

文章编号: 1674—8247(2018)03—0001—07

# 铁路预应力混凝土梁智能张拉系统 BPS 研究

嵇 一

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

**摘 要:**预应力张拉施工作为铁路预应力混凝土预制梁生产过程的关键环节,传统的人工操作方式具有精度低、效率低、操作复杂、同步性差、标定频率高、成果真实性不可控等缺点。针对目前铁路桥梁传统预应力人工张拉存在的问题,文章基于大数据、云技术及射频识别技术,研发了一套集智能张拉泵站、智能张拉千斤顶设备、智能化软件平台、智能化手持设备于一体的铁路预应力混凝土梁智能张拉控制及管理系统(BPS),并在石济客运专线梁场进行了试验验证和应用推广。工程应用结果表明:(1)所研发的 BPS 系统实现了张拉操作的自动化、信息化、远程化、实时化,提高了张拉控制精度、施工质量和工作效率;(2)BPS 系统研发了新型的夹片回缩量传感器,解决了夹片回缩量自动测量问题;(3)BPS 系统完全依照铁路桥梁预应力张拉的规范和流程开发,对铁路梁场适用性强;(4)进行了自动与人工张拉对比试验,验证了 BPS 系统的有效性,并成功应用于石济客运专线、济青高速铁路等大型梁场,效果良好;(5)BPS 系统的研发为智慧高铁和高铁信息化技术的发展奠定了坚实的基础。

**关键词:**铁路预应力混凝土梁;后张法预应力施工;智能张拉系统 BPS

中图分类号:U445.47

文献标志码:A

1

## Research on Intelligent Tensioning System BPS of Railway Prestressed Concrete Beam

ZHUO Yi

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

**Abstract:** Prestressed tension construction is the key link of the production process of prestressed concrete precast beams. The traditional manual operation has many disadvantages, such as low precision, low efficiency, complex operation, poor synchronization, high frequency of calibration and uncontrollable authenticity of results. In view of the problems existing in the traditional prestressed tensioning of railway bridges at present, in this paper, based on big data, cloud technology and radio frequency identification technology, the railway prestressed concrete beam intelligent tensioning control and management integration system (BPS) is developed, which includes intelligent tensioning pumping station, intelligent tensioning jack equipment, intelligent software platform and intelligent handheld device. Furthermore, the BPS system has been tested and applied in the beam field of Shijiazhuang-Jinan passenger dedicated line. The engineering application results show that: (1) The developed BPS system has realized the automation, informatization, remote and real-time operation of the tensioning operation, and improved the tension control accuracy,

收稿日期:2017-11-14

作者简介:嵇一(1983-),男,高级工程师。

基金项目:中国铁路设计集团有限公司重点课题项目(721628)

引文格式:嵇一. 铁路预应力混凝土梁智能张拉系统 BPS 研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(3):1-7.

ZHUO Yi. Research on Intelligent Tensioning System BPS of Railway Prestressed Concrete Beam [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(3):

1-7.

construction quality and work efficiency; (2) To solve the problem of the automatic measurement of clip retraction, the BPS system developed a new sensor for retraction value measurement of clip; (3) The BPS system is fully developed according to the specifications and processes of the prestressed tensioning of railway bridges, and the applicability of the railway beam field is strong; (4) The contrast test of automatic and manual tension is taken, which verifies the validity of the BPS system, and successfully applied to large beam fields of Shijiazhuang - Jinan, Jinan-Qingdao and other passenger dedicated line, the effect is good. (5) The research and development of BPS system has laid a solid foundation for the development of intelligent high-speed rail and high-speed rail information technology.

**Key words:** railway prestressed concrete beam; post-tensioning prestress method; intelligent tensioning system BPS

预应力混凝土预制简支梁作为铁路桥梁的主要上部结构形式,在快速发展的铁路工程建设中已得到广泛应用。预应力张拉施工作为预应力混凝土预制梁生产过程的关键环节,其张拉力施加的精度、同步性等控制指标的优劣直接影响预应力混凝土梁体的承载能力和抗裂性,决定着该预应力构件的安全性和耐久性<sup>[1-5]</sup>。

目前市场上预应力张拉设备共有两类产品<sup>[6-7]</sup>,第一类是传统的人工张拉设备,第二类是公路上使用的自动张拉设备。人工张拉设备采用油泵和千斤顶组成的张拉系统,其工艺可以概括为:①手动驱动油泵;②由压力表读取油压,换算成张拉力;③待压力表读数达到预定值时,用钢尺人工测量张拉伸长值;④人工记录;⑤人工整理张拉结果报表。在传统人工操作过程中,千斤顶油压的测量采用机械式压力表,预应力钢束伸长量由现场的工人用钢尺测量。压力表和钢尺的读数精确度受人为因素影响,读数误差难以控制,往往导致预应力筋锚固时,锚下有效预应力与设计值偏差较大和钢束伸长量测量不准确的问题,预应力施工质量的稳定性和可靠度难以保证。同时,完成一片铁路预制梁张拉,需要 8~10 人同时工作,耗费大量人工工时,生产效率偏低。

公路上使用的自动张拉设备通过计算机控制中心实现预应力张拉全过程自动化<sup>[8-10]</sup>,其中控制中心集成于泵站,泵站和千斤顶与常规预应力张拉的泵站和千斤顶布置原则相同。目前,基于自动张拉设备的自动化预应力张拉在国内外公路桥梁预应力施工中得到一定程度的应用,如港珠澳大桥、金沙江特大桥等国家级重点工程中都应用了预应力智能控制技术。然而,公路领域应用自动张拉系统的张拉控制及管理的流程、标准和硬件设备规格在铁路桥梁施工中并不适用,因为铁路梁场预制梁的伸长量计算方法与公路梁不同,而且铁路对张拉精度要求更高。铁路规范中终张拉阶段的钢束伸长量计算需用到预张拉和初张拉阶

段的钢束伸长量结果,这就要求张拉系统有数据保存和查询的功能。另外公路桥梁预应力自动张拉设备的张拉控制精度、张拉质量也未在铁路桥梁施工领域进行有效验证,因此,适用于铁路桥梁施工的预应力自动张拉系统目前仍处于起步阶段,迫切需要研发一套适用于铁路混凝土桥梁的预应力智能张拉系统。

本文基于大数据、云技术及射频识别技术,提出了一套适用于铁路混凝土桥梁自动张拉的全套软硬件技术,研发了集智能张拉泵站、智能张拉千斤顶设备、智能化软件平台、智能化手持设备于一体的铁路预应力混凝土梁智能张拉控制及管理系统 BPS,并在石济客运专线梁场进行了对比试验验证,在济青、阳大、郑阜客运专线等大型铁路梁场进行了应用推广。

## 1 BPS 智能张拉系统设计

### 1.1 系统功能定位

BPS 系统是专门为铁路后张法混凝土简支梁预应力张拉施工研发的自动化预应力张拉技术,梁体张拉具有以下几个特点:

- (1) 铁路梁体量大、张拉控制力大;
- (2) 铁路梁张拉工序多,计算流程复杂;
- (3) 铁路安全等级高,系统稳定性、均匀性要求高;
- (4) 铁路信息化程度要求高。

因此,BPS 智能张拉系统的目标是将预应力自动张拉硬件设备和软件系统深度整合,并与射频识别技术(RFID)、云技术、大数据技术相结合,搭建了一整套基于物联网的铁路预制梁预应力张拉施工操作控制、过程管理、监督查询平台,实现预应力张拉施工全过程的自动化、信息化、远程化、实时化,并为物联网技术在铁路领域的推广奠定基础,为绿色高铁、智能高铁、信息化高铁助力。

### 1.2 系统组成设计及工作原理

BPS 智能张拉系统由智能张拉硬件设备和软件平

台组成。其中硬件设备由包括智能主泵站、智能副泵站、智能千斤顶、智能手持射频识别终端四部分组成。软件平台包括应用于智能泵站上的 SPT 软件、运行于现场操作中心的 Station 客户端软件、运行于云服务器上的 Cloud 服务器端软件、运行于个人电脑平台的 Client 客户端软件和运行于个人手机平台上的 Portable 客户端软件。

系统的主要原理如图 1 所示。主要流程是通过操作中心的 Station 客户端软件进行梁体的张拉参数配置,并通过云服务器上的 Cloud 服务器端软件进行同

步,将张拉输入数据传输到智能泵站的 SPT 软件上。利用智能千斤顶上测量张拉力的压力传感器、测量钢束伸长量和夹片回缩量的位移传感器,依据张拉力控制、伸长量校核的原则,采用 SPT 软件对梁体张拉过程进行自动控制,整个过程严格按照规范要求执行。当张拉完成后,张拉结果数据会自动上传到云服务器上进行计算,并将计算结果同步到智能泵站和各个客户端软件上,实时查看张拉结果数据。张拉结果报表也可在客户端上自动生成和查询。

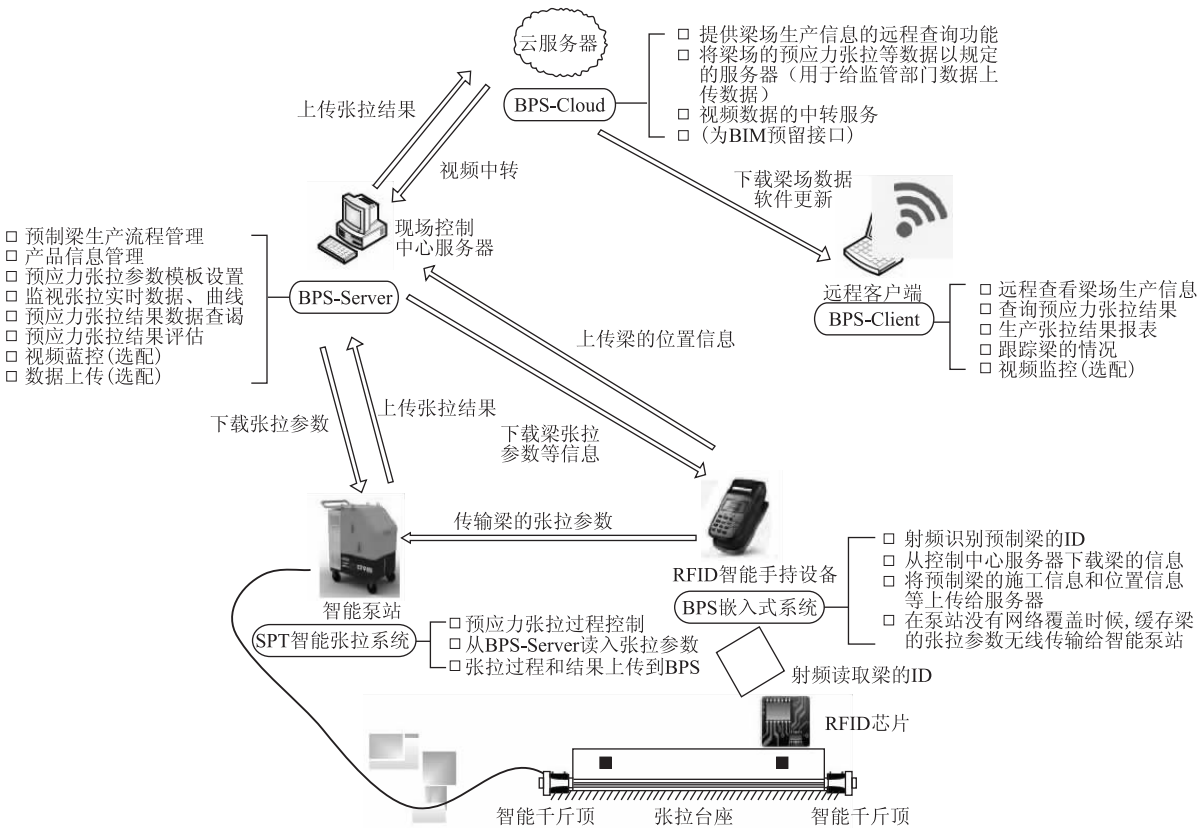


图 1 BPS 智能张拉系统逻辑架构图

1.3 系统功能特点

(1)张拉精度高,保证张拉质量。①实测张拉力偏差在 0.3% ~ 1.0% 范围内;②实测两端不同步率≤5% 的样本比例占 94.4%;③实测伸长值偏差≤6% 的样本比例占 94%;④严格按照规范要求及程序设置张拉流程,减少人工干预,保证张拉数据真实性。

(2)一键式操作,提高工作效率。①一键式自动控制,不间断连续操控,提高作业效率,降低劳动强度;②一键式自动生成张拉成果报表,节约成果填报和整理时间。

(3)节约人工成本,提升经济效益。①自动张拉

设备可减少 4 名工人,节约预应力张拉施工人力成本 50%;②显著减少整套设备的标定频次,大幅减少校准工作,降低成本。

(4)软硬件操作系统可靠,增强系统稳定性。①张拉系统设置有故障提示和报警功能;②张拉过程设置有电源输入保护(防止供电不稳)、张拉压力保护(防止超压)、千斤顶行程保护(防止超顶行程)、位移传感器故障保护(防止位移数值不准)、回程压力保护(防止回程压力过高)等五级安全保护功能。

(5)采用物联网系统架构理念,实现信息化管理。①实现了张拉控制自动化;②实现了张拉成果实时化

查询展示;③实现了梁场管理的远程化和可视化;④实现了张拉施工的精细化操作;⑤利用 RFID 技术为每片梁提供了身份认证,进行全寿命周期管理。

## 2 BPS 智能张拉硬件设备研发

预应力自动张拉控制管理系统硬件设备主要包括智能主泵站、智能副泵站、智能千斤顶三部分。它是通过 PLC 微电脑和工业平板组合方式控制智能泵站和智能千斤顶的张拉,利用压力传感器和位移传感器(测量活塞伸出量和夹片回缩量)的测量数据反馈,通过工业以太网远程控制实现预应力同步和精确张拉。通过双网络通信,实现服务器下载和 RFID(射频识别)扫描多种方式获取张拉模版和控制参数,并将张拉数据自动上传至服务器,消除人为因素干扰,有效地保证预应力张拉施工质量。

### 2.1 智能泵站

智能泵站是张拉系统的动力源,包括主泵和副泵,通过泵站输出的液压动力驱动千斤顶伸缸及缩缸。智能泵站由工业平板电脑、油箱、电机、液压泵、液压阀组、管路系统、电控箱等主要部件构成。智能泵站自动控制部分硬件由控制箱和控制面板两大部分组成。控制箱内部由 PLC 微电脑控制单元、模拟测量检测单元(包括位移和压力的检测)、电源保护单元、电机控制单元、通信单元、温湿度控制单元等集成而成。控制面板则由工业平板电脑和控制按钮组成,完成人机接口功能。

智能泵站能精准实现程序设定的指令,通过以太网无线通讯接口确保数据通讯的可靠交互,每台既能联机工作,也可独立张拉。在联机模式下,所有控制指令均由主站发出,泵站集成移动 4G 数据模块将张拉结果上传服务器。

### 2.2 智能千斤顶

智能千斤顶主要由 350 t 千斤顶及活塞伸出量测量装置、夹片外露量测量装置及连接电缆等组成,并通过数据线将张拉过程的实时位移数据传输到智能泵站的控制系统,进行实时监控。

350 t 千斤顶主要由三大部分组成,一是由油缸、穿心套、定位螺母、大堵头、后密封板、后压紧环及其密封件组成的“不动体”;二是由活塞及其密封件组成的“运动体”;三是便于吊运的提手部分,其细部构造如图 2 所示。

### 2.3 活塞伸出量测量装置

活塞伸出量装置如图 3 所示,主要用于智能泵站

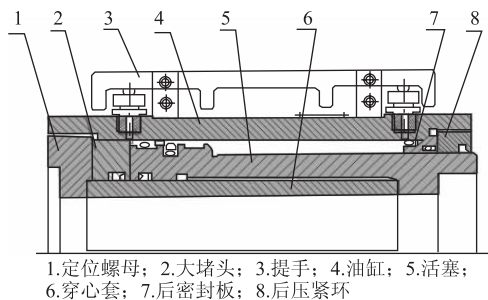


图 2 智能千斤顶细部构造图

张拉过程中,实时采集张拉千斤顶伸缸和缩缸运动时活塞的位移,满足精度 0.1 mm 的实时测量精度,数据精度高。主要由固定座、保护筒、导向筒、直线式位移传感器、压螺母、连接板等构成,采用螺钉联接将固定座和导向座固定在千斤顶油缸上,将连接垫环固定在活塞上。

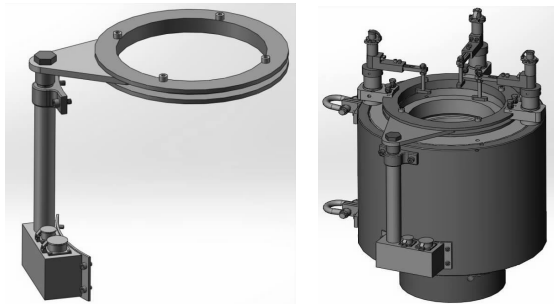


图 3 活塞伸出量测量装置

### 2.4 夹片回缩量测量装置

夹处回缩量装置由固定座、保护导套、端盖、压紧盖组成,如图 4 所示。用于自动测量夹片的回缩量值,每个千斤顶,配置 3 个夹片回缩量测量装置。

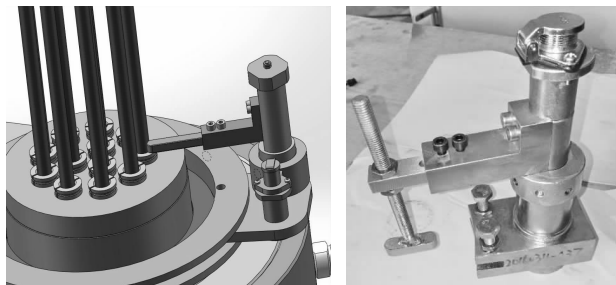


图 4 夹片回缩量测量装置

## 3 BPS 智能张拉软件平台研发

### 3.1 软件功能

BPS 智能张拉软件平台针对现场施工作业人员、管理人员、业主监督人员的需求,开发不同的应用软



件,按照程序运行的硬件环境分为:①运行在智能泵站上的 SPT 软件;②运行在梁场服务器上的 BPS Station 软件;③运行在云服务器上的 BPS Cloud 软件;④运行

在远程客户端的 BPS Client 软件。⑤运行在手持终端上的 BPS Portable 软件。具体功能如表 1 所示,软件界面如图 5 所示。



图 5 BPS 智能张拉平台界面

表 1 BPS 智能张拉软件平台功能表

软件名称	对应硬件	实现主要功能
SPT	智能泵站、智能千斤顶	自动读入或手动设置预应力张拉参数
		张拉千斤顶标定
		预应力张拉过程控制
		按铁路规范修正计算张拉伸长量
Portable	RFID 芯片、RFID 智能手持设备	导出张拉数据结果(缓存到手持设备或通过网络传输)
		射频识别预制梁的 ID
		在网络不覆盖的区域,起到泵站及现场控制中心的数据中转功能
		梁信息查询
Station	现场控制中心服务器	设置预应力张拉参数模板
		批量配置预制梁 ID、梁型及对应张拉参数信息
		获取射频识别梁 ID 后将对应张拉参数配置给智能泵站进行张拉
		监视张拉过程数据、曲线
		查询预应力张拉历史数据结果
		自动生成预应力张拉结果报表
		预制梁施工流程信息管理
		与云服务器进行上传张拉数据及施工信息、下载更新张拉参数模板
Cloud	云服务器	施工现场视频监控(选配)
		提供梁场生产信息的远程查询功能
		张拉数据以规定的格式转发给指定的服务器
Client	远程客户端	视频数据的中转服务
		多个梁场信息的管理
		查询张拉过程数据、曲线
		查询预应力张拉历史数据结果
		查询预制梁生产进度、质量信息
		施工现场视频监控(选配)

3.2 软件特点

(1) 自动化

BPS 系统基于自动张拉设备,具有预制梁预应力施工的自动张拉控制、自动测算张拉控制指标、自动编

制张拉数据报表等功能,实现预应力张拉过程控制的自动化。

(2) 精细化

自动张拉控制设备通过精密的传感系统回馈对油泵进行实时监控,可以使张拉力偏差范围控制在 1% 左右,并实现多顶同时作业以提高张拉同步性。另外,使用高精度位移传感器测算钢束张拉伸长量,从而实现张拉过程中的精准控制和精确测量。

(3) 信息化

BPS 系统借助射频识别技术(RFID)可对梁体从施工到运营各阶段的身份信息、梁型信息、进度信息、质量信息等进行跟踪,实现桥梁全寿命周期的信息化。

(4) 可视化

配备视频监控设备的 BPS 系统能通过系统软件的云台操作、录像回放等功能获取施工现场的视频信息,其软件还可通过曲线图、表格等多种形式查询预应力张拉过程数据结果,实现预制梁施工过程可视化。

(5) 远程化

BPS 系统依托于“云技术”,在有互联网的地方都可查看张拉数据信息、施工进度信息、现场视频信息,实现施工监督管理的远程化。

4 与传统人工张拉试验对比

BPS 智能张拉系统于 2015 年 8 月完成研发工作并在石济客运专线梁场进行应用验证。2015 年 8 月~2016 年 1 月期间,应用 BPS 系统智能泵站+350 t 智能型千斤顶进行了 4 片梁的现场张拉试验,对比采用 BPS 系统和传统人工张拉两种方式张拉梁的钢束伸长

量、钢束张拉力、混凝土应变和静载试验挠度。试验内容和试验梁基本信息分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 试验内容

试验序号	试验名称	子试验名称
试验一	人工预应力张拉与自动预应力张拉对比试验	人工预应力张拉试验
		自动预应力张拉试验
试验二	人工张拉梁与自动张拉梁静载弯曲试验	人工张拉梁静载试验
		自动张拉梁静载试验

表 3 试验梁基本信息

试验梁序号	梁型	设计时速 (km/h)	跨度 /m	试验信息	
				张拉方式	是否进行静载试验
1	有砟轨道预制后张法预应力混凝土简支整孔箱梁(通桥(2009)2229-1 直线无声屏障)	250	31.5	人工张拉	是
2				自动张拉	是
3				自动张拉	否
4				自动张拉	否

试验过程中使用磁通量传感器(每片梁 18 个)对钢束张拉力进行监测,使用 BGK-4200 型振弦式应变计(每片梁 24 个)对梁体应变进行监测。

(1)经试验对比:在钢束伸长量偏差方面,自动张拉的钢束伸长量偏差超过规范限值的比例为 6%,远远小于人工张拉的超限率 48%,说明自动张拉对伸长量的控制更加精准,钢束伸长量偏差对比如图 6 所示。

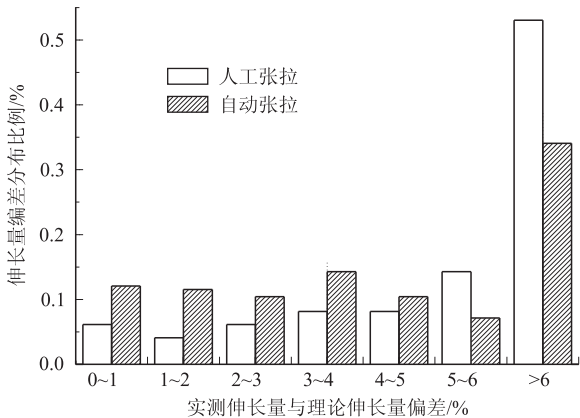


图 6 钢束伸长量偏差对比图

(2)在钢束张拉力方面,自动张拉的钢束张拉力比人工张拉的更加接近理论值,实测智能张拉力偏差在 0.3%~1.0% 范围内,证明自动张拉对钢束张拉力的控制更加精准,钢束张拉力与理论值偏差对比如图 7 所示。

(3)在梁体挠度变形方面,自动张拉静载挠度比人工张拉挠度更小且更加接近理论值,说明自动张拉比人工张拉的质量更有保证,静载试验各阶段梁体挠

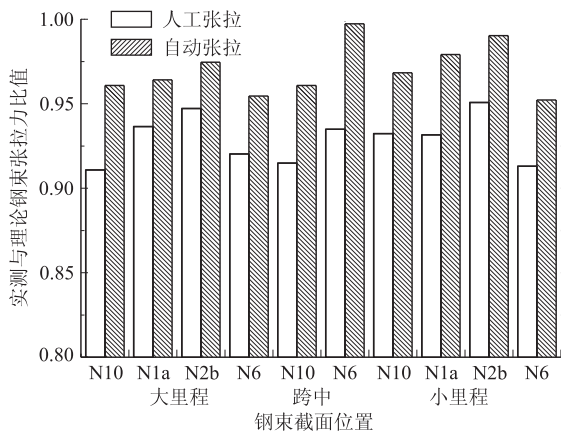


图 7 钢束张拉力与理论值偏差对比图

度与理论值偏差对比如图 8 所示。

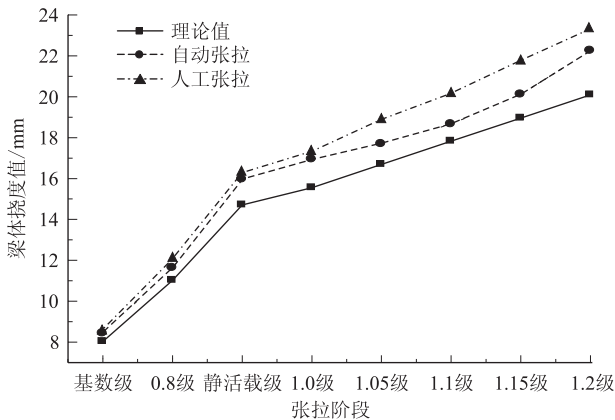


图 8 静载试验各阶段梁体挠度与理论值偏差对比图

(4)实测梁体两端位移不同步率 $\leq 5\%$ 的样本比例占 94.4%,如图 9 所示。

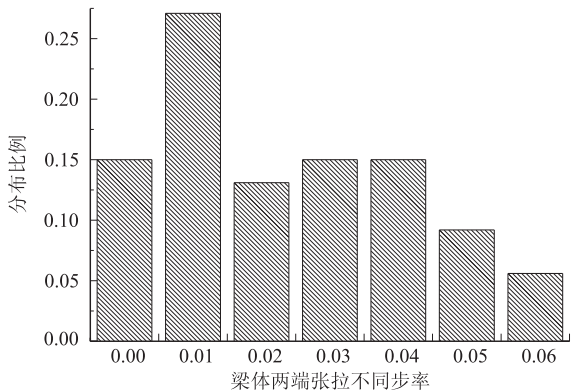


图 9 实测梁体两端位移不同步率偏差对比图

综合张拉和静载试验结果表明:与人工张拉梁对比,采用 BPS 系统张拉的梁在预、初、终张拉及静载试验阶段钢束张拉力和伸长量均与理论值更加接近,自动张拉控制精度更高。

5 应用情况及功效

BPS 智能张拉系统已在石济客运专线、济青高速铁路、阳大铁路、郑阜高速铁路等多个大型铁路梁场得到了全面应用,验证了系统的有效性、可靠性和先进性,切实提高了梁体的张拉质量,优化了张拉工艺流程,降低了返工率,缩短了工期。大幅度降低了工人劳动强度,提高了生产效率,取得了良好的应用效果。

6 结论

本文针对铁路梁体预应力张拉技术的要求及特点,基于大数据、云技术及射频识别技术,研发了一套集智能张拉泵站、智能张拉千斤顶设备、智能化软件平台、智能化手持设备于一体的铁路预应力混凝土梁智能张拉控制及管理系统(BPS),并在石济客运专线梁场进行了试验验证和应用推广,研究结论如下:

(1)BPS 系统实现了张拉操作的自动化、信息化、远程化、实时化,提高了张拉控制精度、施工质量和工作效率;

(2)BPS 系统研发的新型夹片回缩量传感器,解决了夹片回缩量自动测量问题;

(3)BPS 系统完全依照铁路桥梁预应力张拉的规范和流程开发,对铁路梁场适用性强;

(4)BPS 智能张拉系统具有较强的稳定性和适用性,为高速铁路桥梁的预应力张拉提供了一套高精度、实用、有效、可靠的张拉软硬件设备和先进的控制和管理平台,为智慧高铁和高铁信息化技术的发展奠定了坚实的基础。

参考文献:

[1] 吴冲,肖祥淋. 铁路预制梁预应力自动张拉系统技术研究[J]. 铁道建筑, 2014,54(11):11-13.  
WU Chong, XIAO Xianglin. Research on Prestressed Automatic Tensioning System of Railway Prefabricated Beam [J]. Railway Engineering, 2014, 54(11):11-13.  
[2] 肖祥淋. 铁路桥梁预应力施工信息化技术研究[J]. 铁道建筑, 2016,56(4):5-8.  
XIAO Xianglin. Research on Information Technology in Railway

Bridge Prestress Construction [J]. Railway Engineering, 2016, 56(4):5-8.  
[3] 叶阳升,韩自力,蔡德钧,等. 铁路桥梁路基隧道关键工序监控技术研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(5):59-64.  
YE Yangsheng, HAN Zili, CAI Degou, et al. Automatic Monitoring Technology Research on the Key Progress of Construction of Railway Bridge, Subgrade and Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(5):59-64.  
[4] 刘学宏. 自动张拉控制系统在大西铁路客运专线箱梁预制中的应用[J]. 铁道标准设计, 2012,56(10):54-57.  
LIU Xuehong. Application of Automatic Stretching-Control System in Prefabrication of Box Girder on Datong-Xi'an Passenger-dedicated Line [J]. Railway Standard Design, 2012,56(10):54-57.  
[5] 万成钢,姚发海. 预应力张拉对现浇支架受力影响的计算分析[J]. 铁道工程学报, 2012,29(5):30-34.  
WAN Chenggang, YAO Fahai. Calculation and Analysis of Impact of Prestress Tension on Cast-in-place Falsework[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012,29(5):30-34.  
[6] H De Backer, W De Corte, P Van Bogaert. A Case Study on Strain Gauge Measurements on Large Post-tensioned Concrete Beams of a Railway Support Structure[J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2003, 45(12):822-826.  
[7] GUO Quanquan, LI Zhu, DUAN Lian. Automatic Post-Tensioning in Prestressed Concrete Structures [J]. Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering(IABSE), 2004,14(1):37-41.  
[8] 廖强,须民健,李文锋. 预应力智能张拉系统在桥梁施工中的应用[J]. 公路交通技术, 2015,32(2):102-105.  
LIAO Qiang, XU Jianmin, LI Wenfeng. Application of Prestressed Intelligent Tension System in Construction of Bridges[J]. Technology of Highway and Transport, 2015,32(2):102-105.  
[9] 李孝兵,田士强,陈化祥. 预应力张拉监测设备在桥梁施工中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012,8(1):139-141.  
LI Xiaobing, TIAN Shiqiang, CHEN Huaxiang. Application of Prestressed Tension Monitoring Equipment in Bridge Construction [J]. Technology of Highway and Transport, 2012,8(1):139-141.  
[10] 王景华. 预应力钢绞线张拉伸长值量测方法的探讨[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(5):46-48.  
WANG Jinghua. Discussion on the Measurement Method of Tensile Value of Prestressed Steel Strand[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(5):46-48.

(编辑:刘会娟 白雪)