DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250582

川滇金沙江特大桥施工关键技术

伏冠西,吴思凯,赫　勇,袁晶潞
(四川路桥华东建设有限责任公司,四川 成都 610000)

摘　要: 为研究悬索桥施工过程中的关键工序与技术对整个工程的造价、工期及风险控制的影响,结合川滇金沙江特大桥的施工特点,通过优化施工工艺,安全高效的完成了该桥的建设,并缩短了工期,降低了工程造价。该桥主塔施工采用下横梁塔梁异步、上横梁塔梁同步与主动横撑配套施工工艺,确保了主塔与横梁受力及线形要求;重力锚施工采用了非闭合式拱形咬合桩基坑支护体系,减少了支护结构的工程数量,保证了基坑边坡的稳定性;主缆采用预制平行钢丝索股架设,利用双线往复式牵引系统进行索股牵引,确保了工程质量与效率;钢桁梁采用厂内杆件制造、现场总拼与缆索吊装智能监控系统吊装工艺,精确高效的实现了全桥合龙。

关键词: 悬索桥;主塔;重力锚;主缆;钢桁梁
中图分类号: U445;TU997　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0294-06

Key Construction Technologies of Sichuan-Yunnan Jinsha River Special Bridge

FU Guanxi, WU Sikai, HE Yong, YUAN Jinglu
(Sichuan Road and Bridge East China Construction Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to study the impact of key processes and technologies in the construction process of suspension bridges on the cost, duration and risk control of the entire project, combined with the construction characteristics of the Sichuan - Yunnan Jinsha River Special Bridge, the construction of the bridge has been completed safely and efficiently by optimizing the construction process. The construction period is shortened, and the engineering cost is reduced. The construction technology of asynchronous lower crossbeam and pylon beam, and synchronous upper crossbeam and pylon beam supported with the active cross braces is adopted in the construction of the main bridge pylon, which ensures the stress and linearity requirements of the main pylon and crossbeam. A non-closed arched interlocking pile foundation pit support system is used in the construction of the gravity anchor, which reduces the engineering number of support structures and ensures the stability of the foundation pit slope. The main cable is erected by using prefabricated parallel steel wire strands, and the double-line reciprocating traction system is used for strand traction to ensure the quality and efficiency of the project. The hoisting process of in-factory member manufacture, on-site assembly and cable hoisting intelligent monitoring system is adopted for the steel truss girder, which has precisely and efficiently achieved the closure of the whole bridge.

Keywords: suspension bridge; main pylon; gravity anchor; main cable; steel truss girder

0　引　言

悬索桥主要由主缆系统和加劲梁系统构成[1]。核心承载结构为主缆系统,该系统包含桥塔、吊索、锚碇、索鞍等,主缆锚固于两岸锚碇,桥面荷载通过吊索传力于主缆系统,最终荷载传向两岸锚碇,该类桥型结构由于受力性能好、抗震性好、跨度大、外观精美和经济等优点备受建造者们的青睐[2]。

1　工程概况

桥址处于构造剥蚀高中山峡谷地貌区,地处金沙江干热河谷区,属亚热带季风气候类型[1]。该悬索桥桥面宽度为27.5 m、双向四车道,索塔结构采用门式框架形式,两岸塔柱都设计成变截面构造,四川岸塔高135 m,云南岸塔高172 m,采用C50混凝土;基础采用桩基加承台形式,单个承台平面尺寸25.5 m×25.5 m,高7 m,每个承台下布置16根直径3.3 m的钢管复合桩基础,行列式布置,按端承桩设计。四川岸

收稿日期: 2025-06-13
作者简介: 伏冠西(1987—),男,学士,高级工程师,从事桥梁施工技术研究工作。
通信作者: 吴思凯(1994—),男,硕士,工程师,从事桥梁施工技术研究工作。电子信箱:316458175@qq.com

隧道锚其左右两边的锚洞呈现出喇叭状的形态，断面尺寸沿着洞室纵深方向逐步扩大，最大开挖深度达到了 127.373 m，累计开挖的土方量大约是 3.3 万 m^2，混凝土浇筑的总量约为 2.2 万 m^2。云南岸重力式锚碇基础平面尺寸 65.0 m×69.5 m，最大开挖深度为 29.2 m，基坑总的开挖量达到 25.5 万 m^2，回填土石方 4.8 万 m^2，混凝土浇筑总量为 11.5 万 m^2。桥梁主缆采用 172 m+1 060 m+230 m 的三跨布置形式，矢跨比设置为 1∶9，主缆横向间距是 27.5 m，吊索纵向理论间距 15.0 m，两岸锚固系统由索股锚固连接构造以及预应力锚固构造共同构成。吊索系统采用平行钢丝结构，索夹外径 710 mm，设计成骑跨式上下对合型结构并且依靠高强螺杆紧固连接，吊索与索夹采用销接式连接方式，全桥钢桁梁总共划分成 71 个节段，其中端头节段最大重量达到 287 t，跨中标准节段最大重量约为 269.3 t。大桥桥型布置见图 1。

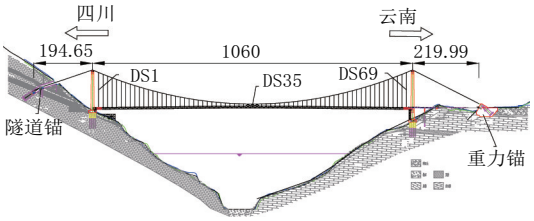

图 1　川滇金沙江特大桥桥型布置（单位：m）

2　主塔施工

主塔为钢筋混凝土门形框架结构，四川岸仅设置一道上横梁，云南岸共设上下两道横梁，左右两侧塔柱顶部中心间距为 27.5 m。主塔起步段采用翻模施工，塔身采用 6 m 节段液压爬模、下横梁塔梁异步、上横梁塔梁同步与主动横撑配套施工工艺[3-4]。四川岸塔柱共分为 23 段，云南岸塔柱共分为 28 段，左右塔柱一致。其中索塔起步段高 9 m，分为 2 段（3 m+6 m）。混凝土采用泵送，垂直输送依靠塔身侧面各布设一套，泵管接到塔顶后通过三通管将泵管分为两分支，便于塔壁混凝土均匀上升，从而泵送到各施工作业面。

该桥两岸的塔柱有着不等高的设计特点，因为塔身向内倾斜，在悬臂施工阶段的时候，自重以及施工荷载产生的水平分力会让塔根部位出现弯矩效应，这样的力学行为会使塔身外侧混凝土拉应力区形成并且随着裂缝发展，同时还会造成成桥状态下塔根截面内外侧压应力分布严重不平衡，导致内侧压应力超过设计值，对索塔结构的耐久性产生不好的影响。根据以上分析来看，把施工过程中的附加应力严格控制在设计允许的范围之内有着关键的工程实践意义。本次索塔施工过程中设置了 5 道主动钢管横撑来调节塔柱受力状态，主动横撑采用两根 ϕ820×12 mm 钢管作为主要受力构件，与 ϕ325×8 mm 钢管连接组成平面桁架，增加顺桥向稳定，确保塔柱施工线型。同时根据施工现场情况，两岸主塔均布设两台塔吊，置于索塔横桥向两侧，并配置两台施工电梯。索塔施工总体布置见图 2。

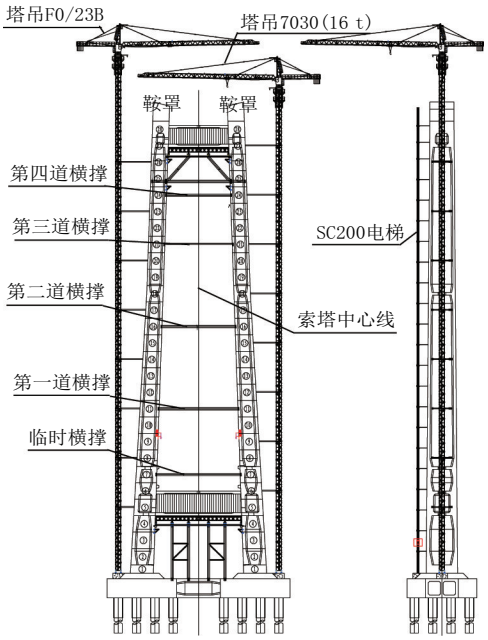

图 2　云南岸总体施工布置图

2.1　横梁施工

桥梁结构设计时两岸采用了不同的横梁布置方案，下横梁的截面尺寸为 9.4 m×9.0 m，上横梁的尺寸为 7.4 m×8.0 m，该结构采用钢-混组合箱形截面形式，其腹板采用波形钢板构造，上下底板是预应力混凝土结构。上横梁内部配置了 4 道钢横隔板，下横梁设置了 10 道钢横隔板，在上下横梁的顶底板内都布置了预应力体系，总共配置了 112 束 22ϕ_s15.2 规格的低松弛预应力钢绞线。

横梁施工前，预先搭设钢管支架平台，再安装波形钢腹板。波形钢腹板安装就位后即进行底板钢筋绑扎和混凝土浇筑，待混凝土达到设计强度 85%、龄期 5 d 后，进行梁体部分预应力张拉，然后在横梁内搭设支架，浇筑横梁顶板（横梁浇筑时塔柱连接段混凝土同步施工），顶板混凝土强度满足要求后将顶板及底板剩余预应力全部张拉。施工过程中为避免下横梁预应力张拉对索塔根部截面应力的不利影响，下横梁顶底板预应力张拉时各张拉 1/2 预应力钢束，待上横梁施工完成后再张拉下横梁剩余预应力钢束。

2.2　下横梁支架系统

下横梁与塔柱的线形以及施工过程产生的应力很大程度上取决于横梁支架的强度和刚度，加之下横梁底部距承台顶间距仅为23 m，为此将云南岸主塔下横梁支架设置为落地钢管支架现浇系统。采用ϕ820×12 mm钢管为主要承力构件，钢管立柱间的联系采用ϕ325×6 mm钢管，由此形成的桁架结构非弹性变形小、整体刚度大，能保证施工过程对横梁的线形和应力的要求。混凝土由底板浇筑纵向从中间向两边浇筑，横向先浇两侧腹板之间的混凝土，再浇两侧腹板仓内混凝土。横向的浇筑方式有利于波形钢腹板底部开孔位置混凝土结合性能、增加剪力件的效果以及控制仓内混凝土的浇筑质量。泵管先通过两根塔柱布置两套导管，然后通过不断拆安泵管以达到混凝土浇筑面全覆盖。下横梁支架布置见图3。

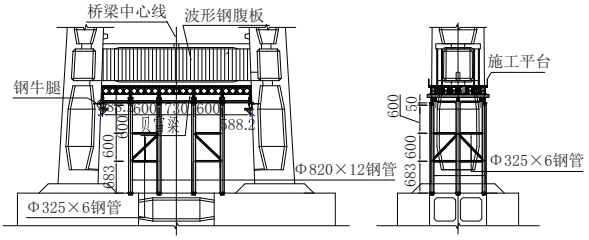

图3　下横梁支架布置图（单位：mm）

2.3　上横梁支架系统

本次施工选用现浇斜腿支撑系统作为上横梁支架的主要结构形式，此支架系统由六根钢管斜腿搭建起主体支撑结构，这些斜腿的纵向平联与立柱一道构建成刚架受力体系，在结构细部的处理工作中，于斜腿根部设置了塔柱间横向撑杆来提高稳定性，在塔内配置了横撑构件，支撑体系的顶部把工字钢横梁用作主要承重构件，在其上面依次安置卸载砂筒、工字钢纵向分配梁以及贝雷梁横向分配梁，形成多级传力路径。最终于贝雷梁上方铺设纵横交错的工字钢分配梁，并完成钢板底模的安装，具体布置形态见图4。

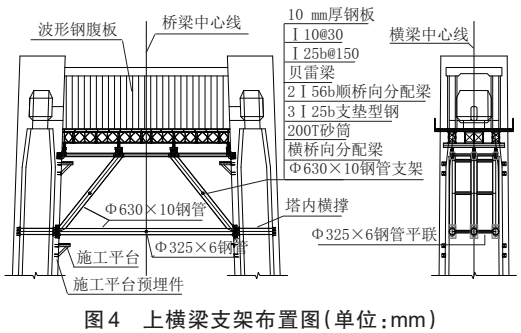

图4　上横梁支架布置图（单位：mm）

2.4　波形钢腹板施工

主塔横梁为波形钢腹板与预应力混凝土顶底板的组合横梁，每道横梁共计2组波形钢腹板，每组由一对波形钢腹板拼成钢箱组成，设计采用1600型波形钢板，考虑方便运输，每节段长度均为1.6 m的2倍，即3.2 m。波形钢腹板与主塔连接部分混凝土分两次浇筑完成。首层待横梁底板混凝土浇筑完成稍沉实后浇筑，浇筑时需在混凝土交界面处安装底板压模，以防止混凝土翻浆，振捣时观察混凝土从翼缘板另一侧翻出，并采用二次振捣，以保证结合部混凝土密实。第二层与顶板混凝土同步浇筑。顶板浇筑同底板相似即从中间向两边浇筑。

3　锚碇施工

3.1　重力锚施工

云南岸重力式锚碇所在斜坡覆盖层为早期高阶地冲洪积堆积物，厚度分布不均匀，现状整体斜坡稳定，锚碇区地形北东侧高，南西侧低。锚碇基础共设两级台阶，基础总长69.5 m，最大开挖深度约为29.2 m。重力锚纵断面布置见图5。

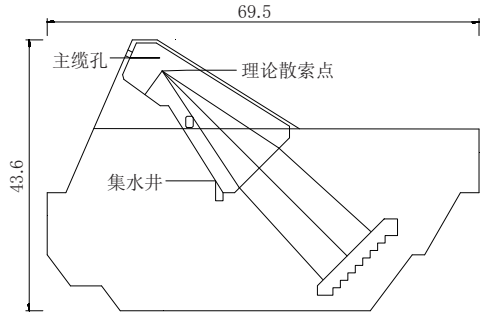

图5　重力锚基坑纵断面布置（单位：m）

锚碇开挖采用全机械开挖方案，基坑边坡防护设计采用锚拉抗滑桩+锚索框架梁+锚杆框架梁+锚杆挂网喷射混凝土+截排水系统的防护形式。首先实施锚碇东侧边坡以及北侧第一级边坡的开挖作业，施工方向从基坑西南角朝着两侧同步推进，接着以锚碇西南角作为起点进行双向开挖工序，来构建环形施工通道系统，最后完成抗滑桩施工以及基坑底部设计标高的开挖工作，在这个过程中一直保留西南角作为出渣通道的关键点，以此来保证施工材料的运输效率。锚碇混凝土按平面分仓、竖向分层的原则进行浇筑，整个重力锚以后浇带为界，划分成4个浇筑区，各浇筑区交错循环施工，单次浇筑高度2.0~2.5 m，单次最大混凝土浇筑方量3 072 m^3。

重力锚基坑施工时，北侧坡体因为地形陡峭致

使稳定性欠佳，东侧边坡和在建隧道洞口仅仅相距 42 m，对基坑变形有着较高的敏感性，这两侧不具备常规放坡开挖的条件。而南侧和西侧地势较为平缓，并且覆盖层较薄，土体自身的稳定性能良好，再加上周边没有关键建筑物，适合采用直接放坡开挖的方案，依据场地特征分析，研究团队创新性地采用了适应山区陡峭地形的非闭合式拱形咬合桩支护体系[5-6]，在北侧和东侧布置拱形咬合桩结构，把传统桩后土压力转变为沿拱轴线传递的轴向力，同时配合在西北、东北以及东南三个关键部位设置角点抗力桩，形成由被动土压力与抗力桩共同承担拱轴推力的复合受力机制，以此保证支护体系整体的稳定性。该创新方案实现了支护结构数量减少 50% 的效益，还依靠系统分析边坡稳定性、支护结构内力分布、抗力特性以及刚度参数等关键指标，验证了工程的可靠性与安全性。

3.2　隧道锚施工

隧道锚处于第四系崩坡积层覆盖，局部陡崖基岩出露，上部碎石土层厚度 0.00 ~ 8.00 m。最大开挖深度 127.373 m，采用人工、机械、光面爆破开挖相结合的方式进行开挖，对单隧洞采用台阶法掘进，在洞口到散索鞍这段等截面隧洞按上、中、下三个台阶开挖，上台阶先掘进，中、下台阶紧跟，台阶错开长度 3.6 m，支护应紧跟爆破开挖工作；在开展前锚室、锚塞体以及后锚室的开挖作业之际，同样将其划分为上、中、下三个作业台阶，各台阶之间保持 1.8 m 到 5.4 m 的合理错距。隧道锚结构见图 6。

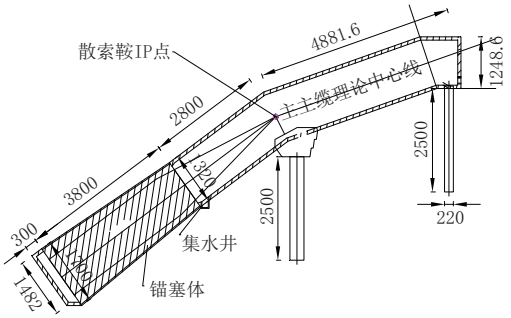

图 6　隧道锚结构（单位：mm）

当主缆系统架设以及附属设施安装工作完成之后才可进行二衬施工，二衬施工流程依照从锚室开始，到前锚室，再到鞍室段，最后延伸至洞口。由于隧洞呈现出喇叭状的结构特点，传统的隧道衬砌台车无法适应这种异形断面的施工要求，因此采用满堂支架体系来进行混凝土浇筑作业，该支架系统由 ϕ48×3.5 mm 规格的扣件式钢管搭建而成的，其纵向、横向以及竖向杆件的间距均设置为 50 cm，并且每隔 5 排设置斜向剪刀撑来提高结构的稳定性[7]。在施工过程中采用支架搭设和仰拱同步施工，依次完成防水层铺设、钢筋绑扎以及模板安装等工序，对于侧墙与顶板结构，采用小型钢模板体系，其中顶板底模依靠满堂支架立杆来提供支撑，左右侧墙模板则凭借支架横杆进行定位固定，并且辅以纵向主筋焊接支撑杆件来进行结构补强。混凝土浇筑采用溜槽输送工艺，同时配合插入式振捣设备来保证混凝土的密实度。

3.3　锚固系统施工

两岸锚固系统主要是由索股锚固连接构造以及预应力锚固构造组合而成[8]。索股锚固连接构造分成单索股与双索股两种类型，前者运用 2 根拉杆搭配单索股连接平板及连接筒的结构形式，后者采用 4 根拉杆结合双索股连接平板及连接筒的配置，每个锚室借助 54 组双索股锚固单元以及 19 组单索股锚固单元达成与主缆索股的可靠连接，该连接体系利用预应力钢束及其配套锚固构造保证整体结构的稳定性。在本次锚固系统的施工过程中，通过 BIM 技术，对定位支架制作安装、弧形索导管制作安装、冷却水管布置、冲突检查等方面实现了在三维空间中的精准定位，确保了预应力管道的安装精度，明确了弧形索道管、定位支架及冷却水管之间的碰撞问题，提高了施工效率和质量。

4　主缆施工

4.1　主缆架设

主缆采用预制平行钢丝索股架设[9]，横向布置两根，主缆中心横向间距为 27.5 m，每根主缆由 127 根索股组成，主缆呈现出竖向排列的尖顶状近似正六边形的结构形态，经过紧缆工艺进行处理之后最终形成了圆形的截面。

从实际施工环境的角度进行考量，两岸的主缆放索场都设置在了重力锚后方经过回填处理的基坑区域，并且在牵引系统正下方的龙门吊位置配套安装了专用的放索支架，相关的布置情况参见图 7。

4.2　索夹螺杆安装

对于该桥梁索夹螺杆的紧固作业，当索夹螺杆数量较少时，采用同步张拉施工法，利用同步张拉器分三个阶段逐渐施加至设计张拉力，当索夹螺杆数量较多时，实施分步张拉法，把螺杆分成两组沿主缆方向交错排列，每组依照三级张拉程序依次施工，等

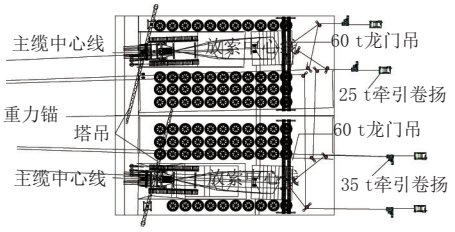

图7　放索场布置图

前组完成后开展后组作业，最后统一进行复张拉工序。在每个阶段张拉至设计拉力后，要完成螺母紧固和张拉器拆卸工作，接着采用超声轴力仪对螺杆有效拉力进行检测[10]，要是发现拉力不足就需要进行补充张拉，以此保证所有螺杆的有效拉力可达到设计规范要求。

为保证悬索桥索夹系统在施工荷载作用时的稳定性，防止出现索夹滑移现象，本工程运用分阶段张拉控制策略，在钢桁梁架设前、架设到50%、全桥合龙以及桥面二期恒载施加等关键施工节点进行螺杆紧固作业，要注意选取代表性螺杆进行长期轴力监测，依靠这种动态调控机制有效维持螺杆预应力水平，为钢桁梁高空架设作业提供可靠的结构安全保障。

5　钢桁梁施工

5.1　钢桁梁制作安装

全桥钢梁71个节段分为4种类型（以四川岸为例NZ01-NZ04），整体节段连接采用栓-焊结合。本工程运用缆索吊吊装技术开展钢桁梁施工，所采用的是板梁单元预制以及现场拼装工艺，需先制造单元板与杆件单元，然后制造主桁片单元、桥面板和桥面板挑臂单元[11]。钢桁梁组成见图8。

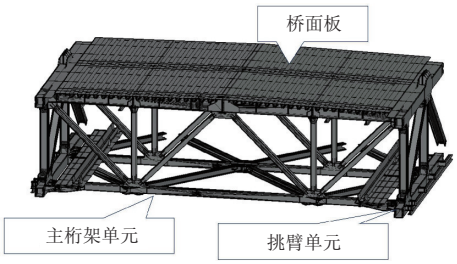

图8　钢桁梁各单元分析

研究团队充分考虑钢桁梁的受力特性，确定了从跨中向桥塔逐步推进配合刚铰混合连接技术的总体施工方案。整个吊装周期中按照监控指令分次顶推两岸索鞍。四川岸端梁在承台上安装临时支架，并采用缆索吊吊装就位，节段安装时向边跨移动为合龙留出空间；其余梁段在拼装台座上拼装完成后可直接采用缆索吊垂直起吊；云南岸端梁则在承台上搭设临时钢管支架，采用汽车吊和缆索吊相结合的方式在临时支架上进行端梁的拼装，节段安装时向边跨移动为合龙留出空间，安装完成后的端梁作为云南岸钢桁梁节段的起吊平台，同时在桥上安装完成主梁滑移轨道；由于云南岸拼梁场位于主塔后方较远距离，梁段不能直接起吊，因此主梁采用定制电动滑移小车将梁段滑移至端梁再起吊。场地布置见图9。

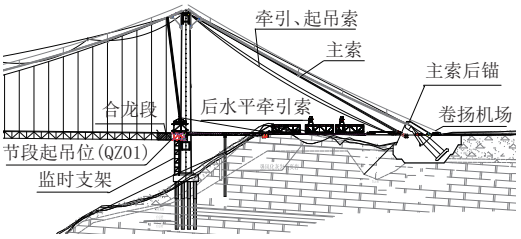

图9　云南岸起吊场地布置

5.2　缆索吊安全监控管理系统吊装施工

本工程缆索吊装系统由主索、牵引索、起吊索、跑车、起吊系统、承索器、塔顶转向索鞍，后锚锚固系统、散索鞍转向索鞍、牵引卷扬机及起吊卷扬机组成，缆索吊断面布置见图10。全桥在左右幅各布置一套缆索吊机，后锚布置于两岸锚碇处，中支点位于两岸主塔横梁上；缆索吊主索共布置2组，每组12根，全桥共24根；单套缆索吊共两根牵引索，两岸各一根，单根走4线布置；单套缆索吊共布置一个吊点（16线），布置起吊索一根，起吊卷扬机布置在云南岸，四川岸锚固于塔顶横梁上，额定起吊重量500 t。

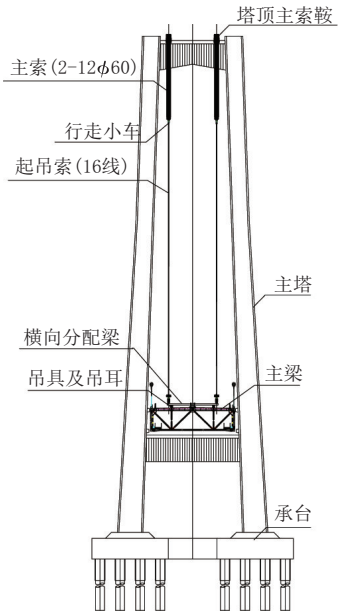

图10　缆索吊装系统断面布置图（单位：mm）

本研究提出的缆索吊智能控制系统实施流程依照以下标准化作业程序展开：首先要做好施工前期准备工作，接着依次开展锚碇主索锚固系统的装配作业，然后依靠主缆牵引系统转换工序来实现主索的牵引架设，在此基础上同步完成牵线及起重卷扬机设备的安装工作，后续工序有跑车组件与上下挂架的整体吊装以及承索器的精准定位安装，之后实施牵引索与起重索的系统布设，在完成电气控制系统的集成安装后，要进行系统试运行及参数调试，最终经过严格的试验检测流程来保证系统各项性能指标符合设计要求。

与传统缆索吊装施工不同，本工程对钢桁梁吊装施工过程中配置安全监控管理系统进行辅助[12-13]，通过在缆索吊系统各设备及各监控部位安装传感器、监测仪器等原件对吊装过程进行监测，及时收集数据，并通过传输系统将数据上传至中央处理器，实测数据分析后由预报预警系统发出各项指令，从而起到实时监测的目的，并能在手机或 PC 端随时观测数据随时了解现场动态。本系统重点针对起吊小车的运动速度与位置定位等数据加以信息化应用管控；并对牵引、起吊卷扬机的张力、绳长、绳速、起升高度、下降深度等信息集成于控制系统，控制系统通过吊装过程中的施工要求来决定起吊的动作，实现手动控制或自动控制。

5.3　钢桁梁铰接

传统的钢桁梁节段间的连接方式有三种：逐段铰接法、逐段刚接法和刚铰结合法。三种方法各有优势同时存在着不足之处。利用全铰法架设钢桁梁，此时梁段的下弦未做任何处理，下弦开口量的变化会增加全桥的波动性，以至于桥型整体结构的抗风性稳定性较差，且该方法需要等到合龙后通过等效压重进行梁段的刚接，等效压重实施难度大，工期长。逐段刚接法的施工可以弥补逐段铰接法的不足，提高抗风稳定性，但是刚接一部分节段后，因未达到最佳的刚接时机，逐渐刚接难度会增大，并且刚接后节段开始受力，产生的弯曲内力在整个施工过程中会使钢桁梁的位移变化表现的异常明显，且内力变化剧烈，可能超过允许应力导致构件破坏。该方法与全铰法架设相同需要压重工作，致使工期增加[14-16]。

本工程运用窗口铰接施工技术来达成钢桁梁节段的连接，依据结构受力特性以及施工条件不同，分别采用临时铰接和临时刚接相互结合的连接方式，借助实时监测钢桁梁线形的演变规律，精确掌握结构刚度转换的窗口期，分阶段去完成从临时铰接至刚接的体系转换，最终在梁体架设完成后达成全桥的刚性连接。该工艺的核心技术是对刚接时机以及铰刚转换节点进行动态优化，实践证明此方法提升了施工效率，缩短了工期，而且成桥线形监测数据和设计预期十分相符，和传统工艺相比有工序简化、工效提升等优势。

6　结　语

针对川滇金沙江特大桥结构设计特点和施工要求，通过优化施工工艺，安全高效顺利的完成了该桥的合龙。横梁施工中采用落地钢管支架现浇系统+现浇斜腿支撑系统+预应力分批张拉组合施工工艺避免了预应力张拉对索塔根部截面应力的不利影响，增强了横梁混凝土的抗裂能力。重力锚施工采用了非闭合式拱形咬合桩基坑支护体系，减少了一半支护结构数量，保证了基坑边坡的稳定性，增强了结构的安全性；并在锚固系统的施工过程中采用 BIM 技术确保了预应力管道的安装精度。采用索夹螺杆同步拉伸器，利用超声波检测螺杆轴力确保了索夹螺杆轴力均匀、稳定，达到了安全、高效施工的目标。在钢桁梁吊装过程中，本桥创新采用了缆索吊智能控制系统+窗口铰接施工工艺，实现了钢桁梁的快速吊装、精准对接，高效高质量的完成了钢梁的安全架设。通过川滇金沙江特大桥新技术新工艺的应用，提高了本工程的施工效率，使施工安全、质量得到了保证，为以后山区大跨径悬索桥的架设提供了弥足珍贵的经验。

参考文献：

[1] 肖安斌，陈伟，邓亨长，等. 湖北白洋长江公路大桥施工关键技术[J]. 公路，2021，66(9)：219-225.
[2] 李兴华，潘东发. 武汉杨泗港长江大桥主桥施工关键技术[J]. 桥梁建设，2020，50(4)：9-16.
[3] 曾祥红. 大跨钢—混凝土混合梁斜拉桥施工控制和塔梁同步施工方法[D]. 西安：长安大学，2012.
[4] 何利，向正松. 山区大跨径悬索桥索塔设计与施工方案研究[J]. 公路交通技术，2019，35(4)：60-69.
[5] 周咏凯，李清培，邓亨长，等. 川滇金沙江大桥重力式锚碇非闭合式拱形咬合桩基坑支护体系设计[J]. 桥梁建设，2023，53(4)：139-146.
[6] 侯江荣. 基于神经网络的基覆型边坡稳定性预测方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2022.
[7] 许登根，周昌栋，赵航. 悬索桥软质岩隧道锚开挖施工关键技术[J]. 世界桥梁，2022，50(3)：45-51.

（下转第 305 页）