DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.019 文章编号:1671-2579(2025)02-0171-07

超高混凝土索塔智能建造关键技术

莫钧[1],张文[2],袁航[2]
(1.深中通道管理中心,广东 中山 528400;2.中交第二航务工程局有限公司,湖北 武汉 430040)

摘要:随着跨海通道及过江通道的规划部署,劳动力需求大、作业条件差等突出的问题在大跨、超高索塔的施工过程中较为显著。为解决此问题,该文基于索塔智能化、工业化、标准化及装配化建造技术理念,探索超高索塔的高效施工方法,该文结合合理施工组织的定性分析,提出了超高索塔的一体化智能筑塔设备及塔柱钢筋工业化成型和装配化施工技术。通过应用于深中通道伶仃洋大桥,研究结果表明:该关键技术显著提升了索塔智能化建造技术水平,有效保障了作业安全,并进一步提高了桥塔建造品质;验证了所提技术的可行性和有效性,为超高混凝土索塔的建造提供了重要的理论和实践指导,对未来类似工程具有显著的借鉴价值,有助于推动索塔施工技术的创新发展。

关键词:超高索塔;一体化智能筑塔设备;智能化建造;装配化施工
中图分类号:U445.4 **文献标志码:**A

Key Technology for Intelligent Construction of Ultra-High Concrete Cable Tower

MO Jun[1], ZHANG Wen[2], YUAN Hang[2]
(1. Management Center, Shenzhen-Zhongshan Bridge, Zhongshan, Guangdong 528400, China; 2. CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: As the planning and deployment of cross-sea and river-crossing passages continue, prominent issues such as high labor demand and poor working conditions have become evident during the construction of large-span and ultra-high cable towers. To address these issues, this paper explored efficient construction methods for ultra-high cable towers based on the concepts of intelligent, industrialized, standardized, and assembled construction technology for cable towers. The research method combined qualitative analysis of reasonable construction organization, and integrated intelligent tower construction equipment for ultra-high cable towers, as well as industrialized forming and assembled construction technologies for tower column reinforcement was proposed. Through the application in the Lingdingyang Bridge along the Shenzhen–Zhongshan Bridge project, the research results indicate that this key technology significantly enhances the level of intelligent construction technology for cable towers, effectively ensures operational safety, and further improves the quality of bridge tower construction. The paper verifies the feasibility and effectiveness of the proposed technology, providing important theoretical and practical guidance for the construction of ultra-high concrete cable towers. This has significant reference value for similar future projects and contributes to the innovative development of cable tower construction technology.

Keywords: ultra-high cable tower; integrated intelligent tower construction equipment; intelligent construction; assembled construction

0 引言

随着中国跨江、跨海通道交通建设快速发展,高墩、大跨径桥梁得到了普遍应用。基于施工现场的高空作业或者水上施工环境,该类型项目施工安全、工效和质量监管已成为建设和施工单位面临的突出问题。为解决高塔施工效率、安全和质量问题,诸多学者及建设、施工、设计单位进行了广泛理论研究和经验总结,万瑞等[1]、张三鹏等[2]对超高层建筑工程的液压爬模施工技术进行了研究,分别通过优化模

收稿日期:2024-10-09
基金项目:广东省交通集团科研项目(编号:JT2022YB06)
作者简介:莫钧,男,硕士,高级工程师.E-mail:17313874@qq.com

板结构和改进爬模预埋件预埋方式、引用爬模-布料机一体化施工技术，实现对超高层竖向结构施工的效率提升；王东辉等[3]、余信言[4]、孙文等[5]基于液压爬模技术，结合具体项目研究了高墩、高塔的施工技术，分别运用了全封闭防风、上下横梁塔柱异步施工、集成模块化工厂拼装等方法手段，结合爬升管控要点，对典型的大风海洋环境施工作业和超高层核心筒建筑的液压爬模技术优化方案有一定指导意义；周翰斌[6]、宋达等[7]、刘自明[8]、李军堂[9]对桥梁索塔常规施工技术进行了介绍，剖析了高度高、跨度长、截面大的公路大桥施工方案设计技术难度与关键施工技术；徐秋红等[10]对全智能控制液压钢模板在桥梁工程的应用进行研究，应用智能制造技术实现外模自动走行定位，内模自动撑开并旋转到位等功能，提高了箱梁施工效率；王鹏[11]、谢良等[12]、封江东等[13]从支撑体系角度对横梁的施工技术进行研究，通过对结构设计的优 化和方案比选，分别解决了索塔拱形横梁高空支架施工安全问题和钻石型索塔下横梁收缩徐变问题；彭晓彬等[14]、王桢等[15]、王鹏等[16]、吴玲正[17]在总体设计阶段对索塔施工提出技术要求；王文明等[18]、任雷[19]、于峥[20]从温控措施、挂篮施工和合龙技术、变截面施工等角度研究高空混凝土施工工艺。

上述学者均基于具体项目背景，结合工艺特点和施工经验，分别总结提炼出在不同应用场景下如何从不同角度优化爬模技术施工工艺，使之适配高空作业的环境下索塔施工的技术要求。优化后的爬模技术对施工效率的提高与人工成本的降低均在具体应用场景中得到有效印证，对超高层建筑和桥梁索塔施工项目存在一定的借鉴意义。然而，目前业界针对超高混凝土索塔的建造与智能装配技术的融合实践研究相对匮乏。因此，本文通过大量查阅相关资料，对比国内外先进超高索塔建造技术和施工方案，基于深圳至中山跨江通道项目伶仃洋大桥索塔施工的一体化智能筑塔设备及塔柱钢筋工业化成型和装配化施工技术，研究超高混凝土索塔智能化建筑关键技术，旨在解决上述问题，指导现场施工，为行业的高质量发展贡献智慧。

1 工程概况

1.1 项目简介

深中通道项目是连接广东省深圳市和中山市的超大型集“桥、岛、隧、地下互通”四位一体的世界级跨海集群工程。其中，伶仃洋大桥作为桥梁工程中关键控制性工程，采用(580+1 666+580)m的三跨全漂浮体系悬索桥结构形式，如图1所示。

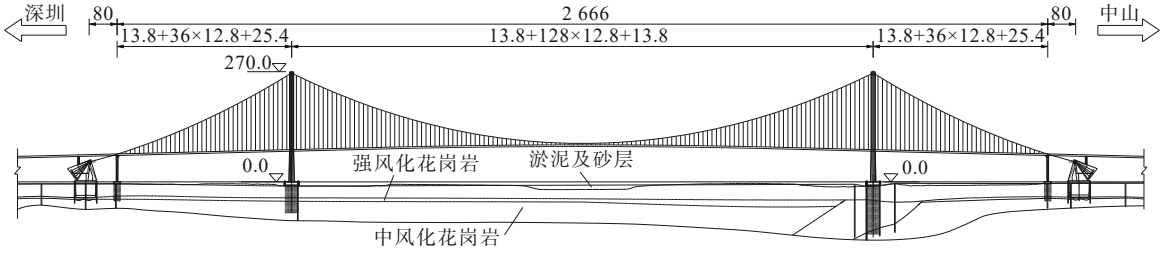


图1 深中通道伶仃洋大桥平面布置图(单位:m)

Figure 1 Planar layout of Lingdingyang Bridge along Shenzhen-Zhongshan Link(unit:m)

伶仃洋大桥索塔为门形结构桥塔，高270 m，其中混凝土段塔高262.5 m，塔冠采用钢结构高7.5 m，整个塔肢共设置上中下三道横梁。塔柱采用空心八边形截面，截面尺寸由最大的13 m×16 m逐渐变化至7.55 m×12.00 m。其中，下塔柱高79 m，塔柱外侧横桥向斜率1:17.174；中、上塔柱分别高70.5 m、113 m，塔柱外侧倾斜均为1:36.336，塔柱内侧倾斜率均为1:44.216，如图2所示。索塔采用C55高性能海工混凝土。

1.2 建设难点

(1) 建设标准高。工程项目的建设目标为“建世界一流可持续跨海通道，创珠江口百年门户工程”，目标定位高。

(2) 建设环境恶劣。工程项目位于高温、高湿、高盐的海洋环境，建设环境腐蚀性较大，对工程质量及防腐措施等要求更为苛刻。

(3) 施工组织难度大。桥位远离陆地，且处于台风侵袭区域，对项目的施工组织、资源配置等提出了更高要求。

2 伶仃洋大桥桥塔施工总体方案

目前，混凝土桥塔主要采用“液压爬模+钢筋现

场散绑”施工工艺，主要存在高空作业量大、机械程度低、安全风险高等问题。表 1 为国内外相关工程混凝土桥塔的基本施工参数。

表 1　国内外相关工程混凝土桥塔基本施工参数

Table 1　Basic construction parameters of concrete bridge towers for related projects in China and abroad

年份	工程名称	主跨/m	塔高/m	主要工艺	钢筋成型	节段/m
2008	苏通长江大桥	1 088	300.4	液压爬模	现场绑扎	4.5
2012	Russky	1 104	320.9	液压爬模	现场绑扎	4.5
2019	南沙大桥	1 688	260.0	液压爬模	现场散绑	4.5
2019	杨泗港长江大桥	1 092	320.0	液压爬模	现场绑扎	6.0

结合本项目的建设目标及施工重难点，项目提出了采用桥塔工业化建造技术打造深中通道伶仃洋大桥东索塔，为大跨桥梁混凝土桥塔建造塑造典范工程。该技术基于一体化智能筑塔机和钢筋部品化制安的技术工艺，即整个塔柱施工采用具有集成化程度高、支点少且承载能力大的新型一体化智能筑塔设备施工，该设备同时配合塔柱节段部品钢筋整体吊装的施工工艺，有效解决传统施工设备存在的问题，进而实现工厂化建造条件。

根据起重设备的能力及节段钢筋重量，将索塔节段划分为 48 节，主要以 4.5 m 及 6.0 m 两种标准节形式为主（图 2），进行整体钢筋部品起吊安装作业，然后再采用 C55 混凝土利用高压泵送到一体化智能

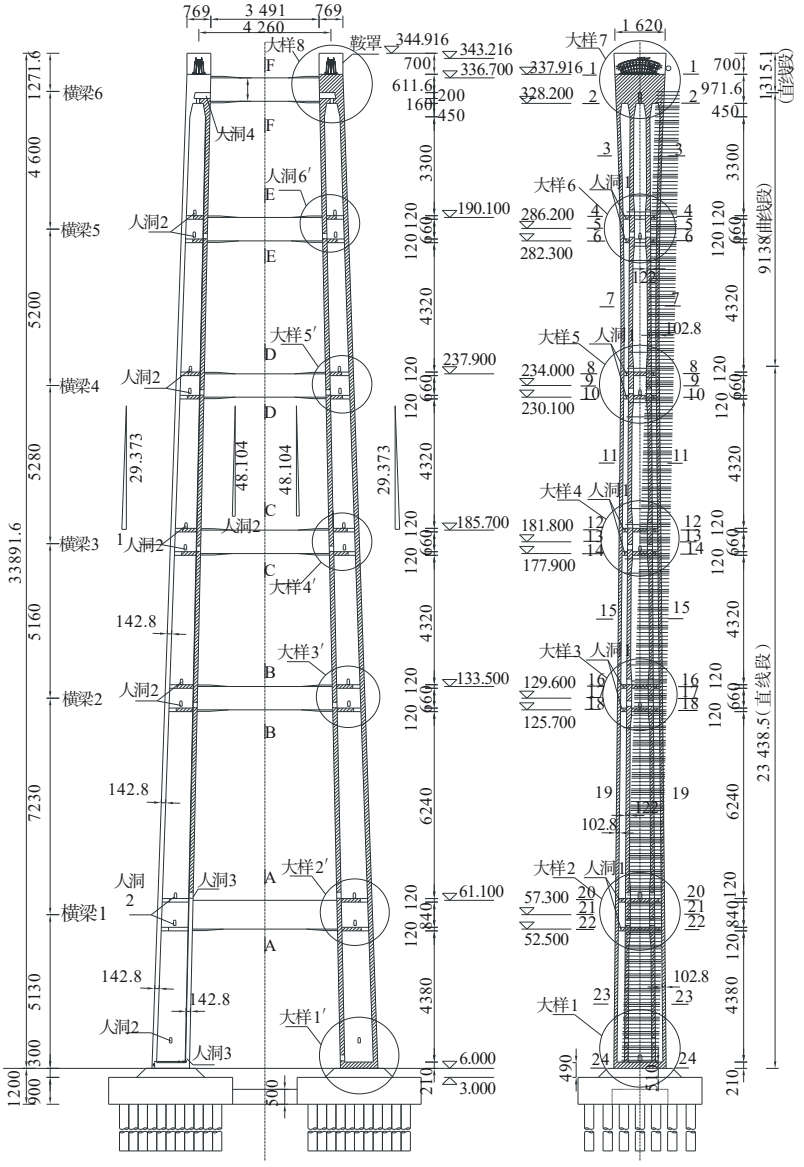


图 2　桥塔立面布置图（单位：mm）

Figure 2　Vertical layout of bridge tower (unit: mm)

筑塔机上配置的布料机，完成混凝土浇筑。

3 超高混凝土桥塔工业化建造关键技术

3.1 一体化智能筑塔机施工工艺

传统液压爬模机位多、整体性不好、承载力小，设置布料和养护系统困难，难以实现工厂化建造条件的基础。基于伶仃洋大桥东索塔基所处的宽阔海域施工环境，以塔柱施工移动工厂的建设理念，提出采用具有钢筋部品调位、混凝土自动辅助布料及振捣、智能养护和应急逃生功能的一体化智能筑塔机，以实现工厂化建造条件，同时通过自动化减人、机械化换人，以期提升桥塔建造品质、效率和安全。

塔柱施工在起始段1#～4#节段采用“搭设临时脚手支架＋传统液压爬模”施工工艺，为后续节段施工提供操作空间；其余节段5#～45#节段均采用一体化筑塔机系统施工。一体化智能筑塔机由架体结构、爬升系统、锚固系统、模板系统、布料系统、振捣系统、养护系统、抗风系统、类工厂系统、人性化服务设施和智能化控制系统等组成。筑塔机总体构成如图3所示。

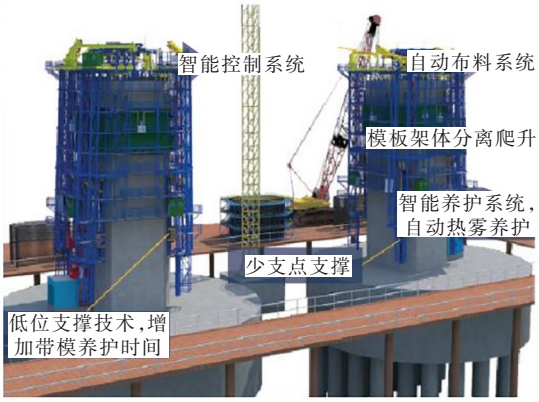


图3 筑塔机总体结构图

Figure 3 Overall structure of tower crane

一体化智能筑塔机单个塔肢主要有4组架体，架体上设置8层操作走道共26.7 m，从上至下可分为作业层(4层)、养护层(2层)、修复层(2层)，架体之间通过收分装置适应主塔截面变化。相比普通液压爬模，增加了养护、修复等功能层，实现了工序与工艺的有序分离作业；外侧模板采用不锈钢模板，模板采用“基准块＋变化块”模式适应不同节段的尺寸收分变化，变化块采用全塔肢通配，提高索塔混凝土施工品质，基于架体悬吊支撑系统完成合模及脱模操作；爬升系统由预埋件、重型轨道、爬箱及顶升油缸等组成，单个塔肢仅采用4组爬升系统组成，相比常规爬升系统减少机位约60%；养护系统位于待施工节段的下层，利用智能温湿度检测设备的智能调节热雾对新浇混凝土节段进行养护，突破常规液压爬模无法脱模养护的工艺。此外，在架体顶部布置两台能够覆盖全塔柱的布料机，通过智能化控制系统可实现自动布料及振捣；智能信息化系统由本地集中监控系统＋远程集中监控系统两部分组成。

筑塔机受力点滞后塔柱施工节段两节，待施工节段钢筋施工完成后，筑塔机带模爬升，通过悬吊系统进行模板安装，待浇筑节段的下层混凝土时利用专用养护系统进行养护；该节段浇筑完成凿毛等待后，安装下节段钢筋，混凝土强度达到设计要求时，脱模与筑塔机进行爬升，同时进行拆模节段的混凝土养护工作，依次循环进行后续节段塔柱施工。图4为一体化智能筑塔机在深中通道伶仃洋大桥东索塔应用场景。针对中国各种超高200 m的斜拉桥及悬索桥混凝土桥塔，采用液压爬模施工进行统计，得到基于液压爬模及一体化智能筑塔建造技术在各施工工序及部位的施工时间如表2所示，采用一体化智能筑塔建造技术可有效提升单节施工效率，大幅提升混凝土塔柱养护时间，同时提升养护为标准化养护。

图4 一体化智能筑塔机应用于深中通道伶仃洋大桥东索塔

Figure 4 Integrated intelligent tower crane applied to east cable tower of Lingdingyang Bridge along Shenzhen-Zhongshan Link

3.2 部品钢筋制作与吊装

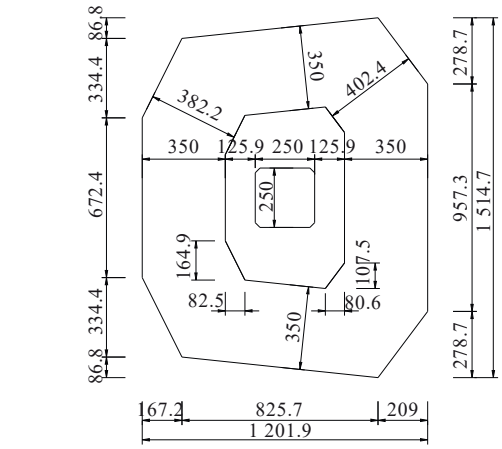
伶仃洋大桥塔柱截面为八边形截面，钢筋全部采用HRB400型，标准节段沿外轮廓线布置两层直径40 mm主筋，内侧竖向配置一层直径32 mm的钢筋，水平配置直径20 mm的箍筋，如图5所示；塔柱竖向主筋在承台施工时已预埋，塔柱施工时进行接长。由于伶仃大桥跨度大，塔柱高度高，因此塔柱截面

大、钢筋布置密集，单个 4.5 标准节段钢筋重量达 52 t，6 m 标准节段钢筋重量达 61 t。

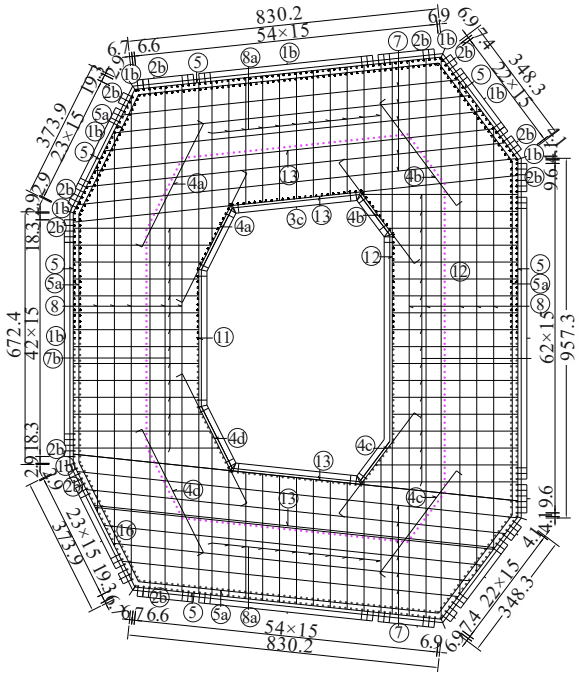
表 2　一体化智能筑塔机和常规液压爬模设备工效对比

Table 2　Working efficiency comparison between integrated intelligent tower crane and conventional hydraulic climbing formwork equipment

方法	塔柱施工工效/(m·d^{-1})	养护方法	现场作业人数/人	功能
一体化智能筑塔机	1.0～1.2	带模养护＋标准养护(热雾)	10	自动浇筑振捣、智能养护
常规液压爬模	0.8	带模养护	18	无



(a) 断面尺寸



(b) 钢筋布置图

图 5　索塔－14.35 m 处断面尺寸及钢筋布置图(单位：cm)

Figure 5　Section size and reinforcement layout of cable tower at －14.35 m (unit: cm)

在常规的施工工艺中，钢筋工程采用单根钢筋现场绑扎的方法，该方法人员投入多、高空作业量大、作业时间长。因此，在考虑机械化、标准化及装配化的基础上，伶仃洋大桥东索塔采用“钢筋网片＋钢筋部品＋整体吊装”的塔柱钢筋工业化成型和装配施工工艺。

钢筋网片加工制作基于工业流水线设计理念，对箍筋接长、机械化布料及定位、主筋与箍筋自动绑扎及焊接、立体多次弯折成形，以及成型质量控制等研发了中国首台钢筋网片柔性制造生产线，并利用该设备在钢筋加工厂内完成塔柱标准节段内层及外层“箍筋＋主筋”的钢筋网片制作，如图 6 所示。钢筋网片完成后，通过船舶运输至施工现场，将单个网片分别吊入塔柱底部设置的钢筋部品拼装平台，在胎架内将网片连接成整体并穿插剩余拉钩筋拼装成塔柱节段整体部品钢筋。整体部品钢筋组拼完成后，采用大型起重机械 MD-3600 及专用吊具将部品钢筋整体吊装至待施工节段进行上下节段钢筋对接，钢筋部品吊装图如图 7 所示。钢筋对接接头采用的是锥套锁紧形式的接头，在满足一级接头的基础上，钢筋对接面可处于同一断面。

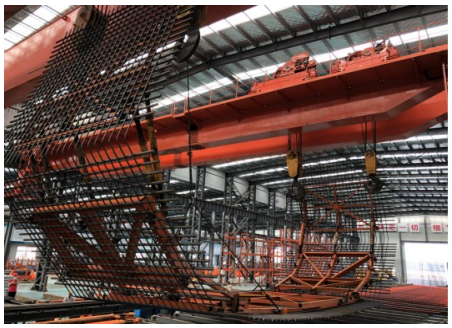


图 6　钢筋网片弯折

Figure 6　Bending of mesh reinforcement

图 7　钢筋部品吊装

Figure 7　Hoisting of reinforcement parts

为保证钢筋部品在制作及吊安过程中不产生过

大变形，在拼装胎架中设置钢筋定位限位装置，主筋与箍筋及拉钩筋之间采用点焊的形式提升钢筋部品骨架整体的刚度，此外在吊装过程中采用重心可调节吊具及多点吊装的方式防止吊装过程变形。

3.3 混凝土浇筑

塔柱混凝土采用高强度、高扬程大体积泵送的C55混凝土，为保证泵送混凝土具有良好的和易性、流动性好，黏度和绝热温升低等性能，在常规高性能混凝土配合比的基础上加入一定量的矿渣、石粉和硅灰，最大程度地提高塔柱混凝土的温度稳定性及体积稳定性，工作性能指标如表3所示。整个塔柱混凝土生产由海上混凝土配送中心生产，配置两台HZS180搅拌站、两台制冰机及冷水机，最大程度保证混凝土出机温度不高于26 ℃。

混凝土由罐车从混凝土集中配送中心运至主墩平台浇筑点，拖泵直接泵送入仓。考虑东索塔高度270 m，采用两台HBT90C-2122D型拖泵泵送混凝土，最大理论混凝土输送量（高速、低速）105 m^3/h、75 m^3/h，垂直输送高度450 m，泵管均沿塔身内腔上升至浇筑点。泵管在顶部与筑塔机顶部的两台布料机衔接，布料通过智能化控制系统可实现自动布料，单个布料半径为16 m，两台布料机可覆盖塔柱全部范围。同时在内腔操作平台下方设置自动辅助振捣系统，有效减少施工对人工的需求。混凝土养护采用一体化智能筑塔机附带的养护系统进行养护，该养护系统由封闭围护幕布系统和热雾养护系统组成，利用智能温湿度检测设备，智能调节热雾，对新浇混凝土进行持续养护。

表3 新型胶凝材料工作性能

Table 3 Working performance of new cementitious materials

混凝土	胶凝材料用量/kg	抗氯离子扩散系数/[10^{-12}(m^2·s^{-1})]			绝热温升/℃	倒塌时间/s
C50	410	4.2	1.2	0.6	39	10

4 结语

伶仃洋大桥位于宽阔海域环境，施工现场远离陆地，施工期台风频繁，海上施工组织难度大、风险高。此外，该桥跨度大、塔柱高、截面复杂，在海洋环境下的高塔混凝土养护条件差，受环境影响大，外观品质不易保证。通过一体化智能筑塔设备在东索塔的安装与使用，在其智能化、多功能的基础上具有良好的安全性与稳定性，整体爬升同步性良好、流畅无碍且速度较快，可有效解决高塔养护的问题，有效保证在恶劣海洋环境下的混凝土品质问题。再通过塔柱钢筋工业化成型和装配施工关键技术的运用，打破了常规塔柱钢筋单根绑扎的施工工艺，有效增加了作业面，将塔柱上钢筋施工时间有效缩短至0.5 d，大大提高了塔柱施工工效，并将高塔钢筋施工部分转移至工厂内，大大降低了高塔施工人员作业的安全风险。最后，通过一体化智能筑塔机配置的布料机、自动振捣系统及信息化控制系统，有效减少了作业人员的数量及劳动强度。

参考文献：

References：

[1] 万瑞，魏春春．液压爬模施工技术在超高层建筑工程中的应用[J]．中国港湾建设，2019，39(7)：70-73.
WAN Rui, WEI Chunchun. Application of hydraulic climbing construction technology in super-high-rise building engineering[J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(7): 70-73.

[2] 张三鹏，张文光，钟国兴．超高层核心筒液压爬模及布料机一体化施工技术[J]．施工技术，2020，49(2)：77-79.
ZHANG Sanpeng, ZHANG Wenguang, ZHONG Guoxing. Integration construction technology of hydraulic climbing formwork and material spreader for core tube of super high-rise building[J]. Construction Technology, 2020, 49(2): 77-79.

[3] 王东辉，韩冰．平潭海峡公铁两用大桥通航孔桥桥塔施工关键技术[J]．桥梁建设，2019，49(3)：1-5.
WANG Donghui, HAN Bing. Key techniques for construction of pylon of channel bridge of Pingtan Straits Rail-Cum-Road Bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(3): 1-5.

[4] 余信言．洛河特大桥高墩液压自爬模施工技术[J]．石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2018，31(增刊2)：149-152.
YU Xinyan. Construction technology of hydraulic self-climbing formwork for high pier of Luohe Bridge[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2018, 31(sup 2): 149-152.

[5] 孙文，王志珑，蒋国华，等．集成模块化工厂拼装液压爬模快速安拆施工技术[J]．施工技术，2019，48(20)：43-45，53.
SUN Wen, WANG Zhilong, JIANG Guohua, et al. Construction technology of fast installation and demolition of hydraulic climbing formwork for assembled in integrated modular industry[J]. Construction Technology, 2019, 48(20): 43-45, 53.

[6] 周翰斌．土耳其伊兹米特海湾大桥施工关键技术[J]．施工技术，2020，49(3)：29-32.
ZHOU Hanbin. Key construction technology for Izmit Bay Bridge in Turkey[J]. Construction Technology, 2020, 49(3): 29-32.

[7] 宋达,易季爰.荆岳长江公路大桥南索塔施工[J].中外公路,2010,30(5):193-196.
SONG Da,YI Jiyuan.Construction of south cable tower of Jingyue Yangtze River Highway Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2010,30(5):193-196.

[8] 刘自明.平潭海峡公铁大桥施工关键技术[J].桥梁建设,2019,49(5):1-8.
LIU Ziming. Key construction techniques for Pingtan Straits Rail-Cum-Road Bridge[J]. Bridge Construction,2019,49(5):1-8.

[9] 李军堂.沪通长江大桥主航道桥桥塔施工关键技术[J].桥梁建设,2019,49(6):1-6.
LI Juntang. Key construction techniques for pylons of main navigational channel bridge of Hutong Changjiang River Bridge[J].Bridge Construction,2019,49(6):1-6.

[10] 徐秋红,李向阳.全智能控制液压钢模板在深中通道箱梁预制中的应用[J].世界桥梁,2019,47(6):36-40.
XU Qiuhong, LI Xiangyang. Application of fully intelligent-controlled hydraulic steel formwork to prefabrication of box girders of Shenzhen – Zhongshan corridor[J].World Bridges,2019,47(6):36-40.

[11] 王鹏.斜拉桥超高索塔上横梁装配桁架式支撑体系设计施工关键技术[J].中外公路,2020,40(3):124-128.
WANG Peng.Key technology of design and construction of truss-assembled support system for upper crossbeam of super-high pylon of cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(3):124-128.

[12] 谢良,赵煜成,戴黎霞.索塔拱形变截面横梁施工关键技术研究[J].中外公路,2016,36(4):216-220.
XIE Liang, ZHAO Yucheng, DAI Lixia. Research on key technologies for construction of variable-cross-section transverse beams in cable tower arch shapes[J].Journal of China & Foreign Highway,2016,36(4):216-220.

[13] 封江东,陈毅明,陈楚龙.沌口长江公路大桥主桥索塔下横梁施工方案比选[J].中外公路,2016,36(3):201-206.
FENG Jiangdong, CHEN Yiming, CHEN Chulong. Comparison and selection of construction schemes for the lower transverse beam of the main cable tower of the Dunkou Changjiang River Highway Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2016,36(3):201-206.

[14] 彭晓彬,詹建辉,常英,等.武穴长江公路大桥总体设计[J].中外公路,2019,39(3):72-77.
PENG Xiaobin,ZHAN Jianhui,CHANG Ying,et al.Overall design of Wuxue Yangtze River Highway Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(3):72-77.

[15] 王桢,牛永喆,李海鹏.宝鸡清水河特大桥主桥总体设计[J].中外公路,2023,43(6):105-115.
WANG Zhen,NIU Yongzhe,LI Haipeng.Overall design of main bridge of Qingshui River Bridge in Baoji[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(6):105-115.

[16] 王鹏.东莞市滨海湾大道沙涌桥总体设计[J].中外公路,2022,42(3):127-130.
WANG Peng.Overall design of Shayong Bridge on Binhai Bay Avenue in Dongguan City[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(3):127-130.

[17] 吴玲正.深中通道项目桥梁设计方案及主要技术难点[J].中外公路,2021,41(2):189-192.
WU Lingzheng. Design scheme and main technical challanges of Shenzhen-Zhongshan Bridge project[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(2):189-192.

[18] 王文明,柴生波,聂宁波,等.拱形桥塔施工控制措施及温度效应分析[J].中外公路,2023,43(6):140-148.
WANG Wenming, CHAI Shengbo, NIE Ningbo, et al. Construction control measures and temperature effect analysis of arch-type bridge tower[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(6):140-148.

[19] 任雷.高墩多塔预应力混凝土斜拉桥主梁施工关键技术[J].中外公路,2022,42(6):99-104.
REN Lei. Key construction technology on cable-stayed bridge girders with high-piers and multiple-towers[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(6):99-104.

[20] 于峥.王家河特大桥高墩多跨矮塔斜拉桥施工关键技术研究[J].中外公路,2021,41(3):110-115.
YU Zheng.Study on key construction technology of cable-stayed bridge with high piers and multiple spans crossing Wangjiahe River[J].Journal of China & Foreign Highway,2021,41(3):110-115.