

# 泰兴市滨江大桥桥梁健康监测系统

## 项 目 方 案

# 目录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1 项目概况 .....           | 1  |
| 1.1 桥梁概况 .....         | 1  |
| 2 项目建设目的及意义 .....      | 1  |
| 2.1 项目建设必要性 .....      | 1  |
| 2.1.1 国内桥梁现状 .....     | 1  |
| 2.1.2 政策解读 .....       | 2  |
| 2.1.3 传统检测技术的不足 .....  | 3  |
| 2.2 项目建设可行性 .....      | 4  |
| 2.3 项目建设目的及意义 .....    | 5  |
| 3 桥梁特点分析及监测对策 .....    | 6  |
| 3.1 桥梁特点分析 .....       | 6  |
| 3.1.1 桥梁病害 .....       | 6  |
| 3.1.2 维修方案 .....       | 11 |
| 3.1.2 运营风险 .....       | 12 |
| 3.2 测点总体布置方案 .....     | 13 |
| 3.3 监测方案 .....         | 14 |
| 3.3.1 环境温湿度监测 .....    | 14 |
| 3.3.2 桥面风速风向监测 .....   | 14 |
| 3.3.3 桥面铺装层温度监测 .....  | 15 |
| 3.3.4 车辆荷载监测 .....     | 15 |
| 3.3.5 主梁竖向位移监测 .....   | 16 |
| 3.3.6 主梁关键截面应变监测 ..... | 16 |
| 3.3.7 主拱关键截面应变监测 ..... | 17 |
| 3.3.8 主梁竖向振动监测 .....   | 18 |
| 3.3.9 船舶撞击监测 .....     | 18 |
| 3.3.10 伸缩缝工况监测 .....   | 19 |
| 3.3.11 锚头腐蚀监测 .....    | 19 |
| 3.3.12 桥面视频监控 .....    | 20 |
| 4 监测系统组成 .....         | 21 |
| 4.1 数据采集与传输子系统 .....   | 21 |

|       |                      |                   |
|-------|----------------------|-------------------|
| 4.1.1 | 数据采集与传输的技术要求 .....   | 21                |
| 4.1.2 | 数据采集与传输方案 .....      | 22                |
| 4.2   | 数据管理与分析子系统 .....     | 22                |
| 4.2.1 | 概述 .....             | 22                |
| 4.2.2 | 系统功能需求 .....         | 23                |
| 4.2.3 | 数据管理与分析子系统总体方案 ..... | 25                |
| 4.3   | 用户界面子系统 .....        | 26                |
| 4.3.1 | 数据分析 .....           | 26                |
| 4.3.2 | 结构预警 .....           | 26                |
| 5     | 系统维护与数据分析 .....      | 30                |
| 5.1   | 系统维护 .....           | 30                |
| 5.1.1 | 系统软件维护 .....         | 30                |
| 5.1.2 | 系统硬件维护 .....         | 30                |
| 5.2   | 数据分析 .....           | 31                |
| 5.2.1 | 报警阈值 .....           | 31                |
| 5.2.2 | 结构健康度评估 .....        | 32                |
| 5.2.3 | 数据分析 .....           | 32                |
| 6     | 项目预算 .....           | <b>错误! 未定义书签。</b> |

# 1 项目概况

## 1.1 桥梁概况

滨江大桥位于江苏省泰兴经济开发区北侧，西邻长江，横跨如泰运河入江口，于 2006 年建成通车。桥梁所在沿江路为南北向工业园区主干道路，交通量一般，主要通行附近工业园区的运输车辆。

滨江大桥主桥采用三跨连续下承式钢管混凝土系杆拱，计算跨径为 48+72+48m，北引桥采用（20+20）m 预应力砼空心板梁，南引桥采用单孔 20m 预应力砼空心板梁，桥梁总长 231.85m。滨江大桥为斜交体系桥梁（主桥与航道斜交 20°）。

（1）道路等级：市政道路。

（2）设计荷载：汽车-超 20 级；挂车-120；

（3）航道等级：V；

（3）级限制性航道，BM=45m，b=39m，HM=5m，h=3.5m，最高通航水位 4.65 米(黄海高程)。

（4）桥面宽度：总宽 22m（2.45m 人行道+1.55m 吊杆区+14m 机动车道+1.55m 吊杆区+2.45m 人行道）；

（5）地震烈度：基本烈度为 6 度，按照 7 度设防。

## 2 项目建设目的及意义

### 2.1 项目建设必要性

#### 2.1.1 国内桥梁现状

随着我国经济的飞速发展和交通基础设施建设的加快，桥梁建设发展迅速。然而，随着大量桥梁建成通车，桥梁的运营安全状态形势日趋严峻：大量的旧桥，有的在设计与施工之初就已埋下隐患；有的设计荷载早已不能满足现行车辆荷载的使用要求；有的使用过程中经常超载运营，损伤严重；有的在洪水、台风等自然灾害作用下功能受损，成为危桥。这些病桥、危桥，如不能及时得到发现和维

修，很有可能在运营过程中发生突然破坏和倒塌，带来严重的人民生命财产损失和社会政治影响。例如 2019 年 10 月 10 日傍晚 18:10 左右，江苏省无锡市锡山区 312 国道上海方向 K135 处、锡港路上跨桥出现桥面侧翻。经现场初步勘测，桥下被压小车 3 辆（其中一辆系停放车辆，无人）。截至 2019 年 10 月 11 日 5 时，事故共造成 3 人死亡，2 人受伤。此次高架桥侧翻事故引起社会广泛关注，也为桥梁管理养护单位提出警醒。



图 2.1-1 无锡高架桥垮塌

### 2.1.2 政策解读

城市生命线是保障城市安全运行的重要基础设施，涉及的行业领域众多，其中包含桥梁、道路。近年来，城市发展迅速，安全风险不断增大，诸如路面塌陷、桥梁倒塌等事故在全国各地时有发生。

党中央、国务院以及江苏省委、省政府高度重视城市生命线安全工程建设工作。

2021 年 9 月 22 日，国务院安委办印发关于推广城市生命线安全工程经验做法切实加强城市安全风险防范工作的通知。要结合安全发展示范城市创建工作，开展城市安全风险综合监测预警，构建全面统筹领导、统一监测调度、联动响应处置的工作体系。要聚焦城市安全管理的主要问题和突出风险，积极借鉴典型做法，加大试点示范工作力度。

2022 年 3 月 6 日，江苏省人民政府办公厅印发《省政府办公厅关于成立城市生命线安全工程建设推进工作领导小组的通知》（苏政传发〔2022〕46 号）。

2022 年 5 月 27 日，江苏省城市生命线安全工程建设推进工作领导小组第一

次会议，试点先行推动城市生命线安全工程建设开好局、起好步。

2023年5月11日，住房和城乡建设部在安徽省合肥市召开推进城市基础设施生命线安全工程现场会，会议表示，要认真贯彻落实习近平总书记关于城市工作的重要论述和党的二十大精神，推进城市基础设施生命线安全工程，通过数字化手段，及早发现和管控风险隐患，提高城市安全保障能力，维护人民生命财产安全。要在深入推进试点和总结推广可复制经验基础上，全面启动城市基础设施生命线安全工程建设。要开展城市基础设施普查，编制城市安全风险清单，配套建设物联智能感知设备，加快城市基础设施监管信息系统整合，完善隐患应急处置流程办法，切实防范化解安全风险。

2023年7月12日，江苏省城市生命线安全工程建设推进工作领导小组第二次会议，全面调度城市生命线安全工程建设工作进展情况，部署安排重点任务，全力打造人民群众的放心线安心线，不断提高城市本质安全水平，在推进社会治理现代化上实现新提升。建设覆盖全省的设区市生命线安全工程，一期工程聚焦聚焦燃气爆炸、城市内涝、地下管线交互风险、第三方施工破坏、供水爆管、桥梁倒塌、道路塌陷等7个风险场景，开展“综合监管”和“智慧监测”，打造省、市、县三级监管系统，建立全省统一的标准规范、保障体系以及行业监管与协同联动机制，实现三级监管系统互联互通、数据共享、业务协同，系统提升设区市基础设施规范化、智慧化管理水平。

城市基础设施安全已得到了广泛关注，利用桥梁健康监测等智慧化手段可尽早发现桥梁运营隐患，提高养护管理水平，提升桥梁运营安全，同时也可评估滨江大桥维修后的使用效果。

### 2.1.3 传统检测技术的不足

传统上，对桥梁结构的评估通过人工目测检查或借助于便携式仪器测量得到的信息进行。人工桥梁检查分为经常检查、定期检查和特殊检查。但是人工桥梁检查方法在实际应用中较大的局限性，不足之处主要表现在：

**需要大量人力、物力并有诸多检查盲点。**这对较大型桥梁尤其突出。像滨江大桥，结构型式复杂，加之很多构件和隐蔽工程部位难以直接接近检查；

**主观性强，难于量化。**检查与评估的结果主要取决于检查人员的专业知识水

平以及现场检测的经验。经过半个多世纪的发展，虽然桥梁的分析设计与施工技术已日趋完善，但对某些响应现象，尤其是损伤的发展过程，尚处于经验积累中，因此对于检测结果进行定量化的描述至关重要；

**缺少整体性。**人工检查以单一构件为对象，而采用现代机械、光学、超声波和电磁波等技术的检测工具，都只能提供局部的检测和诊断信息，而不能提供整体全面的结构健康检测和评估信息；

**影响正常交通运行。**桥梁检测通常需要搭建观察平台或用观测车辆，不可避免需要实施交通控制；

**周期长，时效性差。**单次检测结果无法判断桥梁的结构变化趋势，因此往往需要历年的结果对比，发现问题的时间周期较长。在结构出现异常时，不能向决策者和公众提供即时信息。

由于传统桥梁检测方法的上述诸多不足，我们有必要综合考虑桥梁健康监测系统，实现对桥梁的实时监测，并辅以传统检测的方法，对健康监测系统进行补充，以实现桥梁监测与检测的结合，完成桥梁的智慧化、信息化管理。

## 2.2 项目建设可行性

随着现代传感技术、计算机与通讯技术、信号分析与处理技术及结构振动分析理论的迅速发展，桥梁结构健康监测与安全评价技术近年来已成为国内外工程界和学术界关注的热点。

随着传感器技术、网络技术、微电机系统（MEMS）和全球定位系统（GPS）等检测设备、材料、通信传输技术的迅猛发展，监测系统的精确性、稳定性的大幅度提高，已经能够满足日常的管理维护要求。

监测体系理论与设计日益成熟，克服了早期实时健康监测系统单一的数据采集、有限范围的主体结构监测等缺陷，逐步形成结构技术监测内外结合、设施主体与环境因素相结合、数据采集与数据分析相结合、日常管理与应急处置相结合、档案记录与信息互通结合的完整体系，这为桥梁监测管理提供了坚实的理论基础。

从实际应用来看：通过对传感器的革新和自动远程监控技术的更新换代，桥梁结构健康监测与安全评价系统正向简单易装、经济可行、持久可靠的方向发展，并已在或将在世界许多桥梁中得到应用。

### 2.3 项目建设目的及意义

针对上文中提出的国内桥梁“重建轻养”及传统人工检测技术的不足两大困境，结合桥梁实际情况，希望通过建立健康监测系统达到以下目标：

- 指导类似桥梁结构健康监测系统的设计、施工、验收、运营等全过程工作，实现监测内容与测点布置、数据采集、数据传输通信的标准化；
- 明确桥梁监测系统运行管理流程，为各级桥梁养护管理人员提供一个先进的信息化平台，进一步提升桥梁养护工作的技术水平；
- 通过信息化手段，记录突发事件、并通过预警设置服务于日常桥梁养护工作，保障桥梁运行安全。



### 3 桥梁特点分析及监测对策

#### 3.1 桥梁特点分析

滨江大桥主桥为系杆拱结构,计算跨径为 48+72+48m,桥梁全长为 231.85m。本桥为单幅桥。

**荷载作用点到系杆:**外部荷载(如车辆荷载)首先作用于桥面上的荷载作用点。然后,荷载通过系杆传递到拱脚上。系杆起到了连接桥面和拱脚的作用,在承担荷载的传递过程中起到关键的支撑作用。

**拱脚到拱顶和主梁:**在拱脚处,荷载会分别传递到拱顶和主梁上。拱脚将荷载从系杆传递到拱顶和主梁,这两者在系杆拱桥结构中承担着重要的承载和传力作用。

**拱顶和主梁到桥墩:**荷载从拱顶和主梁传递到桥墩上。拱顶和主梁作为桥梁结构的关键部件,承载着荷载并将其传递到桥墩上。

**桥墩到地基:**荷载通过桥墩传递到地基上。桥墩作为系杆拱桥的支撑结构,通过地基将荷载传递到地面或地下,确保了整个桥梁结构的稳定性和安全性。

这个传力顺序确保了荷载从作用点到承受点的稳定传递,每个部件都起着关键的作用,共同确保了系杆拱桥的安全运行。

##### 3.1.1 桥梁病害

2016 年对滨江大桥进行了结构检测及承载能力评定,按《城市桥梁养护技术规范》(CJJ99-2003)进行评定,桥梁整体 BCI 为 87.77,技术状况为 B 级——良好状态。

1、外观检测如下:

(1)桥面铺装层磨耗,骨料外露,1 处坑槽,面积 0.15m<sup>2</sup>,1 处网裂,面积 16 m<sup>2</sup>,台背铺装层开裂;

(2)4#伸缩缝处轻微桥头跳车;

(3)伸缩缝均泥沙填塞,1#、3#伸缩缝锚固区混凝土碎裂,2#伸缩缝型钢变形,橡胶条脱落;

(4)护栏基座外侧面露筋锈蚀,露筋长度 0.2m;

(5) 两侧人行道路缘石多处胀裂，露筋锈蚀，两侧人行道近桥台处均有高差；

(6) 1#孔板梁底板擦伤破损，钢筋断裂，拱座 3 处破损，破损面积  $0.56 \text{ m}^2$ ，系梁底面近墩处多处露筋锈蚀，露筋长度  $15.9\text{m}$ ，横梁多处露筋锈蚀，露筋长度  $3.9\text{m}$ ，纵梁底面 5 处胀裂，露筋锈蚀，露筋长度  $1.3\text{m}$ ；

(7) 1#孔板梁底板 3 条纵向裂缝，总长  $49.0\text{m}$ ，宽度均已超限（允许最大缝宽  $0.10\text{mm}$ ）；

(8) 1#墩顶和 0#桥台渗水，盖梁及墩身多处混凝土破损，胀裂，露筋锈蚀，破损面积  $0.4 \text{ m}^2$ ，露筋长度  $2.0\text{m}$ ，0#桥台挡块 2 处胀裂，露筋锈蚀，露筋长度  $1.0\text{m}$ ；

(9) 支座脱空 12 个，东侧附挂管线漏水；



1#伸缩缝锚固区混凝土碎裂



2#伸缩缝锚固区混凝土开裂



2-1#拱脚混凝土开裂破损



2-2#系梁底露筋锈蚀



**2-1#墩混凝土胀裂**



**6-21#支座部分脱空**

## 2、锚头专项检查如下

2016 年共检测打开 15 个吊杆下锚头，其中 9 个锚室内上端空心；15 个锚室内夹具、钢绞线锈蚀，其中 2 个锈蚀较严重（2-1-1#、2-2-1#）；4 个吊杆内钢绞线缺失，其中 2-2-4#缺 3 根、2-2-6#缺 3 根、2-2-7#缺 2 根、2-2-8#缺 2 根，且缺失钢绞线的吊杆均位于西侧拱肋。



**2-2-4#吊杆缺失 3 根钢绞线**



**2-2-4#吊杆缺失 3 根钢绞线**



**2-2-7#吊杆缺失 2 根钢绞线**



**2-2-8#吊杆缺失 2 根钢绞线**

2022 年湖南智联科技股份有限公司对滨江大桥进行了结构检测及承载能力评定，按《城市桥梁养护技术规范》（CJJ99-2003）进行评定，滨江大桥主桥完好状态为合格级，桥梁结构构件有损伤，但不影响桥梁安全，滨江大桥引桥总体技术状况评估等级为 B 级，应进行保养小修。

1、外观检测如下：

(1) 全桥拱脚处普遍网裂， $S_{\text{总}}=5.1 \text{ m}^2$ ；涂层局部脱落；拱脚 2 处开裂、 $L_{\text{总}}=2.2\text{m}$ 、1 处破损， $S=0.04 \text{ m}^2$ 、1 处锈胀露筋， $L=0.2\text{m}$ ；拱肋顶板 3 处锈蚀；

(2) 中横梁 2 处锈胀， $L_{\text{总}}=0.6\text{m}$ ；1 处蜂窝麻面， $S=0.04 \text{ m}^2$ ；

(3) 系杆 137 处锈胀露筋， $L_{\text{总}}=38.8\text{m}$ ；5 处破损露筋， $S=0.22 \text{ m}^2$ ；1 处麻面露筋， $S=0.04 \text{ m}^2$ ；小纵梁 3 处锈胀露筋， $L_{\text{总}}=0.6\text{m}$ ；3 处破损， $S_{\text{总}}=0.16 \text{ m}^2$ ；4 处锈胀， $L_{\text{总}}=1\text{m}$ ；

(4) 挑梁 20 处锈胀露筋， $L_{\text{总}}=11\text{m}$ ；2 处破损露筋， $S_{\text{总}}=0.13 \text{ m}^2$ ；2 处破损， $S_{\text{总}}=0.07 \text{ m}^2$ 。

(5) 吊杆 4 处焊缝处锈蚀；

(6) 板梁共 3 条纵向裂缝， $L_{\text{总}}=30\text{m}$ ， $W_{\text{max}}=0.20\text{mm}$ ；2 处锈胀， $L_{\text{总}}=0.7\text{m}$ ；1 处刮蹭， $L=13\text{m}$ 。

(7) 盖梁 3 条横向裂缝， $L=9\text{m}$ ， $W_{\text{max}}=0.20\text{mm}$ ；8 处锈胀， $L_{\text{总}}=3.5\text{m}$ ；1 处网裂， $S=0.4 \text{ m}^2$ ；

(8) 墩柱 2 处竖向开裂， $L=2.4\text{m}$ ；16 处锈胀， $L_{\text{总}}=4.4\text{m}$ ；2 处混凝土剥落， $S=0.03 \text{ m}^2$ ；3 条横向裂缝， $L=2.0\text{m}$ ， $W_{\text{max}}=0.16\text{mm}$ ；2 处刮蹭；6 处破损露筋， $S_{\text{总}}=7.44 \text{ m}^2$ 。

(9) 2-1#墩柱南侧面严重胀裂、大面积破损露筋， $V=1.5 \times 3 \times 0.25\text{m}$ 。

(10) 台帽 1 处析白，1 处横向开裂， $L=2\text{m}$ ；1 处锈胀， $L=0.4\text{m}$ 。

(11) 6#台护坡 1 处开裂， $L=4\text{m}$ 。

(12) 8 个支座局部脱空 20%~50%，1 个支座剪切变形 15 度；钢垫板部分锈蚀。

(13) 伸缩缝堵塞；锚固砼粗骨料外露严重，普遍破损， $S_{\text{总}}=11.5 \text{ m}^2$ 、2 处开裂， $L_{\text{总}}=1.5\text{m}$ 、部分位置型钢高差

(14) 人行道 3 处破损露筋， $S_{\text{总}}=0.06 \text{ m}^2$ ， $H=0.01\text{m}$ ；37 条横向裂缝， $L_{\text{总}}=60\text{m}$ ， $W_{\text{max}}=0.14\text{mm}$ ；12 条纵向裂缝， $L_{\text{总}}=71.1\text{m}$ ， $W_{\text{max}}=0.15\text{mm}$ 。

(15) 栏杆多处破损、锈胀露筋。

(16) 桥面铺装 1 处车辙， $L=10\text{m}$ 。





2-1#墩严重胀裂锈蚀



5-5-3#钢组件锈蚀



3-1#拱肋锈蚀



5-2#系梁底面锈胀露筋



4#伸缩缝锚固区混凝土破损



栏杆破损

## 2、锚头专项检查

(1) 全桥 16 个下锚头钢绞线、夹片、锚具浮锈；33 个下锚头钢绞线、夹片浮锈；6 个下锚头钢绞线浮锈；8 个下锚头夹片浮锈；3 个锚具轻微锈蚀；2 个锚具、夹片锈蚀；2 个锚具、钢绞线锈蚀。

(2) 5-2-3#、5-2-6#、5-2-8#下锚头钢绞线均失效 3 束；5-2-4#、5-2-5#、5-2-9#下锚头钢绞线均失效 2 束；4-1-16#下锚头钢绞线、夹片浮锈，1 束钢绞线失效。2022 年检测过程中，有钢绞线失效的 7 个下锚头打开后未见有夹片掉落，其中，5-2-4#、5-2-5#、5-2-6#、5-2-8#下锚头的钢绞线失效数量与 2016 年 12 月份的检测结果一致，且 2016 年 12 月份检测时大部分钢绞线失效的夹片孔采用木块填塞，

而非夹片。



3.1-55-2-3#吊杆 3 束钢绞线失效



3.1-65-2-4#吊杆 2 束钢绞线失效



3.1-75-2-5#吊杆 2 束钢绞线失效



3.1-85-2-6#吊杆 3 束钢绞线失效



3.1-95-2-8#吊杆 3 束钢绞线失效



3.1-105-2-9#吊杆 2 束钢绞线失效

受桥区环境、交通荷载等不利因素影响，泰兴市滨江大桥整体病害情况仍处于发展趋势。

### 3.1.2 维修方案

根据《2023 年泰兴市滨江大桥维修工程施工图设计说明》，维修工程涉构件及更换、维修加固、防腐涂装等多个方面内容。详细桥梁维修内容汇总如下：

| 项目   | 内容                 |
|------|--------------------|
| 更换构件 | 更换全桥 78 根吊杆        |
|      | 更换引桥全部 180 个板式橡胶支座 |
|      | 重做全桥 4 道伸缩缝        |

|      |                                  |
|------|----------------------------------|
|      | 更换全桥 461.60m 防撞护栏                |
|      | 更换全桥 461.60m 人行道栏杆               |
| 维修加固 | 对 5#墩盖梁进行植筋挂网，增大截面加固             |
|      | 对拱座混凝土破损、钢板锈蚀部位进行钢板转锈稳锈涂装、环氧砂浆修复 |
|      | 对上下部结构混凝土破损露筋部位表观修复              |
|      | 空心板梁底板钻孔排水                       |
|      | 清理疏通泄水孔，补设缺失滤网                   |
| 防腐涂装 | 对桥梁拱座、系梁、横梁进行混凝土防腐涂装             |
|      | 对拱肋、盆式支座钢组件进行钢结构防腐涂装             |

### 3.1.2 运营风险

根据《2023 年泰兴市滨江大桥维修工程施工图设计说明》，本次维修工程涉构件及更换、维修加固、防腐涂装等多个方面内容。意在使桥梁恢复正常使用功能，满足原有设计技术标准、增强桥梁安全性和耐久性。确保桥梁能够长期稳定地为公众服务。

但本次维修工程未改变桥梁自有结构形式、桥区环境、交通荷载等运营环境和基础性状况，滨江大桥在运营中依然承受环境、车辆、风、地震等各种作用的不利影响，同时维修后自身材料也将不断退化，势必导致结构各部分不同程度的损坏和劣化。因此为了保障滨江大桥运营安全，需尽早完成滨江大桥结构健康监测系统的建设。

#### （1）灾害天气

滨江大桥位于江苏省泰兴经济开发区北侧，西邻长江，横跨如泰运河入江口，所在位置面临台风、暴雪、结冰、大雾等多种灾害性天气影响，强风天气对桥梁影响显著，尤其是在强风作用下可能会给结构带来风险。桥梁后期运营过程中依旧受到灾害天气不利影响。

#### （2）交通荷载

滨江大桥所在沿江路为南北向工业园区主干道路，主要通行附近工业园区的运输车辆。2016、2022 年检测均发现存在伸缩缝型钢变形、橡胶条脱落、锚固区混凝土碎裂等病害。病害成因主要是由于车辆交通荷载导致。桥梁后期运营过程中依旧受到交通荷载不利影响。

#### （3）环境温湿度变化

滨江大桥所属桥区环境，属北亚热带湿润季风气候区，冬季盛行西北气流，寒冷干燥；夏季温高湿润；春秋季气旋活动频繁，温和多雨。2016、2022 年检测发现索体存在钢绞线、夹片、锚具锈蚀等病害；上下部结构混凝土存在锈胀、露筋等病害，病害成因之一是由于环境温度的变化影响到混凝土构件的热胀冷缩，湿度变化则可能导致金属部件的腐蚀。桥梁后期运营过程中依旧受到环境温湿度变化不利影响。

（4）主梁线形变化

滨江大桥在长期的使用过程中，由于材料性能退化、结构损伤等因素可能导致主梁线形发生变化。2022 年检测中发现桥面标高实测值与理论值的最大偏差为 68mm。桥梁后期运营过程中受材料性能退化、结构损伤等因素依然可能导致主梁线形发生变化。

3.2 测点总体布置方案

滨江大桥结构健康监测系统，基于桥梁结构特点，根据经济实用性原则，其监测重点应为桥梁环境温湿度监测、桥面铺装层温度监测、桥面风速风向监测、船舶撞击、船撞视频监控、主梁竖向位移监测、车流量监控、主梁竖向振动监测、主梁关键截面应变监测、主拱关键截面应变、伸缩缝监测、锚头腐蚀监测、车辆荷载监测、桥面视频等。结合同类型桥梁监测的经验，对本系统的测点进行优化布置，共设置 14 个监测项目，具体测点布置方案如下：

表 3.2-1 滨江大桥健康监测系统监测项目

| 序号 | 监测类型 | 监测指标     | 数量 |
|----|------|----------|----|
| 1  | 环境   | 环境温湿度    | 1  |
| 2  | 作用   | 桥面风速风向   | 1  |
| 3  |      | 桥面铺装层温度  | 2  |
| 4  |      | 车辆荷载     | 2  |
| 5  |      | 主梁竖向位移   | 2  |
| 6  | 结构响应 | 主梁关键截面应变 | 6  |
| 7  |      | 主拱关键截面应变 | 12 |
| 8  |      | 主梁竖向振动   | 6  |
| 9  |      | 船舶撞击     | 4  |
| 10 |      | 伸缩缝工况    | 2  |
| 11 |      | 锚头腐蚀     | 3  |



|    |         |      |    |
|----|---------|------|----|
| 12 | 视频监控    | 船撞视频 | 2  |
| 13 |         | 车牌抓拍 | 2  |
| 14 |         | 桥面视频 | 4  |
| 15 | 合计（按测点） |      | 49 |

### 3.3 监测方案

#### 3.3.1 环境温湿度监测

**监测目的：**实时监测桥址区的环境温湿度数据，温度的变化可能会影响到混凝土构件的热胀冷缩，湿度变化则可能导致金属部件的腐蚀，为分析大桥在环境温度下结构受力的变形、结构状态与耐久性提供依据。

**技术要求：**对温湿度监测，采用温湿度传感器进行监测，满足各测点的量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置：**计划在滨江大桥第4跨上行跨中桥面布设1个测点对温湿度进行监测。

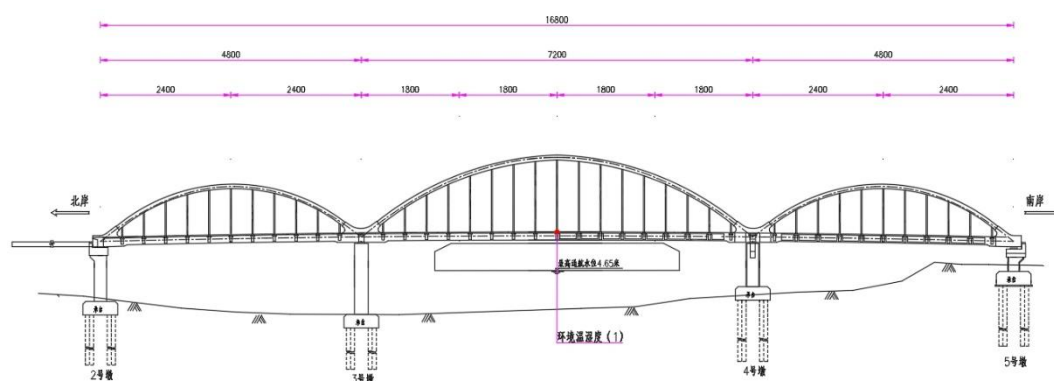


图 3.3-1 环境温湿度监测测点布点图

#### 3.3.2 桥面风速风向监测

**监测目的：**风是桥梁结构所面临的主要外部力之一。监测桥面风速和风向有助于评估风力对桥梁结构的影响程度。强风可能导致桥梁振动增大，甚至影响桥梁的稳定性和安全性，因此及时了解风速和风向对于采取相应的防护和维护措施至关重要。

**技术要求：**对桥面风速风向监测，采用超声波风速风向仪进行监测，满足各测点的量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置：**计划在滨江大桥第4跨上行跨中桥面布设1个测点对风速风向进

行监测。

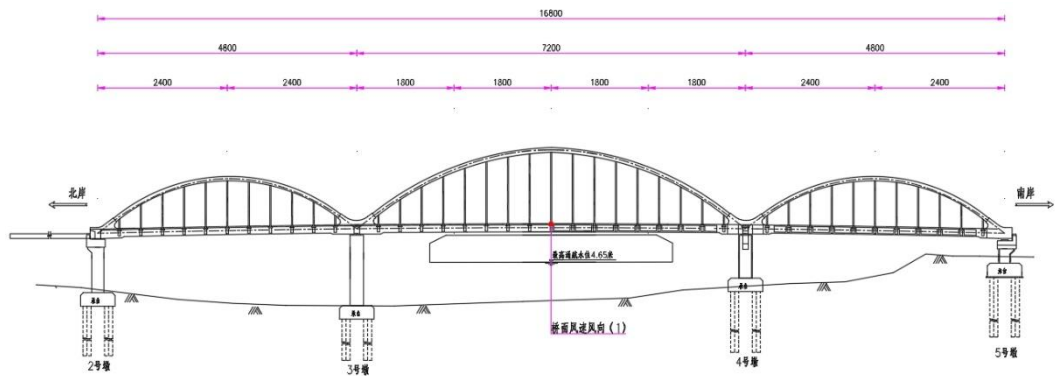


图 3.3-2 桥面风速风向监测测点布点图

3.3.3 桥面铺装层温度监测

**监测目的：**桥面铺装受雨雪天气影响，冬天易结冰，影响交通安全，因此有必要对桥面铺装层进行温度监测。可在高温时报警洒水养护，低温时报警消冰除雪。

**技术要求：**对桥面铺装层温度监测，采用 PT100 铂电阻温度计进行监测，满足各测点的量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置：**计划在滨江大桥第 4 跨上、下行跨中桥面各布设 1 个测点，全桥共计 2 个测点对桥面铺装层温度进行监测。

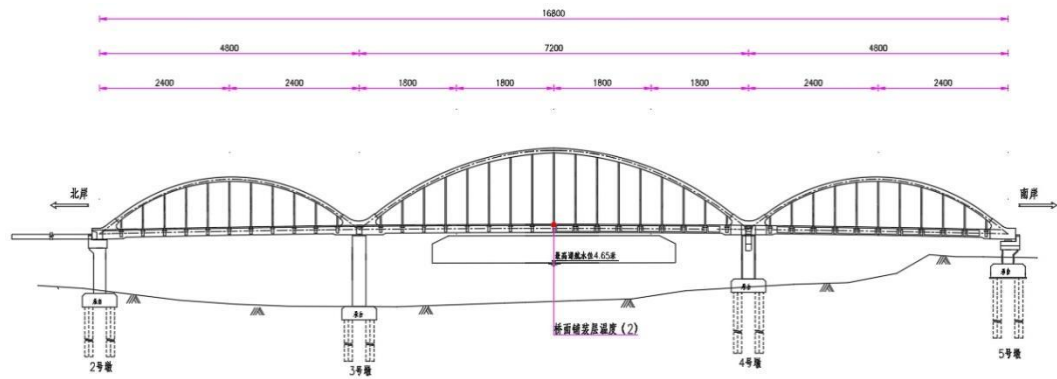


图 3.3-3 桥面铺装层温度监测测点布点图

3.3.4 车辆荷载监测

**监测目的：**通过车牌抓拍和称重系统记录桥梁结构在运营过程中通过的车辆车速、车型、车重、车流量等。为分析车辆荷载对桥梁结构的影响提供依据。

**技术要求：**对车辆荷载监测，采用压电薄膜传感器进行监测，满足各测点的

量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置:** 计划在滨江大桥引桥段距离主桥桥头 100 米处路面铺设压电薄膜，对车辆荷载进行监测。全桥共计 2 车道；计划在称重断面安装车牌抓拍系统，全桥共计 1 个测点。

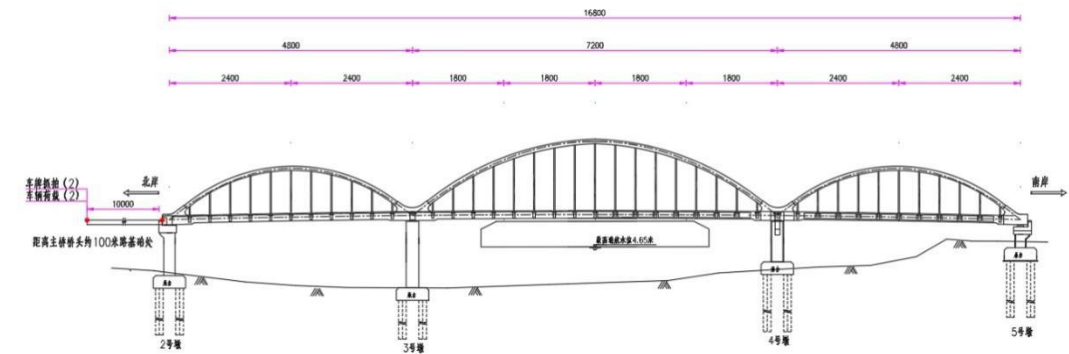


图 3.3-4 车辆荷载监测测点布点图

### 3.3.5 主梁竖向位移监测

**监测目的:** 通过实时监测桥梁竖向位移情况，了解在交通荷载、风荷载、温度荷载等荷载作用下大桥挠度的长期变化，为大桥工作状态动态显示及结构健康评估提供资料。

**技术要求:** 对主梁竖向位移监测，采用光电挠度仪进行监测，满足各测点的量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置:** 计划在滨江大桥第 4 跨上、下行跨中、四分点截面进行测点布设，同时于主墩处各布设 1 个基准点进行桥梁线形监测，全桥共计 2 套。

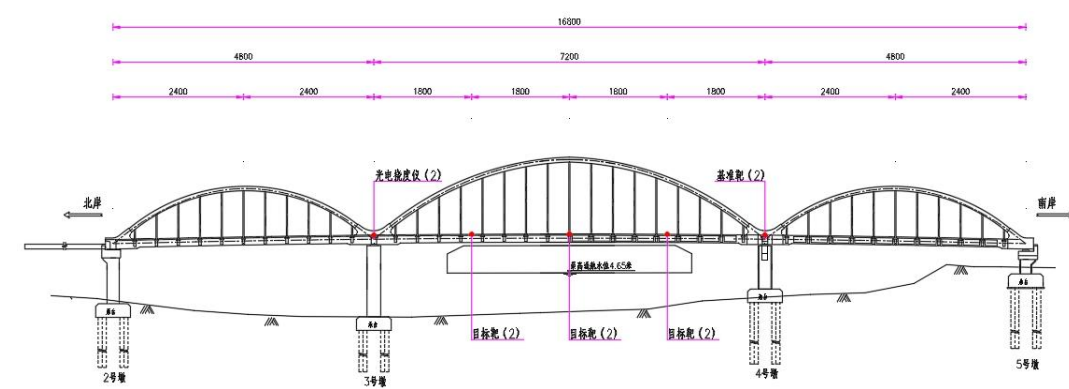


图 3.3-5 主梁竖向位移监测测点布点图

### 3.3.6 主梁关键截面应变监测

**监测目的:** 通过监测主梁关键截面的应变情况，可以评估桥梁结构的健康状

况和结构性能。关键截面的应变数据可以反映桥梁结构受力情况，包括荷载大小、变化趋势以及可能存在的异常情况，为结构健康评估提供重要数据支持。

**技术要求：**对主梁关键截面应变监测，采用振弦应变计进行监测，满足各测点的量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置：**计划在滨江大桥第 4 跨上、下行跨中、1/4 点、3/4 点各布设 1 个测点，全桥共计 6 个测点对主梁关键截面应变进行实时在线监测。

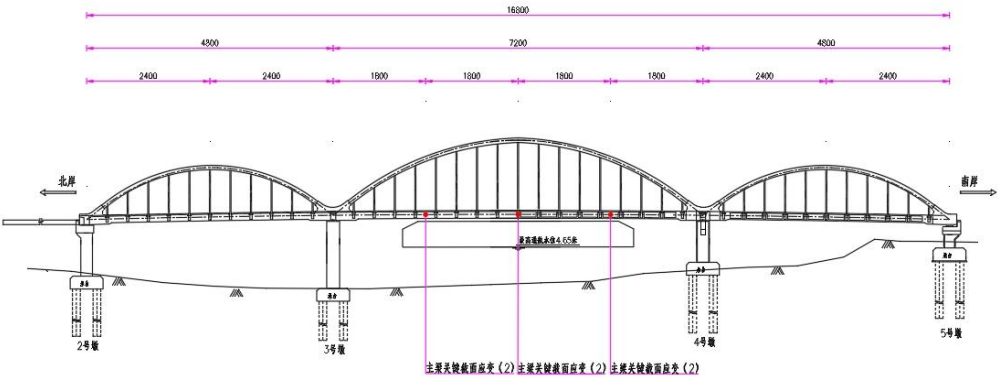


图 3.3-6 主梁关键截面应变监测测点布点图

3.3.7 主拱关键截面应变监测

**监测目的：**主拱是桥梁结构中的重要承载部位，其关键截面的应变情况反映了主拱受力情况和结构健康状况。通过监测主拱关键截面的应变，可以评估主拱结构的健康程度，及时发现可能存在的异常情况，为结构健康评估提供数据支持。

**技术要求：**对主拱关键截面应变监测，表贴式应变计，满足各测点的量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置：**计划在滨江大桥第 3、4、5 跨上、下行跨中拱肋上、下表面各选取 1 个测点，全桥共计 12 个测点对主拱关键截面应变进行实时在线监测。

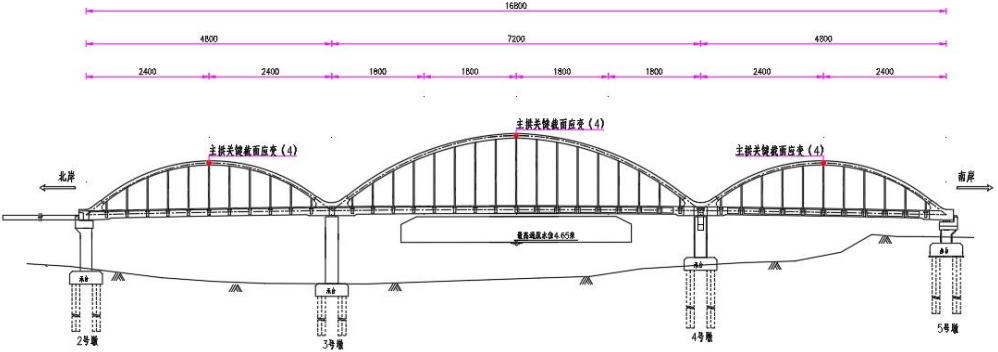


图 3.3-7 主拱关键截面应变监测测点布点图

### 3.3.8 主梁竖向振动监测

**监测目的：**主梁是桥梁结构的重要组成部分，其竖向振动情况反映了桥梁整体结构的健康状况。振动数据提供了关于桥梁结构振动频率、振幅和振动模态等方面的信息，通过监测主梁竖向振动，可以评估桥梁结构是否处于正常工作状态，及时发现任何可能影响结构稳定性和安全性的异常情况。

**技术要求：**对主梁竖向振动监测，采用单向加速度计进行监测，满足各测点的量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置：**计划在滨江大桥第4跨上、下行跨中、1/4截面、3/4截面各安装1个测点，全桥共计6个测点对主梁竖向振动进行实时在线监测。

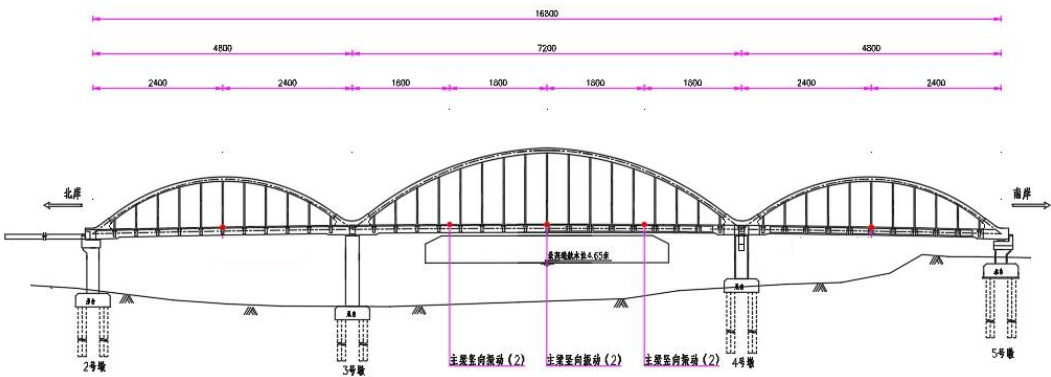


图 3.3-8 主梁竖向振动监测测点布点图

### 3.3.9 船舶撞击监测

**监测目的：**通过监测桥墩处的加速度监测数据，辅以船舶视频监控，对船舶撞击事件进行报警并提供视频信息。第一时间提醒业主对船撞事件作出响应。

**技术要求：**对主梁竖向振动监测，采用单项加速度计进行监测，满足各测点的量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置：**计划在4#墩上、下行墩顶处各安装1个船舶撞击测点，第4跨上、下行跨中系梁处各安装1个船舶撞击测点，全桥共计4个船舶撞击测点；计划在第3跨上行跨中系梁处安装1个视频监控，在第5跨下行跨中系梁处安装1个视频监控，全桥共计2个视频监控测点对船舶撞击进行实时在线监测。

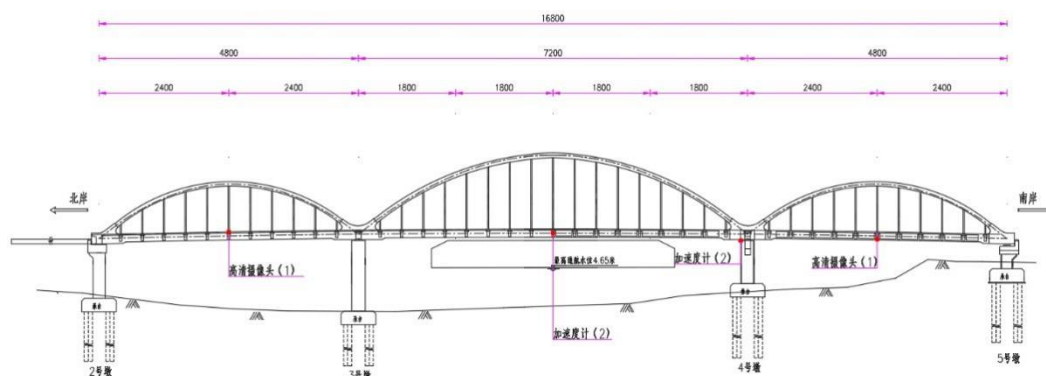


图 3.3-9 船舶撞击监测测点布点图

### 3.3.10 伸缩缝工况监测

**监测目的：**通过对伸缩缝钢构件进行声纹监测，辅以监控摄像头，对异常工作状况进行报警并提供视频信息。第一时间提醒业主对伸缩缝进行检查。

**技术要求：**对伸缩缝监测，采用声纹识别设备辅助摄像头进行监测，满足各测点的量程要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置：**计划对滨江大桥主桥 2#、5#墩处伸缩缝进行监测，上、下行各布置 1 个传感器，全桥共计 2 个声纹识别设备；计划在 2#墩上行截面处安装 1 台高清摄像头对伸缩缝工况进行实时在线监测；

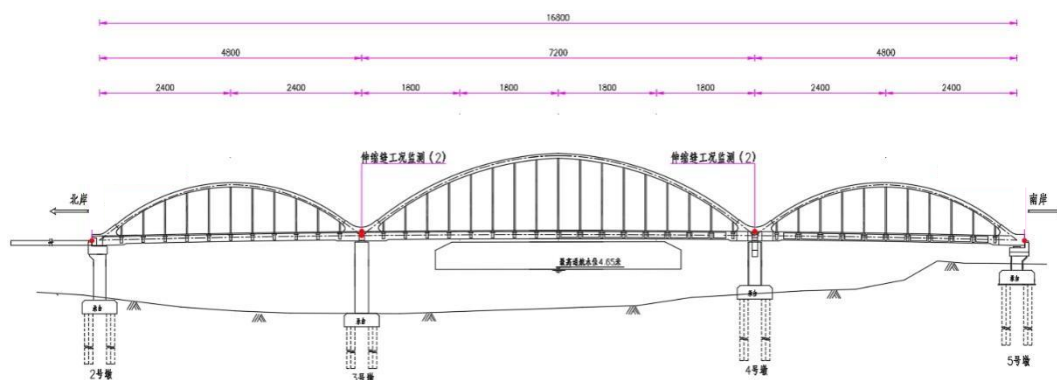


图 3.3-10 伸缩缝工况监测测点布点图

### 3.3.11 锚头腐蚀监测

**监测目的：**通过锚头附近传感器探针腐蚀情况监测吊杆锚头的腐蚀情况，腐蚀监测数据可以为桥梁的养护维修提供科学依据，使养护工作更加针对性和有效性。

**技术要求：**对锚头腐蚀监测，采用气相腐蚀仪进行监测，满足各测点的量程



要求，环境要求，具有良好的精度。

**测点布置：**计划在滨江大桥 4-1-14#吊杆、4-2-14#吊杆、5-2-7#吊杆进行测点布置，全桥共计 3 个测点对锚头腐蚀进行实时在线监测。

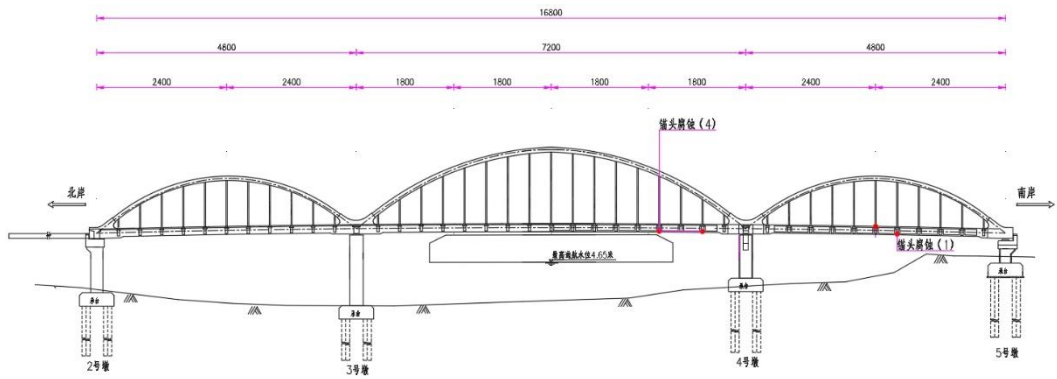
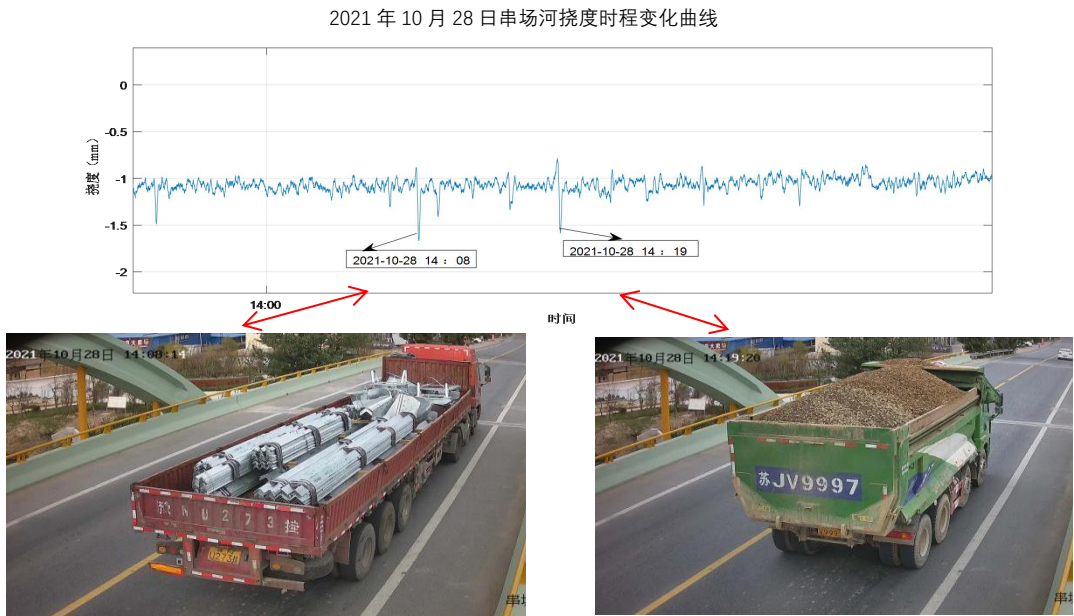


图 3.3-11 吊杆腐蚀监测测点布点图

### 3.3.12 桥面视频监控

计划在第 4 跨上、下行桥头处进行联动抓拍点位布设，各设置 1 个测点，全桥共计 2 个测点对桥面状况进行监控。

下图为以往项目中系统截取的挠度监测数据与同步抓拍照片。可以看出使用光电挠度仪进行桥梁线形监测时动态效果良好，重车通过反馈及时。可以满足日常桥面监控巡查和桥梁线形报警记录要求。



## 4 监测系统组成

滨江大桥健康监测系统主要将包括四个子系统：

- ✧ 传感器子系统
- ✧ 数据采集与传输子系统
- ✧ 数据处理与分析子系统
- ✧ 用户界面子系统

这四个子系统将按以下工作流程运行：

第一层次是传感器子系统的各传感器在线拾取大桥关键部位的信号。第二层次是将采集到的传感器信号转换成数字信号存储在本地工业用计算机内，同时通过计算机光纤网络或 4G 信号输送到数据管理与控制子系统；第三层次是由计算机服务器与工作站组成的计算机系统完成数据的数据后处理、归档、显示及存储；并根据健康评估系统的指令为其提供特定格式和内容的数据以及处理结果；第四层次是将经过综合处理的数据展示在用户界面中，融合数据实时展示、历史数据查询、报警预警、养护管理意见、维护记录反馈等综合信息。

第三章介绍了针对桥梁特点的测点布置方案（传感器子系统），本章将简单介绍数据采集与传输、数据处理与管理、结构预警三大子系统。同时也将对本次健康监测系统界面作出简要说明。

### 4.1 数据采集与传输子系统

数据采集与传输系统负责传感器信号的采集、调理、预处理、显示、传输和保存等。

#### 4.1.1 数据采集与传输的技术要求

为了保证数据采集与传输系统的稳定、可靠及耐久性，其技术要求：

- ✧ 系统应该既能在无人职守条件下连续采样，并可在报警状态下(如台风、大交通等)进行自动特殊采样；
- ✧ 系统中所有数据采集操作必须在同一时标下工作，不同外站以及数据采集系统之间的时间基准差异小于 1 微秒；
- ✧ 系统具有实时自诊断功能；系统应能自动将故障信息上传至数据管理与



控制服务器，并以足够醒目或引起操作人员注意的方式显示、报警；

✧ 当系统的一个或多个部分暂时断电时，系统的各个部分应无需人为干涉即可自动重新启动、同步校时和继续正确运行，并保留断点信息。局部停止工作，其他设备应保持其不受影响部分正常工作。例如，网络通讯崩溃后，单台外站的数据采集、缓存、在线、离线分析功能不受影响；

#### 4.1.2 数据采集与传输方案

滨江大桥各类传感器的监测数据统一通过场端局域网传输至对应数据采集单元（工作站），数据采集工作站工控机按数据协议解析数据并通过 4G 网络统一转发至监控中心服务器。

### 4.2 数据管理与分析子系统

#### 4.2.1 概述

数据管理与控制子系统部署于监控中心，是整个结构健康监测系统的核心。该子系统主要负责对数据采集的控制，对采集数据的处理、分析、统计及显示。该子系统由数据管理与控制计算机、服务器、磁盘阵列、数据库及先关软件构成。数据处理与管理子系统将实时传送来的数据进行处理、归档、显示及存储，用户可使用专用的账户密码在 Internet 上访问建设于数据中心的 WEB 服务器，查看相关实时数据和分析数据。工作人员还会及时收到报警信息，并通知相关的桥梁管理人员；此外子系统还根据处理后的数据，进行结构安全状态识别及评估，并提供相应的报表。

桥梁安全监测系统包括数据采集软件、数据传输与存储管理软件、数据分析软件。面对大量桥梁进行监测产生的海量数据，只有有效的管理与快速的数据分析才能保障安全预警工作有效进行。

#### ✧ 服务器部署策略

滨江大桥健康监测系统使用磁盘阵列 RAID5 技术来保证系统的正常运行和数据的完整。数据保存与磁盘阵列内，磁盘阵列采用 RAID 技术以提高储存速度和数据安全。

#### ✧ 数据存储策略

滨江大桥健康监测系统传感器采取 24 小时连续采集方式。应根据具体的传感器数量、采样频率及保存方式进行详细测算，长期采集将形成海量数据。

系统采集的数据主要分为两类：传感器原始数据和处理分析后的统计数据，其数据存储策略采用文件+关系型数据库的形式。将传感器原始数据文件保存，供查询、计算、分析时使用。将桥梁原始数据信息及系统处理后统计分析数据使用数据库保存，供日常运营管理中的统计、查询、报表等功能使用。

对于传感原始数据文件，文件应按照日期和传感器类别分类存储，便于查询。同时，提供先关文件转换导出功能软件，为文件的内容的提取、数据的查询与计算机提供便利。

安全监测系统数据管理与控制子系统作为监测系统关键的一部分，主要目的在于分担整个系统的数据处理和数据挖掘压力。它主要实现实时监测数据的接收、处理、分析、整合与存储功能，完成现场采集设备的管理与控制，设在大桥管理监控中心内，未来主要功能包括：

与现场数据采集服务器进行通信，对所有传感器信号数据进行收集、整理。

通过调用数据处理算法仓库，对所采集的数据进行预处理（包括滤波、提取、挖掘、温度补偿、通道间的数据耦合、转换）。

针对不同监测项开发相应的算法，进行实时处理分析（变形、交通荷载实时定位），使输出的数据均为结构参数。

数据加工、归档和存储功能，实时解算各通道的特征值，将原始数据与有效特征数据写入数据库。

数据检索和传输功能，将经过处理和分析的数据根据系统界面配置发送到结构健康评估系统进行展示。

将经过处理的实时数据通过预先结构计算值进行预警判断，并把预警标志位传给前台预警评估服务器，以便其可进行实时预警显示。

离线处理功能，定制离线处理计划，实现对处理结果的查看，回放，手动调用进行数据文件的处理功能。

#### 4.2.2 系统功能需求

数据管理与控制系统主要功能模块分为三类：人机界面、分析管理与控制、

管理。数据管理与控制系统主要功能需求如下，需满足以下功能。

#### ✧ 人机界面：

友好的人机交互界面，可以使非专业人员顺利操作；

数值显示：以列表形式显示各类传感器实时示值和历史示值。在显示实时示值时，界面刷新时间小于 1 分钟；

波形显示：以图形形式显示各类传感器统计结果（如最大值、最小值、平均值等）和分析结果（如趋势图、频谱、索力等）；

报表输出：打印输出各类统计分析报表；

指令输入：响应操作人员输入指令（包括鼠标点击和键盘操作等），并将指令传输至分析管理与控制模块或管理模块进行处理；

登陆功能：支持多用户分权限登录，用户操作随用户权限确定；

#### ✧ 分析管理与控制：

数据库操作：完成对数据库的增删改查等各类操作，顺利从数据库中提取数据供显示界面显示；

数据查询：可对各类传感器数据进行实时、历史时间点及时间段数据进行查询；

数据处理：可对相关数据进行重采样、软件滤波等处理，以提高采集数据的可用性；

统计计算：对各类传感器数据进行统计计算，并将结果保存至数据库。统计计算的内容应至少包括最大值、最小值、平均值、趋势等。

自诊断：有效识别失效传感器及数据异常情况；

报警机制：对数据及设备异常进行报警，并记录数据库，同时提供报警信息查询功能；

报表生成：自动生成各类报表，如日报表、月报表、年报表、趋势报表、异常情况报表等，并保存至数据库，同时提供查询、打印功能；

数据导入导出：能对日常数据及临时采集数据进行导入导出操作。数据导入的目的是为了将临时采集数据合并至统一的系统小管理；数据导出的目的是为了将数据导出至其他分析系统进行离线分析，亦可供 Matlab、Ansys 等大型计算分

析软件对采集数据进行分析处理；

日志功能：对数据管理与控制系统的日常操作及异常情况均应记录详细日志，供维护人员查询；

✧ 管理：

采集系统管理：可在监控中心对采集工作站系统进行管理，了解数据采集工作站运行状态、修改传感器采集数据、控制数据采集工作站的启停；

数据库管理：对数据库进行管理操作，数据库数据的整理，备份/恢复数据库；

用户管理：对系统设置不同权限的用户的用户名、用户资料、用户权限等相关信息进行管理；

异常情况管理：对系统日志，系统的运行异常情况进行查询、分析与管理。

4.2.3 数据管理与分析子系统总体方案

滨江大桥健康监测系统数据管理与分析子系统总体构成见图表 4.2-1。由数据采集与整合模块，数据分类、数据挖掘模块，原始监测数据库与数据管理界面 4 部分组成。

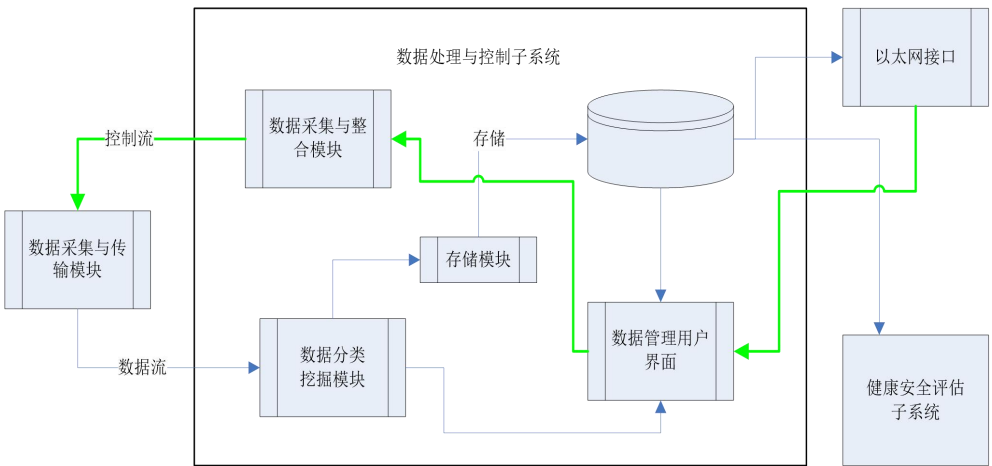


图 4.2-1 数据管理与分析子系统构成方案示意图

数据采集与整合模块驱动数据采集与传输子系统采集数据，采集方案包括时间条件及连续观测参数触发条件，比如可以指定在温度达到某个数值时触发采集等。另外采集控制模块还能够接受用户指令来进行数据采集。

数据分类与挖掘模块主要完成将光纤传输过来的监测数据包进行分解、解析

与分类，并且通过简单的数值分析与比较初步判断数据的优劣，并将良好的监测数据提取出来存入数据库。

监测数据库属于总体系统的中心数据库的一部分，包括原始数据存储库及相应的管理系统。主要完成监测数据的存储，条件查询等工作。监测数据库中的数据将提供给历史回放调用、安全评估子系统使用。

数据管理界面模块属于总体系统界面下的一部分，为用户提供历史监测数据的查询、控制采样等操作，同时通过总体系统界面提供与互联网的连接。

### 4.3 用户界面子系统

监测数据分析工作是实现结构预警的前提。对于本系统中所涉及的各监测指标数据分析功能如下：

#### 4.3.1 数据分析

系统主要监测数据为桥梁环境温湿度、桥面铺装层温度、桥面风速风向、船舶撞击、主梁竖向位移、主梁竖向振动、主梁关键截面应变、主拱关键截面应变、伸缩缝工况、锚头腐蚀、车辆荷载监测等数据，每天选取环境因素较为稳定的时段对其监测数据进行分析统计，取该时段实测数据的平均值作为数据代表值。

#### 4.3.2 结构预警

##### 4.3.2.1 系统基本要求

数据分析和桥梁监测预警是整个监测系统的核心，是系统监测成果服务于桥梁养护管理的纽带，是桥梁结构健康监测系统发挥服务于桥梁养护管理的核心功能。桥梁监测预警系统能够综合桥梁自动化监测数据，对所有数据进行统一处理分析、特征信息挖掘、趋势预测；根据结构预警系统对结构异常状态进行诊断和分级预警；根据监测数据的分析结果给出桥梁结构的管养建议。系统运行初期需建立科学的分级预警体系，然后结合设计计算的限值和监测数据确定合理的预警阈值，实现在线分级预警。

##### ✧ 总体设计要求

➤ 桥梁监测预警能够根据实时监测数据进行统计分析，并综合识别结果及巡检结果对桥梁结构安全使用状况进行预警报警；能够对巡检、监测数据及损伤

识别结果进行趋势分析、对比分析、相关与相干分析、回归分析等；对结构变形参数建立预警指标，能够对其监测结果进行分级预警。

#### ✧ 结构预警设计要求

结构预警要求建立本桥分级预警体系，实现在线实时监测过程中对发生的可能威胁到桥梁结构运营安全结构响应异常时进行预警，提醒桥梁管理养护人员关注结构的运营安全状况。结构预警通过对结构变形监测参数建立预警指标、设置预警阈值进行综合预警。

要求能够实现在线预警，对结构主要监测点的力学指标进行预警和监测系统自身运营状况预警，预警级别分为黄色预警、橙色预警和红色预警三级；对不同级别的预警事件给出相对的应急预案；能够通过提醒、短信等方式通知相关工作人员。

#### 4.3.2.2 系统开发原则

桥梁监测预警的开发遵循以下原则：

✧ 能在桥梁运营期内合理、实用、可靠地进行预警和分析，服务于大桥的管理和养护；

✧ 与整个监测系统相融合，数据调用快捷高效，软件界面友好美观。

#### 4.3.2.3 结构预警模块

##### ✧ 预警模块

预警体系主要作用是在结构实时监测过程中对发生的可能威胁到桥梁结构运营安全的响应指标进行预警，提供桥梁在特殊气候、交通条件下或桥梁运营状况异常时所触发的预警信号，提醒桥梁管理养护人员关注结构的运营与安全状况，并根据需要临时启动识别和评估机制以确定结构是否处于安全状态。

##### ✧ 在线预警

在线预警属于无模型预警体系，对结构主要监测点的力学指标和环境参数进行预警，主要基于监测数据统计及简单数据分析。

##### ➤ 模块工作流程

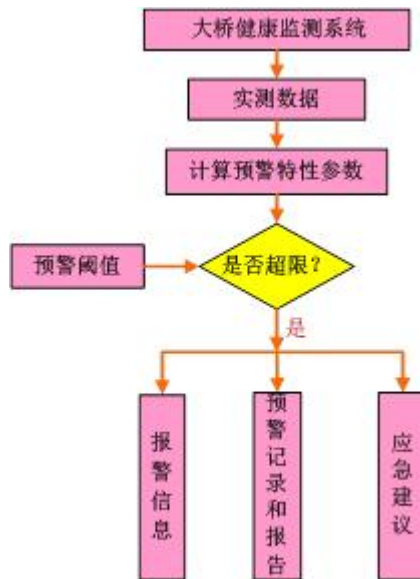


图 4.3-1 结构预警子模块流程图

➤ 预警参数的确定

健康监测系统的预警参数见下表：

表 4.3-1 大桥预警参数表

| 监测项目        | 预警指标       |
|-------------|------------|
| 主梁竖向位移      | (1) 各测点位移值 |
| 主梁竖向振动      | (1) 幅值     |
| 主拱、主梁关键截面应变 | (1) 应变     |
| 车辆荷载        | (1) 总重     |

➤ 预警等级划分

表 4.3-2 预警级别划分及对应的桥梁状态

| 预警等级    | 对应的结构状态描述   |
|---------|---|
| 1 级黄色预警 | 结构已明显偏离通常运营状态，已有明显趋向极限状态的趋势，建议关注。                     |
| 2 级橙色预警 | 结构已严重偏离通常运营状态，已接近设计极限状态，结构安全富裕量已不足，建议密切关注。            |
| 3 级红色预警 | 结构已超越设计极限状态，并已逼近实际极限状态，结构已基本无安全富裕量，结构目前非常危险，建议进行交通管制。 |

➤ 报警方式

报警方式有三种：

- ◆ 在计算机终端软件界面上以醒目的图形方式（数字颜色改变、多级报警线、状态灯）表示预警状态；

- ◆ 通过鸣叫等声音方式通知控制中心管理人员；
- ◆ 通过发短信的方式通知管理人员。

➤ 预警指标阈值的配置

◆ 阈值配置的原则

预警指标阈值的确定将遵循以下原则：

- 相应结构设计规范中规定的限值，包括按极限状态理论设计时承载能力极限状态、正常使用极限状态规定的限值以及按容许应力法设计时规定的设计容许值等；

- 国家相应的法律法规；
- 桥梁管理常用的管理措施；
- 考虑结构安全可靠度采取不同的安全系数进行阈值的分级；
- 建立在监测数据统计分析的基础上，对阈值进行的调整。

最终确定的预警指标阈值需与大桥设计单位、业主进行沟通，并通过业主组织的评审最终确立



## 5 系统维护与数据分析

### 5.1 系统维护

#### 5.1.1 系统软件维护

(1) 软件系统日常检查包括以下内容：

- a.每周 1 次远程巡检，每月定期维护，特殊情况下应急维护；
- b.日常检查内容包括个软件模块功能工作状态检查、实施数据及历史数据检查、超限数据检查确认等；
- c.在系统不停机状态下进行软件日常检查，确需停机维护操作的，在系统访问低谷时间段开展。

(2) 软件系统定期（专项）维护包括以下内容：

- a.每月至少开展 1 次定期维护；
- b.软件定期维护内容包括软件系统时间同步检查，磁盘存储空间检查及清理、数据库异地备份及软件运行日志检查等；
- c.对于有配置参数修改、更正的维护操作，提前做好备份，并在维护完成后做好日志记录。

(3) 软件系统应急维护包括以下内容：

- a.软件应急维护内容包括软件模块崩溃恢复、功能异常修复和数据异常更正等；
- b.当发现软件功能故障时，及时进行确认和处治；
- c.对于非软件因素造成的数据异常或中断等，联合硬件维护人员进行排查、修复并做好维护记录。

#### 5.1.2 系统硬件维护

(1) 硬件设施日常检查包括以下内容：

- a.日常检查结合桥梁日常巡查工作开展；
- b.系统的日常检查对巡查路线上监测设备的表观完好性及稳固性进行检查，并对巡查情况进行记录；

c.对巡查中发现的问题或系统软件反馈的问题，及时处置或通知专业单位进行处置，并对处置结果进行记录。

(2) 硬件设施定期（专项）维护和应急维护包括以下内容：

a.不低于每半年进行 1 次定期维护；

b.对监测传感器、采集设备等表观完好性进行检查；对设备及防护罩的固定情况以及传感器、采集设备与传输线路的接头紧固情况进行检查；

c.对现场采集站、监控中心内等易受灰尘影响的设备及机柜进行除尘处理；

d.对维护发现的问题 24h 内快速响应并进行检查。

## 5.2 数据分析

### 5.2.1 报警阈值

系统报警设计依据《公路桥梁结构监测技术规范》（JT/T1037-2022）11.3 相关条款设计报警阈值，并依据不同指标实现在线实时报警和离线报警，报警指标的设定如表 5.2-1 所示。

系统采用上述报警指标对桥梁进行报警设计，通过后期报警行为的有效性调整报警值，最终形成针对这些桥梁最为有效的报警指标与阈值系统。

表 5.2-1 基于《公路桥梁结构监测技术规范》要求的报警阈值设定

| 序号 | 监测项目        | 报警阈值   | 报警级别 | 养护建议                   |
|----|-------------|--|------|------------------------|
| 1  | 主梁竖向位移监测    | 达到 0.8 倍设计值                                      | 二级   | 提示采取交通管控措施，开展专项检查评估    |
|    |             | 达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级超限                          | 三级   | 提示封闭交通，对桥进行全面检查和结构安全评估 |
| 2  | 主梁关键截面应变监测  | 超过历史最大值  | 二级   | 提示检查索构件                |
|    |             | 超过设计最不利工况计算值                                     | 三级   | 提示封闭交通，对桥进行全面检查和结构安全评估 |
| 3  | 主梁、主拱竖向振动监测 | 10min 加速度均方根达到 $31.5\text{cm/s}^2$ 且持续时间超过 30min | 一级   | 提示检查索构件                |
|    |             | 10min 加速度均方根达到 $50\text{cm/s}^2$                 | 二级   | 提示采取交通管控措施，开展专项检查评估    |

|   |         |               |    |                        |
|---|---------|---------------|----|------------------------|
|   |         | 幅值持续增大、呈现发散特征 | 三级 | 提示封闭交通，对桥进行全面检查和结构安全评估 |
| 4 | 桥面铺装层温度 | 大于 60℃或小于 0℃  | 一级 | 提示采取降温或除冰措施            |

### 5.2.2 结构健康度评估

桥梁结构健康度应包括结构整体健康度和结构构件健康度等级宜划分为I基本完好、II轻微异常、III中等异常、IV严重异常四级，评定依据见下表：

表 5.2-2 桥梁结构健康度评估评定依据

| 健康度等级   | 结构构件               | 结构整体   |
|---------|--------------------|--|
| I基本完好   | 下述（1）中所列监测数据无超限    | 下述（2）中所列监测数据超限等级全部为一级或无超限  |
| II轻微异常  | 下述（1）中所列监测数据超限等级一级 | 除塔顶偏位、锚碇位移、拱脚位移之外下述（2）中所列其他监测数据与分析结果超限等级仅有1项为二级、无三级                            |
| III中等异常 | 下述（1）中所列监测数据超限等级二级 | 下述（2）中所列监测数据与分析结果超限等级出现多项（2项及以上）二级或1项三级；或当塔顶偏位、锚碇位移、拱脚位移出现1项或以上二级；或多项构件健康度中等异常 |
| IV严重异常  | 下述（1）中所列监测数据超限等级三级 | 下述（2）中所列监测数据与分析结果超限等级出现多项三级；或多项构件健康度严重异常                                       |

### 5.2.3 数据分析

#### ➤ 季度监测报表

根据系统开发的报表软件每季度进行监测数据分析处理，并提交季度监测报告。

#### ➤ 特殊事件分析处理报告

桥梁运营中发生的突发事件如船撞、台风、地震、特殊车辆过桥的事件，根据监测系统的监测数据进行结构安全性分析，并提交特殊事件分析报告。