

文章编号: 1674—8247(2021)01—0050—04  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.01.011

## 桥梁测力支座监测系统设计与工程应用

郑晓龙 陈 列 颜永逸 徐昕宇 陈星宇

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**桥梁测力支座及相应的监测系统可用于桥梁的健康监测,在普通球型钢支座基础上开发的一种新型桥梁测力支座,通过在支座内部设置测力结构,采用先进的传感器,外部配置数据传输系统实现实时测力及对桥梁施工和运营状态的远程监控。本文介绍了支座和监测系统的结构形式及工作机理,通过试验测定并在沪昆客专北盘江大桥得到工程应用。结果表明:提出的支座结构形式新颖,受力和传力机理明确,经试验室测试数据重复性好,性能稳定;选用的传感器及配套的数据传输系统性能良好,工艺成熟,输出信号稳定准确;研究成果可以监测桥梁结构的施工和运营状态,也可纳入桥梁健康监测系统,亦可供新制式轨道交通桥梁支座监测系统设计参考。

**关键词:**球型支座;测力;监测系统;北盘江大桥;大跨度拱桥  
**中图分类号:**U443.36 **文献标志码:**A

50

## Design and Engineering Application of Monitoring System of Force-measuring Bearing for Bridges

ZHENG Xiaolong CHEN Lie YAN Yongyi XU Xinyu CHEN Xingyu

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The force-measuring bearing for bridges and its corresponding monitoring system can be used for bridge health monitoring. A new type of force-measuring bearing for bridges developed on the basis of ordinary spherical steel bearing can realize real-time force measurement and remote monitoring of bridge construction and operation status by setting force measuring structure inside the bearing, with advanced sensors and an external data transmission system. This paper introduces the structure and working mechanism of the bearing and monitoring system, which has been tested and applied in the Beipan River Bridge of Shanghai-Kunming Passenger Dedicated Line. The results show that the structure of the bearing is novel, the mechanism of stress and force transmission is clear, the repeatability of data tested in the laboratory is good, and the performance is stable; the selected sensor and supporting data transmission system have good performance, mature technology, and stable and accurate output signal; the research results can either be used to monitor the construction and operation status of bridge structures, or be incorporated into the bridge health monitoring system, and can also be used as a reference for the design of the monitoring system for the bearings of the new rail transit bridge.

**Key words:** spherical bearing; force measuring; monitoring system; Beipanjiang Bridge; Long-span arch bridge

收稿日期:2020-07-07

作者简介:郑晓龙(1976-),男,教授级高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KYY2019029(19-21))

引文格式:郑晓龙,陈列,颜永逸,等.桥梁测力支座监测系统设计与工程应用[J].高速铁路技术,2021,12(1):50-53.

ZHENG Xiaolong, CHEN Lie, YAN Yongyi, et al. Design and Engineering Application of Monitoring System of Force-measuring Bearing for Bridges [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1):50-53.

近年来,国内外桥梁时有垮塌或局部破坏的恶性事故发生,有些发生在桥梁施工期间,有些出现在桥梁运营若干年后,给生命财产造成巨大损失。造成桥梁破坏的因素多种多样,主要是由于外界因素使桥梁承受的荷载变化并积累到一定程度,超过结构承受能力造成的。桥梁结构在使用期间,要求一直保持良好的工作状态,如高速铁路桥梁,虽然桥梁结构超过设计允许的微小变形不致造成结构破坏,但却会降低时速 350 km 列车运行的安全性<sup>[1]</sup>。目前,中铁二院等单位研发的基于电阻应变片感应的测力支座监测系统,由于应变片易受到温漂的影响,测量精度也随之受到影响。

本文研究的桥梁支座监测系统采用溅射薄膜传感器和光纤传感器,将高性能传感器技术应用于桥梁球型钢支座,大幅降低温漂的影响;采用成熟的数据采集技术并借助现代通信技术进行远距离数据传输;针对支座系统的测力结果研发专用的监测平台,使支座监测系统具有自动数据采集、传输、分析、预警和专家评估等功能。该系统也可作为桥梁健康监测的重要组成部分<sup>[2]</sup>。

1 支座测力系统结构设计

测力球型钢支座主要部件由上下锚碇钢棒、上支座板、水平测力环、球冠衬板、活塞、竖向测力弹性体、下支座板等组成,如图 1 所示。其中水平测力环放置在上支座板与活塞间,为圆环状结构,安装有 4 个测量水平力用传感器,如图 2 所示。上支座板将水平力传

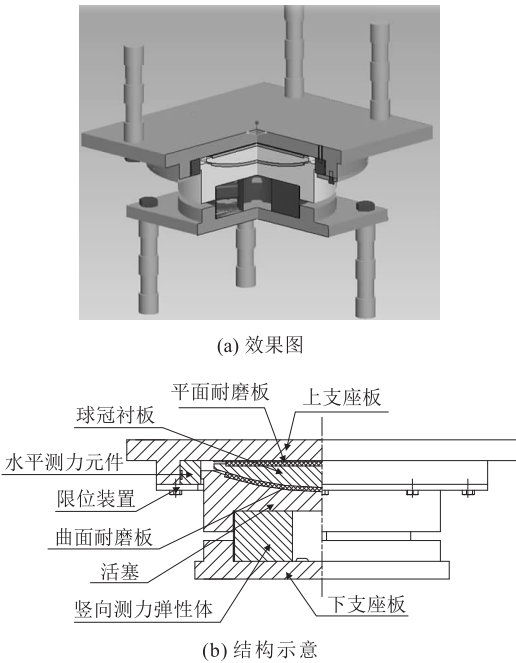


图 1 多向测力支座结构示意图

递给水平测力环,由测力环上的传感器反映水平力的变化。竖向测力弹性体放置在活塞与下支座板间,为带 4 个凸台的圆饼状结构,安装有 4 个测量竖向力的传感器,如图 3 所示。活塞将竖向力传递至竖向测力弹性体,弹性体上的传感器反映竖向力的变化。水平和竖向测力元件相互独立,互不干扰。

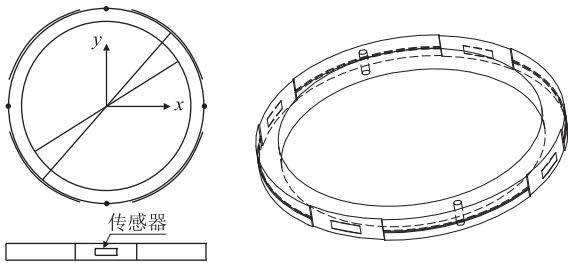


图 2 水平测力环及传感器位置示意图

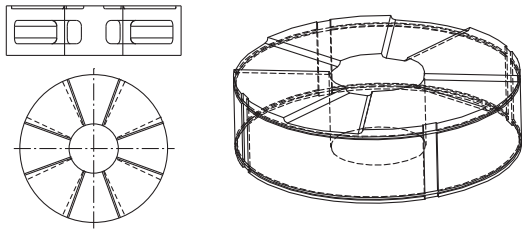


图 3 竖向测力弹性体及传感器位置示意图

2 支座有限元分析

以竖向承载力 3 000 kN 的球型支座为例,水平设计承载力取竖向力的 15% 即 450 kN。采用有限元分析软件 ANSYS 建立模型,支座材料采用 Q345 钢,测力元件采用具有良好低温冲击韧性的 40Cr,其材料特性如表 1 所示。支座球冠衬板和活塞采用 SOLID92 四面体单元,其余部分采用 SOLID185 六面体单元,测力元件与支座本体按非线性接触考虑,接触单元采用 CONTA174 和 TARGE170。有限元模型如图 4 所示<sup>[3]</sup>。

表 1 40Cr 材料特性表

抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服点 $\sigma_s$ /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
$\geq 980$	$\geq 785$	210	0.3

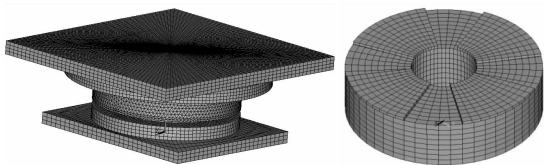


图 4 支座有限元模型图

针对支座受竖向力作用情况,研究竖向测力弹性体的凸台高度和凸台受力面角度变化时凸台受力情况。凸台高度范围0~10 mm,受力面角度范围30°~70°,计算结果显示,凸台高度变化引起的主应力最大值变化范围为90.0~90.7 MPa,凸台受力面角度变化引起的主应力最大值变化范围为76.9~143.3 MPa。考虑到40Cr材料的应力敏感区间、结构稳定性和加工难易程度,选取凸台高度5 mm、受力面角度55°。

针对支座受水平力作用情况,研究水平测力环厚度和环上凹槽深度及宽度,测力环厚度范围10~50 mm;凹槽深度范围0~10 mm;凹槽弧度范围为0°~80°。计算结果显示,测力环厚度直接决定了受力面积大小,主应力最大值变化范围为37.8~59.3 MPa;凹槽深度的变化引起的主应力最大值变化范围为16.4~60.4 MPa,凹槽宽度的变化引起的主应力最大值变化范围为16.4~57.0 MPa。为保证测力环的安全性、应力敏感区间,选取测力环厚度35 mm,凹槽深度2 mm,凹槽弧度30°。

3 支座测力试验

为了验证支座的竖向和水平测力效果和精度,采用光纤传感器作为感应原件,在株洲电机机车研究所新材料监测中心进行了试验<sup>[4-5]</sup>。

支座的竖向力测试,试验的要求和过程参考国家标准 GB/T 17955-2009《桥梁球型支座》,试验荷载取3 000 kN。实验室数据输入如图5所示。测试的结果如表2所示,从表2可以看出测量误差小于4% FS。

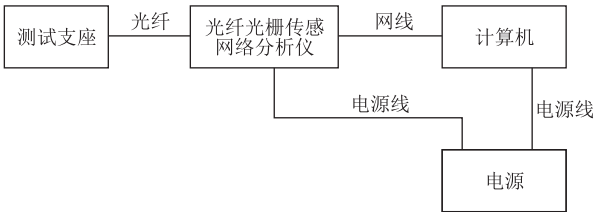


图5 实验室数据传输示意图

表2 竖向力测试结果表

加载力/kN	测量力/kN	加载力/kN	测量力/kN
0	0	1 800	1 740
300	280	2 100	2 340
600	630	2 400	2 340
900	870	2 700	2 740
1 200	1 170	3 000	3 090
1 500	1 530	-	-

支座的水平力测试,实验水平荷载取1 500 kN,测试的结果如表3所示。从表3可以看出测量误差小于6% FS。

表3 水平力测试结果表

加载力/kN	测量力/kN	加载力/kN	测量力/kN
0	0	270	282
45	43	315	330
90	88	360	369
135	140	405	420
180	190	450	473
225	228	-	-

竖向和水平力测试结果与标准荷载的误差通过程序软件进行修正补偿,补偿后误差控制在1% FS以内。

4 信息系统数据传输

通过安装于支座测力元件(弹性体、测力环)上的光纤光栅传感器实现对支座应力的自动测量,通过光纤光栅传感器感测弹性体或测力环上4个点的应力承载情况,转换为光信号输出,最后通过有线传输网络传输至后台监测中心。当桥梁处于无有线网络支持的地区,则采用无线传输方式<sup>[6-7]</sup>。系统结构如图6所示。

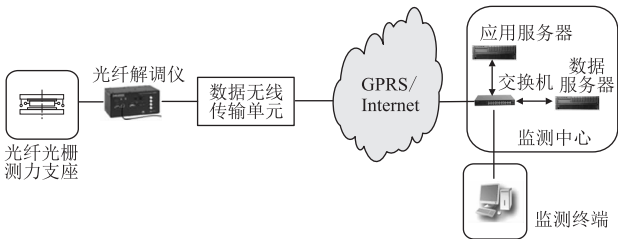


图6 监测系统数据传输结构图

整个监测系统包含数据采集与传输子系统、光伏供电子系统、监测中心及终端(包括数据库与专家评估系统)。根据功能不同又可分为监测单元、监测中心和监测终端3个子系统。监测单元子系统由传感器、光纤解调仪、无线传输设备(含数据采集板和GPRS模块)和光伏供电设备组成,负责收集支座所测得的数据,监测并控制设备运行状态。监测中心由应用服务器、数据库服务器和交换机组成,负责汇集和处理采集到的信息,把数据转发给监测终端。监测终端负责数据的存储、显示和处理。桥梁支座的监测与数据传输系统,如图7所示。

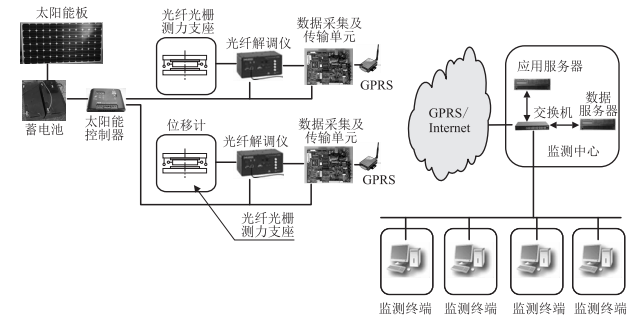


图7 桥梁支座监测系统全图

## 5 工程应用

测力支座监测系统应用于沪昆客运专线北盘江大桥<sup>[8]</sup>。北盘江大桥是目前世界上跨度最大的铁路劲性骨架钢筋混凝土拱桥,桥长445 m,矢高100 m,矢跨比1/4.45,拱上梁沿中心对称各1联4 m×42 m混凝土连续梁,如图8所示。

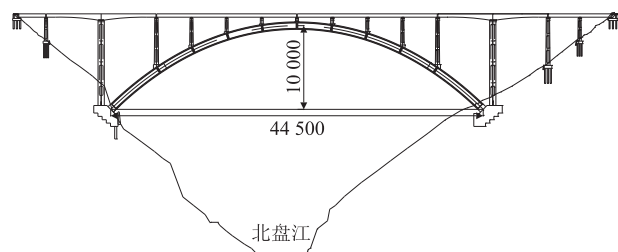


图8 北盘江大桥总体布置图(cm)

北盘江大桥拱上混凝土连续梁为多次超静定体系,受力状态复杂,安装测力支座实测支座反力,通过后台程序计算出连续梁各截面内力、分析收缩徐变、温度变化等产生的附加反力和附加弯矩,监测连续梁桥是否处于正常的工作状态。当列车通过时,还能对列车引起的主梁竖向力、水平摇摆力以及超载、偏载效应等做到长期准确监测。

针对北盘江大桥拱上梁受力特点,在拱上连续梁上安装了2个测力支座,采用太阳能电池板和蓄电池箱,实现了在客户端监测与评估软件上实时显示设定时间内支座的受力数值和曲线,并进行监测预警。

沪昆客运专线已于2016年底开通运营,测力支座监测系统已正常使用3年多。作为北盘江大桥的配套设施,测力支座监测系统数据传输稳定,表明大桥梁部受力状态良好,为大桥的安全运营提供了数据支撑。

## 6 结论

通过对桥梁测力支座监测系统进行结构及数据传输系统的设计、有限元分析、试验测试和工程应用,可得出以下结论:

(1) 支座本体未改变球型钢支座的受力和传力特性,试验室测试数据表明其重复性好、性能稳定。

(2) 选用的传感器及配套的数据传输系统性能良好,工艺成熟,输出信号稳定准确,经工程应用得到了验证。

(3) 由于受到传感器寿命的限制,支座监测系统的有效使用时间距离桥梁的服役年限还有较大差距,还有待于耐久性和稳定性更好的传感器及配套设备成

功研发后,对该系统进行更进一步的研究。

(4) 支座监测系统的研发成果可监测桥梁结构的施工和运营状态,纳入桥梁健康监测系统,推动桥梁工程的智能化发展,亦可为新制式轨道交通桥梁支座监测系统提供一定参考。

## 参考文献:

- [1] 施洲,蒲黔辉,岳青. 基于健康监测的高铁大型桥梁运营性能评定[J]. 铁道工程学报, 2017,34(1): 67-74.  
SHI Zhou, PU Qianhui, YUE Qing. Service Performance Evaluation of High Speed Railway Long Span Bridge Based on Healthy Monitoring [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017,34(1): 67-74.
- [2] 魏新良,王震洪. 桥梁健康监测技术发展现状及趋势分析[J]. 铁道工程学报, 2008(9): 44-47.  
WEI Xinliang, WANG Zhenhong. The Current Development Situation and Trend of Monitoring Technology for Bridge Health [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(9): 44-47.
- [3] 郑晓龙,薛鹏,樊启武,等. 多向测力球型钢支座力学性能分析及参数选取[J]. 铁道建筑, 2015(8): 16-19.  
Zheng Xiaolong, Xue Peng, Fan Qiwu, et al. Mechanical Performance Analysis and Parameter Selection of Multi-Directional Force-Measuring Ball-Shaped Steel Bearing [J]. Railway Engineering, 2015(8): 16-19.
- [4] 李世珩,谭志军,宁响亮,等. 多向测力支座的设计及试验验证[J]. 机械设计与研究, 2016,32(3): 162-164.  
LI Shiheng, TAN Zhijun, NING Xiangliang, et al. Design and Experimental Validation of Multi Direction Measurable Force Bearings [J]. Machine Design & Research, 2016,32(3): 162-164.
- [5] 庄学真,周福霖,魏陆顺. 桥梁球型支座位力学性能试验研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2005(2): 199-201.  
ZHUANG Xuezhen, ZHOU Fulin, WEI Lushun. Experimental Study on Mechanical Property of Sphericity Bearing Model for Bridge [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Sciences Edition), 2005(2): 199-201.
- [6] 王旭芳. 高速铁路桥梁支座设计要求及应用技术[J]. 高速铁路技术, 2011,2(5): 51-54.  
WANG Xufang. Application Technology and Design Requirement of High Speed Railway Bridge Bearing [J]. High Speed Railway Technology, 2011,2(5): 51-54.
- [7] 史康,何旭辉,邹云峰,等. 大跨度高速铁路桥梁健康监测系统研发[J]. 铁道科学与工程学报, 2015,12(4): 737-742.  
SHI Kang, HE Xuhui, ZOU Yunfeng, et al. Research and Development of Health Monitoring System for Long-Span Bridges of High-Speed Railways [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015,12(4): 737-742.
- [8] 谢海清,徐勇,陈列,等. 沪昆高铁北盘江特大桥主拱结构形式及参数比选[J]. 桥梁建设, 2019,49(2): 97-102.  
XIE Haiqing, XU Yong, CHEN Lie, et al. Comparison and Selection of Structural Types and Parameters of Main Arch of Beipanjia Bridge on Shanghai-Kunming High-Speed Railway [J]. Bridge Construction, 2019,49(2): 97-102.