

DOI: 10.7672/sgjs2026020058

宁扬长江大桥悬索桥牵引系统设计与应用*

舒宏生¹, 刘 勋¹, 侯润锋¹, 耿祥云²

(1. 中交第二公路工程局有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 中交二公局华东建设有限公司, 江苏 南京 211800)

[摘要] 宁扬长江大桥主桥为主跨1 560m双塔单跨吊钢箱梁悬索桥,主缆索股采用PPWS法架设施工,上部结构采用3跨连续式猫道作业平台,针对桥位横跨长江流域、两岸牵引系统场地布置较困难等特点进行深入研究,最终猫道架设采用单线往复式牵引系统,主缆索股架设采用闭式循环牵引系统,均满足架设需求;经工程应用,闭式循环牵引系统具有同步、稳定、可靠、高效、经济五大技术特性,可为2 000m以上超大跨径悬索桥主缆索股快速架设施工提供技术支撑。

[关键词] 桥梁;悬索桥;牵引系统;主缆;猫道;设计;施工技术

[中图分类号] U448.25;U445.38

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0058-04

Design and Application of Hauling System for Suspension Bridge of Ningyang Yangtze River Bridge

SHU Hongsheng¹, LIU Xun¹, HOU Runfeng¹, GENG Xiangyun²

(1. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. CCCC-SHEC East China Construction Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211800, China)

Abstract: Ningyang Yangtze River Bridge is a two-tower single-span suspension bridge with a main span of 1 560m. The main cable strands are erected by parallel wire strand (PPWS) method, and the superstructure adopts a three-span continuous catwalk operation platform. In view of the characteristics of the bridge across the Yangtze River and the difficulty of the site layout of the hauling system on both sides, the single-line reciprocating hauling system is adopted for the erection of the catwalk, and the closed-loop hauling system is adopted for the erection of the main cable strands, which meet the erection requirements. Through engineering application, the closed cycle hauling system has five technical characteristics of synchronization, stability, reliability, high efficiency and economy, which can provide technical support for the rapid erection of main cable strands of super-long-span suspension bridges over 2 000m.

Keywords: bridges; suspension bridges; hauling system; main cable; catwalk; design; construction

0 引言

近年来,张靖皋长江大桥和狮子洋大桥的相继开工,标志着我国2 000m级悬索桥正式迎来建设潮。由此而来的现有主缆索股牵引架设技术和相关装备性能的制约问题显得尤为突出。因此,笔者团队针对2 000m级悬索桥主缆索股牵引架设技术进行了超前研究,依托宁扬长江大桥(龙潭长江大桥),总结国内首座采用AS法主缆架设的阳宝山大

桥施工经验^[1],设计了适用于PPWS法的主缆索股闭式循环牵引系统,实现了主缆索股在单台卷扬机系统集成和闭环控制下的高效、安全、高质量牵引架设。

1 工程概况

宁扬长江大桥地处宁镇扬同城化发展中心,为宁镇扬同城化的重要交通设施,服务南京、镇江、扬州区域交通联系。大桥呈南北走向,横跨长江,向北连通扬州,向南连通镇江;大桥上游约17km处为南京长江四桥,下游约29km处为润扬大桥,是江苏省“十五射六纵十横”高速公路网中S47仪征—禄口机场高速公路的重要组成部分。

* 中交第二公路工程局有限公司2022年重点科技研发项目(2022X-2-23)

[作者简介] 舒宏生,硕士,高级工程师,E-mail: hongshengshu@163.com

[收稿日期] 2025-04-12

宁扬长江大桥主桥结构为双塔单跨吊钢箱梁悬索桥(见图1),主桥跨径为1 560m,主缆间距34.8m。其主缆为双缆结构,每根主缆包括126根索股和1根中央通气管道;主缆索股采用预制平行钢丝索股,每根索股由127丝 $\phi 6.0$ 且抗拉强度 $\geq 1\ 960\text{MPa}$ 的高强钢丝组成,单根索股平均无应力长2 891m,重约82.3t。加劲梁采用梁高3.7m的流线型扁平钢箱梁结构形式。桥塔为高约240m的混凝土门式塔,桥塔基础为单桩直径2.8m、共计52根的群桩基础。北锚碇锚体平面呈U形,基础为外径72m、壁厚1.5m圆形地下连续墙结构,南锚碇基础为73.4m \times 56.6m矩形钢壳混凝土+钢筋混凝土沉井基础^[2]。

本桥主缆索股利用3跨连续式猫道施工平台并采用闭式循环牵引系统进行牵引架设。猫道架设阶段采用单线往复式牵引系统进行牵引索、猫道承重索等的架设,其中先导索的施工则考虑长江航道通航需求采用“主飞无人机牵引+伴飞无人机监控”的方式牵引过江。主缆索股架设前,提前将猫道架设阶段的单线往复式牵引系统转换成主缆索股架设阶段的闭式循环牵引系统。

2 牵引系统设计

2.1 猫道架设牵引系统设计

2.1.1 总体设计

本桥猫道设计为3跨连续式结构,采用单线往复式牵引系统进行架设,左、右幅各布置1套牵引系统,主要用于托架承重索、托架定位索、猫道承重索、猫道扶手索、门架承重索架设及配合牵拉猫道面网下滑等。单套牵引系统由30t摩擦式牵引卷扬机、两岸各处转向导轮、锚碇门架导轮组、塔顶门架导轮组、拽拉器、牵引索等组成^[3]。

根据本桥缆索系统安装施工要求,分别对猫道

架设阶段和主缆索股架设阶段牵引索所需最大牵引力进行详细计算,结合工程实际情况,经综合分析后最终确定在南北锚碇后方各配置2台30t摩擦式牵引卷扬机。猫道架设阶段的单线往复式牵引系统总体布置如图2所示。

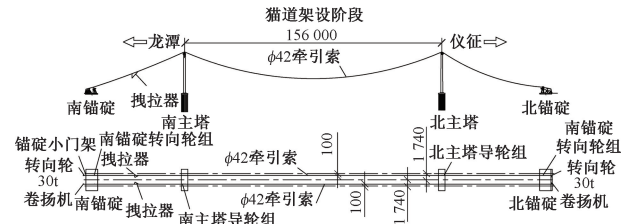


图2 猫道架设阶段牵引系统总体布置(单位:cm)

Fig. 2 General layout of hauling system in catwalk erection stage (unit: cm)

2.1.2 龙潭侧锚碇处布置

猫道架设阶段每套牵引系统在龙潭侧锚碇后方纵向布置1台30t摩擦式牵引卷扬机,卷扬机前方布置地面转向轮,锚块顶面布置小门架及导轮组,锚碇散索鞍支墩顶面布置锚碇门架及导轮组。猫道架设阶段牵引系统龙潭侧锚碇布置如图3a所示。

2.1.3 仪征侧锚碇处布置

猫道架设阶段每套牵引系统在仪征侧锚碇后方横向布置1台30t摩擦式牵引卷扬机,卷扬机前方布置地面转向轮,锚块顶面布置多个转向轮,锚碇散索鞍支墩顶面布置锚碇门架及导轮组;两岸牵引索绳头通过拽拉器可靠连接。猫道架设阶段牵引系统仪征侧锚碇布置如图3b所示。

2.2 主缆架设牵引系统设计

2.2.1 总体设计

根据本桥主缆索股特点并结合现有AS法成熟

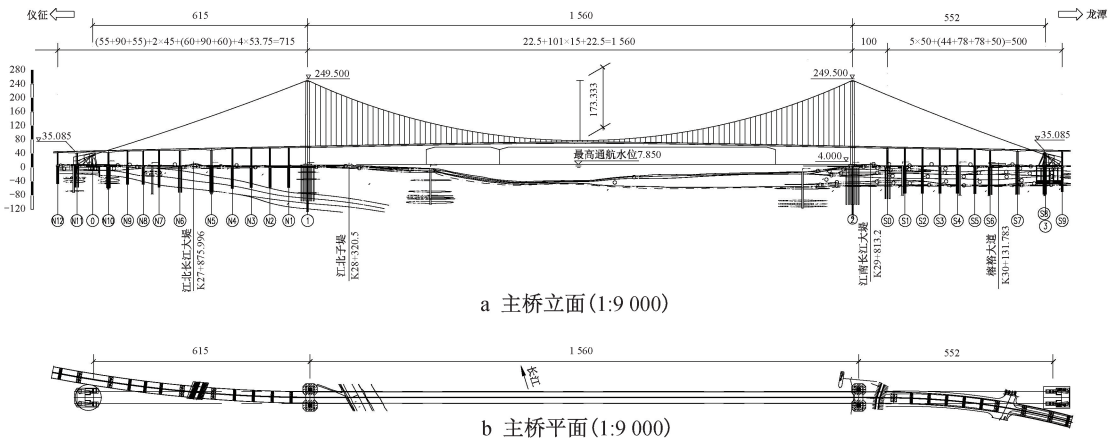


图1 宁扬长江大桥总体布置(单位:m)

Fig. 1 General layout of Ningyang Yangtze River Bridge (unit: m)

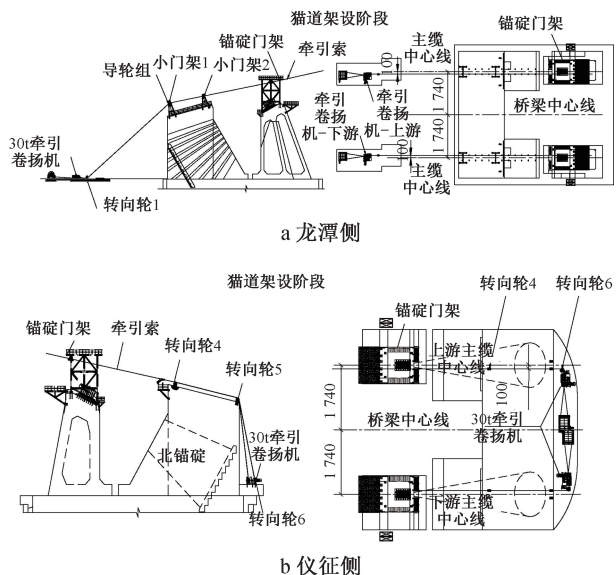


图 3 猫道架设阶段牵引系统锚碇布置(单位:cm)

Fig. 3 Anchorage layout of hauling system in catwalk erection stage (unit: cm)

施工经验,确定其主缆索股采用闭式循环牵引系统进行架设。

左、右幅各布置 1 套闭式循环牵引系统,每套系统在龙潭侧锚碇后方布置 1 台 30t 摩擦式牵引卷扬机,在仪征侧锚碇后方墙面悬挂布置配重机构,牵引索利用拽拉器可靠连接进而形成闭环。龙潭侧锚碇后方场地经硬化处理后作为主缆索股存放区域,该区域布置主缆索股放索装置,单台 30t 摩擦式牵引卷扬机通过正反转独立控制牵引索在龙潭侧锚碇和仪征侧锚碇间做往复运动,实现主缆索股的快速架设。主缆索股架设阶段的闭式循环牵引系统总体布置如图 4a 所示。

2.2.2 龙潭侧锚碇处布置

龙潭侧锚碇后方场地整平硬化处理后作为存放索场地,考虑不影响放索的情况下允许存放约 40 个索盘并进行存放索场地的规划;存放索场地上配备 1 台 320t 履带式起重机用于索盘场内卸车、存放及转运上盘。放索机构前方布置竖向导向轮、水平导向轮、上锚通道等,30t 摩擦式牵引卷扬机设置在上锚通道下方以节省空间;后锚面上根据线形需求设置 2 个支撑小门架,同时沿上锚通道等间距加密布设多个长滚筒,沿后锚斜面及锚跨通道上安装索股托滚。锚碇散索鞍支墩上方安装锚碇门架及导轮组,牵引索随后沿猫道继续牵引。主缆索股架设阶段龙潭侧锚碇处牵引系统布置如图 4b 所示。

2.2.3 仪征侧锚碇处布置

仪征侧锚碇后方墙面左、右幅各布置 1 套配重机构,通过后锚面上的竖立转向轮和支撑轮悬挂于

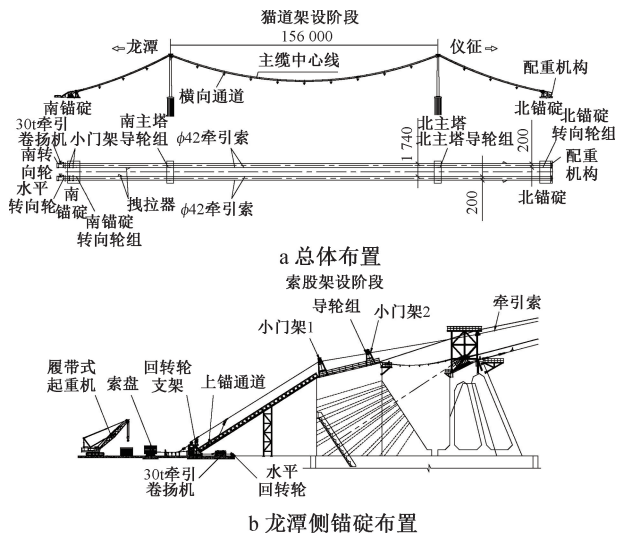


图 4 索股架设阶段牵引系统总体布置与龙潭侧锚碇布置(单位:cm)

Fig. 4 General layout and Longtan side anchorage layout of hauling system in cable strand erection stage (unit: cm)

锚体上,使牵引索具备所需的张力;配重机构竖向悬挂位置可根据牵引索的不同设计垂度、索长等进行动态调整。主缆索股架设阶段仪征侧锚碇处牵引系统布置如图 5 所示。

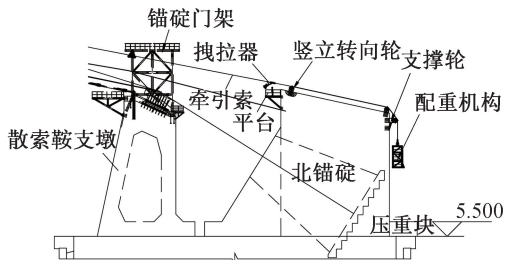


图 5 索股架设阶段牵引系统仪征侧锚碇布置

Fig. 5 Yizheng side anchorage layout of hauling system in cable strand erection stage

3 牵引系统架设施工

3.1 猫道单线往复牵引系统施工

本桥横跨长江且跨径大,因此猫道架设阶段牵引系统需依次进行先导索、多级过渡索牵拉,进而完成 $\phi 42$ 牵引索架设,最终形成猫道架设阶段的单线往复牵引系统^[4]。

3.1.1 先导索架设

先导索采用 $\phi 2.5$ 迪尼玛绳,综合考虑现场条件和已有成熟经验,选用大六轴无人空中牵引先导索过江。无人机牵引先导索施工前,应先进行试飞验证,确保无人机航程、载重、控制信号源稳定性等安全可靠。

架设具体步骤为:无人机从南塔顶空中牵引先

导索至北塔顶,由专业人员遥控无人机至北塔顶门架上空 3m 悬停,确认位置后遥控下放悬挂在无人机上的先导索绳头,由北塔顶上的作业人员接住绳头并临时锚固在塔顶横梁处,随后无人机降落至北岸栈桥,完成先导索的牵引过江施工。

3.1.2 过渡索架设

经计算分析,确定本桥过渡索包括 4 级,分别为 $\phi 4$ 迪尼玛绳、 $\phi 8$ 迪尼玛绳、 $\phi 16$ 钢丝绳、 $\phi 22$ 钢丝绳。迪尼玛绳选用 5t 专用绞盘在塔顶进行收放绳操作,钢丝绳选用塔顶门架上布置的 10t 卷扬机进行收放绳操作,逐级牵引过渡,最终牵引 4 级过渡索 $\phi 22$ 钢丝绳至南塔顶并临时锚固。

3.1.3 牵引索架设

先导索架设前,利用南塔顶门架上的 10t 卷扬机将南锚 30t 摩擦式牵引卷扬机的 1 号牵引索绳头牵拉至南塔顶并临时锚固;4 级过渡索 $\phi 22$ 钢丝绳在南塔顶与 1 号牵引索 $\phi 42$ 钢丝绳连接,北锚 30t 摩擦式牵引卷扬机进行收绳操作,南锚 30t 摩擦式牵引卷扬机进行放绳操作,由南塔牵引 1 号牵引索 $\phi 42$ 钢丝绳至北锚散索鞍支墩顶并锚固;将北锚 30t 摩擦式牵引卷扬机上的 4 级过渡索 $\phi 22$ 钢丝绳更换成 2 号牵引索 $\phi 42$ 钢丝绳;在北锚散索鞍支墩顶工作平台处将 1,2 号牵引索用拽拉器连接;随后调整牵引索的空索垂度,完成上游侧单线往复牵引系统施工。下游侧牵引索架设采用已架设的上游侧单线往复牵引系统完成过渡索、牵引索架设。

3.2 主缆架设闭式循环牵引系统施工

主缆索股架设阶段的闭式循环牵引系统由已架设完成的单线往复牵引系统转换^[5-6]而成:将 1 号拽拉器牵拉至仪征侧锚碇处,随后断开 1 号拽拉器的连接并将 1 号牵引索绳头临时锚固;将 2 号牵引索绳头利用塔顶及锚碇门架处卷扬机依次牵引至龙潭侧;1 号牵引索绳尾从龙潭侧卷扬机内摩擦筒绕过后经龙潭侧锚碇处各转向轮与 2 号牵引索绳头通过 2 号拽拉器连接;2 号牵引索绳尾绕过仪征侧锚碇处转向轮、配重机构等后通过 1 号拽拉器与 1 号牵引索连接;初调牵引索垂度并经牵引系统试运行后终调其垂度和配重机构竖向位置,最终形成主缆索股架设阶段的闭式循环牵引系统,如图 6 所示。

4 闭式循环牵引系统的技术特性

基于 PPWS 法的主缆架设闭式循环牵引系统在宁扬长江大桥主缆架设施工中首次应用,其主要具有五大技术特性。

1) 同步性。利用 30t 摩擦式牵引卷扬机的正反

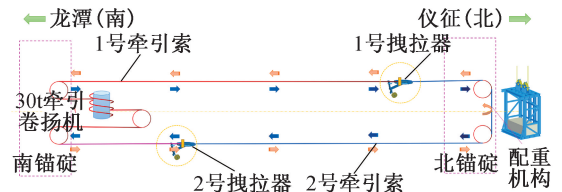


图 6 主缆索股架设闭式循环牵引系统

Fig. 6 Main cable strand erecting closed-cycle hauling system

转功能保证索股的双线往复牵引,双线均由单台卷扬机集成且闭环控制,避免了 2 台卷扬机操作误差,同步性更好。

2) 稳定性。牵引索配重机构设置于仪征侧,处于卷扬机远端,无论卷扬机正反转均可提供同样的初张力,保证牵引过程中索张力稳定,避免双线牵引中可能出现的锚头忽高忽低问题,系统整体稳定性好。

3) 可靠性。①牵引系统运行可靠,由 1 台卷扬机输入端和输出端的力差提供牵引力,避免了以往采用 2 台卷扬机往复牵引时卷扬机出现对拉问题;②主缆索股质量可靠,主缆索股经闭式循环牵引系统架设,安装到位并紧缆后空隙率及质量均满足规范要求。

4) 高效性。①牵引更高效,通过配重实现恒张力控制,过程中无须担心锚头运行时与托滚发生碰撞,无须作业人员跟随,牵引更加高效;②运行更高效,塔顶门架导轮组、猫道门架导轮组等各处转动机构安装精度要求高,保证拽拉器通行顺畅,且 30t 摩擦式牵引卷扬机运行平均速度可达 25~30m/min;③架设更高效,单幅平均每日架设索股 4~5 根,后期通过设备能力提升仍有工效优化提升空间。

5) 经济性。所采用的 30t 摩擦式牵引卷扬机为大功率设备,将原双线往复牵引系统 2 台卷扬机优化为 1 台,索股牵引架设过程中耗电量降低,碳排放量同步减少,顺应节能减排、绿色低碳理念。

5 结语

本文以宁扬长江大桥为例,针对其牵引系统的设计及实际应用情况进行了详细阐述。经实践证明,在 AS 法牵引系统基础上研发的 PPWS 法闭式循环牵引系统相较于双线往复牵引系统同步性好,冲击荷载要小,操作性能好,误操作率低;同时,在放索场地无限制、摩擦式牵引卷扬机设备能力提升等情况下优势将更加明显,可更好地适应国内狮子洋大桥、张靖皋长江大桥等 2 000m 以上超大跨径悬索桥索系统的安装施工。

(下转第 94 页)