裕安一路西延工程空间双曲拱形索塔卧拼竖转施工技术研究及应用

季明志[1,2]，王鹏[1]，沈理[1,2]
（1. 中交第二航务工程局有限公司，湖北　武汉　430040；2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室，湖北　武汉　430040）

摘　要：为解决裕安一路西延工程斜拉桥索塔施工受航空限高、施工水域水深浅、环境保护要求高及工期紧，常规施工工艺无法完成索塔施工的难题，西侧索塔节段采用支架卧拼施工，东侧索塔节段 TS0—TS6 与主梁采用同步顶推施工，待顶推到位后，完成索塔的剩余节段卧拼匹配连接。扣塔及索塔卧拼施工完成后，通过扣塔、同步提升装置等将两侧索塔同步提升到位。实践表明，卧拼+竖向转体施工工艺可解决受限空间环境索塔施工难题，并且保障施工安全、节约施工成本、减少大型设备和设施投入，此工艺可为类似环境施工提供参考。

关键词：斜拉桥；卧拼；竖向转体；索塔
中图分类号：U6；U655.4；U445.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**2095-7874(2026)09-0092-07
doi：10.7640/zggwjs202609013

Research and application of space double-curved arch pylon horizontal assembly and vertical rotation construction technology in west extension project of Yu′an 1st Road

Ji Mingzhi[1,2], Wang Peng[1], Shen Li[1,2]
(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: To address the challenges in constructing the pylon of the cable-stayed bridge for the west extension project of Yu′an 1st Road, including aviation height restrictions, shallow construction waters, stringent environmental protection requirements, and tight construction schedule, conventional construction technologies cannot satisfy the pylon construction demands. A composite construction scheme was adopted: the west pylon segments were assembled horizontally on supports, while the east pylon segments (TS0-TS6) were incrementally launched synchronously with the main girder. Upon completion of the launching process, the remaining pylon segments were horizontally assembled and matched. Following the completion horizontal assembly for the buckle tower and pylon, the pylons on both side were lifted synchronously into their final positions by means of buckle tower and synchronous lifting devices. Engineering practice demonstrates that the horizontal assembly combined with vertical rotation technique effectively resolves pylon construction issues in confined environments. Furthermore, this method enhances construction safety, reduces costs, minimizes the deployment of large-scale equipment, and provides a valuable reference for similar projects under restrictive conditions.

Key words: cable-stayed bridge; horizontal assembly; vertical rotation; pylon

0　引言

随着城市发展需要，越来越多的景观桥梁在市内进行建设，常规景观桥梁索塔施工工艺较多，施工环境受城市空间影响大。若施工环境满足要

收稿日期：2026-02-04　　修回日期：2026-07-28
作者简介：季明志（1995—　），男，吉林长春人，工程师，道路桥梁与渡河工程专业。E-mail：1903211013@qq.com

求，则采用大节段卧拼竖转（卧拼+竖向转体）施工，如江苏昆山震川桥[1]、沈阳浑河三好桥[2]、金婺大桥[3]及九洲航道桥[4]索塔施工；若不存在航空限高，则采用大型塔吊竖拼（竖向拼装）施工，如石家庄滹沱河大桥、漳州芝山大桥、泰州长江公路大桥[5]索塔施工；若施工水域水深满足要求，则采用大型浮吊竖拼施工，如南京五桥北索塔下塔柱施工、南京青奥公园步行桥[6]索塔施工；若施工位置距离岸边较近，则采用大型履带吊竖拼施工，如沱江大桥[7]和太原通达大桥索塔施工。

裕安一路西延工程索塔采用拱形结构，整体呈现“莫比乌斯环”的效果，是一种单侧、不可定向的拓扑结构。该工程地理环境受航空限高、施工水域水深浅、红树林环保要求高、水上作业及工期要求紧等综合因素影响，采用“卧拼+滑移+竖转”的施工工艺，有效解决了施工中的难点，可为类似环境施工提供参考。

1　工程概况

裕安一路西延工程路线全长约 961 m，其中桥梁全长约 758 m，双向六车道，道路等级为城市主干道，设计速度 50 km/h；东西两岸衔接道路全长 221.307 m。其中，主桥为跨海斜拉桥，桥跨布置为 2×78 m+（88 m+2×160 m+58 m）+2×68 m，桥型为拱形塔斜拉桥，跨越前海湾，斜拉桥效果图见图 1。

图 1　斜拉桥效果图

Fig. 1　Rendering of the cable-stayed bridge

主跨 160 m 的钢拱形塔斜拉桥下塔柱采用钢混组合结构，上塔柱采用纯钢结构；采用悬浮式钢锚环结构集中连接约束拉索，主梁采用钢箱梁。索塔高 121.3 m，上塔柱为钢塔，塔柱截面采用六边形，上塔柱索塔总重约 4 600 t，单肢转体重量约为 2 233 t；下塔柱由塔座及下塔柱四肢构成，采用实心钢壳混凝土结构。

索塔竖向共分为 51 个节段（YM1、TX1—TX4、TY1—TY4、CT1—CT4、TS0—TS7），索塔节段长 8~13 m，下塔柱 YM1 节段分为 2 节，索塔节段 CT1—CT4 节段共分为 4 节，上塔柱共分为 46 个节段（TX1—TX4、TY1—TY4、TS0—TS7），见图 2。钢锚梁与索塔节段同步加工、制作，索塔节段最大重量为 123.06 t。

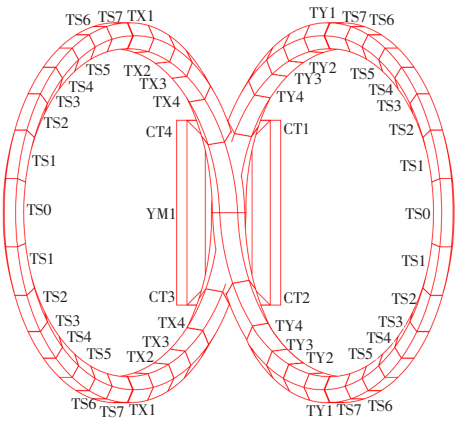


图 2　索塔分节图

Fig. 2　Segment layout of the pylon

索塔施工跨越海域水深大部分在 2~3 m，浅水区域水深约 1 m，经疏浚后水深约 4 m，区域潮位为不规则半日潮，潮位变化幅度约为 1~2 m，多年平均高潮位+1.076 m，桥址北侧为渔政码头，大型船只无法通行，该桥位距离深圳宝安机场约 13 km，施工高度存在航空限高要求。

本项目线路西侧（起点侧）与东侧（终点侧）均存在红树林，工程建设需要跨越红树林区域，受法律要求，工程建设施工不得砍伐红树林，红树林影响施工面积约为 8 287 m^2。施工环境平面图见图 3。

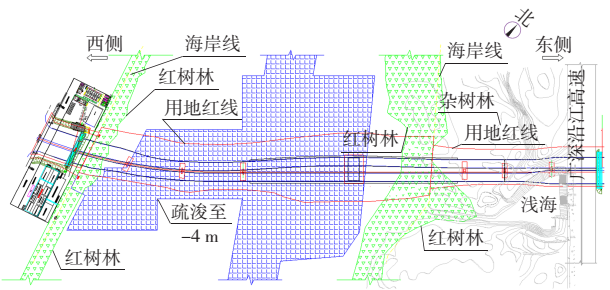


图 3　施工环境平面图

Fig. 3　Construction site layout plan

2　方案比选

2.1　类似项目研究

1）大型履带吊安装。沱江大桥索塔高 173 m，桥面以上 140 m，采用 1 350 t 履带吊（超起工况）

安装，履带吊基础平台均处于岸边，对于履带吊基础平台设置及大臂拼装较为有利，通达大桥施工环境类似。

2）大型浮吊安装。南京五桥北索塔下塔柱高 38.85 m，需采用至少 3 000 t 起重船进行索塔节段起吊，吃水最少 5 m，施工区域水深 7.5 m，可满足施工要求。

3）大型塔吊安装。石家庄滹沱河大桥索塔高 146.5 m，为独塔结构，索塔中、上塔柱均为钢塔，采用 1 台 STT3930–200t 大型塔吊逐节段进行拼装施工。

4）竖转施工。震川桥转体重量 1 750 t，转体角度 75°，索塔高度为 101.6 m 和 78.6 m；沈阳浑河三好桥转体重量 800 t，转体角度达 68.2°，且结构形式与本项目索塔类似。

2.2 大型履带吊竖向拼装方案

上塔柱采用 2 台臂长 144 m(包含副臂长 12 m、超起半径 32 m，超起配重 550 t，后配重 230 t，中央配重 80 t)的 1 250 t 履带吊进行拼装，分别在索塔两侧搭设履带吊站位平台及超起平台，大型履带吊站位于站位平台上进行索塔节段竖向拼装施工。单台履带吊设置 2 个独立平台，分别用于履带吊作业和超起配重旋转；履带吊作业区域需要采用钻孔灌注桩+混凝土承台作为施工平台，超起配重旋转区域采用钢管桩+贝雷梁基础作为施工平台，重新搭设施工栈桥用于履带吊大臂拼装。

履带吊沿着主塔横桥向站位，结合对拉索结构的安装，采用空间三维模型模拟履带吊吊装悬臂对索塔顶部位置的索塔节段进行安装，履带吊作业最大吊幅 68 m，最大吊高 101.3 m。以西侧索塔采用大节段吊装施工为例，分别将 CT4—TX3(CT3—TX3)、TX2—TS7、TS5—TS6、TS3—TS4、TS1—TS2、TS0 节段各自制作成整节段进行吊装，最大负载率为 92.75%；索塔节段吊装过程中，按照有限元分析结果进行水平横撑和对拉装置施工；待索塔节段完成施工后，再进行钢锚环施工，锚环采用支架法施工。

索塔施工阶段计算分析需要增加 3 道水平撑和 1 道对拉装置来抵抗斜拉过程索塔的纵、横桥向变形，施工阶段对拉装置最大拉力 4 300 kN，水平撑最大顶撑力 2 000 kN。

2.3 大型起重船整体安装方案

单侧索塔节段整体在中山钢结构厂进行整体制作，通过船舶水运至施工现场，提前搭设索塔支撑支架，再利用超大型起重船整体吊装索塔塔肢至设计位置。

根据目前国内既有起重船满载吃水及现场施工水深(4 m)，满载吃水不大于 4 m 的起重船为“天威号”，最大起重量为 700 t，“三航风范号”为 2 400 t 起重船，满载吃水 4.3 m，均不满足吊装需求，故此方法不可行。

2.4 大型塔吊竖向拼装方案

索塔横桥向布置 2 台 R8000–430 塔吊(距离中心线 38 m)用于索塔节段吊装，最大吊装直径 52 m，最大吊装独立高度为 115.3 m。为防止塔吊扶墙对索塔施工阶段的影响，将塔吊基础标高设置为+10.10 m，不再设置塔吊扶墙。以西侧索塔采用大节段吊装施工为例，主塔节段制作过程中分别将 CT4—TX3(CT3—TX3)、TX2—TS7、TS5—TS6、TS3、TS4、TS1、TS2、TS0 节段各自制作成整节段进行吊装，最大起重负载率为 86.96%；索塔节段吊装过程中，按照有限元分析结果设置 3 道对拉装置和 1 道水平横撑施工，见图 4；待主塔节段完成施工后，再进行钢锚环施工，锚环采用支架法施工。

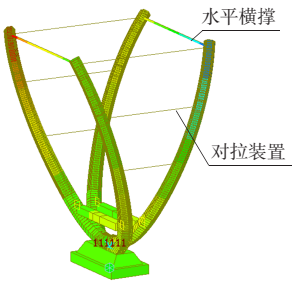


图 4 索塔施工有限元分析图

Fig. 4 Finite–element analysis diagram for the pylon construction

通过计算在竖向悬拼过程中，保障索塔竖向拼装的整体线形及合理合拢状态。对拉装置最大拉力 1 980 kN，水平横撑最大顶撑力为 910 kN。

2.5 卧拼+竖向转体施工方案

采用 2 台 610 t 浮吊船位于桥位两侧进行卧拼支架及滑移支架施工，东侧索塔节段 TS0—TS6(卧拼位置处于红树林上方)与主梁采用同步顶推施工，其它索塔节段直接安装至卧拼支架上方，见图 5。主梁顶推施工同步进行主塔支架、扣塔及索塔节段施工，待主梁顶推到位且扣塔完成安装后，进行索塔竖转施工。

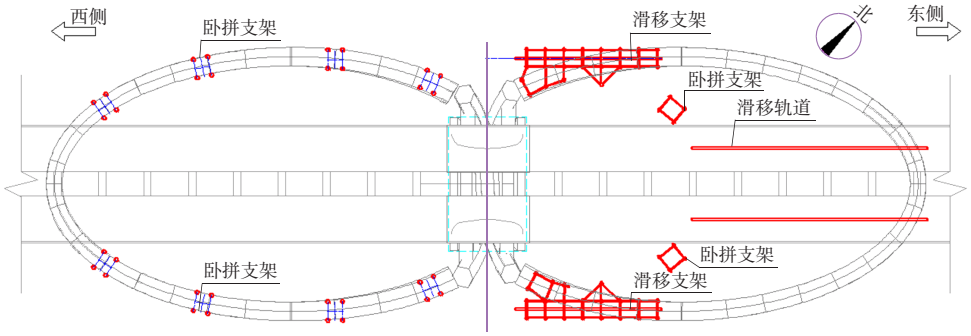


图 5　卧拼滑移图

Fig. 5　Schematic of horizontal assembly and sliding

2.6　方案对比

索塔施工方案对比如表 1 所示。索塔施工综合考虑水深、红树林、航空限高等施工环境影响，“卧拼+竖转”施工方案为推荐方案。

表 1　索塔施工方案对比表

Table 1　Comparison of construction schemes for the pylon

施工方案		施工难点	关键工期/d	资源投入	成本/万元
竖拼施工方案	大型履带吊竖向拼装方案	1）需要搭设履带吊大臂拼装施工平台； 2）需要额外设置基础平台及拼装平台； 3）存在航空限高要求； 4）履带吊、塔肢施工受台风影响安全风险巨大	169	2 台 1 250 t 履带吊、履带吊基础平台、履带吊拼装平台	2 407
	大型起重船整体安装方案	1）施工水域水深不满足要求； 2）受红树林影响起重船吊幅受限； 3）需要寻找起重船档期	125	1 台 2 400 t 起重船、2 套竖向支撑支架	1 232（未考虑疏浚）
	大型塔吊竖向拼装方案	1）需要额外设置基础； 2）需要寻找塔吊档期； 3）存在航空限高要求	175	2 台 R8000–430 塔吊、塔吊基础平台	2 534
卧拼+竖转施工方案		1）节段 TS4、TS5 需要优化为 3 节段； 2）部分索塔节段需要主梁完成后施工	185	2 台 610 t 浮吊船、竖转支架、滑移支架、卧拼支架	1 899

3　卧拼竖转施工技术

3.1　转铰、扣塔等结构设计

1）转铰结构

转铰结构由上铰座、销轴、下铰座及连接件等组成，见图 6。上铰座、下铰座及连接件采用 Q355B 型材、销轴采用 40Cr 材质。销轴直径为 498 mm，长度为 1.27 m。上铰座、下铰座分别与索塔节段通过连接件连接。

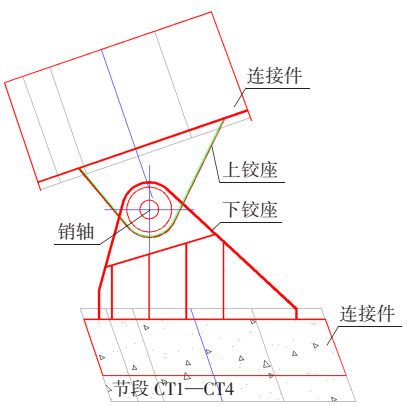
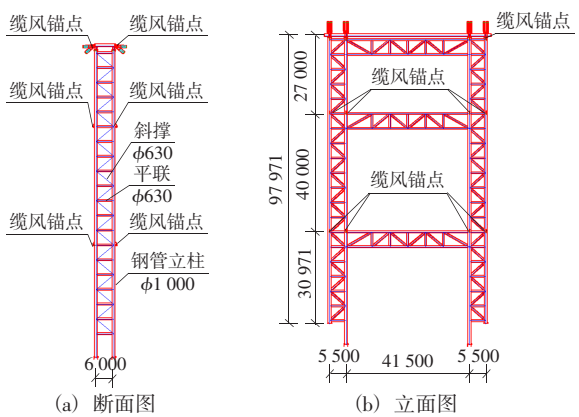


图 6　转铰结构图

Fig. 6　Rotating joint structure diagram

2）扣塔结构

扣塔为 5.5 m×6 m 格构式塔架，高 97.971 m。立柱为 ϕ1 000 mm×12 mm 的钢管，平联及斜撑为 ϕ630 mm×8 mm 的钢管，塔架之间设置 3 道横向连接系结构，结构形式见图 7。为保证塔架拼装及转体过程的稳定性，在扣塔上共设置 3 层（24 个）缆风锚点。扣塔底部采用起重船整节段安装，顶部（14 m 高）采用 2 台塔吊进行安装。



（a）断面图　　（b）立面图

图 7　扣塔结构图（mm）

Fig. 7　Structure diagram of the buckle tower（mm）

3）塔上锚点结构设计

单肢索塔共设置 8 个主锚点和 2 个备用锚点，锚点分别位于索塔节段 TS2、TS3，两相邻锚点中心距离主塔纵桥向中心线间距为 20.6 m、25.6 m，转体提升时随索塔旋转。每组对拉绞设置了 2 个转铰结构，锚固装置与钢索塔耳板通过销轴进行连接。

3.2 下塔柱及下转铰预埋施工

下塔柱索塔节段 YM1 及 CT1—CT4 内钢壳钢筋提前在厂内加工、安装，索塔节段通过装船运输至施工现场，采用 610 t 浮吊船起吊。索塔节段调位主要由导向板、调位牛腿组成。导向板、调位牛腿设置于核心筒内侧，三向千斤顶置于调位牛腿与反力座之间，单个索塔节段布置 4 个调位点。为保证索塔节段顺利连接，通过重心模拟确定 CT1—CT4 各节段吊带长度，将不同长度的下吊带上部与油缸连接，连接完成后与索塔吊耳通过卸扣连接。索塔外的施工平台主要分为 2 部分，竖向爬梯和竖向焊接平台。

铰座在工厂内与索塔节段 CT1—CT4 焊接成整体后运到现场安装。安装时，将销轴穿入下铰座孔内，在下铰座的销轴上布置 2 个测量控制点，通过精确调整索塔节段使得销轴处于水平状态，并与桥梁中心线垂直，之后进行索塔节段间码板连接及焊接施工，然后复测销轴控制点坐标，检查焊接变形情况。剩余 3 个下铰座安装采用相同的测量定位方案，安装时以先安装一侧作为参照，调整基础铰位置，使两侧铰轴中心线连线与桥梁中心线垂直，将 2 个转铰同轴度误差控制在 5 mm 以内。基础铰安装完成后，预埋段及附加段浇筑混凝土。

上铰座及其连接件在工厂内与索塔节段一同进行焊接连接，连接件采用三维定位并根据实际尺寸下料、焊接固定，与主塔横隔板冲突时，应当保证连接件的整体性。上铰座安装过程中在加工厂内与下铰座匹配定位后，再与索塔节段焊接牢固。

3.3 索塔卧拼施工

西侧索塔现场卧拼施工时，首先进行索塔节段 TX2—TX4 的卧拼安装，再施工西侧剩余索塔节段；东侧索塔节段现场卧拼时，首先进行索塔节段 TS0—TS1 的卧拼安装，最后进行 TY2—TY4 的安装；索塔节段 TX2—TX4(TY2—TY4)卧拼时，首先利用销轴将上转铰与下转铰进行连接，再进行索塔节段 TX2 与 TX1(TY2 与 TY1)的节段连接施工，见图 8。

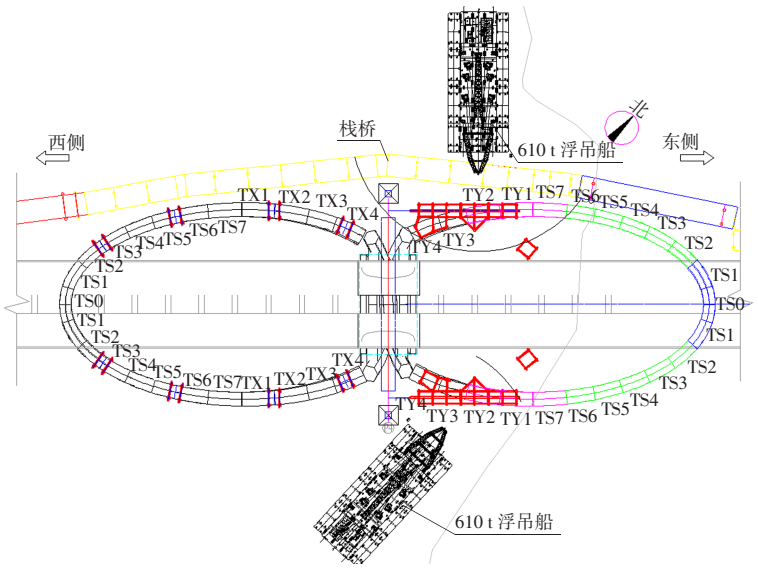


图 8 索塔卧拼施工图

Fig. 8 Construction drawing of the pylon in horizontal assembly

3.4 转体系统施工

转体提升时对称布置 16 个转体提升吊点和 4 个备用吊点，每个提升点布置 1 台 350 t 提升油缸。

1）计算机控制同步提升技术

计算机控制液压同步提升系统由钢绞线及提升油缸集群、传感检测、液压泵站、计算机控制及远程监视系统等组成。计算机控制液压同步提升技术的核心设备采用计算机控制，可全自动完

成同步升降、实现力和位移控制、操作闭锁、过程显示和故障报警等多种功能[8]。

提升油缸采用穿芯式结构，液压泵站是提升系统的动力驱动部分，在液压系统中，采用比例同步技术，可提高整个系统的同步调节性能。传感检测获得提升油缸的位置信息、载荷信息和整个被提升构件空中姿态信息，将这些信息通过现场实时网络传输给主控计算机。主控计算机根据当前网络传来的油缸位置信息决定提升油缸的下一步动作，也可根据网络传来的提升载荷信息和构件姿态信息决定整个系统的同步调节量。

2）同步提升位移控制

主控计算机既可控制所有提升油缸的统一动作又保证各个提升吊点的位置同步。在提升体系中，设定主令提升吊点，其它提升吊点均以主令吊点的位置作为参考进行调节。

每台提升油缸上安装 1 套位置传感器，传感器可以反映主油缸的位置、上下锚具的松紧。通过现场实时网络，主控计算机可以获取所有提升油缸的当前状态，然后中央控制单元根据一定的控制逻辑顺序控制电磁换向阀，从而控制提升油缸的锚具和主油缸动作。

通过行程传感器，检测两侧吊点提升行程，通过计算机进行实时调节，确保两者最大差值不超过 1 cm；通过压力传感器实时监测油缸提升载荷，并进行超差指示。在同一侧的 2 个提升油缸，压力并联使用，确保扣塔所受载荷均匀。在转动铰上安装带有角刻度的钢盘，在转动铰处安装指示杆，派专人观测角度变化；在转体索油缸上面安装行程传感器，检测钢绞线行程，控制人员在转体同时监控索力、位移，防止同侧油缸位移同步超差。

3）同步提升力控制

竖转过程中，在每个提升压力系统布置 1 个压力传感器，通过压力传感器，中央控制单元可以实时采集各个提升油缸的载荷，从而知道各个提升油缸的载荷分配，压力跟踪控制方式实现每个吊点提升油缸提升力与监控提升力进行校核，从而确定索力是否正常，若发现误差超过 50 kN，则立即进行排查。

4）设备故障控制

提升油缸出厂时，均在厂内进行功能性试验和耐久性试验；施工过程中，每侧索塔设置 8 个提升主吊点和 2 个备用吊点，当提升设备出现故障时，采用备用提升油缸进行提升施工。

3.5　索塔竖转

索塔正式转体前，先进行试转体，转体角度为 5°。试转体加载按照 20%、40%、60%、70%、80%、90%、95%、100%分级加载直至结构全部离开支架和主梁。记录各锚点位置与负载，比较各点的实际载荷和理论计算载荷，并根据实际载荷对各点载荷参数进行调整，校核计算机控制程序中的参数设定。

试转体阶段计算机进入“自动”操作程序，进行索塔竖转试转体施工；在试转体过程中，对各点的位置与负载等参数进行监控，观察系统的同步控制状况；转体离地后，空中停滞一定时间；悬停期间组织人员对结构进行观察。

经过试转体，观察后若无问题便进行正式转体，正式转体过程中每次提升步距为 0.25 m，转动至最后 2 个行程时，采用点动控制行程，保证索塔竖转满足要求，最后进行转铰处主塔钢板焊接连接。

4　应用及效果

将索塔在支架和主梁上卧拼拼装为整体，随后在塔肢跟部设置铰接支座，在扣塔顶设置 16 组同步液压提升系统，通过计算机同步控制，将 4 466 t 索塔缓慢竖转 71°，精准至设计位置，最后完成塔根固结及拉索张拉。本工艺减少了大量高空作业，施工风险降低约 75%，大幅缩短工期；卧拼施工保证了索塔焊接与涂装质量，精度控制高；施工过程节省了大型起重设备租赁及支架措施费，综合成本节约显著。

5　结语

1）索塔施工工艺具有多样性，应综合起重设备、水深、生态环境、航道等各种外部环境的影响选择最有利于项目的方案。

2）索塔提升过程中应实时针对提升油缸提升力与监控提升力进行校核，若误差超过 50 kN，则进行排查；为防止竖转过程中出现提升设备故障，需预留提升油缸和备用提升点。

3）为保证转铰结构精准，制造、加工及安装过程中需要采用高精度仪器多阶段测量复核，现场安装过程中需优先考虑转铰结构安装。

参考文献：

[1]　刘宇，于海超，朱舒婷. 蝶翼形非对称钢拱塔斜拉桥施工中的应

力监测技术[J]. 标准技术，2025(6)：45–47.
Liu Y, Yu H C, Zhu S T. Stress monitoring technology in the construction of butterfly–shape asymmetric steel arch tower cable–stayed bridge[J]. Standard Technology, 2025(6): 45–47.

[2] 王国俊，包龙生. 沈阳三好桥钢拱塔竖转施工控制技术研究[J]. 北方交通，2008(6)：44–46.
Wang G J, Bao L S. Research on controlling techniques for vertical body rotating construction of rigid arch tower of Shenyang Sanhao Bridge[J]. Northern Communications, 2008(6): 44–46.

[3] 李景浩，周航，敬芮. 金婺大桥钢塔竖向转体施工技术研究[J]. 建筑机械，2023(6)：129–132.
Li J H, Zhou H, Jing R. Research on vertical rotation construction technology for steel towers of Jinwu Bridge[J]. Construction Machinery, 2023(6): 129–132.

[4] 潘军，徐瑜. 港珠澳大桥九洲航道桥主梁及桥塔施工关键技术[J]. 桥梁建设，2016，46(6)：1–6.
Pan J, Xu Y. Key technologies for construction of main girder and pylons of Jiuzhou Ship Channel Bridge of Hongkong–Zhuhai–Macao Bridge[J]. Bridge Construction, 2016, 46(6): 1–6.

[5] 杨秀礼，彭晓鹏. 泰州长江公路大桥钢塔塔柱吊装方案比选[J]. 建设机械技术与管理，2011，24(7)：87–91.
Yang X L, Peng X P. Contrast between the schemes of lifting the steel tower columns at Taizhou Yangtze River High Bridge[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2011, 24(7): 87–91.

[6] 曾才民，种艾秀，姜云. 南京青奥公园步行桥圆弧形斜钢塔安装施工技术研究[J]. 现代交通技术，2014，11(6)：38–41，48.
Zeng C M, Zhong A X, Jiang Y. Installation construction technology of skew steel tower of Nanjing Youth Olympic Park pedestrian bridge[J]. Modern Transportation Technology, 2014, 11(6): 38–41, 48.

[7] 王锐，王杰，彭鹏. 基于 BIM 碰撞分析的空间扭转钢塔方案比选研究[J]. 施工技术，2025(5)：29–33，50.
Wang R, Wang J, Peng P. Selection research of spatial twisted steel tower schemes based on BIM collision analysis[J]. Construction Technology, 2025(5): 29–33, 50.

[8] 冀风卿. 钢索塔竖转施工受力体系平衡及同步控制技术[J]. 价值工程，2014(14)：105–106.
Ji F Q. Stress system balance and synchronization control technology of steel cable tower vertical transfer construction[J]. Value Engineering, 2014(14): 105–106.

（上接第 42 页）

用寿命。仿真结果表明，该方案能够有效降低锂电池的充放电次数，改善储能装置的运行状态，具有较高的工程应用价值。

未来的研究方向可以进一步探索储能装置使用寿命延长带来的经济效益，从经济角度进一步整体优化混合储能系统的配置。随着全球化发展，混合储能系统优化的重要性日益突出。

参考文献：

[1] 伍婧，涂敏，严新平，等. 我国海洋港口新能源技术应用发展探析[J]. 中国工程科学，2024，26(4)：234–244.
Wu J, Tu M, Yan X P, et al. Analysis of new energy technologies in marine ports of China[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 234–244.

[2] 袁裕鹏，许朝远，李娜，等. 港口多能源融合系统综述[J]. 交通运输工程学报，2024，24(4)：83–103.
Yuan Y P, Xu C Y, Li N, et al. Review on multi–energy integration systems in ports[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(4): 83–103.

[3] Ijeoma W M, Chen H, Carbajales–Dale M, et al. Techno–economic assessment of the viability of commercial solar PV system in Port Harcourt, Rivers State, Nigeria[J]. Energies, 2023, 16(19): 6803.

[4] 陈茜，白晶，陈小月，等. 分布式光伏并网对配电网的影响综述[J]. 科学技术与工程，2024，24(27)：11491–11504.
Chen Q, Bai J, Chen X Y, et al. Review on the impact of distributed PV grid integration on the power grid[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(27): 11491–11504.

[5] 段继兵，李亮，于鸿雁，等. MW 级飞轮混合储能系统在蒙西风电场的实践应用[J]. 城市建设理论研究：电子版，2024(32)：186–189.
Duan J B, Li L, Yu H Y, et al. Practical application of MW–level flywheel hybrid energy storage system in wind farms of western Inner Mongolia[J]. Theoretical Research in Urban Construction: Electronic Edition, 2024(32): 186–189.

[6] 滕伟，许庆祥，王亚军，等. 平滑风电波动的飞轮协同电池混合储能系统经济性配置[J]. 动力工程学报，2024，44(7)：1101–1108.
Teng W, Xu Q X, Wang Y J, et al. Economic configuration of flywheel collaborative battery hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(7): 1101–1108.

[7] Zhang Y, Wu Y H, Li L M, et al. A hybrid energy storage system strategy for smoothing photovoltaic power fluctuation based on improved HHO–VMD[J]. International Journal of Photoenergy, 2023: 1–13.

[8] 李想，张建成，王宁. 超级电容器–飞轮–蓄电池混合储能系统容量配置方法研究[J]. 中国电力，2018，51(11)：117–124.
Li X, Zhang J C, Wang N. Capacity configuration strategy for super capacitor–flywheel–battery hybrid energy storage system[J]. Electric Power, 2018, 51(11): 117–124.

[9] Celik D, Khan M A, Khosravi N, et al. A review of energy storage systems for facilitating large–scale EV charger integration in electric power grid[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 112: 115496.