**{{ bridge\_name }}**

**结构健康监测系统综合评估报告**

**同济大学桥梁工程系**

**{{ date\_range }}**

# 概述

## 工程概况

## 评估依据

本次评估的依据主要包括：已建的健康监测系统数据、日常巡检数据以及专项检测数据。

桥梁健康监测系统作为一个综合性系统工程，其核心任务是实时监测大桥的运营环境以及由环境引起的结构响应，如交通荷载、温度荷载和风荷载等荷载信息，进行数据存储和管理，实时或离线获取行车和结构的双重状态信息，为结构全寿命期的安全、高效、经济运营提供成套技术支撑。健康监测系统主要包括自动化传感测试子系统、数据处理与控制子系统、中心数据库子系统、用户界面子系统、预警与评估子系统。

## 技术标准

《城市桥梁养护技术标准》（CJJ99-2018）

《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG TH21-2011）

《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64-2015）

《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》（JTT 1037-2016）

## 评估内容

本次评估重点分析健康监测系统的监测数据，深入挖掘监测数据的特征，建立特征与结构状态之间的定量指标，并结合人工巡检和专项检测数据，对桥梁的运营状态做出定量评定。本次评估的主要目的及意义如下：

1）利用已建的桥梁结构健康监测系统，实现桥梁的电子化、信息化和智能化管理。为湾头大桥的全寿命周期管养提供数字化和信息化档案。

2）综合评估桥梁运营状态。基于结构自动化监测结果进行统计分析，并结合桥梁巡检结果，对桥梁进行安全状况评定，提升了桥梁安全状态评估的全面性、整体性和准确性。

3）全面掌握桥梁运营状况，为桥梁的日常运营管养提供依据和技术支撑。

4） 诊断桥梁健康监测系统自身的运营性能，实时诊断监测数据的可靠性，保障数据后处理的源数据准确性。结构健康监测系统融合了实时健康监测、实时安全评估技术和桥梁巡检工作。此系统提高了结构健康监测经济效益的同时，全面提高了大桥结构巡检养护客观性、整体性和精确度。

# 数据质量评估

## 数据质量评估方法

传感器的工作状态直接影响桥梁数据处理结果的准确性，因此在数据处理之前有必要进行准确的数据预处理，并及时发现和更换故障传感器。传感器的工作状态评估结果主要分为以下三类，其中异常数据的规定可根据分析目标从后文中选择，以小时区间段为分析对象，确定该时段的主要异常类型，忽略可能存在的多种局部异常共存现象，若存在因停电导致的传感器监测数据文件的缺失，在计算效率比时应去除该时段的影响。传感器的效率比计算方法为：传感器正常工作时段/传感器总工作时段。

从传感器的效率比分布情况可见其区间分许具有较为明显的阶梯性，因此建议分为以下四类：

1. 最近半年内，传感器的监测数据除缺失外仅存在少量非连续性的异常状态，该状态下可认为传感器处于正常工作状态，计算传感器效率比应在90%以上。
2. 最近半年时间内，传感器监测到的数据除缺失外部分处于连续性异常状态，该状态下需合理分析传感器的异常类型，并从监测数值上分析可能存在的原因，计算传感器效率比，该状态下效率比应在90%至60%之间。
3. 最近半年时间内，传感器监测到的数据除缺失外大ⅡⅡ多处于连续性异常状态，该状态下需合理分析传感器的异常类型，并从监测数值上分析可能存在的原因，计算传感器效率比，该状态下效率比应在60%至30%之间。
4. 最近半年时间内，传感器的监测数据几乎完全处于异常状态，该状态下效率比应在30%以下，可判定为故障传感器。

对于Ⅰ类传感器，其工作状态正常，稳定性好，无需更换；Ⅱ类传感器的工作状态相对稳定，可继续服役于该健康监测系统，但在经济允许条件下宜更换；Ⅲ类传感器的工作状态不稳定，异常时间段较多，宜更换；Ⅳ类传感器为故障传感器，应立即更换。

传感器的综合评分权重宜根据传感器的功能及对结构状态评估的指导意义划分，同时结合传感器的数量确定综合评分权重，一般环境监测传感器的比重相对较低，结构荷载次之，结构响应传感器的权重最高，可分为一、二、三级。以外滩大桥为例，其中风速仪和三向加速度本身重要性相对较低，且传感器数量少，故总权重较少为5%，而环境温湿度仪虽然本身重要性较低，但测点布置多，故采用15%权重，其余均采用此类评分方式，然后根据各类传感器的效率比结合权重计算最终评分。亦或是根据每一类传感器的每一个测点的质量等级，计算得到该类传感器的综合质量等级再结合权重计算最终评分。

传感器根据其监测物理量不同，其异常的模式往往不同，根据该项目桥梁的特点，可分为动态响应监测传感器、静态响应监测传感器和环境监测传感器。其中动态响应监测传感器中主要是加速度传感器，因其采样频率高，变化速度快，变化幅值大，对大跨桥梁，一般采用的是力平衡式传感器，将电信号转换为数值信号，该过程受激励水平和噪声等因素的综合作用，加之传感器本身使用年限的增加出现的性能退化，产生的异常类型如下所述：

1. 小值异常：该类异常出现频率极高，振动幅值大多分布在-0.1mg~0.1mg范围内，且因响应数值小以及传感器故障等因素加持，其表现形式一般为方波，随机震荡，并伴随一定的局部异常值出现的形式。
2. 非对称响应异常：该类异常出现概率中等，其表现形式为响应在某一侧（如>0mg）范围内正常，但在另一侧则异常，通常表现为小值形式，及振动幅值一般在0.5mg范围内。
3. 非正常响应数据：该类异常出现的概率中等，其表现形式为从振动时域水平看，无明显的异常，但是综合同一类型不同位置传感器的相关性可见其数据非正常。
4. 振动幅值异常：该类异常出现概率中等，其表现形式为振动幅值比正常加速度响应小一个数据量级，但是振动幅值及频率分析正常，但因幅值较小，可能会由于精度不足导致出现方波现象，考虑可能是供电电压等方面出现的问题。
5. 趋势项：出现的概率不大，动态响应监测值正常，但因各方面因素影响，其整体出现一定的趋势。
6. 异常值：出现概率不大，动态响应监测值正常，在局部点处出现明显超出正常振动幅值范围的数据。
7. 缺失：出现的概率大，具体原因可能因为停电或其他因素。

加速度传感器除上述异常外可能存在其他未发现的异常类型，其中异常4在特殊情况下可作为正常数据分析，5可经过去趋势处理后为正常数据，6可替换局部异常值，7对于非连续性要求的数据分析影响不大。因此在异常统计时需重点关注前4项异常，比计算传感器的工作效率比。

静态监测数据以位移传感器为主要代表，斜拉桥和拱桥的梁端位移监测数据中主要是由结构温度引起的梁端位移变化，无明显的动态成分，其出现异常可能是小时区段内的偏离正常响应趋势的局部异常值和缺失。主梁挠度和桥塔的倾角监测数据中包含一定的动态变化成分，但因采样频率为1Hz，对结构的动态分析无明显帮助，其有效成分仍为静态变化成分，其异常主要是异常响应值和缺失，从而导致的小时区段内的静态成分明显偏离正常趋势。应变传感器采样频率为1Hz，监测响应包含部分动态响应成分，存在明显的温致应变成分，主要异常为局部截断、响应异常值、缺失等。

环境监测中以温湿度传感器和结构温度传感器为代表，其数据异常的模式与静态监测数据基本相同，因其变化成分主要是静态成分，波动不大，出现的异常主要是局部时段内的明显偏离正常趋势的异常响应和缺失。

## 数据质量评估结果

本报告以小时为时间段进行数据评估，忽略1小时时间间隔内的微小异常，统计主要异常，评估加速度及温度传感器的工作状态，统计结果如表格 1所示。状态评估的依据为效率比，即正常工作时段与总工作时段对比，其中效率比在30%以下为Ⅳ类，30%~60%为Ⅲ类，60%~90%为Ⅱ类，90%以上为Ⅰ类。

在对传感器评分时，同样以效率比作为分数，并且以传感器数量作为权重加权得到健康监测系统的得分。评分结果见表格 2。

表格 1 传感器数据质量评估结果

{{table\_sensors\_evaluate}}

表格 2 传感器数据质量评分

{{table\_sensors\_score}}

各传感器全时段的质量评估结果见图 1至图 5

{{figure\_acc\_preprocess}}

图 1 结构加速度数据质量评估结果

{{figure\_vic\_preprocess}}

图 2 拉索加速度数据质量评估结果

{{figure\_str\_preprocess}}

图 3 应变数据质量评估结果

{{figure\_dis\_preprocess}}

图 4 位移数据质量评估结果

{{figure\_tmp\_preprocess}}

图 5 温度数据质量评估结果

{{figure\_hum\_preprocess}}

图 6 湿度数据质量评估结果

{{figure\_gps\_preprocess}}

图 7 GPS数据质量评估结果

{{figure\_ian\_preprocess}}

图 8 倾角数据质量评估结果

{{figure\_set\_preprocess}}

图 9 沉降数据质量评估结果

{{figure\_cbf\_preprocess}}

图 10 索力数据质量评估结果

{{figure\_wsd\_preprocess}}

图 11 风速数据质量评估结果

{{figure\_wdr\_preprocess}}

图 12 风向数据质量评估结果

# 运营环境分析

## 温湿度

环境温度对结构的静力和动力特性均有较大的影响，因此准确把握桥址处环境温度以及结构构件温度具有十分重要的意义，尤其对于结构状态评估。

{{figure\_tmp\_time\_history}}

图 13 温度原始数据

{{figure\_tmp\_rms}}

图 14 温度数据均方根

表格 3 温度均方根数据汇总表

{{table\_tmp\_rms}}

{{figure\_tmp\_mean}}

图 15 温度数据均值

表格 4 温度均值数据汇总表

{{table\_tmp\_mean}}

{{figure\_hum\_time\_history}}

图 16 湿度原始数据

{{figure\_hum\_rms}}

图 17 湿度数据均方根

表格 5 湿度均方根数据汇总表

{{table\_hum\_rms}}

{{figure\_hum\_mean}}

图 18 湿度数据均值

表格 6 湿度均值数据汇总表

{{table\_hum\_mean}}

对温湿度的分析总结如下：

{{tmp\_summary}}

## 风荷载

风荷载作用下的结构稳定性研究具有重要意义。风荷载由平均风和脉动风组成，但目前对风场特性的研究存在很多假定，设计规范在风洞实验结果基础上做出一定简化便于设计，但对大跨及特殊桥梁，结构风致稳定性问题还依赖于风洞实验结果。通过对桥址位置处的风场进行实时监测，监测数据有助于分析设计规范中的参数选择是否合理，并且可利用风场实测特性验算结构在极端风环境下的安全状况。

{{figure\_wsd\_time\_history}}

图 19 风速原始数据

{{figure\_wsd\_rms}}

图 20 风速数据均方根

表格 7 风速均方根数据汇总表

{{table\_wsd\_rms}}

{{figure\_wsd\_mean}}

图 21 风速数据均值

表格 8 风速均值数据汇总表

{{table\_wsd\_mean}}

{{figure\_wdr\_time\_history}}

图 22 风向原始数据

{{figure\_wdr\_rms}}

图 23 风速数据均方根

{{figure\_wdr\_mean}}

图 24 风向数据均值及风向频率玫瑰图

对风向数据的分析总结如下：

{{wdr\_summary}}

对风速数据的分析总结如下：

{{wsd\_summary}}

## 交通荷载

交通荷载是桥梁结构的服务对象，也是公路桥梁在使用过程中引起桥梁安全性和耐久性问题的主要因素之一。近年来，超载问题日益突出，因超载产生的桥梁事故也层出不穷。

{{figure\_traf\_common\_analysis}}

图 25 交通量

{{figure\_traf\_lane}}

图 26 车道分析

{{figure\_traf\_speed}}

图 27 车速分析

{{figure\_traf\_axle}}

图 28 车轴分析

对交通荷载数据的分析总结如下：

{{traf\_summary}}

# 结构数据分析与安全评估

## 主梁加速度数据分析

结构在各种荷载作用下，会产生随机振动，加速度传感器监测构件测点处的加速度实时数据，利用测量的加速度时程信息，可以得到结构在不同运营时间段的频率信息。

{{figure\_acc\_time\_history}}

图 29 主梁加速度原始数据

{{figure\_acc\_rms}}

图 30 主梁加速度均方根分析结果

表格 9 主梁加速度均方根数据汇总表

{{table\_acc\_rms}}

{{figure\_acc\_mean}}

图 31 主梁加速度均值分析结果

表格 10 主梁加速度均值数据汇总表

{{table\_acc\_mean}}

{{figure\_acc\_OMA1}}

{{figure\_acc\_OMA2}}

{{figure\_acc\_OMA3}}

图 32 主梁频率及阻尼分析结果

对加速度数据的分析总结如下：

{{acc\_summary}}

## 拉索加速度分析

桥梁拉索在各种荷载作用下，会产生随机振动，加速度传感器监测构件测点处的加速度实时数据，利用测量的加速度时程信息，可以得到结构在不同运营时间段的频率信息。

{{figure\_vic\_time\_history}}

图 33 拉索加速度原始数据

{{figure\_vic\_rms}}

图 34 拉索加速度均方根分析结果

表格 11拉索加速度均方根数据汇总表

{{table\_vic\_rms}}

{{figure\_vic\_mean}}

图 35 拉索加速度均值分析结果

表格 12拉索加速度均值数据汇总表

{{table\_vic\_mean}}

{{figure\_vic\_OMA}}

图 36 拉索频率及阻尼分析结果

对拉索数据的分析总结如下：

{{traf\_summary}}

## 索力数据分析

{{figure\_cbf\_time\_history}}

图 37 索力原始数据

{{figure\_cbf\_rms}}

图 38 索力均方根

表格 13索力均方根数据汇总表

{{table\_cbf\_rms}}

{{figure\_cbf\_mean}}

图 39 索力均值

表格 14索力均值数据汇总表

{{table\_cbf\_mean}}

对索力数据的分析总结如下：

{{cbf\_summary}}

## GPS数据分析

{{figure\_gps\_time\_history}}

图 40 GPS原始数据

{{figure\_gps\_rms}}

图 41 GPS均方根

表格 15 GPS均方根数据汇总表

{{table\_gps\_rms}}

{{figure\_gps\_mean}}

图 42 GPS均值

表格 16 GPS均值数据汇总表

{{table\_gps\_mean}}

对GPS数据的分析总结如下：

{{gps\_summary}}

## 倾角数据分析

{{figure\_ian\_time\_history}}

图 43 倾角原始数据

{{figure\_ian\_rms}}

图 44 倾角均方根

表格 17 倾角均方根数据汇总表

{{table\_ian\_rms}}

{{figure\_ian\_mean}}

图 45 倾角均值

表格 18 倾角均值数据汇总表

{{table\_ian\_mean}}

对倾角数据的分析总结如下：

{{ian\_summary}}

## 沉降数据分析

{{figure\_set\_time\_history}}

图 46 沉降原始数据

{{figure\_set\_rms}}

图 47 沉降均方根

表格 19 沉降均方根数据汇总表

{{table\_set\_rms}}

{{figure\_set\_mean}}

图 48 沉降均值

表格 20 沉降均值数据汇总表

{{table\_set\_mean}}

对沉降数据的分析总结如下：

{{set\_summary}}

## 应变数据分析

针对结构的局部力学特征，应变传感器具有重要的作用，良好的应变监测设计能够作为结构局部运行状态判定的重要依据，同时可利用其监测数据计算结构的模态等整体性能指标，因此应变传感器在结构的性能评估中具有重要意义。但结构的局部应变受温度、风荷载及车辆荷载的影响显著，在分析中需明确不同作用对应的响应成分，近年来在中小跨径上，这些作用分离效果较好，可用响应数据进行车辆的称重，与动态称重系统交叉验证，但是在大跨桥梁中，应变的影响因素众多，响应成分复杂，准确的分离各种成分具有较大挑战。同时结构应变是作为钢结构疲劳计算的重要依据。

{{figure\_str\_time\_history}}

图 49 应变原始数据

{{figure\_str\_rms}}

图 50 应变均方根

表格 21 应变均方根数据汇总表

{{table\_str\_rms}}

{{figure\_str\_mean}}

图 51 应变均值

表格 22 应变均值数据汇总表

{{table\_str\_mean}}

对应变数据的分析总结如下：

{{str\_summary}}

## 位移数据分析

{{figure\_dis\_time\_history}}

图 52 位移原始数据

{{figure\_dis\_rms}}

图 53 位移均方根

表格 23 位移均方根数据汇总表

{{table\_dis\_rms}}

{{figure\_dis\_mean}}

图 54 位移均值

表格 24 位移均值数据汇总表

{{table\_dis\_mean}}

对位移数据的分析总结如下：

{{dis\_summary}}

# 相关性分析

{{figure\_corr}}

图 55 相关性分析结果

对相关性的分析总结如下：

{{cor\_summary}}

# 评估

{{figure\_ass1}}

图 56 评估结果

{{figure\_ass2}}

图 57 评估结果

对结构评估的分析总结如下：

{{ass2\_summary}}

# 结论与建议

在本季度内，桥梁没有受到极端荷载，结构的整体状态良好，结构响应无明显的异常。

在本次监测时间段内，湾头大桥的健康监测系统中部分传感器出现连续的缺失、异常监测数据等情况，在养护过程中，应定期根据评估报告，检测传感器的故障原因，并及时更换部分故障传感器。其中部分梁端位移计监测数据出现异常，应对此传感器运营情况进行检查。

{{all\_summary}}