桥梁健康监测技术在钢管混凝土拱桥中的研究与应用

赵文溥
山西省交通建设工程质量检测中心（有限公司） 山西 太原 030032

摘 要：随着桥梁工程技术的不断发展，钢管混凝土拱桥因其独特的结构优势，在大型跨河、跨谷工程中得到了广泛应用。然而，此类桥梁在长期运营过程中，受环境、荷载等多种因素影响，其结构性能可能会逐渐退化。为确保桥梁的安全运营，桥梁健康监测技术应运而生。本文以北深沟特大桥为例，深入探讨了桥梁健康监测技术在钢管混凝土拱桥中的研究与应用，为同类桥梁的健康监测提供了参考。

关键词：桥梁健康监测；钢管混凝土拱桥；北深沟特大桥；数据采集；结构性能评估

引言

钢管混凝土拱桥作为一种结合了钢管与混凝土两种材料优点的桥梁形式，具有承载力高、施工方便、经济性好等优点。然而，随着服役年限的增长，桥梁结构可能因环境侵蚀、荷载作用等因素导致性能退化，甚至引发安全事故。因此，对钢管混凝土拱桥进行长期健康监测，及时发现并处理潜在问题，对于保障桥梁安全运营具有重要意义。

1 北深沟特大桥概况

北深沟特大桥位于陵侯高速K137+317处，主桥采用净跨260m的中承式钢管混凝土拱桥，拱轴线为悬链线，矢跨比为1/4.5。拱肋断面形式为桁架式，由4根Φ1000mm的钢管组成，壁厚18mm，钢材采用Q345C。全桥设置9道桁架式风撑，并配备完善的桥面系统。该桥设计基准期为100年，设计安全等级为一级，是区域内重要的交通要道。北深沟特大桥俯视图见图1。

图1 北深沟特大桥俯视图

2 桥梁健康监测系统组成

北深沟特大桥健康监测系统包括传感器系统（SS）、数据采集与传输系统（DATS）、数据处理和分析系统（DPAS）、结构健康监测系统（SHMS）及数据库系统（DBS）。系统设计总体技术路线为：传感器数据采集与状态信息显示用C++开发，确保一致性；数据传输采用TCP协议；数据处理用数据库过程及计算程序，提高精确性；信息门户基于Java开发。系统分类选择开发语言和平台，实现最优化开发体系[1]。

传感器系统采用多种传感器获取桥梁风场、温湿度、结构应变及加速度等参数，布设在桥梁关键部位如拱肋、吊杆、桥面等，以确保数据准确，具体硬件及布置见图2。

3 桥梁健康监测系统数据分析与应用

3.1 应力应变监测数据分析

通过对北深沟特大桥所处位置的风场和环境温湿度进行监测，发现风速风向随季节变化明显，而温湿度则呈日周期性变化[2]。以传感器2023年1月1日至3月31日的数据进行分析，拱肋温湿度计时程图如图3所示，图4为频率分布直方图。

由图可知：（1）下游侧拱肋锚箱处温湿度计直接与外界接触，温度呈日周期性变化，最高温出现在3月10日下午，为23.36℃；最低温出现在1月24日清晨，为-13.1℃；昼夜温差最高约为19℃；随时间变化，温度整体变化趋势平缓。（2）下游侧拱肋锚箱处温湿度计直接与外界接触，湿度呈日周期性变化，湿度受外界影响较大，湿度变化范围为5~99%。（3）下游侧拱肋锚箱处直接与外界接触，空气温度和湿度日变化值比较大。总体来看，温度和湿度呈反相关规律。

利用振弦式应变计对拱肋多个截面进行应变监测，发现应变变化趋势与温度变化趋势呈反比[3]。分析表明，应变变化趋势与温度变化趋势呈反比，其中A01#断面上、下游侧应变变化最明显处为1#测点及13#测点；A05#断面上、下游侧应变变化最明显处为21#测点及31#测点。以2023年3月23日为例，A01#断面上游侧1#测点温度由5℃变化至14℃，应变变化范围为81.94~-92.73με；

A01#断面下游侧13#测点温度由5℃变化至13℃时，应变变化范围为248.88~169.02με；A05#断面上游侧21#测点温度由6℃变化至14℃，应变变化范围为38.61~-52.16με；A05#断面下游侧31#测点温度由5℃变化至13℃时，应变变化范围为-31.43~-105.59με。

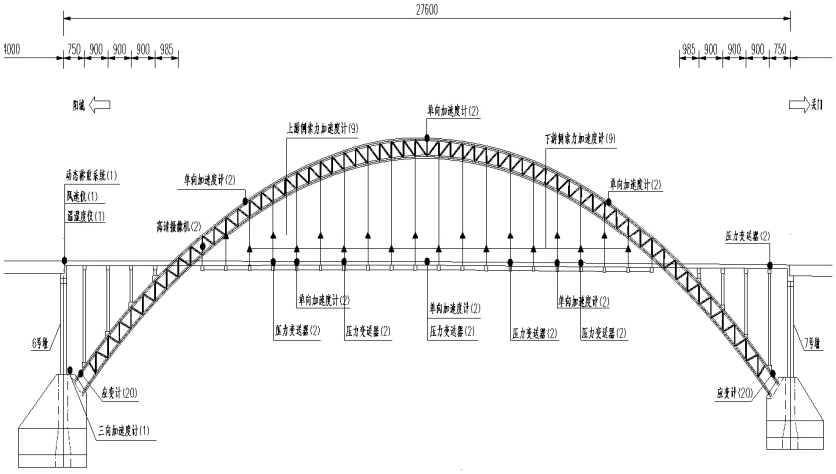

图2 健康监测系统传感器布置图

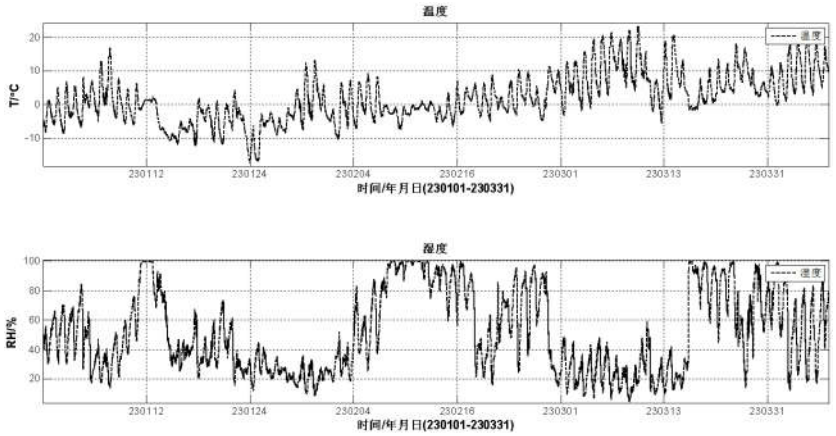

图3 拱肋温湿度计时程图

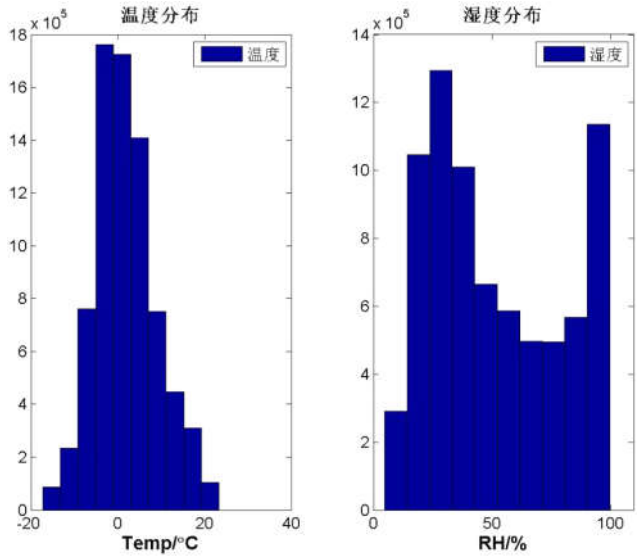

图4 拱肋温湿度分布直方图

因此，针对北深沟特大桥建议：（1）由于桥梁结构的材料（如钢筋混凝土、钢材等）对温度变化敏感，而此地温差（其是昼夜温差）较大，可能导致材料膨胀或收缩，增加结构应力，进而可能引起裂缝或变形。（2）随着湿度在5%到99%的大范围波动，可能对桥梁钢结构造成腐蚀，尤其是在湿度较高的时段或季节。建议加强对桥梁钢结构的防腐处理，定期检查涂层的完整性，必要时进行补涂。

3.2 位移数据监测

桥梁在风荷载、交通及温度等作用下均会发生形变，桥梁挠度受温度、交通、风荷载及支座沉降等多方面的影响。项目中采用液压连通管进行主梁挠度(竖向位移)测试，主梁位移测试精度约为0.5mm，测试数据稳定时间约为2 ~ 3秒。采用液压连通管对主梁挠度(竖向位移)进行测试，传感器安装在桥面上。

表1 测点挠度最大、最小值统计表（单位：mm）

序号	编号	位置说明	测试值	
			最大值	最小值
1	PRE-G02-001	4#吊杆附近截面（上游侧）	27.89	-78.59
2	PRE-G04-001	7#吊杆附近截面（上游侧）	19.29	-98.92
3	PRE-G05-001	主梁跨中截面（上游侧）	5.273	-111.00
4	PRE-G06-001	7’#吊杆附近截面（上游侧）	13.50	-93.70
5	PRE-G08-001	4’#吊杆附近截面（上游侧）	15.01	-77.07

如表1所示，桥梁位移分析表明，其中PRE-G02-001（上游侧主跨4#吊杆附近）测点上挠27.89mm、PRE-G04-001（上游侧主跨7#吊杆附近）测点上挠19.29mm、PRE-G05-001（上游侧主梁跨中截面）测点上挠5.273mm、PRE-G06-001（上游侧主跨7’#吊杆附近）测点上挠13.50mm、PRE-G08-001（上游侧主跨4’#吊杆附近）测点上挠15.01mm。PRE-G02-002（下游侧主跨4#吊杆附近）测点上挠31.32mm、PRE-G04-002（下游侧主跨7#吊杆附近）测点上挠10.77mm、PRE-G06-002（下游侧主跨7’#吊杆附近）测点上挠16.43mm、PRE-G08-002（下游侧主跨4’#吊杆附近）测点上挠38.53mm。

3.3 结构损伤识别与预警

结构的模态特征辨别是采用基于动力特性的损伤识别基础。系统根据实测加速度数据进行频谱分析，采用峰值法提取模态频率。振动测点包括两部分，拱肋振动测点及桥面振动测点。

对全桥加速度测点分析，在外荷载作用下，ACC-A02-002（下游侧拱肋1/4截面）竖向加速度振幅达到约-1.3gal~1.4gal，ACC-A03-002（下游侧拱肋1/2截面）竖向加速度振幅达到约-1.4gal~1.9gal，ACC-A04-002（下游侧拱肋3/4截面）竖向加速度振幅达到约-1.8gal~1.9gal；上游拱肋测点振动与下游测点振动相类似。

根据系统结构识别结果，针对北深沟特大桥建议：

（1）监测数据表明，桥梁在外荷载作用下振动幅度较大，尤其是竖向加速度的波动范围较广。建议定期进行外荷载作用下的桥梁振动响应评估，检查桥梁是否存在过载或超负荷的风险，并根据评估结果对桥梁进行相应加固或调整设计。可通过对外荷载的监控，可以优化桥梁的荷载分布，减少某些部位的过度受力，避免结构局部损伤。（2）ACC-A04-002（下游侧拱肋3/4截面）和ACC-G07-001（上游侧主桥伸缩缝间3/4截面）的振动幅度较大，应重点关注这些高振幅区域，定期检查是否有材料疲劳、裂缝或变形，尤其是在振动幅度剧烈的情况下。对于振动较大的区域，可以考虑进行局部加固，增加支撑或优化结构设计，减少振动对桥梁的长期影响。

4 结论与展望

北深沟特大桥健康监测系统的成功应用，证明了桥梁健康监测技术在钢管混凝土拱桥中的有效性和可行性。通过长期、连续的监测，可以及时发现并处理潜在问题，确保桥梁的安全运营。未来，随传感器技术、数据处理技术及人工智能技术的不断发展，桥梁健康监测系统将更加智能化、自动化，为桥梁的维护管理提供更加全面、精准的支持。

参考文献

[1]王宪玉,李文奇,朱前坤,杜永峰.基于灰度分析的桥梁健康监测系统传感器异常检测[J].湖南大学学报（自然科学版）,2024,51(7):111-118.

[2]李煦阳,张玮,赵长军,孙利民.混合监测方法在桥梁静载试验中的应用[J].广西大学学报（自然科学版）,2024,49(1):60-68.

[3]殷鹏程,龙清春,单德山,曹阳梅.桥梁健康监测数据的质量评估方法研究[J].公路工程,2024,49(2):1-645.