

2024年泰州市普通国省道桥梁健康监测系统设计项目

施 工 图 设 计

第 一 册 共 二 册



中交公路规划设计院有限公司
二零二四年七月 北京

2024 年泰州市普通国省道桥梁健康监测系统设计项目

施 工 图 设 计

设计单位：中交公路规划设计院有限公司

分项负责人：

工程设计资质证书：综合甲级，A111008611

徐文城（机电） 崔营营（软件） 赵凯（结构）

公路水运工程试验检测机构等级证书：

韩飞杨（数据分析）

公路工程桥梁隧道工程专项，交 GJC 桥 039

检验检测机构资质认定证书：CMA，160001073146

参加人员：

项目主管总经理：[签名]

王淼（机电） 刘洋（软件） 李小龙（结构）

项目负责人：[签名] 要世乾

何秋雨（数据分析）

项目主管总工：[签名]

项目二审：[签名] 崔营营

1 概述

1.1 项目实施的意义

服役桥梁在长期气候环境等因素影响下结构材料性能会逐步退化。与此同时，桥梁关键构件及构造工作性能也会在长期的静动力荷载作用下逐渐劣化，从而使得桥梁结构强度和刚度随着时间的增加而不断衰减。在结构性能劣化趋势更为严峻之前，进行适当的外在干预，可以有效降低桥梁服役状态的持续恶化，避免重大的经济损失，同时可以保障人民群众出行安全并有效减少恶性事件发生的概率，满足通行需求。对桥梁结构运行状态进行健康监测，并参照相关监测预警结果进行桥梁现场检查复核，在此基础上对结构安全性能进行评估日益成为桥梁运营日常管理的重要内容。

1.2 项目背景

1.2.1 政策导向

2021年3月，根据《交通运输部关于进一步提升公路桥梁安全耐久水平的意见》（交公路发[2020]127号），部决定在“十四五”期间组织开展跨江跨海跨峡谷等长大桥梁结构健康监测系统建设，并印发《公路长大桥梁结构监测系统建设实施方案》的通知（交办公路[2021]21号）。

2022年1月，为提升公路桥梁安全耐久和科学养护管理水平，指导公路桥梁结构监测系统设计、实施、验收和维护工作，交通运输部发布《公路桥梁结构监测技术规范》（JT/T 1037-2022）。

2024年4月，交通运输部发布《进一步推进公路桥梁隧道结构监测工作实施方案（2024—2030年）》（交办公路〔2024〕26号），要求到2025年底，完成大跨高墩、缆索承重等长大桥梁结构监测系统建设，同步开展桥梁群轻量化结构监测系统试点建设和长大隧道结构监测系统试点建设；2030年完成高速公路、普通国道桥梁结构监测系统全覆盖，指导地方加快普通省道重要桥梁结构监测系统建设。

1.2.2 项目基本情况

依据2024年泰州市普通国省道桥梁健康监测系统设计项目工作内容，对姜堰区、兴化市、泰兴市、靖江市以及市直管范围内共27座普通国省道桥梁进行健康监测系统设计，其中既有结构监测系统升级3座、新建轻量化监测系统24座，对应桥址分布情况如下图所示。

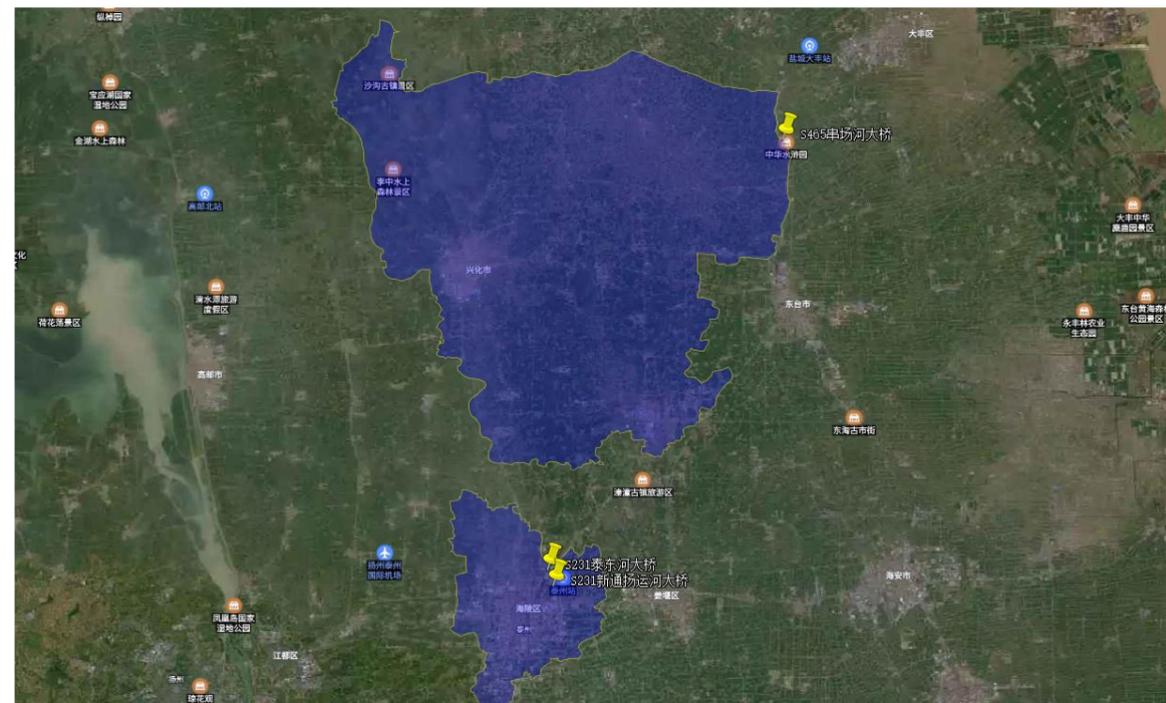


图 1.2-1 桥梁地理位置图

本次设计共分为2册，本册图纸针对3座桥梁既有监测系统升级改造进行设计。

表 1-1 监测系统建设项目清单

序号	桥梁名称	区县	路线编号	结构形式	建设内容	图纸分册
1	泰东河大桥(新)	市区	S231	连续箱梁	升级改造	分册 1
2	申场河大桥	兴化	S465	系杆拱	升级改造	
3	新通扬运河桥	市区	S231	桁架梁	升级改造	
4	老通扬运河东大桥	高港	G328	空心板梁	轻量化	分册 2
5	姜十线航道大桥	泰兴	S334	连续箱梁	轻量化	
6	姜十线大桥	泰兴	S355	连续箱梁	轻量化	
7	中庄河大桥	兴化	G344	空心板梁	轻量化	
8	马甸大桥	泰兴	G345	空心板梁	轻量化	
9	史堡桥	兴化	S229	箱形梁	轻量化	
10	茅山河桥	兴化	S229	空心板梁	轻量化	
11	蚌蜒河大桥	兴化	S231	空心板梁	轻量化	
12	陈北大桥	兴化	S231	空心板梁	轻量化	
13	老通扬河大桥	市区	S231	T梁	轻量化	
14	海河大桥	兴化	S232	空心板梁	轻量化	
15	老通扬运河西大桥	高港	G328	空心板梁	轻量化	
16	唐家庄立交桥	兴化	S229	箱形梁	轻量化	

序号	桥梁名称	区县	路线编号	结构形式	建设内容	图纸分册
17	送水河大桥	高港	S506	空心板梁	轻量化	
18	肖家舍大桥	兴化	G344	空心板梁	轻量化	
19	海沟河大桥	兴化	G344	空心板梁	轻量化	
20	洋汊河大桥	兴化	G344	空心板梁	轻量化	
21	送水河大桥	市区	G523	箱形梁	轻量化	
22	大溪河大桥	兴化	S231	空心板梁、组合箱梁	轻量化	
23	中长安大桥	兴化	S231	空心板梁	轻量化	
24	老通扬运河桥	海陵	S506	箱形梁	轻量化	
25	竹泓东大桥	兴化	S232	空心板梁	轻量化	
26	樊荣大桥	兴化	S232	空心板梁	轻量化	
27	卖水河桥	兴化	S231	空心板梁	轻量化	

2 施工图设计审查意见和执行情况

2024年7月24日，省交通运输厅公路事业发展中心在南京组织召开了泰州市2024年普通国省道桥梁健康监测系统设计审查会，评审意见执行情况如下：

1、补充完善桥梁基础信息及设计依据。

执行情况：已完善既有系统运行情况分析及设计依据。

2、结合桥梁结构特点，进一步优化测点布置。

执行情况：已优化测点布置，突出数据的延续性及共享共用，详见5.2节。

3 桥梁项目调研

3.1 泰东河大桥(新)

3.1.1 桥梁基本信息

泰东河大桥位于S231泰州市海陵区境内，设计荷载等级为城-A级。主桥上部结构跨径组合为(65.9+110+65.9)。中心桩号K4+870.7，桥面全宽17.5m，主桥上部结构为预应力混凝土连续梁桥，下部结构为柱式桥墩，钻孔灌注桩基础。桥梁主桥分左右幅。

新通扬运河桥主要技术标准为：

(1) 桥梁荷载标准：城-A级；

(2) 人群荷载：按照《城市桥梁设计规范》（CJJ11-2011）采用；

(3) 主线设计行车速度：80km/h。



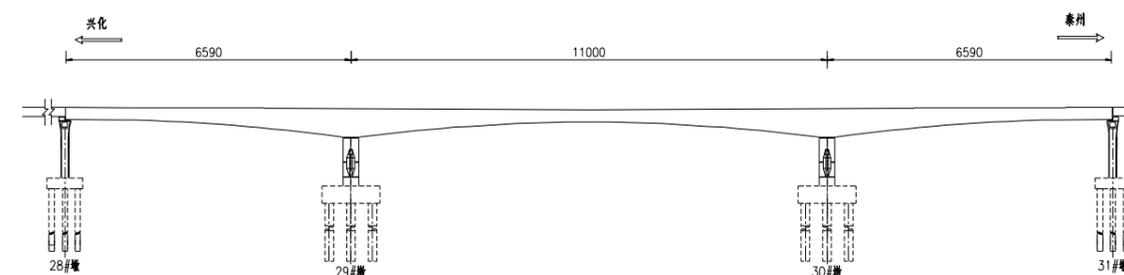
表 3.1-1 S231 泰东河大桥地理位置图



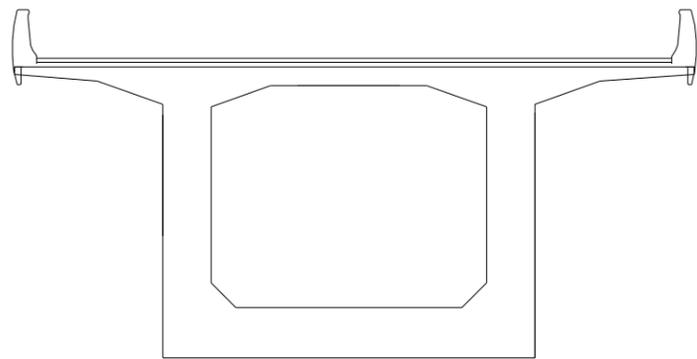
图 3.1-1 正面图



图 3.1-2 侧面图



(1) 主桥立面图



(2) 主桥横断面图

图 3.1-3 泰东河大桥主桥桥型布置图（单位：cm）

3.1.2 原有系统分析

S231 泰东河大桥原有健康监测系统于 2019 年建成并投入使用，监测对象为右幅桥梁。监测内容主要为：结构变形、结构应力（温度）、结构裂缝、交通荷载，全桥共有测点 71 个。

表 3.1-1 泰东河大桥原有健康监测项目

序号	监测类别		监测内容	主要设备名称	单位	数量
1	作用	车辆	所有车道车重、车速、车流量等	压电薄膜传感器	车道	3
2	结构响应	位移	主梁竖向位移	倾角仪	个	9
3			主梁长期变形	棱镜	个	13
4		应变	主梁关键截面应变	振弦式应变计	个	36
5	结构变化	裂缝	主梁混凝土裂缝	柔性导电涂料	个	10
6	合计					71

原健康监测系统设备寿命 5 年，目前已运行至第 5 年，系统运行总体良好。监测表明，导电薄膜处未出现裂缝，因此该设备无法使用后，不再更换。各监测项数据完好率统计如下：

表 3.1-2 泰东河大桥原有健康监测项目数据完好率

序号	监测指标	数据在线率	数据稳定性
1	结构应力（温度）	100%	较好
2	主梁竖向位移	100%	完好
3	车辆荷载	100%	完好
4	结构裂缝	100%	完好

根据《S231 泰东河大桥（新桥）结构健康监测系统数据分析季度报告（2024.01~2024.03）》（苏交科集团检测认证有限公司），泰东河大桥健康监测系统监测状况如下：

- 与初始状态相比，第一季度主梁竖向变形最大值为 21.24mm，变形值在合理范围以内。
- 桥梁结构在当前荷载作用下结构应力数据较为平稳，应力-温度相关性良好。
- 本阶段日均交通量约为 12288 辆，通行车辆多为小客车。

3.1.3 桥梁现场踏勘

本项目设计工作开展前，我单位按照技术人员对桥梁现场进行了踏勘。

(1) 结构外观情况

主桥结构外观未见明显异常。

(2) 现场电网设施供应条件

桥梁位置无线信号良好，桥梁原有结构监测系统供电稳定。

(3) 桥梁周边环境

桥梁附近环境主要包括河道、厂房，该桥上跨泰东河航道，上下游设有分离式防撞墩。现场踏勘发现，泰东河航道通航船舶多、吨位大，有必要对通航船舶进行实时监控，便于及时了解现场突发情况。



(1) 防撞设施

(2) 通航船舶

图 3.1-4 泰东河大桥现场踏勘照片

根据现场踏勘，泰东河大桥日均车流量大，桥下通航船舶多，桥梁外观线形等暂无明显异常，桥梁附近电力供应设施较为完善。

3.1.4 结构计算分析

3.1.4.1 模型建立

运用有限元分析软件 MIDAS CIVIL 建立了泰东河大桥计算分析模型。全桥共划分 76 个单元，77 个节点，结构材料及构件尺寸等严格按照设计资料取用。

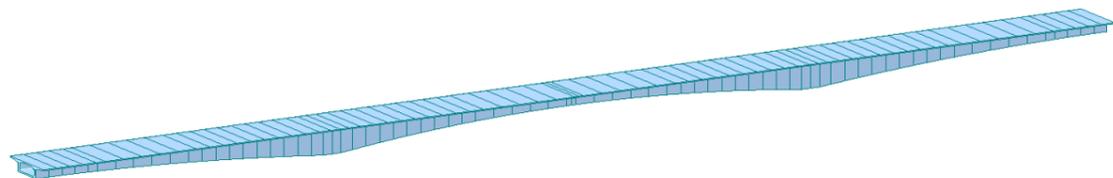


图 3.1-5 S231 泰东河大桥结构有限元仿真分析模型

3.1.4.2 结构响应特征

- 1) 在可变作用下，各跨跨中区域正弯矩数值最大，主墩支点附近区域负弯矩最大；
- 2) 在可变作用下，主跨跨中变形数值最大；
- 3) 由于变形协调，边跨变形趋势与主跨变形趋势相反。
- 4) 结构一阶振型为正对称竖弯，桥梁对应计算理论频率为 1.1Hz。

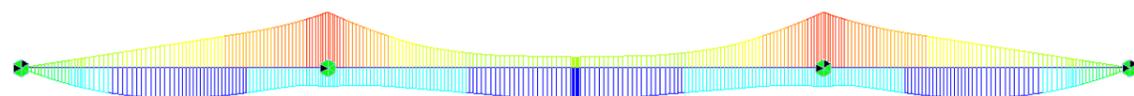


图 3.1-6 活载作用下结构弯矩包络图



图 3.1-7 升温梯度作用下结构变形

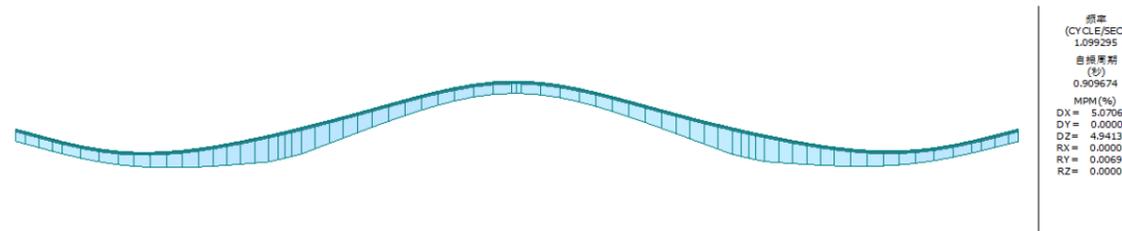


图 3.1-8 结构基频（单位：Hz）

从结构分析角度来看：

- (1) 桥梁结构应变、结构变形等测点布置重点关注跨中区域；
- (2) 结构振动测点布置于边跨、中跨跨中区域。

3.1.5 小结

- (1) 桥址区域交通流量较大，需对过往车辆进行监测；
- (2) 泰东河航道船舶通行量较大，需要对通航船舶进行实时监控，便于及时了解现场突发情况；
- (3) 根据有限元分析结果，该桥重点监测区域为：主梁边跨跨中、中跨跨中及四分点位置。

3.2 新通扬运河桥

3.2.1 桥梁基本信息

新通扬运河桥位于 S231 泰州市海陵区境内，设计荷载等级为城-A 级。主桥为跨度 80 m 的简支钢桁梁，上层为 8 车道公路，下层为 6 车道公路+两人行车道及两非机动车道。上下层均为正交异性钢箱桥面。主桁采用三角型桁架，主桁中心距 33m，节间长度 10m，桥梁横断面采用两片主桁的型式，全桥除支点处设板式桥门架外，其余部分不设横联。

新通扬运河桥主要技术标准为：

- (1) 桥梁荷载标准：满足公路-I级（同时满足城-A 级）；
- (2) 人群荷载：按照《城市桥梁设计规范》（CJJ11-2011）采用；
- (3) 主线设计行车速度：80km/h。



图 3.2-1 新通扬运河桥地理位置图



(a) 正面照

(b) 侧面照

图 3.2-2 新通扬运河桥正面照、侧面照

3.2.2 原有系统分析

S231 新通扬运河桥原有健康监测系统于 2019 年建成并投入使用，监测内容主要为：结构变形、结构应力（温度）、环境腐蚀、交通荷载，全桥共有测点 56 个。

表 3-1 新通扬运河桥原有健康监测项目

序号	监测类别		监测内容	主要设备名称	单位	数量
1	作用	车辆	所有车道车重、车速、车流量等	压电薄膜传感器	车道	3
2	结构响应	位移	主梁竖向位移	倾角仪	个	9
3			主梁长期变形	棱镜	个	9
4		应变	主梁关键截面应变	振弦式应变计	个	32
5	结构变化	腐蚀	钢结构腐蚀	腐蚀探头	个	3
6	合计					56

原健康监测系统设备寿命 5 年，目前已运行至第 5 年，系统运行总体良好，各监测项数据完好率统计如下：

表 3-2 新通扬运河桥原有健康监测项目数据完好率

序号	监测指标	数据在线率	数据稳定性
1	结构应力（温度）	100%	较好
2	环境腐蚀	100%	完好
3	交通荷载	100%	完好
4	结构腐蚀	100%	完好

根据《S231 新通扬运河桥结构健康监测系统设计季度报告（2024.01~2024.03）》（苏交科集团检测认证有限公司），新通扬运河桥健康监测系统设计状况如下：

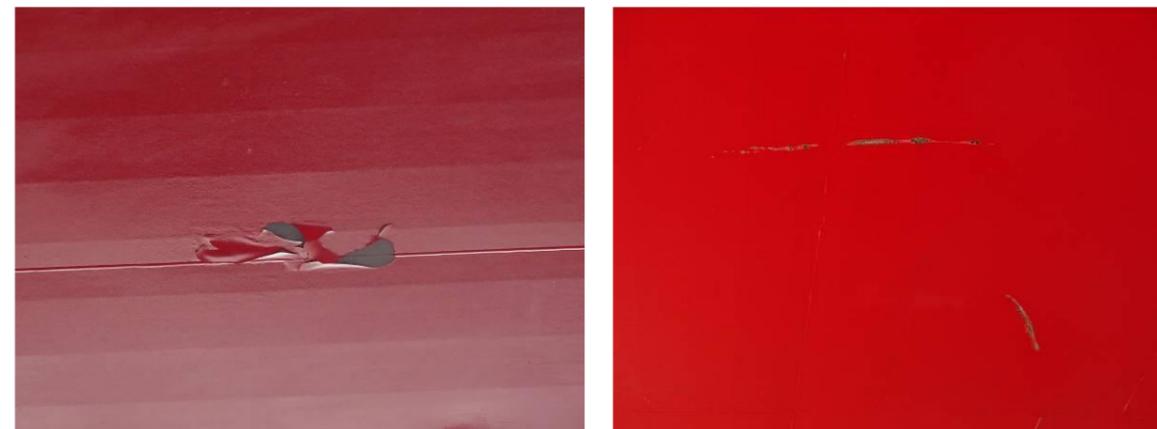
- （1）相对初始测量阶段，本阶段结构变形最大值 11.22mm，变形值在合理范围以内。
- （2）桥梁结构在当前荷载作用下结构应力数据较为平稳，应力-温度相关性较好。
- （3）本阶段日均交通量约为 3189 辆，3 轴及以上车辆占比达到 15%。
- （4）根据《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T722-2008），当前阶段各环境腐蚀测点的腐蚀速率为中等等级。

3.2.3 桥梁养护现状调研

3.2.3.1 桥梁病害情况

根据《2023 年泰州市普通国省道桥梁特殊检查项目检测报告-S231 省道新通扬运河桥》（苏交科集团检测认证有限公司），主桥上部结构评定为 1 类（95.07 分），主桥总体评定等级为 1 类（95.27 分）。

主桥主要病害为：防腐涂层脱落及刮擦受损



1) 防腐涂层脱落

2) 底板涂层刮擦

图 3.2-3 新通扬运河桥现场结构检查状况

3.2.3.2 病害原因分析

防腐涂层脱落及刮擦受损：①桥梁建设过程中造成的损伤；②涂层长期受环境腐蚀所导致。

3.2.4 桥梁现场踏勘

（1）结构外观情况

主桥结构外观未见明显异常。

（2）现场电网设施供应条件

桥梁位置无线信号良好，桥梁原有结构监测系统供电稳定。

（3）桥梁周边环境

桥梁附近环境主要包括河道、厂房，该桥上跨新通扬运河航道，无水中墩。现场踏勘发现，新通扬运河航道通航船舶较多，有必要对通航船舶进行监控。



图 3.2-4 新通扬运河桥现场踏勘情况

3.2.5 结构计算分析

3.2.5.1 模型建立

根据前期收集的技术资料及现场踏勘情况，运用有限元分析软件 MIDAS·CIVIL 建立了新通扬运河桥计算分析模型。全桥共划分 86 个单元、136 个节点，结构材料及构件尺寸等严格按照竣工资料取用。

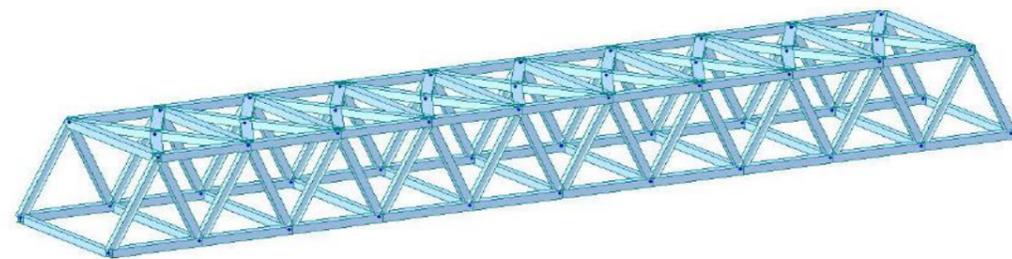


图 3.2-5 新通扬运河桥结构有限元仿真分析模型

3.2.5.2 结构响应特征

计算结果表明：

- (1) 活载作用下，主桁架跨中发生最大竖向变形；最不利组合作用下主桁架跨中发生最大竖向变形。
- (2) 活载及最不利组合作用下主梁钢桁架跨中上下弦杆处产生最大轴力，跨中上弦杆及端腹杆处产生最大应力。

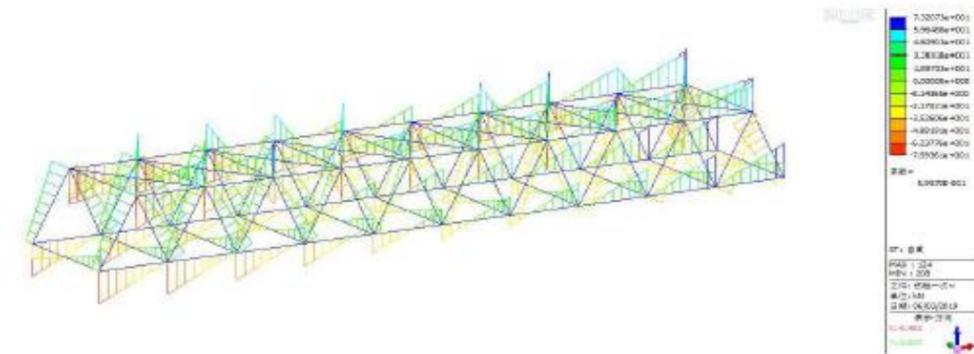


图 3.2-6 活载作用下结构轴力包络图

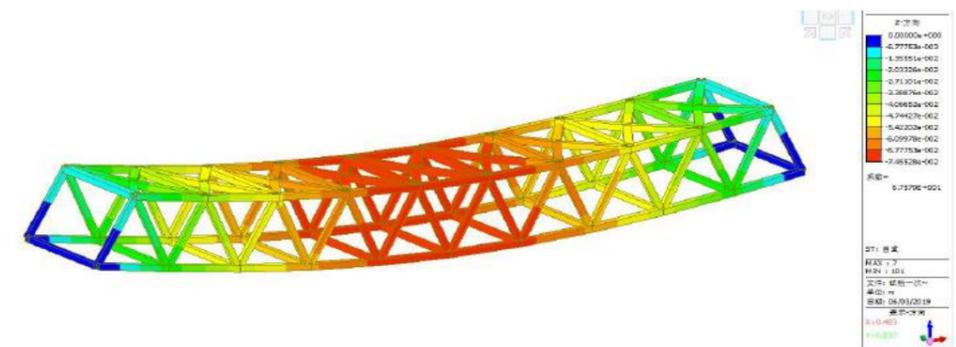


图 3.2-7 活载作用下结构挠度包络图

3.2.6 小结

根据泰州市 S231 新通扬运河桥项目调研结果，总结如下：

- (1) 现场 4G 信号较好，附近电力条件较好，便于后期监测仪器安装；
- (2) 本项目桥址区域交通量中等，存在重载车辆通行，在管养过程中应持续关注重载交通情况；
- (3) 新通扬运河通航船舶较多，需要对通航船舶进行实时监控，便于及时了解现场突发情况；
- (4) 根据有限元计算结果，该桥重点关注区域为：跨中上弦杆、下弦杆、斜腹杆及节点板。

3.3 串场河大桥

3.3.1 桥梁基本信息

S465 串场河大桥位于泰州市兴化市大营镇与盐城市大丰区白驹镇交接处，建设于 2002 年，为东西走向单幅桥梁。该桥主桥为刚性系杆拱桥，跨越串场河，引桥为桥面连续预应力简支空心板，跨径组合均为 $(2 \times 16) \text{ m} + (1 \times 43) \text{ m} + (2 \times 16) \text{ m}$ 。桥梁全长 113.08m，桥面净宽 11.0m，主桥全宽 13.6m，引桥全宽 12.0m，双向 1.5%横坡，设计时速 80km/h，设计荷载等级为汽车-20 级，挂车-100。

串场河大桥技术标准主要包括：

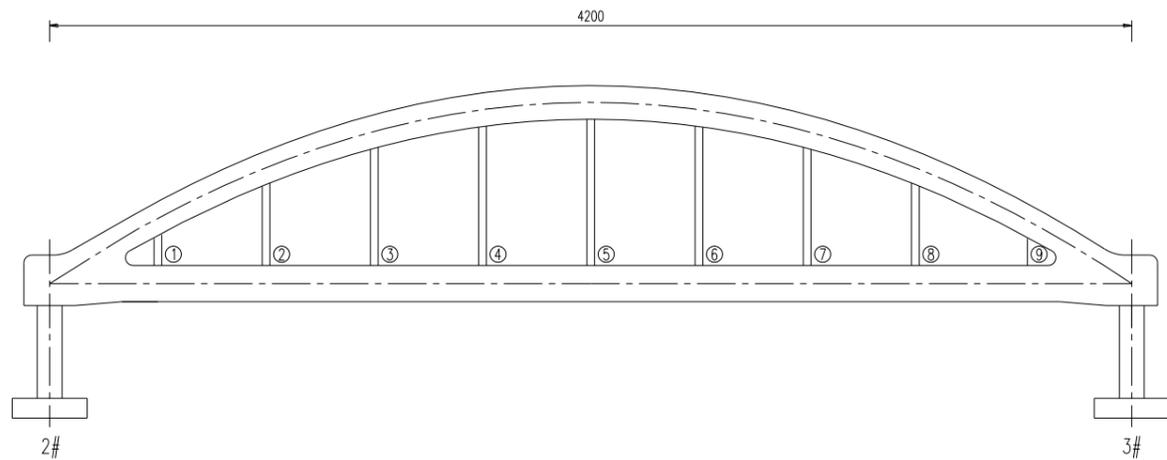
- (1) 设计荷载：汽车-20 级，挂车-100；
- (2) 通航标准：航道通航等级为五级，通航净空为 $38 \times 5 \text{ m}$ ，最高通航水位：2m。



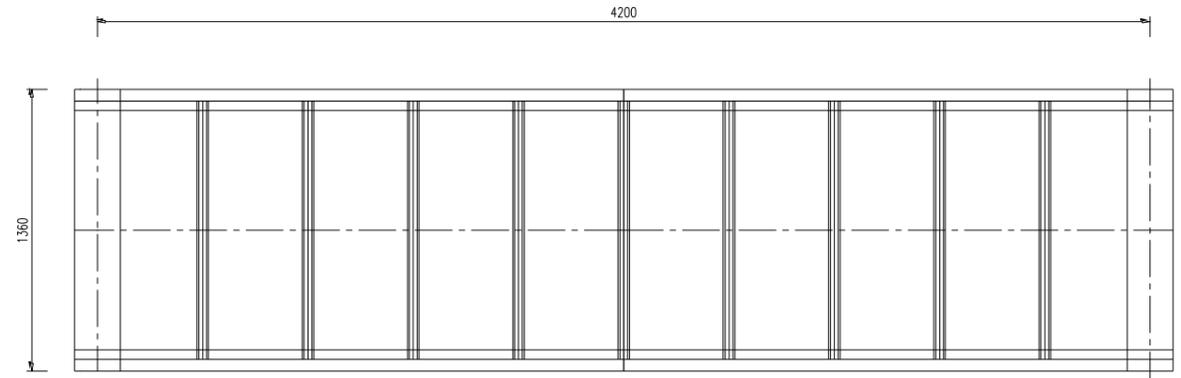
图 3.3-1 正面图



图 3.3-2 侧面图



(1) 主桥立面图



(2) 主桥平面图

图 3.3-3 串场河大桥主桥桥型布置图（单位：cm）

3.3.2 原有系统分析

S465 串场河大桥原有健康监测系统于 2021 年建成并投入使用，监测内容主要为：结构变形、结构应力（温度）、环境腐蚀、交通荷载，全桥共有测点 38 个。

表 3.3-1 串场河大桥原有健康监测项目

序号	监测类别	监测内容	主要设备名称	单位	数量	
1	作用	结构温度	桥面铺装层温度	电阻式温度传感器	台	2
		车辆	所有车道车重、车速、车流量等	压电薄膜传感器	车道	2
			桥面抓拍	高清摄像机	个	1
2	结构响应	位移	主梁竖向位移	图像法动位移监测仪	个	2
				标靶	个	8
3	结构响应	应变	主梁长期变形	棱镜	个	5
4			主梁关键截面应变	振弦式应变计	个	16
5	结构变化	腐蚀	锚头腐蚀	腐蚀探头	个	2
6	合计					38

原健康监测设备寿命 5 年，目前已运行至第 2 年，系统运行总体良好，各监测项数据完好率统计如下：

表 3.3-2 串场河大桥原有健康监测项目数据完好率

序号	监测指标	数据在线率	数据稳定性
1	桥面铺装层温度	100%	完好
2	锚头腐蚀	100%	完好
3	交通荷载	100%	完好
4	结构应力（温度）	100%	完好
5	主梁竖向位移	100%	完好

根据《2023年泰州市普通国省道桥梁健康监测系统设计项目—S465 串场河大桥数据分析报告（2024年1月-3月）》（华设检测科技有限公司），串场河大桥健康监测系统监测状况如下：

- (1) 桥梁结构在当前荷载作用下结构应力数据较为平稳，应力-温度相关性较好。
- (2) 该季度串场河大桥结构线形监测稳定，主梁最大挠度 6.0mm，未超过设计车载作用下的理论计算值。
- (3) 通过监测数据可知称重系统运行稳定，数据采集处于正常状态，本阶段日均通行量 1448 辆，通行车辆以两轴车为主，占比达 64.9%，六轴车共占 25.6%。

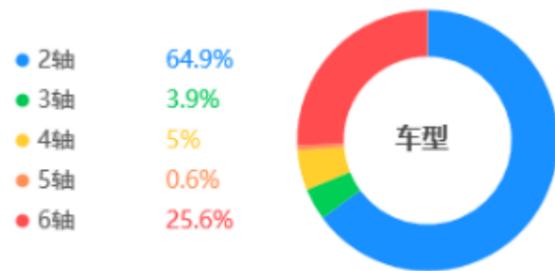
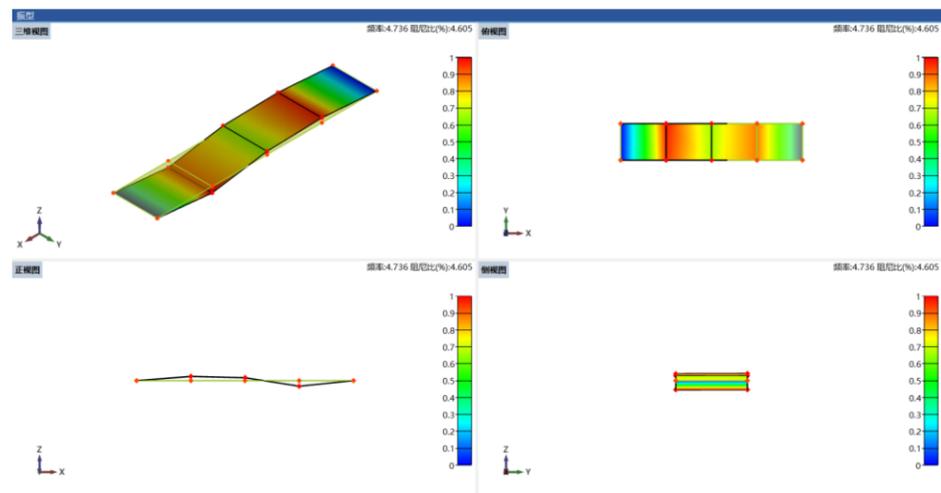


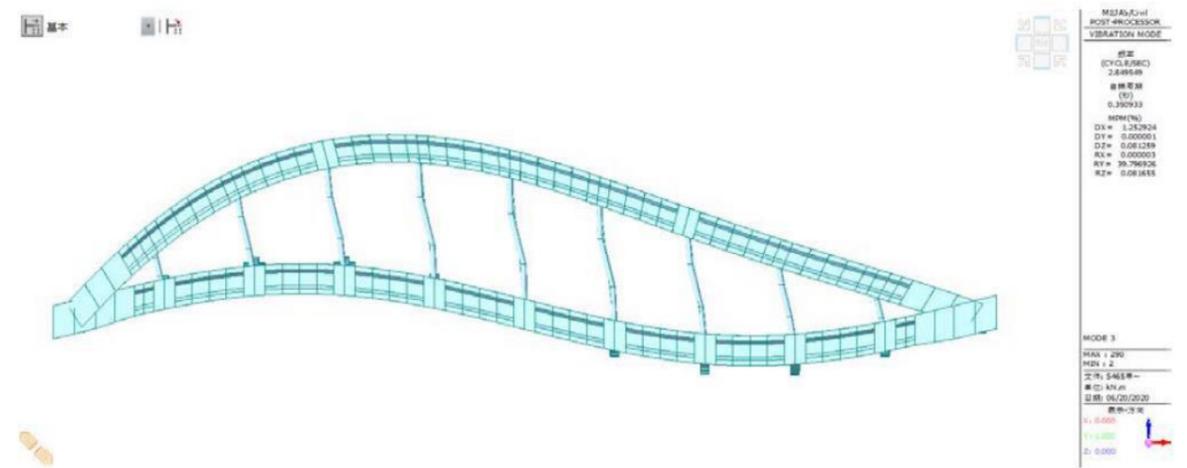
图 3.3-4 2023 年第二季度串场河大桥车辆通行量分布状况

3.3.3 桥梁养护现状调研

根据《2022年泰州市普通国省道桥梁特殊检查项目检测报告-S465 省道串场河大桥》（苏交科集团检测认证有限公司），S465 串场河大桥主桥总体 2022 年被评为 1 类(98.94)，其中：主桥上部结构 1 类（100），下部结构 1 类（98.18），该桥无明显病害，结构刚度满足要求。



(1) 实测 1 阶频率（频率：4.736Hz）



(2) 理论振型（1 阶竖弯振型，频率：2.850Hz）

图 3.3-5 串场河大桥结构基频

3.3.4 桥梁现场踏勘

本项目设计工作开展前，我单位按照技术人员对桥梁现场进行了踏勘。

(1) 结构外观情况

主桥结构外观未见明显异常，全桥吊杆经现场勘察为刚性吊杆。

(2) 现场电网设施供应条件

桥梁位置无线信号良好，桥梁原有结构监测系统供电稳定。

(3) 桥梁周边环境

桥梁附近环境主要包括河道、厂房，该桥水中落墩，下跨河道通航，现场通航标识完善。



(1) 通行货车

(2) 通航标识

图 3.3-6 串场河大桥现场踏勘照片

3.3.5 结构计算分析

3.3.5.1 模型建立

根据前期收集的技术资料及现场踏勘情况，运用有限元分析软件 MIDAS·CIVIL 建立了串场河大桥计算分析模型。全桥共划分 565 个单元、503 个节点，结构材料及构件尺寸等严格按照竣工资料取用。

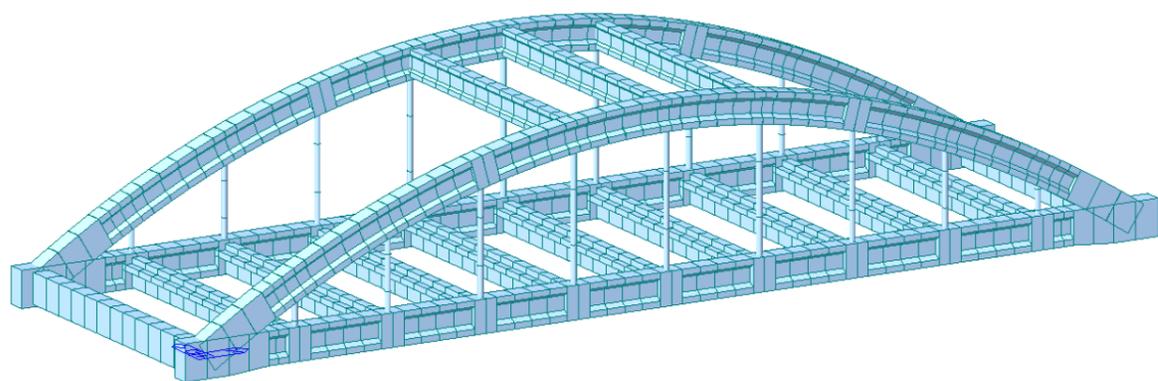


图 3.3-7 串场河大桥结构有限元仿真分析模型

3.3.5.2 结构响应特征

串场河大桥在外荷载作用下结构响应特征主要包括：

- (1) 在活载作用下，系梁四分点区域弯矩最大，达到 $1200\text{kN}\cdot\text{m}$ ；
- (2) 在活载作用下，系梁和拱肋所受轴力均较均匀，系梁所受压达 600kN ，拱肋受压达 750kN ；
- (3) 在活载作用下，系梁、拱肋最大位移分别为 0.6cm 、 0.5cm ，均位于四分点附近；
- (4) 根据计算结果及结构受力响应特征，串场河大桥结构健康监测系统设计部署应重点关注拱肋和系梁四分点、跨中区域。

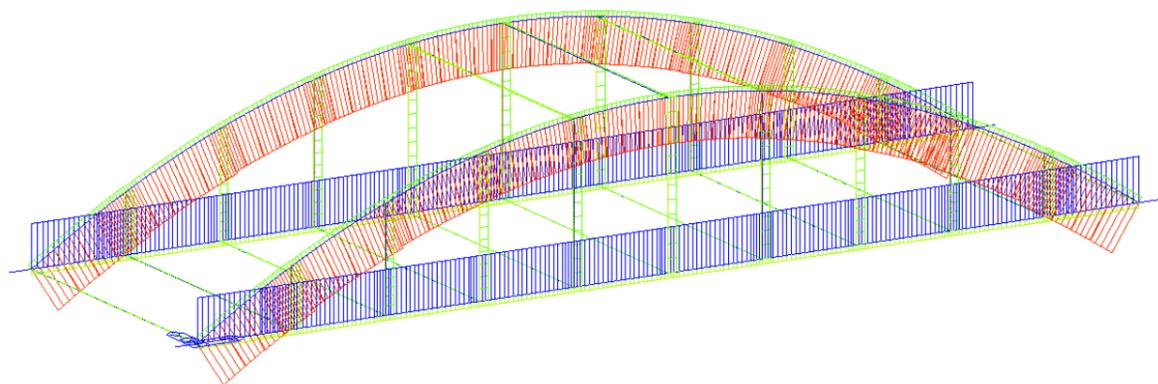


图 3.3-8 活载作用下结构轴力包络图

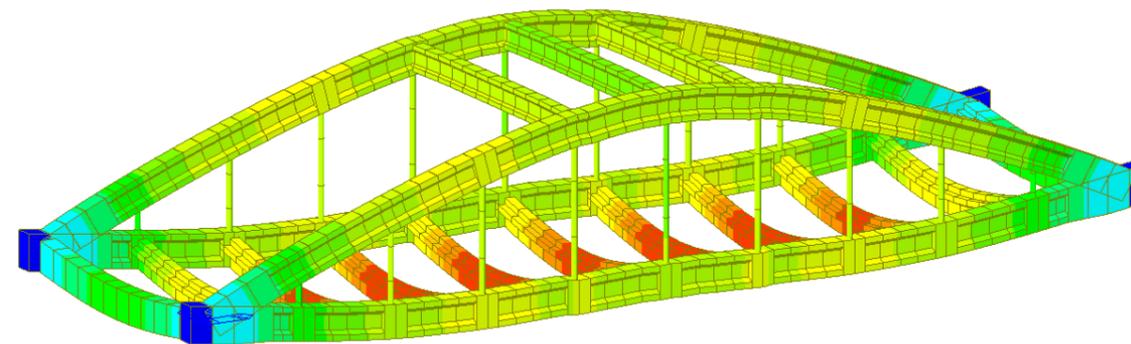


图 3.3-9 活载作用下结构挠度包络图

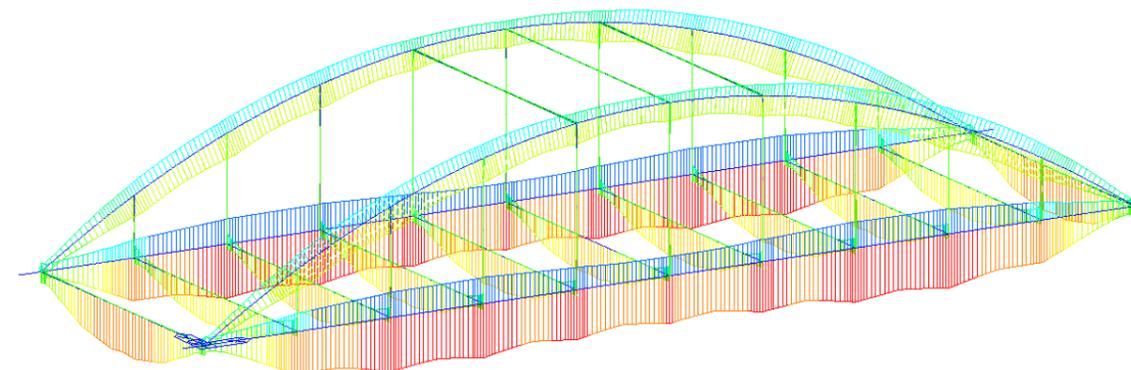


图 3.3-10 承活载作用下结构轴力包络图

3.3.6 小结

- (1) 串场河大桥设计荷载等级低，超重车辆较多，需重点关注车辆通行情况；
- (2) 该桥水中落墩，存在船舶碰撞风险，需要对航道通航情况进行监测；
- (3) 结构有限元分析结果表明健康监测重点区域为拱肋及系梁四分点、跨中、拱脚、横梁端部等区域。

4 设计参考依据

- (1) 相关桥梁监测系统设计资料、监测报告与定检报告；
- (2) 《江苏省普通国省道桥梁结构监测系统建设和运维管理办法》（试行）；
- (3) 《公路桥梁结构监测技术规范》（JT/T 1037-2022）；
- (4) 《建筑与桥梁结构监测技术规范》（GB 50982-2014）；
- (5) 《工程测量标准》（GB 50026-2020）；
- (6) 《公路桥涵养护规范》（JTG 5120-2021）；

- (7) 《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG/T H21-2011）；
- (8) 《公路桥梁承载能力检测评定规程》（JTG/T J21-2011）；
- (9) 《公路工程技术标准》（JTG B01-2014）；
- (10) 《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）；
- (11) 《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）；
- (12) 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）；
- (13) 《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363-2019）；
- (14) 《公路养护安全作业规程》（JTG H30-2015）；
- (15) 《计算机软件可靠性和可维护性管理》（GB/T 14394-2008）；
- (16) 《软件产品质量要求与评价》（GB/T 25000.1-2010）；
- (17) 《建筑物电子信息系统防雷技术规范》（GB 50343-2012）；
- (18) 《综合布线系统工程设计规范》（GB 50311-2016）；
- (19) 《系统接地的型式及安全技术要求》（GB 14050-2008）；
- (20) 《低压配电设计规范》（GB 50054-2011）；
- (21) 《民用建筑电气设计标准》（GB 51348-2019）；
- (22) 《电力工程电缆设计标准》（GB 50217-2018）；
- (23) 《计算机场地安全要求》（GB/T 9361-2011）；
- (24) 《计算机场地通用规范》（GB/T 2887-2011）；
- (25) 《公路工程质量检验评定标准 第二分册 机电工程》（JTG 2182-2020）；
- (26) 《建筑工程施工质量验收统一标准》（GB50300-2013）；
- (27) 《建筑电气工程施工质量验收规范》（GB50303-2015）；
- (28) 《软件系统验收规范》（GB/T 28035-2011）。

注：当上述标准、规范有不一致之处，按照标准和要求高者执行。

5 监测系统总体设计架构

5.1 设计原则

- (1) 应遵从“技术可靠、因桥制宜、经济实用”的原则；
- (2) 统筹考虑监测内容，实现监测设备和监测数据的共享共用；
- (3) 应充分分析结构特点及已有病害，并考虑常规检查不易跟踪观察的重要信息；

- (4) 应充分利用人工检查与常规结构监测的优势互补；
- (5) 应考虑开放环境下传感器及系统的防盗防破坏问题；
- (6) 系统元件的布设不能影响原桥梁构件的正常工作；
- (7) 应综合权衡仿真计算分析结论及桥梁结构病害分布情况确定测点位置；
- (8) 仿真计算分析应按事先搜集的桥梁设计竣工资料建立有限元模型。

5.2 监测对象选择

根据《公路桥梁结构监测技术规范》（JT/T1037-2022）（以下简称“部颁规范”）相关条文说明，结合桥梁结构实际特点及服役现状，进行桥梁监测项目的选择。监测项目选择的主要考虑因素包括：

(1) 环境温湿度是桥梁结构服役过程中需要面对的主要作用因素之一，对应监测数值为桥梁结构耐久性分析及环境作用效应关联分析提供直接的数据支撑。

(2) 桥面铺装受雨雪天气影响，冬天易结冰，影响交通安全，因此有必要监测路面温度，高温报警洒水养护，低温报警消冰初雪。

(3) 主梁挠度、拱顶位移作为结构形态变化的特征参数，是结构服役状态的最直观外化指标。当结构发生明显异常的变形时，结构实际受力状态或者承受外界作用的边界条件将会发生重大变化，因而结构本身服役状态已经与结构受力设计状态之间存在偏离，结构安全已经不能得到有效保证。因此有必要对结构变形指标进行监测、累计数据并分析结构当前状态是否异常。

(4) 桥梁结构应变状态与结构服役状态息息相关。首先，当前桥梁结构设计规范要求结构设计阶段结构工作应变必须在合适的工作范围区间内。其次，结构应变与结构建筑材料之间存在先天联系，结构材料本身材料强度指标作为结构安全评估的重要内容。结构本身服役状态发生严重变化时，必然引起结构构件变形进而发生结构应变的变化，通过对结构应变不同时间点的持续跟踪可以实现结构当前服役状态有否存在异常变化的跟踪监测。因此有必要将结构应变作为健康监测的指标之一。

(5) 结构振动是外荷载突发激励下结构效应的实时反馈，通过对桥梁振动加速度的监测，可以判断桥梁是否发生过大振动，结构振动也是桥梁结构动力特征参数跟踪分析及评估的必要手段。

(6) 一般混凝土裂缝的出现将导致大气环境中的腐蚀介质加速侵入结构内部，进而对结构材料耐久性能造成不利影响。结构受力性质的混凝土裂缝在结构服役期间如果持续发展，有可能对受力关键构件工作状态产生严重的不利影响，进而可能对结构整体承载能力

造成危害。因此有必要筛选重点关注的裂缝进行后续在线实时监测。

(7) 随着服役时间增长,在外在环境和疲劳荷载共同作用下,吊杆常常出现锈蚀问题,而锈蚀现象的出现会削减吊杆截面面积,使吊杆疲劳性能下降,疲劳寿命降低,严重威胁吊杆的安全。因此有必要筛选重点关注的吊杆进行后续在线实时监测。

(8) 人工检查结果是对桥梁结构健康监测数据分析的重要补充。通过实时数据和人工检查相结合的方式,使监测分析更全面、更准确。

S231 泰东河大桥、S231 新通扬运河桥、S465 串场河大桥与部颁规范响应关系对照表如下所示。其中, S231 泰东河大桥、S231 新通扬运河桥处于同一线路上,直线距离约为 2km,因此在环境温湿度及桥面温度方面突出数据的共享共用。

表 5-1 桥梁监测项目响应情况（梁桥）

监测类别		监测内容	交通部规范	S231 泰东河大桥	S231 新通扬运河桥
环境	温湿度	桥址区环境温度、湿度	●	√	√（共用）
		主梁内温度、湿度*	●	不涉及	不涉及
	结冰	桥面结冰	◎		
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、车速	○	已实施（半幅）	已实施（半幅）
		所有车道车流量	○	已实施（半幅）	已实施（半幅）
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎	已实施（半幅）	已实施（半幅）
	风速风向	桥面风速、风向	◎		
	结构温度	混凝土或钢结构构件温度	●	√	√
		桥面铺装层温度	○	√	√（共用）
	船舶撞击	桥墩加速度	○		
		视频图像	○		
地震	桥岸地表场地加速度	◎			
	承台顶或桥墩底部加速度（抗震设防烈度为VII度及以下）	○		√	
结构响应	位移	主梁竖向位移	●	已实施（半幅）	已实施（半幅）
		支座位移	○		
		梁端纵向位移	○	√	√
		高墩墩顶位移	○		
	应变	主梁关键截面应变	●	已实施（半幅）	已实施
	支座反力	支座反力	○		
		振动	主梁竖向振动加速度	●	√
主梁横向振动加速度	○				
主梁纵向振动加速度	○				
	桥墩顶部纵向及横向振动加速度	◎			
结构	基础冲刷	基础冲刷深度	◎		

监测类别		监测内容	交通部规范	S231 泰东河大桥	S231 新通扬运河桥
变化	桥墩沉降	桥墩竖向位移	○		
	裂缝	混凝土结构裂缝	○	已实施（半幅）	
		钢结构裂缝	○		
	腐蚀	墩身、承台混凝土氯离子浓度	◎		钢结构腐蚀
		墩身、承台混凝土侵蚀深度	◎		
	预应力	体外预应力	●	不涉及	不涉及
螺栓状态	高强螺栓紧固力、螺栓脱落	○		√	

备注：1、JT/T 1037-2022：（1）●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。

（2）*仅适用于封闭箱梁。

表 5-2 桥梁监测项目响应情况（拱桥）

监测类别		监测内容	交通部规范	串场河大桥实施设计响应
环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●	√
		主梁内温度、湿度 ^a	●	不涉及
		主拱内温度、湿度 ^b	●	不涉及
	结冰	桥面结冰、吊杆结冰	◎	
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、车速、车速 ^c	●/○	已实施
		所有车道车流量 ^c	●/○	已实施
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎	√
	风速、风向	桥面风速、风向 ^c	●/○	不涉及
		拱顶风速、风向	◎	
	结构温度	混凝土或钢结构构件温度	●	已实施
		桥面铺装层温度	○	已实施
	船舶撞击	桥墩加速度	○	√
视频图像		○	√	
地震	桥岸地表场地加速度	◎		
	承台顶或桥墩底部加速度（抗震设防烈度为VII度及以上）	●	不涉及	
	承台顶或桥墩底部加速度（抗震设防烈度为VII度以下）	○		
结构响应	位移	主梁竖向位移	●	
		主梁横向位移	○	
		支座位移	○	
		梁端纵向位移	○	√
		拱顶位移	●	√
	应变	主梁关键截面应变	●	已实施
		主拱关键截面应变	○	已实施
索力	吊杆（索）力	●	刚性吊杆	

监测类别	监测内容	交通部规范	串场河大桥实施设计响应	
	系杆力	●	不涉及	
	支座反力	○		
	振动	主梁竖向振动加速度	●	√
		主梁横向振动加速度	○	
		主梁纵向振动加速度	◎	
		主拱振动加速度	●	√
		吊杆（索）振动加速度	●	刚性吊杆
结构变化	基础冲刷	◎		
	位移	●	不涉及	
	裂缝	混凝土结构裂缝	○	
		钢结构裂缝	○	
	腐蚀	墩身，承台混凝土氯离子浓度	◎	
		墩身，承台混凝土土氯离子侵蚀深度	◎	
	断丝	吊杆（索）或系杆断丝	○	
	螺栓状态	高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	○	

备注：1、JT/T1037-2022：（1）●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。

（2）^a仅适用于封闭箱梁。^b仅适用于箱型拱。^c中、下承式拱桥为应选监测项、上承式拱桥为宜选监测项。

5.3 监测系统架构组成

在充分调研桥梁设计与桥梁结构特点基础上，结合桥梁的维护管养需求，本系统采用自动化数据采集与人工巡检养护相结合的方式建立。自动化数据采集分析部分分为五个部分，传感器子系统、数据传输子系统、数据存储与管理子系统、数据分析与预警子系统以及用户界面子系统，主要监测桥梁上部结构状态的变化，重点掌控桥梁的结构内力状态的变化；人工检查检测信息作为重要补充进行结构安全综合分析。

从软件架构上来看，又分为采集层、应用层以及数据层，详见图 4.5-1。

数据采集层：工控机接收采集设备发送的数据，并将数据预处理后转发至省局服务器。

应用层：又分为控制层、业务逻辑层及数据服务层。控制层负责场端数据的接收、校验、反馈及存储；业务逻辑层负责数据的分析、展现等；数据服务层为数据深入挖掘提供对外数据接口。

数据层：负责数据的存储、读取。

系统建设分层次设计，可扩展性强，并且易维护。系统建设各模块关系低耦合，数据、业务分层（MVC）。

为继续执行“一省一平台”的管理规定，数据传输子系统、数据存储与管理子系统、数据分析与预警子系统、用户界面子系统等与数据协议、通信、管理、分析、展示等相关的

子系统工作统一采用江苏省交通运输厅公路事业发展中心开发的“江苏省普通国省道桥梁结构监测系统 2.0”。

5.3.1 传感器子系统

该子系统主要为监测元器件及其附属及保护设施，属于整个监测系统的最底层的一个子系统。主要功能是：在桥梁代表性的、控制性、关键截面和部位上安装各种类型少而精、适宜的传感器测试设备。

5.3.2 数据传输子系统

数据传输子系统统一数据接口及网关，实现桥梁结构健康监测项目的接入和数据接收。

数据传输系统共分为监测数据通信服务和监测数据通信测试服务两个子模块。

数据通信服务子模块：接收现场客户端上传的实时监测及设备状态数据，对接收到的数据进行有效性判断，并返回数据上传的结果。

数据通信测试服务子模块：为客户端开发人员提供测试平台。

5.3.3 数据存储与管理子系统

结构监测系统中存在各个子系统、子模块的配置信息、桥梁结构数字化信息以及采集处理的数据，大桥全寿命期内数据量、图形量庞大，信息的种类繁多，有多个子系统共享并互相调用数据信息，同时要支持分布式的处理与访问，也要支持多并发用户的操作，因此数据的安全性极为重要。通过建立系统的数据存储与管理子系统，统一管理组织数据信息，给系统的维护与管理提供便利，也为各应用子系统提供可靠的分布式数据交换与存储平台，方便开发与使用。

5.3.4 数据分析与预警子系统

桥梁监测分析与预警子系统实现监测数据的展示、分析及预警，为桥梁养护管理提供决策依据和指导。

5.3.5 用户界面子系统

本项目用户界面子系统采用江苏省交通运输厅公路事业发展中心开发的“江苏省普通国省道桥梁结构监测系统 2.0”，进行数据的统一管理及分析。



图 5.3-1 江苏省普通国省道桥梁结构监测系统 2.0

5.4 系统物理层面划分

系统在物理位置上划分为现场工作站和监测中心。现场工作站主要放置数据采集设备，包括：解调仪、采集仪和数字信号采集设备等。监测中心放置系统需要的各种服务器，包括：数据采集服务器、数据分析服务器、Web 服务器和数据库服务器。系统部署完成后，用户通过系统提供软件界面使用系统。

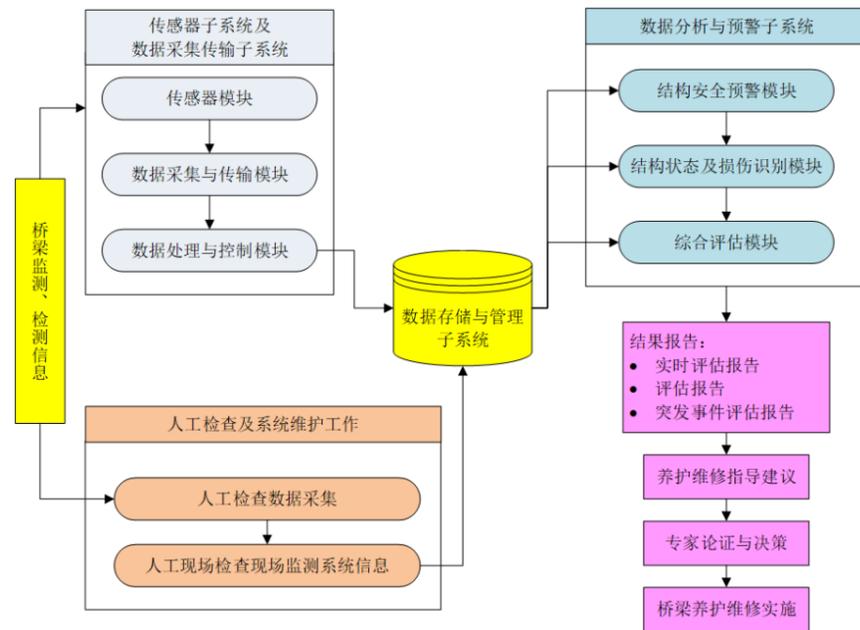


图 5.4-1 系统总体工作流程图

5.5 结构定期巡查及系统维护

5.5.1 检查内容

人工检查按照桥梁养护规范进行，其中重点关注以下内容：

- (1) 伸缩缝是否有异常变形、破损、脱落、漏水，是否造成明显的跳车；
- (2) 护栏有无撞坏、断裂、错位、缺件、剥落、锈蚀等；
- (3) 混凝土预应变束锚固区有无开裂，沿预应变束表面有无纵向裂缝；
- (4) 结构受拉边缘是否存在横向裂缝；
- (5) 结构原有裂缝是否反复开展；
- (6) 混凝土有无渗水、表面风化及严重碳化、剥落、露筋、钢筋锈蚀；
- (7) 混凝土有无碱集料反应引起的整体龟裂现象；
- (8) 支座组件是否完好、清洁，有无断裂、错位、脱空，异常变位；
- (9) 桥墩及基础有无滑动、倾斜、下沉；
- (10) 混凝土桥墩及帽梁有无开裂、剥落、露筋等；
- (11) 前次检测结果列明病害的发展变化情况。

人工检查期间应对桥梁监测系统工作状况进行确认，主要包括：

- (1) 传感器是否正常工作，是否脱落；
- (2) 传感器线路有无人为损伤及自然老化破损；
- (3) 传感器附近构件表面是否存在损伤；
- (4) 桥梁现场数据采集传输终端是否完好，工作环境是否潮湿；
- (5) 现场电力供应设施是否正常工作；
- (6) 现场电力供应设施安全防护设施是否完好；
- (7) 现场电力供应设施安全警示标识是否清晰醒目。

5.5.2 检查频率

人工定期检查每季度进行一次。

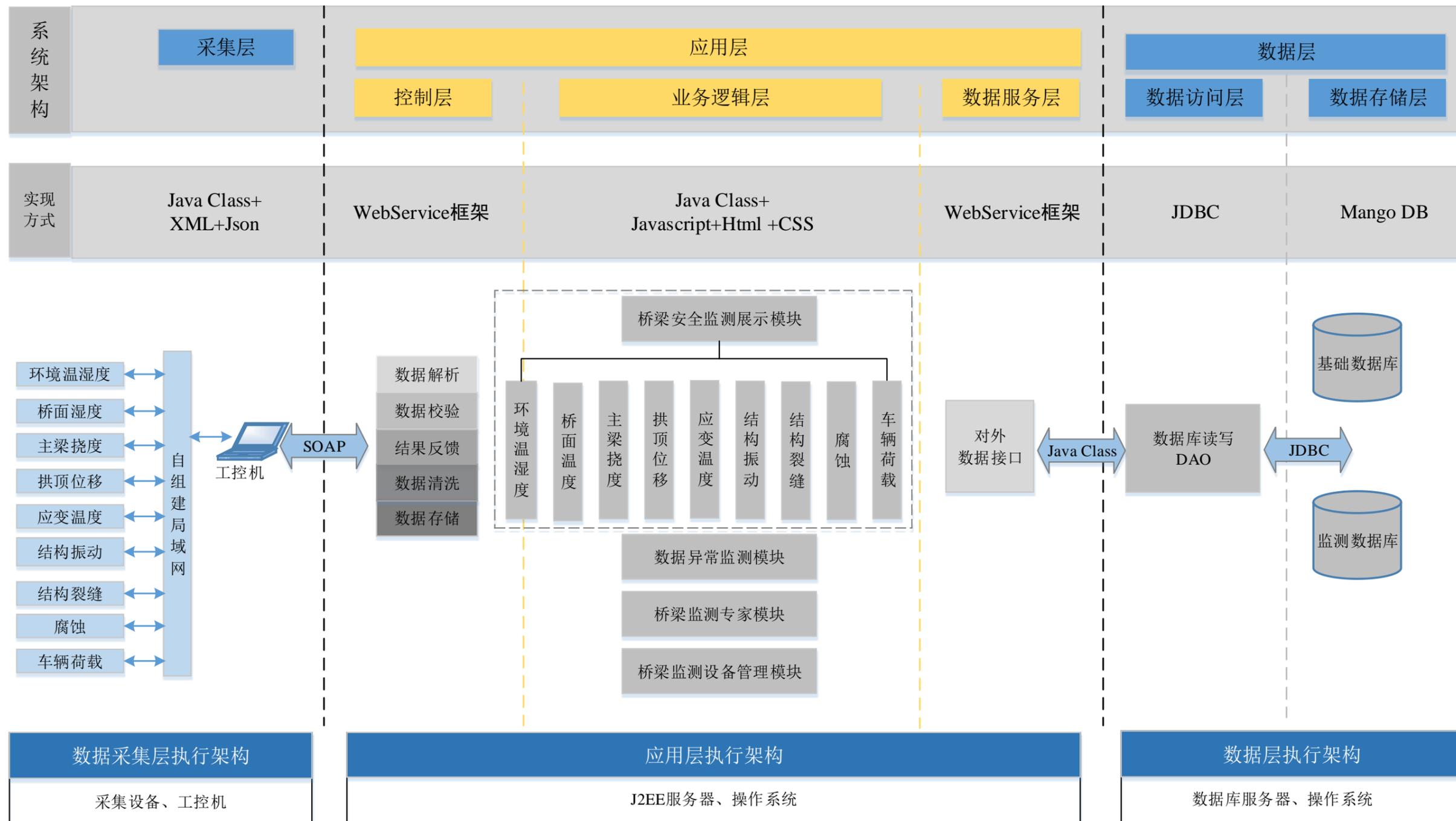


图 5.5-1 系统软件架构图

6 传感器子系统

6.1 传感器选型原则

结构监测是个长时间、连续的观测活动，布置的所有监测测点传感器要精确、寿命长、耐高温性好，测点保护要可靠，采集线路要规整并有可靠保护，不易损坏。在传感器和测试设备选型上，需要满足如下原则：先进性、可靠性、耐久性、可更换性等。

6.2 S231 泰东河大桥

6.2.1 主要监测设备

S231 泰东河大桥既有监测设备如图 5.2-1 与表 5.2-1 所示，全桥共布设 4 个监测项目，合计 71 个测点。

表 6.2-1 S231 泰东河大桥安全监测既有主要设备

序号	监测类别		监测内容	主要设备名称	单位	数量
1	作用	车辆	所有车道车重、车速、车流量等	压电薄膜传感器	车道	3
2	结构响应	位移	主梁竖向位移	倾角仪	个	9
3			主梁长期变形	棱镜	个	13
4		应变	主梁关键截面应变	振弦式应变计	个	36
5	结构变化	裂缝	主梁混凝土裂缝	柔性导电涂料	个	10
6	合计					71

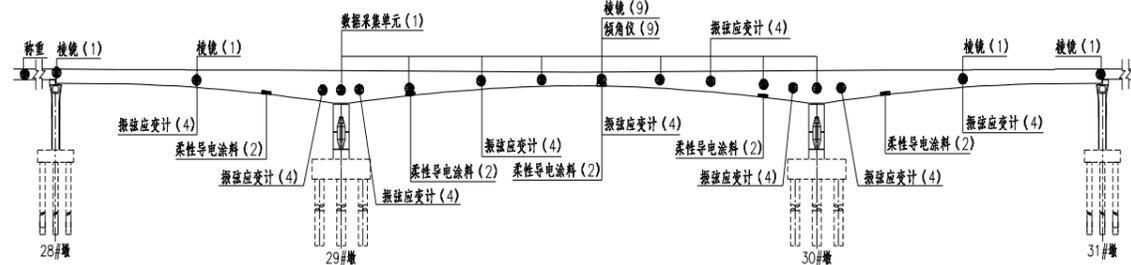


图 6.2-1 S231 泰东河大桥既有测点总体布置图

本次设计的监测项目为 S231 泰东河大桥健康监测系统升级改造，本次系统升级后监测设备如图 5.2-2 与表 5.2-2 所示，升级后全桥共布设 10 个监测项目，合计 105 个测点。

表 6.2-2 S231 泰东河大桥安全监测升级后主要设备

序号	监测类别		监测内容	主要设备名称	单位	原有	升级后	备注
1	环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	温湿度计	个	0	1	
2	作用	结构温度	桥面铺装层温度	电阻式温度传感器	台	0	2	
3		车辆荷载	所有车道车重、车速、车流量等	压电薄膜传感器	车道	3	3	
4		船舶撞击	桥面抓拍	高清摄像头	个	0	2	
5	结构响应	位移	主梁竖向位移	图像法动位移监测仪	台	0	1	
6				标靶	个	0	4	
7				倾角仪	个	9	9	
8		主梁长期挠度	棱镜	个	13	13		
9	梁端纵向位移	拉线式位移传感器	个	0	4			
10	应变	主梁关键截面应变	振弦式应变计(温度)	个	36	48	新增 12 个	
11	振动	主梁振动加速度	低频加速度传感器	个	0	6		
12	结构变化	裂缝	混凝土裂缝	振弦式表面裂缝计/柔性导电涂料	个	10	10	
13	合计					71	105	

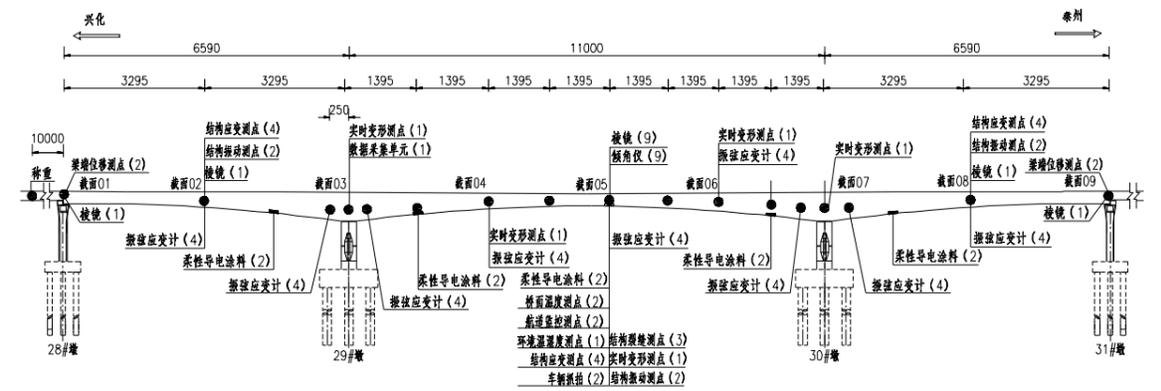


图 6.2-2 S231 泰东河大桥升级后测点总体布置图

6.2.2 测点布置

6.2.2.1 环境温湿度监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.2 节，桥址区环境温度和湿度的监测测点宜布设在桥梁跨中位置。

在泰东河大桥右侧栏杆处布置 1 个环境温湿度测点，在测点处布置 1 个温湿度计，全桥共布置 1 个温湿度计。

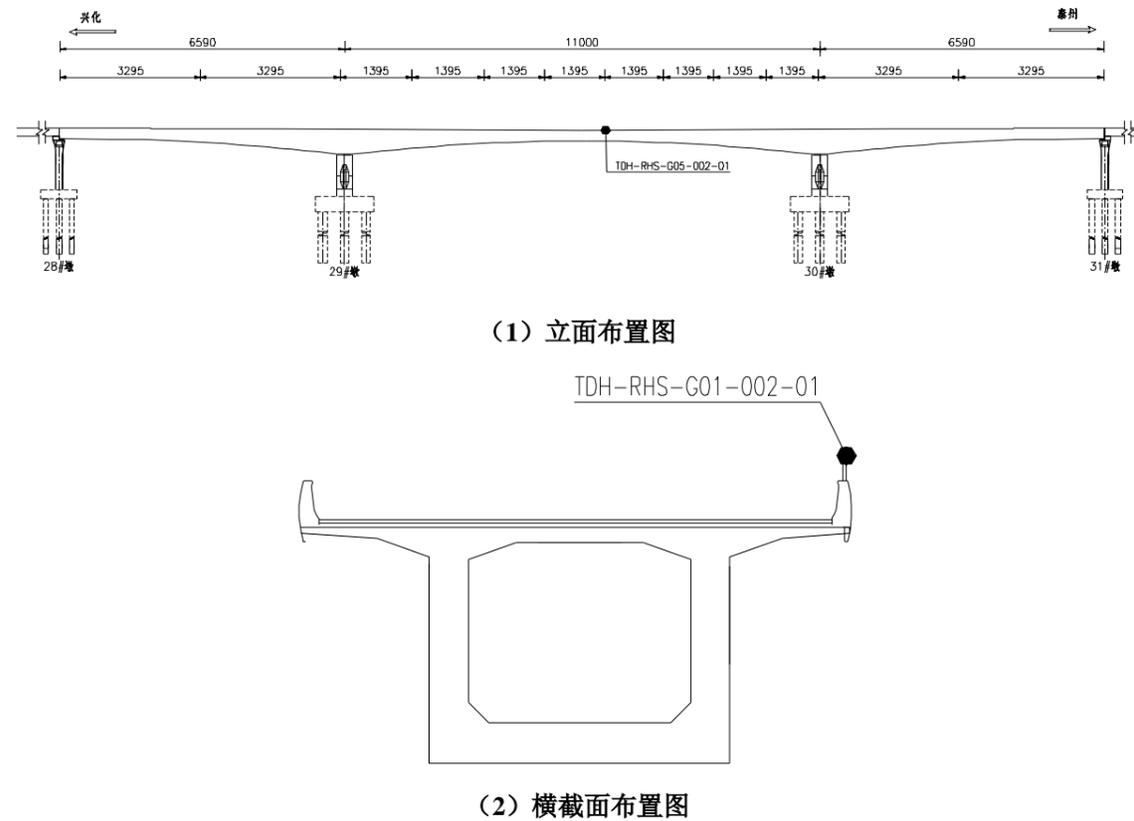


图 6.2-3 泰东河大桥环境温湿度监测测点布置图（单位：cm）

6.2.2.2 桥面温度监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.3 节，结构温度监测测点应根据桥梁结构温度场分布特点并结合结构类型、联长、跨径、构件尺寸、铺装体系、日照情况等因素综合确定，宜在主梁铺装层布设温度监测测点。

在泰东河大桥跨中左右侧桥面铺装处布置 1 个桥面铺装层温度测点，每幅布置 1 个电阻式温度计，全桥共布置 2 个电阻式温度计。

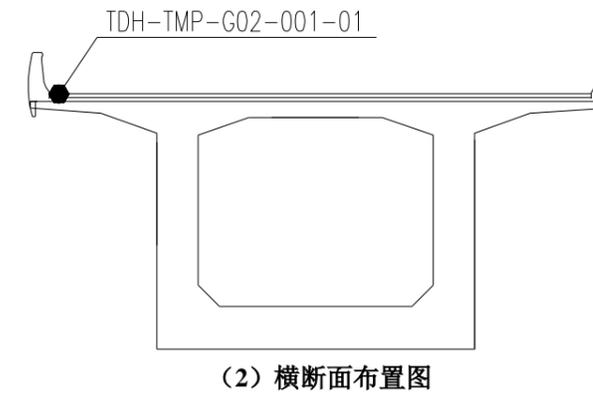
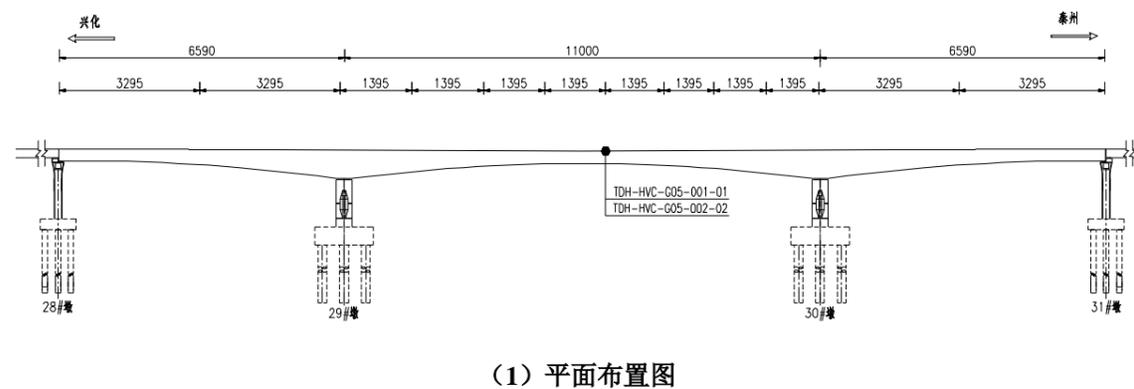


图 6.2-4 泰东河大桥桥面温度监测测点布置图（单位：cm）

6.2.2.3 航道监控监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.3 节，航道监控测点宜在主梁上、下游两侧对称布设。

为加强对桥梁服役期间桥下通航情况，获取桥址区突发事件发生前后实际状况，在泰东河大桥主桥左右幅各布设 1 个航道监控监测测点，全桥共布设 2 个。

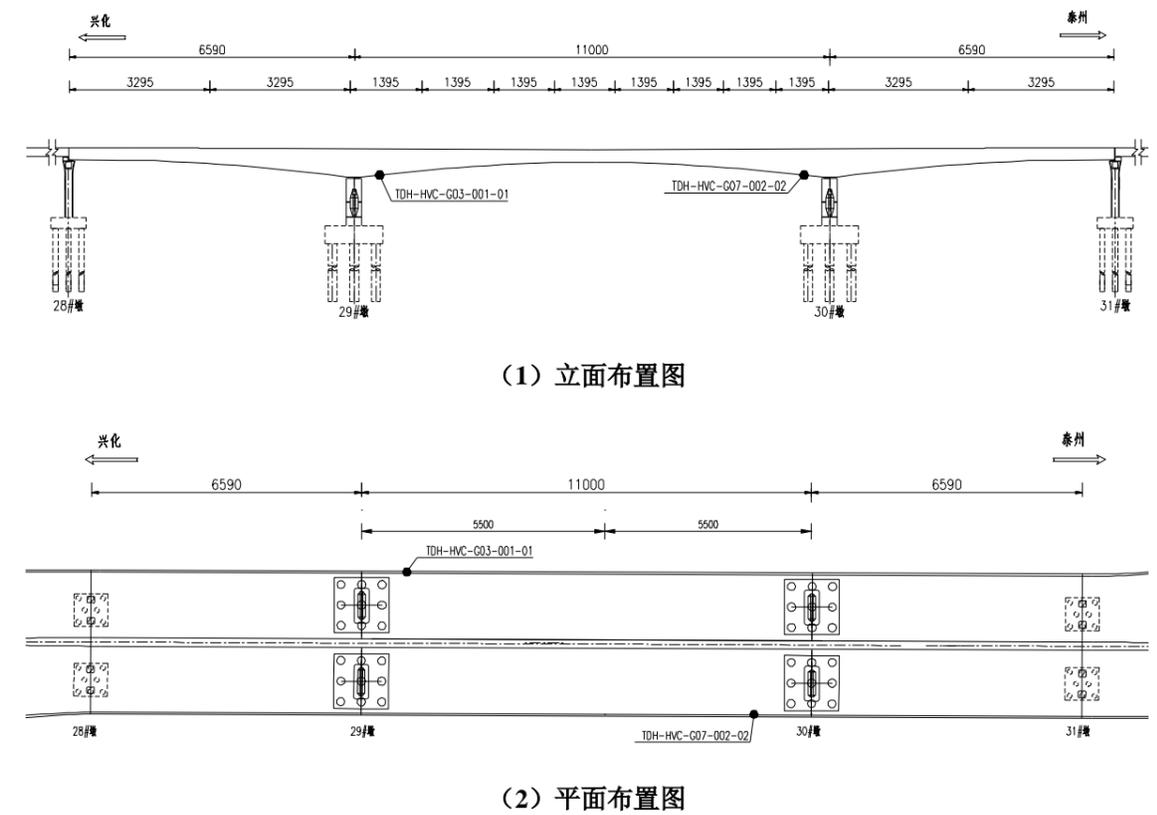


图 6.2-5 泰东河大桥航道监控测点布置图（单位：cm）

6.2.2.4 桥面抓拍监测

为监测桥梁重车通行情况，后期与主梁挠度监测进行联动，在泰东河大桥主桥左右幅桥梁各布设1个桥面抓拍监测测点，全桥共布设2个。

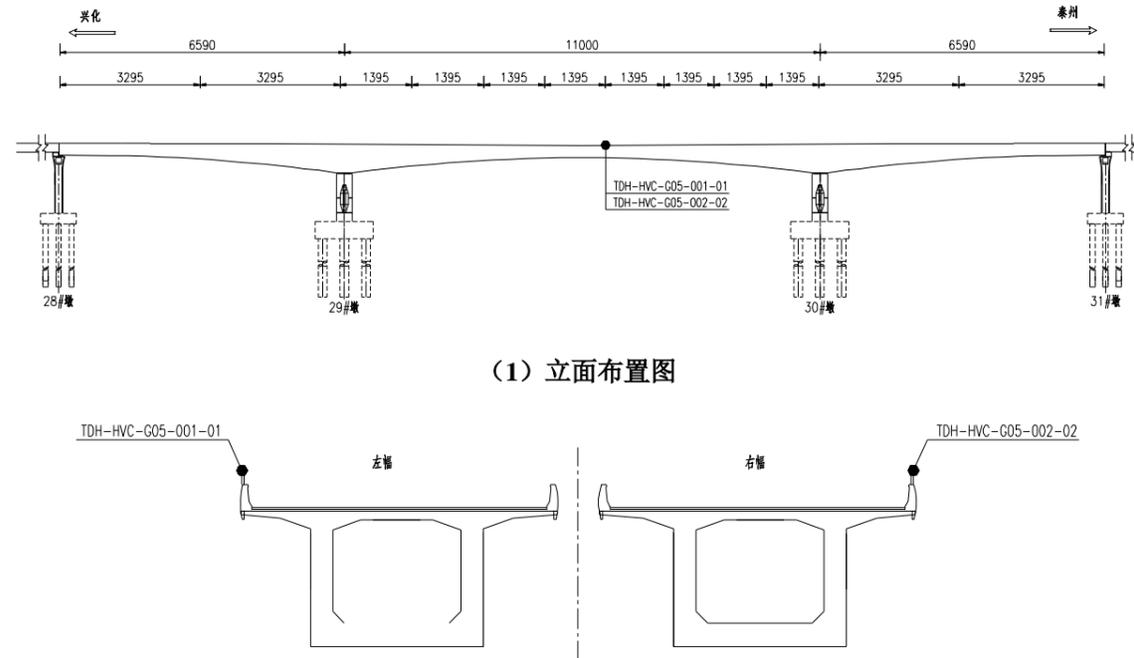
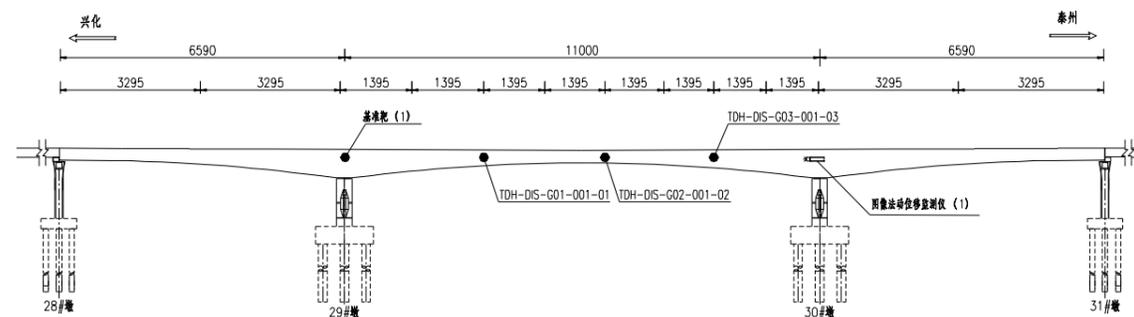


图 6.2-6 泰东河大桥航道监控测点布置图（单位：cm）

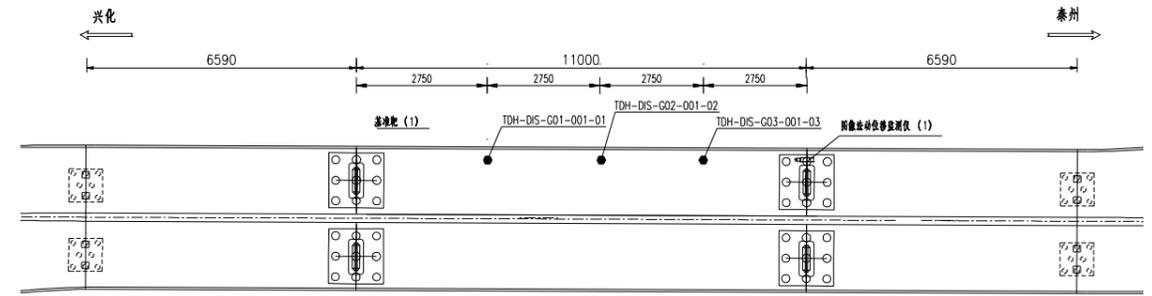
6.2.2.5 主梁挠度监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.4 节，主梁竖向位移监测测点应在主跨跨中和 1/4、3/4 主跨。

泰东河大桥主桥右幅已布置实时挠度测点，本次在左幅箱内布设主梁竖向位移测点，全桥共布置 4 个标靶，1 台图像法动位移监测仪。



(1) 立面布置图



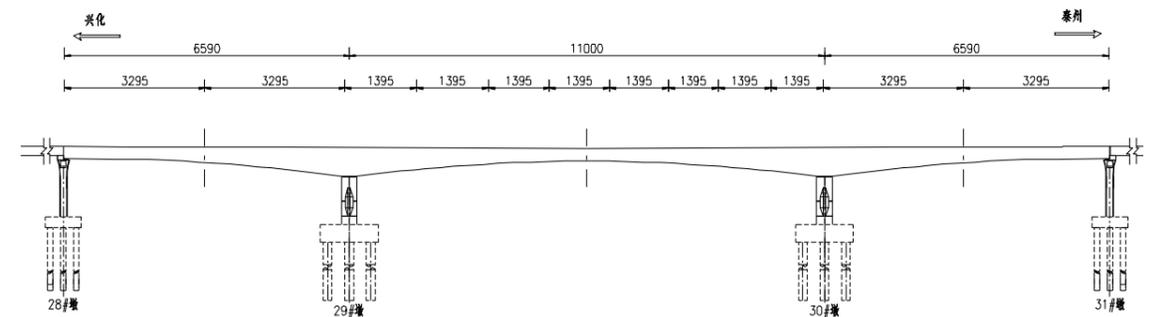
(2) 平面布置图

图 6.2-7 泰东河大桥实时性主梁挠度监测测点布置图（单位：cm）

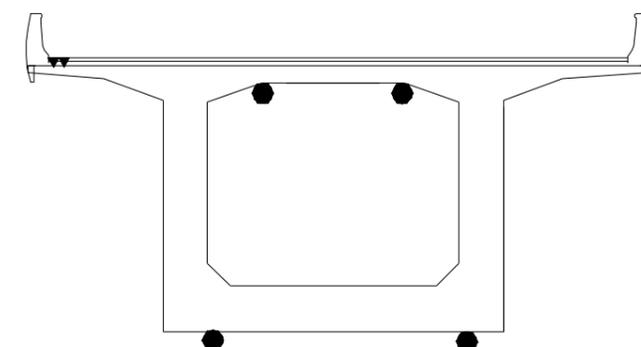
6.2.2.6 结构应变监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.4 节，主梁等关键构件截面静态和动态应变监测测点位置和数量应根据结构计算分析和易损性分析，选择受力较大的关键截面、部位布设。

泰东河大桥原健康监测系统在右幅布置了 32 个结构应变测点，本次升级改造保留原有设备，并在左幅各跨跨中布置结构应变监测截面，每个截面布置 4 个振弦式应变传感器，全桥共新增 12 个振弦式应变传感器。



(1) 立面布置示意图



(2) 平面布置示意图

图 6.2-1 泰东河大桥结构应变监测测点布置图（单位：cm）

6.2.2.7 结构振动监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第7.4节，主梁竖向振动监测测点应根据主梁振动振型确定，主拱振动监测测点应根据主拱振型确定，宜布设在振型峰值点处，避开振型节点；测点位置应至少包括主跨跨中和1/4、3/4主跨。

通过结构振动监测数据可以判断桥梁是否发生过大振动，识别桥梁结构动力特性，泰东河大桥选取各跨跨中截面处布设1个结构振动监测测点，全桥共布置6个低频加速度传感器。

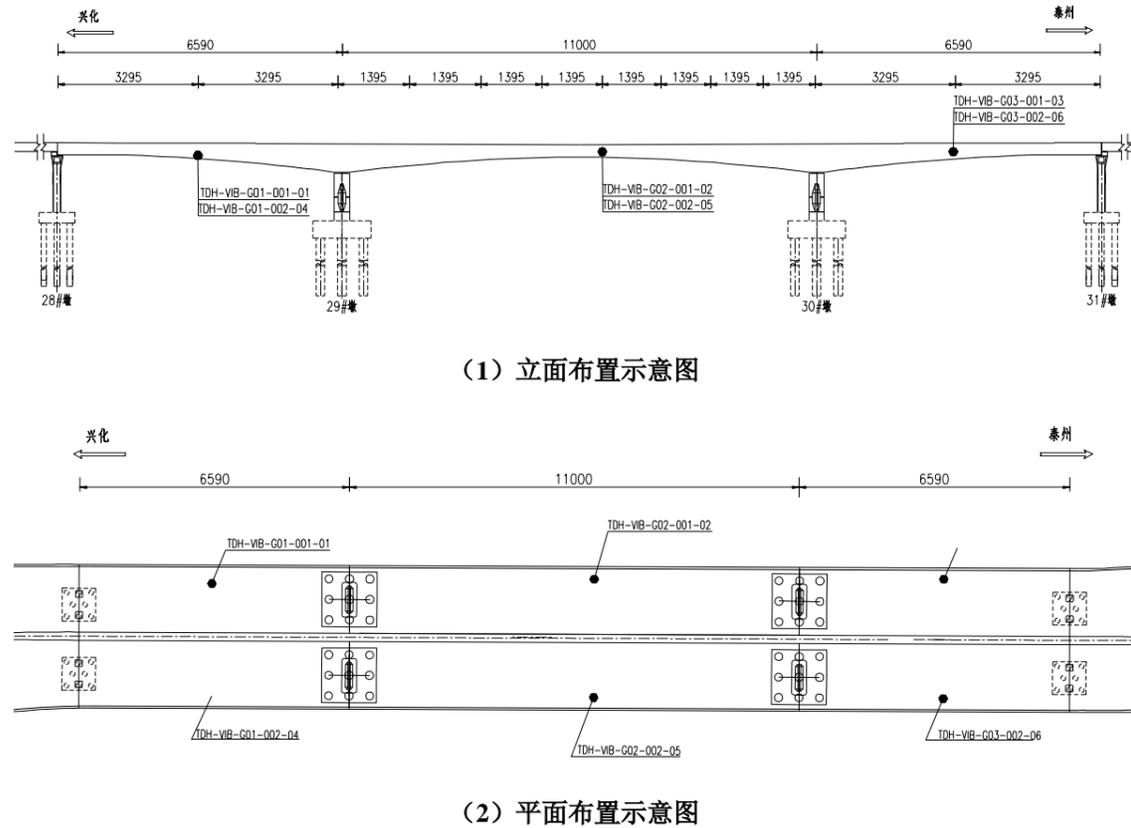


图 6.2-8 泰东河大桥结构振动监测测点布置图（单位：cm）

6.2.2.8 梁端位移监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第7.4节，主梁梁端纵向位移测点宜布设在墩顶梁端支座处。

在泰东河大桥两侧伸缩缝处各布设1个梁端位移测点，每个测点布置1个拉绳式位移传感器，单幅布置2个拉绳式位移传感器，全桥共布置4个。

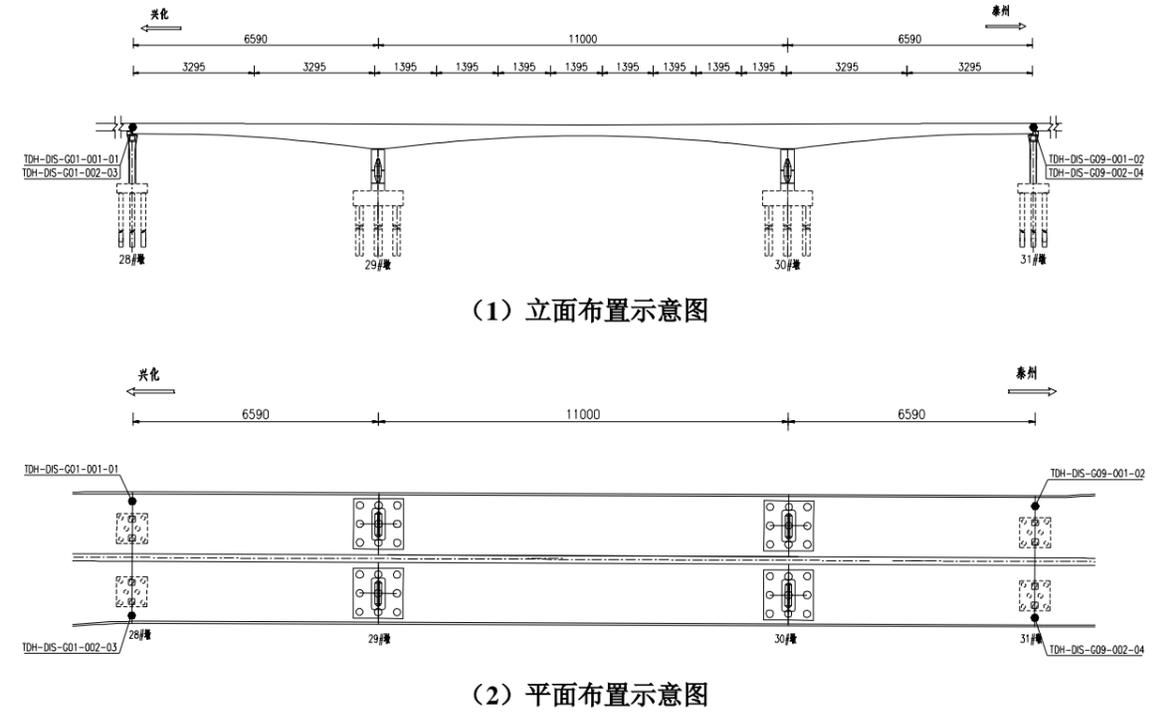


图 6.2-9 泰东河大桥梁端位移监测测点布置图（单位：cm）

6.2.2.9 结构裂缝监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第7.5节，“混凝土结构和钢结构裂缝监测测点应依据检查(测)、技术状况评定、养护维修结果确定测点位置和数量，宜对裂缝宽度和长度变化跟踪观测。”

泰东河大桥已设置导电薄膜进行裂缝监测，监测过程中未发现新增裂缝，本次升级改造保留原有测点。

6.3 S231 新通扬运河桥

6.3.1 主要监测设备

泰州市 S231 新通扬运河桥原健康监测系统设计项目及主要使用的监测设备如表 6.3-1 与图 6.3-1 所示。全桥共布设5个监测项目，合计56个监测设备。

表 6.3-1 泰州市 S231 新通扬运河桥原结构健康监测系统设计项目

序号	监测类别		监测内容	主要设备名称	单位	数量
1	作用	车辆	所有车道车重、车速、车流量等	压电薄膜传感器	车道	3
2	结构响应	位移	主梁竖向位移	倾角仪	个	9
3			主梁长期变形	棱镜	个	9
4		应变	主梁关键截面应变	振弦式应变计	个	32

序号	监测类别	监测内容	主要设备名称	单位	数量	
6	结构变化	腐蚀	钢结构腐蚀	腐蚀探头	个	3
7	合计				56	

序号	监测类别	监测内容	主要设备名称	单位	原有	升级后	备注
10	结构变化	腐蚀	钢结构腐蚀	腐蚀探头	个	3	3
11		螺栓状态	螺栓滑脱	高清摄像头	个	0	2
12	合计				56	80	

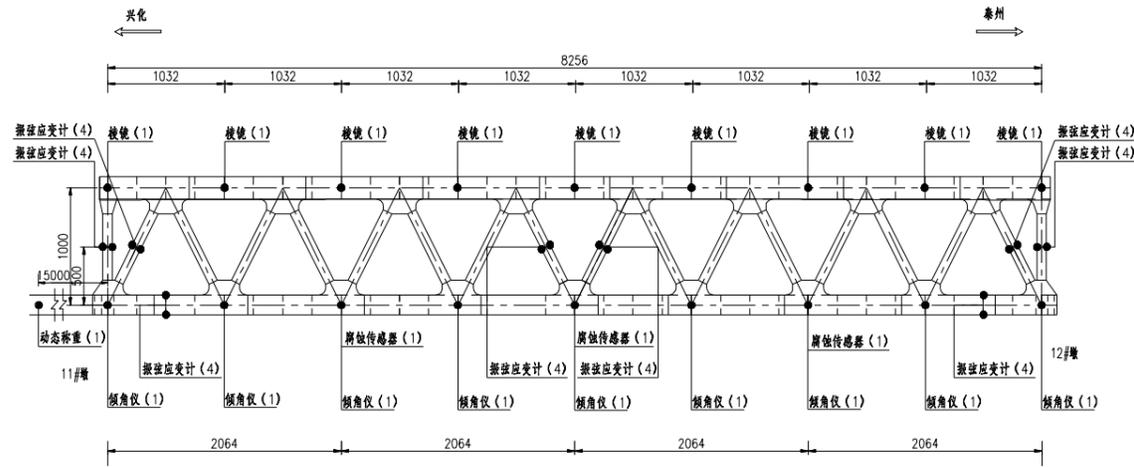


图 6.3-1 泰州市 S231 新通扬运河桥既有监测项目测点总体布置图

升级后的监测项目及主要使用的监测设备如图 5.3-2 与表 5.3-2 所示，升级后全桥共 10 个监测项目，合计 81 个测点。环境温湿度及桥面温度监测项共用 S231 泰东河大桥监测数据。

表 6.3-2 升级后结构健康监测系统监测项目

序号	监测类别	监测内容	主要设备名称	单位	原有	升级后	备注	
1	环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	温湿度计	个	0	0	共用
2	作用	结构温度	桥面铺装层温度	电阻式温度传感器	台	0	0	共用
3		车辆荷载	所有车道车重、车速、车流量等	压电薄膜传感器	车道	3	6	新增3车道
4		船舶撞击	桥面抓拍	高清摄像头	个	0	2	
5	结构响应	位移	主梁竖向位移	图像法动位移监测仪	台	0	1	
6				标靶	个	0	4	
7				倾角仪	个	9	9	
8	应变	主梁关键截面应变	振弦式应变计(温度)	棱镜	个	9	9	
9				拉线式位移传感器	个	0	4	
9	振动	主梁振动加速度	低频加速度传感	个	0	6		

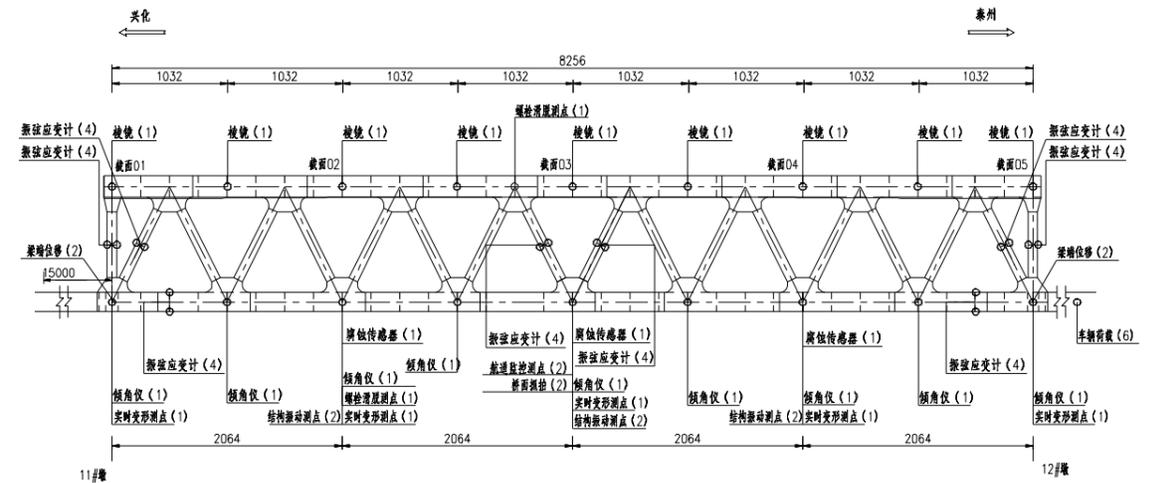


图 6.3-2 升级后监测项目测点总体布置图

6.3.2 测点布置

6.3.2.1 车辆荷载监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.3 节，车辆荷载监测测点应覆盖所有行车道，且宜选择在路基或有稳定墩柱支撑的混凝土结构铺装层内，宜结合视频监控测点获得所有车道的车辆空间分布。

车辆荷载监测现场布置按照以下条件优选：

- (1) 断面布置于桥头附近断面（路面）处。
- (2) 断面所在路面纵坡宜与桥上相近。
- (3) 断面所在道路前后 100 米范围路面平整度等行驶条件与桥上相同。
- (4) 断面不宜布置于弯道、车流汇交口、交叉路口、车辆变道区等影响车辆正常行驶的区域附近。

新通扬运河桥下行桥幅已布置动态称重系统，上行桥幅在原址处增设车辆荷载监测系统，现场覆盖 3 个车道。

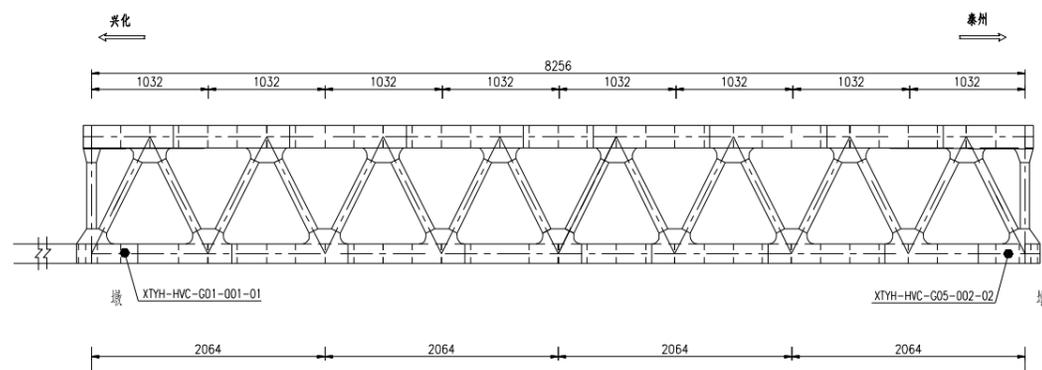


图 6.3-3 新通扬运河桥车辆荷载监测测点布置图（单位：cm）

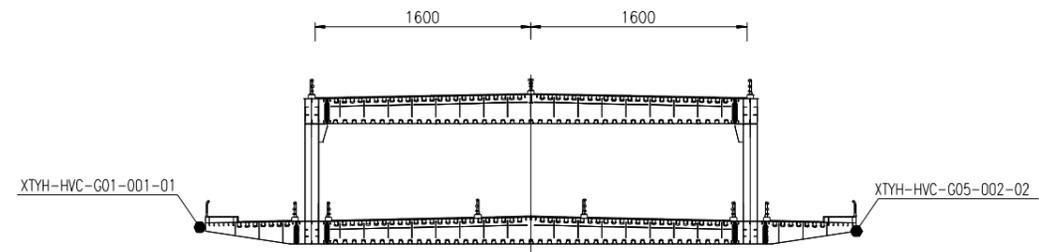
6.3.2.2 航道监控监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.3 节，航道监控测点宜在主梁上、下游两侧对称布设。

为加强对桥梁服役期间桥下通航情况，获取桥址区突发事件发生前后实际状况，在新通扬运河桥主桥左右侧桥梁各布设 1 个航道监控监测测点，全桥共布设 2 个。



(1) 立面布置图

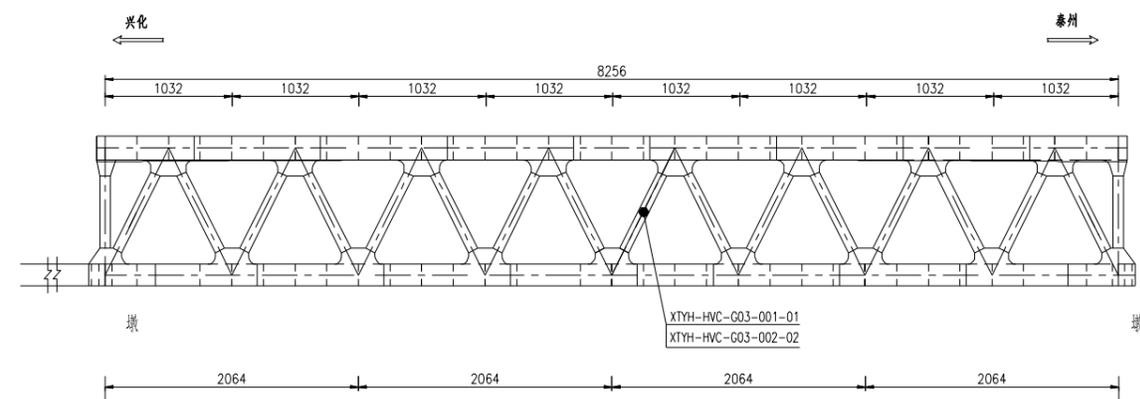


(2) 横截面置图

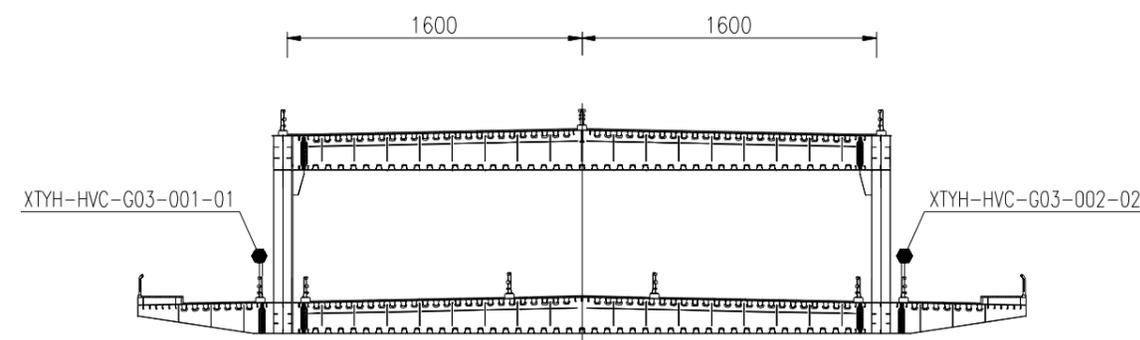
图 6.3-4 新通扬运河桥航道监控测点布置图（单位：cm）

6.3.2.3 桥面抓拍监测

为监测桥梁重车通行情况，后期与主梁挠度监测进行联动，在新通扬运河桥主桥左右侧桥梁各布设 1 个桥面抓拍监测测点，全桥共布设 2 个。



(1) 立面布置图



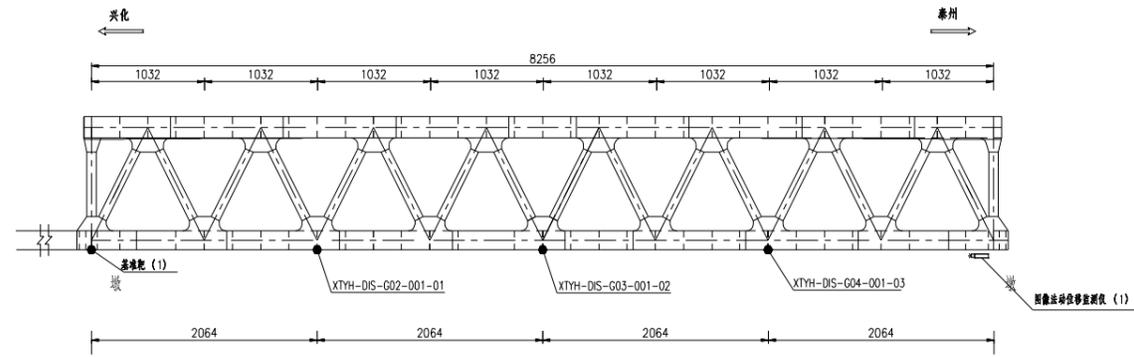
(2) 横截面布置图

图 6.3-5 新通扬运河桥航道监控测点布置图（单位：cm）

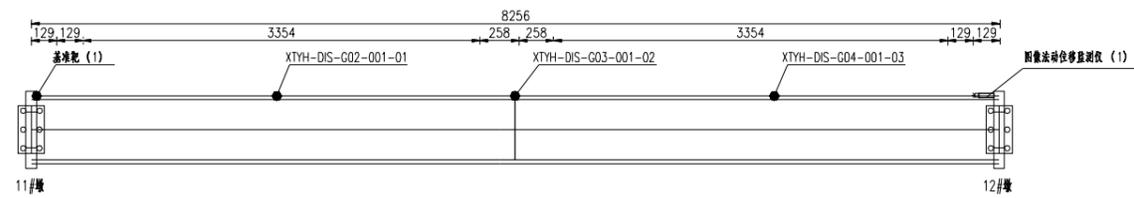
6.3.2.4 主梁挠度监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.4 节，主梁竖向位移监测测点应在主跨跨中和 1/4、3/4 主跨。

为获取主梁挠度实时变化结果，在新通扬运河桥左幅布设实时挠度测点，全桥共布置4个标靶，1台图像法动位移监测仪。



(1) 立面布置图



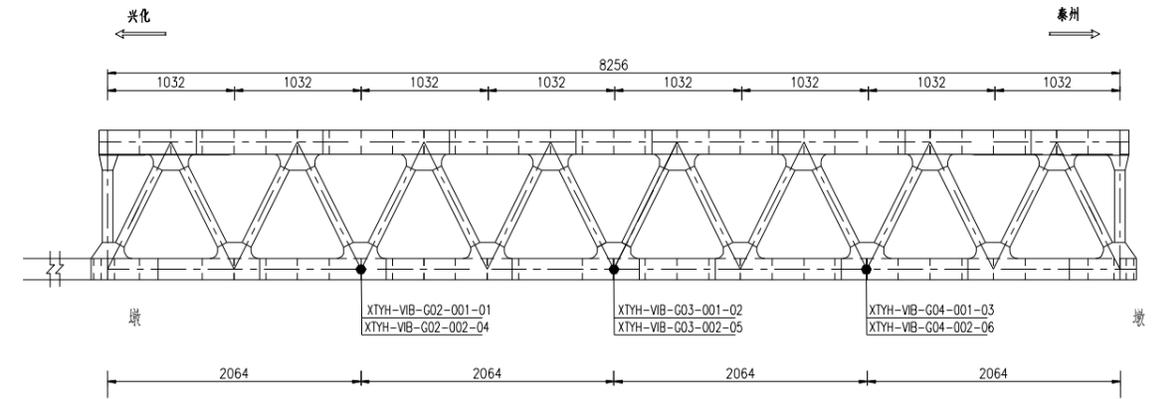
(2) 平面布置图

图 6.3-6 新通扬运河桥主梁挠度监测测点布置图（单位：cm）

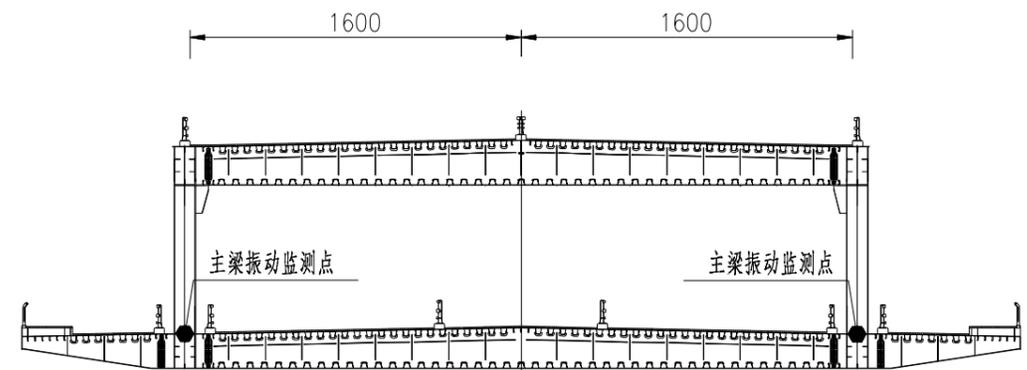
6.3.2.5 结构振动监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.4 节，主梁竖向振动监测测点应根据主梁振动振型确定，主拱振动监测测点应根据主拱振型确定，宜布设在振型峰值点处，避开振型节点；测点位置应至少包括主跨跨中和 1/4、3/4 主跨。

通过结构振动监测数据可以判断桥梁是否发生过大振动，识别桥梁结构动力特性，新通扬运河桥选取主桁架 L/4、L/2 和 3L/4 处各布设 1 个结构振动监测测点，每个测点布置 1 个低频加速度传感器，全桥共布置 6 个低频加速度传感器。



(1) 立面布置示意图



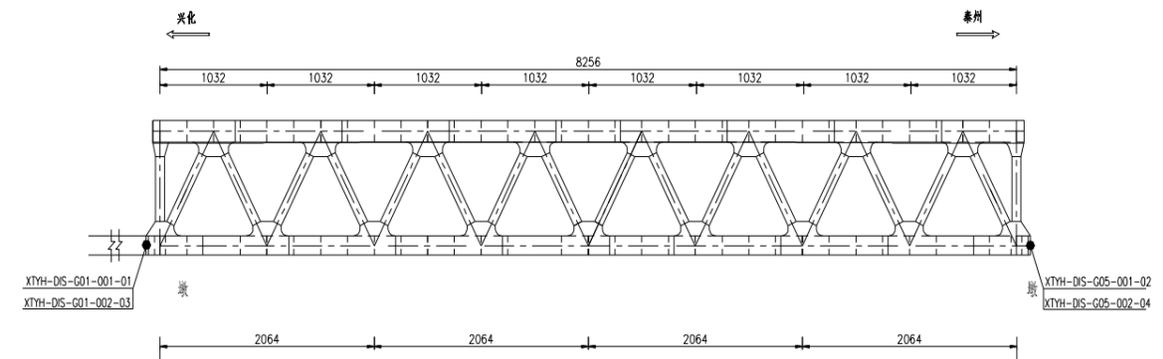
(2) 平面布置示意图

图 6.3-7 新通扬运河桥结构振动监测测点布置图（单位：cm）

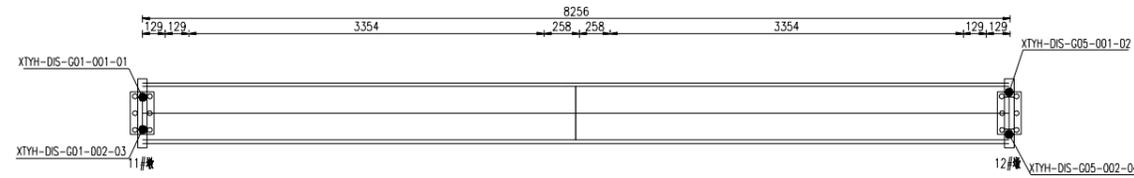
6.3.2.6 梁端位移监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.4 节，主梁梁端纵向位移测点宜布设在墩顶梁端支座处。

在新通扬运河桥两侧伸缩缝处各布设 1 个梁端位移测点，每个测点布置 1 个拉绳式位移传感器，单幅布置 2 个拉绳式位移传感器，全桥共布置 4 个。



(1) 立面布置示意图

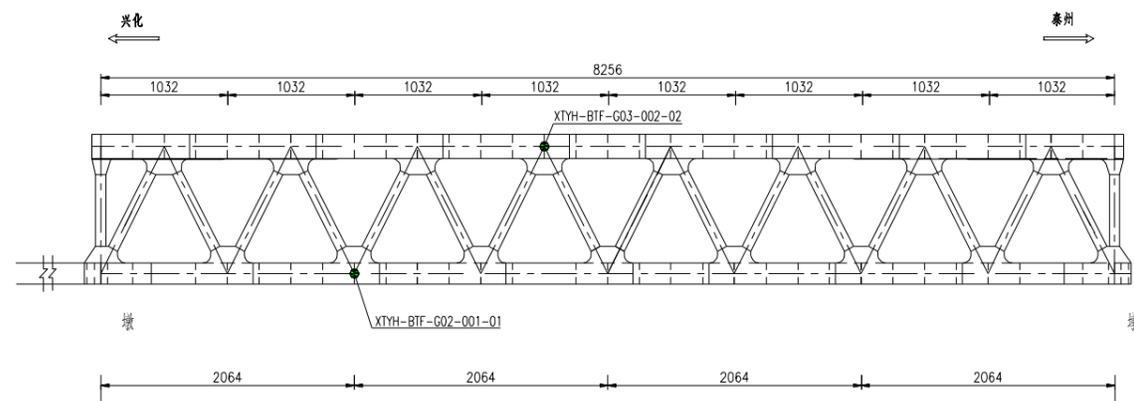


(2) 平面布置示意图

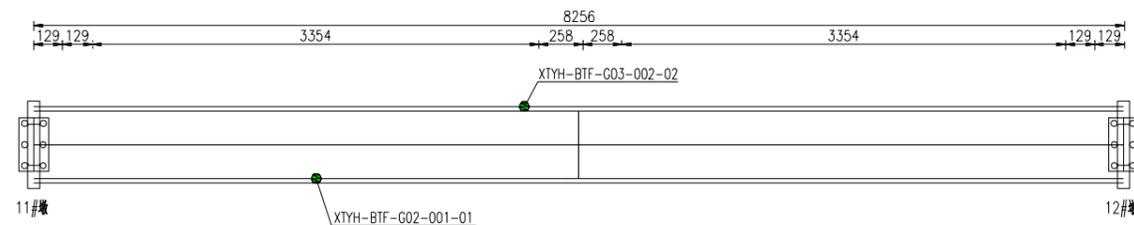
图 6.3-8 新通扬运河桥梁端位移监测测点布置图（单位：cm）

6.3.2.7 螺栓滑脱监测

新通扬运河桥为钢结构桥梁，各杆件之间通过节点板连接，节点板螺栓的工作状态直接影响桥梁运营过程中的安全性，因此选取 L/4 处下弦杆与 L/2 处上弦杆进行螺栓滑脱监测，监测方式为视频监控。



(1) 立面布置示意图



(2) 平面布置示意图

图 6.3-9 新通扬运河桥梁螺栓滑脱监测测点布置图（单位：cm）

6.4 S465 串场河大桥

6.4.1 主要监测设备

泰州市 S465 串场河大桥原健康监测系统设计项目及主要使用的监测设备如表 6.3-1 与图 6.3-1 所示。全桥共布设 5 个监测项目，合计 38 个监测设备。

表 6.4-1 泰州市 S465 串场河大桥原结构健康监测系统设计项目

序号	监测类别		监测内容	主要设备名称	单位	数量
1	作用	结构温度	桥面铺装层温度	电阻式温度传感器	台	2
		车辆	所有车道车重、车速、车流量等	压电薄膜传感器	车道	2
			桥面抓拍	高清摄像机	个	1
2	结构响应	位移	主梁竖向位移	图像法动位移监测仪	个	2
			标靶	个	8	
		主梁长期变形	棱镜	个	5	
3	应变	主梁关键截面应变	振弦式应变计	个	16	
5	结构变化	腐蚀	钢结构腐蚀	腐蚀探头	个	2
6	合计					38

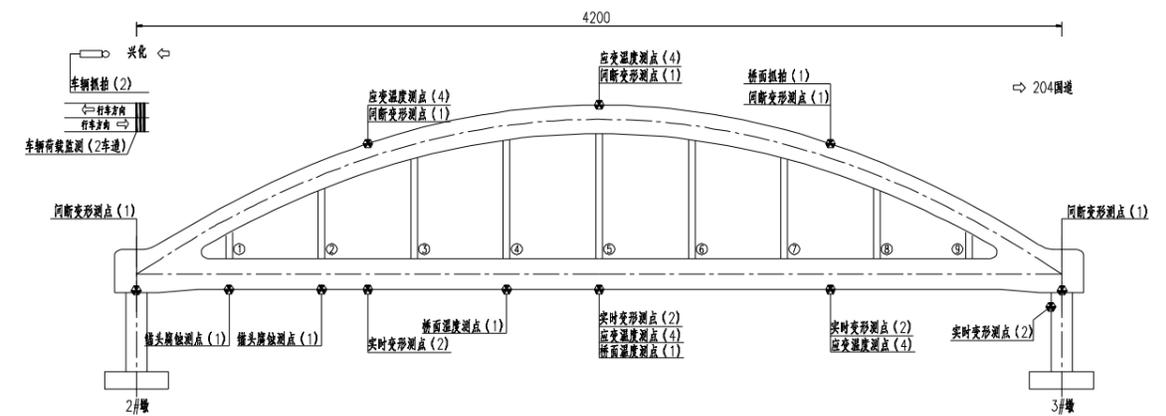


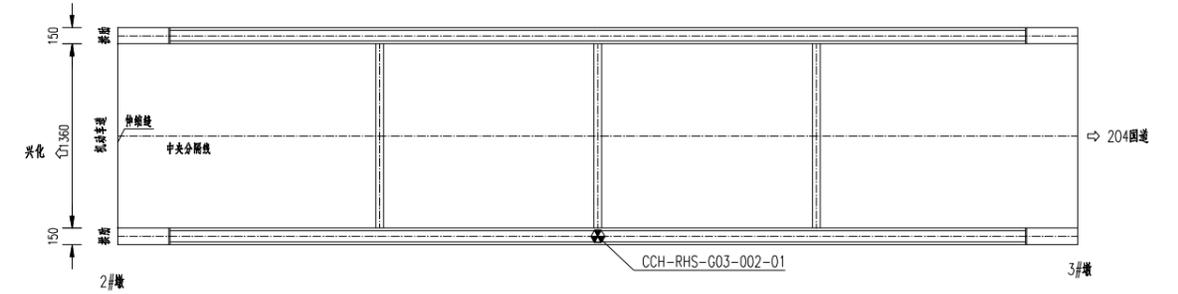
图 6.4-1 泰州市 S465 串场河大桥既有监测项目测点总体布置图

升级后的监测项目及主要使用的监测设备如图 5.4-2 与表 5.4-2 所示，升级后全桥共 10 个监测项目，合计 61 个测点。

表 6.4-2 升级后结构健康监测系统设计项目

序号	监测类别		监测内容	主要设备名称	单位	原有	升级后	备注
1	环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	温湿度计	个	0	1	
2	作用	车辆荷载	动态称重系统	压电薄膜	车道	2	2	
		桥面抓拍	高清摄像头	个	1	1		
3	作用	结构温度	桥面铺装层温度	电阻式温度计	个	2	2	
船舶碰撞		桥墩加速度	低频加速度传感器	个	0	2		
4	作用	航道监控	高清摄像头	个	0	2		
5		结构响应	位移	主梁竖向位移	图像法动位移监测仪	个	2	2
6	目标靶			个	8	8		
6	棱镜			个	5	5		

序号	监测类别	监测内容	主要设备名称	单位	原有	升级后	备注	
7		拱顶位移	倾角仪	个	0	2		
8		梁端位移	拉线式位移传感器	个	0	2		
9		应变	关键截面应变	应变（温度）传感器	个	16	16	
10		振动	振动加速度	低频加速度传感器	个	0	12	
11	结构变化	腐蚀	环境腐蚀	腐蚀探头	个	2	4	新增2
12	合计					38	61	



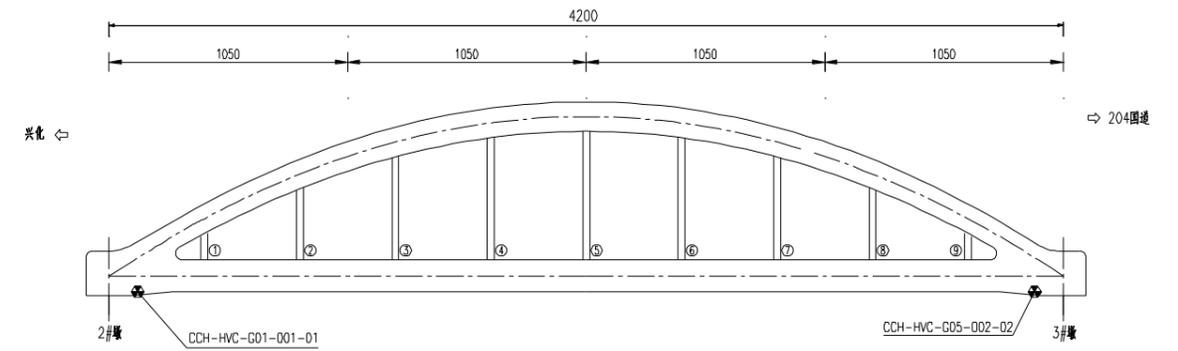
(2) 平面布置图

图 6.4-3 串场河大桥环境温湿度监测测点布置图（单位：cm）

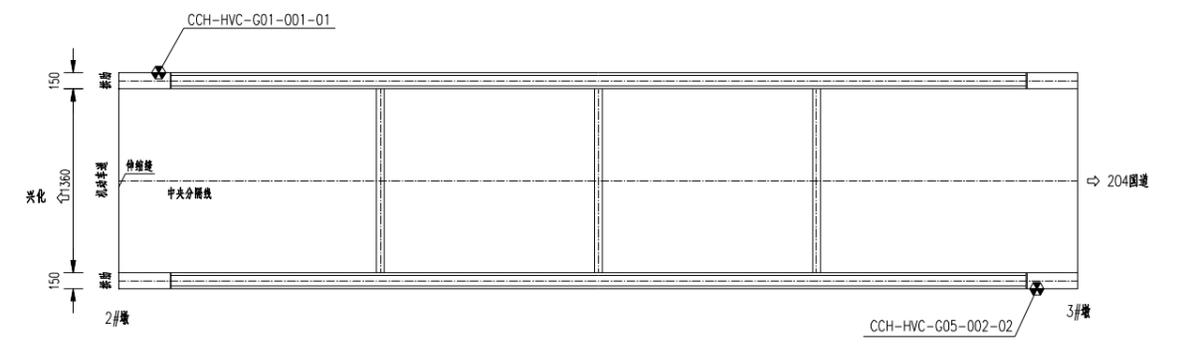
6.4.2.2 航道监控监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.3 节，航道监控测点宜在主梁上、下游两侧对称布设。

为加强对桥梁服役期间桥下通航情况，获取桥址区突发事件发生前后实际状况，在串场河大桥主桥左右侧各布设 1 个航道监控监测测点，全桥共布设 2 个。



(1) 立面布置图



(2) 平面布置图

图 6.4-4 串场河大桥航道监控测点布置图（单位：cm）

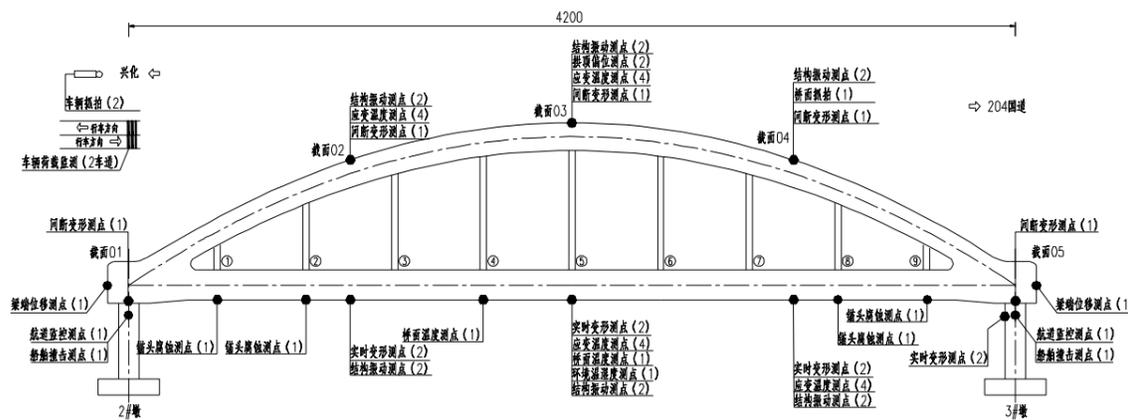


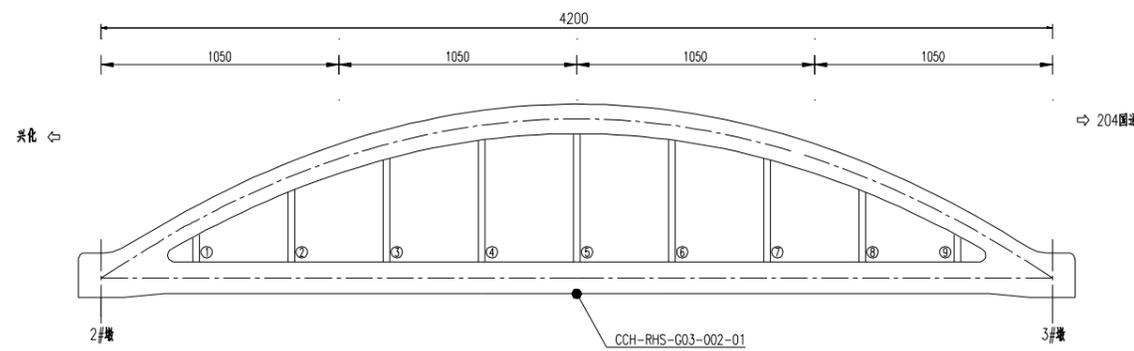
图 6.4-2 升级后监测项目测点总体布置图

6.4.2 测点布置

6.4.2.1 环境温湿度监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.2 节，桥址区环境温度和湿度的监测测点宜布设在桥梁跨中位置。

为监测桥梁温湿度，在串场河大桥右侧栏杆处布置 1 个环境温湿度测点，在测点处布置 1 个温湿度计，全桥共布置 1 个温湿度计。



(1) 立面布置图

6.4.2.3 船舶撞击监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.3 节，航道撞击测点宜在主梁上、下游两侧对称布设。

串场河大桥水中落墩，为监测船舶通航情况，在串场河大桥主桥左右侧各布设 1 个水平向船舶撞击监测测点，全桥共布设 2 个。

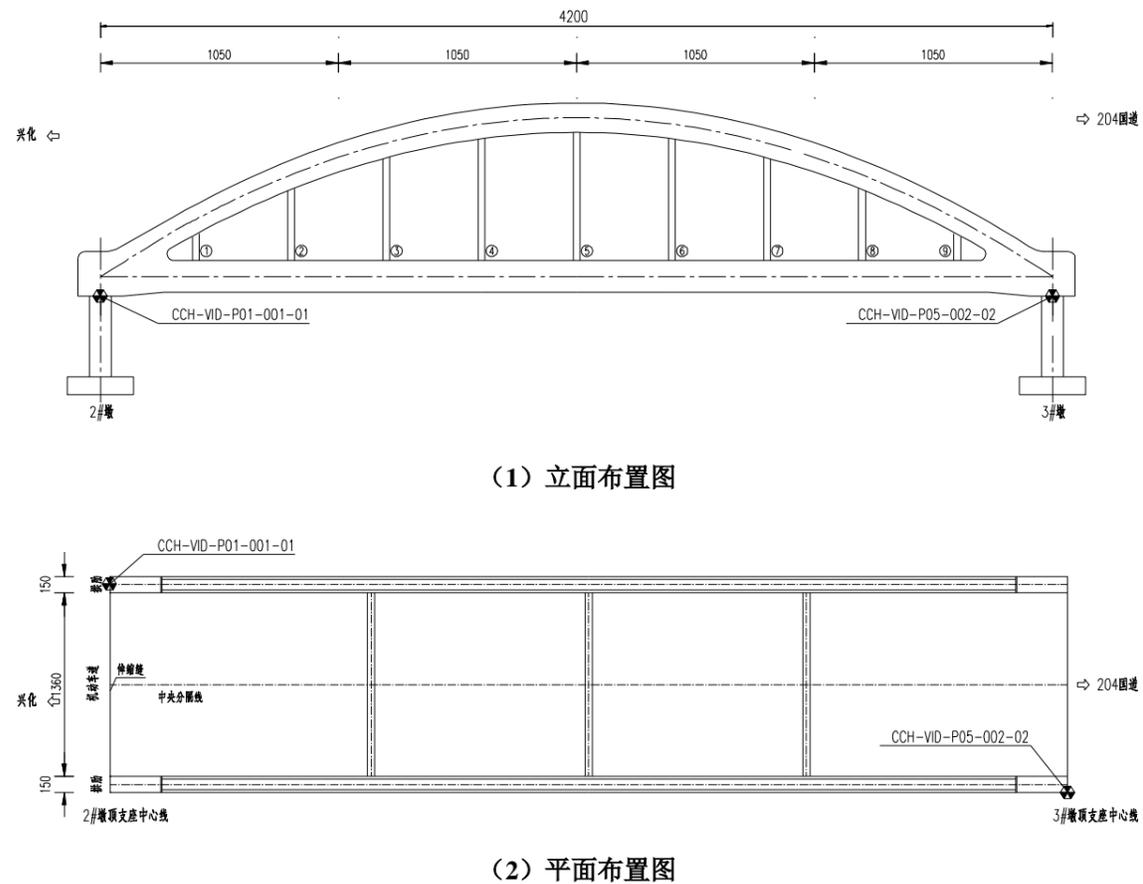


图 6.4-5 串场河大桥航道监控测点布置图（单位：cm）

6.4.2.4 拱顶位移监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.4 节，拱顶位移监测测点应分别布设于拱顶部。

串场河大桥在拱顶处各布设 1 个拱顶位移测点，每个测点布置 1 个倾角仪，全桥共布置 2 个倾角仪，布置位置如下：

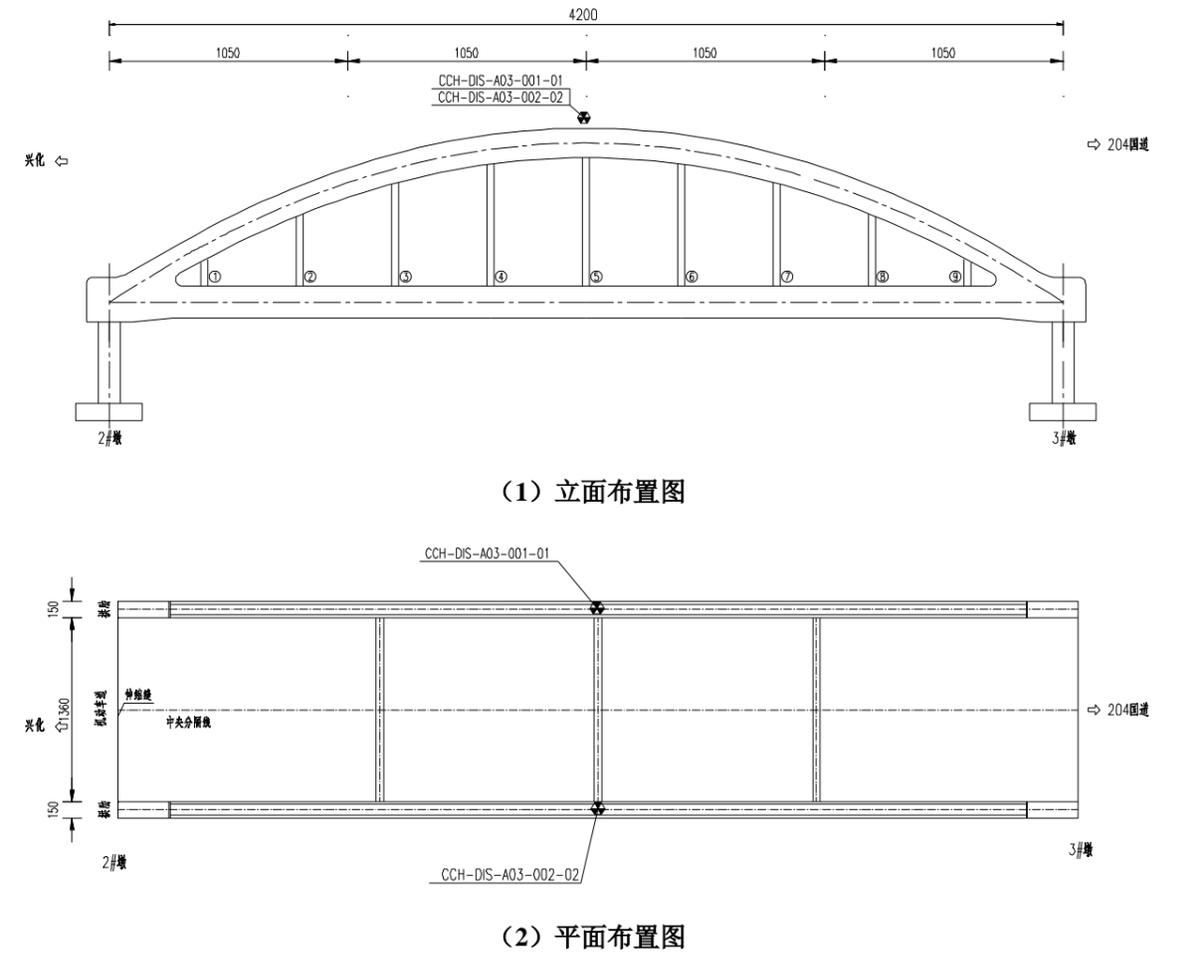
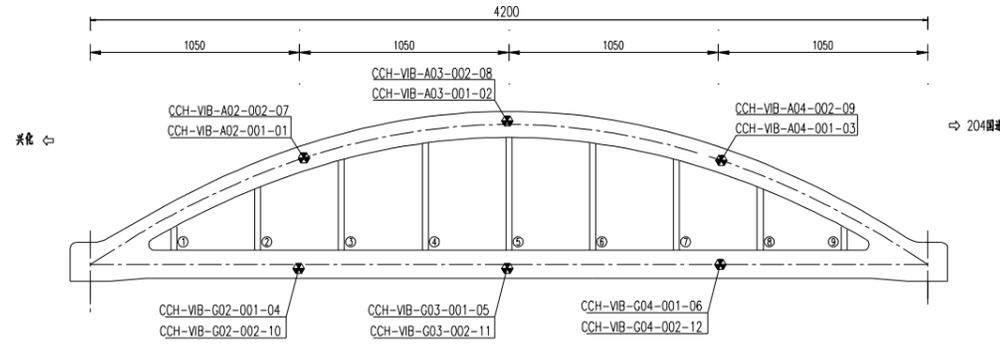


图 6.4-6 串场河大桥拱顶位移监测测点布置图

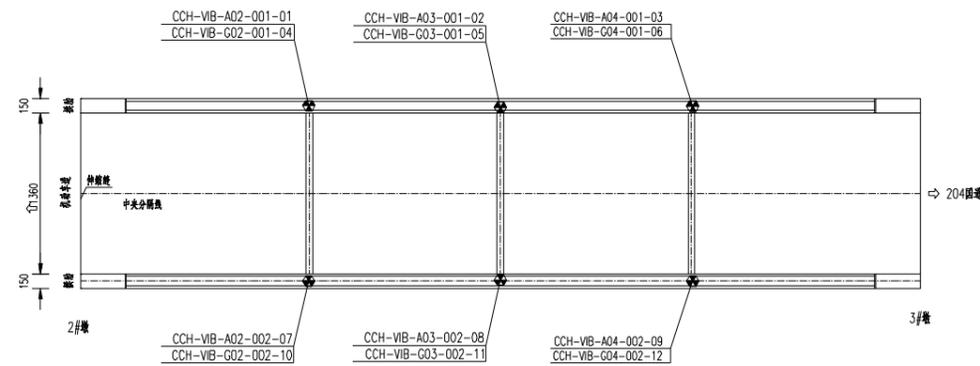
6.4.2.5 结构振动监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.4 节，主梁竖向振动监测测点应根据主梁振动振型确定，主拱振动监测测点应根据主拱振型确定，宜布设在振型峰值点处，避开振型节点；测点位置应至少包括主跨跨中和 1/4、3/4 主跨。

选取拱肋、系梁四分点截面和跨中截面处各布设 1 个结构振动监测测点，每个测点布置 1 个低频加速度传感器，全桥共布置 12 个低频加速度传感器。拱肋、系梁四分之一截面和跨中截面处测点监测主梁竖向加速度，布置位置如下：



(1) 立面布置示意图



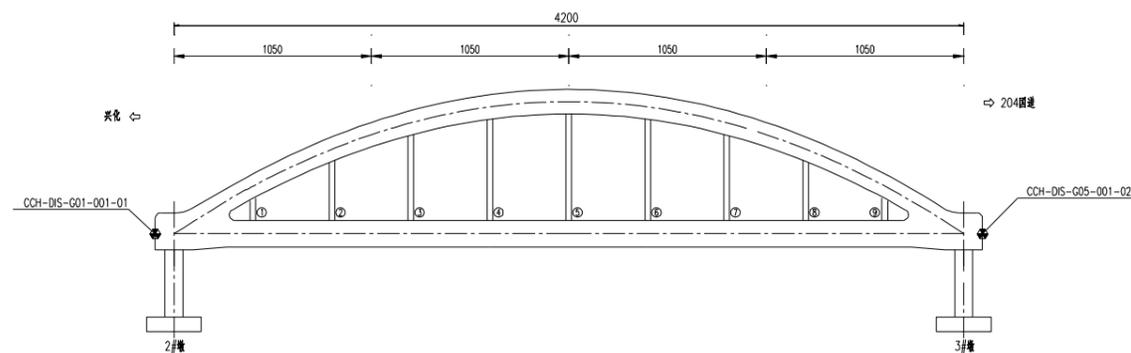
(2) 平面布置示意图

图 6.4-7 串场河大桥结构振动监测测点布置图（单位：cm）

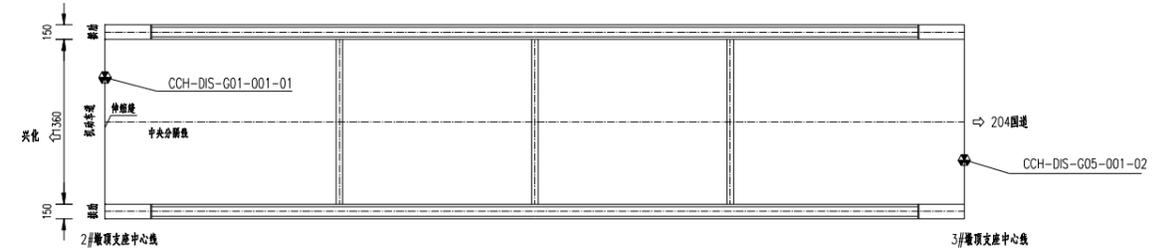
6.4.2.6 梁端位移监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》第 7.4 节，主梁梁端纵向位移测点宜布设在墩顶梁端支座处。

在串场河大桥两侧伸缩缝处各布设 1 个梁端位移测点，每个测点布置 1 个拉绳式位移传感器，全桥共布置 2 个。



(1) 立面布置示意图



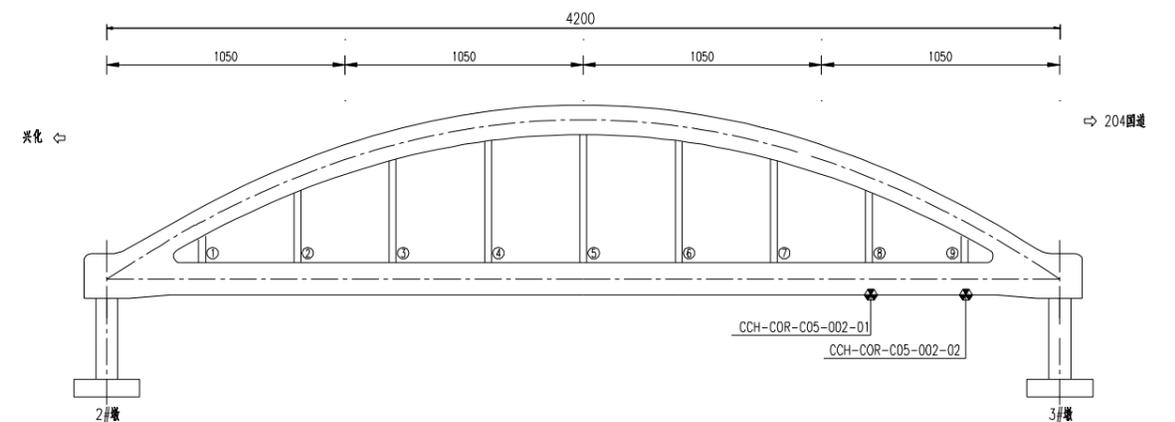
(2) 平面布置示意图

图 6.4-8 串场河大桥梁端位移监测测点布置图（单位：cm）

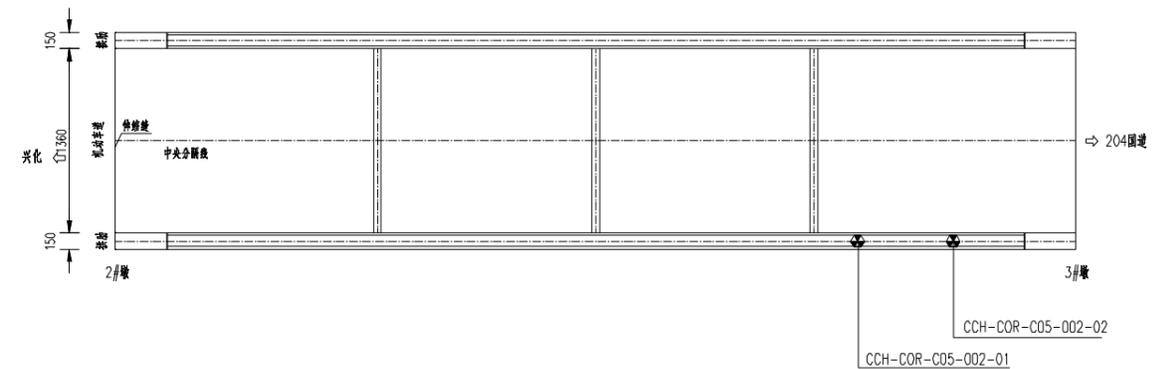
6.4.2.7 吊杆腐蚀监测

依据《公路桥梁结构监测技术规范》7.5 小节，“腐蚀测点可布设在锚头端部位置或易腐蚀断丝位置。”

串场河大桥原桥健康监测系统在北侧系梁底 1#、2#吊杆锚头处已布设 1 个吊杆腐蚀测点，本次拟北侧 8#、9#吊杆处各布设 1 个腐蚀监测测点，全桥共布设 4 个腐蚀监测测点



(1) 立面布置图



(2) 平面布置图

图 6.4-9 泰东河大桥腐蚀监测测点示意图

6.5 传感器性能参数

监测桥梁各监测项主要设备性能如表 5.8-1 所示。

表 6.5-1 主要监测设备性能一览表

序号	监测项目	传感器类型	量程	精度	采集频率	使用寿命
1	环境温湿度	温湿度计	温度：-30~80°C 湿度：0~100%RH	温度：±0.5°C 湿度：±2%RH	1Hz	≥5年
2	桥面铺装层温度	电阻式温度计	-30~70°C	0.5°C	1/600Hz	≥5年
3	主梁挠度监测	图像法动位移监测仪	1~600m	5~50m (0.1mm) 50~100 (0.25mm) 100~150m (1mm)	10Hz	≥5年
4	拱顶位移监测	倾角仪	/	0.001°	10Hz	≥5年
5	结构应变(温度)	振弦式应变传感器	应变：±1500με 温度：-20~80°C	应变：1με 温度：0.1°C	1/600Hz	≥5年
6	结构振动	低频加速度传感器	20m/s ²	0.3V/ms ⁻²	50Hz	≥5年
7	航道监控	高清摄像机	水平：360° 垂直：-15°~90°	400万像素	实时采集	≥5年
8	腐蚀监测	腐蚀传感器	/	10nm	1/600Hz	≥5年
9	车辆荷载监测	压电式称重系统	轴载≥30T	±10%	触发采集	≥5年
10	梁端位移	拉绳式位移计	600mm	0.3mm	10Hz	≥5年

6.5.1 环境温湿度监测

环境温湿度拟选用温湿度传感器，其性能参数为：

表 6.5-2 温湿度传感器技术参数

名称	技术参数
温度测量范围	-30°C~80°C
温度测量精度	±0.5°C @25°C
湿度测量精度	±2%RH @25°C
湿度测量范围	0~100%RH @25°C
通讯接口	RS485
供电电源	DC9~24V 1A

名称	技术参数
运行环境温度	-30°C~80°C
运行环境湿度	5%RH~90%RH



图 6.5-1 温湿度传感器示意图

6.5.2 桥面铺装层温度监测

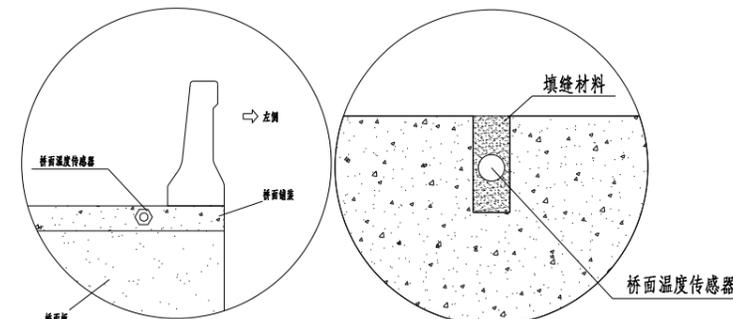


图 6.5-2 桥面铺装层温度监测测点布置大样图



图 6.5-3 桥面温度传感器

桥面温度监测拟选用电阻温度计，其技术参数如下：

- (1) 温度测量范围：-30°C~+70°C；
- (2) 精度：±0.5°C；
- (3) 灵敏度：0.1°C。

6.5.3 航道监控、桥面抓拍监测

航道监控、桥面抓拍采用视频摄像机，其技术参数应满足下表要求：

- (1) 成像色彩：支持 4K 高清画面输出；
- (2) 成像范围：支持 360°水平旋转，垂直方向-15°~90°；
- (3) 电源电压：AC24V。



图 6.5-4 高清智能球机示意图

6.5.4 主梁挠度监测

主梁挠度监测选用图像法动位移监测仪，对应技术参数如下：

- (1) 精度：0.1mm；
- (2) 测量距离：1~600m；
- (3) 输出频率：10Hz；
- (4) 工作温度：-30℃~50℃。



(1) 图像法动位移监测仪



(2) 目标靶

图 6.5-5 图像法动位移监测系统

6.5.5 结构应变监测

结构应变监测拟选用振弦式应变传感器，主要性能参数为：

- (1) 应变测试量程：±1500με；

- (2) 分辨力：≤0.125%FS；
- (3) 温度测试量程：-20℃~+80℃；
- (4) 测量精度：0.1℃；
- (5) 工作温度：-20℃~80℃。



图 6.5-6 应变传感器

6.5.6 结构振动监测

结构振动监测拟选用低频加速度传感器，其技术参数如下表所示。

表 6.5-3 低频加速度传感器技术参数

技术指标	档位、参量	1	2	3	4
		加速度	小速度	中速度	大速度
灵敏度 (V·s ² /m 或 V·s/m)		0.3	38	2.6	0.5
最大量程	加速度(m/s ² , 0-p)	20	/	/	/
	速度(m/s, 0-p)	/	0.124	0.3	0.6
	位移(mm, 0-p)	/	20	200	500
通频带 (Hz, dB)		0.25~80	1~100	0.25~100	0.07~100
输出负荷电阻 kΩ		1000	1000	1000	1000
分辨率	加速度(m/s ²)	5×10 ⁻⁶	/	/	/
	速度(m/s)	/	4×10 ⁻⁸	4×10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁶
	位移(m)	/	4×10 ⁻⁸	4×10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁶



图 6.5-7 低频加速度传感器

6.5.7 结构腐蚀监测

腐蚀监测拟选用腐蚀传感器，其技术参数如下表所示。

表 6.5-4 腐蚀传感器技术参数

探头Cu 质薄膜厚度：10 m	腐蚀减薄分辨率：10nm
温度误差： $\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；-40~60	相对湿度误差： $\leq \pm 3\%$
大气压强误差： $\leq \pm 0.5\text{hPa}$	AD 分辨率：24bit，双通道同步采样



(1) 腐蚀监测仪



(2) 电阻探针

图 6.5-8 腐蚀传感器示意图

7 数据采集与传输子系统

7.1 子系统架构

数据采集与传输子系统包括数据采集与数据传输两大模块，由分布在桥梁现场的数据基站、数据采集子站和传输网络构成。

根据结构监测系统的数据采集与传输信号的不同，相应的分成两个部分，即模拟信号传感器的数据采集与传输和数字信号传感器的数据采集与传输。系统组成框图如下图所示。

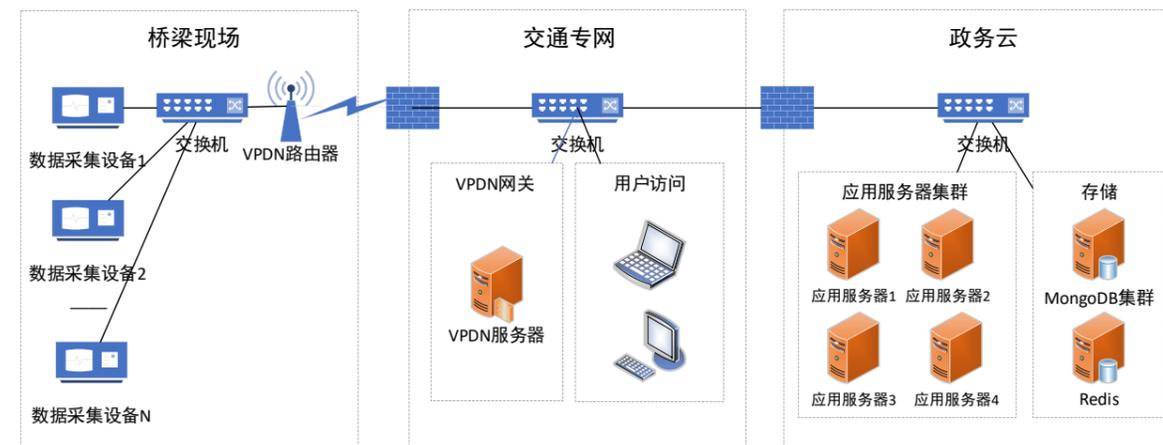


图 7.1-1 数据采集与传输子系统架构

7.2 设计要求

桥梁健康监测系统能否对桥梁结构的安全状态和服役寿命做出准确客观的评估，取决于数据采集系统能否及时准确地采集到如实反映结构状态的特征信息。

数据采集与传输子系统应满足以下设计要求：

- 1) 数据采集和传输设备能满足自动、实时数据采集与传输要求；
- 2) 数据采集、传输设备与传感器系统精度相匹配，满足测量精度要求；
- 3) 数据采集设备集成化程度高，便于统一管理控制；
- 4) 数据采集设备具有对信号进行放大、过滤、去噪和隔离等处理；
- 5) 数据采集与传输设备耐久性好、性能稳定、抗干扰性强以及电力供应稳定可靠；
- 6) 数据采集与传输设备的保护应具备完整方案和相关应急预案；
- 7) 保护数据采集与传输设备不受温湿度、雷击及干扰源（电源、电磁）等环境因素的影响及防止损坏；
- 8) 为方便系统后期扩展升级，系统传输主干光缆冗余备用芯纤不少于 20%，且预留通道不少于 10%；
- 9) 应满足其他技术要求，如：同步采样（对多路信号进行同时采样的功能），模拟输出（输出模拟信号的能力），数字 I/O（直接输出数字或准数字的能力），触发（数据采集设备启动方式）等。

7.3 数据采集与传输方案

数据采集与传输是指对安装在大桥上的各种类型的传感器的信号完成必要的预调理后按一定的采样频率进行模数转换（A/D），最后在数据采集站计算机上保存并进行远程传输。各种类型的传感器的模拟或数字信号经预处理、采集后从外场的数据采集站通过无线

传送至位于监控中心的数据处理与控制计算机上。

桥梁结构监测系统所有设备均采用标准以太网协议通过光缆传输数据。基站设有通讯网口，基站利用通讯网口和机电工程提供的通信主干光缆，连接到交换机。在外场相对较近的设备附近设置数据采集子站，可共用一台交换机、采集端等。

桥梁结构监测系统实时采集与传输的数据主要包括：环境温湿度、桥面温度、车辆荷载、结构振动、结构位移、应变温度、结构裂缝等监测数据。各类传感器的监测数据统一通过场端局域网传输至对应区域采集站，采集站工控机按数据协议解析数据并通过无线统一转发至监控中心服务器。

7.4 布线设计

监测系统的布线包括以下三方面内容。

（1）传感器线缆网络

传感器线缆网络是由外场工作站引出至各采集设备的线缆和线缆保护线槽及钢管组成，线缆的两端分别连接各种传感器及采集仪器。模拟信号输出传感器需采用屏蔽信号电缆进行信号传输。

（2）外场机柜供电系统

外场机柜供电由就近接入电源，结构监测系统从此处接电。外场机柜供电系统是由系统配电箱到结构监测系统配电箱，并进入外场机柜 UPS 设备的供电设备、供电线缆和保护管组成。

（3）传感器采集器供电传输网络

传感器采集器供电传输系统是由外场采集站 PDU 向机柜外传感器采集设备供电的线缆和保护管组成。

7.5 时间同步采集设计

对结构的健康状况的分析需基于同一时刻或同一个时间段，要求各种仪器在同一时刻开始采集，保证分析数据的同步。本系统中时间同步功能的实现是由应用服务器作为时间服务器，通过校准服务器的时间，再通过监测网络时间协议（NTP）为其它嵌入式采集设备提供时间同步服务，它能够提供更高于 1ms 的时间精度。

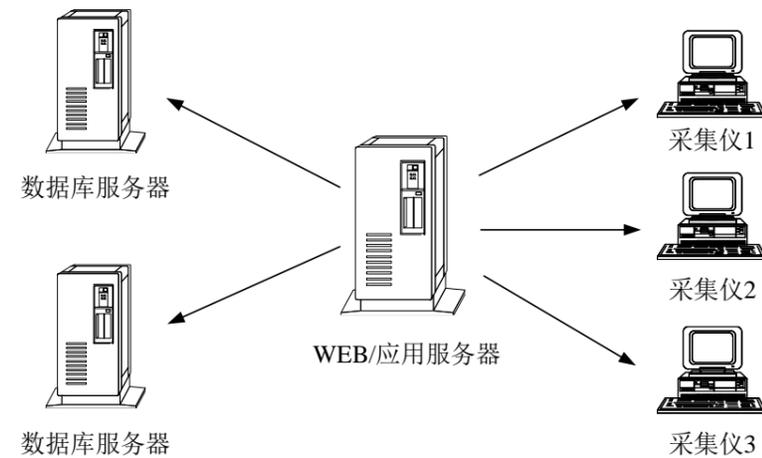


图 7.5-1 时间同步示意图

7.6 断点续传设计

系统建成后，各监测项目可按预定频率进行采集、传输。如发生网络故障或电力故障，系统可自动识别、自动续传，避免采集数据传输中断，以确保数据完整性。

7.7 主要设备性能要求

为保证场端数据的有效采集与传输，采用分布式采集方式，设置数据采集总站与子站。数据采集总站内主要设备有：工控机、交换机等设备，是系统的重要组成部分。主要功能是实现一定范围内的传感器信号调理、数据采集、数据传输至中心服务器。数据采集总站一定要具有连续稳定运行的特点，并且有一定的自动纠错功能。子站内主要设备有：交换机、采集模块等设备。主要功能是实现一定范围内的传感器信号采集、转换等。

►应变采集仪

- 通道数量：24 通道；
- 每通道测量时间：振弦<3 秒，差阻<4 秒，其他类型传感器视传感器稳定时间而定；
- 数据存储容量：2Mb（1000 条记录）；
- 数据接口：RS485、USB；
- 通讯方式：RS485、光纤；
- 系统功耗：待机<0.5W，测量<1W；
- 电源系统：供电方式：DC 12~24V / AC 110~220V；
电池：12V 7Ah 免维护蓄电池；
- 时钟精度：±1 分钟/月；
- 工作温度：-20°C~+60°C；
- 存储温度：-40°C~+85°C；

- 防护等级：IP65（可定制 IP66、IP67）
- 箱体尺寸：(L)600mm×(W)380mm×(H)210mm。

➤动态数据采集分析仪

- 通道数量：8 路；
- 分辨率：24bits；
- 采样频率：200Hz/Ch max；
- 接入信号类型：电磁式；
- 输入信号范围：±2.5V，±1.25V，±0.625V，±0.3125V，±150mV，±75mV；
- 通讯接口：RJ45；
- 工作温度：-30~+70°C；
- 防护等级：IP65

➤电流信号采集模块

- 通道：8 路差分，可独立设置量程；
- 输入类型：mV，V，mA；
- 输入量程：±0.15V，±0.5V，±1V，±5V，±10V，±20mA，0~20mA，4~20mA；
- 采样速率：10 采样点每秒；
- 输出接口：RJ45；
- 工作温度：-40~85°C。



图 7.7-1 采集模块

➤工控机

- CPU：LGA1155 构架；
- 内存：支持 16G；
- 双显：1 个 DVI-D 接口、1 个 VGA+HDMI 接口；

- 网络：2 个千兆网口；
- USB：10 个 USB2.0 接口；
- 硬盘：1T。



图 7.7-2 工控机

➤交换机

主要用于传感器与工控机的数据交换，技术指标如下：

- 端口：5 个千兆 RJ45 端口，4 个 PoE 端口；
- 支持本地 Web 管理；
- 支持端口 VLAN；
- 工作温度：0°C~40°C；
- 工作湿度：5%~95%。



图 7.7-3 交换机

➤串口服务器

- 串口规格：RS485：3 线（A+，B-，GND）；
- 网口规格：RJ45、10/100Mbps、交叉直连自适应；
- IP 获取方式：静态 IP、DHCP；
- 工作温度：-40~85°C；
- 工作湿度：5%~95% RH。



图 7.7-4 RS232/RS485 串口服务器

8 数据存储与管理子系统

结构监测系统中存在各个子系统、子模块的配置信息、桥梁结构数字化信息以及采集处理的数据，大桥全寿命期内数据量、图形量庞大，信息的种类繁多，有多个子系统共享并互相调用数据信息，同时要支持分布式的处理与访问，也要支持多并发用户的操作，因此数据的安全性极为重要。通过建立系统的数据存储与管理子系统，统一管理组织数据信息，给系统的维护与管理提供便利，也为各应用子系统提供可靠的分布式数据交换与存储平台，方便开发与使用。

8.1 主要功能

数据存储与管理子系统是桥梁结构监测各子系统数据的支撑系统，其功能应该包含监测设备管理、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。该子系统的主要功能：

- 1) 为各类数据提供存储的工具与场所，实现对大量、多种类数据的管理，为多个子系统提供共享数据信息，同时要支持分布式的处理与访问；
- 2) 支持多并发用户的操作；
- 3) 为各应用子系统提供可靠的分布式数据交换与存储平台，方便开发与使用；
- 4) 提供数据安全性及用户管理的工作；
- 5) 提供数据分布式快速查询的工具；
- 6) 提供保障数据一致性与同步性的工具。

8.2 设计原则

- 1) 应遵循数据库系统的可靠性、先进性、开放性、可拓展性、标准和经济性的基本原则；
- 2) 应保证数据的共享性、数据结构的整体性、数据库系统与应用系统的统一性；

3) 应建立在清晰、简明、标准化的数据元上，保障用户方便、快速、准确地检索所需信息；

- 4) 数据库系统在使用时应支持在线实时数据处理分析；
- 5) 具备对海量数据的有效筛选、归档以及相应的元数据管理；
- 6) 具有数据维护功能，可对数据库中已有的数据进行增加、删除、修改等操作；
- 7) 具有报警系统，当数据达到规定的数量极限时，能进行相应删除、导出等操作。

8.3 数据存储需求分析

1) 结构综合信息

包括自动化采集设备信息、大桥结构参数，系统维护参数、系统预警参数、日志记录等，这些数据构成大桥基本信息库。通过结构综合信息，用户可以了解桥梁的基础数据、监测测点布置情况、预警设置等信息。

2) 自动化监测数据

这类数据分为原始数据、实时数据、分析数据、历史存档数据等，数据通过预处理后，通过分析可以得到有关结构特性以及荷载响应特性等结果，在此基础上可建立起结构预警参数数据库（设计值和预警值）。随着结构年龄增加，其限值标准需作调整更新。根据不同阶段的状态值，可以了解结构运行的情况。

3) 报表数据

包含系统分析报告以及预警分析报告，均以文件的形式存储在系统中。

系统数据具有数据量庞大、类型多且杂、实时响应要求高等特点。根据系统对海量数据以及不同形式数据的存储与管理需求，应该针对不同类型的数据，选择合适的数据库管理系统，实现对大桥几何数据、监测时间序列数据、图像监测信息和文件信息的统一存储。

8.4 数据存储内容及要求

存储数据主要包括：结构综合信息、自动化监测数据及报表数据。

- 1) 结构综合信息与报表数据容量较小，拟永久存储。
- 2) 自动化监测数据受长期、高频采集影响，数据容量通常较大，其数据存储要求为：
 - (1) 监控中心计算机机房实时监测数据存储时间大于 5 年。经处理后的特征数据、超限报警、评估结果等结构化数据存储时间大于 20 年。
 - (2) 监控中心计算机机房非结构化视频数据存储大于 90 天，特殊事件视频数据应转移备份并永久保存。
 - (3) 监测系统宜采用容灾备份机制，可具备各类数据压缩存储和异地备份功能。

9 数据分析及预警子系统

9.1 子系统架构

数据分析与预警子系统由数据分析系统和预警子系统两部分组成，数据分析又分为数据预处理和数据后处理。数据分析与预警子系统总体框架如图 8.1-1 所示。

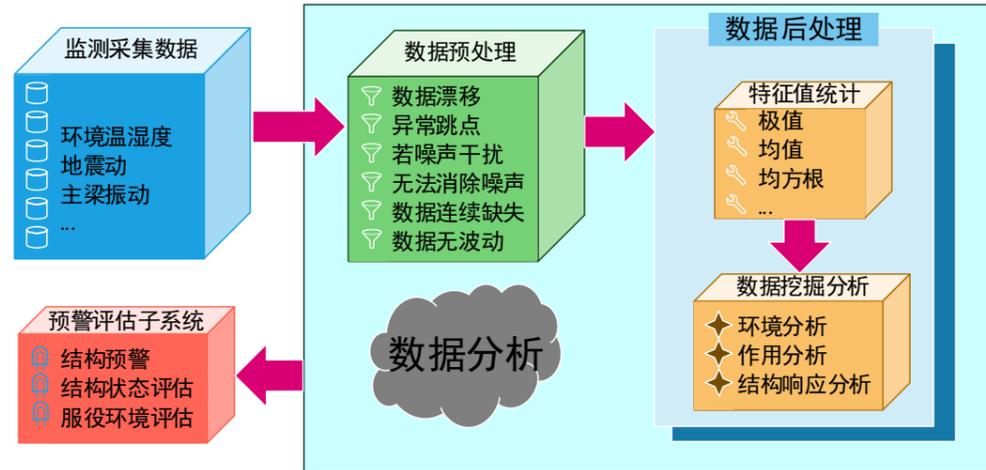


图 9.1-1 数据分析及预警子系统总体框架

9.2 数据预处理

结构健康监测系统对工程结构对象所得到的分析评估结果，其准确性和精度与传感器类型和数量、数据采集模块、数据传输模块等硬件设备的性能息息相关，但是信号进行采集的过程中，由于存在着各种各样的环境干扰（如电磁场等），或者传感器固有属性，或者传输电路干扰，硬件设备老化等其他原因，使得进入到测站的数字信号包含干扰信号（即噪声），或者数据存在丢失，不完整，不一致，造成了采集获取的监测信号不能够反映实际工程结构对象的真实信息。因此，针对自动化数据采集系统获取的信号，必须进行前处理，尽可能地获取反映结构对象真实状态的信号。同时为数据的后处理提供有效的数据支持。

数据预处理旨在对采集的原始数据按照一定的判别准则，判断数据质量好坏，针对数据存在的“病症”，结合不同类型传感器、采集设备的特征，做出各种仪器设备自身是否处于正常工作状态，以及故障可能原因的诊断以及维修建议，通知现场相关人员对仪器设备进行故障排查检修工作。同时，对针对异常数据的不同表现形式，采取纠正不一致数据，消除异常数据，修补遗漏数据，平滑噪声数据等相应的措施，为后续的分析处理准备干净整齐的数据。监测数据可分为静态类和动态类，针对不同数据类型，数据异常判断及相应预处理方法如错误!未找到引用源。所示。

表 9.2-1 数据异常判断及预处理方法

数据类型	数据异常类型	判断方法	处理方法
静力数据	异常跳点	差值 n 倍标准差	剔除
	数据缺失	长时间无数据采集	预警
	弱噪声干扰	弱环境激励明显测点	平滑滤波
	时变数据的趋势项干扰	温度影响明显监测项	去趋势项
	数据连续无波动	相邻差值连续为零	剔除
振动数据	数据连续无波动	相邻差值连续为零	剔除
	数据漂移	数据连续超限	数据平移
	数据缺失	长时间无数据采集	预警
	无法消除强噪声	PSD 分段峭度	剔除
	弱噪声干扰	弱环境激励明显测点	平滑滤波
	数据连续无波动	相邻差值连续为零	剔除
	数据漂移	/	去均值处理

9.3 数据后处理

为进一步获取结构的实际受力状态，评估结构的服役水平，对预处理后的监测数据进行后处理分析。后处理分析包括监测数据的极值、均值等特征值统计和数据挖掘分析，数据挖掘分析框架如图 8.3-1 所示。

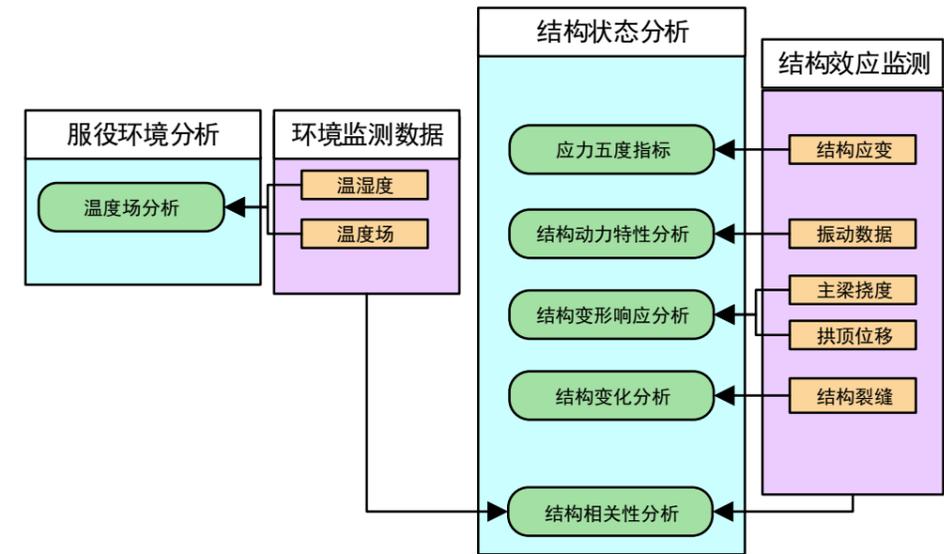


图 9.3-1 数据分析系统框架图

健康监测系统数据分析系统根据所涉及监测项指定，参照部颁规范要求，数据分析系统软件清单如表 8.3-1 所示。

表 9.3-1 数据分析项目清单

分析类别	监测项目	分析项	分析指标
环境监测	环境温湿度	统计分析	最大值/最小值/平均值
		桥梁耐久性影响	超限持续时间
		谱分析	反应谱
作用	环境温度	统计分析	最大值/最小值/平均值

分析类别	监测项目	分析项	分析指标
监测	桥面温度	统计分析	最大值/最小值/平均值
		桥面结冰	桥面结冰概率
	车辆荷载	车载统计	车重/轴重/车型/标准当量/超载车
		车载效应	车载效应统计/荷载效应概率分布
结构响应	主梁挠度	统计分析	最大值/最小值/平均值
		主梁线形变化	主梁相对变形图
	梁端纵向位移	统计分析	最大值/最小值/平均值
		累计行程分析	梁端纵向累积行程
	拱顶位移	统计分析	最大值/最小值/平均值
		累计行程分析	拱顶位移累积行程
	静应变	统计分析	最大值/最小值/平均值
		应力五度指标	安全度/承载度/异常度/振荡值/动向指标
	振动	统计分析	幅值/均方根
		模态分析	模态频率/模态振型
频谱分析		频谱图	
结构变化	腐蚀	统计分析	腐蚀程度、腐蚀进程、氯离子浓度
	结构裂缝	统计分析	裂缝宽度、随时间变化规律
综合分析	主梁挠度	变形校验分析	校验系数
	各监测项	相关性分析	相关性时程
			相关性散点图

9.4 结构安全预警机制

结构健康监测结构安全预警总体框架如图所示。

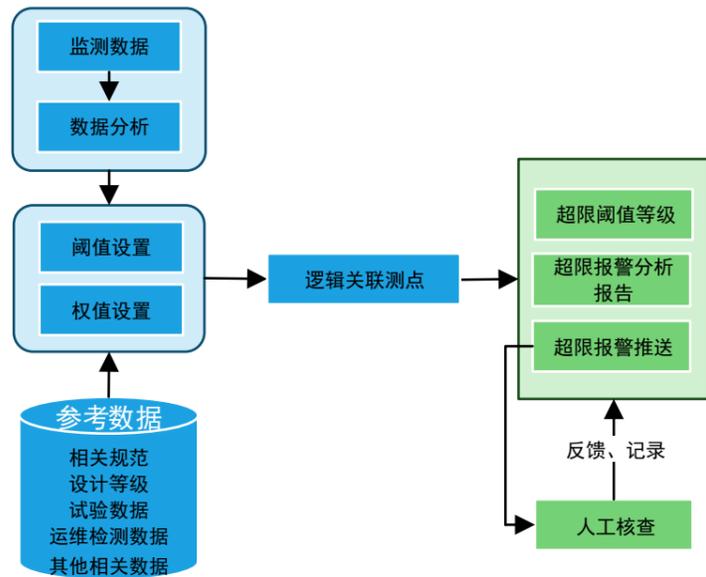


图 9.4-1 结构安全预警系统总体框架

9.4.1 报警状态的判别

结构监测预警阈值的设定宜按照以下原则确定：

- (1) 基于监测参数历史统计值、设计值和规范容许值设定报警阈值；

- (2) 考虑监测数据动态特征、统计特性以及异常特征设定报警阈值；

- (3) 兼顾桥梁定期检查及技术状况评定结果设定报警阈值；

- (4) 依据桥梁使用状况和系统运行状况可对报警阈值进行动态调整。

- (5) 本项目桥梁监测项目预警阈值设计参照《公路桥梁结构监测技术规范》（JT/T 1037-2022）设定如下表所示。

表 9.4-1 桥梁结构监测预警设置

报警类别	报警内容	报警阈值	报警级别
环境	最高温度、最低温度、最大温差	大于 1.0 倍设计值	一级
		大于 1.2 倍设计值	二级
作用	车辆总重或轴重	达到 1.5 倍设计车辆荷载	一级
		达到 2.0 倍设计车辆荷载	二级
	混凝土、钢结构构件温度	达到设计值	一级
结构响应	主梁竖向位移	大于 60°C或小于-20°C或根据铺装体系材料力学性能随温度变化关系确定	一级
		达到 0.8 倍设计值	二级
	达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级超限	三级	
	梁端纵向位移	达到 0.8 倍设计值	二级
		绝对值达到设计值	三级
	拱桥主拱拱顶位移	达到 0.8 倍设计值	二级
		达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级超限	三级
	主梁振动加速度	10 min 加速度均方根达到 31.5cm/s ² 且持续时间超过 30min	一级
		10 min 加速度均方根达到 50 cm/s ²	二级
		幅值持续增大、呈现发散特征	三级
主拱关键截面静应变	超过历史最大值	一级	
	超过设计最不利工况计算值	二级	
结构变化	裂缝	出现结构性裂缝	一级
		裂缝宽度超过规范限值或发展加速	二级
监测数据分析结果	主梁下挠	腐蚀深度到达保护层深度	二级
		持续下挠	三级

9.4.1 结构健康度评估

- 1.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 9.4-2 桥梁结构健康度等级评定依据

健康度等级	结构构件	结构整体
I基本完好	本节 2a)中所列监测数据无超限	本节 2b)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	本节 2a)中所列监测数据超限等级一级	除塔顶位移、锚碇位移、拱脚位移之外，2b)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	本节 2a)中所列监测数据超限等级二级	本节 2b)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；或当塔顶位移、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	本节 2a)中所列监测数据超限等级三级	本节 2b)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

2.宜通过监测数据分析、并与超限阈值比较，进行桥梁结构健康度评估，评估参数包括：

- a)构件健康度表征评估参数：梁端纵向位移、关键截面应变、裂缝等监测数据；
- b)结构整体健康度表征评估参数：采用主梁竖向位移、结构振动等监测数据，以及主梁持续下挠等分析结果。

3.也可以通过损伤识别和模型修正建立可靠的有限元模型，将计算的结构响应和结构变化结果与表 8.4-1 中超限阈值进行对比，参考表 8.4-2 进行桥梁结构健康度评估。

9.4.2 预警信息反馈

本项目桥梁监测项目实时预警信息内容主要包括：结构健康度评估结果、预警级别、预警构件/荷载，报警传感器编号和位置、报警监测值和预警值，对应信息接收人如表所示。

表 9.4-3 实时预警信息表

序号	结构健康度评估结果	预警方式	接收人	采取措施
1	II轻微异常	电子邮件	我单位数据维护员 管养单位桥梁工程师	I: 桥梁工程师现场检查桥梁概况 II: 我单位桥梁季度检查期间重点关注、核对与跟踪
2	III中等异常	电子邮件及短信	我单位数据维护员 管养单位桥梁工程师	I: 桥梁工程师现场检查桥梁概况 II: 我单位数据维护员次日现场检查核对预警信息

序号	结构健康度评估结果	预警方式	接收人	采取措施
3	IV严重异常	电子邮件、短信及口头通知	我单位数据维护员 我单位项目负责人 管养单位桥梁工程师 主管领导	I: 桥梁工程师现场检查结构安全状态，必要时紧急封闭交通 II: 我单位项目负责人及数据维护员即刻到达现场检查桥梁安装状态，必要时协助封闭现场交通

9.5 分析成果的交付

按照结构健康监测实施及运行期间可能出现的情形，在技术服务期间提交的结构安全分析成果主要包括：

- (1) 结构健康监测运行报告（每季度一册）；

基于各个监测项目数据进行阶段分析，对桥梁服役状态进行综合评估并给出养护建议，同时对监测系统工作状态进行跟踪维护。

- (2) 结构健康监测二级超限报警报告（根据实际按事件实时发出）；

当监测系统给出二级超限报警信息时发出，对应内容包括二级报警信息记录、人工现场核查结果、报警信息分析结论、报警对应处置意见。

- (3) 结构健康监测三级超限报警报告（根据实际按事件实时发出）；

当监测系统给出三级超限报警信息时发出，对应内容包括三级超限报警信息记录、人工现场核查结果、报警信息分析结论、报警对应处置意见。

10 支持保护系统

10.1 供电系统

结构健康监测系统中在线监测场端设备均使用 220V/50Hz 交流电，本次升级改造监测设备利用原有供电设施。

监测系统外场设备的供电系统包括数据采集站（子站）供电和传感器供电系统。

1) 外场机柜供电系统

数据采集站需 220V 交流供电。电源箱需配备一个隔离变压器，以避免雷击。

电缆、电线应满足以下要求：

a) 电缆、电线要作清晰的编号标记，用于接序和回路检查，每根电缆在端头处要装有标签；

b) 电缆应按实际长度铺设，铺设时不应超过电缆厂家规定的牵引和弯曲半径的要求。

在敷设时要避免电缆护套的应力损伤。可以使用牵引润滑油；

- c) 当电缆通过电缆孔洞、电缆管道和类似的地方时要密封，防止害虫和水进入；
数据采集站配电箱电源引入后，分别供给空调、工作站设备及辅助设备使用。

2) 传感器供电系统

结构监测系统中的传感器子系统的电源由结构监测系统现场采集站 UPS 提供。通过电源模块进行交-直流电压转换后，使用屏蔽电缆向各传感器设备供电。

10.2 网络条件

经调研，桥梁附近 4G 网络信号好，测试数据传输网速流畅。桥梁端监测数据向监测服务器发送拟通过 4G 网络进行通信传输。

10.3 数据安全

健康监测系统数据安全应满足以下要求：

- (1) 数据安全应包含数据完整性、数据加密、数据访问权限控制和数据可审计性；
- (2) 数据完整性应包含数据传输完整性和数据存储完整性，并符合下列规定：

①数据传输完整性宜符合 GB/T 37025 的相关规定；

②应采用封装签名、测试字验证、引用约束等方式保证数据存储完整性，并提供非完整数据的解决措施；

(3) 对监测系统敏感字段或业务数据应加密存储；

(4) 通过公网传输监测数据时，应根据管理要求进行加密传输，加密过程应使用国家密码管理部门批准使用的算法；

(5) 数据审计应具备监测记录外部用户访问监测数据行为的功能；

(6) 监测系统应具备数据访问权限控制功能，能够对用户访问权限进行分级管理。

10.4 网络信息安全

1) 防火墙实施方案

IPC 采用 GlassWire（Version 3.3.495）主机防火墙，隔离现场局域网与 VPDN 专网，防火墙的设置原则如下：

(1) 建立合理有效的安全过滤原则对网络数据包的协议、端口、源/目的地址、流向进行审核，严格控制外部非法访问。

(2) 只打开必须的 TCP/UDP 数据传输端口，防范恶意攻击。

(3) 定期查看防火墙访问日志，对防火墙的管理员权限严格控制。

2) 漏洞修复方案

定期使用 OpenVAS 等漏洞扫描工具定期扫描系统内存在的安全漏洞，及时下载安装系统漏洞补丁。

3) 防病毒方案

采用 Microsoft Windows Defender 网络防病毒软件，建立 IPC 整体防病毒体系，对 IPC 采取全面病毒防护。同时，根据官方网站公布的流行性或重大恶性病毒及时下载系统补丁和杀毒工具，采取相关措施，防范于未然。

4) 数据安全方案

IPC 磁盘采用 RAID 阵列提高数据的可靠性，同时定期对 IPC 中重要的数据进行备份，防止因为各种软硬件故障、病毒、黑客的破坏等原因导致的数据丢失。同时，对系统中的敏感数据使用 SHA-256 形成信息摘要，防止数据被篡改，同时使用 AES 对称加密技术进行加密，并严格保证密钥不会外泄，确保数据的安全性、完整性和机密性。

5) 访问控制管理

实施有效的用户口令和访问控制，在内网中系统管理员必须管理好所有的设备口令，在不同系统上使用不同的口令，同时口令采用大小写字母、字符、数字等组合的强密码，并定期更换。

6) 安全审计

开启日志系统，对用户登录信息、系统异常、电源异常、服务异常等情况等自动记录日志，以便出问题时跟踪追查审计

10.5 电缆

(1) 性能要求

电缆符合中华人民共和国电缆技术规范。

(2) 安装要求

- a) 端接点之间不允许有电缆接头；
- b) 任何的无保护电缆的结构连接有足够保护措施。

(3) 端接

- a) 全部电缆端接在相应的终端盒和终端设备；
- b) 终端接头进行标记和识别，电缆、电线的记号用来帮助正常接续；
- c) 室内应配置先进的配线架。配线架的机械结构和工艺要求应符合国家规范要求；

d) 每个配线架的容量应足以在它的线路侧端接全部室外和室内电缆包括备用线对及在设备侧端接的所有设备电缆，以满足监测系统的需要；

e) 配线架和端子板上均应有明显的标志。

10.6 防雷接地系统

10.6.1 防雷原则

根据结构监测系统的需求，按照以下原则进行防雷方案设计：

- (1) 将绝大部分雷电流直接引入地下泄散；
- (2) 阻塞沿电源线或数据、信号线引入的过电压波危害设备（内部保护及过电压保护）；
- (3) 限制被保护设备上浪涌过电压幅值（过电压保护）。

10.6.2 防雷方案

由于大桥结构设计中已考虑主体结构防雷（直击雷保护），在此基础上，健康监测系统防雷方案如下：

- (1) 在所有动力配电箱内输出至 UPS 前安装过电压保护器；每个数据采集站配电箱均安装一个；
- (2) 在所有机柜内 UPS 输出至桥面、塔顶外部用电设备处，安装过电压保护器。

10.6.3 设备要求

表 10.6-1 电源防雷器性能参数

性能参数	数值
工作电压	220V AC
工作频率	47~63Hz
最大持续运行电压	385V
动作电压	620V
反应时间	<25 ns
标称放电电流 (8/20μs)	20kA
最大放电电流 (8/20μs)	50kA
残压	≤1800V
限制电压 (8/20μs)	1300V
工作环境	-40 到 85°C, ≤95%

表 10.6-2 信号防雷器性能参数

性能参数	数值
额定电压	5V、12V、24V
额定负载电流	500MA
最大持续运行电压	8V、15V、30V

性能参数	数值
标称放电电流 (8/20μs)	5kA
最大放电电流 (8/20μs)	10kA
限制电压	15V、30V、42V
最大传输速率	2Mbps
插入损耗	<0.1dB
失效机制	通讯线路对地短路或断开
工作环境	-40 到 85°C, ≤95%

11 系统实施方案

项目实施过程中，为保证工作效率，保证施工界面允许的情况下多个项目同步施行。结构监测项目在布设相关测点及布置线缆时尽量同时使用桥检车提供的作业到达条件。

现场硬件设备部署施工组织具体时间安排如表 10.1-1 所示。

表 11.1-1 场端设备安装时间安排

序号	工作名称	需用天数	时间安排					
			10	20	30	40	50	60
1	传感器安装	30						
2	传感器保护	15						
3	系统现场调试	10						
4	监测通信调试	10						
5	实施阶段总结	10						
6	系统试运行	20						
7	系统优化调整	20						
8	资料整理	10						

12 交通组织方案

按照本项目监测子项安装需要部分封闭交通，并相应制定桥梁封闭期间的交通实施方案（具体参数按照《公路养护安全作业规程》（JTG H30-2015）、《道路交通标志和标线 第 4 部分：作业区》（GB5768-2017）选取），主要措施如下：

施工具体时间结合现场交通量确定，并向交警、路政部门报批后执行。

- 1、在施工区域来车方向设置施工标志、导向箭头标志等交通引导标志，用锥筒及水马实行半封闭渠化通行。
- 2、施工阶段：监测桥幅外侧行车道施工，封闭对应车道。
- 3、施工完半幅之后另外半幅参照执行。
- 4、撤场并恢复正常通行。

结构裂缝等监测项目传感器安装时需要临时占用外侧车道施工，对应交通组织方案如图 11.1-1 所示。

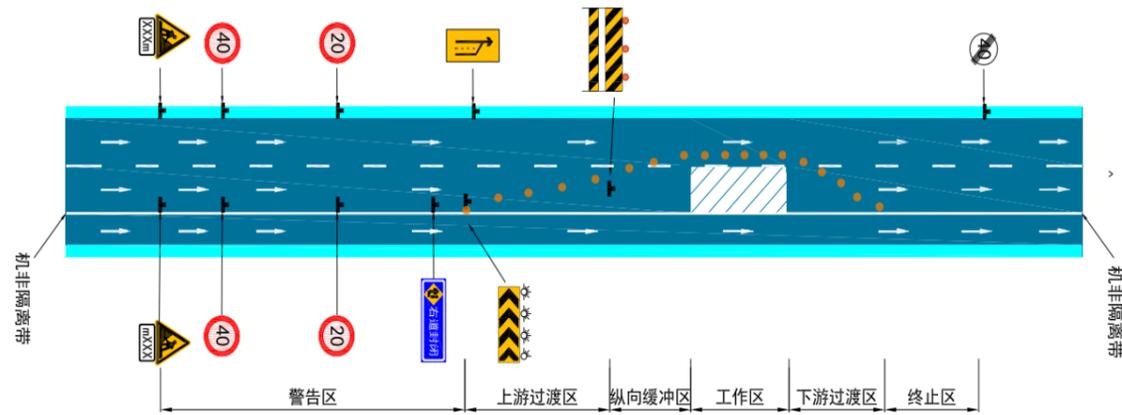


图 12.1-1 监测实施道路交通组织示意图

13 施工注意事项

13.1 施工方法和技术措施

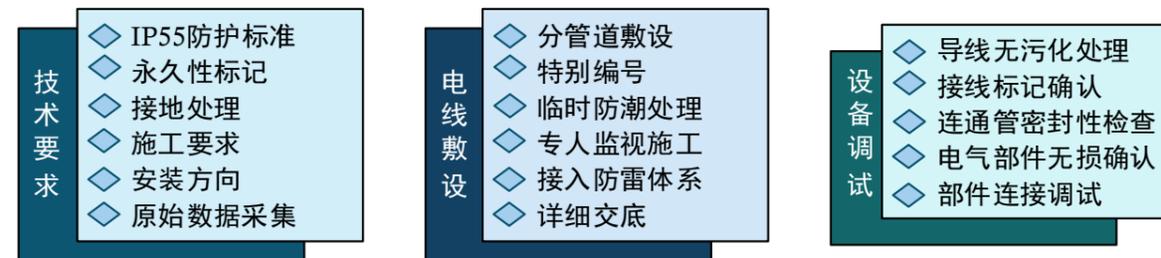


图 13.1-1 施工方法和技术措施

1) 技术要求

(1) 对于需要一般防护的传感器保护标准应满足 IP55 要求，直接裸露于外的传感器如风速风向仪等，按照其相应保护要求办理。

(2) 所有传感器的定位应有明显的永久性标记，以便后期更换时可找到以前的位置。

(3) 无论是能够直接暴露于空气中，还是不允许暴露于空气中的设备，对电子部分均采取保护措施。

(4) 传感器设备需采取可靠接地，泄放可能产生的感应电压。

(5) 传感器为精密测量设备，安装时必须轻拿轻放，严禁敲打击拍。

(6) 部分监测传感器具有监测方向性，安装前须参阅传感器设备说明及其安装方法，如振动传感器、压力变送器等等。

(7) 用于监测桥梁结构响应的传感器，安装完成时，必须采集原始读数并记录保存。

2) 电线敷设

(1) 为避免电源感应对仪器测量、系统通讯带来影响，本系统所用的电源电缆不能同传感器电缆、通讯电缆敷设在同一保护管内。

(2) 敷设时绝对防止火花溅落在电缆上，因此要沿敷设线有专人监视。电缆敷设前要核对长度和清单，防止电缆长度不足。电缆盘要编号，顺次写下所敷电线号。敷设前要做电缆绝缘记录，敷设好一根就要整理一根。敷设后电线头要临时用塑料薄膜封头以防湿气浸入。

(3) 电缆应穿管保护，保护管规格为镀锌钢管，特殊困难线段以不锈钢软管连接。顺桥向部分沿线缆槽道路由敷设。

(4) 所有的保护管均应联入主桥的防雷接地体系。

(5) 对施工工人要作一次详细交底，分清负责范围。

3) 设备调试

(1) 设备电源线和配线的导线要求清洁、无脏化、软化及绝缘破裂等现象。

(2) 接线处要求牢固，各处标记需醒目正确、不易褪色并与设计图一致。

(3) 连通管及镀锌钢管要完善无损，测试连通管的密实度，不能漏水。

(4) 各电器部件要完好无损，内外清洁无灰尘、无腐蚀。

(5) 各部件连接调试应正常。

13.2 硬件设施的安装

(1) 场端各个监测项目传感器的安装位置偏差应满足设计文件要求，如现场实际条件异常导致安装位置必须更改的，现场安装人员应遵循设计单位的书面同意。

(2) 应采用合适的施工方法保证传感器及其附属产品的安装对监测桥梁原有构件的正常工作无影响：禁止对监测桥梁原有构件进行损伤、拆除重建等严重影响结构安全的行为；禁止在施工过程中采用可能引起混凝土崩裂的施工方式。

(3) 对施工过程中造成的桥梁微损区域应及时修复。

(4) 为保证传感器使用的耐久性要求，现场传感器安装应满足设计图纸和生产厂家提出的技术要求。

13.3 线缆施工

(1) 电缆的弯曲半径应大于电缆直径的 15 倍。

(2) 应尽量避免电缆的接续，电缆接续时须采用专门接插件。

- (3) 设备连接电缆时，宜从设备下部进线。
- (4) 电缆应进行套管防护，套管内径不宜小于电缆外径的 1.5 倍。
- (5) 直埋电缆在直线段应每隔 50~100m、电缆接头及转弯处、进入不同环境处时应设置明显的方位标志，在易于接触区域警示防护标志应加密设置。
- (6) 沿室外墙面敷设电缆宜采用吊挂方式，沿室内墙面敷设电缆宜采用卡子方式。
- (7) 用于数据采集传输的现场设备连接线缆应及时进行归纳防护处理，以保证结构耐久性要求。

13.4 施工安全

- (1) 施工用电安全应符合国家标准《用电安全导则》（GB/T 13869）、《国家电气设备安全技术规范》（GB 19517）和《施工现场临时用电安全技术规范》（JGJ 46）有关规定。
- (2) 高处作业应满足现行《建筑施工高处作业安全技术规范》（JGJ 80）有关规定。
- (3) 现场地面施工作业区域应设置安全围挡和安全标志，并应设专人监护、监控，需要办理作业批准手续的应积极办理。
- (4) 现场施工人员配备的劳动保护用品应符合现行国家标准《个体防护装备选用规范》（GB/T 11651）的有关规定。
- (5) 现场作业结束后，应检查并消除隐患后离开现场。

13.5 其他

现场施工前应认真核对设计图和实桥对应情况，如发现实际构造与设计图纸有出入及有新的结构安全相关病害产生时，应及时通知设计人员。其它未尽事宜应满足按照现行规范相关规定要求。

14 验收方案

14.1 资料验收

施工单位具备以下完整资料文件后可向建设单位提出验收申请：

- (1) 监测系统施工图。
- (2) 监测系统竣工图。
- (3) 施工期间设计变更过程传递文件（如有）。
- (4) 监测系统试运行成果报告。

- (5) 硬件产品出厂合格证明。
- (6) 监测类产品标定报告。
- (7) 其他资料。

14.2 现场验收

结构监测硬件设备现场验收内容、验收方式及评判标准如表 13.2-1 所示。

表 14.2-1 结构监测硬件设备现场验收依据

序号	验收内容	验收方式	判断标准
1	设备类别	现场核对	厂、证、物三者一一对应
2	设备数量	现场核对	数量不小于设计文件要求
3	测点位置	量距	小于设计文件给出的误差值
4	测点存活率	数据读取	100%
5	施工造成的桥梁构件损伤	目测	1)混凝土破损数量不大于测点数目的 10%，单处最大面积不大于 200cm ² ，不得破坏原有钢筋。 2)钢结构不得出现板材切割及板材钻孔等。 3)钢结构表面板材不得出现未涂装的裸露区域。
6	施工现场安全风险	目测	1)现场设施附着可靠，无坠落风险。 2)现场设施未侵入交通通行区域。 3)设备连接线缆应进行防护。 4)现场施工电缆采取了空气开关等主动防护措施。 5)现场施工电缆等间距布设警示标志。

14.3 数据传输验收

(1) 通信系统现场验收内容、验收方式及评判标准如表 13.3-1 所示。

表 14.3-1 通信系统现场验收依据

序号	验收内容	验收方式	判断标准
1	数据丢失率	数据对比	误差≤ 1%
2	信息缓存	数据容量估算	数据缓存时间不小于 3 个月
3	传输延时	数据对比	≤ 60 秒
4	断点续传	传输中断模拟测试	传输中断后系统重启自动续传
5	自动重启	异常模拟测试	系统因异常原因停止工作，在恢复工作条件后系统自动重启

(2) 监测项目应在场端系统完成 AD 转换，传输至监测中心数据库的监测数据应具有明确物理含义，直接可读、可用。

监测系统施工单位对传输数据质量应负完全责任，负责数据解读至监测物理量。

15 与省中心平台对接预留方案

本桥系统建成后将纳入江苏省交通运输厅公路事业发展中心开发的“江苏省普通国省道桥梁结构监测系统 2.0”统一管理。本桥采用基于 TCP/IP 的光纤专网实现本地数据传输，通过 VPMV 汇总于监控中心服务器，与平台采用数据接口传输，并使用消息认证、数字签名等技术保证数据传输的完整性、实时性、安全性和稳定性。本系统采用在线存储和离线存储相结合的方式，一方面采用 FC SAN 存储网络，实现原始数据在专用存储网络中在线存储，另一方面通过场端布设的工控机，能够实现在网络中断情况下原始数据的本地保存。本系统相应数据类型、协议编码如下表所示。

表 15.1-1 实时监测数据表

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	
传感器 ID	长整型	该条监测数据所属传感器
数据采集时间	日期时间型	
当前值	双精度浮点型	按实际精度要求保留小数点
报警状态	整型	0-正常；1-超限一级报警；2-超限二级报警；3-超限三级报警
数据状态	整型	0-正常；1-异常
备注	字符型	

表 15.1-2 特征值统计数据表

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	
传感器 ID	字符型	该条监测数据所属传感器
数据采集时间	日期时间型	
采样间隔	整型	特征值统计间隔时间，单位为（s）
最大值	双精度浮点型	统计时间范围内的最大值
最小值	双精度浮点型	统计时间范围内的最小值
平均值	双精度浮点型	统计时间范围内的平均值
RMS 均方根	双精度浮点型	统计时间范围内的均方根值
方差	双精度浮点型	统计时间范围内的方差值
数据状态	整型	0-正常；1-异常
备注	字符型	

表 15.1-3 通用报文协议数据格式定义

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
报文类型	0	报文类型	BYTE	报文类型=2	02 代表通用报文
预留位	1	预留	BYTE	预留，默认为 0	
	2	方向	BYTE	0-下行信息；1-上行信息	
	3	网络通讯计算机编号	BYTE	默认为 0	

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注	
	4	命令码	BYTE	命令码=1		
消息长度	5	长度低	INT	报文长度用两个字节表示，低字节在前，高字节在后	报文长度为 N*4+9，即 7 个时间字节和 2 个对象码字节，每个数据值占 4 个字节，一共 N 对。	
	6	长度高				
时间戳	7	年	BYTE	年+1900	实际的年需要加上 1900	
	8	月	BYTE	月		
	9	日	BYTE	日		
	10	时	BYTE	时		
	11	分	BYTE	分		
	12	毫秒低	INT	毫秒用两个字节表示，低字节在前，高字节在后	用毫秒数除以 1000 得到的值就是秒数，余数就是毫秒数。	
13	毫秒高					
传感器通道	14	对象码低	INT	对象码用两个字节表示，低字节在前，高字节在后	对象码就是数据通道编码	
	15	对象码高				
传感器数据	16	数据值低	FLOAT	数据值用四个字节表示，此字节为低字节	从字节 16 开始，依次每 4 个字节表示一个数据值，一共 N 个。	
	17	数据值				数据值用四个字节表示，此字节为次低字节
	18	数据值				数据值用四个字节表示，此字节为次高字节
	19	数据值高				数据值用四个字节表示，此字节为高字节

16 系统运维方案

16.1 结构监测系统运行一般特点

根据以往项目经验，总结结构监测系统、监测设备和工作人员素质呈现如下特点：

- 1) 网络系统故障较少；
- 2) 监测设备一般运行良好，故障较少；外场传感器故障较多发；
- 3) 运营养护团队员工素质和技术专业水平在近年逐步提高；
- 4) 进口的监测设备产品，存在维修周期较长等问题；
- 5) 投入运营后，由于监测数据量大增，易存在服务器超负荷运转状况；
- 6) 受自然环境的侵蚀，特别是桥面设备、光纤线路易损、易老化。

16.2 系统运维管理

16.2.1 管理模式

专设一个运营维护团队，分为监测系统运营维护组和监测数据评估组。

1) 一般运营维护方式

- (1) 每年一次维护，工程师对网络设备、健康检测系统设备的维护；
- (2) 发现异常及时分析与判断，快速做出响应并按单位相关流程程序执行；
- (3) 当出现故障时，工程师第一时间赶赴现场，迅速按单位故障流程和应急处理流程执行；
- (4) 网络设备工程师、软件工程师、数据分析工程师各自按自己的职责，每天对网络系统各个部分实时检测；
- (5) 网络设备工程师、软件工程师、数据分析工程师和维护工程师每年对结构监测系统设备和数据进行汇总分析，判断系统运行的状况；
- (6) 每次上桥维护与维修作业，与桥梁养护管理单位等进行沟通，确保各项作业工作顺利进行和工作人员、车辆的安全；
- (7) 每年向业主递交一份设备运营维护、维修报告；
- (8) 特殊情况或重大设备故障，及时向管理部门汇报，并详细说明相关处理方案。

2) 特定情况运营维护方式

重要领导来访、节假日前对系统各个设备进行安全维护巡查；

在台风、暴雨、冰冻、大雪等自然灾害来临的前后，对系统各个设备进行安全维护巡查。

16.2.2 系统运维管理内容

结构监测系统为专业服务系统，运营过程中需要桥梁结构工程师、软件工程师、维护工程师和值班人员共同完成。

1) 日常系统管理

(1) 结构健康状态页面的日常监控

值班人员通过结构监测系统中结构健康状态页面，按各监测内容及不同的实时监测区段，及时掌握各实时监测内容当前的实测数据和预警情况。如值班人员发现异常情况，及时通知维护工程师确认异常现象，以便采取进一步措施。做好日常记录和故障记录。

(2) 设备工作状态页面的日常监控

值班人员通过结构监测系统中设备工作状态页面，对传感器模块、数据采集及传输模块、数据处理及管理模块的所有硬件设备工作状态进行监视；值班人员可通过该页面直观地了解结构监测系统所有设备当前的实时工作状态及设备预警信息。如发现异常情况，及时通知维护工程师进行确认，以便采取进一步措施。做好日常记录和故障记录。

2) 数据维护管理

数据维护工程师主要负责结构监测系统采集数据的收集、分析工作，同时负责结构监测系统基础数据的收集、整理、预处理和录入维护工作。

基础数据包括型号信息、设备信息、位置信息、通道信息、监测项目、布置图和预设显示方案。

数据维护工程师需按照桥梁结构工程师确认的基础数据进行日常维护，包括基础数据的添加、修改、删除等操作。数据维护工程师可进行维护的基础数据包括型号信息、设备信息、位置信息、通道信息、监测项目、数据采集制度和评估体系。

3) 运营养护管理

(1) 设备的日常定期维护

系统维护人员根据预定的系统养护计划，定期对全桥所有监测设备进行专业维护，以保证设备始终处于高效的运转状态。初步拟定，当前对主要的外场设备每季度均进行一次定期维护工作。

(2) 故障设备的检修维护

维护工程师每日对设备运行情况进行初检、分析和记录归档，严格按维护流程规定执行维护计划，对要维护、维修个更换的设备记录详尽，有据可查。对各个设备运行的性能要具有可预测性和判断准确性，及时向管理所提出详尽的运营维护建议、措施和方案。

(3) 运营维护工具管理

运营维护要在每次运营维护之前，对汽车、工具、设备钥匙、安全锥和荧光背心等必须认真、仔细地检查，并对使用情况做好详细记录。发现问题及时维修与更换。

(4) 运营维护制度与安全管理

定期对员工进行运营维护 and 安全性教育，做到所有人员仪表端庄，态度认真，遵章守纪。运营人员不得擅自离岗和脱岗，维护人员时刻牢记安全作业的思想，做好各项安全防范工作。

16.2.3 数据安全

数据安全应满足以下要求：

(7) 数据安全应包含数据完整性、数据加密、数据访问权限控制和数据可审计性；

(8) 数据完整性应包含数据传输完整性和数据存储完整性，并符合下列规定：

①数据传输完整性宜符合 GB/T 37025 的相关规定；

②应采用封装签名、测试字验证、引用约束等方式保证数据存储完整性，并提供非完

整数据的解决措施；

（9）对检测系统敏感字段或业务数据应加密存储；

（10）通过公网传输检测数据时，应根据管理要求进行加密传输，加密过程应使用国家密码管理部门批准使用的算法；

（11）数据审计应具备检测记录外部用户访问检测数据行为的功能；

（12）检测系统应具备数据访问权限控制功能，能够对用户访问权限进行分级管理。

16.2.4 网络信息安全

1) 防火墙实施方案

IPC 采用 GlassWire（Version 3.3.495）主机防火墙，隔离现场局域网与 VPDN 专网，防火墙的设置原则如下：

（1）建立合理有效的安全过滤原则对网络数据包的协议、端口、源/目的地址、流向进行审核，严格控制外部非法访问。

（2）只打开必须的 TCP/UDP 数据传输端口，防范恶意攻击。

（3）定期查看防火墙访问日志，对防火墙的管理员权限严格控制。

2) 漏洞修复方案

定期使用 OpenVAS 等漏洞扫描工具定期扫描系统内存在的安全漏洞，及时下载安装系统漏洞补丁。

3) 防病毒方案

采用 Microsoft Windows Defender 网络防病毒软件，建立 IPC 整体防病毒体系，对 IPC 采取全面病毒防护。同时，根据官方网站公布的流行性或重大恶性病毒及时下载系统补丁和杀毒工具，采取相关措施，防范于未然。

4) 数据安全方案

IPC 磁盘采用 RAID 阵列提高数据的可靠性，同时定期对 IPC 中重要的数据进行备份，防止因为各种软硬件故障、病毒、黑客的破坏等原因导致的数据丢失。同时，对系统中的敏感数据使用 SHA-256 形成信息摘要，防止数据被篡改，同时使用 AES 对称加密技术进行加密，并严格保证密钥不会外泄，确保数据的安全性、完整性和机密性。

5) 访问控制管理

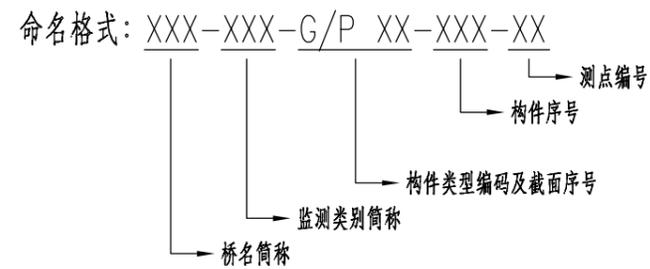
实施有效的用户口令和访问控制，在内网中系统管理员必须管理好所有的设备口令，在不同系统上使用不同的口令，同时口令采用大小写字母、字符、数字等组合的强密码，并定期更换。

6) 安全审计

开启日志系统，对用户登录信息、系统异常、电源异常、服务异常等情况等自动记录日志，以便出现问题时跟踪追查审计。

17 施工图预算

桥梁监测点编号命名规则



- 1、桥名简称: TDH表示泰东河大桥; XTYH表示新通扬运河大桥; CCH表示串场河大桥。
- 2、监测类别简称: 不同监测项的英文简称, 由3位大写字母组成。
- 3、构件类型编码及截面序号: 表示当前传感器所在构件类型 (G: 梁, P: 墩, Y: 引道); 截面序号由2位阿拉伯数字组成, 不足两位, 前序补0。
- 4、构件序号: 由3位阿拉伯数字组成, 不足三位, 前序补0。
- 5、数字编号: 由2位阿拉伯数字组成, 不足两位, 前序补0。
- 6、示例: TDH-RHS-G03-001-01, 表示泰东河大桥环境温度湿度监测项G03梁段第001构件第01个监测点。

注:

1.应参照交通运输部《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037-2022) 要求编写。

施工图例

序号	名称	图例	序号	名称	图例
1	工控机		12	电阻式温度计	
2	动态数据采集分析仪		13	低频加速度传感器	
3	称重数据采集处理器		14	拉绳式位移计	
4	振弦式综合采集仪		15	振弦式应变传感器	
5	工业级交换机		16	LVDT裂缝传感器	
6	光纤收发器		17	高清摄像机	
7	UPS		18	通讯电缆	
8	开关电源模块		19	电力电缆	
9	串口服务器		20	网线	
10	应变采集仪		21	光缆	
11	温湿度计		22		