

文章编号: 0451-0712(2013)05-0065-06

中图分类号: U446.2

文献标识码: B

苏通大桥结构健康监测实践与思考

许映梅

(江苏苏通大桥有限责任公司 常熟市 215536)

摘 要: 阐述了苏通大桥结构健康监测系统的构成、工程应用与研究概况, 结合笔者近 4 年苏通大桥结构健康监测系统的应用与管理实践经验, 并与香港昂船洲大桥结构健康监测系统进行对比分析, 探讨大型桥梁健康监测系统中存在的问题, 提出对策措施。

关键词: 苏通大桥; 结构健康监测; 基础监测; 施工监测; 项目管理

连接长江口南通河段苏州、南通两市的苏通大桥主航道桥是一座超大跨径斜拉桥, 于 2008 年建成通车。对于超大跨径斜拉桥, 在工程设计阶段完全掌握和预测结构在各种环境和运营条件下的力学特性、结构状态和结构响应是不可能的。其理想的几何线形与合理的内力状态不仅与设计有关, 也与施工密切相关。苏通大桥设计时进行了详细地结构静动力计算分析, 并通过模型试验验证其抗风、抗震安全性。但是结构理论分析是基于图纸理想化的有限元计算分析, 需要以很多假定条件为前提, 而模型试验可能与实际桥位真实环境不符, 且存在无法回避的尺寸效应和相似性问题。因此, 建立苏通大桥结构健康监测系统, 对获取桥区环境数据, 分析和把握苏通大桥各施工工况和成桥阶段实际结构在各种不利环境和运营条件下的工作状态和结构响应, 验证大桥设计理论、模型和假定, 服务指导运营养护, 甚至对改进超大斜拉桥设计方法和规范标准都具有重要的意义。

1 苏通大桥结构健康监测系统工程应用与研究

1.1 工程概况

苏通大桥全长 8.146 km, 宽 34 m, 双向六车道。由引桥、主桥和辅桥组成。引桥采用 30 m、50 m、75 m 跨径的预应力混凝土连续箱梁桥; 辅桥为 $(140+268+140)=548$ m 的 3 跨预应力混凝土连续刚构桥; 主桥为 $(100+100+300+1\ 088+300+100+100)$ m = 2 088 m 的 7 跨双塔双索面钢箱梁斜

拉桥。主墩基础采用由 131 根长约 120 m、直径 2.5 m~2.8 m 的变直径钻孔灌注桩和长 114 m、宽 48 m 的哑铃形变厚度承台组成的群桩基础, 主墩基础区域实施了永久冲刷防护工程。主塔为高 300.4 m 的倒 Y 形塔, 全桥共有斜拉索 272 根, 最长的为 577 m。

1.2 结构健康监测系统

苏通大桥初步设计阶段, 提出始于基础施工的整个生命过程的结构健康监测总体规划方案, 将结构健康监测工程分为基础施工监控及动态反馈研究、上部结构施工控制、大桥测量信息管理系统开发、成桥结构健康监测研究等 4 个分项目实施。其后, 指挥部委托国内外多家有经验的研究咨询机构针对苏通大桥结构特点和大桥安全维护要求, 遵循功能要求和效果—费用分析两大准则, 对成桥结构长期健康监测内容、方法及实施策略、传感器优化布设、主要监测硬件设备性能与选配、监测系统数据通信方式选择、评估方法、有待解决的监测问题等进行分析研究, 完成了成桥结构健康监测系统概念设计、技术设计和施工图联合设计, 确定将苏通大桥结构健康监测与安全评价系统分为监测系统与评估系统两部分进行实施。由于监测系统目前国内外技术较为成熟, 而评估系统尚处于研究探索阶段, 因此, 苏通大桥建设期将监测系统与评估系统分开实施, 监测系统按工程项目进行管理和验收, 评估系统按科研项目进行管理和验收。系统于 2003 年开始设计, 2008 年 3 月交工验收, 至今运行 4 年多, 目前状态基本正常。

收稿日期: 2013-04-11

1.2.1 成桥结构健康监测系统

成桥结构健康监测系统以苏通大桥主桥和辅桥为主要监测对象,由传感器系统、数据采集与传输系统、数据管理与控制系统以及“苏通大桥索塔地基安全监控系统”中的部分测点组成。监测内容分为荷载监测和结构响应监测,主要有风荷载、构件温度、路面温度、空气温度与相对湿度、钢筋混凝土构件腐

蚀、整体位移、支座位移、地震与船舶撞击、加速度、应变、应力、索力、墩台沉降等监测。苏通大桥结构健康监测系统布设于主桥和辅桥上的传感器设备数量共 566 个,具体如图 1 和图 2 所示。另外纳入苏通大桥结构健康监测系统的索塔地基基础(包括群桩基础内部河床冲刷)监测传感器共 581 个,即时测点传感器总量为 1 147 个。

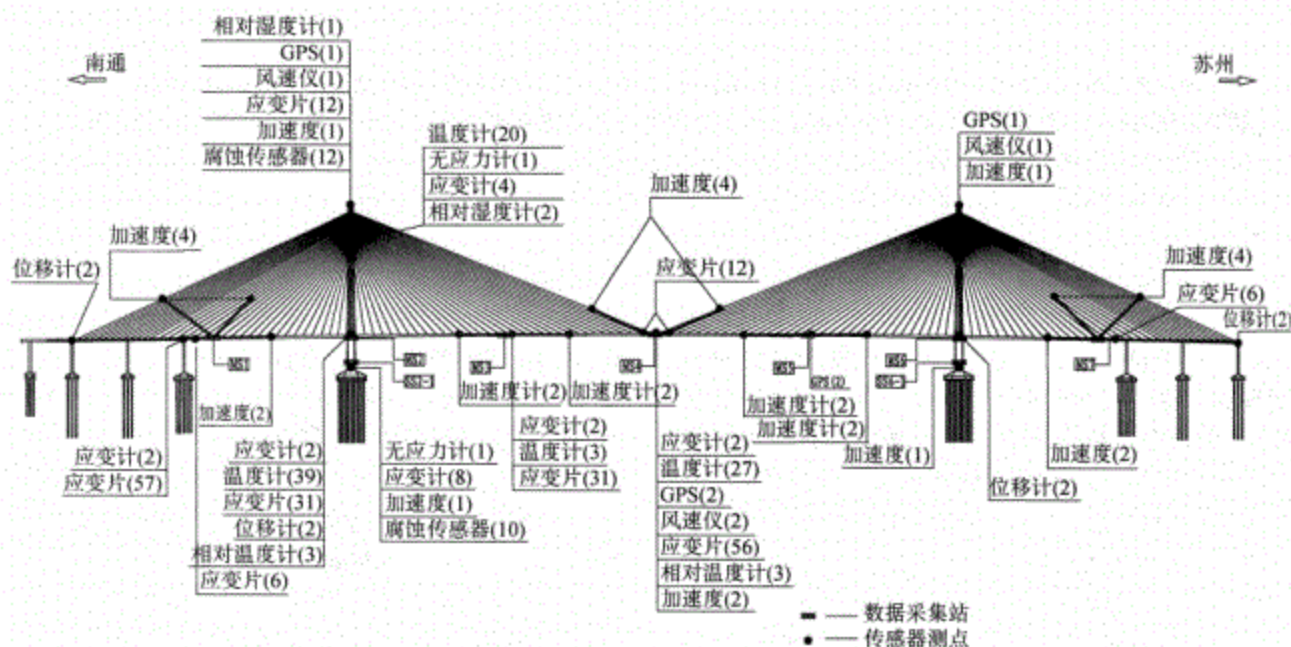


图 1 主桥斜拉桥传感器与数据采集站连接示意

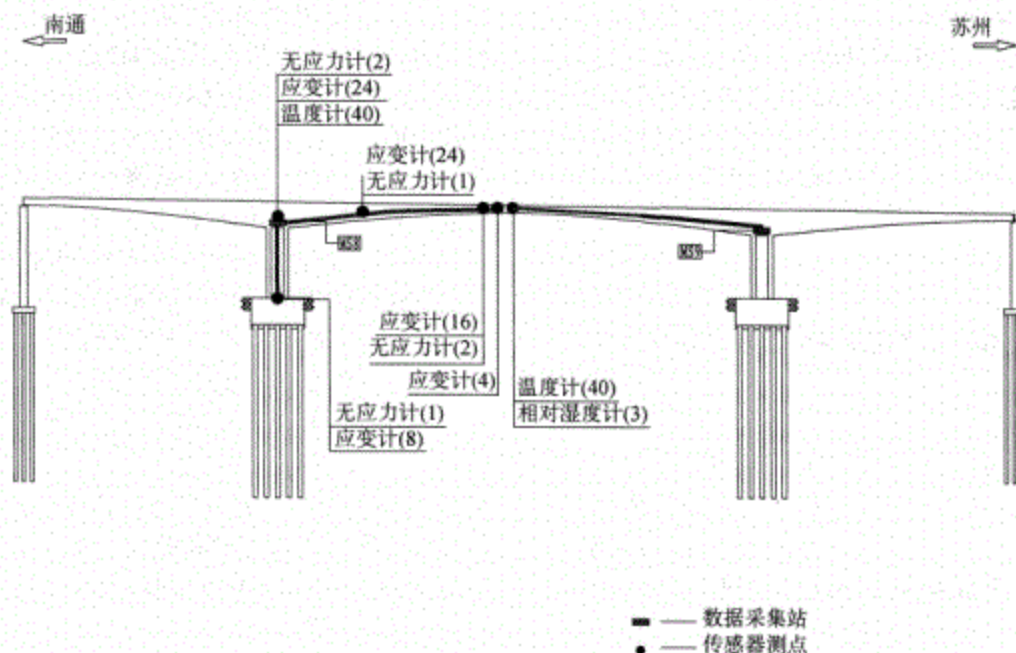


图 2 辅桥连续刚构传感器与数据采集站连接示意

苏通大桥结构健康监测系统选用了较为安全可靠的双环型光纤网络为主干网,局部采用星形网络。数据管理与控制系统由2台服务器、1台数据归档设备及4台工作站组成。4台工作站分别是数据采

集与控制工作站、结构健康评估工作站、人机界面工作站、GPS工作站。软件由数据采集软件、数据传输软件、数据管理与分析软件及便携式系统采集软件组成,网络拓扑图如图3所示。

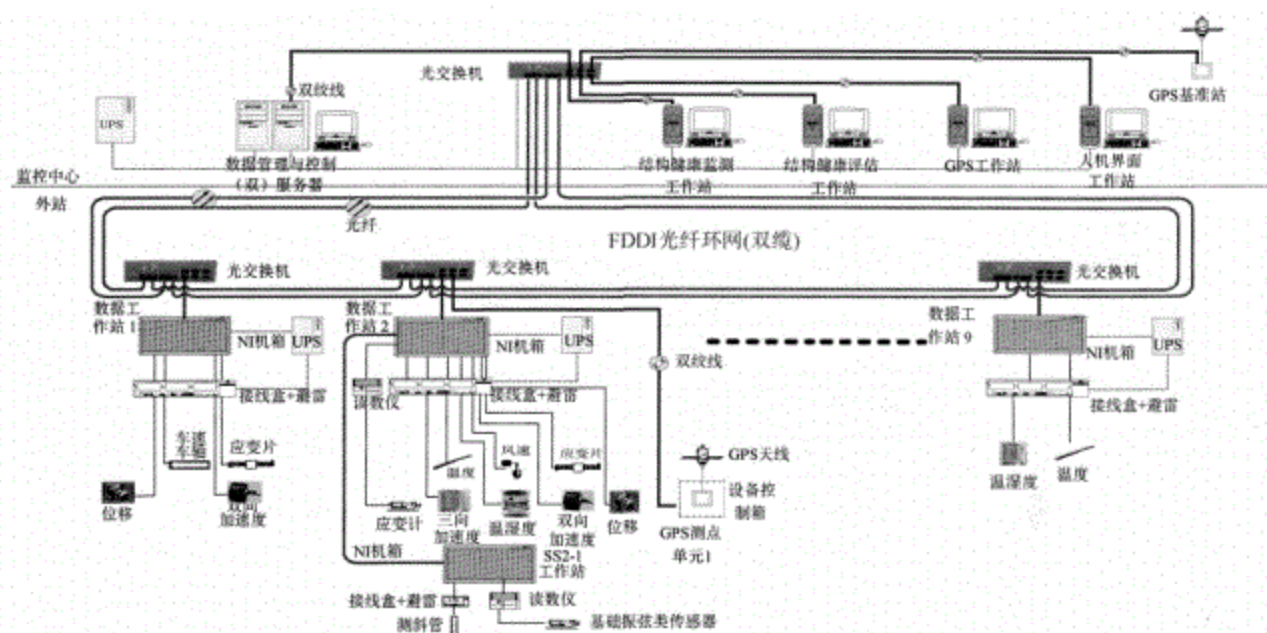


图3 苏通大桥结构健康监测及评估系统网络拓扑示意

1.2.2 索塔地基基础稳定与安全性监测

为了实现对斜拉桥索塔地基基础的安全监控,苏通大桥建设期建立了由1531套先进传感器组成的实时监测系统,主要监测内容包括群桩基础内部河床冲刷、基桩桩身轴力和桩顶轴力、基桩倾斜变形和水平位移、承台应力、承台挠曲变形和差异沉降等。筛选其中的581个传感器纳入成桥结构健康监测系统。大桥施工期间,开展了从河床冲刷防护、群桩基础浇筑到桥面铺装的施工全过程跟踪观测,分析了整个施工过程中桩基础的传力机理和受力状况。监测结果表明,在承台和索塔浇筑、钢箱梁吊装、桥面铺装、动静载试验以及通车运营过程中,索塔群桩基础的所有监测点均无涉及桩基础安全性的异常信号。对比前期的有限元计算和离心模型试验结果,桩基础的实测沉降和差异沉降值偏小。河床防护层不仅保护了河床免遭冲刷,而且对提高桩基础的整体性和承载能力以及控制桩基础的沉降和不均匀沉降均具有重要意义。潮位、温度和日照辐射等复杂环境对群桩基础的受力有重要影响,但其不利影响在施工期间已经完成,对通车运营后的群桩基础承载性能和受力安全性未见不利影响。结合桩

顶轴力和承台应力在平面上的分布特征以及桩身轴力随深度的分布规律,可以认为索塔基础群桩效应不明显,具有较强的整体性和较高的安全储备。

1.2.3 斜拉桥上部结构施工监测

斜拉桥上部结构施工控制采用全过程自适应几何控制法。上部结构施工监测选择满足施工阶段参数识别测试项目,包括荷载源及结构响应,如风、温度、索塔的倾斜、主梁位移、塔梁动力特性、塔梁重点部位应变、斜拉索索力等项目进行施工期自动跟踪监测和目标对比分析。对索塔线形、主梁线形及梁长等结构几何线形采用GPS和全站仪两种动态监测系统测量和对比分析,并同步监测结构环境温度、风等,进行温度和风修正。主梁几何监测除对主梁高程、主梁轴线、基础沉降、钢锚箱的定位等进行监测外,还对主梁的水平变位进行监测。塔梁在不同施工阶段的动力特性监测的内容主要包括索塔、主梁的频率、阻尼比、振幅。施工监测具体项目及对应传感器如表1所示,施工控制自动监测截止于成桥后。监测结果表明,成桥状态塔梁线形平顺,塔梁控制点标高误差、桥轴线误差、各斜拉索索力误差等均满足设计要求,具有良好的成桥线形状态。

表 1 施工控制监测项目及对应的传感器

监测项目	传感器/仪器	单位	数量	测量方式		说 明
				人 工	自 动	
风速风向	超声波风速风向仪	台	6		☆	
钢构件温度	数字温度计	个	128		☆	
混凝土构件温度	数字温度计	个	156		☆	
空气温度与相对湿度	电子温湿度计	台	2		☆	
拉索温度	温度仪	支	5	☆	☆	测温索内埋入 5 个数字温度计
主梁位移	连通管	个	4		☆	
	液压传感器	台	46		☆	
索塔倾斜	双向倾斜仪	台	68		☆	
	棱镜/全站仪	套	68	☆		
动力特性	加速度/速度传感器	台	18		☆	
应变	电阻应变片	个	300		☆	主塔 128, 主梁 156, 临时墩 16
索力	锚索计 (穿心式索力传感器)	台	8	☆		
	加速度传感器	台	40	☆	☆	

1.2.4 评估系统研究与开发

苏通大桥结构健康监测评估系统围绕结构安全运营管理这个主题,以监测系统实测数据为主要研究对象,研究解决日常运营状态下结构健康状态评估关键技术问题。系统主要研究内容有:(1)采用小波包分析技术建立基于振动测试与小波包能量谱的工程结构损伤预警方法;(2)采用信息融合技术建立桥梁结构损伤定位方法;(3)采用统计模式识别技术建立“环境条件归一化”的苏通大桥主梁损伤预警方法;(4)采用最大熵谱技术建立斜拉索自振频率的在线识别方法,以改善传统经典功率谱法中存在的识别精度差、噪声影响大等问题;(5)建立苏通大桥基准有限元模型与修正方法。评估系统研究与开发对人员专业技术水平要求高,需根据大量实测数据建立特征数据库,以此为基础,完善相关结构损伤诊断标准。因此评估系统应用尚处于探索研究阶段,达到人机对话计算机自动诊断尚需较长时间的探索研究。

1.2.5 监测系统工作状态及数据综合分析

苏通大桥全桥上、下部结构共布设 1 147 个各种不同类型的传感器,对桥梁的结构健康状况进行

实时在线监测。系统施工完成后主要进行数据采集、信号分析、数据保存、数据的初步处理、数据的实时显示、初步统计等工作。运营以来,大桥先后经历了建成后无车载、2008 年大雪、交工动静载试验、周边地震、堵车偏载、台风以及最高交通量近 12.6 万辆高峰交通量等工况。由于苏通大桥结构健康监测系统长期在线实时运行,经实时观测或事后调阅历史数据发现,系统对这些特殊时刻的环境状况及结构响应都能及时地捕捉信息、存贮数据,通过对 4 年来振动、内力、支座位移及 GPS 观测结果等数据的分析对比,发现测点数据在正常范围内波动,未发现异常状态。

1.3 与昂船洲大桥对比分析

自 20 世纪 80 年代末以来,大型桥梁结构的健康监测逐渐成为研究热点,欧、美、日、韩、中国香港及大陆等相继在数十座大跨桥梁上建立规模不等的结构健康监测系统。其中,香港最为领先、成果最为显著。早期的青马桥、汲水门桥、汀九桥等的监测成果已应用于青龙桥、昂船洲大桥的设计。苏通大桥结构健康监测系统与昂船洲大桥监测系统的对比如表 2 所示。

表2 苏通大桥与昂船洲大桥成桥健康监测对比

比较项目		苏通大桥	昂船洲大桥
监测范围		主桥主跨1 088 m,长2 088 m七跨斜拉桥,辅桥140+268+140 m三跨预应力混凝土连续刚构桥。	主跨1 018 m,全长1 595.5 m九跨斜拉桥。
传感器	规模和数量	全桥约1 147个,包括超声风速仪、温度仪(钢、混凝土、路面)、空气温湿度仪、腐蚀传感器、加速度计(固定、可移动)、GPS、位移传感器、应变计(焊接式、振弦式)。	全桥约1 200多个,包括超声风速仪、地震仪、温度仪(钢、混凝土、路面、拉索)、空气温湿度仪、气压计、雨量计、腐蚀传感器、车速车轴仪、数字摄像仪、加速度计(固定、可移动)、GPS、双向倾斜仪、位移传感器、应变计(焊接式、振弦式)。
	差异对比	含主桥基础和辅桥监控,且基础传感器布设数量较多。未含拉索温度仪(永久监测)、气压计、雨量计、双向测斜仪(塔、墩永久监测)、车速车轴仪、数字摄像仪。	塔基础仅布设2个地震仪,基础未布设其他传感器。
健康监测系统功能对比		仅含结构健康监测、结构健康数据管理、用户检索、监测数据初步处理与显示,由人工转存维护管理系统需要的趋势分析数据。	包括结构健康监测、数据分析、结构构件维修、结构健康数据管理、用户检索、监测评估结果显示等。
		结构健康监测合同独立实施,鉴于监测系统设计与实施滞后于主体结构设计和施工,系统未能实施拉索温度仪、车速车轴仪安装方案。数据摄像仪与主体监控系统进行整合,监测系统取消桥面摄像系统。	制定详细技术规范,将其纳入主体结构建造合同同步实施。
		监测数据实时信息分析能自动生成,评估分析需人工进行。	监测数据处理与分析能自动的或半自动化进行。
		局部兼顾桥梁检测要求。	监测数据分析方法、采集参数兼顾了桥梁检测要求。
		运营期有专业团队负责系统维护。需落实组建具有实力的专业团队进行数据分析和评估。	运营期有专业团队负责系统维护、分析和评估。

注:港珠澳大桥香港段连接路桥拟将结构健康监测与维修管理等各项工作结合为一个系统,包括:养护巡检解析、结构健康监测、评估与评级、结构构件维修、结构健康数据管理、用户检索、监测评估结果显示等,并制定详细技术规范,将其纳入主体结构建造合同同步实施。

2 问题与对策

(1)大跨径桥梁结构健康监测技术已较为成熟,但评估系统仍处于探索研究阶段。监测系统的传感器选型与合理布设、监控评估方法的研究需综合考虑设计、施工、成桥动静载试验、营运养护管理等的要求。

(2)结构健康监测不仅是技术性问题也是管理性问题。在项目管理上涉及桥梁主体业主、设计、施工、检测、运营养护管理、监测系统本身的设计、施工、设备供应及分析评估等多单位多部门协调与配合;在专业上涉及桥梁结构、桥梁检测、岩土工程、计算机技术、网络通讯、信号识别与处理、机电设备硬件处理、数据处理与评估等多专业整合;在运营养护上受养护经费和管理人员缺失等因素影响,系统数据开发与利用受到很大限制。因此,项目初期不

仅要做好技术方案规划,也需要做好项目管理方案规划,明确在项目各阶段各相关专业的职责和工作要求,并以承包合同为纽带予以传递和落实。苏通大桥索塔地基基础稳定与安全性监测在项目管理上,有效地实现了集设计、施工监控、成桥试验与运营养护监测与评估为一体的运作模式,监测成果对桩土共同作用、群桩传力机理等进行验证和修订,其经验值得同类桥梁借鉴。为做好大跨桥梁结构健康监测评估工作,建议除建立以经济合作体为中心的专家协作体系外,应在项目建设期着力建立由多元人才组成的公益性研究组织(由志愿者组成)——结构健康监测评估组织,更好地推进大跨径桥梁健康监测评估技术的发展。

(3)结构健康监测对桥梁工程养护管理的指导目前仍具有一定的局限性。受监测软硬件规模和人

们对运营状态下的结构劣化和损伤诊断认知水平等因素影响,运用结构健康监测成果直接指导养护还需不断探索和积累。应将结构健康监测与人工目视巡查、检测有机结合,建立和存贮结构原始指纹。监测设计阶段需界定可确定预警指标和待确定预警指标,以便指导养护管理用户正确理解和使用预警指标,并做好预警指标的研究和积累工作。系统运营阶段应做好台风、地震、船撞、堵车偏载等特殊事件的结构响应分析和记录,由专业评估组织定期对结构进行评估评级,着力构建结构评价指标和损伤评价体系,进行结构劣化趋势性分析,解决整体状态损伤评价问题,建立结构异常检出和提示系统,实现结构预警功能。

(4)协调解决传感器寿命与结构设计使用寿命的矛盾。监测设计阶段,需对每个传感器的测试目的、功能、性能、预期寿命、维护保养要求、维修更换方案予以明确和说明;对传感器异常、监测系统异常和结构异常需予以界定;对能明确的预警指标需予以明确。如桥面风速与汽车荷载,苏通大桥设计考虑与汽车荷载组合的风力按桥面风速 25 m/s 计算,超过 25 m/s 不与汽车荷载组合。运营养护阶段,应根据监测系统设计要求和系统维修保养管理经验,合理进行系统维护规划,科学制定备品备件替换计划,定期进行传感器标定与检测,努力保证系统稳定与可靠。

(5)利用现有监测系统的通讯通道和硬件设备,科学扩容监测系统。根据人工检查检测结果,对需跟踪监测的局部损伤区域,增设传感器进行实时监测与跟踪分析。将未来拟为桥区运营管理服务而建立气象观测站的观测数据纳入监测系统,弥补系统自身不足。在车速车轴仪(WIM)系统缺乏的情况下,拟采用收费站数据与桥面车辆监控摄像相结合的方法开展车辆荷载特性研究,为结构分析提供基础。

3 结语

国内已设计和建成多座大跨桥梁健康监测系

统,为充分发挥健康监测系统的作用,避免资源浪费,不仅需要促进桥梁结构健康监测技术的发展,而且还需要促进桥梁健康监测项目管理技术的发展。监测系统设计应综合考虑满足设计、施工、检测、养护管理等多用户需求。其发展趋势是实现人机结合、专业分析,监测系统与维护管理系统有效整合,推动桥梁损伤识别技术的发展,实现从研究层面向用户操作层面的飞跃。

参考文献:

- [1] 张启伟.大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J].同济大学学报,2001,29(1):65-69.
- [2] 同济大学.苏通长江公路大桥桥梁健康监测系统设计(之一)初步研究报告[R].2002.
- [3] 丹麦 COWI 公司.苏通大桥结构健康监测概念设计[M].2003.
- [4] 江苏省交通科学研究院,香港理工大学.苏通大桥结构健康监测技术设计文件[M].2004.
- [5] 苏通大桥结构健康监测与安全评价系统研究与设计联合体项目组.苏通大桥结构健康监测与安全评价系统施工图设计文件[M].2004.
- [6] 江苏苏通大桥有限责任公司,江苏华兴软件有限公司.苏通大桥结构健康监测系统操作维护手册[M].2008.
- [7] 河海大学.苏通大桥索塔群桩基础承载性能与安全性监测评估(阶段性成果报告)[M].2012.
- [8] 武汉港湾工程质量检测中心,西南交通大学土木工程学院.苏通大桥施工监测传感器系统设计[M].2005.
- [9] 张鸿,罗承斌,张永涛,等.苏通大桥主桥上部结构施工及控制技术研究[J].中国工程科学,2009,11(3):85-91.
- [10] 东南大学.苏通大桥结构健康监测数据管理与结构状态预警系统研究报告[R].2008.
- [11] 秦权.大跨悬索桥的结构结构监测系统[J].市政技术,2005,(S1):31-35.
- [12] 黄启远.港珠澳大桥香港段连接路桥的结构健康监测与维修管理系统(访问工作简报)[R].2012.
- [13] 张喜刚,陈艾荣,等.苏通大桥设计与结构性能[M].北京:人民交通出版社,2010.