

山区高陡边坡缆索吊装施工技术研究

虞 朗

(四川路桥华东建设有限责任公司, 四川 成都 610200)

摘 要 随着我国交通基础设施建设的重心向西部山区转移, 高速公路、铁路、水利水电等工程不可避免地需要穿越地形复杂、地势险峻的高陡边坡区域。在此类环境下, 传统的大型起重设备因受地形限制难以进场作业, 而修筑临时施工便道不仅成本高昂, 且对原始山体破坏严重, 极易诱发滑坡、崩塌等地质灾害。缆索吊装技术作为一种成熟的空中运输与吊装手段, 凭借其跨越能力强、地形适应性强、对地表扰动小等独特优势, 成为解决山区高陡边坡施工难题的关键技术。本文针对山区高陡边坡缆索吊装的难点以及山区高陡边坡缆索吊装施工技术的应用价值进行了分析, 探究了山区高陡边坡缆索吊装施工技术应用策略, 以期为相关人员提供参考。

关键词 山区高陡边坡; 缆索吊装; 地形约束; 动态稳定性; 智能化控制

中图分类号: U445.46

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.014

0 引言

我国山区面积广阔, 随着交通、水利等基础设施建设向西部纵深推进, 工程活动不可避免地遭遇高陡边坡这一复杂地形。高陡边坡通常具有地形陡峭、临空面高、场地狭小、地质条件复杂等特征, 传统施工模式依赖修筑便道、开辟平台供大型起重设备作业, 不仅成本高昂、周期漫长, 更因大挖大填而极易诱发滑坡、崩塌等地质灾害, 对生态环境造成严重破坏。而缆索吊装技术利用架设于空中的承载索构建“点对点”的运输通道, 可实现重物跨越深谷、陡崖的水平和垂直运输, 对地形适应性强、对地表扰动小, 是解决山区高陡边坡施工难题的有效手段。然而, 在该极端环境下应用缆索吊装技术, 面临着索塔与锚碇布设困难、动态荷载下边坡稳定性控制复杂等严峻挑战。为了最大限度发挥出山区高陡边坡缆索吊装施工技术的优点, 需要针对该技术的具体应用进行深入研究分析。

1 山区高陡边坡缆索吊装的难点

1.1 地形地质与设备布设的冲突

山区高陡边坡最明显、最本质的特征是其极端的地形条件, 一般由地壳抬升与河流强烈下切共同作用形成, 其典型地貌表现为“V”形深切河谷、悬崖峭壁、基岩大面积裸露, 可供建设使用的场地极其稀缺。因此, 山区高陡边坡与缆索吊装系统对场地的基本要求存在

直接而尖锐的冲突: 索塔基座的选址极其困难。理想的索塔位置应选在地质条件良好、地形相对平缓的台地上, 但山区高陡边坡恰恰缺乏这类天然条件^[1]。故而实践中索塔常被迫直接立于陡峭的坡面或悬崖边缘。

在此条件下进行基础开挖, 本身就是高风险作业, 由于开挖作业在近于垂直的坡面上进行, 施工人员高空作业时的安全防护极其困难, 机械设备的悬空作业也极难控制。同时, 大规模开挖必然打破原有山体的应力平衡, 尤其在岩体节理裂隙发育、风化程度极高的地段, 开挖扰动极有可能诱发坡面局部崩塌乃至整体滑坡。更严重的是, 索塔基础的承载力、抗倾覆能力、抗滑移能力都处在极大的考验之下, 设计中稍有不慎, 塔架在使用过程中就可能发生沉降、倾斜, 甚至彻底倒塌。

1.2 高动态荷载下的结构稳定性控制

吊装作业过程中产生的动态荷载与边坡及缆索系统的相互作用, 构成了一个复杂的动态难题。山区高陡边坡的缆索吊装, 其荷载工况远比平原地区复杂, 对结构稳定性的控制提出了更高要求^[2]。

1.2.1 缆索系统的受力状态极为复杂

在陡峭地形中, 两岸索塔通常存在巨大的高差, 这直接导致承载索的垂度呈现非线性变化。当跑车从高岸向低岸移动时, 承载索的受力状态和空间位置时刻都在变化, 由此产生的水平分力、垂直分力以及侧

作者简介: 虞朗(1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路与桥梁隧道施工。

向分力相互耦合,使得整个索系处于一种动态的平衡之中。与此同时,山区峡谷往往是风能集中的区域,瞬时风速高、风向紊乱,缆索系统作为典型的风敏感结构,在风荷载作用下极易产生振动。起吊瞬间的冲击荷载以及吊装过程中因加速度变化产生的惯性力,都会进一步加剧缆索系统的受力波动。这种复杂的动态受力状态,对缆索系统的设计裕度、钢丝绳的疲劳寿命、卷扬机的同步性以及各连接节点的可靠性都提出了极高的要求。

1.2.2 吊装就位的精准度控制难度极大

高陡边坡环境下的吊装作业,其目标构件往往需要安装在边坡本体之上或紧邻边坡的结构物上。由于缆索吊装属于高空无依托作业,且受高差大、跨度大、风荷载复杂等因素的影响,被吊重物在起升、横移、下放过程中极易产生大幅度的摆动。这种“摆幅”现象是缆索吊装中的固有难题,在山区峡谷大风环境中尤为剧烈。重物的摆动不仅会影响就位效率,更严重的是,稍有不慎,摆动中的重物就会与陡峭的山体岩面或已经安装好的结构发生剧烈碰撞,造成构件损坏、山体落石甚至安全事故。在狭窄的作业空间内,如何实现重物的“毫米级”精准对位,是对操控技术、设备性能和人员素质的综合考验。

2 山区高陡边坡缆索吊装施工技术的应用价值

2.1 突破地理屏障,实现“跨越式”运输

山区高陡边坡环境中缆索吊装技术最突出、最重要的应用价值是它提供了真正能突破地理屏障限制的“跨越式”运输方案,因此其价值绝不只是技术可行性的证明,更是对整个工程建设模式的根本性革新。在缆索吊装技术出现以前,山区深谷、陡崖上的结构物施工都采用“迂回抵达”的传统思路,往往是先修建足够长的临时施工便道,以“之”字形或螺旋形从山脚蜿蜒向上到达施工高程,再在结构物附近开辟足够面积的平台,让汽车吊、履带吊等常规起重设备进场作业。然而,此种模式有十分明确而重大的局限性,在高陡边坡上修筑施工便道本身就是极其困难、风险极大的工程,必然要进行大量土石方开挖,修建高填方路基,实施复杂的边坡防护工程,故其工程造价常远超主体结构本身,工期也极长。更重要的是,受地形条件严格限制,即使耗费巨资修建便道,也很难将大型起重设备运达所有需要作业的点位,尤其是悬崖绝壁之处,传统起重设备根本无处安放^[3]。

2.2 保护生态环境,减少工程创面

工程建设与环境保护协调统一已经明确成为不可逾越的红线,而生态环境本就极其脆弱的山区,要在完成建设任务的同时最大限度地保护原始地貌、自然生态,这也成为评价一项技术先进性最直接、最有力的标尺。缆索吊装技术在保护生态环境方面有传统施工方法不可替代的生态价值。传统的“开山辟路、填筑平台”施工模式实质上是对山体进行大规模人为改造:修建施工便道必然要进行大量挖方、填方作业,因此既会彻底破坏地表植被,又会改变山坡原始地形,形成大面积的人工创面。暴雨来临时,该创面极易发生水土流失,进而诱发滑坡、泥石流等次生灾害,对下游河流生态、农田村庄都构成直接而重大的威胁。更严重的是,大型设备在坡面反复碾压作业,会对地表植被、土壤结构造成不可逆的伤害。传统模式可被概括为“先破坏、后治理”,而此种模式往往需要耗费巨量资金进行生态修复,且实际修复效果又极难达到预期。

缆索吊装技术在环境保护方面的优势不仅体现在减少开挖量上,更重要的是它从根本上改变了施工对山体的作用方式。索塔及锚固点的布设只需要在少数几个关键位置进行局部基础施工,施工扰动范围被严格限制在塔基周围很小的区域内,山坡上的绝大部分区域都不会受到施工活动的直接影响。缆索横跨峡谷时,吊装路径完全悬空,构件在空中移动不会与地面接触,自然也就不会对地表植被造成任何破坏。施工结束后,仅需对索塔基础及锚固点进行简单的场地恢复,就能让山体基本回归原始状态,山坡的自然植被可以在短时间内自行恢复生长,水土保持功能很快就能重建。

3 山区高陡边坡缆索吊装施工技术应用策略

3.1 基于BIM+GIS的“天地一体化”前期规划与锚固优化

山区高陡边坡缆索吊装的复杂性,决定了其成败在很大程度上取决于前期规划的质量。传统基于二维图纸和现场踏勘的规划方式,难以准确捕捉地形的三维空间特征和地质的隐蔽信息,极易导致决策失误。因此,必须引入先进的信息技术手段,构建“天地一体化”的规划与设计体系。

该策略结合地理信息系统与建筑信息模型技术:先用无人机倾斜摄影、三维激光扫描等测绘手段对施

工现场进行高精度地形数据采集,建立施工区域地形、地貌、植被、既有建构筑物等要素的三维实景模型;继而采用地理信息系统技术对区域内地质构造、岩层产状、节理裂隙发育程度、历史滑坡点等地质信息进行系统整合,形成完整的地质信息数据库^[4]。将相关数据导入建模平台,建立缆索吊装系统及施工环境的数字孪生体,开展索塔位置、锚碇选点的反复模拟优化。通过模拟承载索的空间线形、计算索塔受力及变形、分析不同选址方案对山体稳定性的影响,确定最优布设方案。优化原则为“避让优先”,即利用三维可视化手段对索塔基础、主锚碇等关键受力结构进行地质避让分析,主动避开地质勘察中所揭露的滑坡体、断层破碎带、软弱夹层等不良地质区域,优选基岩完整、承载力高的稳定地段。

3.2 实施“小分段、多索道、智能化”的吊装控制

高陡边坡环境下有限的作业场地,对吊装作业的组织方式提出了严峻挑战。传统采用单一大型缆索吊机、整体吊装大型构件的模式,往往需要宽阔的拼装和堆放场地,这在山区陡坡上是难以满足的。应当转变思路,采用“小分段、多索道、智能化”的综合控制策略。

“小分段”策略是将大型构件合理拆分成若干尺寸较小、重量较轻的“小分段”单元,在设计时就充分考虑山区运输及吊装的限制,将整体结构划分为可在工厂或山下平坦区域预制、又可由常规运输车辆直接运至缆索吊装起吊点的各单元。通过“化整为零”,既大大降低了对拼装场地的需求,也使单次吊装的起重吨位减小,缆索系统的荷载峰值相应降低,整个吊装系统的安全裕度得以提高。

“多索道”策略是根据工程规模及施工组织需要合理布置多条并行或交叉的工作索道,当单条索道不能满足工期要求,或者不同作业面彼此干扰时,布置多索道可以组织多工点、多构件的平行作业。同时,多索道协同作业能合理分散吊装任务,实现资源最优配置,施工效率显著提高。此外,多索道布置也增大了系统的冗余度,在某条索道发生故障时其他索道可承担应急任务^[5]。

“智能化”策略是提高吊装精准性、安全性的有效手段,传统缆索吊装主要依靠地面指挥人员的目测及手势来控制,受视线被遮挡、距离较远、天气不利等因素影响,其操控精度及反应速度都难以保证。智能化改造的思路是在缆索系统中嵌入各种智能感知设备:

在关键受力点布置高精度索力传感器,对承载索、牵引索、起重索的受力状况进行实时监测,跑车上安装全球定位系统(GPS)或北斗定位模块,精确确定其空间位置,吊钩及作业面附近布置高清摄像头,实现作业区域无死角视频监控,塔架及边坡重要部位布设风速仪、倾角仪、加速度计等环境及结构监测设备,所有监测数据都通过无线网络实时传送到中央集控室。集控室以可编程逻辑控制器(PLC)为自动控制系统的核心,操作人员无需亲赴现场嘈杂、危险的作业区域,可在安全舒适的室内,借助多屏联动的实时数据及视频画面远程操控卷扬机的启停及速度。而且,控制系统本身具有智能决策能力,出现索力异常、风速超限、重物摆幅过大等危险信号时,系统会自动报警,必要时自动执行紧急停机等安全保护动作,真正把事故隐患消灭于萌芽状态。与此同时,操作人员可从实时监测数据中调整吊装参数,优化起吊速度、横移轨迹、下放节奏,实现对吊装过程的精准控制,使构件安全、准确就位安装。

4 结束语

山区高陡边坡缆索吊装施工是一项集地形适应、结构控制与风险管控于一体的系统工程。研究表明,其核心难点在于地形地质条件与设备布设的天然冲突,以及高动态荷载下缆索系统与边坡稳定性之间的复杂耦合效应。该技术具有突破地理屏障与保护生态环境的双重应用价值,既实现了对深谷、陡崖的跨越式运输,又最大限度减少了对山体的扰动破坏。未来,随着智能传感与自动控制技术的发展,山区高陡边坡缆索吊装将向更加智能化、数字化的方向发展,为我国复杂山区重大工程建设提供更为坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 张华贵.水利水电工程缆索吊装系统设计研究[J].科技视界,2025(33):80-83.
- [2] 凌鹏飞.缆索吊装大悬臂悬拼施工技术研究[J].大众科技,2025(04):47-50.
- [3] 翁浩,岳秀斌,陈小佳,李志峰,董必昌.缆索吊装施工新型组合锚碇在陡峭山区的应用[J].西部交通科技,2024(12):200-203.
- [4] 欧昌伟.缆索吊装悬拼安装在山区大跨钢箱梁桥梁中的应用[J].江西建材,2023(08):330-333.
- [5] 周咏凯.山区超大跨径拱桥缆索吊装系统设计研究[J].城市道桥与防洪,2023(08):228-231,22.