

水利水电工程智能锚索张拉系统的研发与应用

李 志¹, 曾 伟¹, 蒋小春², 孙 颖¹

(1. 华能澜沧江水电股份有限公司托巴水电工程建设管理局, 云南 迪庆 674608;

2. 成都中华瑞科技有限公司, 四川 成都 610031)

摘要:现有水利水电工程锚索张拉施工多采用人工控制张拉力、测量张拉伸长值等,存在控制精度差、随意性大、施工效率低、质量管理难等问题。依托 TB 水电工程,研发了基于中央服务器集中管控的智能预应力锚索张拉系统。该系统集参数设计、数据记录、实时监控、在线评估、应力监测等功能为一体,实现对整个锚索张拉工程的全过程、全周期智能化管理。TB 水电工程实例验证结果表明,该系统满足现场施工需要,有利于保障锚索施工质量、降低劳动强度、提升施工管理水平、提高智慧施工水平,具有较高的推广和应用价值。

关键词:预应力锚索;智能张拉;实时监控;水利水电工程

中图分类号:TV52

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)S1-0074-05

Research and application of intelligent anchor cable tensioning system in water conservancy and hydropower projects//LI Zhi¹, ZENG Wei¹, JIANG Xiaochun², SUN Ying¹ (1. Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diqing 674608, China; 2. Chengdu Spring Energy Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In current water conservancy and hydropower projects, anchor cable tensioning operations often rely on manual control of tension forces and measurement of elongation, leading to issues such as poor control accuracy, high variability, low construction efficiency, and challenges in quality management. Based on the TB Hydropower Project, an intelligent prestressed anchor cable tensioning system was developed, featuring centralized control via a central server. This system integrates functions such as parameter design, data recording, real-time monitoring, online evaluation, and stress monitoring, enabling intelligent management of the entire process and lifecycle of anchor cable tensioning operations. Validation through the TB Hydropower Project case study demonstrates that the system meets on-site construction requirements, helps ensure anchor cable construction quality, reduces labor intensity, improves construction management, and enhances intelligent construction capabilities, offering significant value for wider application and promotion.

Key words: prestressed anchor cable; intelligent tensioning; real-time monitoring; water conservancy and hydropower project

为保证水利水电工程长时间稳定可靠运行,通常要在项目建设过程中对边坡进行加固处理。作为一种重要施工技术,预应力锚索加固技术通过采用预应力方法,将锚索锚固在岩体内部,可用于边坡加固、地下工程支护、城市基坑加固等多种应用场景。该技术因具有不破坏岩体、施工灵活、速度快、干扰小、受力可靠且为主动受力等优点,而被广泛应用。

预应力锚索加固技术的使用可追溯到 20 世纪初,美国首先在阿伯斯莱森和费莱顿煤矿使用锚索来支护煤矿巷道顶板^[1]。1934 年在阿尔及利亚切尔夫斯坝的加高工程中,首先采用承载力为 1 万 kN 的预应力锚索来保持加高后坝体的稳定性^[2],自

此,预应力锚索加固技术因其经济性、稳定性及安全性被广泛运用于坝体加固工程中。20 世纪 60 年代,我国开始逐步论证预应力锚索加固技术并将其运用在实际工程中。1964 年,梅山水库右岸坝基工程项目第一次成功运用了该技术^[3]。20 世纪 70 年代,该技术逐步在我国的国防、水电、矿山等领域得到广泛应用。20 世纪 80 年代以来,随着人们对锚索技术的深入研究、对锚固技术认识的逐步提高以及相应技术的发展,锚索被大量应用于工程,相关的技术规范开始出现,锚固机理、试验设备和施工工艺等方面的研究都取得了较大进展。

从人机交互角度看,国内预应力锚索加固技术

基金项目:华能集团科研项目(HNKJ22-H87)

作者简介:李志(1978—),男,高级工程师,主要从事水电工程技术管理及智慧化系统建设管理工作。E-mail:307562450@qq.com

的发展主要分为两个阶段:①人工操作、人工记录阶段。传统的锚索张拉工艺为手动驱动油泵,根据压力表读数控制张拉力,人工测量张拉伸长值并进行手动记录,存在张拉力控制误差大、伸长量测量不准确、张拉力和伸长量未同步控制等问题。同时,由于锚索张拉施工是隐蔽工程,难以对锚索张拉施工过程进行监控,除了施工完成后读取测力计数据、检查锚头位移,很难及时了解施工效果。②数字化、智能化阶段。随着通信技术、控制方法和计算机技术的发展,锚索张拉施工向数字化和智能化方向发展。例如:周正等^[4]开发了一种电动油泵 BZ2.5-63M 系统,可以实现自动控制及显示记录、张拉力自动补偿,但该系统主要用于大型箱梁和轨枕的双端张拉,计算机系统无法采集和控制液压压力;郝志红^[5]研制了一种全自动张拉仪,对锚具进行了改进,并将自适应 PID 控制算法应用到了控制系统,减小了张拉控制误差,但系统未投入实际制造和工程应用中;杨肖委^[6]研发了一种预应力智能张拉机,采用穿心式预应力千斤顶,并将电液比例控制技术应用在其系统中,实现了高精度张拉,但未设计时间曲线(位移-时间曲线、油压-时间曲线)界面,无法直观呈现同步张拉效果。

目前,国内锚索张拉控制设备的应用得到了一定发展,但多用于桥梁和边坡加固等一般工程。水电站多建于高山峡谷地形中,江河两岸边坡陡峭,存在地质条件复杂、工程规模巨大、施工技术困难、环境湿度大、操作空间狭小、设备搬运及安装困难等情况^[7],对锚索张拉装置的操作便携性和环境适应性提出了很高的要求,因此还没有专门用于水利水电行业的智能锚索张拉设备。水利水电行业锚索施工大都参照人工绘制的张拉力-压力表读数关系曲线,以手动调节油泵油压的方式,实现锚索张拉过程中的千斤顶的张拉力控制,存在工序粗糙、控制精度低、随意性大的问题,且数据为人工记录,记录随意性大,存在篡改可能性,其准确性、真实性难以得到保证。

综上,水利水电行业现有的锚索张拉技术仍停留在人工控制的阶段,自动化程度亟待提升。本文依托 TB 水电工程,开展了智能锚索张拉系统的研究,研发了基于中央服务器集中管控的智能预应力锚索张拉系统,以期实现对整个锚索张拉工程的全过程、全周期智能化管理。

1 智能锚索张拉系统控制流程和原理

1.1 控制流程

锚索张拉系统可对锚索进行预紧张拉、分级张

拉、自动泄压、倒顶张拉处理。预紧张拉,通过千斤顶把整根锚索的每一根钢绞绳分别拉紧,使得每根钢绞绳都处于同一受力条件下,防止因受力不均导致锚索不合格的情况发生;分级张拉,可按设计要求预设张拉分级及锚索持荷时间,过程中自动控制张拉分级及持荷停止时间,上一级持荷时间结束后,自动开始下一级张拉,直至张拉结束;倒顶张拉,在张拉控制过程中自动对千斤顶的张拉行程进行判断,当出现千斤顶的行程不满足下一级锚索的伸长量时,系统会自动进行倒顶泄压,泄压完成后,人工完成千斤顶锚索安装,安装好千斤顶后人工确认,系统自动进行后续张拉;自动泄压,在张拉过程中出现倒顶张拉自动泄压外,张拉正常结束后也可自动泄压。智能锚索张拉系统控制流程见图 1。

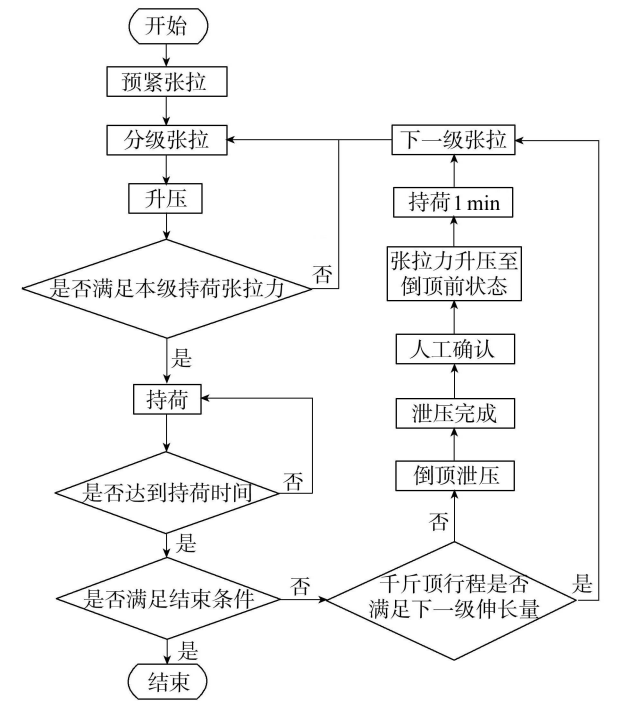


图 1 智能锚索张拉系统控制流程

1.2 控制原理

由于锚索张拉过程中张拉力不便测量,因此通过液压油的油压值进行间接测量。锚索张拉过程中张拉力与油压之间存在线性关系:

$$F = aP + b \tag{1}$$

式中: F 为锚索张拉力; P 为实时油压; a 为油压换算系数,与千斤顶的活塞面积有关; b 为消除机械误差。

智能锚索张拉控制系统根据控制模型对锚索施加张拉力。该控制模型基于液压油泵排量转速曲线、液压电机频率转速曲线、油管管阻与油压曲线、油管千斤顶腔体随油压升高变化的刚性变化曲线、流体流速对压力的影响曲线等对油泵进行复合函数处理设计。控制系统中除施加的油量外,其它变量

都对系统存在动态影响。该控制模型由动态调控转至趋于静态平衡调节的方式完成整体控制,使得该控制模型满足设计规范要求,设计张拉力提升速度不大于每分钟 0.1 倍;通过拟定综合曲线方程,达到对锚索张拉力的精确控制。

智能锚索张拉控制模型的输出信号和达到张拉的效果曲线图如图 2 所示,其中控制信号为系统函数复合输出结果,张拉力为最终控制得到的效果。 $0 \sim t_1$ 时段,控制信号急速上升,得到的张拉力缓慢提升,主要由机械结构等原因造成,该时段主要是将油压调节至初始值; $t_1 \sim t_2$ 时段,此时油压已提升,控制信号趋于平缓,张拉力处于快速提升过程; $t_2 \sim t_3$ 时段,控制信号趋于稳定,通过监控张拉力提升速度对控制信号进行调控,使得张拉力在此区段保持在理论张拉值; $t_3 \sim t_4$ 时段,控制信号缓慢降低,使得液压系统处于动态平衡状态,消除油压对张拉力的影响,使控制信号停止输出时,张拉力不出现猛降现象,让张拉力控制较为稳定。

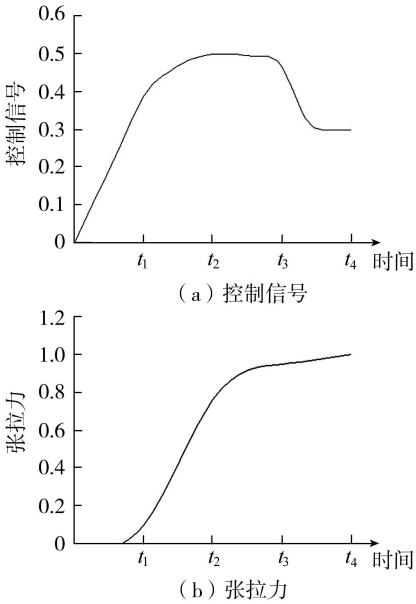


图 2 控制信号与张拉力随时间变化曲线

2 智能锚索张拉系统组成

智能锚索张拉系统的研发基于“全面感知、真实分析、实时控制”的闭环控制理论,实时采集锚索张拉关键参数,分析张拉情况,智能控制张拉过程。智能锚索张拉系统具有自动张拉、自动数据记录、无线接入云服务器、远程实时监控等功能,以科学、规范的智能张拉替代传统的人工张拉,根据设定参数控制完成整个张拉过程,实现锚索张拉全过程智能化施工及管理。

智能锚索张拉系统架构如图 3 所示。系统由智能锚索张拉设备和智能预应力锚索张拉管理系统组

成。智能锚索张拉设备是系统的执行机构,通过设定的参数智能执行张拉,并记录、显示、存储过程中的数据,同时实时上传数据至中央服务器。智能预应力锚索张拉管理系统作为部署于中央服务器的网络平台,是系统的大脑,负责确定工艺参数,实时监控,并进行数据整理、汇总、统计。

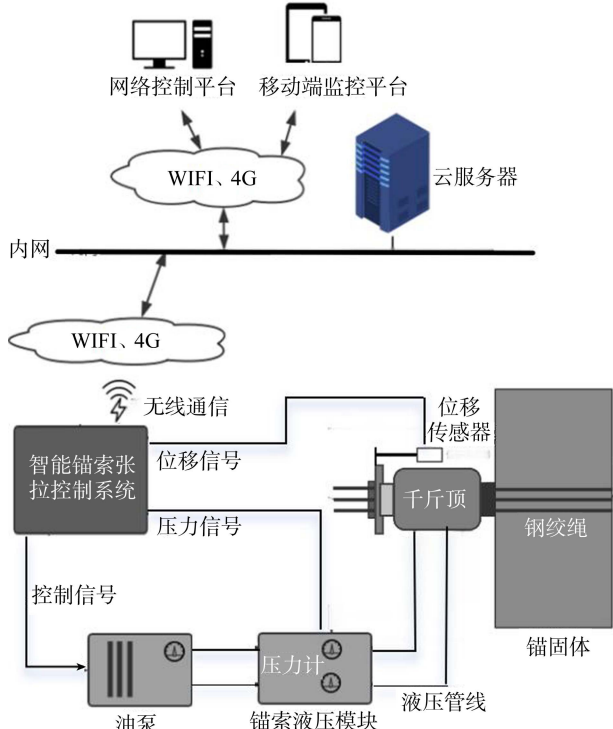


图 3 智能锚索张拉系统架构

2.1 智能锚索张拉设备

智能锚索张拉设备主要包含智能锚索张拉控制系统、锚索液压模块、千斤顶、位移传感器、压力传感器、无线模块等。智能锚索张拉控制系统包含人机交互界面,用于显示数据和发送控制指令,当发送控制指令后,锚索液压模块控制油泵开始工作;油泵工作后,智能锚索张拉控制系统实时采集位移传感器和安装在千斤顶回油管上的压力传感器测量的信号,分析锚索张拉状态,生成控制指令;锚索液压模块根据控制指令控制油泵的送油阀实现自动张拉;张拉完成后,系统自动停止运行;张拉过程中,通过无线模块将采集的数据和施工报表上传至中央服务器。

2.1.1 智能锚索张拉控制系统

智能锚索张拉控制系统主要用于参数设置、数据采集、数据显示、数据记录和无线接入。其功能主要包括:

a. 人机交互。现场操作人员通过操作智能锚索张拉控制系统来实现对锚索张拉全过程的施工控制,包括设定参数、观测施工过程、特殊情况下发送控制指令等,可查看锚索施工报表和曲线。

b. 张拉数据采集、显示和记录。采用全数字化加密技术,传感器信号通过数字加密信号传输以保证数据真实可靠。

c. 无线传输。智能锚索张拉控制系统的数据通过无线网络接入智能预应力锚索张拉管理系统,以实现实时监控、数据汇总。

d. 张拉控制。结合现场张拉过程,进行分级张拉。张拉过程会根据设置参数自动进行分级控制和切换,满足当前分级持荷张拉力时,会在当前分级进行锚索持荷,达到持荷时间后进行下一级的张拉。

2.1.2 锚索液压模块

锚索液压模块主要用于油压数据采集和液压控制,替代人工调节油压阀门,具有控制精度高、响应速度快、控制效果好等特点,同时降低人工误操作可能。

锚索液压模块工作原理为:①液压模块上设有压力传感器,压力传感器与智能锚索张拉控制系统通过电气连接,油压数据通过电气接口实时传输给智能锚索张拉控制系统;②智能锚索张拉控制系统根据实时油压数据、锚索张拉工艺控制策略及现场设计要求,发送控制信号给液压模块和液压油泵,控制锚索张拉过程;③锚索液压模块根据控制信号对液压阀和液压油泵进行控制。

2.1.3 技术特点

a. 小巧轻便,便于移动、吊装和边坡露天施工。水电站边坡陡峭,设备搬运困难,施工场地狭小。智能锚索张拉设备整体重量小于 130 kg,体积小,底部设计有轮子便于移动,侧面设计有吊环,便于施工现场吊装。

b. 模块化设计,便于拆装和维护。主要模块智能锚索张拉控制系统和锚索液压模块设计为独立模块,需要时可以从设备中取出作为独立模块使用,提高了设备使用的灵活性与便携性。

c. 高度智能化。一键启动,智能张拉,按照水利水电工程锚索张拉规范设计,以自动化的张拉控制替代人工操作,保障锚索施工质量。

d. 高度信息化。设备通过无线网络接入中央服务器,实现实时远程监控,及时了解现场张拉情况,施工完成后数据自动汇总。

2.2 智能预应力锚索张拉管理系统

智能预应力锚索张拉管理系统是智能锚索张拉系统的核心,主要包括以下 4 个模块:

a. 锚索施工参数设置。结合规范和现场施工要求,对锚索施工的持荷时间等参数进行设定,通过网络下载到智能锚索张拉设备。

b. 远程实时监控现场锚索施工。锚索施工是

隐蔽工程,以往对锚索施工的监管主要通过监理旁站进行,耗时耗人。管理者可以通过电脑或手机登录锚索张拉管理系统,实时查看现场的张拉力、伸长量、持荷时间等全过程数据,提高了监管的效率和便利性。

c. 在线分析张拉成果数据。锚索施工数据汇总到中央服务器,生成报表和曲线,可以分时间段、施工单位、部位查询施工成果,对施工成果进行统计分析,及时掌握施工进度。

d. 具有专家系统接口。专家可以通过锚索张拉管理系统实现信息交互、数据共享,必要时可以远程指导现场施工。

3 工程实例

3.1 总体情况

2022 年 11 月至 2023 年 8 月,在 TB 水电工程开展了 3 次智能锚索张拉现场试验。在现场试验的基础上,对智能锚索张拉设备进行优化完善。施工成果表明:①智能锚索张拉设备性能稳定可靠,可以实现锚索施工过程的数据采集、数据显示、过程控制等各项功能的需要。②智能锚索张拉设备具备小型化、模块化特点,经现场试验后,能够适应边坡工作条件,便于现场施工携带和运输,提升工作效率。③智能锚索张拉控制策略可行有效,按照规范进行锚索张拉施工,实现锚索正常工况的智能处理和倒顶异常工况的提示,有力保障了锚索张拉施工质量。

3.2 智能锚索张拉和人工锚索张拉情况对比

a. 智能锚索张拉数据自动上传服务器,全过程无需人工干预,实现科学规范施工。智能锚索张拉时,根据压力、张拉力、伸长量、持荷时间等各种参数实时分析锚索张拉状态,及时做出判断,自适应调整策略,智能完成锚索张拉施工全过程,自动生成报表和曲线。而人工锚索张拉时,数据需手动记录、纸质归档,材料易出错、易丢失,且不能直观反映张拉过程。

b. 智能锚索张拉按照规范进行分级张拉及超张拉,控制精度更高,张拉过程更加规范、标准,保证锚索施工质量。智能锚索张拉时,当张拉力满足本级持荷张拉力要求时进行持荷,满足持荷时间进入下一级张拉,不满足本级持荷张拉力要求时进行升压再持荷,保证按照规范要求对锚索张拉,根据模型计算所需张拉力尽快反馈控制,控制精度高。而人工锚索张拉时,根据油压表读数人工控制张拉力,误差率较高,且油压表读数精确性受到油液黏度、温度等多种因素影响,控制精度不高。

c. 智能锚索张拉持荷时间严格满足设计要求,

有利于保障锚索施工质量。智能锚索张拉时,严格按照设定的持荷时间完成张拉,保证每一次持荷时间达到足够时长。人工锚索张拉时,现场工人主要基于自己的经验来判断是否达到持荷时间,持荷时间差异较大,部分持荷时间不能达到设计要求,可能影响锚索张拉质量。且由于当前的纸质记录并不记录持荷时间,事后无法检验张拉过程的规范性。

d. 智能锚索张拉通过实时采集传感器加密信号自动测量锚索的伸长量,数据自动记录,保证了数据的准确性、真实性。智能锚索张拉时,数据实时采集、自动记录,并打印了报表和过程曲线,杜绝人为干预,保障了数据的真实性、可靠性。人工锚索张拉时用伸长计或游标卡尺等工具手动测量锚索伸长量,误差率较高,约 5%,且测试值易受工人技能、视觉疲劳、主观判断等因素的影响,手工记录时存在很大的随意性,无法保证数据的真实性。

e. 智能锚索张拉有利于降低工人劳动强度。传统施工模式下,工人需要手动驱动油泵、通过油压表控制张拉力、人工测量伸长值,整个过程需要人工实时关注锚索张拉施工过程,精神高度紧张。采用智能锚索张拉系统后,将工人从时刻关注锚索张拉施工过程的状态中解放出来,工人只需要观察和值守,在倒顶泄压过程中短暂介入,劳动强度大大降低。

3.3 应用效果

a. 有利于保障锚索施工质量。智能锚索张拉以科学、规范的智能张拉替代人工操作,智能完成锚索张拉过程,减少人工干预和误操作,锚索施工按照规范进行,解决了以往控制水平低、控制精度差等难题,锚索施工质量得到有力保障。

b. 节省人工,降低工人劳动强度,提高工效。智能锚索张拉系统实施后,自动控制张拉力和位移,数据自动记录,大大降低了现场工人的工作强度,系统规范、自动完成锚索施工,施工后打印规范的施工报表,替代人工手动记录,提高工作效率。

c. 提升智慧施工水平。以往水电施工中锚索资料大多采用手工记录,效率低、易出错、资料统计耗时耗力、施工分析滞后。智能锚索系统实施后,现场数据实时上传至中央服务器,可通过电脑、手机等移动端远程实时查看现场施工数据,锚索资料自动上传、归档,施工管理方可以及时了解现场施工情况,提高锚索施工的技术水平和管理水平。

4 结 语

本文对智能锚索张拉系统进行了研究,研发了适应水利水电工程锚索施工需求的智能锚索张拉系

统,并在 TB 水电工程进行了现场试验。应用智能锚索张拉系统进行锚索张拉,可按照锚索张拉规范自动控制张拉力,自动完成整个张拉过程,有效节省人工,降低工人劳动强度,保障锚索张拉质量,提升智慧施工水平,具有易于部署和移动的优点,适用于水利水电行业,具有较高的推广和应用价值。

参考文献:

[1] LI C. C. Rockbolting: principles and applications [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

[2] 张乐文,汪稔. 岩土锚固的现状与发展[C]//2002 年中国西北部重大工程地质问题论坛论文集. 北京: 科学出版社, 2002: 551-556.

[3] 裴亚建. 预应力锚索加固边坡中的群锚效应研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.

[4] 周正,宋慧杰. 预应力施工配套机具的研制[J]. 建筑技术开发, 1999, 26 (5): 21-22. (ZHOU Zheng, SONG Huijie. Development of prestressed construction equipment [J]. Building Technology Development, 1999, 26 (5): 21-22. (in Chinese))

[5] 郝志红. 全自动预应力张拉仪的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.

[6] 杨肖委. 预应力智能张拉系统的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.

[7] 闻炼,黄亮,向欣,等. 水电工程岩土锚固技术研究现状与发展趋势[J]. 安全与环境工程, 2023, 30 (4): 35-45. (WEN Lian, HUANG Liang, XIANG Xin, et al. Research status and development trend of rock and soil anchoring technology in hydropower engineering [J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30 (4): 35-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 23 编辑: 俞云利)

