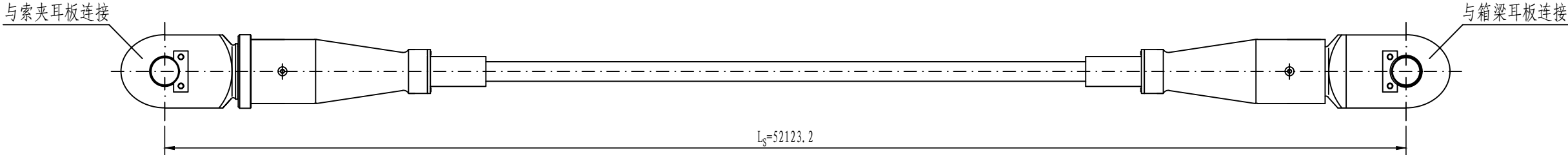
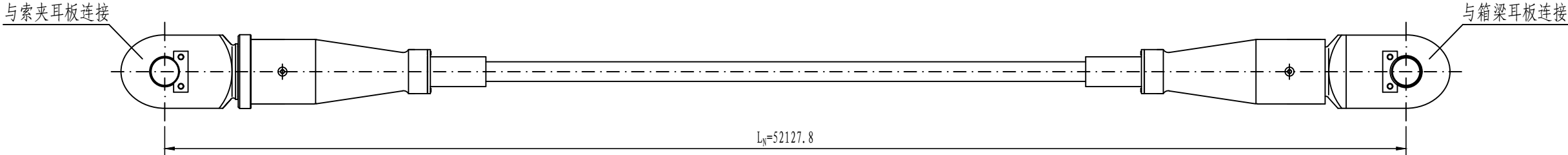
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z46表示左幅46#索夹，Y46表示右幅46#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



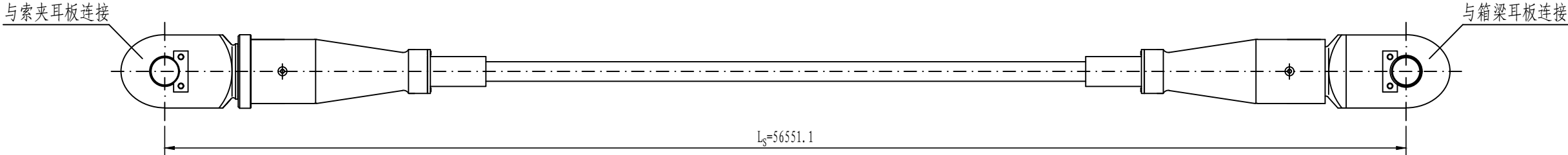
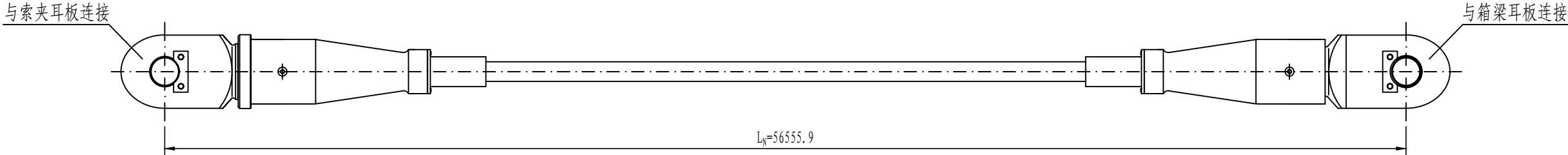
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z47表示左幅47#索夹，Y47表示右幅47#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



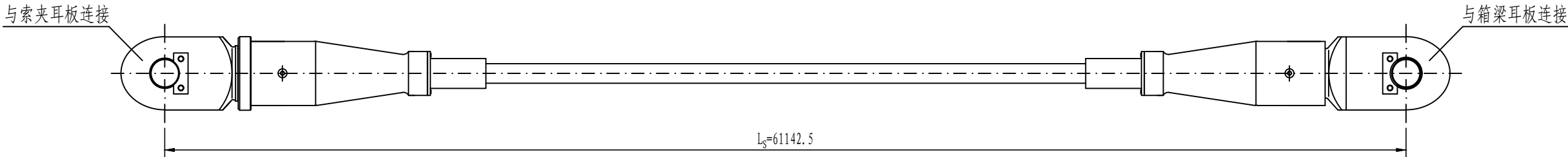
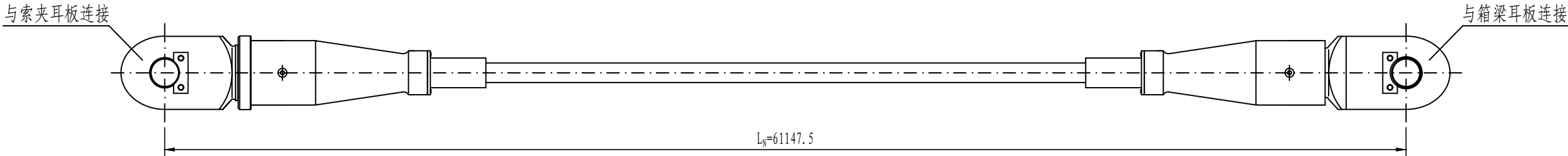
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z48表示左幅48#索夹，Y48表示右幅48#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



注:

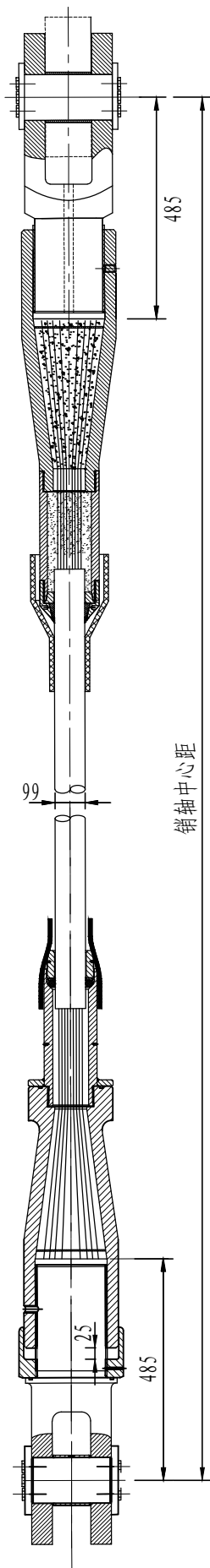
- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z49表示左幅49#索夹，Y49表示右幅49#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。



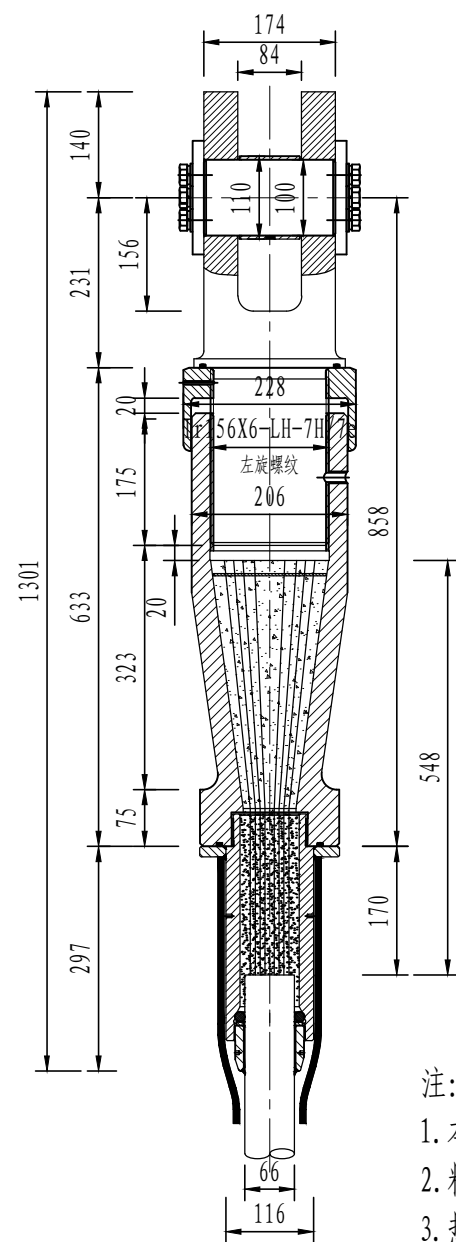
注:

- 1. 本图尺寸以毫米计。
- 2. Z50表示左幅50#索夹，Y50表示右幅50#索夹。
- 3. 本图中 L_N 表示同一索夹处的北侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度， L_S 表示同一索夹处的南侧吊索锚头销孔中心之间无应力长度。

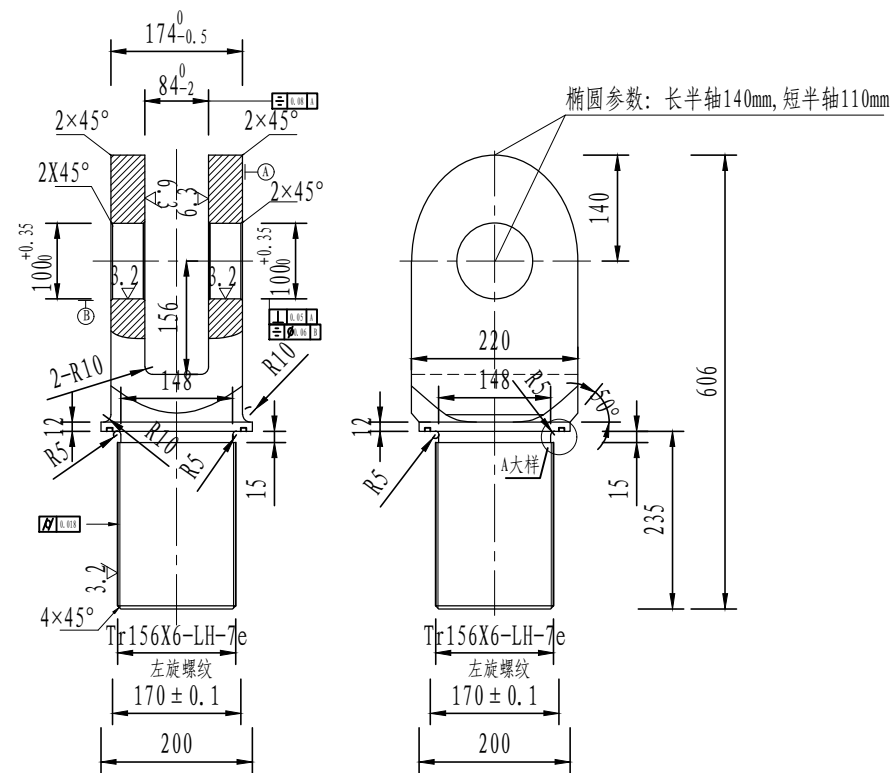
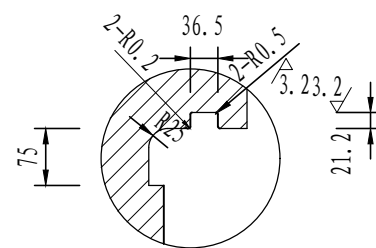
新增吊索总装图



上锚具总装图



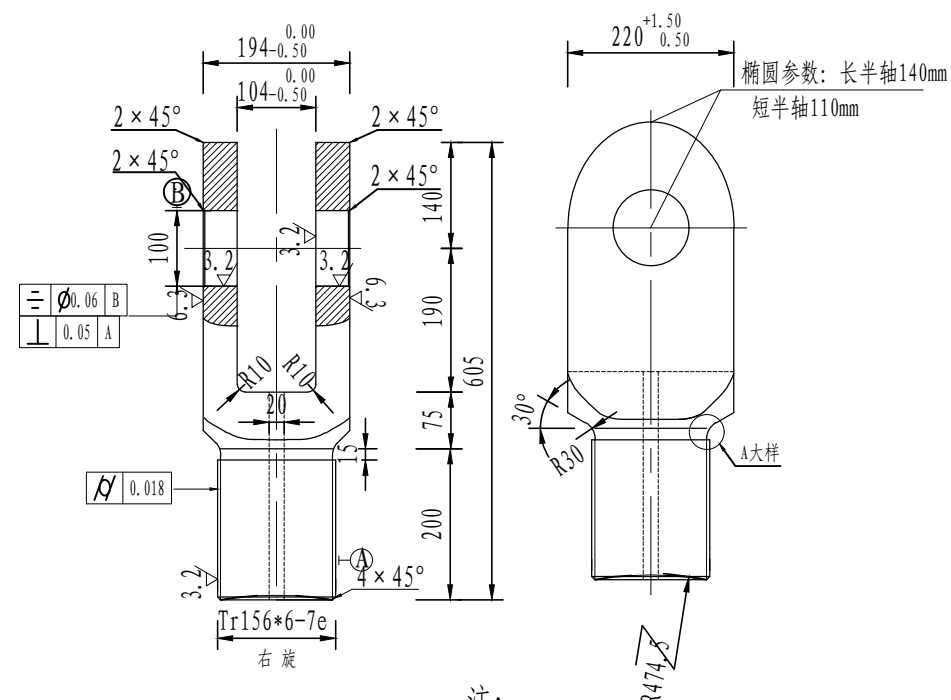
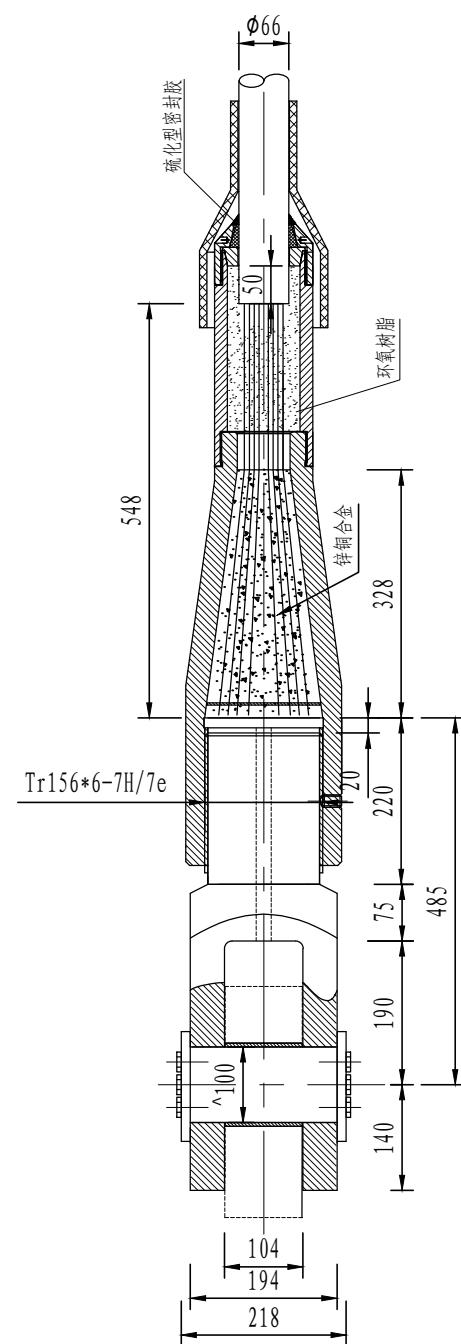
上耳板构造图

A大样
1:5

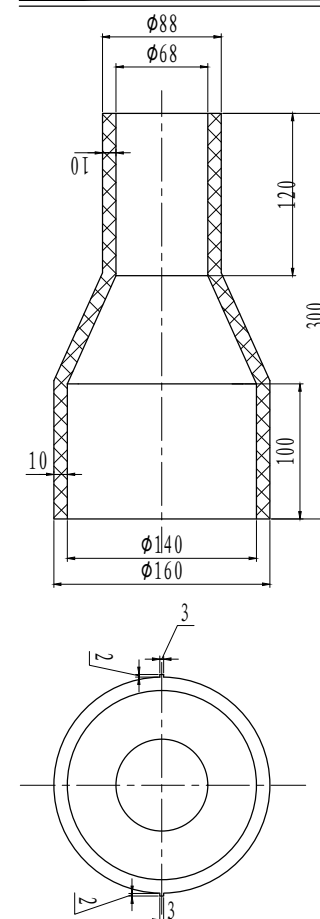
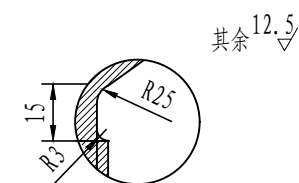
注:

1. 本图尺寸除注明外，均以毫米计。
2. 粗加工后经调质处理，成品表面硬度HB270-320。
3. 热处理后的半成品均须经超声波探伤检验，并符合《锻件钢棒超声波检验方法》(GB/T4162-2022)中的要求进行超声波探伤检查，B级合格，并出备合格证书。
4. 成品按《承压设备无损检测》(NB/T47013.4-2015)的要求进行磁粉探伤，Ⅱ级合格，工件不得有裂纹。
5. 经检查合格后，进行精加工，螺纹部分须按《承压设备无损检测》(NB/T47013.5-2015)的要求进行渗透探伤，Ⅱ级合格；不得有裂纹等影响强度的缺陷存在。
6. 螺纹入口处修钝，厚度不小于1毫米，不完全螺纹去除1/4圈，锐角倒钝需倒 $2 \times 45^\circ$ ，同种规格应具有互换性。
7. 表面喷砂 (Sa3.0) 表处后按《热喷涂金属和其他无机覆盖层锌、铝及其合金》(GB/T9793-2012)电弧喷锌 $\geq 100 \mu\text{m}$ ，锌层用环氧漆封闭；上耳板与上锚杯自由旋合，不损伤保护层。
8. 在耳板侧面激光打上编号，例 YZ73S-01...YZ73S-xx (以此类推)。
9. 未注明尺寸公差执行GB/T1804-m；未注明形位公差执行GB/T1184-H。

下耳板构造图



A大样



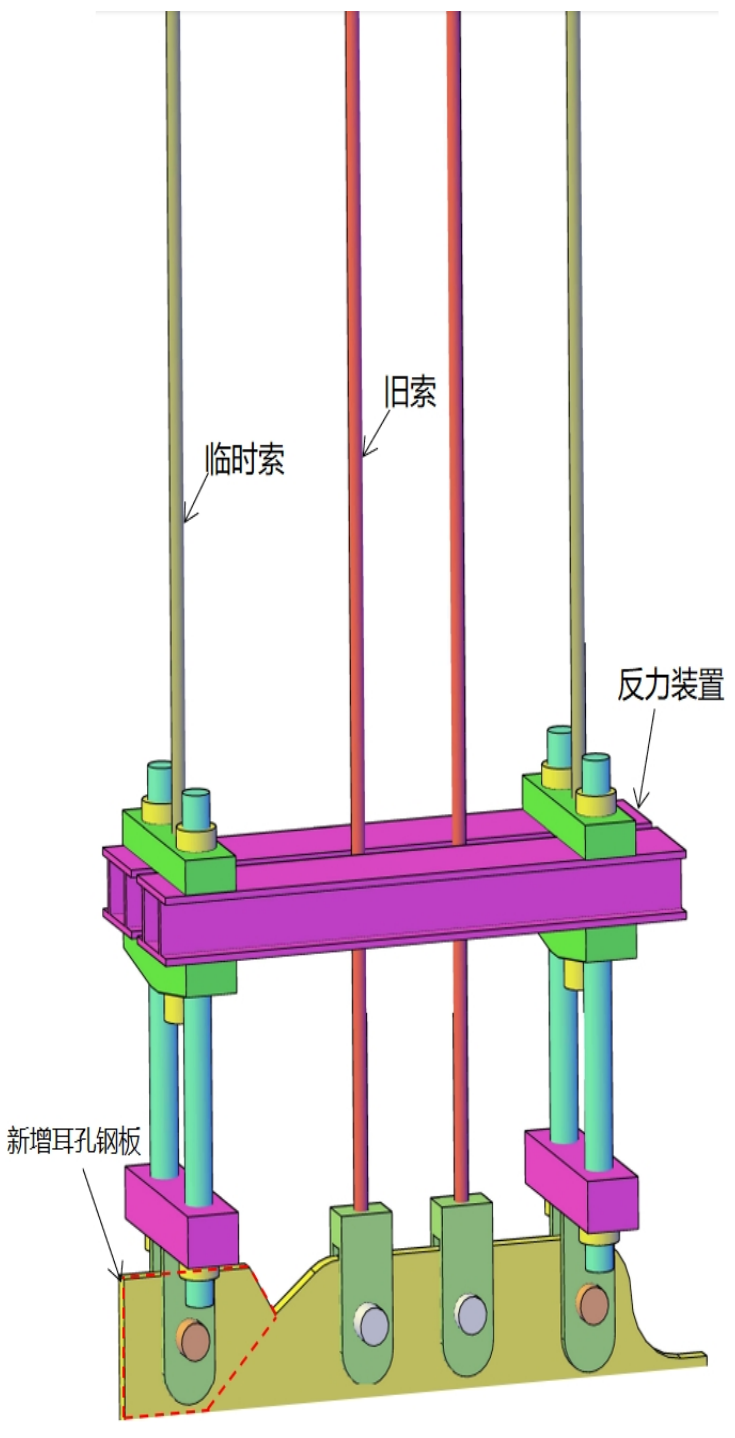
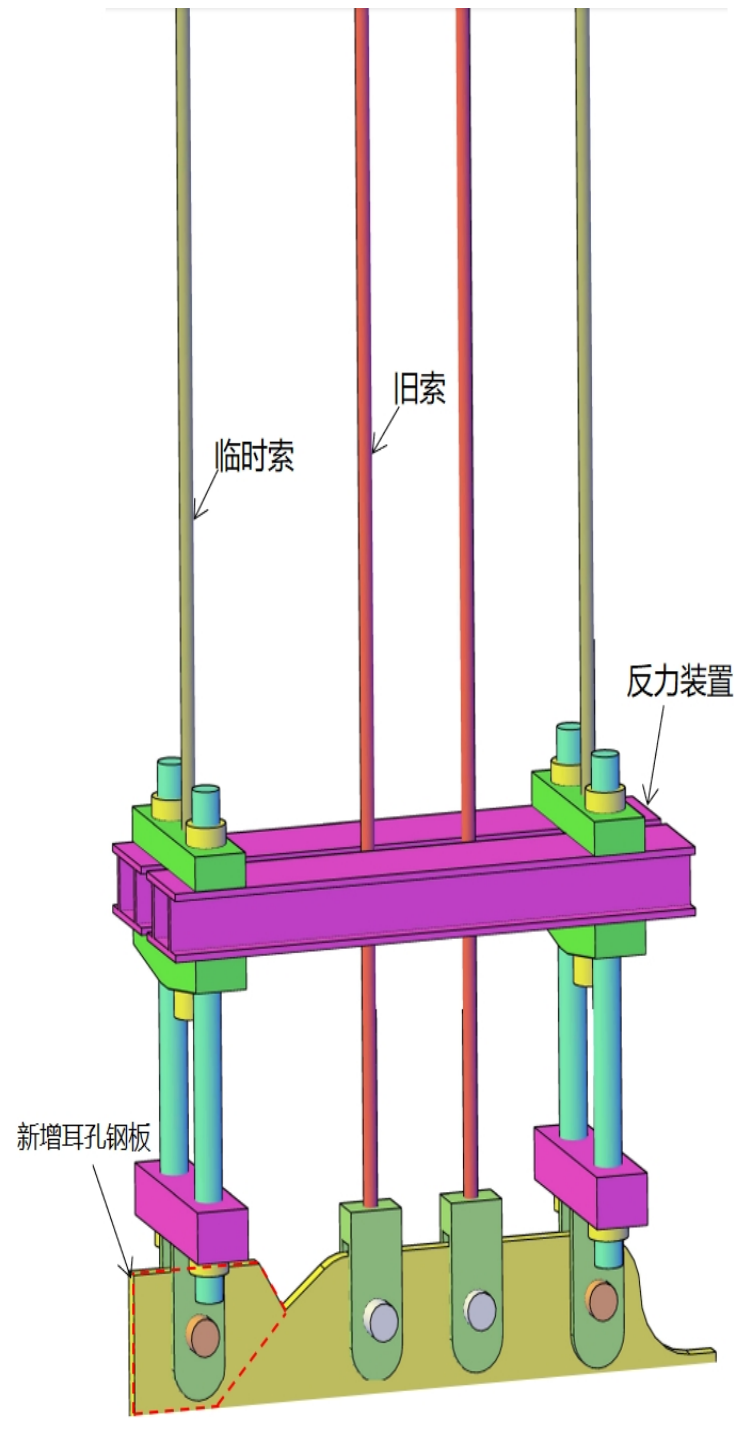
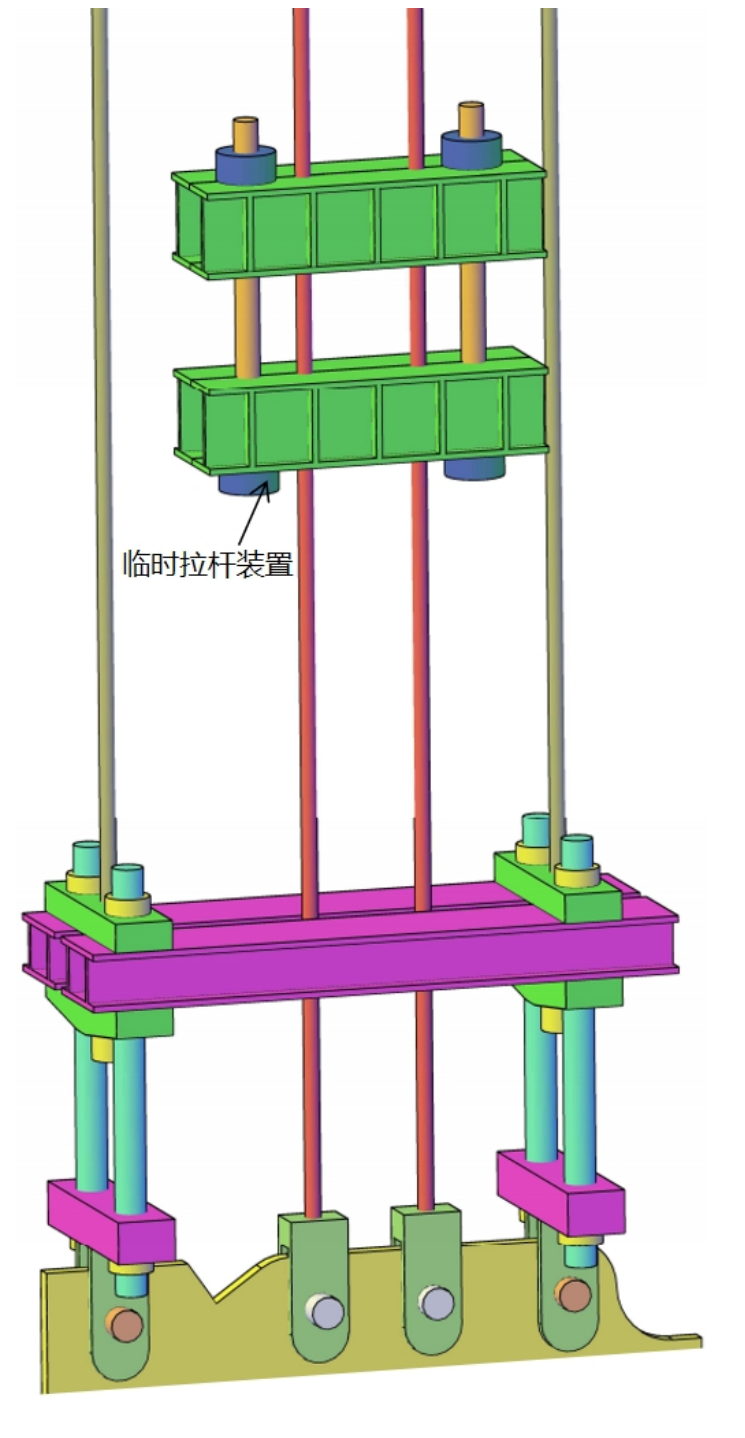
注：

(一) 下锚具

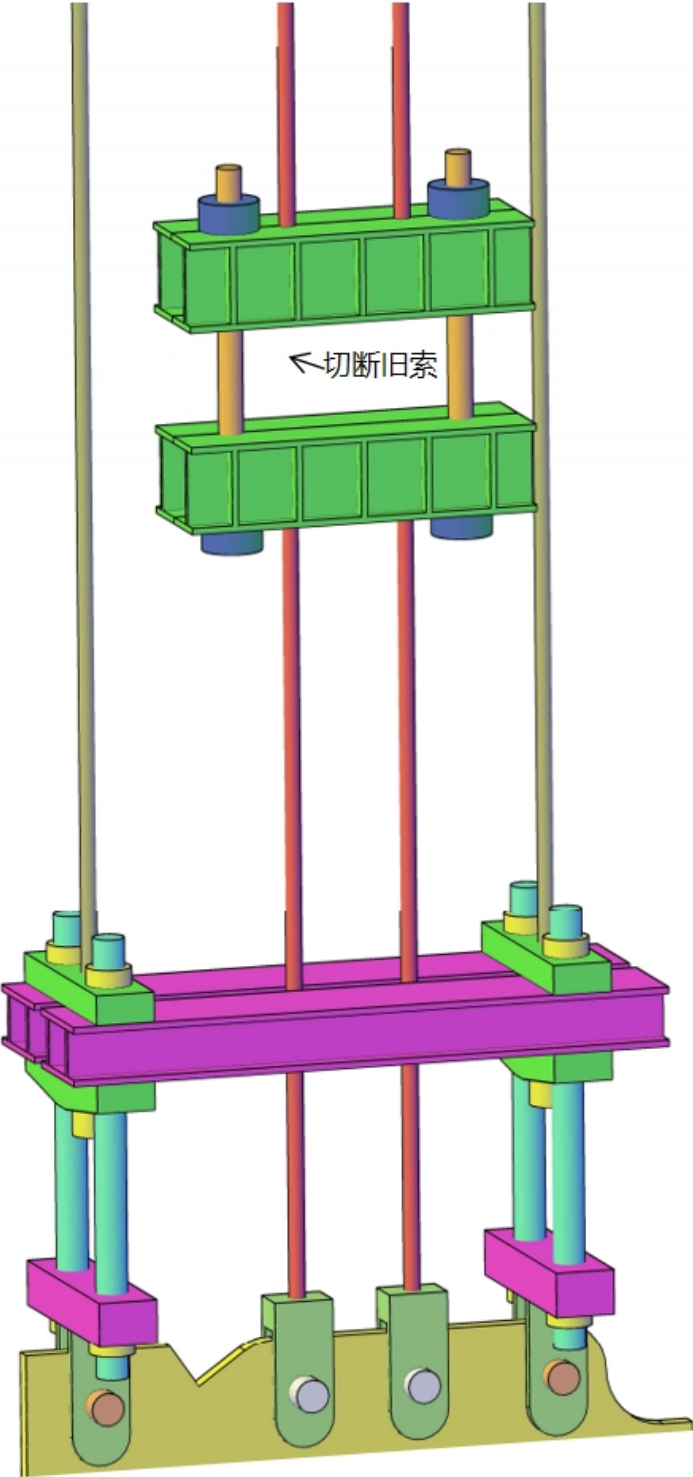
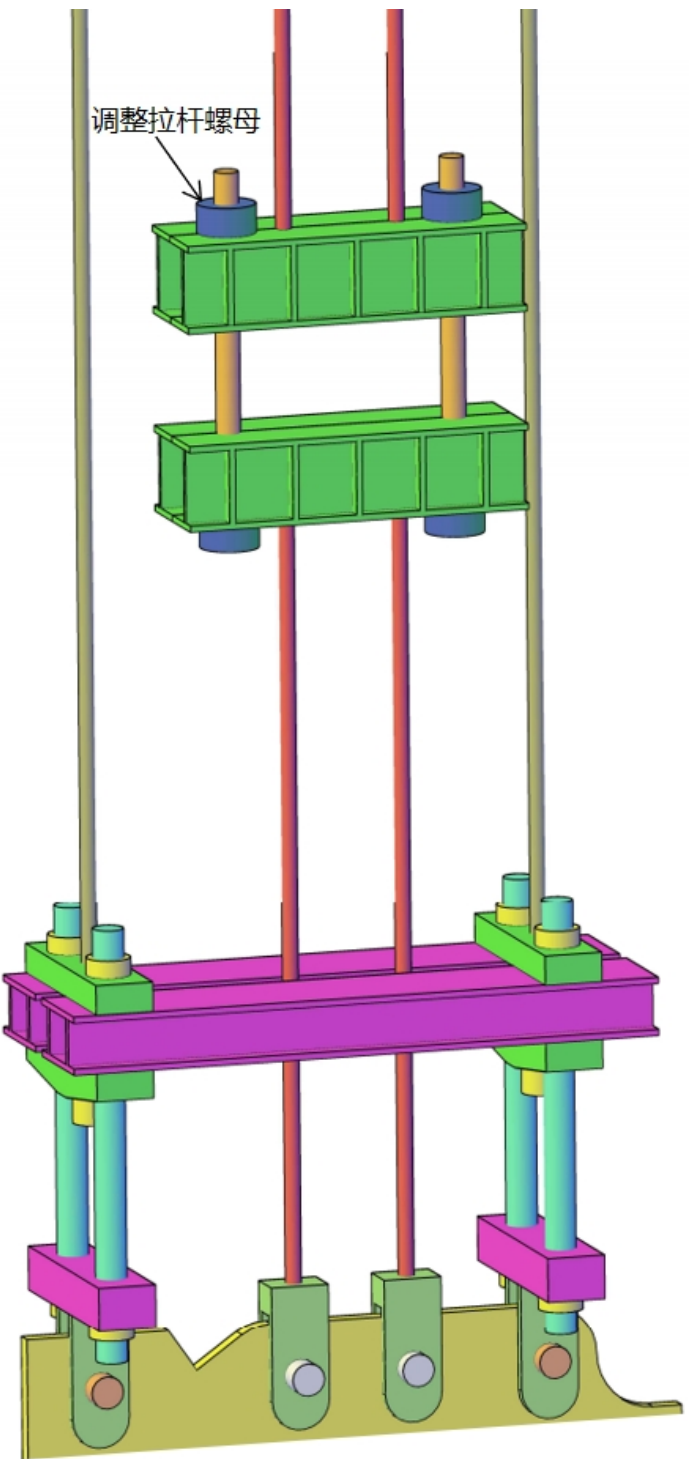
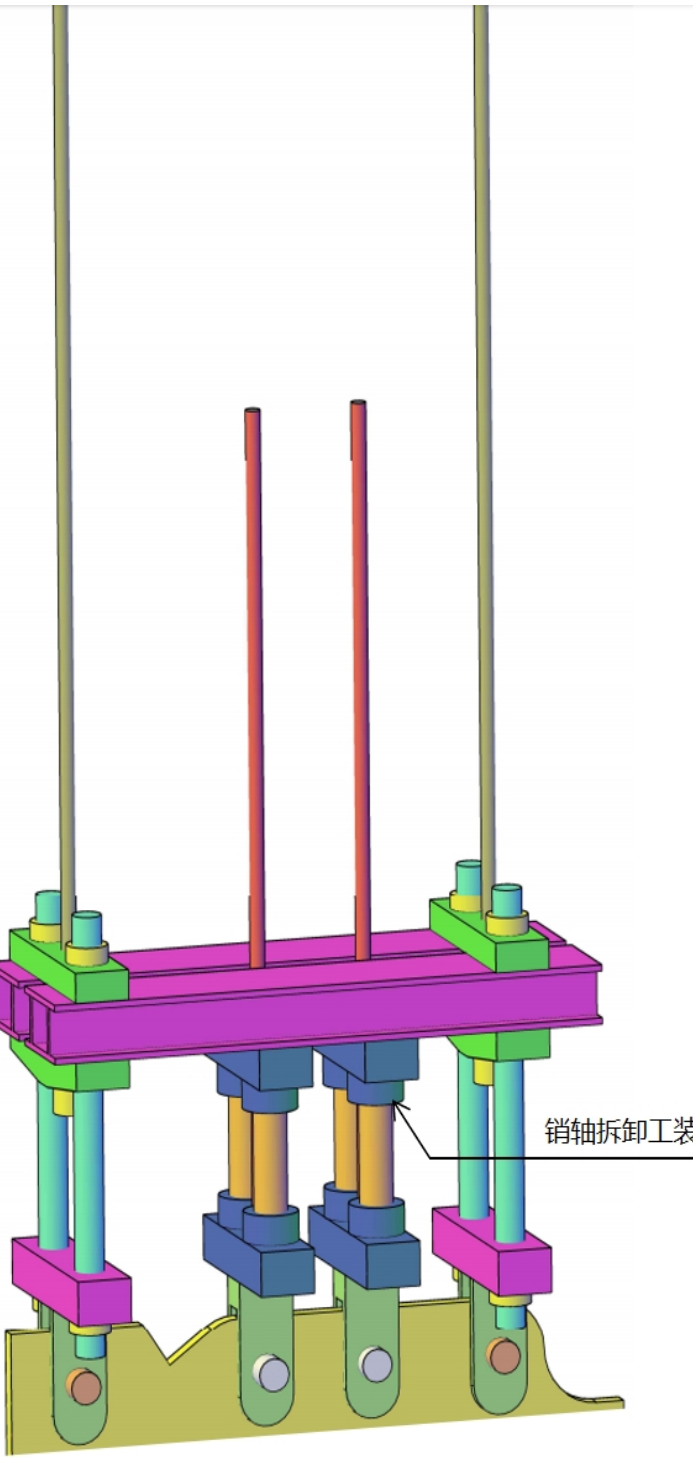
1. 本图尺寸除注明外, 均以毫米计。
2. 粗加工后经调质处理, 成品表面硬度HB270-320。
3. 热处理后的半成品均须经超声波探伤检验, 并符合《锻件钢棒超声波检验方法》(GB/T 4162-2008)中的要求进行超声波探伤检查, B级合格, 并出备合格证书。
4. 成品按《承压设备无损检测》(NB/T47013.4-2015)的要求进行磁粉探伤, II级合格, 工件不得有裂纹。
5. 经检查合格后, 进行精加工, 螺纹部分须按《承压设备无损检测》(NB/T47013.5-2015)的要求进行渗透探伤, II级合格; 不得有裂纹等影响强度的缺陷存在。
6. 螺纹入口处修钝, 厚度不小于1毫米, 不完全螺纹去除1/4圈, 锐角倒钝。
7. 表面喷砂 (Sa3.0) 表处后按《热喷涂金属和其他无机覆盖层锌、铝及其合金》(GB/T 9793-2012)
8. 在耳板侧面打上编号, 例 YZ73X-01.....YZ73X-36。
9. 未注明尺寸公差执行GB/T1804-m; 未注明形位公差执行GB/T1184-H。

(二) 防水罩

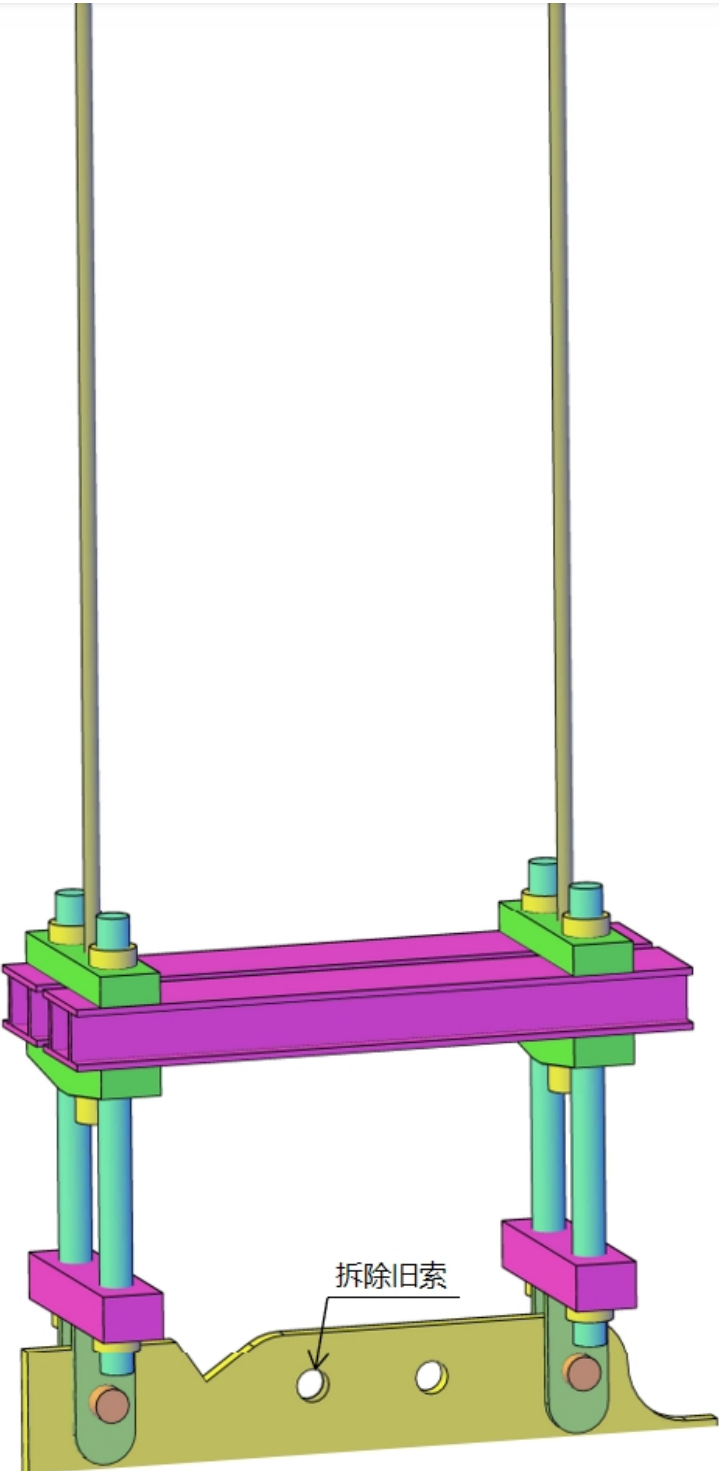
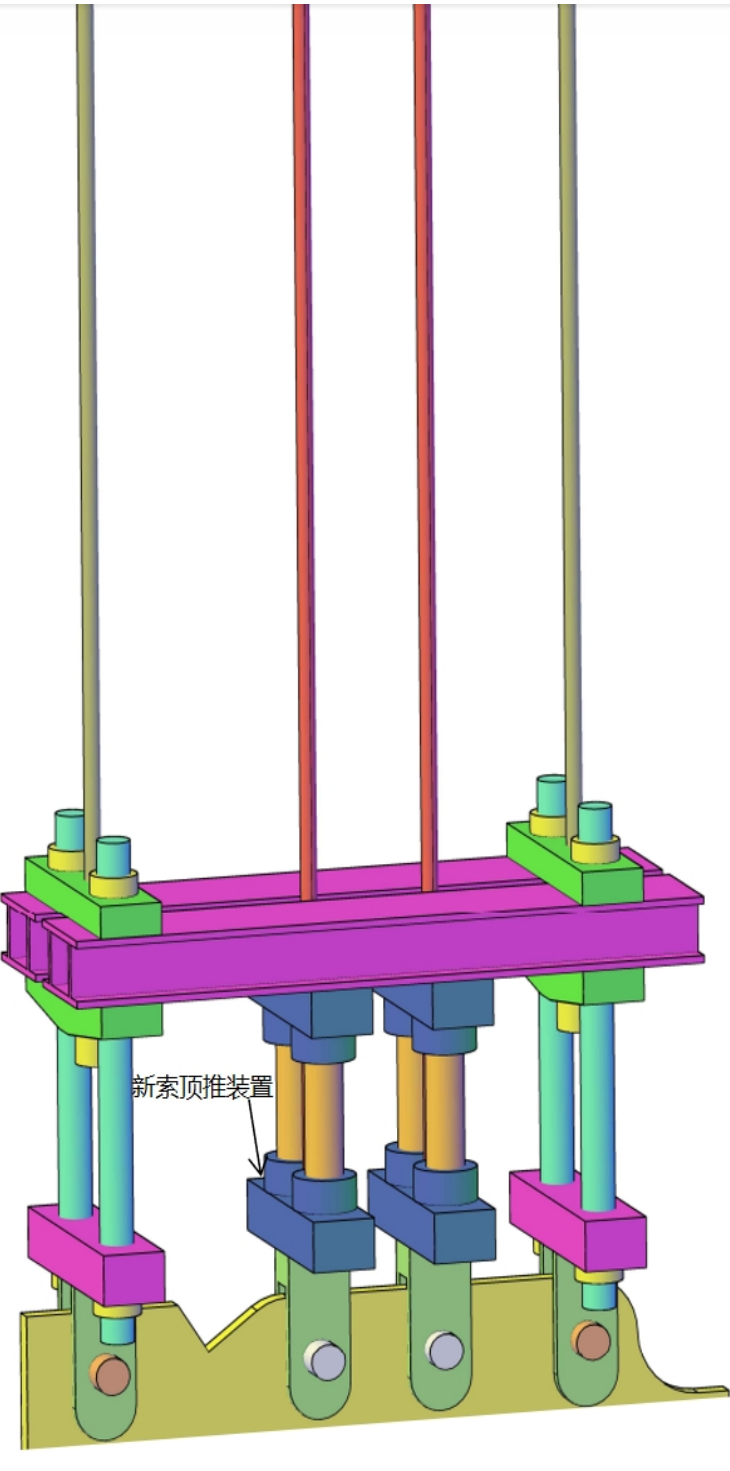
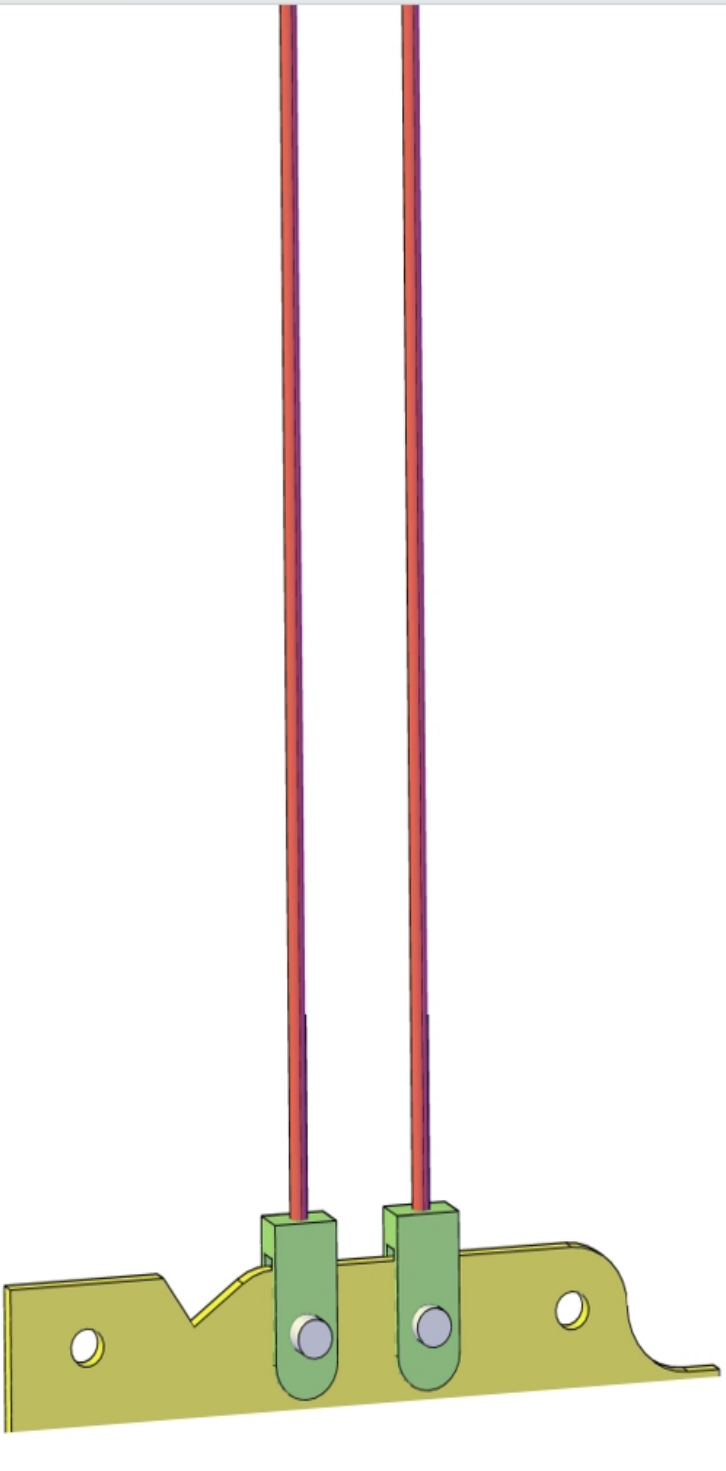
1. 本防水罩材料采用HDPE注塑成有3mm直段的椭圆型；根据HDPE防雨罩尺寸设计、加工模具。
2. 椭圆直段3mm处高出2mm, 用于后加工分模面，开模开全模。
3. 注塑成型后未注尺寸公差采用GB/T 1804-m;
4. 注塑成型后未注形位公差采用GB/T 1184-H。

施工阶段	第1阶段	第2阶段	第3阶段
工作内容图示			
工作内容	1. 准备工作，进行交通管制，和工具的准备； 2. 按照要求增加新的吊耳孔； 3. 在对应主缆位置安装临时索夹； 4. 安装临时吊索及张拉工装；	1. 根据计算结果，张拉临时索至计算索力。	1. 在旧索体下部安装临时拉杆装置； 2. 张拉临时拉杆至计算值，卸载临时拉杆间旧索索体全部剩余索力值；

注：本图适用于1#-4#、47#-50#吊索更换。

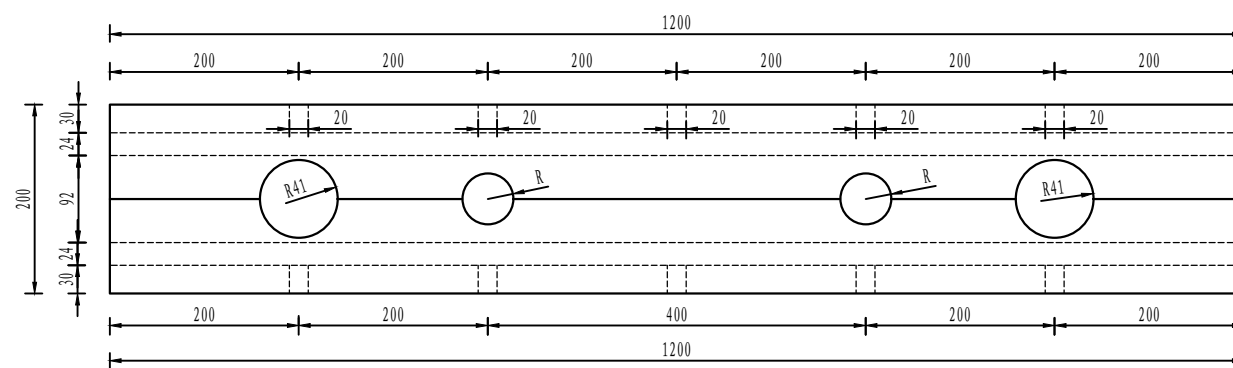
施工阶段	第4阶段	第5阶段	第6阶段
工作内容图示			
工作内容	1. 采用专用设备同时切割两根旧索，将旧索索力转移至临时拉杆及临时吊索上；	1. 控制临时拉杆装置上的螺栓，放张临时拉杆，再次卸载旧索下端索体索力； 2. 通过完全放张临时拉杆将旧索下端索体内力全部卸载。	1. 安装销轴专用拆卸工装；

注：本图适用于1#-4#、47#-50#吊索更换。

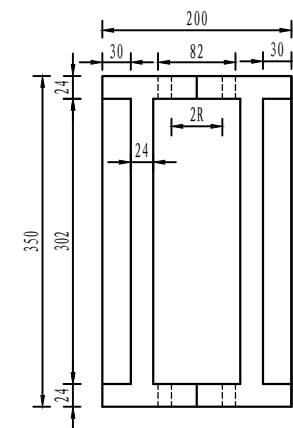
施工阶段	第7阶段	第8阶段	第3阶段
工作内容图示			
工作内容	1. 分别拆除旧索下端和上端销轴，旧索完全被拆除	1. 采用吊机等设备将新索上端叉耳与索夹对齐，完成新索上端安装。 2. 在新索下端与临时索张拉反力梁之间安装千斤顶； 3. 利用临时索张拉反力梁设备张拉顶推新索至下锚杯至耳板，安装销轴，完成新索的安装。	1. 拆除临时索及张拉设备，完成整根索的更换；

注：本图适用于1#-4#、47#-50#吊索更换。

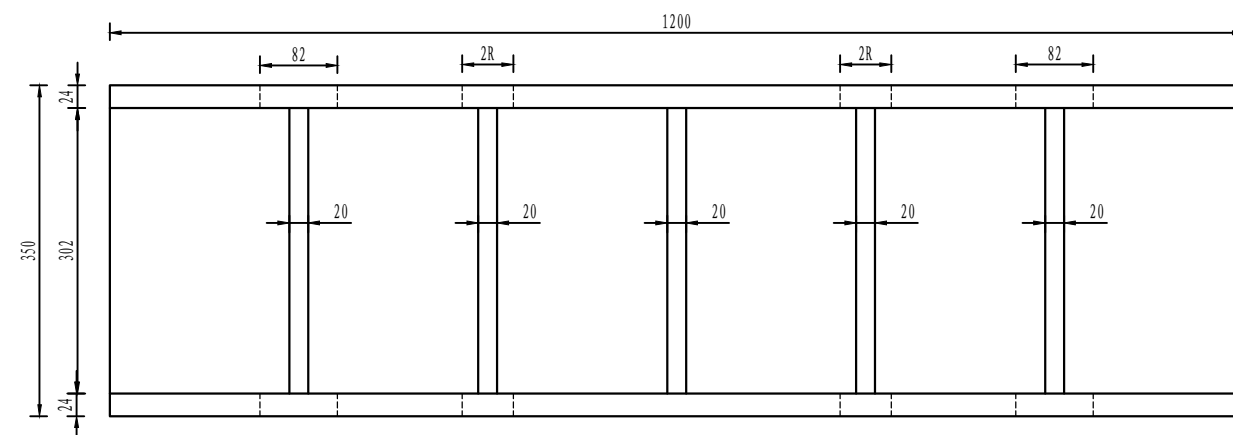
临时拉杆平面图



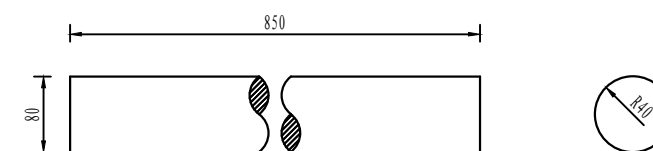
临时拉杆侧面图



临时拉杆立面图



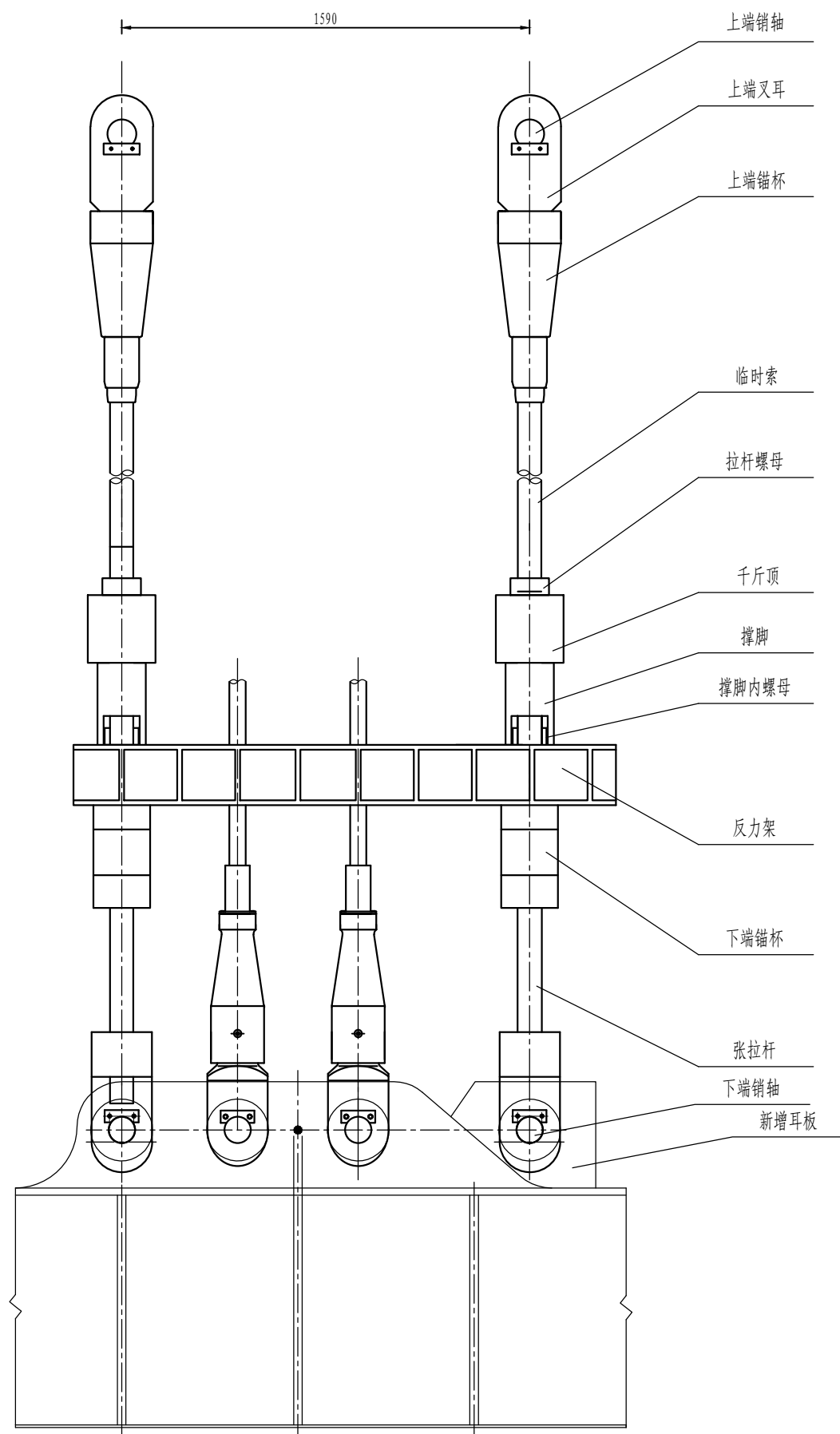
临时张拉杆构造图



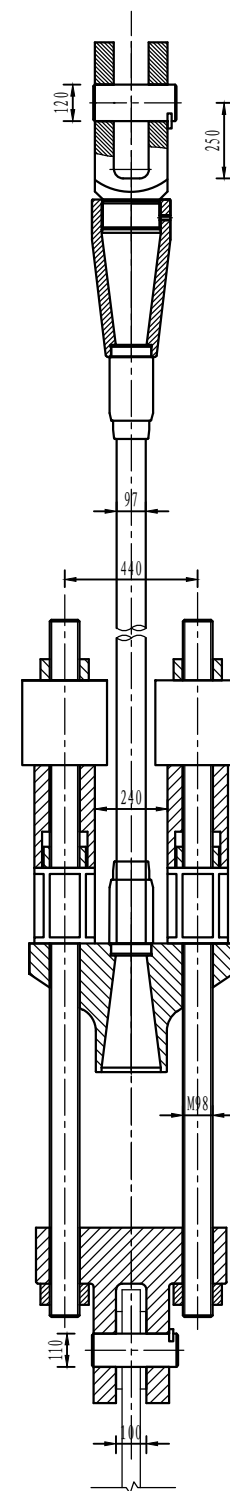
注:

1. 本图尺寸均为mm;
2. 本图临时拉杆适用于旧索卸载;
3. 临时拉杆装置采用Q345低碳钢。
4. 本图中R的尺寸根据现场施工时的具体情况来选取。

立面图



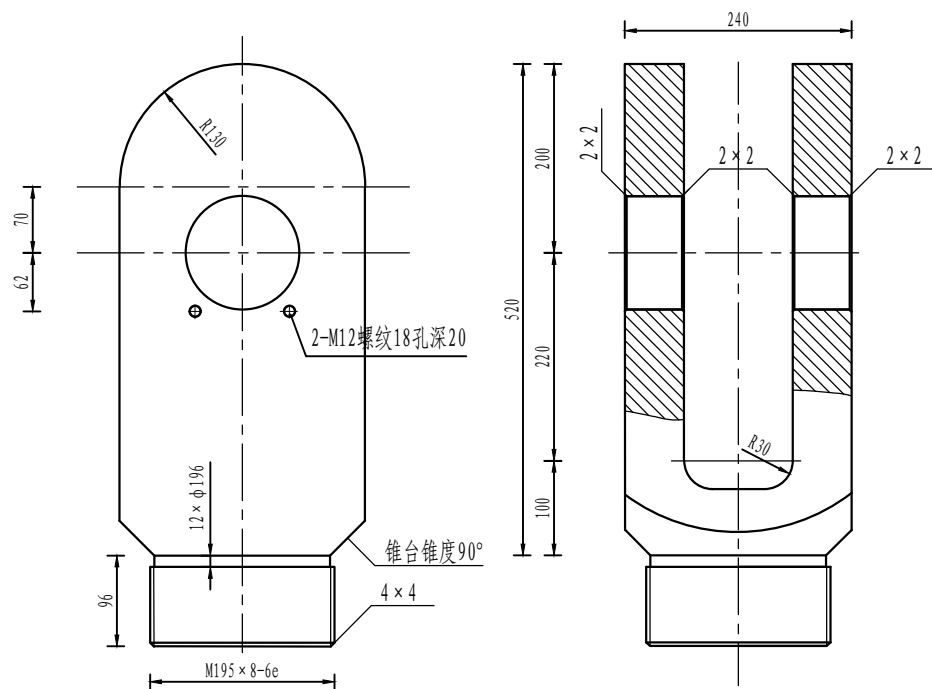
侧面图



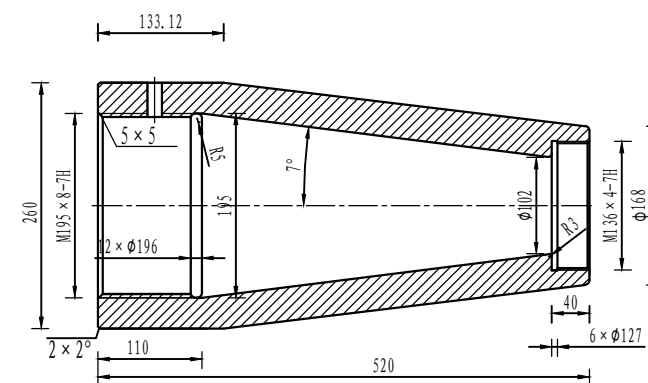
注:

1. 本图尺寸均为mm;
2. 上端、下端叉耳、上端锚杯材料采用Cr40, 原材料化学成分及机械性能符合《合金结构钢技术条件》(GB/T3077-2015);
3. 下端锚杯材料采用ZG35Cr1Mo, 原材料和机械性能满足《大型低合金钢铸件》(JB/T6402-2006)的规定;
4. 销轴材料采用40CrNiMoA, 原材料化学成分及机械性能符合GB/T3077-2015《合金结构钢技术条件》

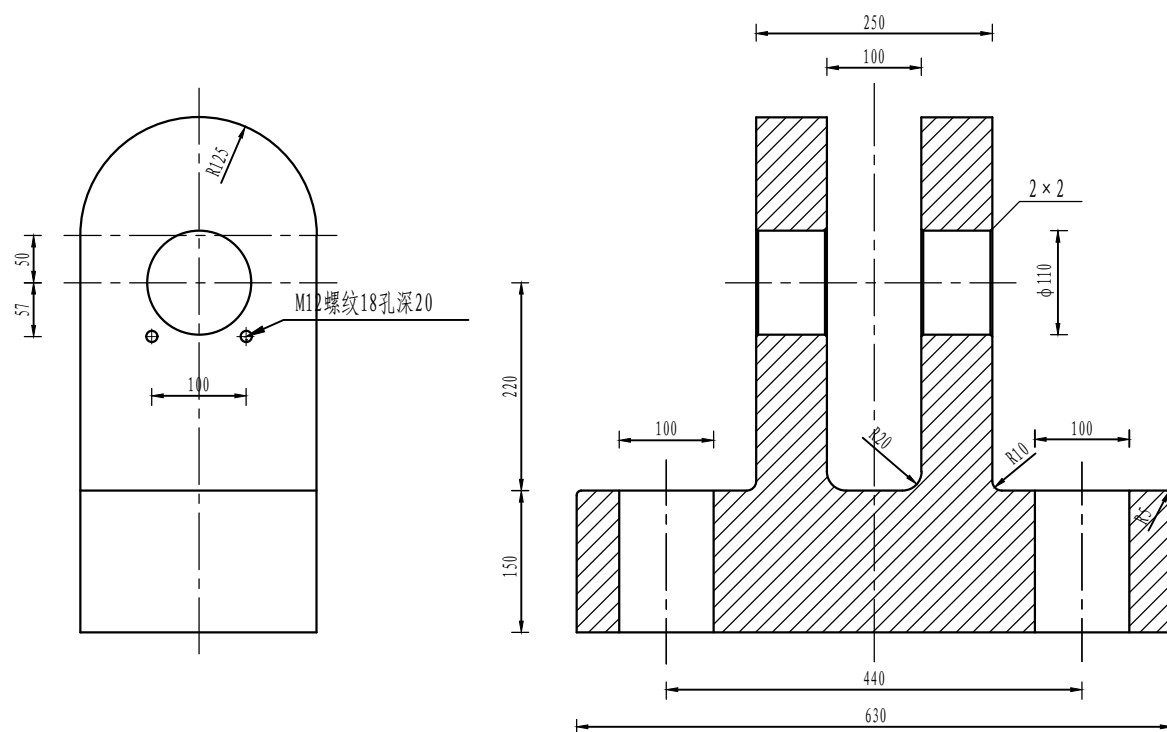
上端叉耳构造图



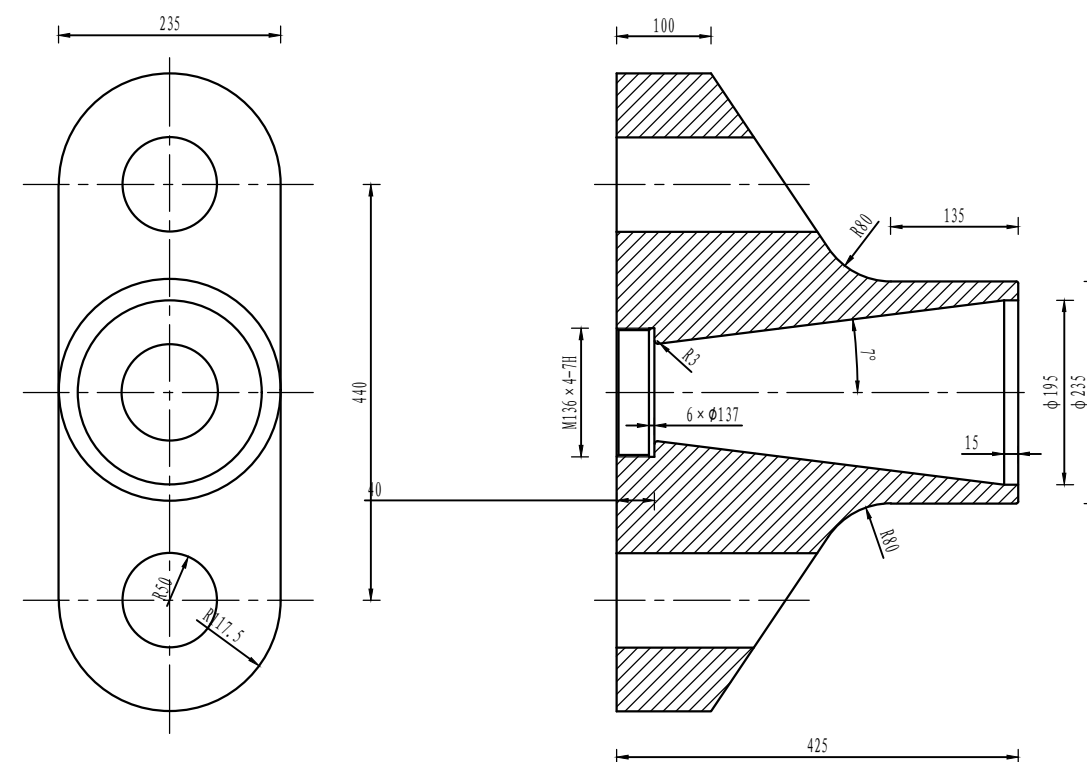
上端锚杯构造图



下端叉耳构造图



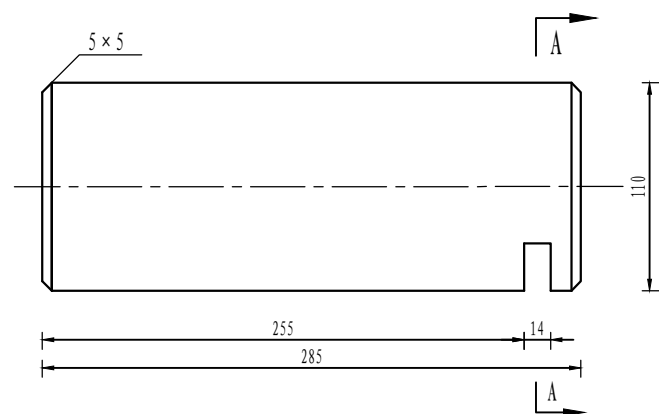
下端锚杯构造图



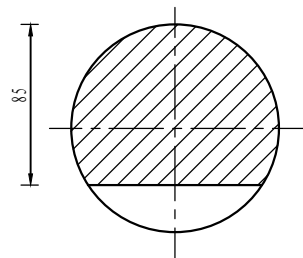
注:

1. 本图尺寸均为mm;

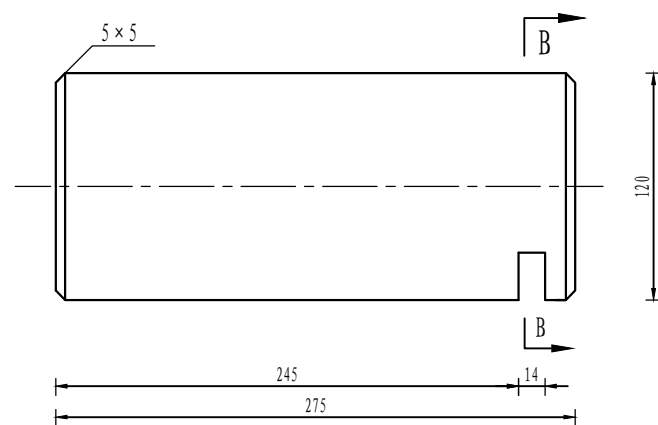
下端销轴构造图



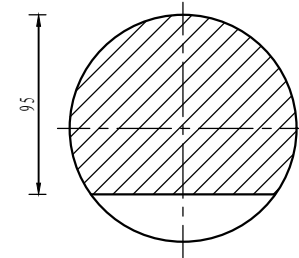
A-A



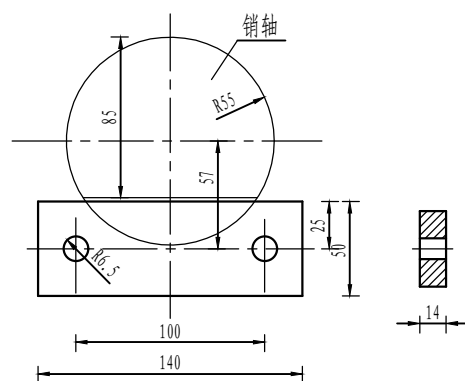
下端销轴构造图



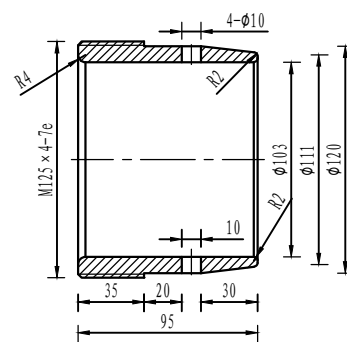
B-B



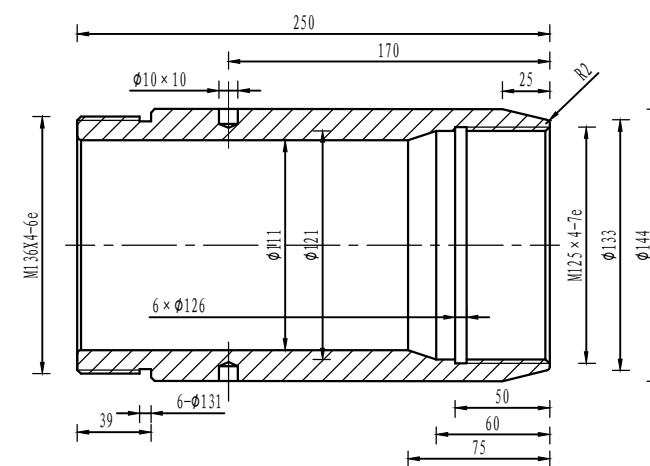
挡板构造图



密封压环构造图



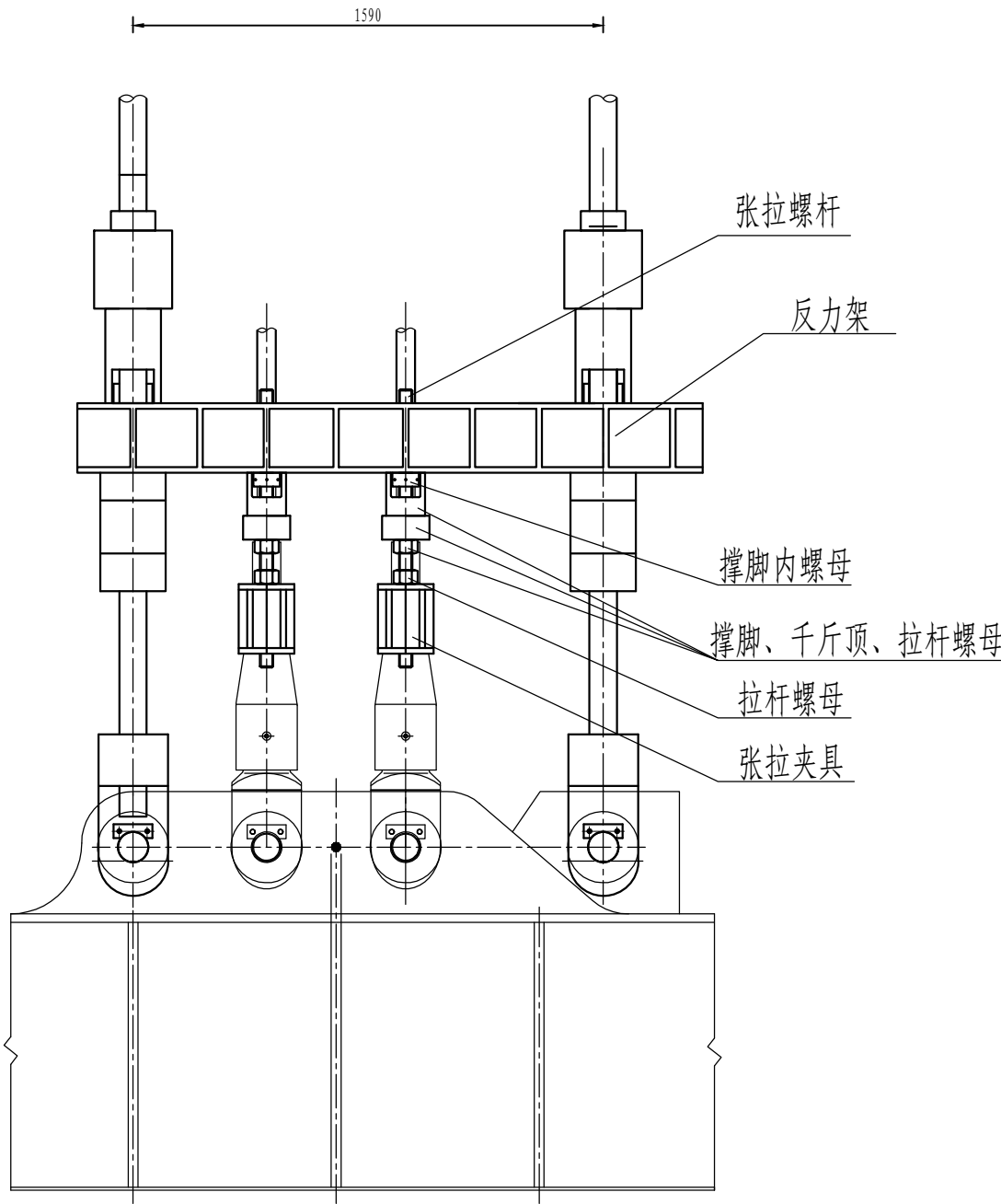
连接筒构造图



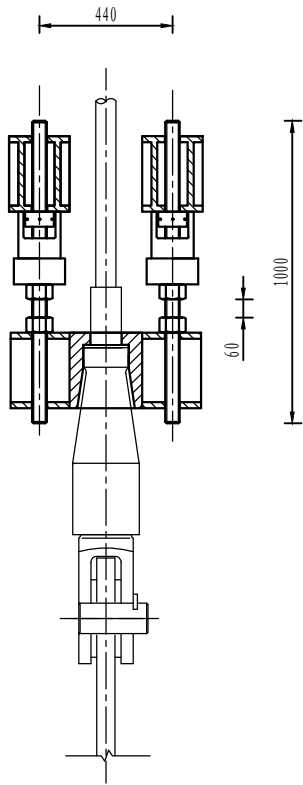
注:

1. 本图尺寸均为mm;

立面图

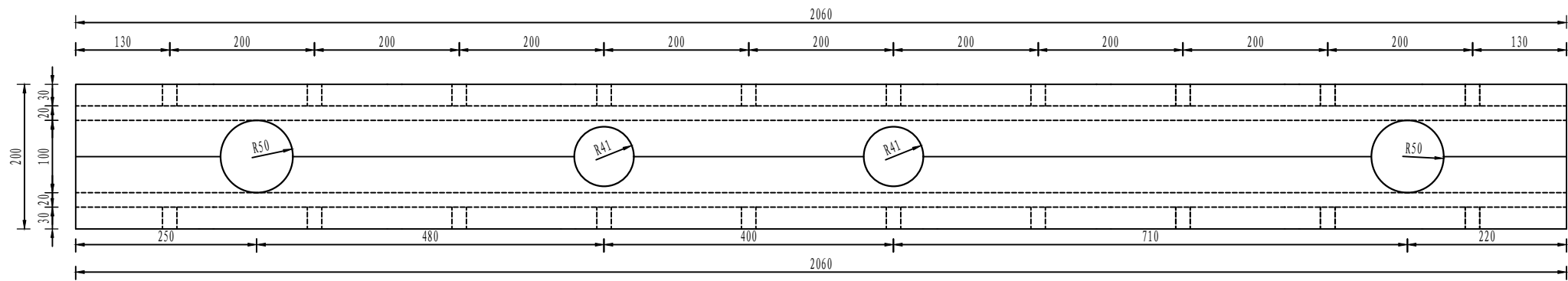


侧面图

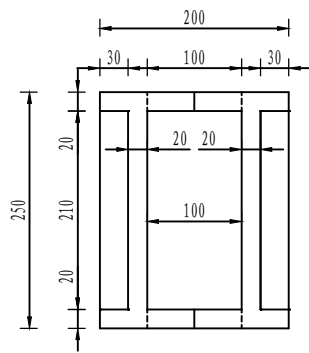


注：
1. 本图尺寸均为mm;

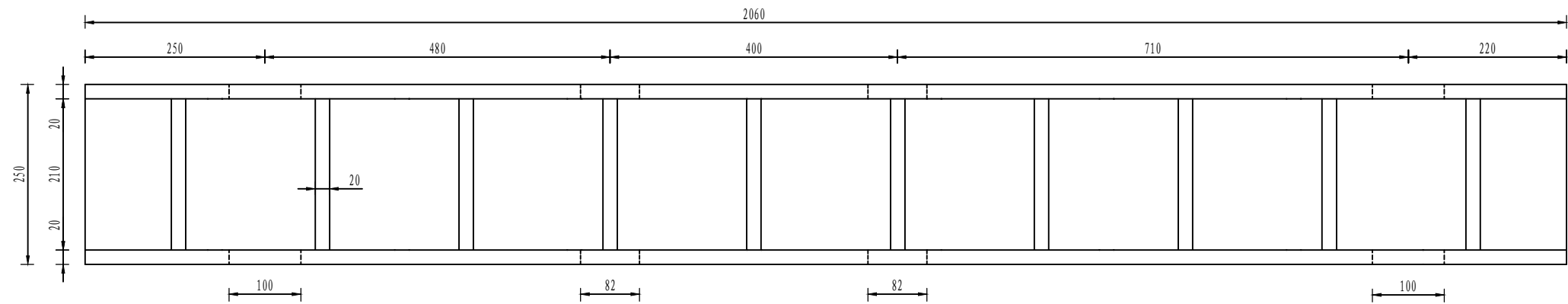
反力梁平面图



反力梁侧面图

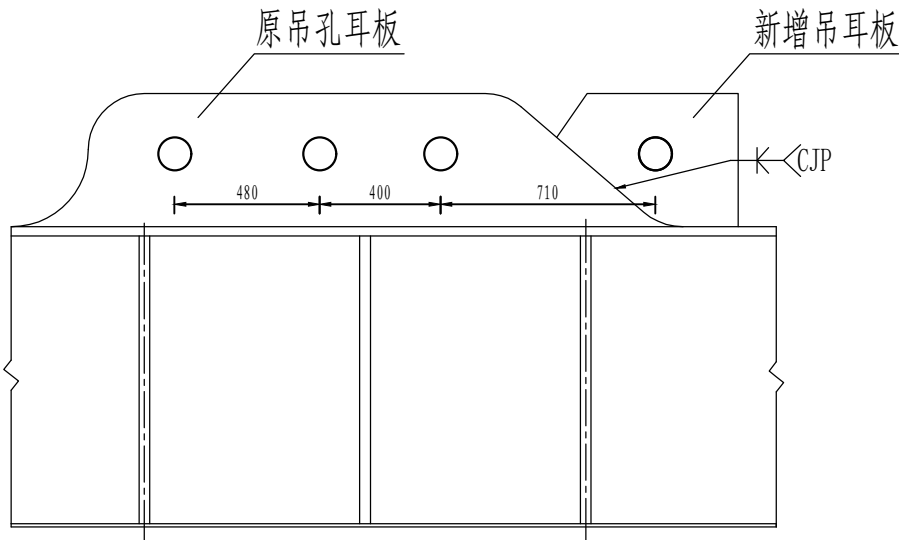


反力梁立面图

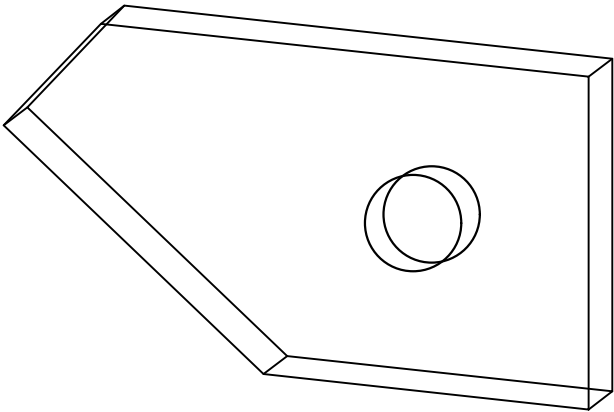


- 注：
- 1. 本图尺寸均为mm；
 - 2. 本图仅示出一片反力梁的构造图；
 - 3. 反力架采用Q345低碳钢。

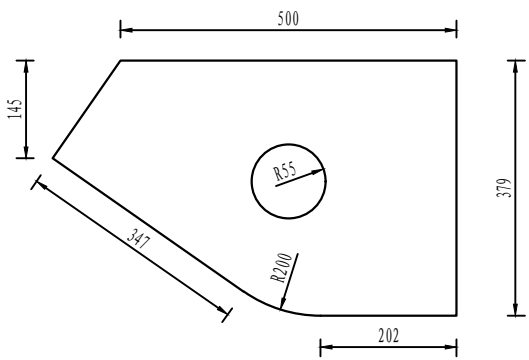
新增耳板与原耳板拼接示意图



新增吊耳板



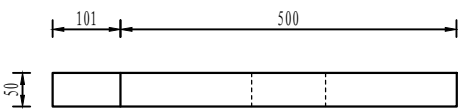
新增吊耳板立面



新增吊耳板侧面



新增吊耳板平面



注：
1. 本图尺寸均为mm。
2. CJP表示全熔透焊缝。