

DB61

陕 西 省 地 方 标 准

DB 61/T 1037—2016

连续梁（刚构）桥健康监测技术规程

Structural health monitoring system technical specification for continuous girder
(rigid frame) bridges

2016 - 07 - 27 发布

2016 - 10 - 01 实施

陕西省质量技术监督局 发 布

前 言

本标准根据 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由西安公路研究院提出。

本标准由陕西省交通运输厅归口。

本标准起草单位：西安公路研究院。

本标准主要起草人：石雄伟、袁卓亚、冯威、赵建勋、宋彬、任赞、马毓泉、许冰、谢刚、苗建宝。

本标准由西安公路研究院负责解释。

本标准首次发布。

联系信息如下：

单位：西安公路研究院

电话：029-88811608

地址：西安市高新六路 60 号

邮编：710065

连续梁（刚构）桥健康监测技术规程

1 范围

本标准规定了连续梁（刚构）桥健康监测系统的总体设计、传感器子系统、数据采集与传输子系统设计、结构安全评估与预警子系统设计、数据库管理子系统设计、系统验收、监测成果提交等内容。

本标准适用于陕西省公路工程中既有和新建的连续梁（刚构）桥桥梁结构健康监测。市政道路桥梁和特别重要的中小跨径桥梁可参考执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

JTG B001 公路工程技术标准
JTG D60 公路桥涵设计通用规范
JTG D62 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
JTG/T F50 公路桥涵施工技术规范
JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
JTG/T J21 公路桥梁承载能力检测评定规程
JTG/T J21—01 公路桥梁荷载试验规程

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

桥梁结构健康监测 bridge structural health monitoring (BSHM)

通过对桥梁结构整体行为和实时环境响应的监测，实现对桥梁服役情况、可靠性、耐久性和承载能力的评估，为桥梁养护与管理决策提供依据和指导。

3.1.2

有限元模型修正 finite element updating

依据相关测试结果，利用有效手段修正结构有限元模型参数，使所建立的有限元模型尽可能地反映结构的真实状态。

3.1.3

传感器 transducer/sensor

将特定的被测量信息（包括环境变化、结构应变、结构变形、结构振动等）按一定的规律转换成某种可用信号输出的器件或装置。

3.1.4

损伤识别 damage identification

利用结构的响应数据来分析结构物理参数的变化，进而识别结构损伤的过程。

3.1.5

安全评估 safety assessment

通过各种测试手段，分析结构当前的工作状态，并与其临界失效状态进行比较，评价其安全等级。

3.1.6**预警 warning**

在结构潜在危险发生之前，根据结构监测数据和评估结果，向相关部门发出警戒信号的过程。通常通过理论分析设置预警阈值实现。

3.1.7**预警阈值 warning threshold**

结构监测中，触发结构监测系统发出预警信号所需的监测指标控制值。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

A ——截面极值差值的最小绝对值；

$A_1, A_2, \dots, A_n$ ——1 到 n 截面极值差值的最小绝对值；

D ——结构运营时某一时刻某截面的测试挠度，单位为毫米（mm）；

D_{max} ——结构正常使用极限状态短期效应组合下某截面的最大挠度，单位为毫米（mm）；

DPR ——原点留数法的指标；

$diag(\cdot)$ ——提取括弧内矩阵的对角元；

ECP_i ——第 i 个自由度的特征向量乘积指标；

E_0 ——有效独立系数；

F ——Fisher·信息阵；

$F(K)$ ——第 i 阶模态振型改变对损伤系数向量的灵敏度；

f_{cd} ——混凝土抗压设计强度，单位为兆帕（MPa）；

f_{max} ——某截面的结构允许最大挠度，单位为毫米（mm）；

f_{td} ——混凝土抗拉设计强度，单位为兆帕（MPa）；

$J_{r/s}$ ——表征最小二乘法准则的目标函数，其值越小越好，传感器位置所测数据估计的模态越准确；

$K_1, K_2, \dots, K_n$ ——相应的结构刚度；

M_{ij} ——有限元质量阵的第（ i ； j ）个元素；

MAC_{ij} ——模态保证准则矩阵的第（ i ； j ）个元素；

MKE_{ik} ——与第 k 个模态第 j 个自由度相对应的模态动能；

$MSSP_i$ ——第 i 个自由度的模态分量加和指标；

Q ——与维数相同的 $n \times m$ 维的单位正交矩阵；

$\hat{q}_{0LS}$ ——利用较多传感器取得的模态坐标的最佳最小二乘估计；

$\hat{q}_s$ ——采用某待选传感器组合时模态坐标的最小二乘估计；

R —— $n \times m$ 维的上三角矩阵；

S ——模态矩阵的奇异性比；

τ	——表示矩阵的转置；
Λ	——对角的结构特征值矩阵，其每一个对角元为结构圆频率的平方；
σ	——结构运营时某一时刻某截面的测试应力，单位为兆帕（MPa）；
σ_m	——模态矩阵的最小奇异值；
$\sigma_{\max}$	——结构正常使用极限状态短期效应组合下某截面的最大应力，单位为兆帕（MPa）；
$\sigma_{s\max}$	——截面在正常使用极限状态的上缘最大应力，单位为兆帕（MPa）；
$\sigma_{s\min}$	——截面在正常使用极限状态的上缘最小应力，单位为兆帕（MPa）；
$\sigma_{x\max}$	——截面在正常使用极限状态的下缘最大应力，单位为兆帕（MPa）；
$\sigma_{x\min}$	——截面在正常使用极限状态的下缘最小应力，单位为兆帕（MPa）；
σ_1	——模态矩阵的最大奇异值；
Φ	——归一化后的模态矩阵，其每一列为结构的一个模态；
Φ_{ik}	——第 k 个模态在 i 点的分量，为有限元质量阵中的相应元素；
Φ_{jk}	——第 k 个模态在 j 点的分量；
$\otimes$	——矩阵与相对应的元素点点相乘。

4 总体设计

4.1 一般规定

- 4.1.1 系统设计宜根据桥梁结构受力特点进行专项设计，并应结合后期养护工作的开展进行综合考虑以达到最优化。系统设计应做到检测数据真实、分析方法正确和系统软、硬件可靠。
- 4.1.2 系统应采用先进的硬件设备、合理运用计算机技术和远程信息传输技术，并应保障系统的实时性和安全性。
- 4.1.3 系统软件应操作简便，便于维护，能满足用户的不同需求，具有一定的前瞻性，并易于扩展和升级。
- 4.1.4 如对多座大桥进行联测时，应考虑系统内部数据的兼容性和共享性等要求。

4.2 监测项目

主要监测项目见表 1，监测项目确定宜根据桥梁结构实际状况结合项目需求合理选择。

表1 监测项目

环境及作用监测	结构监测	
	静力监测	动力监测
温度*、湿度、风荷载、车辆荷载	应变（应力）*、挠度*、沉降、倾角、伸缩缝变位、支座位移	频率*、振型、阻尼
注：带*号为必测项目。		

4.3 系统功能设计

桥梁结构健康监测系统应包括传感器子系统、数据采集与传输子系统、结构安全评估与预警子系统和数据库管理子系统，各子系统功能应符合表2的规定。系统应能满足对结构进行实时监测、及时预警与评估以及特殊环境状况下的应急监测要求，监测数据采集应真实可靠，数据传输及时，预警及时，评估结果可信。

表2 系统构成及主要功能

系统	主要功能
传感器子系统	将被测的不同形式的物理量转变成便于记录及再处理的电压、电流或光等信号。
数据采集与传输子系统	实现信号采集、传输。
结构安全评估与预警子系统	实现对桥梁危险状态进行预警、对桥梁状态参数和损伤状态进行识别、对桥梁综合性能进行评估。
数据库管理子系统	各子系统数据的支撑系统，完成数据的归档、查询、存储、维护和打印输出等工作。

5 传感器子系统

5.1 传感器选型

- 5.1.1 传感器的选择应综合考虑被测结构的物理量性质、安装环境、测试环境等因素，具体包括测量类型、分辨率、测量范围、测试周期、测试环境、安装环境以及资金投入等进行合理选择。
- 5.1.2 传感器应技术成熟、性能先进，耐久性和抗干扰能力强，应易安装，便于维护和更换。
- 5.1.3 传感器正常工作前应进行校准、调试，以确保其正常工作。常见传感器类型及相应监测内容见表3。

表3 常见传感器类型及相应监测内容

监测类别	监测内容	传感器类型
环境及作用	风荷载	机械式风速仪、超声风速仪等
	温度、湿度	温湿度传感器
	车辆荷载	动态称重仪、视频监控
结构响应	应力	光纤光栅应变传感器、振弦式应变传感器、压电薄膜传感器等

表3 常见传感器类型及相应监测内容（续）

监测类别	监测内容	传感器类型
结构响应	挠度	全球卫星定位系统（GPS）、静力水准仪（HLS）、自动全站仪和激光测试仪等
	沉降	位移计
	倾角	水准式倾角仪、光纤光栅式倾角计等
	动力响应	加速度传感器
	支座变形	位移计
	伸缩缝变位	位移计

5.2 传感器布置

5.2.1 环境监测、几何线形监测和外部荷载监测传感器应依据结构形式结合现场地形特点进行布置。常见连续（刚构）桥几何线形监测内容见表4。

表4 常见连续（刚构）桥几何线形监测内容

主要内容	附加内容
主梁 1/4L、1/2L、3/4L 截面竖向变位	高墩倾角、墩底沉降

5.2.2 结构常见静力测点、动力测点布置见附录A，传感器可通过优化算法进一步优化，优化算法见附录B和附录C。

5.2.3 传感器数量应适度冗余，并可扩充和升级。

5.2.4 传感器及传输线缆布设不应损伤结构，应有适当的防护措施，并应考虑后期维护安全可行性。

5.3 传感器子系统设计要求

5.3.1 传感器采集数据精度应满足桥梁安全评价与预警的需求。

5.3.2 传感器的安装和布线应不造成对桥梁的破坏，不影响桥梁的外观。

5.3.3 传感器布设应具有较好的防锈蚀、防老化和防人为破坏功能，并做好防雷、防盗等安全措施。

5.3.4 传感器主要性能参数应结合项目要求合理确定，但不应低于表5中常用传感器基本参数要求。

表5 常用传感器基本参数要求

传感器名称	技术指标
风速仪	风速量程：0m/s~60m/s
	风速测量精度：±3%或±0.3m/s
	风向方位角量程：0°~360°
	风向测量精度：<±3°
	采样频率：≥20Hz
	工作温度：-30℃~65℃
	使用寿命：≥5年
动态称重仪	测速量程：5 km/h~180km/h

表5 常用传感器基本参数要求 (续)

传感器名称	技术指标
动态称重仪	测速精度: $\leq \pm 1.5\%$
	车辆识别精度: $\geq 98\%$
	称重量程: $\geq 300\text{kN/轴}$
	交通量计数精度: $\leq \pm 1\%$
	轴距误差: $\leq \pm 1\%$
	测量精度: $\pm 5\%$
	工作温度: $-30^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$
	工作湿度: $0\text{ RH} \sim 85\text{RH}$
	使用寿命: ≥ 5 年
加速度传感器 (A)	测量方向 (轴数): 3
	量程: $\pm 2\text{g}$
	频响范围: $0\text{ Hz} \sim 100\text{Hz}$
	分辨率: $< 1.0\text{ }\mu\text{g}$
	灵敏度: $\geq 1500\text{mv/g}$
	横向灵敏度比: $< 1\%$
	工作温度: $-30^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$
	使用寿命: ≥ 5 年
加速度传感器 (B)	测量方向 (轴数): 1
	量程: $\pm 5\text{g}$
	灵敏度: $\geq 1000\text{mv/g}$
	分辨率: $< 1.0\text{ }\mu\text{g}$
	频响范围: $0\text{ Hz} \sim 100\text{Hz}$
	工作温度: $-30^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$
	使用寿命: ≥ 5 年
应变传感器	量程: $\pm 1500\text{ }\mu\text{ }\epsilon$
	分辨率: $1\text{ }\mu\text{ }\epsilon$
	采样率: $\geq 10\text{ Hz}$
	工作温度: $-30^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$
	使用寿命: ≥ 5 年
位移传感器	量程: $> 20\text{mm}$
	精度: $\leq 0.5\text{FS}$, 沉降监测时精度: 0.01mm
	分辨率: $\leq 0.1\text{FS}$
	工作温度: $-20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$
	使用寿命: ≥ 5 年
温湿度传感器	湿度量程: $0\text{ RH} \sim 100\text{RH}$
	湿度精度: $\pm 1.5\text{RH}$
	温度量程: $-20^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$
	温度精度: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

表5 常用传感器基本参数要求 （续）

传感器名称	技术指标
温湿度传感器	使用寿命：≥5年
倾角仪	量程：±15°
	分辨率：0.0005°
	精度：≤0.1%FS
	工作湿度：0 RH~85%RH
	工作温度：-20℃~80℃
	使用寿命：≥5年
静力水准系统	量程：≥200mm
	分辨率：<0.1%FS
	工作温度：-25℃~80℃
	工作湿度：≤95%RH
	使用寿命：≥5年

6 数据采集与传输子系统设计要求

6.1 数据采集

- 6.1.1 采集设备的性能应与对应传感器性能匹配，满足长期稳定工作要求。采集设备应易于更换，且更换不影响采集软件使用，宜增大所有功耗器件的冗余量，延长其使用寿命。
- 6.1.2 数据采集模式应根据工程特点与现场具体条件选择。采集设备在特殊状态下应可进行人工干预。
- 6.1.3 采集设备不应设置在潮湿、有静电和电磁场环境之中，应做好防尘防雷击保护设施，传输线缆宜短。采集设备应有不间断电源保障或太阳能供电等代替方案。
- 6.1.4 传感器采样频率应能反映被监测结构的行为和状态，宜根据结构静态、动态指标的监测需要合理选择相应传感器及其采样频率。
- 6.1.5 采集设备应遵循标准协议，配置信号增益等硬件设备，实现对信号预处理，应具备实时自动采集存储、即时显示反馈、实时自诊断等功能，应保证现场数据的真实性、实时性、连续性、有效性。

6.2 数据传输

- 6.2.1 数据传输分为有线传输方式和无线传输方式，应综合考虑数据传输距离、工程特征和现场地形条件、网络覆盖状况、已有的通信设施等因素，灵活选取：
- a) 当工程现场存在无线发射设备或在有强电磁场的环境下，应采取有效的电磁屏蔽措施，当无法实施电磁屏蔽时，应采用有线传输方式；
 - b) 对于交通不便的深山峡谷、复杂地形、物理线路布设和维护困难的环境及需要构建临时传输网络的工程现场，宜采用无线传输方式；
 - c) 根据工程实际需要，可选择一种或多种传输方式进行组合使用；
 - d) 采用有线传输数据时宜利用已有的光纤通信网等数据传输线路，设置必要的中继器或转发器，选取适当的传输介质；同时应以现场数据采集器的接口为基础，以增加最少的接口转换器为原则，选取适当的接口类型；

- e) 采用无线传输数据时应根据工程现场营运的网络、成本和现场实际情况选择合适的无线传输方式;
 - f) 数据传输系统应设计数据备份机制, 应具备较大存储数据的能力。
- 6.2.2 数据传输系统应保证数据传输的可靠性、高效性和数据传输质量。
- 6.2.3 数据传输时低速数据可采用异步传输, 高速数据可采用同步传输。当选择同步传输时, 应结合现场实际情况, 综合考虑传感器间距离、工程特征及现场地形条件等因素, 选择合适的同步技术:
- a) 对于小范围的结构健康监测系统, 宜采用基于信号的同步技术;
 - b) 对于大范围的结构健康监测系统, 宜采用基于时间的同步技术;
 - c) 根据工程实际需要, 也可选取一种或两种同步技术组合使用。
- 6.2.4 应能够定时启动传感器设备监测运行, 能够与现场监控中心工作站进行通信与数据交换, 能够进行时钟校验。
- 6.2.5 可对监测传感器与二次仪表启动电源控制, 可对二次仪表增益控制, 可按不同的监测操作和不同的监测内容、采样次序、采样频率, 完成对传感器输出的采样与模数转换。
- 6.2.6 接收工作站可对监测操作参数进行修改, 调整监测运行的时间和监测采样次序、采样频率与监测模拟量转换参数。
- 6.2.7 对配置专用测控软件的传感器设备, 可提供软件运行的平台, 并编制相应的通信协议与接口, 可提供监测数据非正常状况的识别、剔除与事件发生率的记录, 可完成与监测数据输出内容相应的监测数据初步整理。
- 6.2.8 应根据要求, 调整数据有限期的存储、备份及管理, 可对传感器设备输出物理量与运行状况进行检测、识别, 能够实现工作站电源故障的报警; 接受工作站传送的监测参数调整的指令, 进行相关的监测过程或监测数据处理参数的调整, 并记录、备份相关的调整指令, 现场传输子系统宜采用数字信号传输方式, 并保证传输线路的可靠性、安全性和可更换性。

6.3 其他要求

- 6.3.1 对特别重要桥梁可根据需要设置现场监测室, 监测室应远离产生粉尘、油烟、有害气体以及生产或贮存具有腐蚀性、易燃、易爆物品的工厂、仓库、堆场等。
- 6.3.2 应远离强振源和强噪声源, 宜避开强电磁场干扰, 无法避开时应采取有效的电磁屏蔽措施。

7 结构安全评估与预警子系统设计要求

7.1 一般规定

- 7.1.1 结构安全评估与预警子系统应对结构各类监测参数建立明确的预警指标, 并通过对监测数据进行处理分析, 实现对结构状态的监测和分级预警。
- 7.1.2 结构安全评估与预警子系统应能独立或综合日常、定期检测结果实现对结构的状态综合评估。
- 7.1.3 系统应具备预警信息处理功能, 能将各种预警信息以电子邮件和短信等形式通知相关人员。
- 7.1.4 按照数据处理目的和深度的不同可分为结构异常状态预警、结构损伤识别和结构安全评估三个层次, 设计时可依据结构实际状态、监测目的、需求及资金投入综合考虑。

7.2 结构预警

- 7.2.1 系统能够稳定运行, 能够对桥梁的主要危险状态进行识别, 实现分级预警。预警应及时, 不允许出现漏报, 误报率不高于 2%。
- 7.2.2 预警指标应以控制截面的应力和挠度为主。

7.2.3 在桥梁处于异常状态时,系统能够根据预警级别给出相应应急预案。

7.2.4 结构预警宜采用以规范限值为主,理论分析值为辅的分层次预警体系。实行四级报警制度,结构应力 σ 为结构真值(既有桥梁后期安装的系统为相对增量,可采用应力释放法等测的结构前期真值进行叠加分析), $\sigma_{\max}$ 为结构正常使用极限状态组合的最大应力,挠度参数指标 D 为动挠度:

- a) 第一级为“绿色区”,在该区域内,结构应力 $\sigma < 0.75 \sigma_{\max}$ 且结构挠度 $D < 0.75 D_{\max}$,结构处于安全状态,所有测点正常监控;
- b) 第二级为“黄色区”,在该区域内,结构应力 $0.75 \sigma_{\max} \leq \sigma < \sigma_{\max}$ 或结构挠度 $0.75 D_{\max} \leq D < D_{\max}$,结构仍处于安全状态,但受力较不利;
- c) 第三级为“橙色区”,在该区域内,结构应力 $\sigma_{\max} < \sigma < f_{cd}$ 或 f_{td} ,结构挠度 $D_{\max} \leq D < f_{dmax}$,结构虽然满足规范要求,但已经超出理论计算值,存在潜在隐患;
- d) 第四级为“红色区”,在该区域内,结构应力 $\sigma \geq f_{cd}$ 或 f_{td} ,结构挠度 $D \geq f_{dmax}$,结构已不满足规范要求,存在重大安全问题。

7.2.5 发现监测仪器设备异常引起测值异常时应及时对设备进行检修,重测。对于由于结构本身劣化损伤引起的测值异常应及时查明原因,采取应急措施,保证结构安全。

7.2.6 监测成果可结合定期检查、人工巡检等资料实现对结构的状态评估;连续刚构桥梁状态评估宜采用变权层次分析法,指标权重分配宜采用专家评估法,也可采用JTG/T H21中相关规定。

7.2.7 能够根据历史识别经验对模型进行修正,进而对状态识别和损伤识别算法进行拓展和升级,提高自身性能。

7.2.8 桥梁评估系统应能提供综合评估报告,评估结果应明确、直观,并提出维护管养建议。

8 数据库管理子系统设计要求

8.1 数据库组成

8.1.1 数据库应至少包括以下信息:

- a) 设备标识、设备名称、所属子站、几何位置、设备功能、出厂参数、安装时间、采样频率、预警阈值、运行状况、维修记录等;
- b) 原始环境信息、荷载信息、结构响应信息、结构形态信息以及原始数据等;
- c) 结构设计图纸、基本设计参数、结构分析模型;
- d) 评估所采用的准则和方法,评估时的主体、时间、参数、对象、结果和报告;
- e) 用户名、用户标识、用户组、个人信息。

8.1.2 选择数据库管理系统宜考虑下列因素:

- a) 系统支持对海量数据的高效管理机制;
- b) 异常情况下的容错功能;
- c) 系统恢复功能,数据的共享和交换功能;
- d) 系统宜支持分布式数据管理功能,包括分布式数据存储、复制、数据透明访问等。

8.2 数据库管理子系统设计要求

8.2.1 数据库设计应遵循数据库系统的可靠性、先进性、开放性、可扩展性、标准性和经济性的基本原则，并保证数据的共享性、数据结构的整体性、数据库系统与应用系统的统一。

8.2.2 结构健康监测数据库应能将采集系统收集到的实时数据和历史数据进行数据处理，并提供给评估系统进行数据分析，并将处理及分析结果进行保存。

8.2.3 数据库系统应支持在线实时数据处理分析、离线数据处理分析以及两种工作方式的混合模式。

8.2.4 数据库功能应包括监测设备管理、监测信息管理、结构模型信息管理、评估分析信息管理、数据转储管理、用户管理、安全管理以及预警信息管理等。

8.2.5 用户管理应支持用户权限的定义和分配，根据用户权限来操作不同模块，提供基于角色的用户组管理、用户授权、注册账号和认证管理等。

8.2.6 系统安全管理应提供系统运行环境的网络安全管理和安全保护、数据库的容灾备份机制、敏感信息标记以及用户使用日志审计等功能。

8.2.7 系统交互可采用人机交互、监测系统与数据库系统交互，也可采用分布式环境下的协作交互。

8.3 系统软件性能要求

8.3.1 可实时监测桥梁的各测点传感器，可自定采集时间，并对原始数据进行滤波、计算等处理，数据以数字或相应曲线、图等形式实时显示、记录和打印。

8.3.2 监测数据应保存在多种数据库内，并可进行历史数据查询，生成选定时间段内的测试参数的最大最小值，应能直接生成 EXCEL 或其他形式报表。

8.3.3 相关数据成果可以各种图形方式显示。

8.3.4 能对系统用户进行口令和操作权限管理。

8.3.5 系统满足可扩展性要求，满足系统功能的添加、删除、维护、修改、增强和扩展。

9 系统验收

9.1 桥梁结构健康监测系统建成正常运营 3 个月后，可报业主并由相关部门组织系统验收。验收内容应包括各子系统和整体性能指标验收。

9.2 申请验收时应提供以下资料：

- a) 桥梁结构健康监测系统成果报告，应包括项目概况、系统设计、系统安装、系统集成等内容，并附前端传感器型号及布置图等资料；
- b) 桥梁结构健康监测系统项目合同；
- c) 监测系统操作指南。

9.3 应保证表面式传感器的成活率为 100%，埋入式传感器的有效率不低于 90%，对失效的传感器应补设表面式传感器。应用程序调试完成后，应进行功能、性能测试。验收表格见附录 D。

10 监测成果

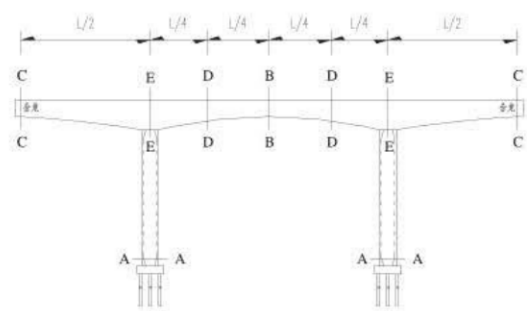
10.1 健康监测系统运行期间，可根据需要由管理方或委托第三方进行结构监测和系统维护，并按季度或年度提交阶段成果报告。

10.2 监测报表应包括下列内容：概述、监测依据、监测内容、测点布设、实施情况、数据对比分析，监测结论和重要原始数据等附件。

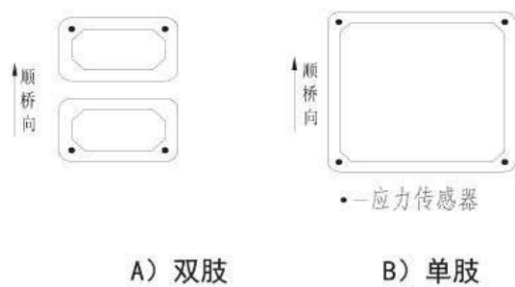
附 录 A
(规范性附录)
传感器测点布置图

A.1 传感器测点布置图

传感器测点布置见图A.1、图A.2、图A.3、图A.4和图A.5。



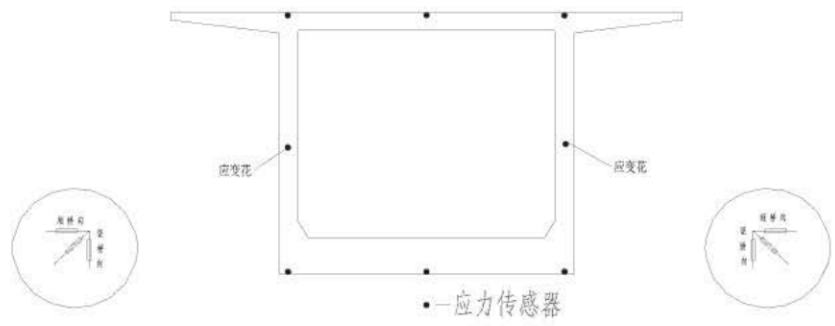
图A.1 常见静力测点立面布置



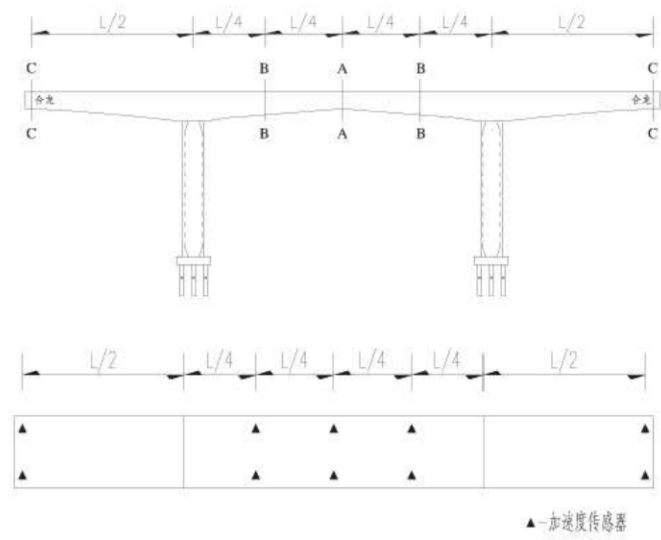
图A.2 桥墩墩底测点布置 (A-A 截面)



图A.3 主梁测点布置 (B-B、C-C 截面)



图A.4 主梁测点布置 (D-D、E-E 截面)



图A.5 常见加速度传感器布置

附 录 B
(规范性附录)
静力测点优化布置算法

B.1 静力测点优化布置算法

B.1.1 利用有限元分析软件对桥梁结构进行分析得到设计荷载作用下结构在正常使用极限状态各截面上下缘应力值。

B.1.2 利用混凝土设计极值和实测截面极值差值的最小绝对值作为强度储备指标，如公式 (B.1)，两两比较求得截面重要性程度参数。

B.1.3 将数据代入到公式 (B.2) 中，得到截面权重的判断矩阵A。

$$A = \min(|\sigma_{s\max} - f_{td}|, |\sigma_{s\max} - f_{cd}|, |\sigma_{s\min} - f_{td}|, |\sigma_{s\min} - f_{cd}|, \dots, |\sigma_{x\max} - f_{td}|, |\sigma_{x\max} - f_{cd}|, |\sigma_{x\min} - f_{td}|, |\sigma_{x\min} - f_{cd}|) \quad (\text{B. 1})$$

$$C = (u_{ij})_{n \times n} = \left(\frac{A_i}{A_j} \right) = \begin{pmatrix} \frac{A_1}{A_1} & \frac{A_1}{A_2} & \dots & \frac{A_1}{A_n} \\ \frac{A_2}{A_1} & \frac{A_2}{A_2} & \dots & \frac{A_2}{A_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{A_n}{A_1} & \frac{A_n}{A_2} & \dots & \frac{A_n}{A_n} \end{pmatrix} \quad (\text{B. 2})$$

B.1.4 利用特征根法求出最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其对应特征向量 W ，对特征向量 W 进行正规化和一致性检验后即可以得到各截面权重值，从而排除人为因素的影响，求得结构应力监测最佳截面。

附 录 C
(规范性附录)
加速度传感器的布置准则与方法

C.1 传感器的布置准则

C.1.1 加速度传感器布置宜符合下列准则：

- a) 模态保证准则；
- b) 模态矩阵的奇异值比准则；
- c) 平均模态动能；
- d) Fisher 信息阵；
- e) 模态的可视化程度；
- f) 表征最小二乘法准则。

C.1.2 模态保证准则矩阵可按公式 (C.1) 进行计算：

$$MAC_{ij} = \frac{\Phi_i^T \Phi_j}{\sqrt{(\Phi_i^T \Phi_i)(\Phi_j^T \Phi_j)}} \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

C.1.3 模态矩阵的奇异值比可按公式 (C.2) 进行计算：

$$S = \frac{\sigma_1}{\sigma_m} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

C.1.4 平均模态动能宜选择所有自由度模态动能中较大一部分的结构测点，以使得测试信号具有较高的信噪比，且得到的模态识别结果精度较高。

C.1.5 有效独立法的Fisher信息阵可按公式 (C.3) 进行计算：

$$F = \Phi^T \Phi \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

C.1.6 模态的可视化程度是待识别的模态宜在结构的特征点或者整体上有一定分布，具有一定的可视化。

C.1.7 表征最小二乘法准则可按公式 (C.4) 进行计算：

$$J_{r/s} = (\hat{q}_s - \hat{q}_{0LS})^T (\hat{q}_s - \hat{q}_{0LS}) \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

C.2 传感器布置方法

C.2.1 加速度传感器可按下列方法进行布置：

- a) 模态动能法；
- b) 特征向量乘积法；
- c) 原点留数法；
- d) 有效独立法；
- e) 改进的 MinMAC 法；
- f) QR 分解法；

g) 特征值灵敏度法。

C.2.2 模态动能法可按公式 (C.5) 进行计算:

$$MKE_{ik} = \Phi_{ik} \sum_j M_{ij} \Phi_{jk} \dots\dots\dots (C.5)$$

C.2.3 特征向量乘积指标可按公式 (C.6) 进行计算, 模态分量加和指标可按公式 (C.7) 进行计算:

$$ECP_i = \prod_{k=1}^m |\Phi_{ik}| \dots\dots\dots (C.6)$$

$$MSSP_i = \prod_{k=1}^m |\Phi_{ik}| \dots\dots\dots (C.7)$$

C.2.4 原点留数法的指标可按公式 (C.8) 进行计算:

$$DPR = \Phi \otimes \Phi \Lambda^{-1} \dots\dots\dots (C.8)$$

C.2.5 有效独立法的有效独立系数可按公式 (C.9) 和公式 (C.10) 进行计算:

$$E_D = \text{diag}(QQ^T) \dots\dots\dots (C.9)$$

$$\Phi = QR \dots\dots\dots (C.10)$$

C.2.6 改进的MinMAC法可按下列步骤进行:

- a) 根据经验和结构特点选择初始若干传感器位置 (少于所需传感器数目);
- b) 增加一个待选传感器位置, 按照公式 (C.1) 计算 MAC 矩阵并存储最大的非对角元, 然后更换增加的传感器为另一个待选传感器位置, 重新计算 MAC 矩阵并存储最大的非对角元, 这样继续下去直至所有的待选传感器位置都被计算过。然后比较所存储的各个最大的非对角元, 选择其中最小者, 在其所对应的位置布设一个传感器;
- c) 按照第 b 步的方法重复增加传感器, 直到所需要的传感器数目为止。

C.2.7 模态矩阵的QR分解法可按下列步骤进行:

- a) 首先对结构振型矩阵的转置 Φ^T 进行正交三角分解 (QR 分解);
- b) 然后选择分解后的正交矩阵 Q 的前 s 列所对应的位置布设传感器。

C.2.8 特征值灵敏度法可按下列步骤进行:

- a) 设结构损伤只引起刚度的变化, 而质量的变化可忽略不计;
- b) 计算特征向量的变化, 特征向量的变化可按公式 (C.11)、公式 (C.12) 和公式 (C.13) 计算:

$$\Delta\phi_i = F(K)\delta A \dots\dots\dots (C.11)$$

$$F(K) = \left(\sum_{r=1}^n \frac{-\phi_r^T K_1 \phi_r}{\lambda_i - \lambda_r} \phi_r, \sum_{r=1}^n \frac{-\phi_r^T K_2 \phi_r}{\lambda_i - \lambda_r} \phi_r, \sum_{r=1}^n \frac{-\phi_r^T K_3 \phi_r}{\lambda_i - \lambda_r} \phi_r, \dots, \sum_{r=1}^n \frac{-\phi_r^T K_L \phi_r}{\lambda_i - \lambda_r} \phi_r \right) \dots\dots\dots (C.12)$$

$$\delta A = \{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_L\}^T \dots\dots\dots (C.13)$$

- c) 按照有效独立法的相似过程构造 Fisher 信息矩阵，按公式 (C. 14) 计算：

$$A = F(K)^T F(K) \dots\dots\dots (C. 14)$$

- d) 依次删除对信息阵独立性贡献最小的行，最后保留的行即为传感器的布设位置。

附 录 D
(规范性附录)
桥梁结构健康监测系统验收表

D.1 硬件部分

桥梁结构健康监测系统验收表（硬件部分）见表D.1。

表D.1 桥梁结构健康监测系统验收表（硬件部分）

序号	设备名称及型号	数量	参数	工作状态	是否满足合同要求
附件： 1、硬件采购证明材料。 2、系统整体布置详图。					
验收人： (单位盖章) 年 月 日					

D.2 软件部分

桥梁结构健康监测系统验收表（软件部分）见表D.2。

表D.2 桥梁结构健康监测系统验收表（软件部分）

序号	项目	合同要求	工作状态	是否满足合同要求
1	系统整体			
2	数据采集与传输子系统			
3	质量安全评估与预警子系统			
4	数据库管理子系统			
验收人： （单位盖章） 年 月 日				