

和平大桥结构健康监测系統升級改造項目

施工圖設計

第一冊（共一冊）



浙江數智交院科技股份有限公司

ZHEJIANG INSTITUTE OF COMMUNICATIONS CO.,LTD.

二 〇 二 六 年 七 月

和平大桥结构健康监测系統升級改造項目

施工圖設計

第一冊（共一冊）

單位主管負責人：

部門負責人：

項目負責人：

項目總工程師：



浙江數智交院科技股份有限公司

ZHEJIANG INSTITUTE OF COMMUNICATIONS CO.,LTD.

二 〇 二 六 年 七 月

序号	图 表 名 称	图表号	页数	备注
1	设计说明	SI-1	47	
	系统图			
1	系统拓扑图	SI-2-1	1	
2	DAU-01 外站传感器编号对应表（一）	SI-2-2	1	
3	DAU-01 外站传感器编号对应表（二）	SI-2-3	1	
4	DAU-01 外站传感器编号对应表（三）	SI-2-4	1	
5	DAU-01 外站传感器编号对应表（四）	SI-2-5	1	
	布点图			
1	原系统总体布点图	SI-3-1	1	
2	新增、更换传感器布点图（一）	SI-3-2	1	
3	新增、更换传感器布点图（二）	SI-3-3	1	
4	保留测点总体布点图	SI-3-4	1	
5	升级改造后系统总体布点图（一）	SI-3-5	1	
6	升级改造后系统总体布点图（二）	SI-3-6	1	
7	桥梁截面编号布置图（一）	SI-3-7	1	
8	桥梁截面编号布置图（二）	SI-3-8	1	
9	数据采集外站布点图	SI-3-9	1	
10	数据采集外站布置图	SI-3-10	1	
11	桥址区环境温湿度测点布点图	SI-3-11	1	
12	桥址区环境温湿度测点布置图	SI-3-12	1	
13	索塔锚固区温湿度测点布点图	SI-3-13	1	
14	索塔锚固区温湿度测点布置图	SI-3-14	1	
15	塔顶风速风向测点布点图	SI-3-15	1	
16	塔顶风速风向测点布置图	SI-3-16	1	
17	桥面风速风向测点布点图	SI-3-17	1	
18	桥面风速风向测点布置图	SI-3-18	1	
19	桥面铺装层温度测点布点图	SI-3-19	1	
20	桥面铺装层温度测点布置图	SI-3-20	1	
21	地震动测点布点图	SI-3-21	1	
22	地震动测点布置图	SI-3-22	1	
23	主梁竖向位移测点布点图	SI-3-23	1	
24	主梁竖向位移测点布置图	SI-3-24	1	

序号	图 表 名 称	图表号	页数	备注
25	支座位移测点布点图	SI-3-25	1	
26	支座位移测点布置图	SI-3-26	1	
27	梁端位移测点布点图	SI-3-27	1	
28	梁端位移测点布置图	SI-3-28	1	
29	塔顶偏位测点布点图	SI-3-29	1	
30	塔顶偏位测点布置图	SI-3-30	1	
31	主梁应变测点布点图	SI-3-31	1	
32	主梁应变测点布置图	SI-3-32	1	
33	索塔应变测点布点图	SI-3-33	1	
34	索塔应变测点布置图	SI-3-34	1	
35	索力测点布点图	SI-3-35	1	
36	索力测点布置图	SI-3-36	1	
37	主梁振动测点布点图	SI-3-37	1	
38	主梁振动测点布置图	SI-3-38	1	
39	主塔振动测点布点图	SI-3-39	1	
40	主塔振动测点布置图	SI-3-40	1	
41	视频监控测点布点图（一）	SI-3-41	1	
42	视频监控测点布置图（一）	SI-3-42	1	
43	视频监控测点布点图（二）	SI-3-43	1	
44	视频监控测点布置图（二）	SI-3-44	1	
	走线图			
1	桥址区环境温湿度走线图	SI-4-1	1	
2	索塔锚固区温湿度走线图	SI-4-2	1	
3	塔顶风速风向走线图	SI-4-3	1	
4	桥面风速风向走线图	SI-4-4	1	
5	桥面铺装层温度走线图	SI-4-5	1	
6	地震动走线图	SI-4-6	1	
7	主梁竖向位移走线图	SI-4-7	1	
8	支座位移走线图	SI-4-8	1	
9	梁端位移走线图	SI-4-9	1	
10	塔顶偏位走线图	SI-4-10	1	
11	主梁应变走线图	SI-4-11	1	

序号	图 表 名 称	图表号	页数	备注
12	索塔应变走线图	SI-4-12	1	
13	索力监测走线图	SI-4-13	1	
14	主梁振动监测走线图	SI-4-14	1	
15	主塔振动走线图	SI-4-15	1	
16	视频监控走线图（一）	SI-4-16	1	
17	视频监控走线图（二）	SI-4-17	1	
18	视频监控走线图（三）	SI-4-18	1	
	安装图			
1	数据采集外站机柜安装图	SI-5-1	1	
2	光电挠度仪安装图	SI-5-2	1	
3	温湿度计安装图	SI-5-3	1	
4	振弦式应变计安装图	SI-5-4	1	
5	拉绳式位移计安装图	SI-5-5	1	
6	加速度计安装图（一）	SI-5-6	1	
7	加速度计安装图（二）	SI-5-7	1	
8	路面温度传感器安装图	SI-5-8	1	
9	倾角传感器安装图	SI-5-9	1	
10	监控摄像头安装图	SI-5-10	1	
11	桥架及线缆防护安装图	SI-5-11	1	
	接线图			
1	数据采集外站机柜配电图	SI-6-1	1	
2	温湿度计接线图	SI-6-2	1	
3	路面温度传感器接线图	SI-6-3	1	
4	加速度计接线图（一）	SI-6-4	1	
5	加速度计接线图（二）	SI-6-5	1	
6	拉绳/顶杆位移计接线图	SI-6-6	1	
7	倾角传感器接线图	SI-6-7	1	
	软件图			
1	数据处理与控制系统逻辑拓扑图	SI-7-1	1	
2	采集软件流程图	SI-7-2	1	
3	通讯软件流程图	SI-7-3	1	
4	传感器参数远程控制模块	SI-7-4	1	

序号	图 表 名 称	图表号	页数	备注
5	实时显示模块	SI-7-5	1	
6	人机交互界面模块	SI-7-6	1	

0 评审意见

2026 年 7 月 3 日，徐州市城市管理局邀请相关部门的代表和特邀专家，在徐州市市政管理中心三楼会议室组织召开了《和平大桥结构健康监测系统升级改造项目施工图》审查会。经讨论，形成专家意见如下：

专家意见一：补充完善桥梁状况评定及原有监测数据分析结论；

回复：已补充补充完善桥梁状况评定及原有监测数据分析结论，桥梁状况评定内容详见 1.3 章节，原有监测数据分析结论详见 1.5 章节。

专家意见二：完善截面应变监测点布设；

回复：已优化主梁关键截面应变测点布设，修改后应变测点位置覆盖全桥 4 分点位置，详见 4.1.1.10；

专家意见三：根据桥下状况，针对性布设桥下视频监控点位；

回复：经现场踏勘以及桥检报告调研，和平大桥桥下未发现车辆撞击、火烧等外部作用痕迹，且现有设计视频监控点位可覆盖整个桥下空间，实现对桥下区域的整体监测。

专家意见四：完善施工方案及交通组织方案；

回复：已优化监测点安装工艺相关内容，并依据《城市道路交通组织设计规范》GB/T 36670-2018 对交通组织方案进行了优化。详见 6.3 章节。

1 概述

1.1 建设背景

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 6 月 14 日，国务院安委办、应急管理部召开全国安全防范工作视频会议，提出要抓紧建立城市生命线监测系统。充分运用好先进监测设备和大数据、物联网等现代化科技手段、及时发现风险、管控风险、化解风险。

2021 年 9 月 22 日，国务院安委办、应急管理部下发通知，部署加强城市安全风险防范工作，推广城市生命线安全工程经验做法，要求切实提高城市防控重大风险与突发事件的能力，从本质上提升城市安全治理现代化水平。通知指出，当前城市安全新旧风

险交织叠加，安全风险防范压力加大，一些城市相继发生房屋坍塌、爆炸、洪涝、台风等重特大事故灾害，城市安全形势复杂严峻。各地区要结合安全发展示范城市创建工作，根据实际统筹开展城市安全风险综合监测预警。

2021 年 9 月 24 日，国务院安委办召开城市安全风险监测预警工作现场推进会，会议强调，城市生命线工程要具备“能监测、会预警、快处置”三个功能，确保监测预警系统为城市安全而建，为城市安全而用。要找准突出风险点，高危先建、急用先建，着力化解与群众生命安全息息相关的突出风险。要坚持探索创新，因地制宜开展监测预警工作建设试点，以点带面提升城市安全风险防范能力。

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召开，深入学习贯彻习近平总书记重要讲话重要指示精神，认真落实国务院安委会部署安排，试点先行推动城市生命线安全工程建设开好局、起好步。

2024 年 3 月，江苏省住房和城乡建设厅发布了《江苏省城市生命线安全工程桥梁智慧监测技术指南》（试行），该指南立足城市安全运行和风险防控需求，对城市桥梁智慧监测的系统架构、监测布设、数据传输、平台功能、预警分级、评估模型、联网对接等方面提出了系统性规定和要求，并明确将斜拉桥等特殊结构桥梁列为重点管控对象，在监测参数覆盖、数据精度保障、异常智能识别、信息汇聚共享等方面均设置了更高标准，为城市桥梁监测系统建设与改造提供了刚性执行依据。

和平大桥作为徐州市城市生命线工程接入桥梁，为深入贯彻落实国家及江苏省关于城市生命线安全工程建设的总体部署和相关政策要求，大桥升级改造建设将紧密围绕城市基础设施安全运行与风险防控需求，统筹推进监测感知、数据融合、风险预警和运维管理等能力建设。通过完善桥梁结构健康监测体系，提升信息化、数字化和智能化管理水平，进一步增强桥梁安全保障能力和风险防范能力，全面提升大桥基础设施规范化、智慧化和精细化管理水平，为徐州市城市生命线安全运行提供有力支撑。

1.2 桥梁概况

和平大桥位于和平路，跨越铁路站场，建于 2008 年 5 月，跨径总长 1008m，跨径组成 4×20m+4×20m+4×20m+4×20m+3×20m+(192+176)m+4×20m+4×20m+ 3×20m+40m。

主桥桥面宽 28m，引桥桥面宽 28m、24m。

大桥主桥采用 176+192m 单塔双索面预应力混凝土斜拉桥，塔梁墩固结，176m 侧为 3%纵坡，192m 侧为 0.5%纵坡，凸曲线，中间塔梁固结处采用半径为 $r=5000\text{m}$ 的圆曲线过渡。主梁采用肋板式预应力混凝土结构，主梁梁侧高 2.5m，顶宽 28m，底宽 26m，梁顶设 2%人字坡。高跨比 1:76.8，宽跨比 1:6.9。标准主肋底宽 2m，桥面板厚 29cm。为增加主梁横向刚度，主梁沿纵向每隔 3~6m 设一道横梁，标准横梁厚 28cm。边跨断面增加实体段，起压重作用。



图 1.2-1 桥梁地理位置



图 1.2-2 桥梁立面照



图 1.2-3 上部结构照



图 1.2-4 下部结构照

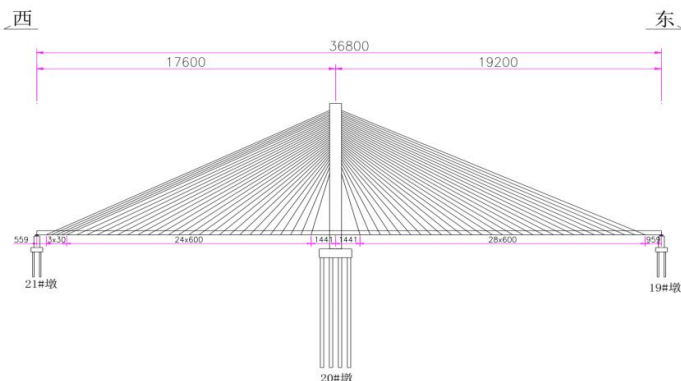
斜拉索结构采用双索面、密索、扇形，斜拉索在主梁上锚固标准间距为 6m，现浇段索距 3m。索塔上的锚固间距从 1.2~2.7m 不等，拉索最小倾角 25° ，双面拉索共 116 根。斜拉索采用环氧喷涂钢绞线 $\Phi 15.24$ ，抗拉强度标准值 1860MPa，根据索力不同，采用 OVM250-22、25、31、37、43、55 六种规格的拉索，配套使用 OVM 体系锚头，塔端为张拉端，梁端为固定端。在主梁锚固处设多面钢锚箱。

索塔呈 H 型塔，钢筋混凝土结构，具有受力性能好，抗扭刚度大，造型美的特色。自承台顶索塔塔高 100.5m，桥面以上索塔高 86.49m，桥面以上 34.80m 处设置一道横梁，以增强索塔的稳定性的；两个上塔柱之间的净距为 20m，塔柱外边缘之间的距离为 28m；上塔柱柱高 51.69m，中塔柱柱高 37.53m，下塔柱柱高 11.28m。上、中塔柱采用单箱单室空心断面，斜拉索锚固侧壁厚 1.2m，另两侧厚 0.8m；下塔柱空心变截面。

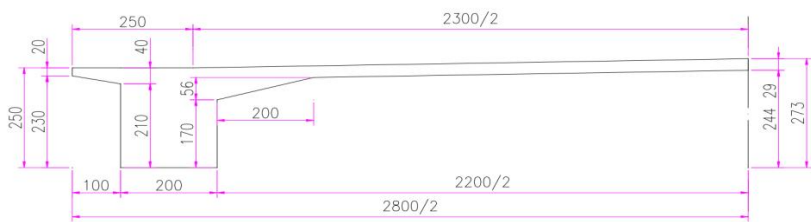
桥梁两个边墩均设置纵向活动支座，采用 GPZ7000-ZX 型盆式橡胶支座，设计支座反力为 7000kN，容许水平位移为 $\pm 200\text{mm}$ ；桥梁伸缩装置采用 MF320 型模数式伸缩缝，以适应梁体温度变形及车辆荷载作用下的位移需求；桥面铺装结构由 6cm 厚中粒式沥青混凝土和 4cm 厚细粒式沥青混凝土组成，总厚度 10cm，桥面排水利用桥面横坡将雨水汇入排水管，并通过纵坡引流至引桥桥下排出。

和平大桥主要技术标准如下：

- (1) 道路设计车速、设计等级：和平路设计车速为 50km/h，道路等级为城市主干路。
- (2) 设计荷载：城-A 级。
- (3) 桥面宽度：桥面总宽为 28m，具体布置如下：2×1.0m 防撞墙、锚索区+2×1.5m 人行道（含护栏）+23m 行车道。
- (4) 桥面坡度：最大纵坡 3%，车行道横坡为 2.0%。
- (5) 地震烈度：7 度。
- (6) 设计风速：10m 高处 100 年一遇 10min 平均最大风速 25.6m/s。。



（a）立面图



(b) 断面图
图 1.2-5 和平大桥结构总体布置图

1.3 桥梁技术状况

2025 年，按照《城市桥梁养护技术标准》（CJJ 99-2017）相关规定，对和平大桥开展技术状况评定。评定结果表明，和平大桥主桥技术状况等级为合格级，养护建议为进行保养小修；南幅东引桥技术状况指数为 96.1、南幅西引桥技术状况指数为 97.6、北幅东引桥技术状况指数为 97.0、北幅西引桥技术状况指数为 96.7，均评定为 A 级完好状态，养护建议为开展日常保养。

现场检查及专项检测结果表明，和平大桥主桥主要病害集中于主梁、主塔及附属构件等部位，同时结构耐久性能、线形状态及动力特性总体良好，具体情况如下：

(1) 主梁病害

现场检查发现，主梁横隔板存在 30 处横向裂缝伴析白现象，累计长度 27.4 m；存在 2 处蜂窝露筋病害，面积共计 0.40 m²；存在 1 处破损露筋病害，面积 0.06 m²。桥面板底面发现 42 处纵向裂缝伴析白，累计长度 51.8 m，以及 3 处横向裂缝伴析白，累计长度 3.5 m。此外，主梁预应力锚块发现 1 处纵向裂缝伴析白，长度 0.5 m；主梁梁体发现 1 处纵向裂缝伴析白，长度 0.5 m，并存在 1 处露筋锈蚀病害，面积 0.02 m²。

(2) 主塔病害

主塔主要存在混凝土保护层劣化及钢筋锈胀等病害。现场检查发现，主塔共有 120 处锈胀露筋病害，累计面积约 16.54 m²；同时存在 5 处涂层脱落病害，累计面积约 877 m²。此外，主塔内部 2 处检修梯笼存在锈蚀现象。

(3) 斜拉索及支座状况

现场检查未发现斜拉索明显病害，索体及附属构件整体状态良好。支座检查发现 4 个钢盆存在锈蚀现象，需结合日常养护工作开展跟踪检查。

(4) 混凝土碳化检测

对桥梁混凝土构件开展碳化深度检测，结果显示，所抽检构件混凝土碳化深度与实测保护层厚度的比值均小于 0.5，对应评定标度值均为 1。检测结果表明，当前混凝土碳化程度较低，尚未对钢筋产生明显不利影响，结构混凝土耐久性能总体良好。

(5) 钢筋锈蚀检测

对抽检构件开展钢筋锈蚀状况检测，结果显示，各检测构件钢筋锈蚀评定标度值均为 1，表明当前阶段混凝土内部钢筋未发现明显锈蚀迹象，钢筋锈蚀风险较低，结构整体处于正常状态。

(6) 桥面线形检测

桥面线形检测结果表明，和平大桥桥面整体线形平顺，未发现明显异常突变点，桥面高程变化满足结构正常使用要求。

(7) 结构动力特性检测

经检测，和平大桥主桥整体自振频率为 0.342 Hz，第 22#跨和第 19#跨自振频率分别为 3.076 Hz 和 5.371 Hz。由于缺少历次动力特性检测数据，本次测试结果作为结构动力特性基准数据，可为后续检测过程中开展纵向对比分析、评价结构性能变化趋势提供参考依据。

(8) 斜拉索索力检测

斜拉索振动测试结果表明，拉索振动基频由索塔向两侧逐渐减小，呈现短索振动基频较高、长索振动基频较低的分布规律，符合斜拉桥拉索振动特性规律。索力测试结果显示，索力整体呈现长索索力较大、短索索力较小的分布特点，符合斜拉桥索力分布的一般规律。塔身南北两侧拉索索力基本对称，左右侧合计索力相对偏差仅为 0.028%，索力分布对称性良好。与 2022 年 7 月实测索力结果对比，各测点索力相对偏差均控制在 10%以内，最大偏差为 N28#拉索的-7.2%，整体索力变化幅度较小，表明斜拉索受力状态总体稳定。

综合分析表明，和平大桥主桥整体技术状况良好，结构受力性能、动力特性及耐久性能总体满足使用要求。局部存在的主梁裂缝、混凝土缺陷、主塔锈胀露筋及涂层脱落

等病害主要影响结构耐久性能，应结合养护计划开展针对性维修处治，并加强重点部位病害发展跟踪，以保障桥梁长期安全运营。

1.4 现有监测系统概况

和平大桥结构监测系统工程于 2019 年 9 月建成并通过验收。系统中含有包括风荷载、路面温度、环境温湿度、索力、应力应变、主梁挠度等监测项合计 80 台传感器及相应采集设备，并布置 1 个外站。具体传感器类型及数量见表 1.3-1。原监测系统的展示界面如图 1.4-2 所示。

表 1.4-1 和平大桥 2019 年建设系统测点统计

序号	监测内容	监测手段	测点数量
1	风荷载监测	风速风向仪	1
2	路面温度监测	路面温度传感器	1
3	大气温湿度监测	空气温湿度计	1
4	斜拉索索力监测	索力加速度计	16
5	应力应变监测	振弦应变计	32
6	结构温度监测		
7	主梁挠度监测	倾角仪	21
8	索塔偏位监测	倾角仪	2
9	视频监控	高清摄像头	6
合计:			80

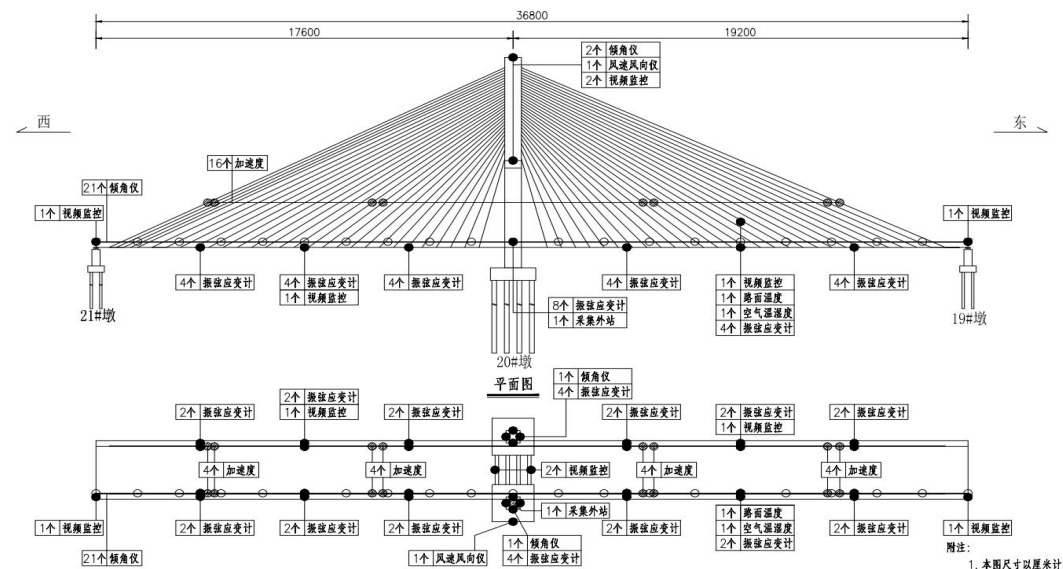


图 1.4-1 原系统传感器总体布置图



图 1.4-2 原监测系统展示界面

和平大桥结构监测系统运行 4 年后，经 2023 年 11 月份对系统进行排查结果，系统中部分硬件设备目前存在采集异常的情况，根据相关要求，和平大桥作为徐州市城市生命线接入桥梁，保证数据完好率和准确性具有十分必要。

2024 年开展的升级改造工作保障了和平大桥结构监测系统稳定运行,确保桥梁运营安全,具体的更换、新增设备列表如下,其中 2024 年新增的 4 个梁端位移监测点截止目前仅运行 2 年,数据质量较好,本次升级改造不进行更换,保留原测点。

表 1.4-2 和平大桥 2024 年更换、新增设备清单

序号	设备名称	单位	数量	维护类别	说明
1	倾角传感器	个	4	更换	原系统 21 个设备，本次改造更换 4 个
2	位移传感器	个	4	新增	新增 4 个梁端位移测点

1.5 现有监测系统状态评估

基于 2025 年 6 月至 12 月和平大桥结构健康监测数据开展分析评价，结果表明，现阶段桥梁整体结构状态良好，环境荷载作用、结构响应及关键受力指标均未出现异常变化，结构安全性能总体满足设计及运营要求。监测期间，桥梁风环境、温度作用及结构响应变化规律基本符合斜拉桥结构特点，主梁挠度、结构应力、斜拉索索力及索塔偏位等关键监测指标均处于合理变化范围内，未发现明显异常响应或持续性劣化趋势，桥梁整体工作状态稳定。

具体分析如下：

（1）环境荷载作用方面，桥址区域风速、风向变化规律较为稳定。2025 年 6 月至 12 月期间，和平大桥平均风速变化范围为 2.46～3.79 m/s，主塔塔顶最大风速达到 38.19 m/s，2 min 平均最大风速为 15.20 m/s（7 级风），10 min 平均最大风速为 12.26 m/s，均未超过设计控制风速要求。桥址处大气温度、湿度及路面温度变化符合季节性变化规律，监测期间最高气温为 40.12℃，最低气温为-1.58℃；路面温度最高达到 55.80℃，最低为-2.80℃。虽然夏季高温和冬季低温条件下环境作用较为明显，但结构响应未出现异常，环境因素对桥梁结构的影响总体处于可控范围内。

（2）结构受力状态方面，主梁及索塔应力变化主要受温度荷载影响，车辆荷载引起的结构响应相对较小。经温度效应剔除后，混凝土结构应力最大值为 1.51 MPa，最小值为-1.61 MPa，主梁及索塔应力波动范围控制在 3.12 MPa 以内，未发现异常应力集中、突变或持续增长现象。监测结果表明，当前结构受力状态稳定，实际工作应力远低于材料强度设计值，结构仍具有较高安全储备。

（3）主梁变形状态方面，主梁挠度变化与温度变化呈现较强相关性，整体变形规律符合斜拉桥温度响应特征。监测期间，主梁最大挠度变化量为 134.35 mm，其中东侧跨最大变化量为 134.35 mm，西侧跨最大变化量为 35.36 mm。主梁挠度变化均处于设计控制范围内，未发现异常变形或持续累积变形现象，表明主梁整体刚度及变形性能满足运营要求。

（4）斜拉索受力状态方面，各拉索索力变化幅度较小，最大变化率为 4.58%，整体受力状态稳定，所有拉索索力均小于设计最大值，安全系数均大于 3.0，满足安全储备要求。监测结果显示，塔身南北两侧索力整体较为对称，左右侧合计索力相对偏差仅为 0.028%。但由于和平大桥东西侧跨径分别为 192 m 和 176 m，结构受力存在一定差异，部分对应索号出现一定程度的索力不对称现象，最大索力相对偏差为 N28#拉索的-7.2%。现有监测结果能够反映索力整体变化趋势，但对于局部索力异常识别能力仍有限，建议结合专项索力检测进一步核查，并加强重点拉索长期跟踪监测。

（5）索塔结构状态方面，索塔顺桥向及横桥向偏位整体处于正常范围，南、北侧塔柱偏位变化规律基本一致，与温度变化趋势具有较好一致性。监测期间，索塔顺桥向最

大偏位控制在±0.11°以内，平均偏位为-0.02°；横桥向最大偏位控制在±0.13°以内，平均偏位为 0.026°，未出现异常倾斜或持续偏移现象。但监测结果显示，南侧塔柱结构响应较北侧更为明显，现有监测点位及监测参数尚难以进一步分析其响应差异原因，建议后续在两侧塔柱中部增设偏位监测点，加强对主塔空间变形特征及异常响应机理的识别能力。

综合来看，现有结构健康监测系统能够较好实现和平大桥主要环境因素和结构响应的连续监测，对掌握桥梁整体运行状态、保障安全运营发挥了重要作用。但从长期运营和精细化养护需求来看，现有监测系统仍存在一定局限性。一方面，现有系统监测参数覆盖范围有限，部分关键结构部位（如主塔局部响应、索力分布、主梁空间变形等）的感知能力不足，难以全面支撑桥梁多维状态评估；另一方面，现有系统主要以数据采集和状态展示为主，针对监测数据的智能分析、异常识别、趋势预测及风险评估能力仍需进一步提升。同时，部分监测设备已运行多年，存在设备老化、数据稳定性下降以及后续维护成本增加等问题。

因此，虽然当前和平大桥结构总体状态良好，但随着桥梁服役年限增长以及智慧化养护管理要求不断提高，现有监测系统在监测覆盖、数据质量、智能分析和安全评估能力等方面已难以完全满足桥梁长期安全运营需求，有必要开展结构健康监测系统升级改造，进一步提升桥梁状态感知、风险预警和智能化管养水平。

1.6 系统升级改造必要性

1.6.1 政策导向

2024 年 3 月，江苏省住房和城乡建设厅发布了《江苏省城市生命线安全工程桥梁智慧监测技术指南》（试行），该指南立足城市安全运行和风险防控需求，对城市桥梁智慧监测的系统架构、监测布设、数据传输、平台功能、预警分级、评估模型、联网对接等方面提出了系统性规定和要求，并明确将斜拉桥等特殊结构桥梁列为重点管控对象，在监测参数覆盖、数据精度保障、异常智能识别、信息汇聚共享等方面均设置了更高标准，为城市桥梁监测系统建设与改造提供了刚性执行依据。



《江苏省城市生命线安全工程桥梁智慧监测技术指南》（试行）

1.6.2 监测需求层面

和平大桥监测系统建设于 2019 年，作为城市重要斜拉桥结构，原监测系统建成时间相对较早，整体技术体系、硬件配置及软件功能均基于早期建设经验设计搭建，缺乏相关指南规范。经过多年连续运行，受室外复杂环境、长期车辆振动、大气腐蚀及设备自然老化等多重因素影响，大量传感器出现精度漂移、稳定性下降、数据采集可靠性降低等问题，采集传输设备均已逐步进入性能衰减期，备品备件采购困难，后期运维保障难度持续加大。具体体现在以下方面：

（1）现有监测系统的工控机、采集仪及前端传感器等核心设备均服役时间较长，设备已进入老化期，所有硬件性能衰减严重：

工控机与采集仪长期处于不间断运行状态，内部元器件持续损耗老化，在桥梁复杂振动与电磁干扰环境下，频繁出现死机卡顿、数据采集中断、通讯链路不稳定、传输丢包延时等典型故障，系统整体运行可靠性大幅下降，已无法持续稳定保障监测数据的连续性、完整性与实时性，难以满足桥梁常态化安全监测的基本要求。

前端监测设备如各类应力、位移、索力、温湿度、风速风向、摄像头、倾角仪传感

器及传输线缆等，长期裸露安装于桥梁上部结构、拉索及塔柱等露天部位，持续经受高低温交变、雨水侵蚀、空气腐蚀、车辆往复振动等多重不利作用，设备灵敏度逐步衰减、测量精度持续下降，故障率显著升高。并且大部分传感器设计使用寿命备注为“≥5 年”，目前已运行超出 7 年，存在异常高风险，整体已不具备长期稳定开展结构监测的硬件基础。

（2）现有系统数据质量差，无法满足结构安全分析需求

受硬件老化、性能衰减及传输不稳定等多重因素叠加影响，现有系统采集获取的原始数据质量已严重不达标，存在大量无效、失真与异常数据，难以支撑结构状态评估与安全预警工作，监测系统存在的主要问题如下：

1）数据缺失问题

数据问题突出，因采集设备故障、通讯中断及供电异常等原因，索力、位移、应变、倾角等关键结构监测参数频繁出现断档、漏采现象，无法形成连续完整的长期监测序列，缺失关键时段结构响应信息，导致结构演化规律难以准确分析。

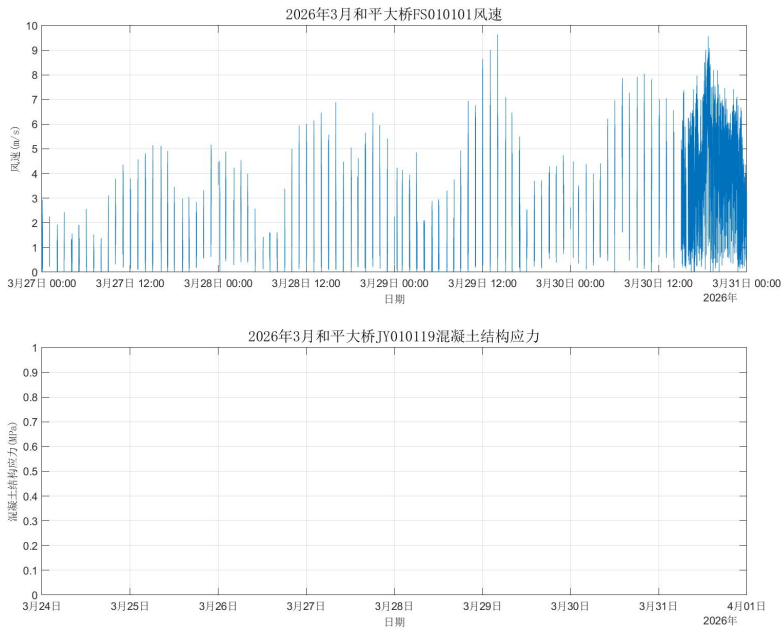


图 1.6-1 和平大桥典型数据缺失图

2）数据跳点问题

数据跳点现象频发，受采集模块稳定性不足、线路接触不良及外部干扰影响，监测曲线频繁出现无规律突变、异常峰值与瞬时跳变，数据波动与结构实际受力状态严重不

符，无法真实反映桥梁在车辆荷载、温度变化等工况下的真实响应特征。



图 1.6-2 和平大桥典型数据跳点图

3）基线漂移问题

基线漂移问题显著，传感器长期服役后零点漂移、温度漂移、蠕变漂移现象日益严重，监测基线持续偏离真实基准位置，整体数据趋势失真，无法准确识别结构微小变形与内力变化，丧失了对结构早期损伤与潜在风险的识别能力，不能为结构安全评估、病害诊断提供真实可靠的数据支撑。

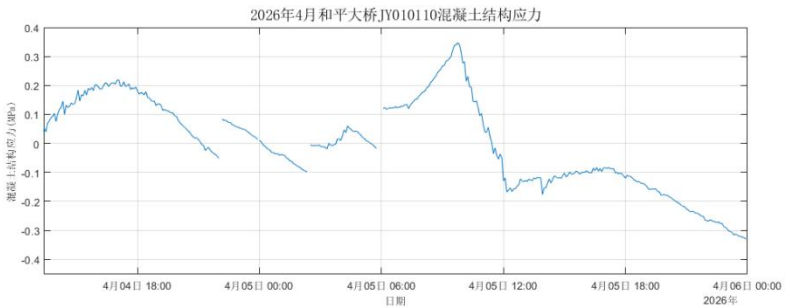


图 1.6-3 和平大桥典型数据漂移图

当前和平大桥原有健康监测系统已出现硬件老化、功能不足、数据失真、运维困难等突出问题，整体监测能力显著下降，既无法匹配最新行业规范与地方技术指南要求，也难以满足城市桥梁精细化、智能化管养的现实需要。为切实筑牢城市桥梁运行安全防线，全面落实行业监管与属地管理责任，实时掌握桥梁结构真实受力状态与长期安全演化趋势，有效防范结构疲劳损伤、超载影响、极端环境作用及设备失效带来的各类运营风险，亟需对现有健康监测系统进行全面升级改造。通过更新替换老旧硬件设备、优化完善监测点位布设、搭建新一代数据处理与智能分析平台、统一标准接口实现数据汇聚共享，全面实现监测体系标准化、规范化、智能化升级，真正达成结构状态可全面感知、风险隐患可提前预警、管养决策可科学支撑的建设目标，保障和平大桥长期安全稳定运营，持续支撑城市交通顺畅运行与城市公共基础设施安全。

表 1.6-1 现有监测系统传感器问题统计

监测指标	存在问题	数量
温度、湿度	数据异常，无法反映环境参数变化规律	1
风速、风向	数据长期缺失，监测功能失效	1
路面温度	监测数据异常，存在测值漂移现象	1
位移	部分测点数据异常或长期不更新，存在设备老化现象	21
应变/温度	传感器失效，数据稳定性较差	32
索力	测值异常，部分测点存在漂移或失真现象	16
视频监控	摄像机离线、图像中断或画面质量较差	6
索塔	数据稳定性较差	2

表 1.6-2 现有监测系统控制设备与辅材问题统计

设备及辅材	存在问题	数量
现场采集工控机	设备运行时间较长，存在系统运行缓慢、存储空间不足、硬件老化等问题	1
电流采集模块	采集精度下降、通信异常、模块故障	1
位移采集模块	数据漂移、采集异常、接口老化	1
串口服务器	网络连接异常、设备老化	1
光纤收发器	光通信不稳定、接口老化、设备离线	1
静态信号采集仪	采集精度下降、通信不稳定、设备故障	1
动态信号采集仪	采集精度下降、通信不稳定、设备故障	1
工业级交换机	网络传输异常、端口故障、设备老化	1
工业级路由器	网络连接不稳定、通信中断、设备性能下降	1
12V/24V 开关电源	输出电压波动、电源老化、供电可靠性下降	5
硬盘录像机	设备运行缓慢、部分功能失效	1
信号线缆	绝缘老化、接头松动、信号传输质量下降	/
电力线缆	老化破损、接头松动、供电稳定性下降	/
4G 断路器	通信异常、远程控制功能失效	4
空气开关	触点老化、保护功能下降	4
线缆防护	防护层破损、密封性能下降	/
数据采集外站机柜	密封性能下降、内部积尘受潮、设备安装空间不足、空调故障	1

注：相关设备已连续运行超过 7 年，大量设备已接近或超过设计使用寿命，存在硬件老化、性能下降、运行稳定性不足及故障率升高等问题，已难以满足当前桥梁监测系统长期稳定运行和智慧

化管理需求。因此，本次升级改造拟进行整体更新更换，以提高系统运行可靠性、数据采集稳定性及后期运维保障能力。

1.6.3 数据应用提升方面

目前桥梁监测系统虽已积累了大量监测数据，但数据应用仍以基础统计和结果展示为主，对数据价值的深层次挖掘和综合利用不足，尚未建立环境作用、结构响应与结构性能演变之间的关联分析机制，难以充分揭示桥梁服役状态变化规律。在监测数据应用方面，缺乏针对桥梁日常运营、突发事件及专项工况的深度分析，例如强风、台风等极端天气条件下风场特性及结构响应的全天候实时预警分析，重大交通流量或安全事故期间桥梁结构状态的实时监测与通报，以及地震等突发事件后的结构安全快速诊断与评估等，尚未形成覆盖桥梁全生命周期的动态感知和风险预警体系。

同时，现阶段常规监测、专项监测、定期检测、日常巡检等多源数据相对独立，缺乏统一管理 with 协同分析，未能充分发挥多源数据互补验证和协同增效的优势，难以实现“1+1>2”的综合应用效果。因此，有必要进一步完善监测数据融合与分析体系，推动各类监测指标、检测成果及运维信息的深度融合，构建环境—荷载—响应—损伤—性能的全链条分析框架，实现桥梁结构状态的实时感知、精准评估和主动预警，最大程度发挥结构健康监测系统在桥梁安全保障、运营管理和养护决策中的支撑作用。

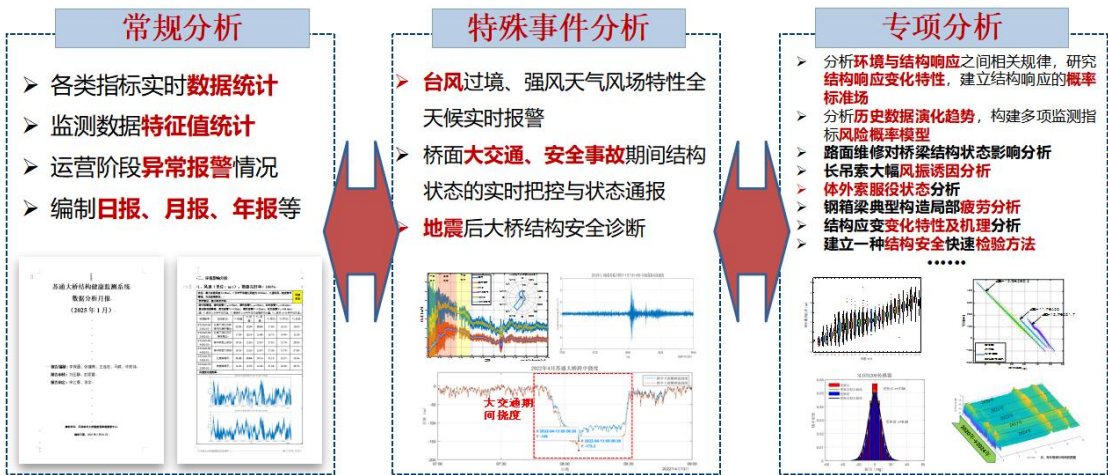


图 1.6-4 和平大桥数据应用深度提升思路

2 设计依据与总体要求

2.1 设计依据

1) 本工程相关的工程技术资料
桥梁前期设计图纸、施工图、地质勘察报告、养护资料等。

2) 采用和参考的技术规范与标准

(1) 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁结构监测技术规范(行业标准, JT/T1037-2022) [S].人民交通出版社, 2022.

(2) 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑与桥梁结构监测技术规范(国家标准, GB50982-2014) [S].中国建筑工业出版社, 2015.

(3) 中国工程建设标准化协会.结构健康监测系统设计标准(行业标准, CECS333:2012) [S].中国建筑工业出版社, 2013.

(4) 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市桥梁设计规范(行业标准, CJJ11-2011) [S].中国建筑工业出版社, 2012.

(5) 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用闭路监视电视系统工程技术规范(国家标准, GB50198-2011) [S].中国标准出版社, 2012.

(6) 中华人民共和国住房和城乡建设部.供配电系统设计规范(国家标准, GB50052-2009) [S].中国计划出版社, 2010.

(7) 中华人民共和国住房和城乡建设部.电气装置安装工程低压电器施工及验收规范(国家标准, GB50254-2014) [S].中国标准出版社, 2014.

(8) 中华人民共和国信息产业部.综合布线系统工程设计规范(国家标准, GB/T50311-2016) [S].中国标准出版社, 2017.

(9) 国家技术监督局.端接件总规范(国家标准, GB/T15286-1994) [S].中国标准出版社, 2015.

(10) 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑物电子信息系统防雷技术规范(国家标准, GB50343-2012) [S].中国建筑工业出版社, 2012.

(11) 《江苏省城市生命线安全建设一期工程技术指导书(试行)》(2022 年 7 月 22 日印发)

(12) 《江苏省城市桥梁安全风险评估指南(试行)》(苏生命线办发〔2023〕14 号附件 4, 2023 年 8 月 14 日印发)

(13) 《江苏省城市生命线安全工程桥梁智慧监测技术指南》(试行), 2024.

(14) 《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T 1037-2022

注：在本项目系统实施过程中，如若国家、部委有最新颁发的标准、规范和规程，则以最新的相关文件执行。

2.2 总体建设要求

和平大桥结构监测系统升级改造项目总体要求如下：

- 满足《江苏省城市生命线安全工程桥梁智慧监测技术指南》（试行）的各项技术要求。
- 结构监测系统应稳定可靠、经济实用。
- 选用长期稳定性和耐久性好的传感器和设备。
- 传感器和其他设备必须具有可维护性和可更换性；监测数据的分析和处理必须保证既能用于结构评估，也能够纳入桥梁管理系统用于桥梁维护管理决策。
- 系统应具备一定预警功能，在参数内力接近或突破设计内力临界值时系统应有预警提示及记录功能。
- 系统设计应有一定开放性，以确保系统具备相应的升级换代能力和远程数据共享及监测功能。
- 系统设计要考虑其长期使用过程中设备损坏的实际问题，系统传感器数量和设备等应具有适度冗余，以确保系统可靠性和满足系统未来改进、拓展和完善要求。
- 系统应满足二次开发和集成的要求。

3 系统建设重点分析

3.1 服役环境分析

3.1.1 桥区环境

桥梁位于徐州市主城区东部，是和平路东延工程的重要控制性节点，西接老城区核心区域，东连云龙区及徐州新城区，是沟通徐州传统中心城区与东部发展片区的重要快速通道。桥梁横跨京沪铁路、陇海铁路及徐州铁路站场区域，承担京沪铁路南北向运输

和陇海铁路东西向运输功能，列车运行密度大、通行频繁，铁路振动、列车风及运营荷载长期作用于桥梁周边环境。同时，大桥作为徐州市区东向出行的重要通道，承担城市主干路交通转换功能，日常车流量较大，在节假日、高峰通勤及重大活动期间易形成持续重载交通流，对桥梁结构产生较高运营荷载需求。

和平大桥已成为连接城市功能组团的重要交通纽带，其交通地位和运行保障要求不断提升。桥梁一旦发生运营异常，不仅会影响城市主干路交通组织，还可能对铁路运输安全及区域交通体系产生较大影响。

3.1.2 车辆荷载

徐州和平大桥的通行管控标志明确显示了两项限制：一是禁止货车通行，二是限制车辆总质量不超过 30 吨。



图 3.1-1 和平大桥限重及限行标志

3.1.3 气候情况

和平大桥桥址区属暖温带季风气候区，受东亚季风系统影响明显，具有四季分明、雨热同期、冷热差异显著的特点。全年气候资源较为丰富，能够满足桥梁结构长期运营环境要求，但同时也存在温度变幅大、季节性降雨集中及寒潮影响等不利因素。

桥址区多年平均气温约为 14~15℃，年内温度变化幅度较大。1 月份最冷，平均气温约 0℃左右，极端低温条件下可降至-15℃以下；7 月份最热，平均气温约 27~28℃，极端高温可超过 38℃。受冬夏季温差影响，桥梁结构长期承受较明显的温度荷载作用，需考虑温度应力、伸缩缝位移以及支座变形等因素对结构耐久性的影响。

3.1.4 水利水文

和平大桥桥址区多年平均降水量约 800～930mm，降雨分布不均，具有明显的季节性特征。全年约 55%～60%的降水集中于 6 月至 9 月，其中 7 月至 8 月为主汛期，常受强对流天气及台风外围云系影响，短时强降雨过程较多。暴雨天气可能导致桥面排水系统承受较大压力，同时增加桥梁附属设施的腐蚀风险。

强风方面，徐州地区全年以东南风和东北风为主，春季及冬季易受冷空气活动影响，局部时段可能出现 6～8 级阵风。湿度条件总体处于中等水平，年平均相对湿度约 70%左右。夏季高温高湿，冬季相对干燥。受降雨、雾霾及冬季融冻循环影响，混凝土表层可能出现碳化加速、钢筋锈蚀及局部冻融损伤等耐久性问题，需要加强桥面铺装、防排水系统及混凝土保护层的长期维护。

3.2 桥梁风险分析

3.2.1 关键特性分析

徐州和平大桥在运营中承受环境、车辆、风、地震等各种作用的不利影响，同时随着服役时间的增加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。本项目根据大桥桥区环境、结构体系与构造特点，分析桥梁在运营管养过程中存在的主要风险。和平大桥的主要关键特性分析如下表。

表 3.2-1 和平大桥的主要关键特性分析

序号	结构及运营环境特性	监测内容及指标特点
1	和平大桥主桥采用 176+192m 单塔双索面预应力混凝土斜拉桥，桥面宽 28m；索塔呈 H 型塔，自承台顶索塔塔高 100.5m，桥面以上索塔高 86.49m	（1）桥面宽度大，主梁空间位移特性明显； （2）塔柱高度大，温度、荷载耦合作用下受力复杂。
2	和平大桥斜拉索结构采用双索面、密索、扇形，双面拉索共 116 根，桥址区常受强对流天气及台风外围云系影响	（3）主梁、索塔和斜拉索在异常环境风荷载作用下可能出现有害振动；因此对桥址代表性位置的风场进行监测，结合主梁、索塔振动分析、模态分析，是评价桥梁结构及桥面交通运营安全状况的必要手段。
3	和平大桥主梁为大截面预应力混凝土箱梁，受太阳辐射、环境气温变化及混凝土热传导特性影响，梁体内部易形成一定温度梯度，从而产生附加温度应	（4）环境温度和结构温度场分布是长期存在的影响结构内力变化的重要作用，对环境温度和结构温度场监测有利于对结构长期内力

序号	结构及运营环境特性	监测内容及指标特点
	力和结构变形；桥梁塔柱为钢筋混凝土结构，塔壁厚度大，属大体积混凝土构件，其材料热膨胀系数较低，且导热性能不良。 大桥桥址环境季节温差明显，极端低温条件下可降至-15℃以下；极端高温可超过 38℃；结构各部位与外部环境热交换不均。	变化规律以及结构实际力学特性的分析和评价。 （5）对结构响应监测数据的分析，离不开温度修正。
4	和平大桥受力体系由主梁、索塔、斜拉索及墩塔基础共同组成，属于典型的高次超静定结构体系。	（6）监测桥梁结构的不同部件的变形，如桥面挠度和整体结构空间变形有利于分析和掌握大桥结构的受力边界条件和整体受力状况。

3.2.2 运营环境风险

3.2.2.1 灾害天气

和平大桥所在位置面临大风（以短时阵风为主）、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。桥梁在风的作用下发生的振动主要是颤振、驰振，涡激振动、抖振和拉索风振等。在强风作用下对桥梁结构造成的损失主要表现为：气动弹性不稳定；强度破坏（强度）；变形过大（刚度）；疲劳破坏；结构物的振动使结构使用者产生感觉上或心理上的不舒适。另外一方面可能会导致行车风险，在强风作用下车辆通过桥梁时，风、车、桥三者间存在相互作用，导致车辆的受力性能与驾驶操控性能改变，容易引起车辆事故。

沥青路面黑色材料，对太阳热辐射的吸收率达到 0.85~0.95。处于高温情况下，沥青路面的抗变形能力会降低，在车辆的负荷下，特别在气温超过 38℃就会有很大车辙深度；气温连续超过 40℃，路面就会出现严重的车辙破坏。过高的路面温度不仅仅会产生车辙，还会因为路面和轮胎摩擦，导致胎内气压升高产生爆胎的危险，影响交通安全。而暴雪、结冰会造成地面摩擦力降低，大雾天气会带来道路能见度降低等问题，造成车辆行驶困难。车辆驾驶难度升高，易诱发事故的发生。

桥址区可能出现雷击，伴有低空雷，运营管理中可能发生雷击风险事故；特别是高塔顶部若防雷设施考虑不足，将导致后期运营中雷电对桥梁结构的损害。

3.2.2.2 车流密集

和平大桥作为徐州市重要的城市交通通道，承担着区域交通集散和快速通行功能。随着城市交通需求的持续增长，桥面交通流量总体保持较高水平，早晚高峰期间车辆通行密集，车辆荷载作用频繁。长期反复的交通荷载作用将对桥面系构件及主承重结构产生累积影响，可能导致局部构件疲劳损伤、结构刚度变化及线形变化等问题，因此需通过定期检测和长期监测及时掌握桥梁结构运营状态，保障桥梁安全稳定运行。

3.2.2.3 桥上事故

和平大桥运营过程中桥上存在车辆相撞、车辆撞桥或车辆起火等事故。当桥面车辆相撞时，可能会引起交通堵塞，车辆堆积在桥面上，导致桥面严重偏载，甚至影响结构安全性能。同时可能会出现车辆撞击桥梁事故，对结构的关键部位造成重大影响，在这种情况下对结构安全性能可能产生威胁。另外车辆起火或化学品泄漏等情况的发生都可能对桥梁结构造成影响，损坏桥面铺装、降低结构承载力等，该类事件应引起重视，宜通过监测系统在第一时间发现险情，及时处理，将损失减小到最小。

3.2.2.4 桥下空间

通过现场检查桥梁上下部结构及周边环境状况，未发现影响桥梁安全运营的异常情况。桥下空间满足通行要求，未发现车辆撞击桥墩、梁体及其他桥梁构件形成的碰撞痕迹；结构表面未发现火烧、烟熏等高温作用迹象，未见因外部环境因素引起的结构损伤。

3.2.3 结构风险

3.2.3.1 主梁线形变化

在长期的使用过程中，由于长期服役、节假日堵车、结构承载能力下降等因素可能导致主梁线形发生变化。主梁线形的变化不仅会影响行车的舒适性和结构的安全性，还常常伴随着结构内力的恶化调整，造成桥梁损坏的潜在风险。

3.2.3.2 索塔偏位

和平大桥主桥为独塔双索面斜拉桥，属于大跨径柔性结构体系。索塔采用钢筋混凝土结构，在运营过程中受到环境温度变化、车辆荷载、风荷载及斜拉索索力变化等因素

共同作用，可能产生塔顶位移及结构变形。随着桥梁服役年限增长，若结构性能发生退化，可能出现索塔刚度降低、塔顶偏位增大及受力状态异常等问题，进而影响桥梁整体受力性能和运营安全。

3.2.3.3 桥面铺装损坏

桥面铺装在大流量、重载交通下易出现坑塘、鼓包、车辙等病害，尤其高温、重载、水害是造成桥面铺装早期病害的重要因素，影响结构耐久性和舒适性，须要加强对桥面铺装的预防性巡检养护工作。

3.2.3.4 主梁局部损伤

和平大桥主梁作为桥梁主要承重构件，在正常运营荷载作用下通常能够满足强度和刚度要求。但在车辆撞击、火灾、高温作用以及长期环境侵蚀等不利因素影响下，主梁局部区域可能出现混凝土开裂、保护层剥落、钢筋锈蚀及局部受损等病害。当损伤未能及时发现和处治时，可能进一步发展，导致结构耐久性下降、承载能力减弱，甚至影响桥梁正常运营安全。

3.2.3.5 支座损坏

支座是桥梁上下部结构关联的关键部位，支座的好坏直接影响到桥梁的运营状况，支座的日常巡检和养护就显得极其重要，应重点关注支座与相关的连接螺栓腐蚀与松动。特别是支座位移量，直接反应支座的受力状态，同时，同一标高的支座高差、支座橡胶损坏、老化现象等也应引起重视。

3.2.3.6 拉索高强钢绞线锈蚀断丝

斜拉索是斜拉桥的重要受力构件，其工作状态直接关系到桥梁结构的安全性、耐久性和正常使用性能。和平大桥斜拉索长期暴露于大气环境中，并持续承受较高水平的恒载和车辆荷载作用，因此不可避免地受到环境侵蚀、温度变化、风荷载及疲劳荷载等多种因素影响。随着服役时间增长，拉索可能出现防护体系老化、钢丝锈蚀、索力异常及局部断丝等病害，从而导致承载能力下降和受力状态改变。

拉索病害主要来源于以下几个方面：

- (1) 在车辆荷载、风荷载及温度作用影响下，斜拉索长期处于交变应力状态，锚固区及局部应力集中部位易发生疲劳损伤；
- (2) 锚头密封系统、防护套管或 PE 护套老化、开裂后，雨水和湿气可能侵入索体内部，引起钢丝腐蚀和锈蚀断丝；
- (3) 腐蚀与疲劳耦合作用会进一步加速钢丝性能退化，导致拉索承载能力下降，并影响桥梁整体受力体系的安全性。

3.3 有限元分析

3.3.1 桥梁概况

徐州和平大桥主桥采用 176+192m 预应力混凝土独塔斜拉桥，塔、梁固结体系。主梁为肋板式预应力混凝土结构，其标准截面如下如所示。梁侧高 2.5m，顶宽 28m。索塔采用 H 型，索塔自承台顶到塔顶高 100.5m；索型为双索面，扇形，密索体系，斜拉索在主梁上锚固的标准间距为 6.0m，边跨 176m 设置加密区为 3.0m。双面拉索共 116 根。

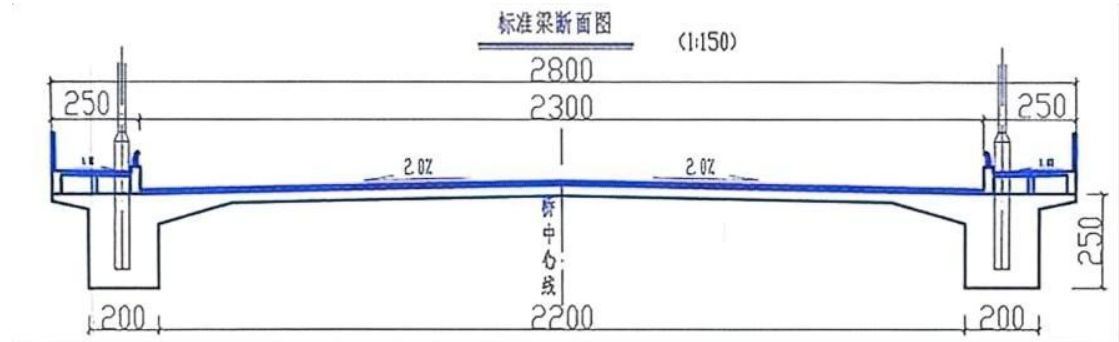


图 3.3-1 主梁标准断面

3.3.2 主要技术标准

- 1、道路等级：城市主干路 I 级
- 2、设计车速：50km/h
- 3、荷载等级：城-A 级汽车荷载
- 4、桥面宽度：28m=23m（双向六车）+2x1.0m（防撞墙、锚索区）+2x1.5m（人行道宽含栏杆）
- 5、设计风速：10m 搞除 100 年一遇 10min 平均最大风速 25.6m/s。
- 6、地震烈度：7 度

3.3.3 材料特性

和平大桥采用的主要材料如下表所示：

序号	部位	材料类型	弹性模型（MPa）	线膨胀系数
1	主梁	C60	3.6×10 ⁴	1.0×10 ⁻⁵
2	索塔	C50	3.45×10 ⁴	1.0×10 ⁻⁵
3	承台及承台系梁	C30	3.00×10 ⁴	1.0×10 ⁻⁵
4	斜拉索	喷涂环氧钢绞线体系	1.95×10 ⁵	1.2×10 ⁻⁵
5	纵向预应力钢束	预应力钢绞线	1.95×10 ⁵	1.2×10 ⁻⁵
6		精轧螺纹钢	2.0×10 ⁵	1.2×10 ⁻⁵

主要材料截面特性如下表所示

序号	部位	面积（m ² ）	I _{xx} （m ⁴ ）	I _{yy} （m ⁴ ）	I _{zz} （m ⁴ ）
1	主梁标准截面	18.6	8.364	11.831	1967.95
2	索塔上柱	16.66	73.322	79.538	30.484
3	索塔中柱（最大处）	19.74	104.940	159.500	38.521
4	索塔下柱（最大处）	27.86	351.078	300.793	173.861
5	斜拉索 M15-22	3.99×10 ⁻³	2.536×10 ⁻⁶	1.268×10 ⁻⁶	1.268×10 ⁻⁶
6	斜拉索 M15-25	4.54×10 ⁻³	3.275×10 ⁻⁶	1.638×10 ⁻⁶	1.638×10 ⁻⁶
7	斜拉索 M15-31	5.62×10 ⁻³	5.029×10 ⁻⁶	2.514×10 ⁻⁶	2.514×10 ⁻⁶
8	斜拉索 M15-37	6.72×10 ⁻³	7.187×10 ⁻⁶	3.594×10 ⁻⁶	3.594×10 ⁻⁶
9	斜拉索 M15-43	7.81×10 ⁻³	9.700×10 ⁻⁶	4.850×10 ⁻⁶	4.850×10 ⁻⁶
10	斜拉索 M15-55	9.98×10 ⁻³	15.838×10 ⁻⁶	7.919×10 ⁻⁶	7.919×10 ⁻⁶

和平大桥边界条件：主梁与主塔采用塔梁固结结构，边墩采用纵向活动支座。

3.3.4 模型简介

本桥采用 Midas civil2023 对大桥建立了精细化的有限元空间模型，全桥共 498 个节点，392 个单元。桥塔、主梁均采用梁单元，斜拉索采用只受拉桁架单元。天后大桥为全漂浮体系，主塔和主梁之间设置侧向阻尼器和侧向限位支座，主梁仅在边跨设置约束支座。模型边界条件：边跨采用一般支撑模拟主梁支座，主塔和主梁之间设置横向受压节点弹性支撑，桥塔底部直接固结。

离散后模型如下图所示：

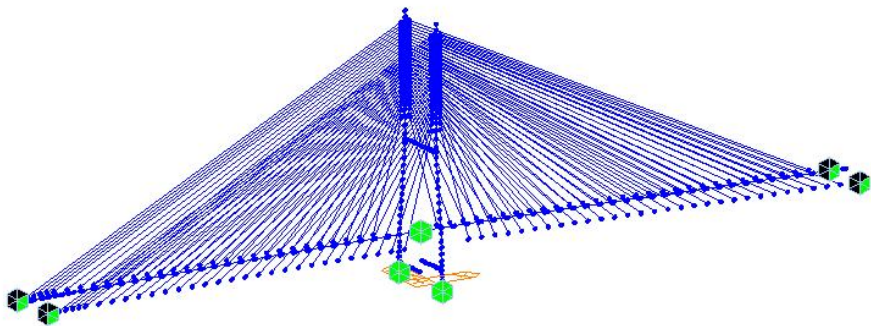


图 3.3-2 大桥有限元离散模型

3.3.5 主要计算结果分析

本计算分析了大桥在汽车荷载、人群荷载、温度荷载、风荷载等作用下，主桥运营期间的的基本受力和变形特性，计算分析如下：

1、主桥在汽车和人群荷载作用下的弯矩图如下所示，176m 边跨主梁最大正弯矩位于距边墩约 35m 处，最大正弯矩值为 $3.981 \times 10^4 \text{KN.m}$ ；192m 边跨主梁最大正弯矩位于距边墩约 35m 处，最大正弯矩值为 $3.899 \times 10^4 \text{KN.m}$ ；最大负弯矩位于主墩节点处，最大负弯矩为 $3.641 \times 10^4 \text{KN.m}$ 。

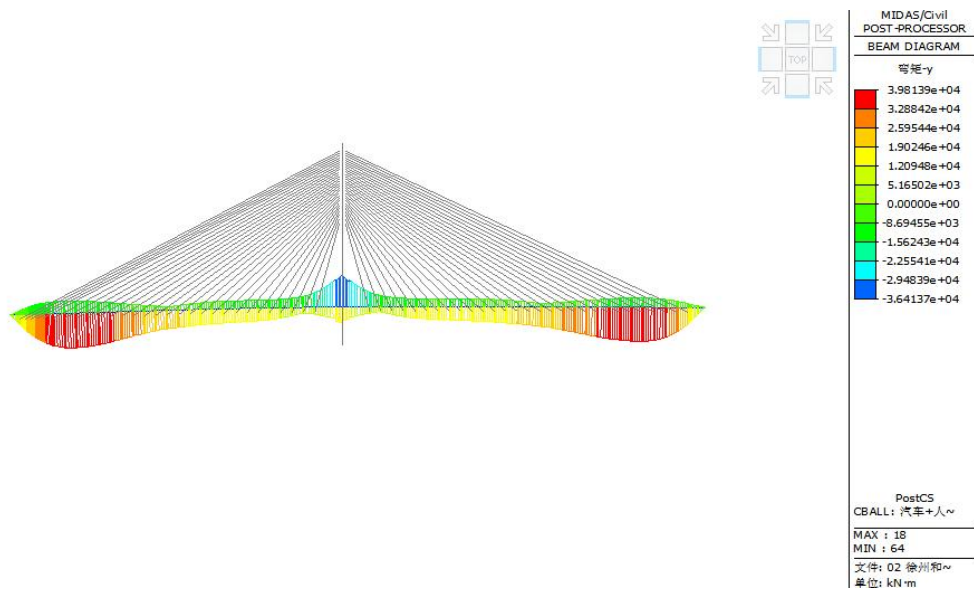


图 3.3-3 大桥在汽车荷载和人群荷载作用下的弯矩图 (KN.m)

2、主桥在汽车和人群荷载作用下的竖向变形图如下所示，176m 边跨主梁最大竖向位移位于距边墩约 54m 处，最大值为 8.489cm；192m 边跨主梁最大竖向位移位于距边墩约 57.5m 处，最大值为 9.796cm。

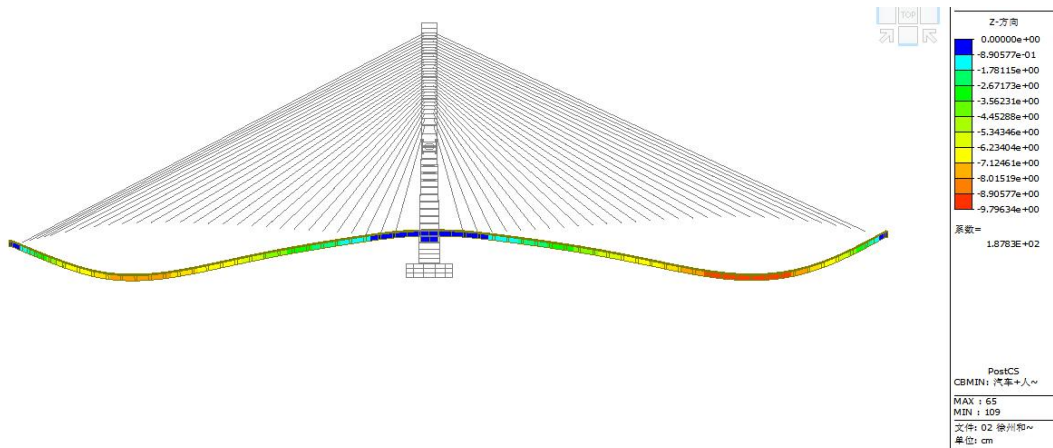


图 3.3-4 大桥在汽车和人群荷载作用下主梁竖向变形图 (cm)

3、主桥在汽车、人群和温度作用下，主梁及主塔纵向变形如下图所示，主梁在 176m 边墩梁端纵向位移为 5.914cm，在 192m 边墩梁端纵向位移为 6.653cm。

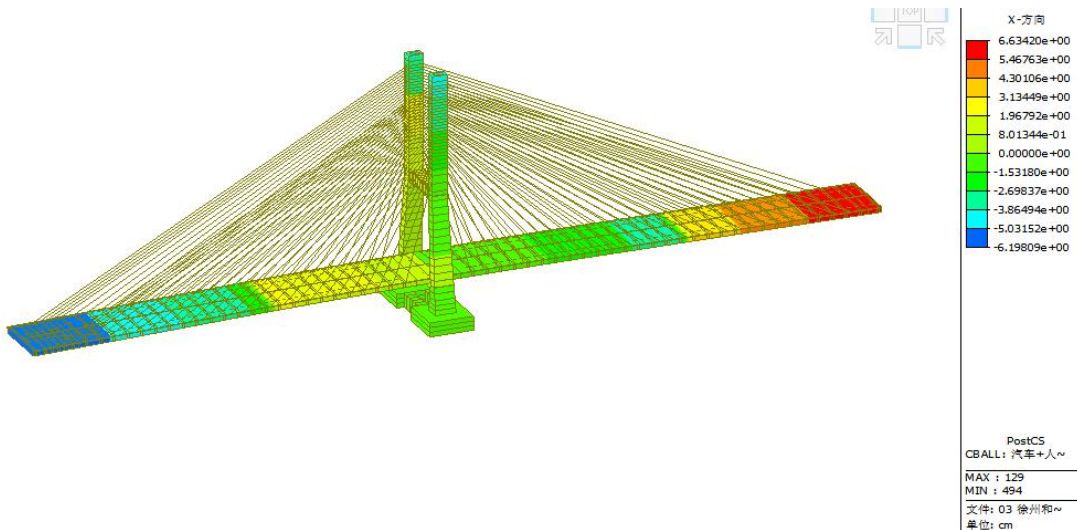


图 3.3-5 大桥在汽车、人群和温度荷载作用下主梁纵向变形图 (cm)

4、主桥在汽车、人群和温度作用下的主梁下缘应力图如下所示，176m 边跨主梁最大应力变化位于距边墩约 35m 处，应力变化为 -6.11~6.04MPa；192m 边跨主梁最大应力变化位于距边墩约 35m 处，应力变化为 -6.51~5.25MPa。

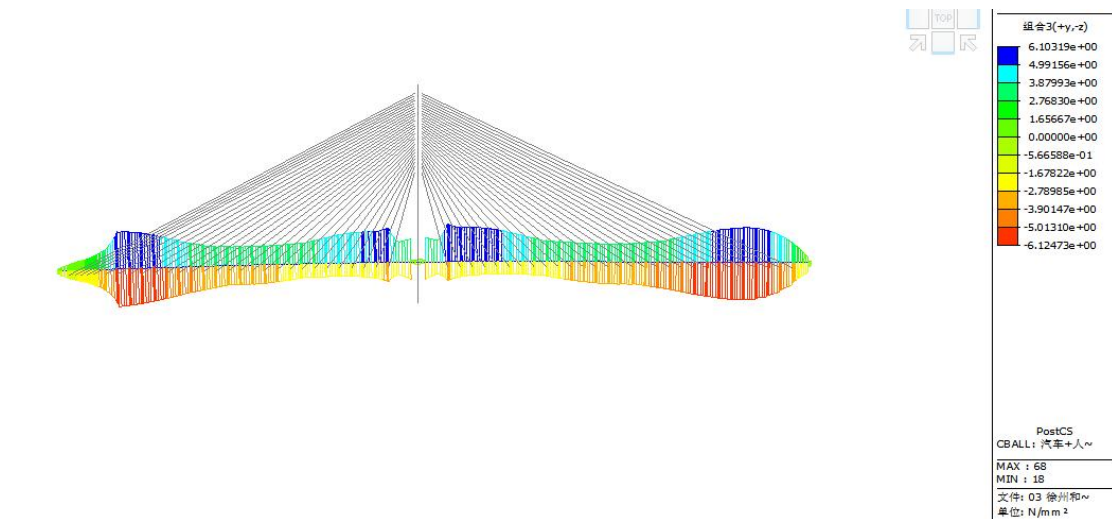


图 3.3-6 大桥在汽车、人群和温度荷载作用下主梁下缘应力图（MPa）

5、主桥前五阶振型图及频率值如下所示：

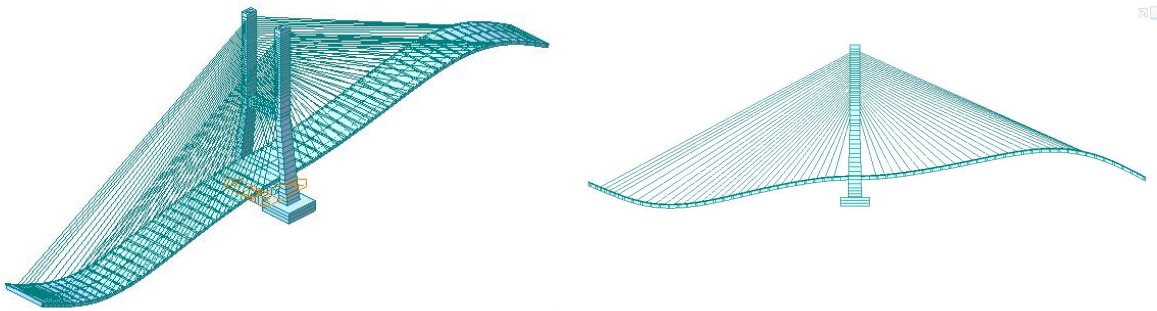


图 3.3-7 大桥一阶竖弯振型图（f1=0.403）

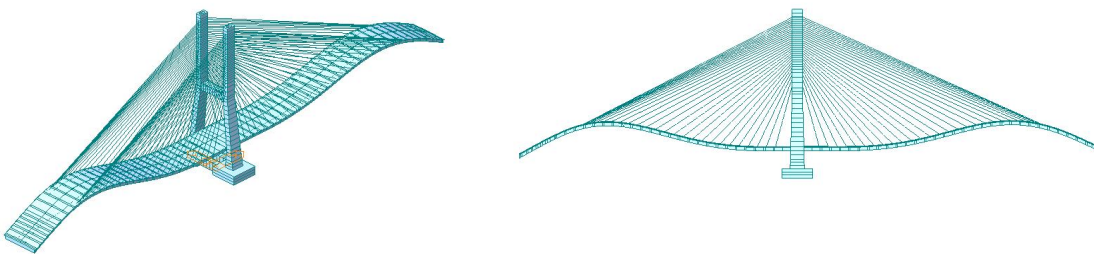


图 3.3-8 大桥二阶竖弯振型图（f1=0.745）

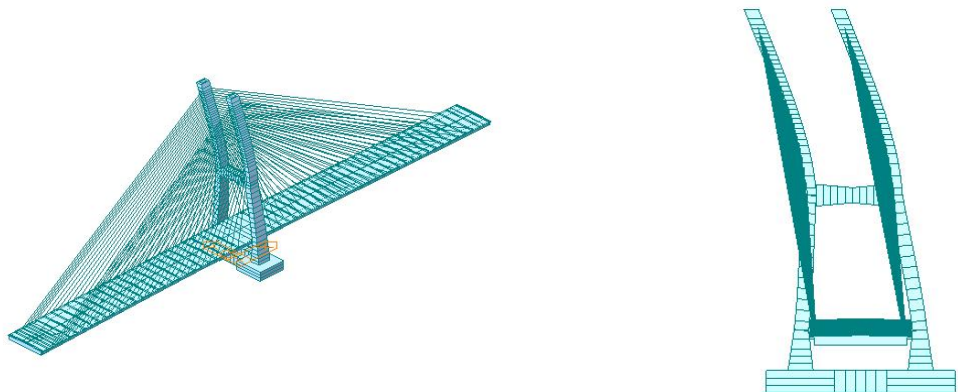


图 3.3-9 大桥三阶侧弯振型图（f1=0.753）

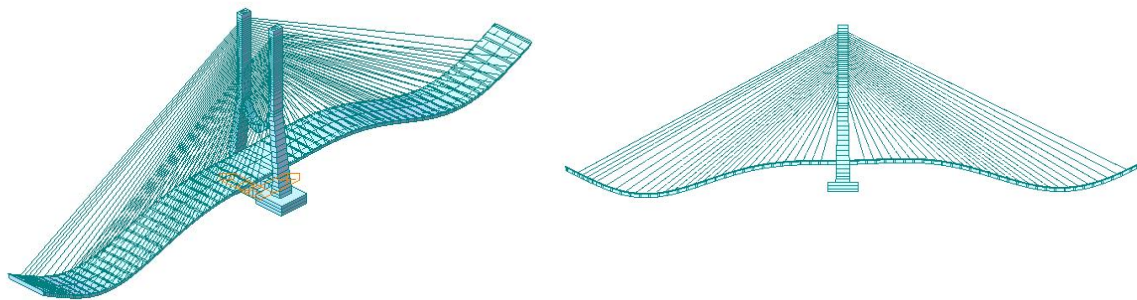


图 3.3-10 大桥四阶竖弯振型图（f1=0.782）

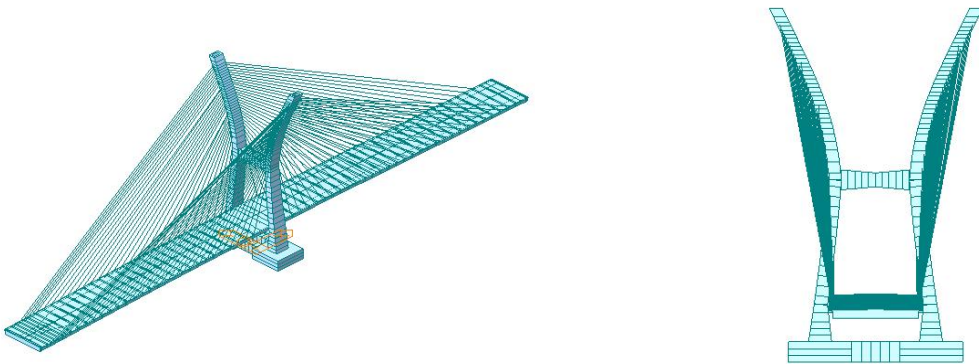


图 3.3-11 大桥五阶侧弯振型图（f1=1.059）

3.4 系统设计原则

本次监测系统升级改造遵循《江苏省城市生命线安全工程桥梁智慧监测技术指南（试行）》相关要求，结合和平大桥结构特点、运营环境及现有监测系统运行情况，在充分利用既有监测资源的基础上，对现有监测设备进行优化、更换和补充。针对桥梁关键构件、重点风险源及现阶段监测需求，新增必要监测参数和监测设备，完善数据采集、传输、存储、分析及预警功能，提高监测数据的准确性、完整性和可靠性。通过新旧系统的融合升级，构建覆盖关键部位、满足风险防控要求的智慧监测体系，为桥梁安全运营、养护管理和城市生命线工程建设提供技术支撑。指南中斜拉桥标准化监测内容如下表所示。

表 3.4-1 斜拉桥标准化监测内容

监测内容		斜拉桥
温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●
	主梁内环境温度、湿度	●
车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	◎

监测内容		斜拉桥
风速、风向	所有车道车流量	◎
	桥面风速、风向	●
	塔顶风速、风向	●
结构温度	混凝土或钢结构构件温度	●
	桥面铺装层温度	◎
船舶撞击	桥墩振动加速度	◎
	视频图像	◎
地震	承台顶或桥墩底部加速度（抗震设防烈度≥Ⅶ度）	●
	承台顶或桥墩底部加速度（抗震设防烈度<Ⅶ度）	◎
位移	主梁竖向位移	●
	主梁横向位移	◎
	支座位移	●
	梁端纵向位移	●
	拱脚位移	/
	塔（拱）顶偏位	●
应变	主梁关键截面应变	●
	索塔关键截面应变	◎
	主拱关键截面应变	/
索力	吊杆（索）索力	/
	斜拉索索力	●
	系杆力	/
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	●
	塔顶水平双向振动加速度	●
	主拱振动加速度	/
裂缝	混凝土结构裂缝	◎
	钢结构裂缝	◎
视频监控	桥面设施状况	◎
	桥下空间情况	◎

注：●为应选监测项，◎为宜选监测项。

3.5 系统建设目标

覆盖《江苏省城市生命线安全工程桥梁智慧监测技术指南（试行）》基本要求的前

提下，体现“一桥一策”原则，聚焦结构关键安全隐患，创新技术整合、引领行业发展：

通过更新替换老旧硬件设备、优化完善监测点位布设、统一标准接口实现数据汇聚共享，全面实现监测体系标准化、规范化、智能化升级，真正达成结构状态可全面感知、风险隐患可提前预警、管养决策可科学支撑的建设目标，保障和平大桥长期安全稳定运营，持续支撑城市交通顺畅运行与城市公共基础设施安全。

3.6 系统框架与组成

3.6.1 系统架构

和平大桥桥梁监测系统主要包括两个子系统，运作流程如下图所示。

- ✧ 自动化监测子系统
- ✧ 数据存储与显示子系统

这两个子系统将按以下工作流程运行：

第一步是自动化监测子系统的各传感器在线拾取结构关键部位的信号，并采用实时采集方式获取数据；

第二步是由数据存储与显示子系统完成数据的后处理、归档、显示及存储，并实现数据的展示、推送、报警等功能。

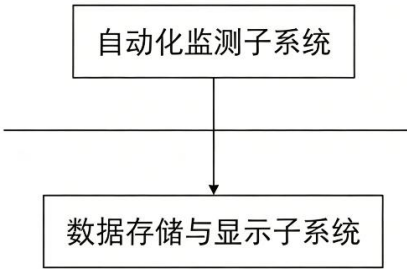


图 3.6-2 系统结构示意图

3.6.2 网络架构

和平大桥监测系统通过专线网络接入物联网平台，同步对接生命线平台。监测数据经运营商专线传输至大物联网平台，进入应用服务环境，实现监测数据的实时采集、传

输、存储与分析。物联网平台为系统提供计算资源、数据存储、网络通信及网络安全等基础支撑服务。系统用户及运维人员通过 VPN 加密通道访问监测平台，满足日常监测管理和运维工作需求。对外数据共享采用前置机隔离交换方式，并结合防火墙安全策略实现安全同步，确保数据交互过程安全可靠。

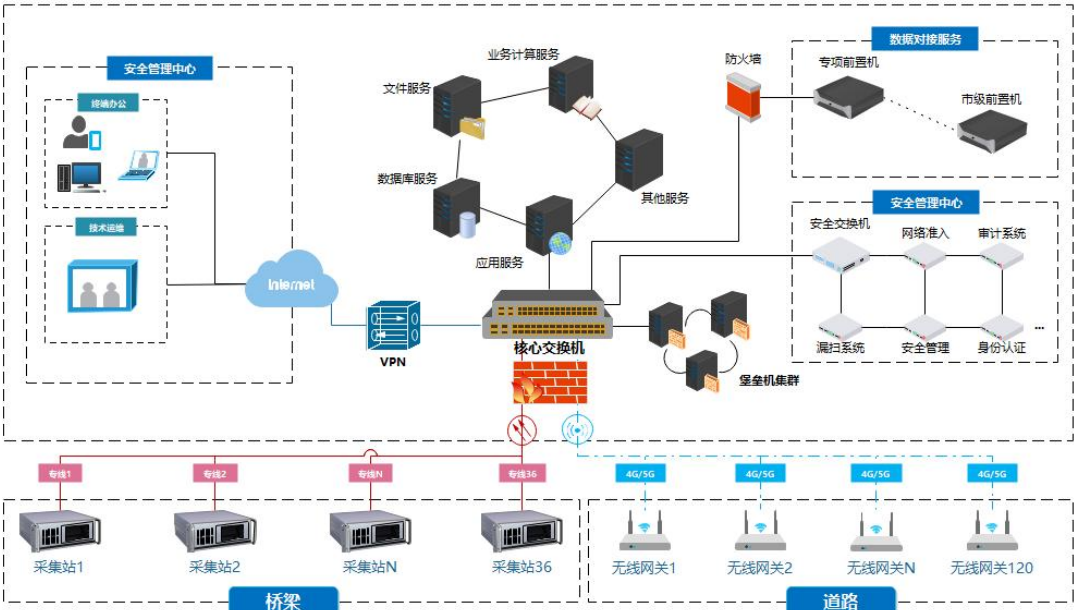


图 3.6-3 网络架构

4 系统详细设计

4.1 监测内容与测点布设

通过对《江苏省城市生命线安全工程桥梁智慧监测技术指南》(试行)中斜拉桥适用监测内容的分析，可实施的监测项共 28 项，依据《指南》要求，同时结合大桥当前结构监测系统各监测指标测点数据质量、数据深度应用方面，通过分析论证，现有结构监测系统宜增加必要的应选监测项目，包括索塔锚固区温度、湿度、桥面风速、风向、支座位移等 8 个项目，应选监测项共增加测点 30 个；同期拟废弃 10 个测点，更换包括主梁竖向位移、桥面铺装层温度、桥址区环境温度、湿度等监测项目，共计 67 个测点；同时现有结构监测系统宜增加相应的宜选监测项目视频监控，共增加 12 测点；具体调整的监测项目与测点数据见表 4.1-2。

和平大桥主跨跨径布置为 192 m+176 m。考虑到 192 m 跨下方涉及铁路运营区域，现场施工条件受限，新增应变测点实施难度较大，未在该跨开展大规模应变监测扩充。为保证主跨结构应变监测的连续性、完整性及长期对比分析需求,本次升级改造保留 192 m 跨原有 3 个应变监测测点，用于持续掌握该跨关键截面应变变化规律。同时，在 176 m 跨结合结构特点及监测需求新增应变测点，进一步提升桥梁关键受力区域的感知能力。

本项目将基于《江苏省城市生命线安全工程桥梁智慧监测技术指南》(试行)的基础上，本着“一桥一策”的设计理念，本着把握环境、作用、结构响应和结构变化的特征，兼顾代表性、经济性、可更换性，并考虑设备布设条件所受约束性等原则。增加和补充大桥斜拉桥环境、作用、结构响应和结构变化相应监测指标。其中，结构响应和结构变化监测的测点布置在受力较大、变形较大、易损、影响主要部件安全耐久和结构整体安全的位置、已有病害和损伤的位置。对性能退化、损伤劣化严重的桥梁构件，针对性增加监测测点数量；对不可更换的监测测点，做冗余布设；对关键部件或关键构件监测内容，布设校核测点。

表 4.1-1 和平大桥结构监测内容与测点布设升级统计

监测选项	依据指南数	待升级项目数	现有测点数	保留测点数	新增测点数	更换测点数	废弃测点数	升级后测点数
应选监测项	15	7	69	7	30	52	10	89
宜选监测项	13	4	15	0	12	15	0	27
非指南监测项	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	28	11	84	7	42	67	10	116

表 4.1-2 和平大桥结构监测内容与测点数量

监测内容		监测选项	原测	保留	废弃	更换	新增	总测
温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●	1	0	0	1	1	2
	主梁内环境温度、湿度	●	/	/	/	/	/	/
车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	◎	0	/	0	0	0	0
	所有车道车流量	◎	0	/	0	0	0	0
风速、风向	桥面风速、风向	●	0	/	0	0	2	2
	塔顶风速、风向	●	1	0	0	1	0	1
结构	混凝土或钢结构构件温度	●	共用	/	0	0	0	/

监测内容		监测选项	原测	保留	废弃	更换	新增	总测
温度	桥面铺装层温度	◎	1	0	0	1	0	1
船舶 撞击	桥墩振动加速度	◎	0	/	0	0	0	0
	视频图像	◎	0	/	0	0	0	0
地震	承台顶或桥墩底部加速度（抗震设防烈度≥Ⅶ度）	●	0	/	0	0	3	3
位移	主梁竖向位移	●	21	0	1	20	0	20
	主梁横向位移	◎	0	/	0	0	0	0
	支座位移	●	0	/	0	0	2	2
	梁端纵向位移	●	4	4	0	0	0	4
	塔（拱）顶偏位	●	2	0	0	2	0	2
应变	主梁关键截面应变	●	24	3	9	12	4	19
	索塔关键截面应变	◎	8	0	0	8	0	8
索力	斜拉索索力	●	16	0	0	16	4	20
支座 反力	支座反力	◎	0	/	0	0	0	0
振动	主梁竖向振动加速度	●	0	/	0	0	6	6
	主梁横向振动加速度	●	0	/	0	0	6	6
	塔顶水平双向振动加速度	●	0	/	0	0	2	2
裂缝	混凝土结构裂缝	◎	0	/	0	0	0	0
	钢结构裂缝	◎	0	/	0	0	0	0
视频 监控	桥面设施状况	◎	6	0	0	6	4	10
	桥下空间情况	◎	0	/	0	0	8	8
合计			84	7	10	67	42	116

注：●为应选监测项，◎为宜选监测项。其中主梁竖向位移监测点含光电挠度仪（4 个）、基准靶标测点（4 个）。

4.1.1 传感设备

4.1.1.1 桥址区环境温度、湿度监测

目的：实时监测部署位置的环境温湿度数据，为结构构件除湿防腐，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。

原因：依据《指南》4.2.1 条款：桥址区环境温度和湿度的测点宜布设在桥梁跨中位置，可根据桥梁跨径、构造、联长增设测点。对于桥梁构件封闭空间，温度和湿度监测点位应布设于桥梁结构内、外温度或湿度变化较大和对温度、湿度敏感的部位。

传感器类型：温湿度传感器，传感器技术指标参考表 4.1-3。

数量：2 台（更换 1 台、新增 1 台）。

位置：主桥桥面东侧跨中南侧护栏外侧布设 1 个温湿度计，合计更换 1 个桥址区环境温湿度测点；南侧主塔塔顶布置 1 个测点，合计新增 1 个索塔锚固区温湿度监测测点。

表 4.1-3 温湿度传感器技术指标

技术指标	指南规定	仪器指标	寿仪器命
测量范围（相对湿度）	0~100%RH	0~100%RH	≥5 年
误差（相对湿度）	≤±2%RH（在 20℃条件下）	±2%RH（在 20℃条件下）	
测量范围（温度）	<年极小值-20℃及>年极大值+30℃	-40℃~+80℃	
误差（温度）	≤±0.5℃	±0.1℃	
采样频率	温度：≤1/600Hz 湿度：1/600Hz	1/600Hz	

4.1.1.2 桥面风速、风向监测

目的：风荷载是大跨度斜拉桥的主要荷载之一，通过监测自由风场的风速和风向获得和分析桥梁结构的风参数，服务于结构状态评估。

原因：依据《指南》4.2.3 条款说明：风荷载测点应选择主梁跨中上、下游两侧和塔顶各布设一个风速风向监测点位。

传感器类型：三向超声风速仪，传感器技术指标参考表 4.1-4。

数量：2 台（新增 2 台）。

位置：主桥西侧跨中北侧、主桥西侧跨中南侧各布设 1 个测点，合计新增 2 个桥面风速风向测点。

表 4.1-4 三向超声风速仪技术指标

技术指标	指南规定	仪器指标	寿命
量程	>1.2 倍设计风速	0~70m/s	≥5 年
误差	≤±0.3m/s	≤±0.3m/s	
采样频率	10Hz	10Hz	

4.1.1.3 塔顶风速、风向监测

目的：风荷载是大跨度斜拉桥的主要荷载之一，通过监测自由风场的风速和风向获得和分析桥梁结构的风参数，服务于结构状态评估。

原因：依据《指南》4.2.3 风荷载测点应选择主梁跨中上、下游两侧和塔顶各布设一个风速风向监测点位。。

传感器类型：三向超声风速仪，传感器技术指标参考表 4.1-4。

数量：1 台（更换 1 台）。

位置：南侧主塔塔顶布置 1 个测点，合计更换 1 个塔顶风速、风向测点。

4.1.1.4 桥面铺装层温度监测

目的：通过对桥面铺装层温度的监测，得到的温度监测数据可用于温度修正和温度梯度的获取。

原因：依据《指南》4.2.4 条款说明：宜在主梁铺装层布设温度监测点位。

传感器类型：桥面温度传感器，传感器技术指标参考表 4.1-5。

数量：1 台（更换 1 台）。

位置：主桥桥面东侧跨中 1 个红外温度传感器，合计更换 1 个桥面铺装层温度测点。

表 4.1-5 桥面铺装层温度传感器技术指标

技术指标	指南规定	仪器指标	仪器寿命
测量范围	-30℃~ + 80℃	-50℃~ + 80℃	≥5 年
分辨力	≤0.1℃	0.1℃	
最大允许误差	±0.5℃	±0.5℃	
频率	≤1/600Hz	1/600Hz	

4.1.1.5 地震监测

目的：通过监测大桥的桥墩加速度，确定大桥的振动响应情况，为及时、直观地评价大桥的状态提供资料；

原因：根据《指南》4.2.6 条款说明：地震动监测点位宜布设于桥梁桥墩底部或承台顶部，可布设于桥梁两岸的护岸、锚碇锚室内，近桥址监控中心等自由场地。

传感器类型：加速度传感器，传感器技术指标参考表 4.1-6。

数量：3 个（新增 3 个）。

位置：南侧主塔承台处布设 3 个测点，合计新增 3 个地震监测测点。

表 4.1-6 加速度传感器技术指标

技术指标	指南规定	仪器指标	仪器寿命
量程	>±2.0g	±2.0g	≥5 年
灵敏度	≥2.5V/g	≥2.5V/g	
分辨力	≤1×10 ⁻⁵ g	≤1×10 ⁻⁵ g	
采样频率	触发采集加速度：50Hz	触发采集加速度：50Hz	

4.1.1.6 主梁竖向位移监测

目的：通过监测大桥的空间位移，确定大桥的变形状况、几何线形等，为及时、直观地评价大桥的状态提供资料；为评价大桥的适用性提供依据。

原因：根据《指南》4.2.7 条款说明：主梁竖向位移监测测点应在主跨跨中和 1/4、3/4 主跨，边跨跨中处布设；对于宽幅桥面、中央索面或其他具有扭转监测需求的主梁，应在同一断面左右幅外侧位置布设监测测点。

传感器类型：光电挠度仪，传感器技术指标参考表 4.1-7。

数量：20 个（更换 20 个，废弃 1 个）。

位置：主桥两侧主跨上等间距设置 8 个挠度监测点，全桥共计布设 20 个测点。

表 4.1-7 光电挠度仪技术指标

技术指标	指南规定	仪器指标	仪器寿命
测量误差	≤0.2mm	0.2mm	≥5 年
采样频率	1Hz	1Hz	

4.1.1.7 支座位移监测

目的：对支座位移变化进行监测，获取在车辆、风等荷载下的支座位移数据，对支座寿命进行评估预测，指导对构件的管养与更换。

原因：根据《指南》4.2.7 条款：支座位移、主梁梁端纵向位移测点宜布设在墩顶梁端支座处，宜根据不同支座的功能和类型选择支座位移测量方向。

传感器类型：顶杆式位移计，传感器技术指标参考表 4.1-8。

数量：2 台（新增 2 台）。

位置：东侧 2#墩北侧东侧、2#墩南侧各 1 个位移计，合计新增 2 个支座位移测点。

表 4.1-8 顶杆式位移计技术指标

技术指标	指南规定	仪器指标	仪器寿命
基本误差（%）	≤±0.5	±0.5	≥5 年
采样频率	1Hz	1Hz	

4.1.1.8 梁端纵向位移监测

目的：对梁端位移进行监测，实时了解其疲劳效应和磨损情况，为评估风荷载、船撞、地震、交通对大桥结构的作用提供依据。

原因：根据《指南》4.2.7 条款：支座位移、主梁梁端纵向位移测点宜布设在墩顶梁端支座处，宜根据不同支座的功能和类型选择支座位移测量方向。

传感器类型：拉绳式位移计，传感器技术指标参考表 4.1-9。

数量：4 台（保留 4 个）。

位置：东侧 2#墩北侧、东侧 2#墩南侧、西侧 19#墩北侧、西侧 19#墩南侧各 1 个测点，合计保留 4 个梁端纵向位移测点。

4.1.1.9 塔顶偏位监测

目的：实时监测大桥的塔顶偏位，研究其与环境变化（风、温度、交通荷载）的关系，为大桥整体变形特性评估提供资料。

原因：根据《指南》4.2.7 条款说明：塔（拱）顶偏位监测点位应布设于索塔（拱肋）顶部。

传感器类型：倾角仪。

数量：2 台（更换 2 台）。

位置：北侧主塔塔顶、南侧主塔塔顶各 1 个测点， 合计更换 2 个塔顶偏位监测测点。

4.1.1.10 主梁关键截面应变监测

目的：通过监测主梁关键截面内应变，获取应变实时监测数据，进而确定关键截面的应力状态。

原因：依据《指南》4.2.8 条款：应变监测测点符合下列规定：a) 主梁、索塔、主拱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； b) 正交异性钢桥面板动态应变监测测点应选择在重车道或行车道车轮轮迹线对应位置，宜布设在顶板、U 肋和横隔板等疲劳热点； c) 受力复杂的构件截面和部位，宜布设三向静态和动态应变监测测点； d) 钢混接合段宜布设应变监测测点，可布设在应变较大和应力集中处。

传感器类型：振弦式电阻应变计，传感器技术指标参考表 4.1-9。

数量：19 个（原有 24 个，保留 3 个，废弃 9 个，更换 12 个，新增 4 个）。

位置：西侧主跨 4 分跨上下游位置、塔梁固结处附近位置合计更换 12 个测点，塔梁固结处主梁截面合计新增 4 个测点；东侧主跨四分点位置处各保留一个应变测点。

表 4.1-9 振弦式应变计技术指标

技术指标	指南规定	仪器指标	仪器寿命
测量范围	≥被测量范围的 1.2 倍且≥1000με	±1500με	≥5 年
分辨率	≤1με	≤1με	
采样频率	≥1/600 Hz	1/600 Hz	

4.1.1.11 索塔关键截面应变监测

目的：通过监测索塔关键截面内应变，获取应变实时监测数据，进而确定索塔关键截面的应力状态。

原因：依据《指南》4.2.8 条款：应变监测测点符合下列规定：a) 主梁、索塔、主拱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； b) 正交异性钢桥面板动态应变监测测点应选择在重车道或行车道车轮轮迹线对应位置，宜布设在顶板、U 肋和横隔板等疲劳热点； c) 受力复杂的构件截面和部位，宜布设三向静态和动态应变监测测点； d) 钢混接合段宜布设应变监测测点，可布设在应变较大和应力集中处。

传感器类型：振弦式应变计，传感器技术指标参考表 4.1-11。

数量：8 台（原有 8 台，更换 8 台）。

位置：主塔南、北侧塔柱东、南、西、北侧壁，合计更换 8 个测点。

4.1.1.12 斜拉索索力监测

目的：对斜拉索索力进行实时监测，并计算得到索力数据，同时可根据振动频谱对构件的风致振动进行监测及预警。

原因：根据《指南》4.2.9 条款：索力监测点位应根据悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）和系杆等索构件的布置形式、规格、型号、长短、索力和应力，确定监测的索构件，宜选择上、下游索构件成对布设。

传感器类型：加速度传感器，传感器技术指标参考表 4.1-10。

数量：20 个（更换 16 台，新增 4 台）。

位置：索力监测点对称布置于桥梁上下游斜拉索区域，覆盖长索、中长索及短索等典型索段，能够较好反映不同长度拉索的索力变化特征及整体受力状态。在主桥西侧 S29#拉索、主桥西侧 N29#拉索、主桥西侧 S13#拉索、主桥西侧 N13#拉索、主桥东侧 S12#拉索、主桥东侧 N12#拉索、主桥东侧 S28 拉索、主桥东侧 N28#拉索各布设 1 个测点，合计更换 16 个索力加速度计，新增 4 台。

4.1.1.13 主梁竖向振动加速度监测

目的：对主梁振动进行实时监测，并根据振动频谱对构件的风致振动进行监测及预警，同时可根据数据进行模态分析，判断结构衰减情况。

原因：根据《指南》4.2.11 条款：主梁竖向和横向振动监测点位应根据主梁振动振型确定，宜布设在振型峰值点处，避开振型节点；点位位置应至少包括主跨跨中和 1/4、3/4 主跨。

传感器类型：加速度传感器，传感器技术指标参考表 4.1-10。

数量：6 台（新增 6 台）。

位置：主桥西侧 1/4 跨处、主桥西侧 1/2 跨处、主桥西侧 3/4 跨处、主桥东侧 1/4 跨处、主桥东侧 1/2 跨处、主桥东侧 3/4 跨处各布设 1 个竖向测点，合计新增 6 个主梁竖向振动加速度测点。

表 4.1-10 加速度传感器技术指标

技术指标	指南规定	仪器指标	仪器寿命
测量范围	振动响应最大值的 1.2 倍且≥1g	±5g	≥5 年
横向灵敏度	≤5%	<5%	
频率响应	20Hz	20Hz	

4.1.1.14 主梁横向振动加速度监测

目的：对主梁振动进行实时监测，并根据振动频谱对构件的风致振动进行监测及预警，同时可根据数据进行模态分析，判断结构衰减情况。

原因：根据《指南》4.2.11 条款：主梁竖向和横向振动监测点位应根据主梁振动振型确定，宜布设在振型峰值点处，避开振型节点；点位位置应至少包括主跨跨中和 1/4、3/4 主跨。

传感器类型：加速度传感器，传感器技术指标参考表 4.1-13。

数量：6 个（新增 6 个）

位置：主桥西侧 1/4 跨处、主桥西侧 1/2 跨处、主桥西侧 3/4 跨处、主桥东侧 1/4 跨处、主桥东侧 1/2 跨处、主桥东侧 3/4 跨处各布设 1 个横向振动加速度测点，合计新增 6 个主梁横向振动加速度测点。

4.1.1.15 塔顶水平双向振动加速度监测

目的：根据索塔振动数据对风致振动进行监测及预警，同过主塔模态分析判断结构刚度衰减情况。

原因：根据《指南》4.2.11 条款：塔顶水平振动监测点位应在塔顶双向布设。

传感器类型：加速度传感器，传感器技术指标参考表 4.1-10。

数量：2 个（新增 2 个）

位置：南侧主塔塔顶纵向、横向各布设 1 测点，合计新增 2 个塔顶水平双向振动加速度监测测点。

4.1.1.16 桥面视频监控

目的：监测和平大桥桥面运行情况

原因：动态监测桥面运行状态，为结构状态的评估提供数据支撑。

传感器类型：视频摄像机，传感器技术指标参考表 4.1-11。

数量：10 个（原有 6 个，更换 6 个，新增 4 个）。

位置：主桥桥面、主塔横梁合计新增和更换 10 个测点。

表 4.1-11 视频监控装置技术指标

技术指标	指南规定	仪器指标	仪器寿命
像素	≥400 万	400 万	≥5 年
帧率	≥25FPS	25FPS	
动态范围	≥55dB	≥55dB	

4.1.1.17 桥下空间视频监控

目的：监测和平大桥桥下运行情况

原因：动态监测桥下运行状态，为结构状态的评估提供数据支撑。

传感器类型：视频摄像机，传感器技术指标参考表 4.1-11。

数量：8 个（新增 8 个）。

位置：主桥 19#北（南）侧桥下、主桥 10#北（南）侧桥下、主桥 26#北（南）侧桥下、
等各 1 测点，合计新增 8 个测点。

4.2 附属设备布设

4.2.1 工控机

目的：保障系统数据采集设备正常运行。

作用：控制各采集设备正常运行，暂时存储采集设备采集的数据，再传输到监控中心。

原因：工控机是控制设备正常运行，提高采集质量的辅助设备。

位置：外站。

数量：1 台。

参数：4U 上架式机箱；i5 处理器；4G 内存；500G 硬盘容量。

4.2.2 交换机

目的：数据通讯。

作用：保证系统正常运行，进行网络的提供、和数据的传输。

数量：1 台交换机。

位置：外站等相关位置。

参数：2 个 10/100M 自适应 RJ45 端口；5VDC/0.4A 直流电源供电。

4.2.3 光纤收发器

目的：将短距离的双绞线电信号和长距离的光信号进行互换。

位置：外站。

数量：4 对

参数：1 个 2.5Gbps 单纤 SC 口；1 个 1Gbps/2.5Gbps RJ45 口；5VDC/0.4A 直流电源供电。

4.2.4 串口服务器

目的：数据通信协议转换。

作用：将串行通信标准 RS485 转换为串行通信标准 RS232，实现远距离信号传输。

数量：1 台。

位置：根据就实际情况布设。

参数：传输速率：300bps-115.2Kbps；工作环境：-40℃-85℃；传输介质：双绞线。

4.2.5 数据采集外站机柜

目的：采集设备、仪器深度整合,包含 UPS、配电等多个子系统,通过监控系统对全部系统实现统筹管理。

作用：为新增传感设备与采集设备提供汇集环境。

数量：1 个。

位置：南、北索塔上横梁内。

参数：160cm×80cm×60cm。

4.2.6 信号线、电源线、网线、光缆

目的：信号传输、电力输送及提供网络传输服务。

类型：信号线、电源线、网线、光缆。

位置：根据实际情况布设。

参数：信号线采用屏蔽双绞线；电源线采用 RVV3×4 铜芯线缆；网线采用超五类屏蔽双绞线；光缆采用室外层绞式铝带铠装光缆。

4.2.7 走线管

目的：保护电缆、光缆、网线、信号线等硬件设备。

类型：镀锌管、PE 管。

位置：根据实际情况布设。

参数：根据实际情况定制。

5 数据采集与传输

5.1 数据采集方案

5.1.1 数据采集方案

数据采集系统主要完成对传感器信号的调制、采集以及将采集到的传感器信号进行初步的预处理，并将初步预处理后的数据传输到后台计算机进行桥梁健康分析与评估，采集子系统的硬件部分通常由数据采集工作站和数据传输网络组成，除此以外，还包括数据采集与传输软件。

为保证数据采集系统的稳定、可靠及耐久性，数据采集方案如下：

- （1）系统在无人职守条件下连续采样；
- （2）系统中所有数据采集操作在同一时标下工作，不同外站以及数据采集系统之间的时间基准差异小于 1μs；
- （3）系统具备实时自诊断功能；系统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；
- （4）当系统的一个或多个部分暂时断电时，系统的各个部分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；

（5）数据采集具备数据缓冲和本地存储功能。根据桥梁特性要求以及传感器性质以不同采样率实时采集到的数据，具体各类传感器采样频率如下表所示。在进行数据传输之前，在内存中有一定长度的缓冲，以便提高数据安全性及进行数据初步预处理操作。

表 5.1-1 系统数据采集频率要求

监测内容	规范要求采样频率	设计采样频率
环境温度	≤1 / 600 Hz	1 / 600 Hz
环境湿度	1 / 600 Hz	1 / 600 Hz
风速风向	超声风速仪:10 Hz 机械式风速仪:1 Hz	10 Hz
结构温度	1 / 600 Hz	1 / 600 Hz
地震	触发采集加速度:50 Hz	50 Hz
位移	动位移:20 Hz 静位移:1 Hz	静位移:1 Hz
应变	动应变:10 Hz 静应变:1 / 600 Hz	动应变:20 Hz 静应变:1 / 600 Hz
索力	压力传感器:1 Hz 加速度传感器:50 Hz 电磁弹式传感器:1 / 3 600 Hz	加速度传感器:50 Hz
振动	20 Hz	20 Hz
视频监控	≥25 FPS	25 FPS

5.1.2 数据采集软件设计

（1）数据采集软件架构设计

数据采集与传输是整个监测系统的中枢与关键，主要完成原始数据的获取与传输，是连接现场采集设备和监控中心应用软件的中转站，所以要求系统有较高的稳定性和可自修复性。我们采用当今主流 Windows 平台作为采集软件的运行平台，基于 LabVIEW 图形化编程软件实现数据采集子系统快速配置及运行。

Windows 操作系统是多任务多用户操作系统，具有较好的实时响应性能和多任务处理能力，可靠性和可扩展性较高。针对本系统的特点，基于 Windows 平台来实现数据采

集软件，能够实现数据监测的实时性好、精度高，同时系统具有良好的可靠性、稳定性和抗干扰性等特点。在外站和监控中心各布置一台数据采集与传输服务器。两台服务器互为备用，大幅提高系统的可靠性。

同时，采集软件平台的配置文件支持接受对采集终端采集任务的设置。主要包括：

- ✧ 采集模块采样率
- ✧ 各个采集通道属性（对应采集通道的 ID，是采集信号在整个监测系统中的唯一标识）
- ✧ 采集信号的阈值（最大最小值）与故障标志位。
- ✧ 单位换算系数（采集到的电信号数据与原始物理信号之间的折算关系，根据该关系，将电信号数据转换为原始物理信号数据）
- ✧ 数据存储格式与存储模式。

对采集模块的设置不支持动态更改，即更改采集模块设置前必须停止当前的采集任务，然后根据相应的导入命令更新进入新的采集任务；采集终端将连续采集的数据以数据包为单位（一个数据包包含一段时间连续采集的信号数据和对应的一些信号信息）通过 UDP 端口发送给监视终端；采集终端将数据存储任务指定的数据包以文本文件的形式存入本地；采集终端将内部各模块、引擎和接口的状态转换，错误信息等内容通过广播的方式发送到控制和监测终端，并将错误信息整理成错误日志存入本地；各采集终端对大桥的振动信号采取 1588 时钟服务器精确对时。同步采集，满足各点振动信号之间严格的相位同步要求。

采集系统安装运行在桥梁现场，和现场采集器等设备通讯，采集各种参数数据，并将数据转存至存储服务器，安装在控制室的实时数据库系统。

为了采集终端软件调试与使用的方便和规范，各采集终端使用统一的软件架构。由于每一台终端的硬件配置都有所不同，所采集的物理信号也各不一样，所以在设计和实现数据采集终端软件时，充分考虑以下几个方面：

- ✧ 统一的软件架构；
- ✧ 模块化、可扩展的数据采集功能；

- ✧ 便于维护、配置的操作界面。

由于各个数据采集终端安放的位置比较远，必须具有方便的接口使得开发人员、用户能够及时地改变系统设置。这样，在系统安装调试的初期，需要经常更改参数设置时，能够减少大量的调试时间。

（2）数据采集制式及采样频率

系统根据传感器和数据采集设备的不同，所支持的采样频率满足本系统的数据采集要求。系统软件设计已考虑灵活性和可配置性，可以支持通过配置程序修改采样制式和频率，系统的采集制式支持人工干预、环境触发采集、按定制模式采集，三种制式的可选优先级依次降低。

5.2 数据传输方案

数据传输模块的功能设计应满足以下要求：

- a) 应保障数据传输的一致性、完整性、可靠性和安全性要求；
- b) 由传感器到智能网关的局域网络数据传输，可采用有线、无线或者两者相结合的方式；上传至平台的数据传输可选用 4G、5G、窄带物联网（NB-IoT）等无线传输网络；
- c) 宜采用物联网传输协议（常见的如 HTTP、MQTT、LwM2M 等）进行数据传输；
- d) 对于触发采集的设备，为确保设备正常在线运行，应定时发送设备状态信息。

传输安全性：

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。

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：

- a) 数据传输完整性宜符合 GB/T 37025 的相关规定；
- b) 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。

对监测系统敏感字段或业务数据应加密存储。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。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。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。

5.3 数据预处理与存储

传感器感知的信号应进行调理、预处理。设计采用在存储管理软件方面处于领先地位的备份管理软件，用于数据保护、应用高可用性和灾难恢复。使用业界成熟的备份管理软件解决方案，适用于各种应用、服务器、存储硬件和相关设备并实现互操作。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。该子系统由数据处理与控制计算机、服务器、数据库及相关软件构成。

存储管理软件具备以下功能：

- （1）数据保护：数据保护着重于为异构环境提供可靠的、可扩充的软件存储管理、备份和恢复功能，从台式电脑到监控中心，提供全面数据保护。
- （2）高可用性：立足于使应用程序和数据保持最高水平的可用性。能够对系统整个监控中心并实现高可用性及轻松管理。

5.4 数据质量控制

数据管理建立数据质量监督和评价体系，对数据的创建、利用、变更、销毁的过程实现质量管控及量化考核。

数据对象命名及编码是唯一的，并应满足资源数量增加的要求。

数据采集明确来源、内容、范围及精度要求；数据应适时进行采集，并建立持续更新机制。

监测设备在线率不应低于 90%，每日异常数据的总数不宜大于应采集数据总数的 10%，并应采取相关措施逐年提高设备在线率、降低异常数据比例。

存在异常数据的监测点位须及时进行核实，并在 24 小时内完成现场整改。

对数据采集、处理、分析等环节进行持续改进和优化，以提高数据质量和数据价值。

定期开展数据质量分析评价工作，确保数据质量达到控制标准。

对在线监测数据进行数据有效性检查，主要包括以下内容：

- 1）在线监测设备在接收到故障代码或标记故障情况下产生数据、校准和维护期间数据及超出量程数据视为无效数据，对该时段的数据做标记，作为仪器检查和校准的依

据予以保留；

- 2）监测数据短时间内急剧上升或下降时，给予报警提醒以便于及时查明原因，判断数据的有效性；
- 3）当监测数据长时间保持恒定不变时，给予相应的报警提醒；
- 4）超出在线监测设备校准周期的数据进行标记，并评估其数据有效性；
- 5）当零点漂移或量程漂移超出规定范围时，对从上次校验合格到本次校验不合格期间的监测数据进行确认，并剔除无效数据；
- 6）根据设定的数据采集频率，以及某段时间内实际获得的数据量，计算数据完整性并进行数据预警。

5.5 数据安全保障

5.5.1 安全网络通信

基础性指标、常规性指标、重点保护和安全保障能力的综合实力达到国家规定的标准，有效提升信息系统的安全性和可靠性。主要包括以下几个方面：

- 1、基础设施防护：包括网络安全设备、操作系统、数据库、服务器等方面的安全防护，确保信息系统的基础设施不被攻击或破坏。
- 2、数据安全防护：包括数据的加密、备份、恢复等方面的安全措施，防止数据泄露、损坏或被篡改。
- 3、用户身份认证和访问控制：确定用户身份，并根据其权限分配访问控制，防止未授权人员访问系统或数据。
- 4、安全监测与应急响应：包括安全漏洞扫描、恶意代码检测、入侵检测等方面的安全监测与事件响应，能够及时识别和处理安全事件。

5.5.2 安全保障要求

- 1.身份鉴别：在安全计算环境中应对系统中的用户进行身份标识和鉴别。在对每一个用户注册到系统时，采用用户名和用户标识符标识用户身份，并确保在系统整个生命周期用户标识的唯一性。在每次用户登录系统时，采用受安全管理中心控制的口令、令牌、基于生物特征、数字证书以及其他具有相应安全强度的两种或两种以上的组合机制

进行用户身份鉴别，并对鉴别数据进行保密性和完整性保护。

2.访问控制：在安全计算环境设置自主和强制访问控制机制，对应用系统的文件、数据库等资源的访问，避免越权非法使用；对资源及目标计算节点的身份、地址、端口和应用协议等进行可信验证；对主要的主、客体进行安全标记，按安全标记和强制访问控制规则，确定主体访问客体的操作进行控制。

3.安全审计：在安全计算环境中，要求记录系统的相关安全事件。审计记录包括安全事件的主体、客体、时间、类型和结果等内容。提供审计记录查询、分类、分析和存储保护；确保对特定安全事件进行报警；确保审计记录不被破坏或非授权访问。应为安全管理中心提供接口；对不能由系统独立处理的安全事件，提供由授权主体调用的接口。

4.入侵防范：在安全计算环境中，操作系统、数据库系统及应用系统具备一定的安全防护能力，面对外界的攻击行为，具有一定的入侵防范能力。应遵循最小安装的原则，仅安装需要的组件和应用程序；应关闭不需要的系统服务、默认共享和高危端口；应通过设定终端接入方式或网络地址范围对通过网络进行管理的管理终端进行限制；应提供数据有效性检验功能，保证通过人机接口输入或通过通信接口输入的内容符合系统设定要求；应能发现可能存在的已知漏洞，并在经过充分测试评估后，及时修补漏洞；应能够检测到对重要节点进行入侵的行为，并在发生严重入侵事件时提供报警。

5.恶意代码防范：在安全区域边界主干链路上部署下一代防火墙开启防病毒策略，可对网络传播流行的木马、病毒、恶意软件等进行检测和清除。终端配合网络版杀毒软件，形成网络和终端全方位恶意代码检测和清除。定期对防病毒软件和防病毒网关的病毒库及软件版本进行及时更新和升级。

6.可信验证：可基于可信根对计算节点的 BIOS、引导程序、操作系统内核、应用程序等进行可信验证，并在应用程序的关键执行环节对系统调用的主体、客体、操作可信验证，并对中断、关键内存区域等执行资源进行可信验证，并在检测到其可信性受到破坏时采取措施恢复，并将验证结果形成审计记录，送至安全管理中心。

采用具有网络可信连接保护功能的系统软件或具有相应功能的信息技术产品，在设备连接网络时，对源和目标进行平台身份鉴别、平台完整性校验、数据传输的保密性和

完整性保护等。

将系统的安全配置信息形成基准库，实时监控或定期检查配置信息的修改行为，及时修复和基准库中内容不符的配置信息。

7.数据完整性、保密性：在安全计算环境中采用密码等技术支持的完整性校验机制，检验存储和处理的 用户数据的完整性，以发现其完整性是否被破坏，且在其受到破坏时能对重要数据进行恢复；采用密码等技术支持的保密性保护机制，对在安全计算环境中存储和处理的 用户数据进行保密性保护。

8.数据备份恢复：在安全计算环境中，要求数据备份具备异地备份与恢复功能，确保业务系统在受到攻击时，保证能够在短时间进行恢复。

9.剩余信息保护：在安全计算环境中，剩余信息保护涉及主机层面和应用层面。“剩余信息”主要是内存或者硬盘的存储空间，要保护的时间是被释放或重新分配给其他用户后。

10.个人信息保护：在安全计算环境中，造成个人信息泄漏的有集中，主要有：身份认证方式单一，易受字典式攻击；应用程序安全功能缺失，安全防御措施不足；信息传输协议和数据存储方式不安全，降低身份认证安全性；源代码开发的安全性较低，应用层攻击频发；用户密码安全意识薄弱，技术管理策略实施困难；多种攻击形式造成信息泄漏事件频发。一个信息系统的安全包括物理层、网络层、系统层、应用层、数据层以及安全管理方面的内容。信息系统在某一层面的安全不能代表整个信息系统的安全，需要各方面的完善和结合。

5.5.3 安全管理制度

《网络安全等级保护基本要求》在安全策略、管理制度、制定和发布、评审和修订等四个方面对安全管理制度提出了要求。根据单位信息安全管理工作的特点，制定信息安全管理工作的总体方针和安全策略，明确安全管理工作的总体目标、范围、原则和安全框架等。根据安全管理活动中的各类管理内容建立安全管理制度；并由管理人员或操作人员执行的日常管理操作建立操作规程，形成由安全策略、管理制度、操作规程等构成的全面的信息安全管理制度体系，从而指导并有效地规范各级部门的信息安全管理工作。

通过制定严格的制度规定与发布流程、方式、范围等，定期对安全管理制度进行评审和修订。安全管理制度可以在很大程度上防止由于人为因素导致的安全性问题，同时，对一个信息网络系统来说，管理制度需要结合系统的特点以及系统所处环境的特殊性进行考虑。

管理制度方面的具体工作包括：

制定信息安全工作的总体方针和安全策略，说明机构安全工作的总体目标、范围、原则和安全框架等；

建立管理人员或操作人员执行的日常管理操作规程；

形成由安全策略、管理制度、操作规程等构成的全面的信息安全管理制度体系；

安全管理制度应通过正式、有效的方式发布；

每年由信息安全领导小组负责组织相关部门和相关人员对安全管理制度体系的合理性和适用性进行审定；

进行定期或不定期对安全管理制度检查和审定，对存在不足或需要改进的安全管理制度进行修订。

5.6 平台对接

5.6.1 对接系统接口规范

桥梁传感器监测系统与物联网平台之间的对接接口，包括通信协议、消息格式、认证鉴权、数据编码等，均依据本规范（《开放物联接入协议-桥梁传感器设备 MQTT 接入规范》）执行。

5.6.2 数据交互与共享功能采用以下方案

1）数据传输协议采用 MQTT 3.1.1，设备作为客户端发布消息，平台作为服务端订阅或接收消息。

2）消息载荷采用 JSON 格式（二进制透传除外），通用协议体包含 Seq、MsgType 等字段，业务协议体根据传感器类型定义具体内容。

3）设备上线采用一机一密认证：使用平台颁发的 DeviceID 和 DeviceSecret，通过 ClientID 组合参数（securemode、signmethod、timestamp）计算 Password，经 TLS 加密

通道完成身份验证。

4）设备注册后需按 KeepAlive（30~600 秒）定期发送心跳，平台超时未收到心跳即判定离线。

5）监测数据通过事件上报接口向平台推送，支持温度、湿度、风速、风向、测距（挠度）、加速度、拉线裂缝计（应变）、倾角等传感器数据。

6）图片、视频等文件采用简单存储流程：设备先向平台获取上传 URL，再直传至存储服务，最后通知平台结果并关联事件。

7）平台可向设备下发事件订阅规则，设备仅上报符合订阅条件的事件类型和通道。

8）网关类设备需上报子设备全量列表及变更信息，平台统一管理子设备。

5.6.3 数据上传

系统监测数据按规范中定义的 Topic 格式上传至平台。设备作为 MQTT 客户端，将实时监测数据封装为事件上报报文（使用 /iot/{DEVID}/{CHILDDID}/{LOCALINDEX-RESOURCECTYPE}/model/event/report/{DOMAIN}/{IDENTIFIER} 主题），发布到 MQTT Broker；平台设备接入服务（DAS）订阅对应主题，接收并解析数据。通信过程采用 TLS 加密，保证传输安全。典型数据上传流程如下：

- 1）设备完成 MQTT CONNECT 注册上线；
- 2）平台响应 CONNACK；
- 3）设备按心跳间隔发送 PINGREQ 维持连接；
- 4）传感器采集数据后，构造 JSON 报文（含 basic 事件基础信息及 payload 业务数据），通过 PUBLISH 发布至指定 Topic；
- 5）平台收到后返回 PUBACK（QoS≥1 时），完成一次数据上报。

完整流程如图 5.6-1 所示。



图 3.3-2 事件订阅和上报流程

本项目采用“桥梁监测系统—物联网平台—生命线平台”的三级数据传输架构。桥梁监测系统通过现场传感器和数据采集设备获取桥梁环境参数及结构响应数据，并将原始监测数据上传至物联网平台；物联网平台负责对接入数据进行统一管理、协议转换、数据校验及标准化处理，并按照生命线平台统一的数据交换接口规范，通过 HTTP/HTTPS 或 MQTT 等通信方式将处理后的监测数据传输至生命线平台；生命线平台接收数据后，实现和平大桥监测数据的统一汇聚、可视化展示、报警预警及综合管理。同时，生命线平台保留和平大桥原系统展示界面模块，保证原有监测功能的延续性。



图 3.3-3 原监测系统展示界面

5.7 系统供电

桥端监测系统升级改造后供电点与原系统一致。

6 项目实施与验收

根据《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》（住房和城乡建设部令第 37 号）及相关安全管理要求，危险性较大的分部分项工程（简称“危大工程”）是指房屋建筑和市政基础设施工程施工过程中，容易导致人员群死群伤或者造成重大不良社会影响的分部分项工程。危大工程主要包括深基坑工程、模板工程及支撑体系、起重吊装及起重机械安装拆卸工程、脚手架工程、拆除工程、暗挖工程以及其他具有较大危险性的工程内容，施工单位需按照相关规定编制专项施工方案，并落实安全管理措施。

本项目主要实施内容为桥梁健康监测系统设备升级改造，包括传感器安装、数据采集设备部署、通信线路敷设及系统调试等工作，不涉及桥梁主体结构施工、拆除工程、大型吊装工程、深基坑工程及高大模板支撑体系等危大工程。施工过程中主要风险为高处作业、临边作业、临时用电及交通组织安全风险，施工单位应按照相关安全管理要求落实防护措施，确保施工安全。

6.1 实施总体要求

桥梁结构监测系统实施应科学合理，保证监测设备正常运行和使用寿命，确保监测数据准确、可靠。

桥梁结构监测系统实施必须严格遵守招标文件、设计文件和合同技术文件的相关规定。

桥梁结构监测系统实施必须按照《职业健康安全管理体系要求及使用指南》GB/T45001-2020 的相关要求，认真落实各项安全保障措施和环境保护要求。

桥梁结构监测系统实施，应按照施工工序，分别在前期准备阶段、现场实施阶段、质量检验阶段和交工验收阶段分别制定相关技术要求。

桥梁结构监测系统实施，除应符合本文件规定外，尚应遵守国家及行业现行有关标准的规定。

桥梁结构监测系统监测设备安装及调试过程中，将同步关注桥梁结构外观状况，对现场发现的明显病害现象进行记录和反馈，跟踪其发展变化情况，及时反馈相关问题，为监测数据分析及桥梁运营状态研判提供参考。

6.2 实施前准备要求

6.2.1 设计交底与现场勘查

系统实施前，建设单位应组织设计人员对施工单位和监理单位的相关人员进行设计交底。

系统实施前，施工单位应充分熟悉图纸，组织工程技术人员进行现场踏勘和实地测量，检查设计图纸与现场实际情况是否一致。

6.2.2 施工安全方案申报

桥梁结构监测系统现场实施前，应由施工单位完成施工安全方案申报，获得监理单位或建设单位批准后方可进行现场实施。

桥梁结构监测系统施工安全方案申报内容应包括安全生产承诺书、安全组织机构、进场人员资质证书、三级安全教育培训、施工现场危险源分析、施工现场安全防护措施和安全事故应急预案等内容。

6.2.3 施工组织设计评审

桥梁结构监测系统现场实施前必须完成施工组织设计，并报监理单位或建设单位审批，审批通过后方可进行现场实施。

施工组织设计中应包含完整的质量保证体系，保证每道工序按规范要求进行，确保工程质量。

施工组织设计中的工程进度计划应满足总工期要求，工序安排合理。

施工组织设计中应明确各分项、分部工程的施工方法和施工工艺。

施工组织设计中的管理人员和工程技术人员应与投标文件相符，如有更换，替换人员的资质应不低于被替换人员。

施工组织设计中的施工机械设备的数量、型号、规格、生产能力和完好率应与投标文件相符。

施工组织设计中应明确环保、文明施工的管理措施和方案。

6.2.4 材料、设备进场报验

材料、设备进场检验应在建设单位或监理单位监督下进行，并保存完整的开箱照片、

影像资料和检验记录。

材料、进场设备名称、型号和数量必须与合同文件一致，合格证书、标定证书、铭牌标志等质量证明文件齐全。

材料、设备进场后应按材质、型号和规格进行分区和分类保管，存放位置应通风干燥，存放时间不应超过产品保质期。

材料、设备和软件的进场验收记录，宜按本文件附录 A 材料、设备进场报验用表的样式进行登记。

6.2.5 开工申请

现场实施前，施工单位应完成进场人员资质申报、施工机械进场计划申报和施工材料、设备的进场报验。

现场实施前，施工单位应完成对现场人员的施工技术交底。

施工单位在完成所有准备工作后，向建设单位或监理单位申请开工，获得批准后方可进行现场实施。

6.3 交通组织设计

6.3.1 人员安排与交通管制

桥梁结构监测系统实施应科学合理，根据现场安装、调试及运维需求，合理配置项目实施人员、工程车辆及登高设备，计划投入工程车 40 天、登高车 20 台班，保障监测设备运输、安装、调试及后期维护工作的顺利开展，保证监测设备正常运行和使用寿命，确保监测数据准确、可靠。

6.3.1.1 人员安排

成立以项目经理为首的交通安全领导小组，进行统一指挥、统一协调，实行岗位问责制度。领导小组包含 1 名组长、1 名副队长、1 名安全监督员和 1 名应急救援队长。领导小组成员分工如下：

组长：第一责任人，直接对社会承担安全管理责任，全面管理交通安全维护工作。

副组长：对组长负责，协助组长管理交通安全与维护工作，负责安全管理制度的制定和落实，安全措施 的落实。并负责协调路政、交警等各方面的关系，负责突发事件的

应急处理，并即时为社会提供道路施工和管理信息。

安全监督员：对组长和副组长负责，负责对下属班组进行交安组织与维护的技术交底与安全交底。对施工前和施工过程中的交通组织与安全维护措施进行监督检查，落实整改纠正。

应急救援队：负责处理突发事件。

其他成员：服从各自所在班组的管理与调度。

6.3.1.2 交通管制

(1) 交通管制实施方法

施工作业时根据《城市道路交通组织设计规范》，交通组织设计主要包括以下几个方面：

(1) 交通调查与分析

通过现场踏勘、交通流量调查、交通预测、问卷调查等方式，对设计范围内道路网条件、道路功能属性、周边用地情况、交通流分布、交通运行特征、交通事故及违法情况、交通管理设施、公共交通设施等开展调查分析，掌握区域交通需求及运行规律，明确现状交通存在的问题及形成原因，为后续交通组织设计提供依据。

(2) 设计目标确定

基于交通需求分析结果，结合区域交通特点和管理需求，明确交通组织设计目标。设计目标应具有针对性和可实施性，重点围绕保障交通安全、规范交通秩序、提升道路通行效率、缓解交通拥堵等方面提出，并采用定性定量相结合的方式描述。

(3) 设计方案编制

根据交通现状分析和设计目标，确定交通组织设计思路，制定总体方案和实施方案。针对复杂交通环境，可开展多方案比选，从交通流组织、交通设施布设、实施条件及预期效果等方面进行综合评价，形成交通组织方案设计说明书、交通组织图纸及相关工程量清单等成果。

(4) 方案论证与评审

设计方案完成后，应通过相关管理部门审查或组织专家评审，对方案的合理性、可实施性及预期效果进行论证，提出优化意见。对于未通过审查或评审的方案，应根据反馈意见进行修改完善。

(5) 方案实施与优化

经确认后的交通组织方案按照计划组织实施，实施前应做好交通引导、信息发布及相关准备工作，必要时开展试运行。实施过程中应加强交通运行监测，根据实际交通变化及时采取人工疏导和优化调整措施；实施后应开展效果评估，对交通秩序、拥堵情况及事故变化情况进行跟踪分析，持续优化交通组织方案。

图 6.3-2 为涉路施工封闭示意图，最终封路方案以后期实施期间交通组织方案审查会为准。

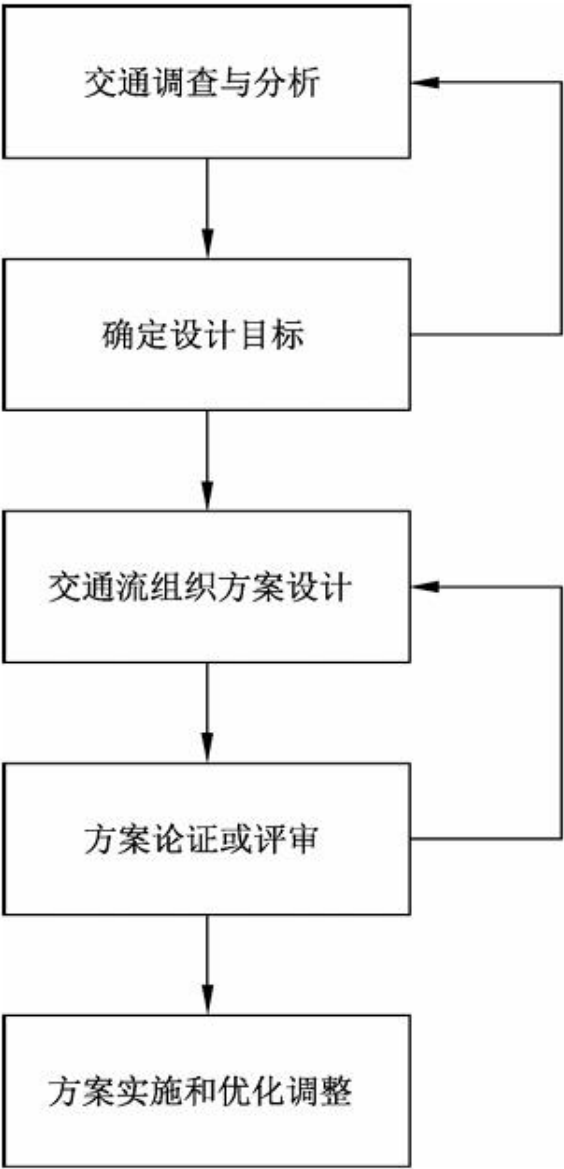


图 6.3-1 交通组织设计工作流程图



和平大桥桥侧道路情况

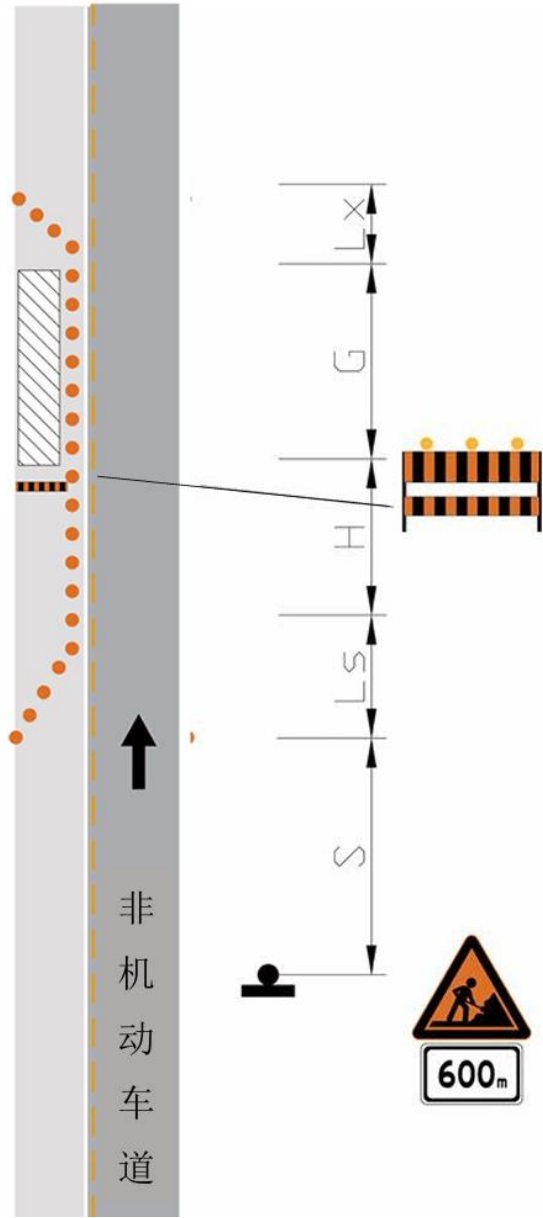


图 6.3-2 作业区布置示例图

表 6.3-1 交通安全标志及设施配置数量

名 称	规 格	单 位	数 量	备 注
标志牌		块	2	
导向标志		块	1	
导向标志		块	1	
附设警示灯的路栏		块	1	
车道减少		块	1	
车道减少		块	1	
爆闪灯		套	2	
限速 80		个	1	

名 称	规 格	单 位	数 量	备 注
限速 60		个	1	
安全锥		个	250	
非机动车导向		个	2	

注：标志、标牌根据现场及交警意见适当加密

（2）交通管制实施步骤

交通封闭实施步骤：从警告区开始位置依次放置“前方施工”、“限速 60”、“车道变窄”和“导向牌”→摆放上游过渡区锥桶、标志牌→缓冲区放置锥桶、标志牌→施工区警示灯路栏、锥桶→下游过渡区内放置锥桶→终止区标志。

交通解除实施步骤：拆除终止区锥筒→下游过渡区、施工区及缓冲区内的锥筒、标志牌→逆着行车方向将锥筒拆除→顺着行车方向拆除警告区内标志标牌→撤离所有人员、交通管制车辆→恢复车道正常交通。

（3）交通管制注意事项

- ✧ 检查区的前方，设置清楚正确的标志及布设交通锥，并安排交通管理人员，引导车辆安全通过。
- ✧ 长时间的施工作业，安排交通管理人员定时检查交通管制设施的完整，遇到标志标牌及交通锥倒伏等情况及时予以恢复。
- ✧ 负责交通管制的人员，已通过安全教育培训。
- ✧ 配合交通管制需要，作业时段须配合调整；如避开交通高峰时段检查或机动移设交通管制设施等方法。
- ✧ 与交警、交通执法部门及相关部门的沟通，服从其安排，遇到特勤情况及时拆

除交通管制，确保道路畅通

6.3.2 安全应急预案

6.3.2.1 恶劣天气应急预案

（1）预防措施

- ✧ 施工总体安排时间尽量考虑避开宜产生恶劣天气的季节和时段；
- ✧ 所有的标志牌、水马、导向灯等交通维护设施，必须固定牢固，避免大风被吹移。

（2）应急措施

- ✧ 时刻关注天气预报，在办公室设立近期天气预告牌，时刻掌握将来几天内的天气情况，以便提前做好应对措施；
- ✧ 大风天气，做好维护设施的固定工作，提前安排维护小组人员做好检查。并安排维护小组做好巡查工作；
- ✧ 大雨、大雾、大风等恶劣天气，停止作业；
- ✧ 及时主动与路政、交警部门联系，按路政、交警部门要求做好配合工作。

6.3.2.2 发生交通事故应急预案

当施工区域附近发生交通事故时，现场值班人员必须立即向交警、路政及业主有关部门汇报，同时报项目应急领导小组。项目应急领导小组接到报警后，立即叫停施工，并迅速组织 3 个应急小组进行现场维护。

（1）后勤联络小组在发生交通事故后，必须立即向交警、路政及业主有关部门实时汇报现场情况，汇报人员必须详细的汇报事故发生时间、地点、性质、初步的危害程度、影响范围等基本情况。把汇报人姓名、联系电话讲清楚，便于及时沟通了解现场情况。汇报小组同时要向其他救援小组不间断的传达交警、路政和业主有关部门的交通疏导及救援方案。

（2）交通疏导小组通过在交通事故前方放置标志标牌，人员在应急车道外侧和中分带用颜色鲜艳的旗子并开启警报器和频闪灯，提醒司机减速慢行，将后方堵塞的车辆按序进行疏导，让车辆安全、缓慢的通过事故区域。

（3）事故救援小组同时组织救援人员在事故现场投入抢救工作，备好吊车，装载机和挖掘机听从交警、路政的统一协调指挥，组织力量协助消除堵塞，为前来应急救援的

队伍创造条件。抢救步骤遵循先抢救受伤人员后抢修机具的原则。

①视事故车辆撞击情况，轻者由停放在现场的工程应急车拖带到紧急停车的硬路肩上。听候交警处理，撞击严重者立即联系清障车前来牵引，拖离到指定地点听候处理。

②组织人员清理事故车辆的散落物，如用人工搬运不动的启用装载机或汽车吊，以最快的速度清除散落物，以最短的时间恢复正常通车。

③如遇到有人员被重物压住，救援小组通过现场器械以及救援人员的密切配合，先将重物移开，再把重物下压人员救出。进行快速包扎送就近医院抢救，根据情况电告 120 医院急救中心求救

（4）如果堵车长度较长，且交通事故的处理无法短时间内解决，项目部则迅速通知交警、路政等单位，对通行车辆进行分流。

（5）在救援过程当中，所有救援人员都必须服从交警、路政和业主等有关人员的统一安排。现场救援工作做到有序、快速。

（6）如遇各类突发应急事件造成交通堵塞时间较长，短时间内不能恢复通行,警备任务等情况，项目部将采取施工区域快速撤离,立即开放交通措施，待情况解除后再恢复交通管制。

6.4 现场实施要求

6.4.1 桥梁结构监测系统工程划分

桥梁结构监测系统实施宜按分项工程、分部工程和单位工程逐级开展相关工作。

工程桥梁结构监测系统工程宜分为传感器系统、数据采集与传输系统、数据存储与显示系统、软件系统和系统试运行五个分部工程，分别制定相关技术要求。

6.4.2 传感器系统实施要求

传感器供电应根据设备参数选择相应电源，供电线路施工应满足《供配电系统设计规范》GB50052-2016 的要求。

传感器防雷接地应符合《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB50343-2012 的要求。

传感器和保护装置表面应光泽一致、无划伤、无刻痕、无剥落、无锈蚀。

传感器安装立柱、支架及螺栓应符合设计要求，防腐措施得当，裸露金属部分无锈

蚀。

埋入式安装的传感器安装时，信号线缆应与内部构件进行固定，禁止悬吊，线缆出口位置应使用套管加以保护。

通过附属设施安装的传感器，附属设施刚度应满足设计要求。

每个通道内各传感器中心波长应尽量分散，避免解调时相互干扰。

传感器安装后应在 24 小时内完成初始数据的记录。

传感器系统施工全过程应保留完整的影像或图片资料。

6.4.3 数据采集与传输系统实施要求

数据采集工作站施工要求：

- a) 外站位置分布合理，安装稳固端正，无伤残痕迹；
- b) 外站机柜尺寸、防腐措施满足设计要求；
- c) 外站机柜内接线端子和接插座安装规范，强、弱电区分明确，金属机箱与接地端连接可靠；
- d) 机柜整体密封性能良好，柜内无积水、尘土，机柜内宜安装温度控制系统；
- e) 机柜内设备分布合理，布线整齐、捆扎牢固，标识清晰；
- f) 机柜内供电应满足《供配电系统设计规范》GB50052-2016 的要求，设备工作状态正常；
- g) 外站防雷接地应符合《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB50343-2012 的要求。

线缆敷设施工要求：

- a) 梳理原系统所有线缆路由，排查防护缺失、破损、老化等问题，对原系统线缆防护进行全面整改；
- b) 新增线缆防护主要采用桥架与线管组合的方式；
- c) 走线管道、桥架安装应符合《电气装置安装工程电缆线路施工及验收标准》GB50168-2018 的规定；
- d) 线缆敷设应符合《电缆敷设国家标准》GB50217-94 的规定；

e) 线缆敷设位置不宜有腐蚀性物质排放、强磁场或强电场干扰，当无法避免时应采取防护或屏蔽措施。

f) 线缆敷设前应进行外观检查，线缆上厂名、产品型号和额定电压连续标识清晰，线缆外护套无伤痕、破损；敷设时应平直整齐、固定可靠；敷设后在线缆起始位置和终点位置应有清晰铭牌。

g) 光缆敷设应符合《商业建筑电讯布线系统标准-第 3 部分光纤布线部件标准》的要求；

h) 光缆敷设前应进行外观检查和导通测试，敷设时光缆弯曲半径不应小于光缆外径的 15 倍；

i) 光缆接续应采用专用设备熔接，熔接损耗应小于 0.3db。

网络通讯施工要求

- a) 网络通讯设备工作状态正常；
- b) 网络接线符合设计要求；
- c) 数据传输时延、光信号衰减等指标满足 EIA/TIA568 规范要求；
- d) 数据传输误码率 BER≤10-8。

6.4.4 数据存储与显示子系统实施要求

硬件设备安装位置的环境温度、湿度控制应满足《电子信息系统机房设计规范》GB50174-2008 的要求；

系统供电应满足《供配电系统设计规范》GB50052-2016 的要求，强、弱电区分明确；

系统防雷接地应符合《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB50343-2012 的要求；
服务器机柜及其设备安装稳固端正，无伤痕，接线端子和接插座安装规范，标识清楚；

机柜内设备分布合理，裸露金属部分无锈蚀，柜内布线整齐、捆扎牢固，标识清晰。

6.4.5 软件系统施工要求

软件系统设计应符合《信息安全技术-信息系统通用安全技术要求》GB/T20271-2016

的规定；

软件系统测试应符合《计算机软件测试规范》GB/T15532-2016 的规定；

软件系统文档编制应符合《计算机软件文档编制规范》GB/T8567-2006 的规定；

数据采集与传输软件技术要求

- a) 数据采集与传输软件应采用模块化设计，根据不同类型的监测设备进行选择、配置。
- b) 数据采集与传输软件应保存运行状态文件，记录软件运行情况和错误代码。
- c) 数据采集与传输软件应具备较强的鲁棒性，在网络过载或个别硬件设备故障等情况下，能够不崩溃，不影响其他设备的数据采集与传输。
- d) 动态同步采集时，各传感器同步精度应小于 10ms。
- e) 静态同步采集时，各传感器同步精度应小于 30s。

6.4.6 数据存储与显示软件技术要求

- a) 数据存储与显示软件应具有原始数据保存功能，存储的原始数据精度不低于传感器的分辨率，原始数据存储时间不小于 1 年，到期后进行备份、存档。
- b) 数据存储与显示软件应将预处理后的统计数据入库，动态数据库中的统计数据宜永久保存。

c) 数据存储与显示软件应作为统一的数据出口，实现多用户操作及数据共享。

结构状态评估和预警软件技术要求

- a) 评估软件应综合判断环境因素和结构损伤状态，评估结构性能退化的征兆和趋势，实现对日常管理养护工作的指导。
- b) 评估软件宜按照权重比例，对桥梁上部结构、下部结构和附属结构三部分的安全状态进行评分。
- c) 预警软件应采用分级报警机制，实现特殊事件报警功能。

6.4.7 系统试运行要求

系统试运行时长无相关规定时不得少于 90 天；

试运行期间，平均无故障运行时间应大于总时长的 95%。

试运行期间，数据缺失率应不大于 5%。

6.5 监测点安装工艺

本项目监测点安装及线缆敷设施工过程中，充分考虑桥梁运营环境及周边既有设施条件，严格控制施工范围和作业方式，确保不影响铁路正常运营及相关作业安全。对于跨越铁路区域的桥梁结构，施工前应结合现场条件制定专项施工组织方案，明确作业时间、施工区域、安全防护及风险控制措施。监测设备安装、支架固定、线缆敷设等作业均采用安全、可靠的施工方式，避免对铁路设施造成干扰或影响铁路运行安全。同时，施工过程中加强与铁路管理单位的沟通协调，严格落实现场安全管理要求，确保监测点安装及线缆敷设工作安全、有序开展。

6.5.1 风速风向监测（风速仪）

具体实施步骤为：

- （1）传感器底部套筒式安装底座内连接信号传输线缆，线缆敷设至立柱内部接线手孔处，预留适量线缆用于线缆接续。
- （2）定位：风速仪顶部有“0”指示标记，以此为起点，顺时针方向 0~360°递增，在固定仪器前必须用精密方向测定仪器测定固定方向作为参照，通车选择指北方向为 0°相位。
- （3）使用配套螺栓固定传感器底座，确保安装稳固，可使用螺丝胶进行加固，防止长期振动导致的螺栓脱落。
- （4）立柱采用 DN150 镀锌钢管制作，安装杆采用 DN50 镀锌钢管制作，安装杆与立柱中空，可穿传感器信号线缆，立柱手孔内接线传感器信号线缆，接头部位需要焊接，使用热缩管保护。
- （5）安装立柱时确保周边无遮挡，无强电磁干扰。



图 6.5-1 风速风向仪现场照片

6.5.2 环境温湿度监测（温湿度计）

具体实施步骤为：

- （1）选择安装点位置附件合适的路灯杆；
- （2）将固定支架固定在路灯杆垂直距离桥面 2 米的位置；
- （3）安装传感器和保护罩，确保稳固牢靠；
- （4）传感器信号线缆使用 PE 护套保护，接头处焊接。
- （5）线缆插头接上传感器接口，做好防水。
- （6）桥塔内温湿度计使用膨胀管及螺丝固定在塔壁内侧。



图 6.5-2 环境温湿度仪现场照片

6.5.3 应力应变/结构温度监测（振弦式应变计）

本次振弦式应变计安装位置均在西侧主跨，不涉及下跨铁路施工。具体实施步骤为：

- （1）用配套的模具和安装块组装，然后根据图纸位置做好定点标记；
- （2）用电锤在标记位置打两个中心相距 120mm 的孔，直径 8mm、深 40mm；
- （3）清楚孔内残渣灰尘，注入植筋胶，将固定块的螺杆置于孔内；
- （4）调节角度和位置，确保模具能顺畅的拿出，然后穿入振弦杆（禁止旋转传感器的两极）；
- （5）使用配套的扳手调整固定块上的螺栓并紧固；
- （6）安装温度传感器及线圈，用卡箍紧固，同时安装保护盒，将对接线缆引入盒内；
- （7）线缆对接按照规范要求镀锡、防水、绝缘，所有线缆穿管不得裸露；
- （8）在机柜端将线缆按照图纸编号接入采集设备，采集安装初值；
- （9）初值偏离太大的传感器要重新调整，松开安装块上的螺栓，微调后再紧固，再次采集初值，如果合适则把安装盒固定，反之重复微调。



图 6.5-3 振弦式应变计现场照片

6.5.4 地震监测/主梁振动/主塔振动监测（加速度计）

具体实施步骤为：

- （1）测量、放样，根据图纸确定安装位置和安装方向。
- （2）通过改变底座方向来确定传感器测量方向。
- （3）混凝土表面安装时，安装底座使用 M8 膨胀螺丝固定在被测构件上。
- （4）传感器安装在底座上，安装前必须清洁安装面。
- （5）传感器使用 M4 不锈钢螺栓固定在底座上，安装前在传感器与底座之间使用结构胶进行加固。
- （6）安装时需注意安装方向与传感器出厂标定方向是否一致。
- （7）传感器安装后通电测试，确保正常使用后安装保护罩，保护罩使用 M5 内六角螺栓固定在安装底座上。
- （8）保护罩预留Φ22 出线孔，安装 PG13 防水接头，用于传感器信号线缆敷设。
- （9）传感器信号线缆接头部位需要焊接，使用热缩管保护，接线部位收纳在保护罩内。
- （10）传感器检验后，必须在规定位置标注传感器编号，便于维修更换。
- （11）传感器安装盒及底座具有密封设计，完成安装的传感器安装盒及底座将具有良好的防尘和防水功能。
- （12）安装工作完成后，进行测试工作。用万用表测量电流、电压、电阻值，并用笔记本电脑做数据采集且保存原始数据，比对参数，检查是否符合要求。



图 6.5-4 地震加速度计现场照片

6.5.5 塔顶偏位监测（倾角仪）

具体实施步骤为：

- (1) 支架安装：将倾角传感器的安装支架按照指定高度用膨胀螺丝固定在箱室内外腹板和桥塔塔壁内侧，并保证支架安装水平。
- (2) 传感器安装：将传感器 4 个脚用 M5 螺丝固定在支架上。
- (3) 走线与连接：将信号线用 PVC 管防护并固定，与传感器连接部分要焊接，接头做好防护。
- (4) 接头与编号：用电烙铁将信号线中的各根线按一定顺序焊接到接头上，并拧紧接头上的螺丝钉以防信号线从接头中脱落。根据倾角位置对各个接头进行编号。



图 6.5-5 倾角仪现场照片

6.5.6 支座位移监测（顶杆位移计）

本次顶杆位移计安装位置均在西侧主跨，不涉及下跨铁路施工。具体实施步骤为：

- (1) 打孔与插入膨胀螺丝：用电钻在混凝土箱梁侧面方向打孔，然后插入膨胀螺丝。
- (2) 固定拉线式位移传感器：将传感器固定在支架上，确定好拉绳预留的长度，用螺丝将传感器固定。
- (3) 固定传感器支架：将支架与打好孔的膨胀螺丝对齐从钢板孔中穿过，调整好角度，拧紧膨胀螺丝螺母，将四个角用螺母固定，在支架后用环氧树脂胶进行固定。
- (4) 走线与连接：将穿过螺纹管的 4 芯信号线与传感器信号线按照一定规则焊接在一起。
- (5) 接头与编号：用电烙铁和焊锡将 4 芯信号线，分别连接纵向和横向支座位移传感器，仪器端按照相应规则制作航空插头，接头中的各根线按一定规则烙到接头上，

并拧紧接头上的螺丝钉固定电线以防电线从接头中脱落。根据支座位移传感器的位置对做好的各个接头进行编号。

- (6) 连接机箱：将接头按照编号插到对应的通道中并做好记录。



图 6.5-6 顶杆位移计现场照片

6.5.7 主梁竖向位移监测（光电挠度仪）

本项目光电挠度仪、靶标安装均不会扰动铁路上侧主跨的主梁。具体实施步骤为：

- (1) 安装位置确定：对照施工图纸，确定传感器的安装位置（可通过预留底座确认）。用红色记号笔标记（标注传感器编号），并用手机拍照。
- (2) 传感器安装：使用不锈钢膨胀将支架直接安装于栏杆/立柱上。用内六角扳手松开紧定螺钉，取下安装底座。用一颗十字内六角螺钉初步固定底座，底座装在带螺纹孔的支架上。装上图像位移计/靶标，调整俯仰角后拧紧紧定螺钉。
- (3) 靶标防护：每个靶标安装处设置警示标志牌；
- (4) 电源线接直流 24V，防护插头引脚 3 接 GND，引脚 4 接 DC24V。网线口接打好水晶头的网线，网线另一头插交换机。设备防护罩和立杆需要接地并做好防雷处理。
- (5) 安装须确保安装方向、安装位置、连接、出线等正常后方可进行安装和固定。
- (6) 传感器安装必须通过水平尺确保垂直和水平。
- (7) 传感器安装盒及护套具有密封设计，完成安装的传感器安装盒及底座将具有良好的防尘和防水功能。



图 6.5-7 靶标现场模拟照片

6.5.8 斜拉索索力监测（索力加速度计）

具体实施步骤为：

- （1）传感器安装在底座上，安装前必须清洁安装面。
- （2）传感器使用 M5 不锈钢螺栓固定在底座上，安装前在传感器与底座之间使用结构胶进行加固。
- （3）传感器通电测试正常后，使用 M5 内六角螺丝固定保护罩。
- （4）保护罩预留Φ22 出线孔，安装 PG13 防水接头，用于传感器信号线缆敷设。
- （5）传感器信号线缆接头部位需要焊接，使用热缩管保护，接线部位收纳在保护罩内。
- （6）安装底座使用不锈钢 U 型箍固定在吊索上，安装高度 2.5 米。
- （7）传感器信号线缆使用 PE 软管保护，使用不锈钢抱箍固定在吊索上，固定间隔

0.5 米。

- （8）保护罩安装完成后，必须在规定位置标注传感器编号，便于维修更换。



图 6.5-8 索力加速度计现场照片

6.5.9 桥面视频监控/桥下空间视频监控（高清摄像头）

具体实施步骤为：

- （1）选择安装点位置附件合适的路灯杆；
- （2）将固定支架固定在路灯杆垂直距离桥面约 5 米的位置；
- （3）安装球机，确保稳固牢靠；
- （4）线缆插头接上传感器接口，做好防水。



图 6.5-9 高清摄像头现场照片

6.6 质量检验要求

6.6.1 施工质量检验与评定参与单位

桥梁结构监测系统施工质量检验与评定应由建设单位、监理单位、设计单位、施工单位共同参与完成。

6.6.2 施工质量检验与评定办法

桥梁结构监测系统施工质量检验与评定应按分项工程、分部工程和单位工程逐级进行，分别进行评分，并以相应工程的评分结果核定质量等级，质量等级分为合格与不合格。

施工单位在各分项工程完工后进行自检，自检合格率达到 100%后，报请监理单位进行分项工程施工质量检验与评定。

监理工程师进行分项工程质量检验时应对各类型监测设备进行抽检，抽检比例不少于同类设备总量的 10%且不少于 1 个。

分项工程质量等级评定宜按分项工程质量检验评定表中所列的基本要求、检查项目和外观鉴定的要求进行评分，分项工程评分值不小于 90 分者为合格，小于 90 分者为不合格。评定为不合格的分项工程，经修改、返工、复调，满足设计要求后，可以重新进行评分。

分部工程质量等级评定时，所属各分项工程全部合格，则该分部工程评为合格，所属任一分项工程不合格，则该分部工程为不合格。

单位工程质量等级评定时，所属各分部工程全部合格，则该单位工程评为合格；所属任一分部工程不合格，则单位工程为不合格。

建设单位在对承包人和监理工程师进行的工程质量检验和评定进行审定的基础上，联合设计单位与监理单位成立项目交工验收委员会，组织工程的交工验收。

6.7 交工验收要求

6.7.1 一般要求

桥梁结构监测系统验收应在试运行期满完成试运行报告后，由建设单位组织成立验收委员会，开展相关验收工作。

桥梁结构监测系统验收宜按下列程序依次进行：

- （1）确定验收委员会成员，明确验收组长；
- （2）召开验收会，宣布会议议程、验收委员会成员和验收标准；
- （3）各单位汇报项目实施情况（建设单位汇报项目执行报告、设计单位汇报设计总结报告、施工单位汇报施工总结报告、监理单位汇报监理总结报告）；
- （4）验收委员会查阅项目文件资料，进行项目内业资料审查、验收；
- （5）系统功能演示，验收委员会对桥梁结构监测系统进行功能验收；
- （6）验收委员会内部讨论，形成验收意见；
- （7）验收委员会宣读验收意见，建设单位签发交工验收证书。

验收不合格的项目应在 6 个月内完成整改并再次组织验收，未通过验收的工程不得交付使用。

6.7.2 硬件验收

硬件验收应包含以下内容：

- （1）进场设备材料的数量、规格型号、技术参数等与合同文件、设计文件的一致，合格证、质保卡、说明书及出厂检验报告齐全；
- （2）传感器安装位置正确、牢固、端正，表面平整，与结构物接触面紧密，采取了必要的防腐防护措施，信号线按要求连接到位；
- （3）数据采集设备处于正常工作状态，机柜内电力线、信号线、元器件等布线平直、整齐、固定可靠，插头牢固，标识清晰。出线管与箱体连接密封良好，机柜内无积水、尘土、霉变；机柜接地连接可靠，接地引出线无锈蚀；
- （4）光电缆线路敷设与数据中心设备安装应满足《公路工程质量检验评定标准第二册机电工程》（JTGF80-2）的有关要求。

6.7.3 软件验收

软件验收应包含以下内容：

- （1）数据采集与传输软件功能完整性和一致性检查，能够正常采集、存储、转发监

测数据，各项功能指标满足设计文件要求；

（2）数据处理与管理软件功能完整性和一致性检查，能够正常接收、处理、存储、转发监测数据，各项功能指标满足设计文件要求；

（3）用户界面软件功能完整性和一致性检查，各软件模块功能满足设计文件要求，静态基础数据、实时监测数据、历史统计数据等各类数据准确、齐全；

（4）软件整体请求响应速度、数据刷新率等性能指标满足设计文件要求。

（5）软件由具备相关认证的第三方测评单位的软件测评单位进行软件测试，测试内容应包含单元测试、功能测试、性能测试、集成测试等，并出具《软件测试报告》，报告应详细描述每个测试用例的测试结果，对于重大功能偏离、缺陷和逻辑错误，需经开发单位修复完善后再次提交测试，最终测试通过率应不低于测试用例总数的 95%。

6.7.4 资料验收

资料验收文档的齐全性、规范性和一致性检查，应包含以下内容：

（1）合同相关资料：合同协议书、招投标文件、系统设计文件等；

（2）实施过程资料：系统施工图设计文件、系统变更资料；设备进场报验资料、监测设备设施安装记录、设备设施检验资料；软件需求规格说明书、软件设计说明书；监理资料；有关会议纪要；

（3）交工验收资料：系统实施总结报告、系统竣工图、系统使用手册和系统试运行报告。

（4）资料归档：桥梁结构监测系统项目资料归档应按照建设单位的项目文件编制办法进行组卷、归档。桥梁结构监测系统项目资料宜按下列内容进行组卷：

a) 综合卷：包括项目立项文件、项目招投标文件、合同文件、安全管理文件、计划管理文件等。

b) 设计卷：包括施工图设计、方案评审文件等。

c) 施工卷：包括施工组织设计、开工申请、设备进场报验文件、变更文件、施工日志、竣工图等。

d) 监理卷：包括监理规划、监理实施细则、会议纪要、施工质量检验评定文件和监

理通知等。

e) 结算卷：包括计量文件、变更计量文件、工程决算书和审计报告等。

f) 验收卷：包括会议通知、议程、签到；项目执行报告；设计、施工、监理工作总结报告；交工验收意见；加工证书等。

6.7.5 系统安全等级保护

系统平台安全性符合《信息安全技术网络安全等级保护基本要求》（GB/T22239）规定的第二级安全通用要求，应能够在统一安全策略下防护免受来自外部有组织的团体、拥有较为丰富资源的威胁源发起的恶意攻击、较为严重的自然灾害，以及其他相当程度的威胁所造成的主要资源损害，能够及时发现、监测攻击行为和处置安全事件，在自身遭到损害后，能够较快恢复绝大部分功能。

6.7.6 系统交接与培训

桥梁结构监测系统培训应包括下列内容：

（1）系统总体情况介绍：包括系统组成、系统功能、系统日常管理注意事项、系统异常处理办法等。

（2）系统硬件情况介绍：包括设备型号、安装位置、连接方法、参数设置方法、调试、维护注意事项等。

（3）系统软件情况介绍：包括软件操作方法、安装调试方法等。

桥梁结构监测系统交接应包括下列内容：

（1）内业资料交接：包括项目归档资料、项目施工过程中影像资料或图片、软件操作手册、硬件维护手册、系统运行报告等。

（2）系统交接：确保现场管理人员正确使用系统各项功能

7 监测系统运维

7.1 数据分析

7.1.1 阈值设定

报警设计依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，

监测报警采用分级报警机制，级别从高到低分别为：一级报警（严重）、二级报警（一般）、三级报警（轻微）。一级预警由各地权属单位、行业主管部门、相关部门协同处置。二级预警由各地权属单位、城市行业主管部门协同处置。各地权属单位开展现场排查、处置并及时反馈处置结果；城市行业主管部门监督协调。三级预警由各地权属单位开展现场排查、处置并及时反馈处置结果。规范给出了报警指标的设定表 7.1-1。

表 7.1-1 规范报警阈值规定

序号	监测项目	报警等级	报警阈值规定
1	最高温度、最低温度、最大温差	二级（一般）	达到 1.2 倍设计值
		三级（轻微）	达到 1.0 倍设计值
2	风速、风向	一级（严重）	桥面 10min 平均风速达到桥面设计基准风速
		二级（一般）	桥面 10min 平均风速达到 0.8 倍桥面设计基准风速
		三级（轻微）	桥面 10min 平均风速达到 25m/s
3	地震动加速度	一级（严重）	达到设计 E2 地震作用加速度峰值
		二级（一般）	达到设计 E1 地震作用加速度峰值
4	主梁竖向位移	一级（严重）	达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警
		二级（一般）	达到 0.8 倍设计值
5	支座位移	一级（严重）	绝对值达到设计值
		二级（一般）	绝对值达到 0.8 倍设计值
6	梁端纵向位移	一级（严重）	绝对值达到设计值
		二级（一般）	绝对值达到 0.8 倍设计值
7	塔顶偏位	一级（严重）	达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警
		二级（一般）	达到 0.8 倍设计值
8	主梁关键截面静应变	二级（一般）	超过设计最不利工况计算值
		三级（轻微）	超过历史最大值
9	索力	一级（严重）	超过设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警
		二级（一般）	达到 0.95 倍设计值
10	主梁振动加速度	一级（严重）	幅值持续增大、呈现发散特征
		二级（一般）	10min 加速度均方根达到 50cm/s²
		三级（轻微）	10min 加速度均方根达到 31.5cm/s²，且持续时间超过 30min
11	裂缝	二级（一般）	结构性裂缝宽度超过规范限值或发展加速

序号	监测项目	报警等级	报警阈值规定
		三级（轻微）	出现结构性裂缝

本项目结合有限元分析软件 Midas Civil 对大桥建立了精细化有限元模型，并根据桥梁运营期的实际情况，建立了常见的荷载工况，得到了大桥的整体变形、应力分布及模态振型等相关分析结果。项目结合有限元模型计算结果、规范相关规定制定各测点阈值参考值。

7.1.1.1 风荷载监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，风速报警设定为三级报警：一级（严重），二级（一般），三级（轻微）。一级（严重）为桥面 10 分钟平均风速大于桥面设计风速，二级（一般）为桥面 10 分钟平均风速大于 0.8 倍桥面设计风速，三级（轻微）为桥面 10 分钟平均风速大于 25m/s。风荷载监测阈值表如下：

表 7.1-2 风荷载监测阈值表 单位（m/s）

序号	监测点位置	设计值	一级（严重）	二级（一般）	三级（轻微）
1	176m 边跨跨中	30.7	30.7	25.6	25
2	主塔塔顶	30.7	30.7	25.6	25

7.1.1.2 地震加速度监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，地震报警设定为二级报警：一级（严重），二级（一般）。一级（严重）为达到设计 E2 地震作用加速度峰值，二级（一般）为达到设计 E1 地震作用加速度峰值。本桥位于徐州市主城区东部，查《中国地震动参数区划图》（GB18306-2015）知该区地震峰值加速度按 0.1g，反应谱特征周期 0.45s，地震动监测阈值表如下：

表 7.1-3 地震动监测阈值表 单位（cm/s²）

序号	监测点位置	设计值	一级（严重）	二级（一般）	三级（轻微）
1	主塔承台处	\	251.6	59.78	\

7.1.1.3 主梁竖向位移监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，主梁竖向

位移报警设定为二级报警：一级（严重），二级（一般）。一级（严重）为达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警，二级（一般）为达到 0.8 倍设计值。主梁竖向位移监测阈值表如下：

表 7.1-4 主梁竖向位移监测阈值表			单位（mm）		
序号	监测点位置	模型计算值	一级 （严重）	二级 （一般）	三级 （轻微）
1	176m 边跨 1/4 跨处	83.1	83.1	66.48	\
2	176m 边跨 1/2 跨处	62.04	62.04	49.63	\
3	176m 边跨 3/4 跨处	23.22	23.22	18.58	\
4	192m 边跨 1/4 跨处	23.72	23.72	18.98	\
5	192m 边跨 1/2 跨处	67.61	67.61	54.09	\
6	192m 边跨 3/4 跨处	96.71	96.71	77.37	\

7.1.1.4 支座位移监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，支座位移报警设定为二级报警：一级（严重），二级（一般）。一级（严重）为绝对值达到设计值，二级（一般）为绝对值达到 0.8 倍设计值。支座位移监测阈值表如下：

表 7.1-5 支座位移监测阈值表			单位（mm）		
序号	监测点位置	设计值	一级 （严重）	二级 （一般）	三级 （轻微）
1	176m 跨边墩支座	\	20	16	\

7.1.1.5 梁端纵向位移监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，梁端纵向位移报警设定为二级报警：一级（严重），二级（一般）。一级（严重）为绝对值达到设计值，二级（一般）为绝对值达到 0.8 倍设计值。梁端纵向位移监测阈值表如下：

表 7.1-6 梁端纵向位移监测阈值表			单位（mm）		
序号	监测点位置	模型计算值	一级 （严重）	二级 （一般）	三级 （轻微）
1	176m 跨梁端纵向位移	57.62	57.62	46.10	\
2	192m 跨梁端纵向位移	62.84	62.84	50.27	\

7.1.1.6 塔顶偏位监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，塔顶偏位

报警设定为二级报警：一级（严重），二级（一般）。一级（严重）为达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警，二级（一般）为达到 0.8 倍设计值。塔顶偏位监测阈值表如下：

表 7.1-7 塔顶偏位监测阈值表			单位（mm）		
序号	监测点位置	模型计算值	一级 （严重）	二级 （一般）	三级 （轻微）
1	主塔塔顶-横向	33.78	33.78	27.02	\
2	主塔塔顶-纵向	45.34	45.34	36.27	\

7.1.1.7 主梁关键截面静应变监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，主梁关键截面静应变报警设定为二级报警：二级（一般），三级（轻微）。二级（一般）为超过设计最不利工况计算值，三级（轻微）为超过历史最大值。主梁关键截面静应变监测阈值表如下：

表 7.1-8 主梁关键截面静应变监测阈值表			单位（MPa）（拉正压负）		
序号	监测点位置	模型计算值	一级 （严重）	二级 （一般）	三级 （轻微）
1	176m 边跨 1/4 跨处	-5.69~5.78	\	-5.69~5.78	\
2	176m 边跨 1/2 跨处	-3.13~3.06	\	-3.13~3.06	\
3	176m 边跨 3/4 跨处	-2.14~4.21	\	-2.14~4.21	\
4	192m 边跨 1/4 跨处	-1.94~4.89	\	-1.94~4.89	\
5	192m 边跨 1/2 跨处	-3.78~2.71	\	-3.78~2.71	\
6	192m 边跨 3/4 跨处	-5.93~4.54	\	-5.93~4.54	\

7.1.1.8 主塔关键截面静应变监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，主梁关键截面静应变报警设定为二级报警：二级（一般），三级（轻微）。二级（一般）为超过设计最不利工况计算值，三级（轻微）为超过历史最大值。主梁关键截面静应变监测阈值表如下：

表 7.1-9 主塔关键截面静应变监测阈值表			单位（MPa）（拉正压负）		
序号	传感器编号	模型计算值	一级 （严重）	二级 （一般）	三级 （轻微）
1	主塔北侧塔柱南侧壁	±1.55	\	±1.55	\
2	主塔北侧塔柱西侧壁	±1.68	\	±1.68	\

序号	传感器编号	模型计算值	一级 (严重)	二级 (一般)	三级 (轻微)
3	主塔北侧塔柱北侧壁	±1.76	\	±1.76	\
4	主塔南侧塔柱东侧壁	±1.76	\	±1.76	\
5	主塔南侧塔柱西侧壁	±1.66	\	±1.66	\
6	主塔南侧塔柱北侧壁	±1.56	\	±1.56	\

7.1.1.9 索力监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，索力报警设定为二级报警：一级（严重），二级（一般）。一级（严重）为超过设计值或一个月

内出现 10 次以上二级报警，二级（一般）为达到 0.95 倍设计值。索力监测阈值表如下：

表 7.1-10 索力监测阈值表单位（KN）

序号	传感器编号	模型计算值	一级 (严重)	二级 (一般)	三级 (轻微)
1	主桥西侧 S29#拉索	5040	5040	4788	\
2	主桥西侧 N29#拉索	5040	5040	4788	\
3	主桥西侧 S28#拉索	5122	5122	4866	\
4	主桥西侧 N28#拉索	5122	5122	4866	\
5	主桥西侧 S13#拉索	4325	4325	4109	\
6	主桥西侧 N13#拉索	4325	4325	4109	\
7	主桥西侧 S12#拉索	4225	4225	4014	\
8	主桥西侧 N12#拉索	4225	4225	4014	\
9	主桥东侧 S12#拉索	4240	4240	4028	\
10	主桥东侧 N12#拉索	4240	4240	4028	\
11	主桥东侧 S13#拉索	4350	4350	4133	\
12	主桥东侧 N13#拉索	4350	4350	4133	\
13	主桥东侧 S28 拉索	4520	4520	4294	\
14	主桥东侧 N28#拉索	4520	4520	4294	\
15	主桥东侧 S29 拉索	4270	4270	4057	\
16	主桥东侧 N29#拉索	4270	4270	4057	\
17	主桥西侧 N2#拉索	2428	2428	2307	\
18	主桥西侧 S2#拉索	2428	2428	2307	\
19	主要东侧 N2 拉索	2338	2338	2221	\
20	主要东侧 S2 拉索	2338	2338	2221	\

7.1.1.10 结构振动监测

依据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》，结构振动监测报警设定为三级报警：一级（严重），二级（一般），三级（轻微）。一级（严重）

为幅值持续增大、呈现发散特征，加速度均方根大于 50cm/s²，二级（一般）为 10min 加

速度均方根达到 50cm/s²，三级（轻微）为 10min 加速度均方根达到 31.5cm/s² ，且持续

时间超过 30min。结构振动监测阈值表如下：

表 7.1-11 结构振动监测阈值表 单位（cm/s²）

序号	监测点位置	一级 (严重)	二级 (一般)	三级 (轻微)
1	176m 边跨 1/4 跨处主梁	>50（幅值持续增大、呈现发散特征）	>50	31.5 （持 30min）
2	176m 边跨 1/2 跨处主梁			
3	176m 边跨 3/4 跨处主梁			
4	192m 边跨 1/4 跨处主梁			
5	192m 边跨 1/2 跨处主梁			
6	192m 边跨 3/4 跨处主梁			
7	桥塔塔顶			

7.1.2 监测报警处理流程

根据《江苏省城市生命线安全工程运行监测报警预警指南（修订版）》中报警预警

处置相关要求，监测系统报警、预警及处置流程应进行分级管理，明确报警核实、预警

研判和应急响应职责。报警与预警处置措施可总结如下：

（1）报警阶段处置措施

监测设备触发报警后，首先进入报警核实阶段。各地权属单位负责对报警信息进行

接收、核实及初步判断，根据监测数据变化情况、现场检查结果及设备运行状态，确认

报警信息的真实性，并判定报警等级。

报警采用分级管理机制，按照严重程度由高到低划分为：

一级报警（严重）；

二级报警（一般）；

三级报警（轻微）。

报警处置过程中，应结合人工巡查、现场检查、数据分析、模型研判及专家意见等

方式开展综合判断。对于同一设备持续触发且未消警的同类型、同等级报警，应按照峰

值报警值进行信息合并，避免重复报警，并形成统一处置记录。

若在规定核实时间内完成现场核查并确认报警为误报，应及时进行消警处理；若确

认报警信息真实，应进一步开展风险研判，判断是否需要升级为预警，并按照预警流程启动后续响应措施。

（2）预警阶段处置措施

当报警信息经核实后，判定可能对桥梁结构安全、设施运行或人员安全造成影响时，应由相关权属单位、行业主管部门开展综合研判，并根据风险影响程度发布预警信息。

预警阶段主要开展以下工作：

1、风险评估与信息发布

结合监测数据变化趋势、结构状态、现场检查情况及历史运行数据，对风险发展趋势进行综合分析，确定预警等级，并及时向相关责任单位发布预警信息。

2、联动响应与现场处置

根据预警等级启动相应响应机制，组织养护单位、管理部门及相关专业力量开展现场核查和风险控制措施，包括：

- 1）加强桥梁现场巡查和重点部位检查；
- 2）对异常监测指标进行持续跟踪；
- 3）必要时采取交通管制、限载限行、现场警戒等临时措施；
- 4）开展专项检测或专家技术评估。

3、风险消除与闭环管理

完成风险处置后，应对监测数据、现场情况及处置结果进行复核，确认风险解除后完成预警解除，并形成完整的报警—研判—处置—反馈闭环管理流程。

（3）总体应急处置原则

监测报警、预警与处置工作应遵循“以人为本、安全预防、分级响应、联动处置、属地为主”的原则，建立权属单位、行业主管部门及相关部门协同联动机制。报警主要用于发现异常并核实确认，预警主要用于风险研判和启动应急响应。通过报警信息快速识别、预警风险及时发布以及多部门协同处置，实现桥梁安全风险的主动管控和闭环管理。

7.1.3 数据分析内容

运维期间，监测数据采用桥端工控机定期拷贝方式进行获取，常规情况下按每月 1

次的频率开展数据拷贝；在极端天气、突发事件、异常报警或其他特殊事件期间，根据实际需要于事件发生当日及时完成数据拷贝，确保监测数据的完整性和时效性。

基于获取的监测数据，定期开展数据分析与评估工作，形成月报、年报及特殊事件报告。其中月报用于按月反映监测对象的运行状态与异常变化趋势，年报用于按年度总结结构性能的长期演变规律，特殊事件报告则针对突发异常、报警密集或极端环境等情况进行专项分析。所有报告均需在数据预处理的基础上剔除错误数据，确保能够准确、真实地反映监测对象的实际状态，核心内容应重点包括异常信息统计（如异常场景、异常设备、报警次数、异常极值及报警阈值）和异常事件记录（如异常事件名称、起止日期、事件描述及处治措施）。此外，数据分析报告应作为后续检查检测、养护维修及加固改造的重要参考依据，对于报告中反映的各类异常报警及异常事件，相关单位和管理人员应当予以密切关注并高度重视。

7.2 监测系统维护

本次和平大桥监测系统升级改造后系统运维期为 5 年。运维期应安排专人常驻现场进行维护工作。

7.2.1 监测系统软件维护

（1）软件系统日常检查包括以下内容：

- a. 制定远程巡检计划，定期进行维护，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. 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；
- b. 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。

7.2.2 监测系统硬件维护

（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. 对生命线系统平台用户界面展示的监测数据及桥梁现场机柜的计算机设备和工控机状态进行检查，并进行记录；
- d. 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. 制定定期维护计划，特殊情况下应急维护；
- b. 对强（台）风、超限车辆过桥等可预见的特殊事件发生前对系统进行专项维护；
- c. 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；
- d. 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；
- e. 对维护发现的问题 24h 内快速响应并进行检查。

8 本项目升级、改造重点

在桥梁健康监测系统升级改造工程中，“升级”与“改造”是两个界定清晰、侧重点不同的施工及技术优化范畴，二者相辅相成但核心作业内容、实施对象、工程性质差异显

著。本项目监测系统的升级以监测技术提质、设备性能优化、桥端采集和传输系统架构升级为主；改造以硬件重构、设施整改为主，侧重实体工程改动，具体内容如下：

8.1 升级重点

1. 监测设备精度升级

针对原有监测设备精度不足、参数滞后、性能衰减但设备安装点位、布设数量无需调整的情况，将原有普通精度监测设备同点位替换为更高精度、高稳定性、高采样率的新型监测设备，属于典型的升级范畴。例如将常规位移计、应变计、倾角仪、温湿度传感器、风速风向仪等基础设备，替换为更高精度传感器，从硬件源头提升监测系统整体性能。

2. 桥端采集、传输升级

对桥梁健康监测数据采集软件、数据传输软件进行版本迭代与功能优化。包括老旧系统版本更新、兼容漏洞修复、操作界面优化、系统运行卡顿修复、多终端适配升级等，解决原有系统卡顿、闪退、兼容性差、操作繁琐等问题，保障系统运行的流畅性与稳定性。

3. 算力与配套性能升级

针对原系统数据存储不足、运算速度慢、网络传输延迟等问题，进行现场工控机算力扩容、存储硬盘扩容、网络带宽升级、数据传输模块优化等，提升海量监测数据的采集、传输、运算、存储效率，避免数据丢失、传输滞后、运算卡顿等问题。

8.2 改造重点

1. 测点与传感器布局改造

包括新增原有监测系统相较指南遗漏的传感器测点、拆除废弃无效测点、根据桥梁结构病害特点和新规范要求重新规划测点布局，彻底优化监测覆盖范围。

2. 线路与管网系统改造

对老化、破损、漏电、信号干扰严重的通讯线缆、信号传输线路、供电线路进行全线更换；重新规划管线敷设路径、新增防护管线、整改线路乱拉乱接问题，修复破损线

管、桥架，完善线路防水、防尘、防腐蚀防护措施。

3. 安装配套设施改造

对传感器安装支架、设备防护箱、机柜、检修平台等配套设施进行翻新、加固、更换和新增；修复锈蚀、变形、破损的安装构件，完善设备户外防护设施，保障监测设备长期稳定运行。

9 工程量清单

表 9-1 和平大桥结构健康监测系统新建项目工程量清单				
序号	名称	单位	数量	备注
1	系统设计费用	项	1	
2	系统硬件费用	项	1	
2.1	传感器设备			
2.1.1	温湿度计	台	2	1.温度传感器： ①量程：量程上限宜超出大气温度年极大值 30℃以上，量程下限宜低于年极小值 20℃以上； ②最大允许误差：±0.5℃ ③分辨力：≤0.1℃ 2.湿度传感器： ①量程：0～100%RH(非凝露) ②最大允许误差：±2% RH
2.1.2	风速风向仪	个	3	1.风速测试量程：>60m/s 2.最大允许误差：0.3 m / s
2.1.3	温度计	个	1	温度传感器： 1.量程：-30℃~+80℃ 2.测量精度：≤0.1℃ 3.最大允许误差：±0.5℃
2.1.4	光电挠度仪	套	4	1.测量精度：0.2mm（50 米测距） 2.工作温度：-30℃~+80℃
2.1.5	靶标	个	16	
2.1.7	位移计	个	2	1.最大允许误差：≤0.5%
2.1.8	倾角仪	个	2	1.测量范围：-5°~+5° 2.角度误差：≤0.02° 3.采样频率：≥1Hz
2.1.9	加速度计	个	37	1.量程：>±5.0 g 2.横向灵敏度：≤5% 3.频响范围：0Hz~100Hz

2.1.10	监控摄像头	个	18	1.像素：≥400 万 2.帧率：≥25FPS 3.动态范围：≥55dB 4.应具备自动光圈、变焦镜头、昼/夜自动转换功能、防护罩
2.1.11	振弦式应变计	个	24	1.应变传感器量程：≥1500με 2.分辨率：≤1με
2.2	控制设备与辅材			
2.2.1	现场采集工控机	台	1	1、CPU：主频≥2.5GHz；2、内存：≥8GB，可扩展；3、硬盘：≥1TB，可扩展；4、接口：≥2 个千兆网口；5、工作温度：-20℃-+70℃
2.2.2	电流采集模块	台	1	4-20mA
2.2.3	位移采集模块	台	1	0-5V
2.2.4	动态信号采集仪	台	1	1、通道:支持 128 通道；2、连续采样速率：200Hz；3、模数转换位数:24 位Σ-△A/D，频响范围：DC~30Hz。
2.2.5	动态信号采集通道	套	5	1、与动态信号采集仪配套；2、含 8 个采集通道。
2.2.6	静态信号采集仪	台	1	1、通道:支持 32 通道；2、通道测试时间：<3s；3、通讯方式：RS485、光纤；4、工作温度：-20~+60℃，防护等级：IP65。
2.2.7	静态信号采集通道	套	2	1、与静态信号采集仪配套；2、含 16 个采集通道。
2.2.8	串口服务器	台	1	1、传输速率：300bps-115.2Kbps；2、工作环境：-40℃-85℃；3、接口数量≥8。
2.2.9	光纤收发器	对	4	1、1 个 2.5Gbps 单纤 SC 口； 2、1 个 1Gbps/2.5Gbps RJ45 口；5VDC/0.4A 直流电源供电。
2.2.10	工业级交换机	个	1	1、标准：支持 IEEE802.3 10BASE-T 以太网；2、固定端口：≥8 个 0/100/1000M 自适应以太网端口；3、交换方式：存储-转发；4、背板带宽(Gbps):16Gbps；5、传输模式：全双工/半双工自适应；6、工作温度：-20℃~+70℃

2.2.11	工业级路由器	台	1	1、网口数量：不少于1WAN/LAN+2LAN；2、工作温度：-20℃~+70℃；3、工作湿度：5%~95%RH（无凝露）；4、防尘等级：IP30；5、无线标准：IEEE 802.11b/g/n, 2.4GHz；6、支持运营商：移动、电信、联通:2/3/4G
2.2.12	12V/24V 开关电源	个	5	12V/24V
2.2.13	硬盘录像机	台	1	16 路 NVR 网络
2.2.14	硬盘	块	6	4 TB
2.2.15	RVVP 4*0.5 信号线 缆	米	4000	RVVP 4*0.5
2.2.16	SYV 50-2-1 信号线 缆	米	2500	SYV 50-2-1
2.2.17	RVV 2*2.5 电力线缆	米	1500	RVV 2*2.5
2.2.18	RVV 2*1.5 电力线缆	米	500	RVV 2*1.5
2.2.19	GYXTW-8B1 光纤	米	500	GYXTW-8B1
2.2.20	UTP-11-5E-4P 网线	米	700	UTP-11-5E-4P
2.2.21	4G 断路器	个	4	1、63A(220V)；2、阻性负载≤11000W，感性负载≤5000W；3、远程控制：不限距离。
2.2.22	空气开关	个	4	2p C63A
2.2.23	镀锌钢管	米	1200	1、镀锌 DN32；
2.2.24	桥架	米	300	1、规格:80mm*80mm*1.2mm
2.2.25	立柱	个	2	定制（高度≥2000mm、直径≥50mm、厚度≥3mm）
2.2.26	数据采集外站机柜	个	1	长≥600mm，高≥1200mm，宽≥600mm；不锈钢材质；可放工控机、采集设备、交换机、硬盘录像机等设备，含空调，含铝合金滑槽
2.2.27	挂壁机柜	个	4	长≥300mm，高≥400mm，宽≥200mm；不锈钢材质；可放交换机、硬盘录像机等小型设备，含2个风扇，含挂墙或抱杆配件、铝合金滑槽
3	软件费用			
3.1	数据平台对接	项	1	1、接入物联网平台；2、接入生命线平台。
3.2	数据采集	项	1	含数据采集软件（自主研发）
3.3	数据传输	项	1	含数据传输软件（自主研发）

4	系统集成与调试			
4.1	硬件安装费	项	1	
4.2	系统试运行集成调试	项	1	
4.3	网络连通性测试与调试	项	1	
4.4	老旧设备拆除	测点 数	67	
4.5	工程车	台班	45	
4.6	登高车	台班	20	
4.7	交通组织	天	20	
4.8	网络通讯	年	5	
5	验收			
5.1	试运行分析报告	项	1	
5.2	系统硬件使用手册编制	项	1	
5.3	系统软件使用手册编制	项	1	
6	系统运维			
6.1	系统维护			
6.1.1	系统例行检查和硬件维护	年	5	运维期内，每日完成线上系统运营情况巡检，硬件每季度定期功能检查和故障修复
6.1.2	系统软件维护	年	5	运维期内软件每季度定期功能检查和故障修复
6.1.3	应急维修服务	年	5	运维期内在节假日、极端天气等时段对软硬件设备 24h 线上巡查及线下维护
6.1.4	工程车	台班	30	
6.2	数据分析			
6.2.1	月度数据分析报告	年	5	运维期内每月出具桥梁监测系统监测数据分析月度报告（每年 12 次）
6.2.2	年度数据分析报告	年	5	运维期内每年出具桥梁监测系统监测数据分析年度报告（每年 1 次）
6.2.3	特殊事件分析报告	年	5	运维期内在节假日、极端天气等时段出具桥梁监测系统监测数据特殊事件报告（每年不低于 3 次）
6.2.4	专项分析	年	5	运维期内每年依据桥型特点进行专项分析，分析桥梁结构安全（每年 1 次）

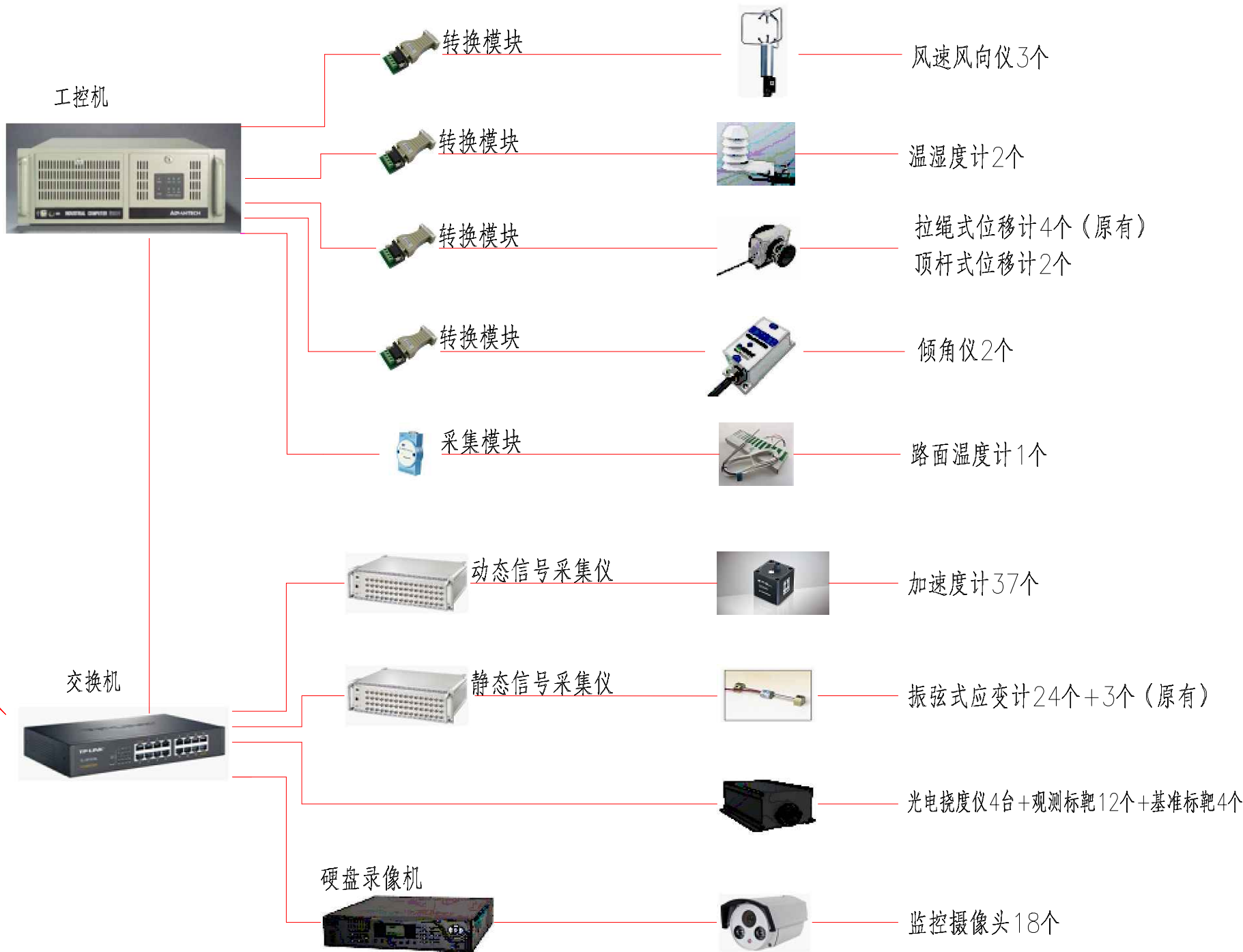
6.2.5	异常报警处置	年	5	监测数据触发阈值时及时进行线 上线下处置
6.3	运维期技术支持			
6.3.1	运维期技术支持	项	1	运维期内 24h 监测系统软硬件技 术支持
7	安全生产费	项	1	
8	工程监理费用（建安 费*2.01%）	项	1	



同步传输至物联网平台

系统拓扑图

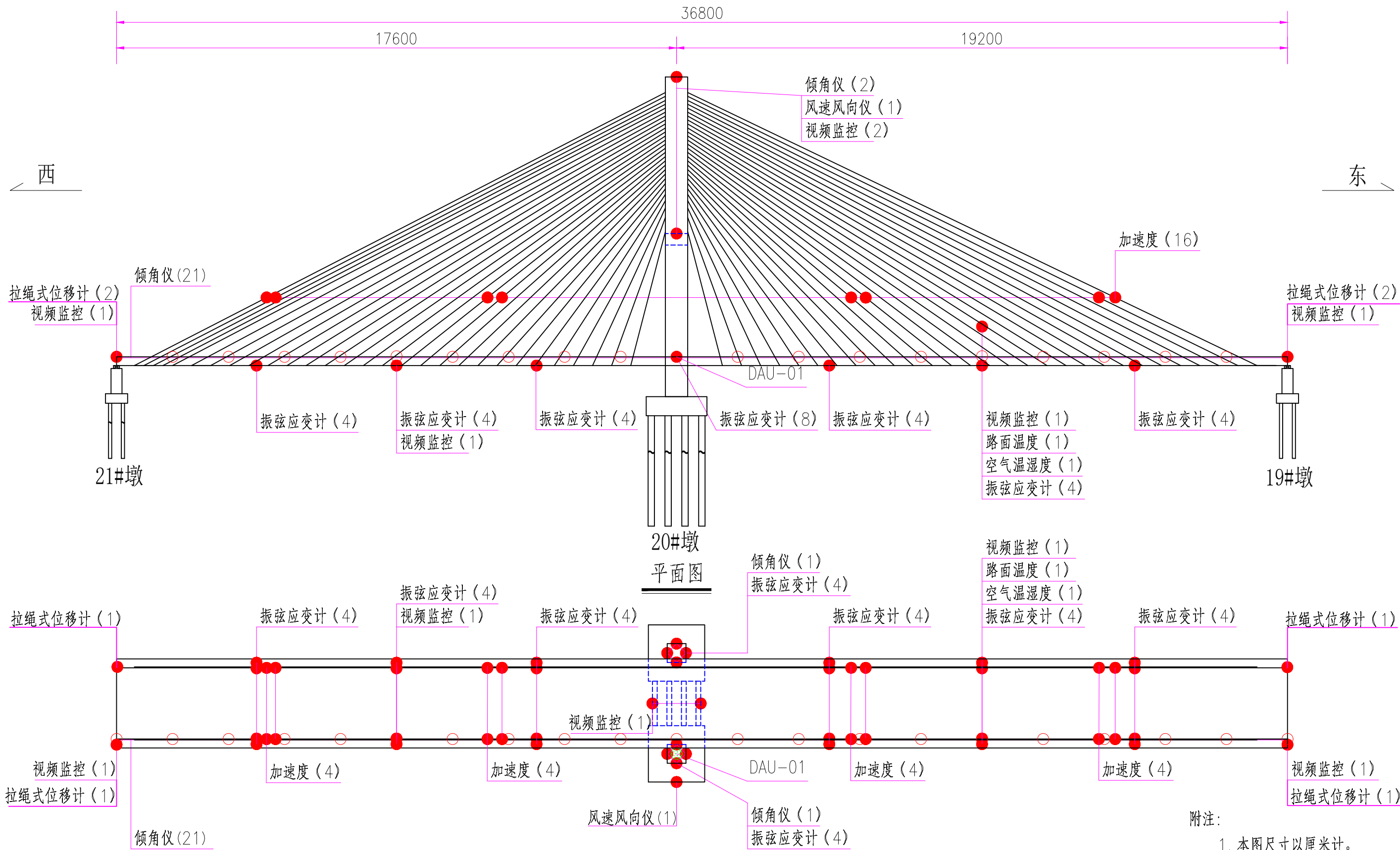
数据采集单元DAU-01



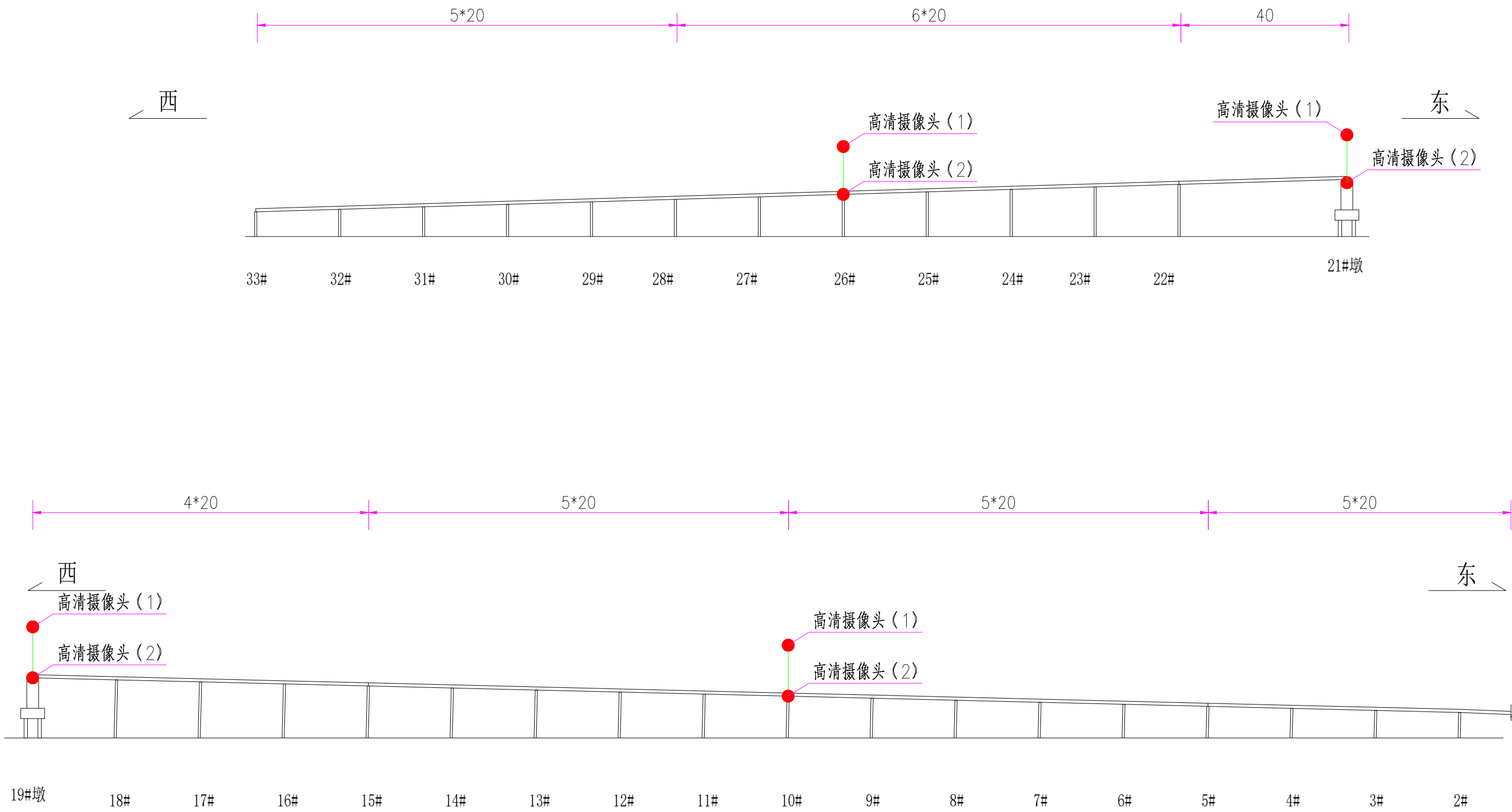
DAU-01外站传感器编号对应表（二）													
其他 交通工程 建筑 道路 专业会签	桥梁名称	采集设备编号	监测指标	传感器编号	位置描述	备注							
	DAU-01	位移采集模块	梁端位移	HPDQ-DIS-E17-002-01	19#墩南侧	保留							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G03-001-01~02	主桥西侧N29#（N28#）拉索	更换							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G03-002-01~02	主桥西侧S29#（S28#）拉索	更换							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G06-001-01~02	主桥西侧N13#（N12#）拉索	更换							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G06-002-01~02	主桥西侧S13#（S12#）拉索	更换							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G11-001-01~02	主桥东侧N13#（N12#）拉索	更换							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G11-002-01~02	主桥东侧S13#（S12#）拉索	更换							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G15-001-01~02	主桥东侧N29#（N28#）拉索	更换							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G15-002-01~02	主桥东侧S29#（S28#）拉索	更换							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G10-001（002）-01	主桥东侧N2#（S2#）拉索	新增							
		动态信号采集仪	斜拉索振动/索力	HPDQ-VIC-G08-001（002）-01	主桥西侧N2#（S2#）拉索	新增							
		R485-232	主梁竖向位移	光电挠度仪	主塔西侧北（南）侧	更换							
		R485-232	主梁竖向位移	HPDQ-DIS-G03-001（002）-01	主桥西侧1/4跨北（南）侧	更换							
		R485-232	主梁竖向位移	HPDQ-DIS-G05-001（002）-01	主桥西侧1/2跨北（南）侧	更换							
		R485-232	主梁竖向位移	HPDQ-DIS-G07-001（002）-01	主桥西侧3/4跨北（南）侧	更换							
		R485-232	主梁竖向位移	基准靶	21#墩北（南）侧	更换							
		R485-232	主梁竖向位移	光电挠度仪	主塔东侧北（南）侧	更换							
		R485-232	主梁竖向位移	HPDQ-DIS-G11-001（002）-01	主桥东侧1/4跨北（南）侧	更换							
		R485-232	主梁竖向位移	HPDQ-DIS-G13-001（002）-01	主桥东侧1/2跨北（南）侧	更换							
R485-232	主梁竖向位移	HPDQ-DIS-G15-001（002）-01	主桥东侧3/4跨北（南）侧	更换									
浙江数智交院科技股份有限公司		和平大桥结构健康监测系统 升级改造项目施工图设计	DAU-01外站传感器编号对应表（二）	设计	杨世杰 杨世杰	复核	周超 周超	一审	陆潇雄 陆潇雄	二审	陈露晔 陈露晔	编号 图号	2026QT190269 SI-2-3

浙江数智交院科技股份有限公司	和平大桥结构健康监测系统 升级改造项目施工图设计	DAU-01外站传感器编号对应表（三）	设计	杨世杰	复核	周超	一审	陆潇雄	二审	陈露晔	编号	2026QT190269
				杨世杰		周超		陆潇雄		陈露晔	图号	SI-2-4

原系统总体布点图



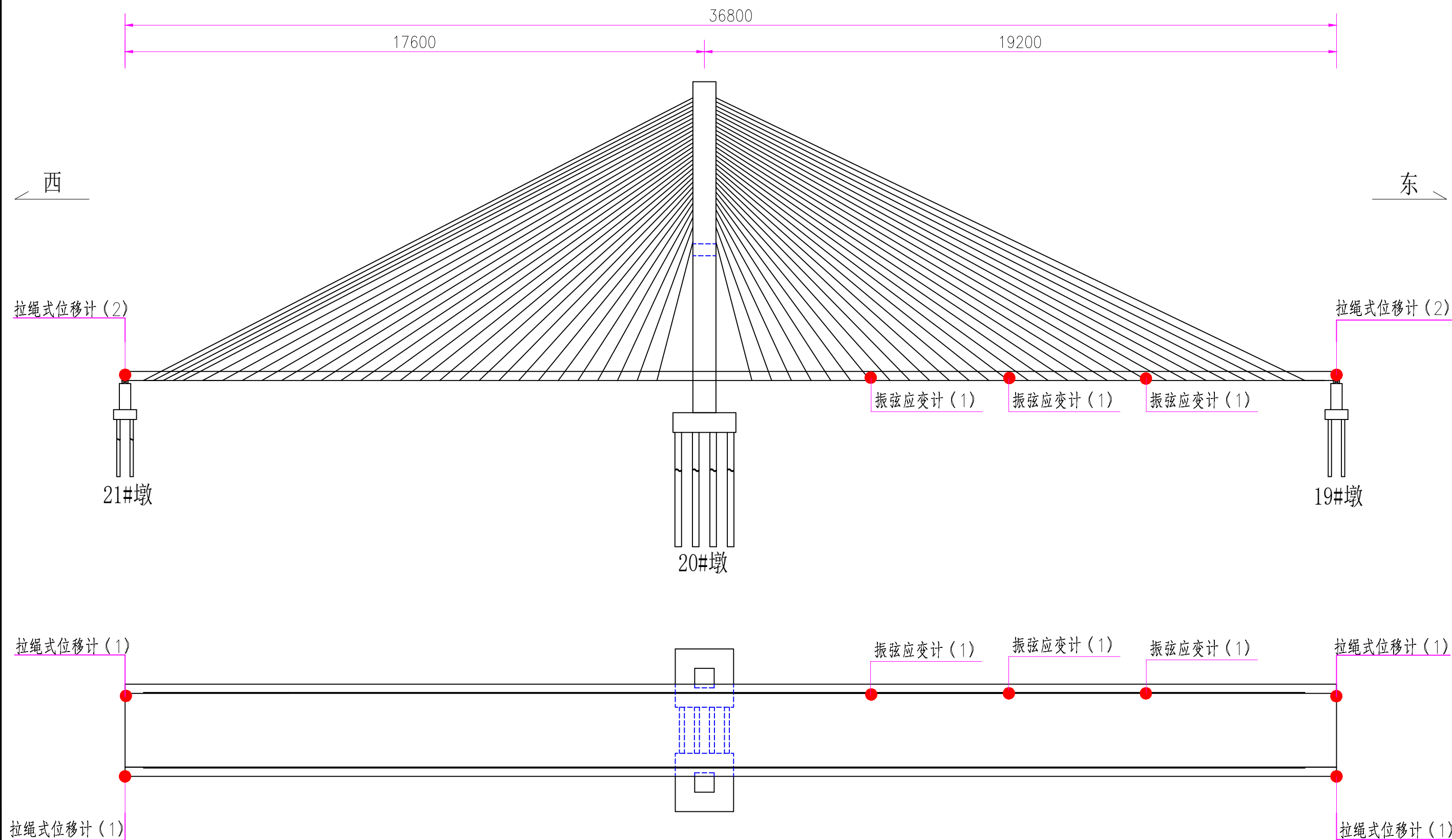
新增、更换传感器布点图（二）



附注：
1. 本图尺寸以厘米计。

浙江数智交院科技股份有限公司	和平大桥结构健康监测系 统升级改造项目施工图设计	新增、更换传感器布点图（二）	设计	杨世杰	复核	周超	一审	陆潇雄	二审	陈露晔	编号	2026QT190269
				杨世杰		周超		陆潇雄		陈露晔	图号	SI-3-3

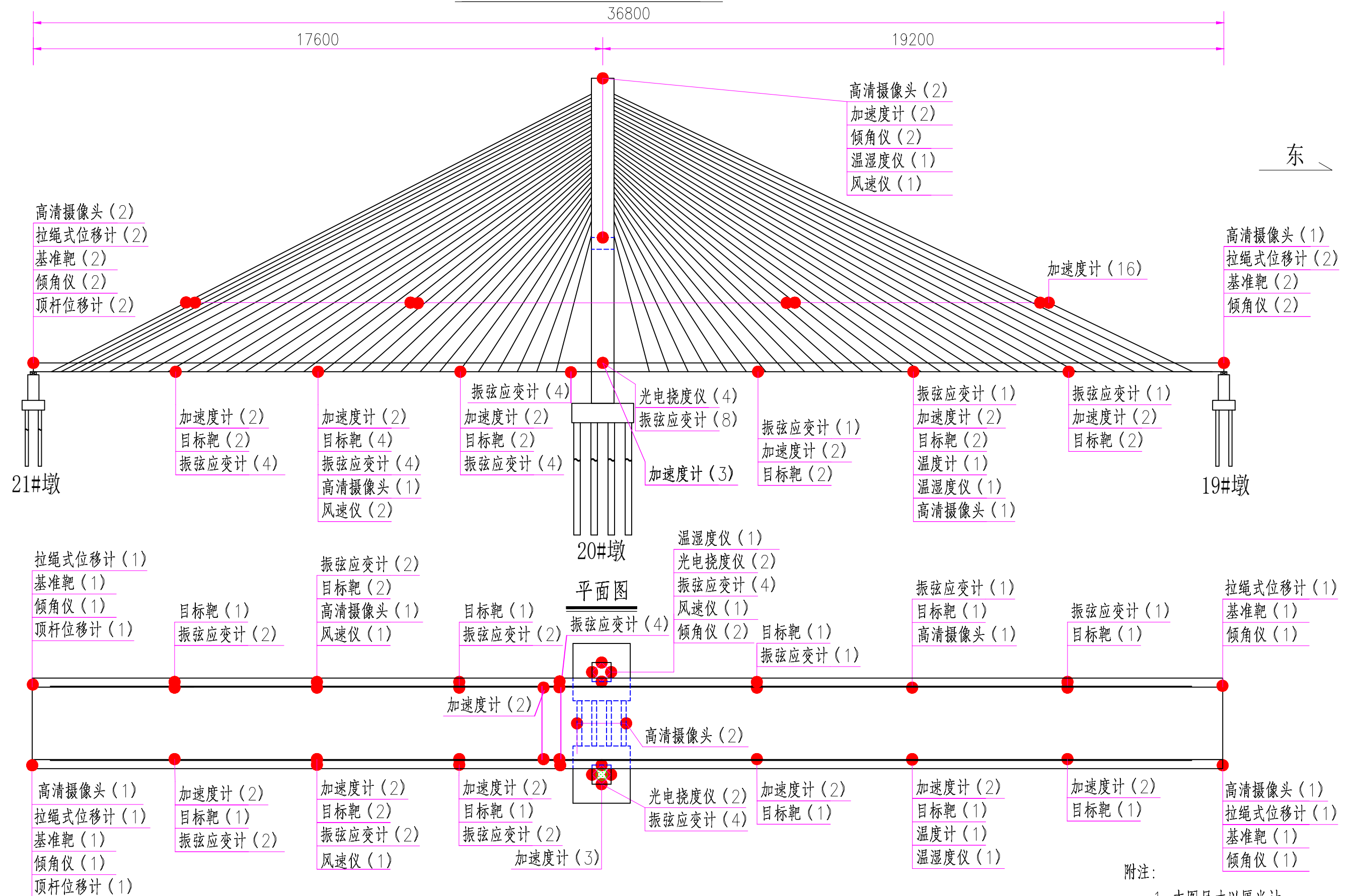
保留测点总体布点图



附注:

1. 本图尺寸以厘米计。

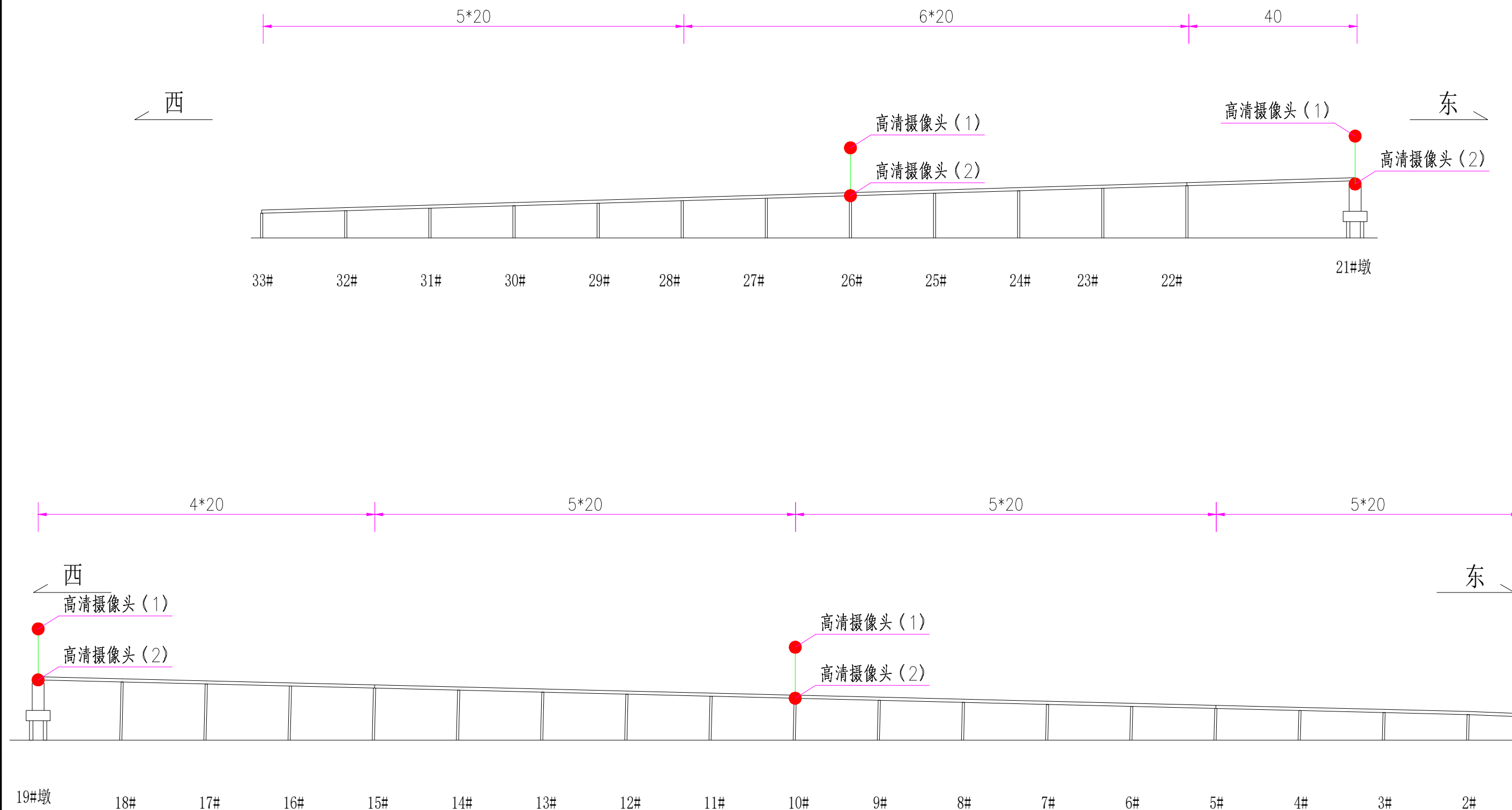
升级改造后系统总体布点图（一）



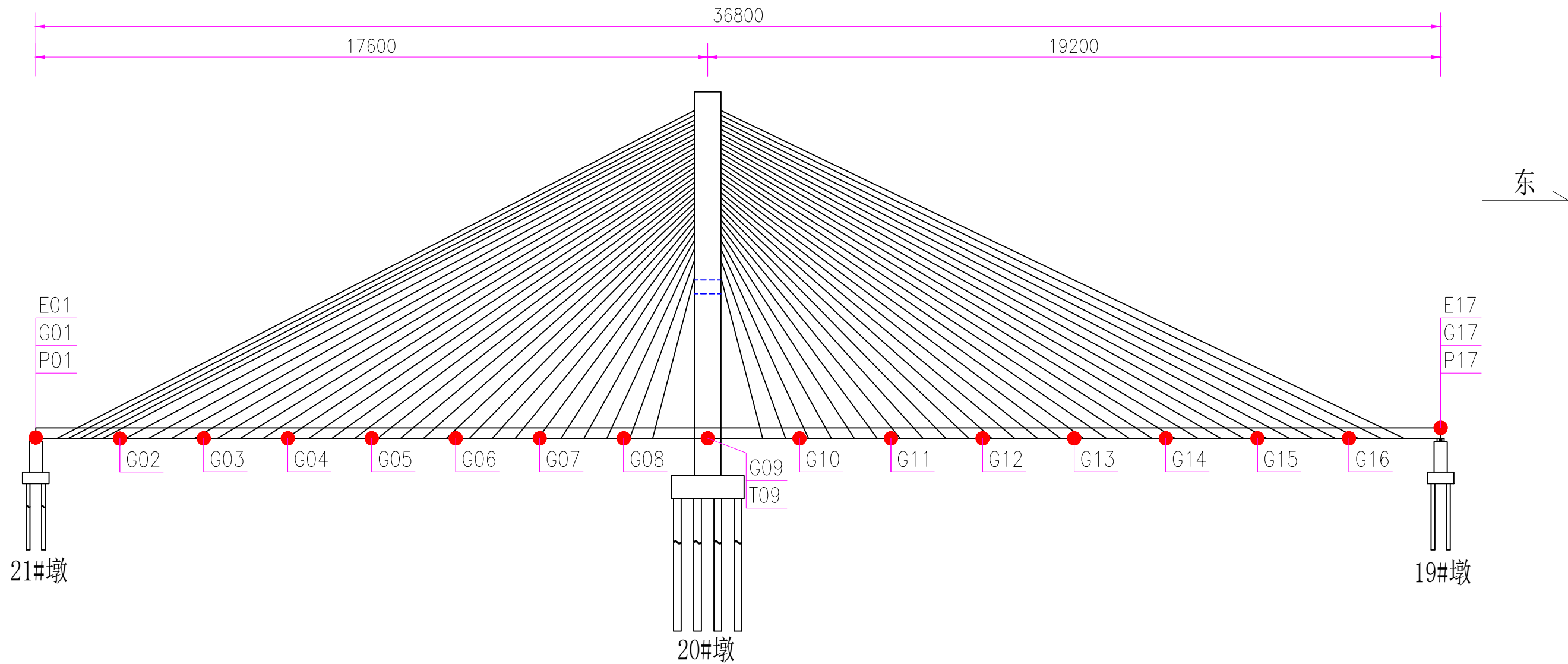
附注：

1. 本图尺寸以厘米计。

升级改造后系统总体布点图（二）



桥梁截面编号布置图（一）



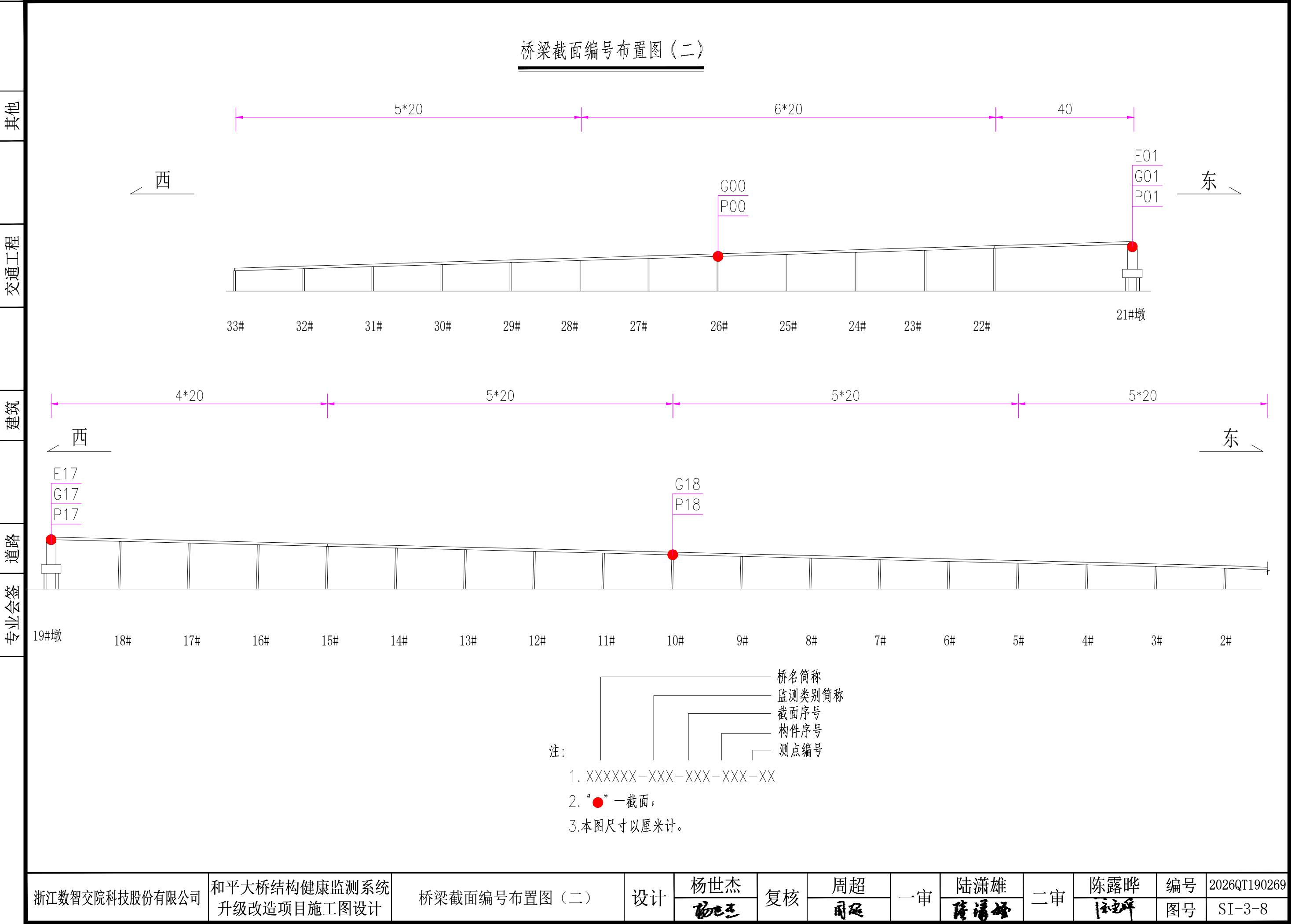
注：

1. XXXXXX-XXX-XXX-XXX-XX

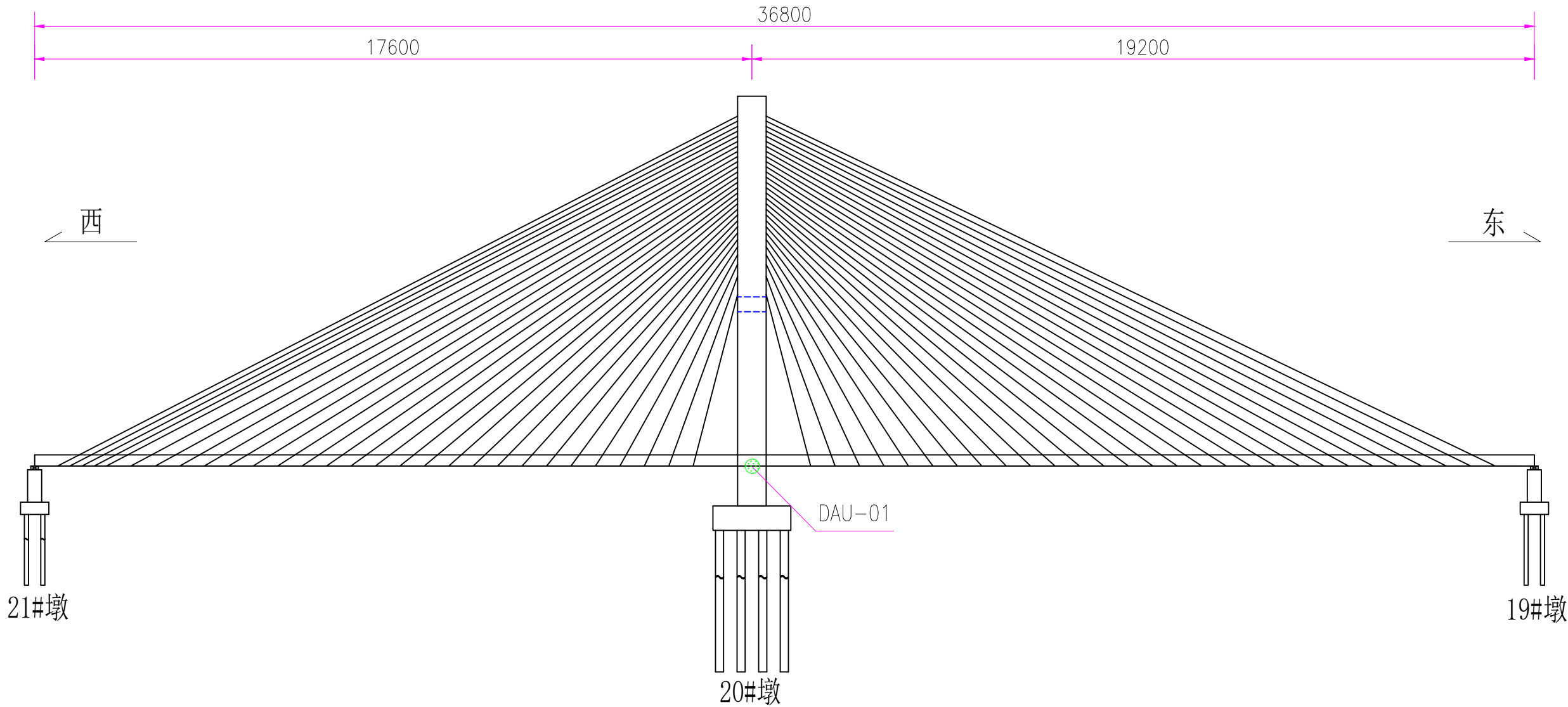
2. “●”一截面；

3. 本图尺寸以厘米计。

桥名简称
监测类别简称
截面序号
构件序号
测点编号

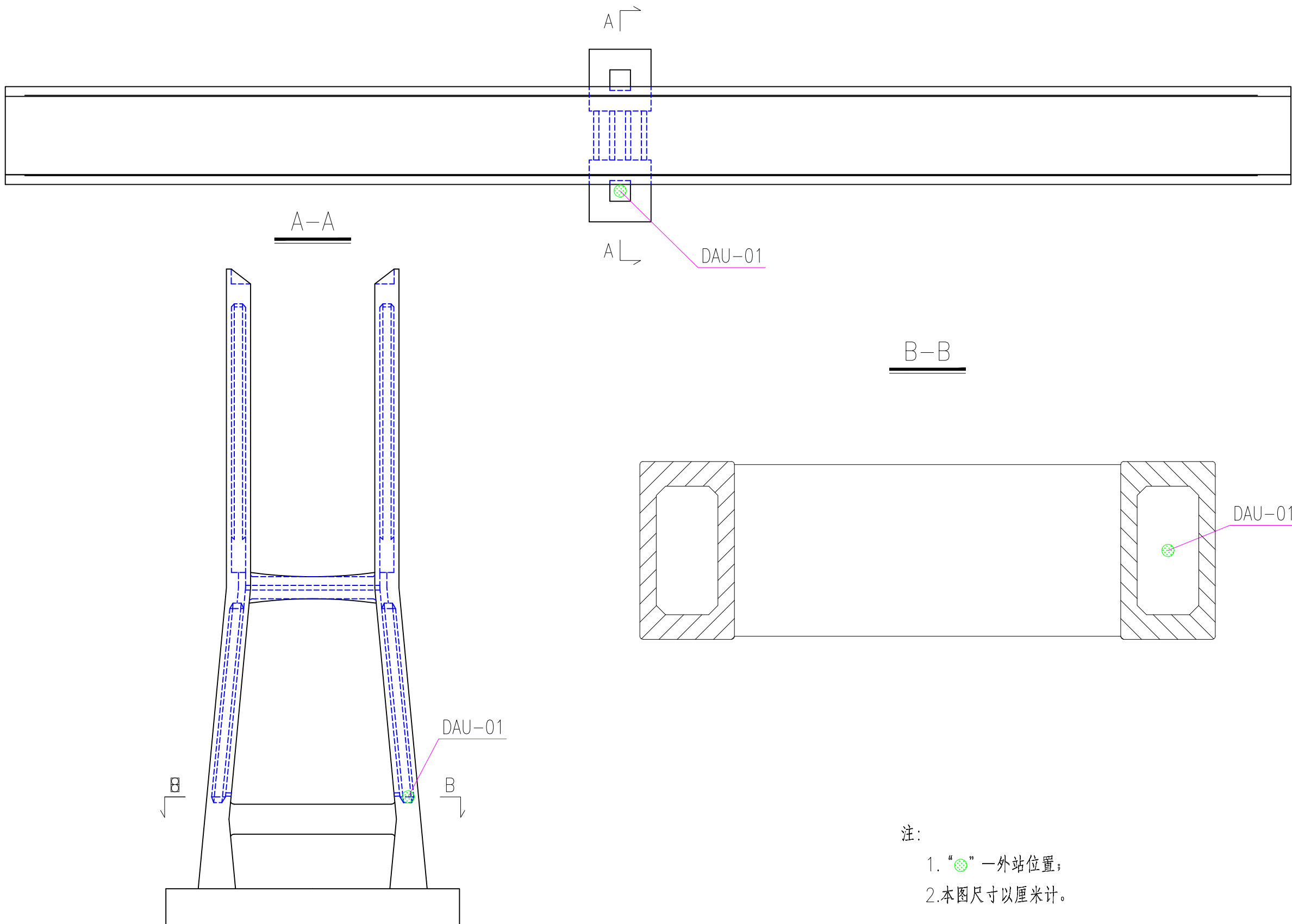


数据采集外站布点图

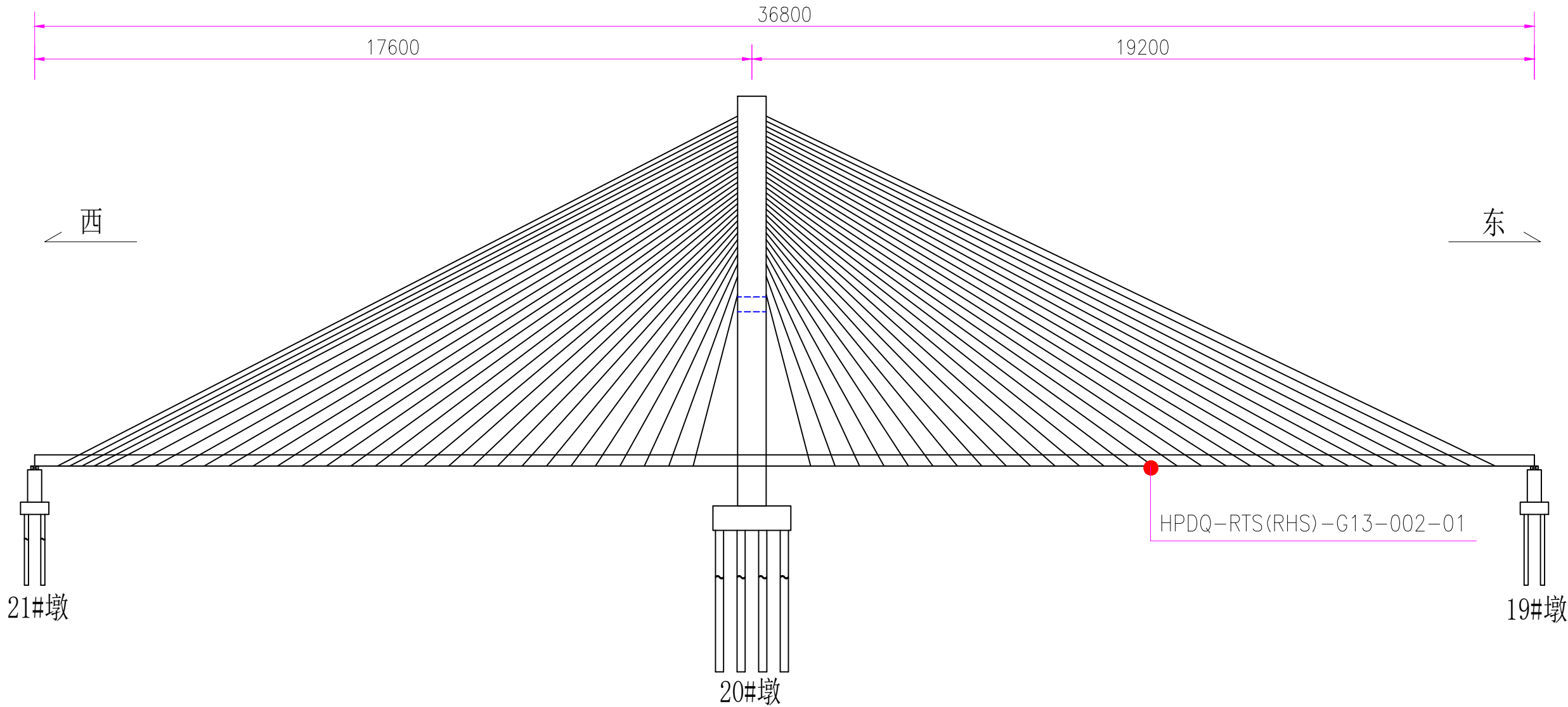


- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

数据采集外站布置图



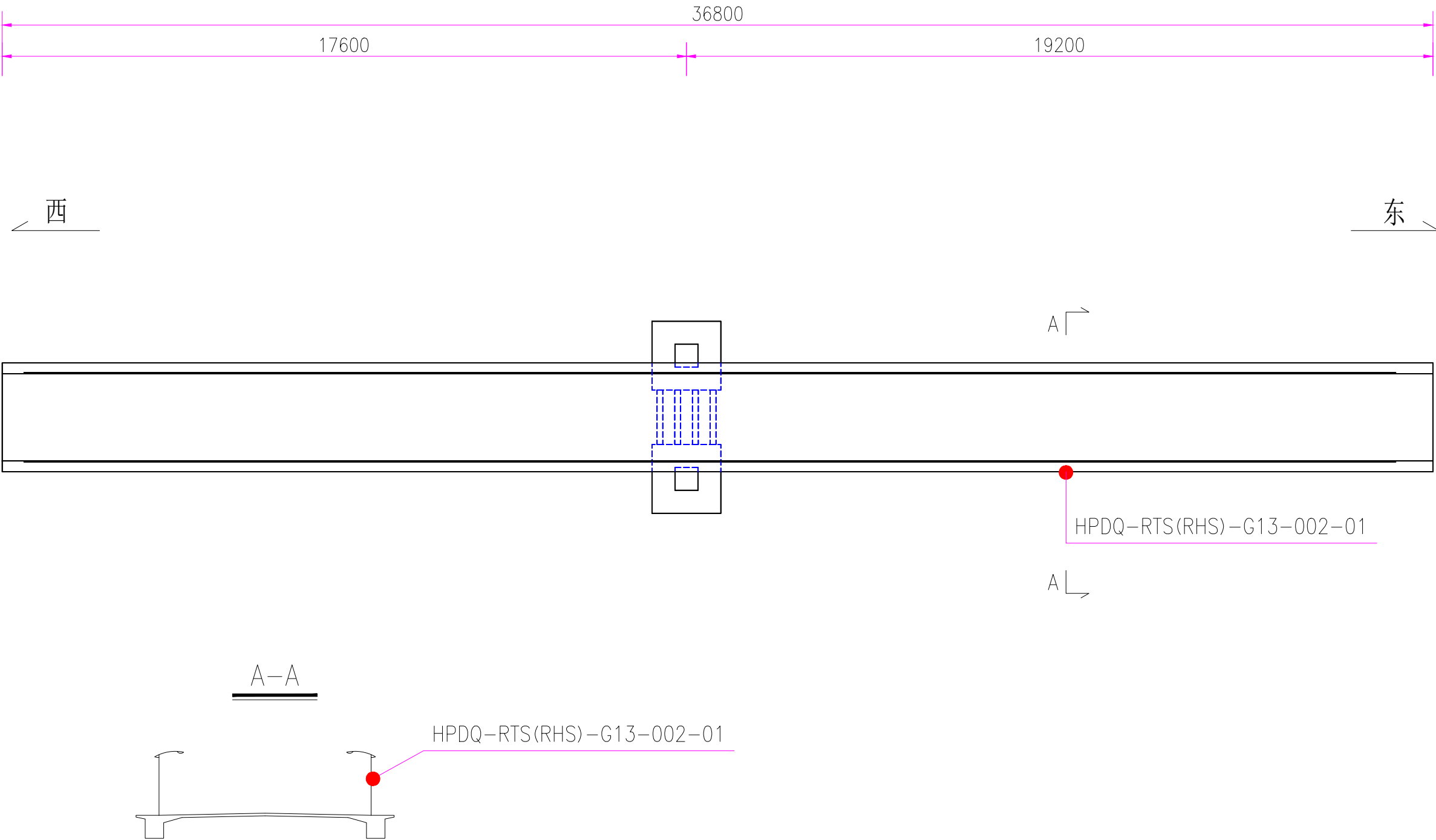
桥址区环境温湿度测点布点图



桥址区环境温湿度监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-RTS(RHS)-G13-002-01	主桥桥面东侧跨中南侧护栏外侧

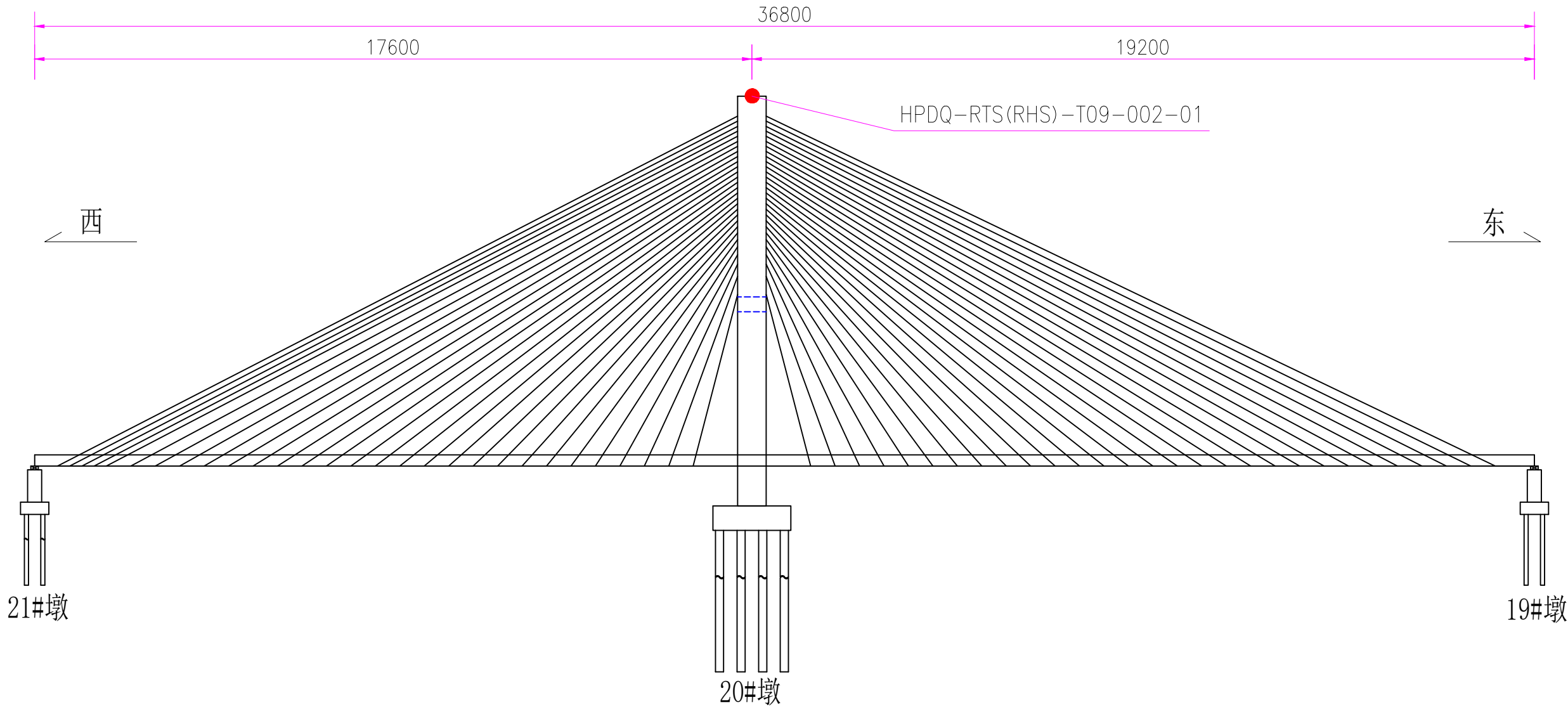
- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

桥址区环境温湿度测点布置图



- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

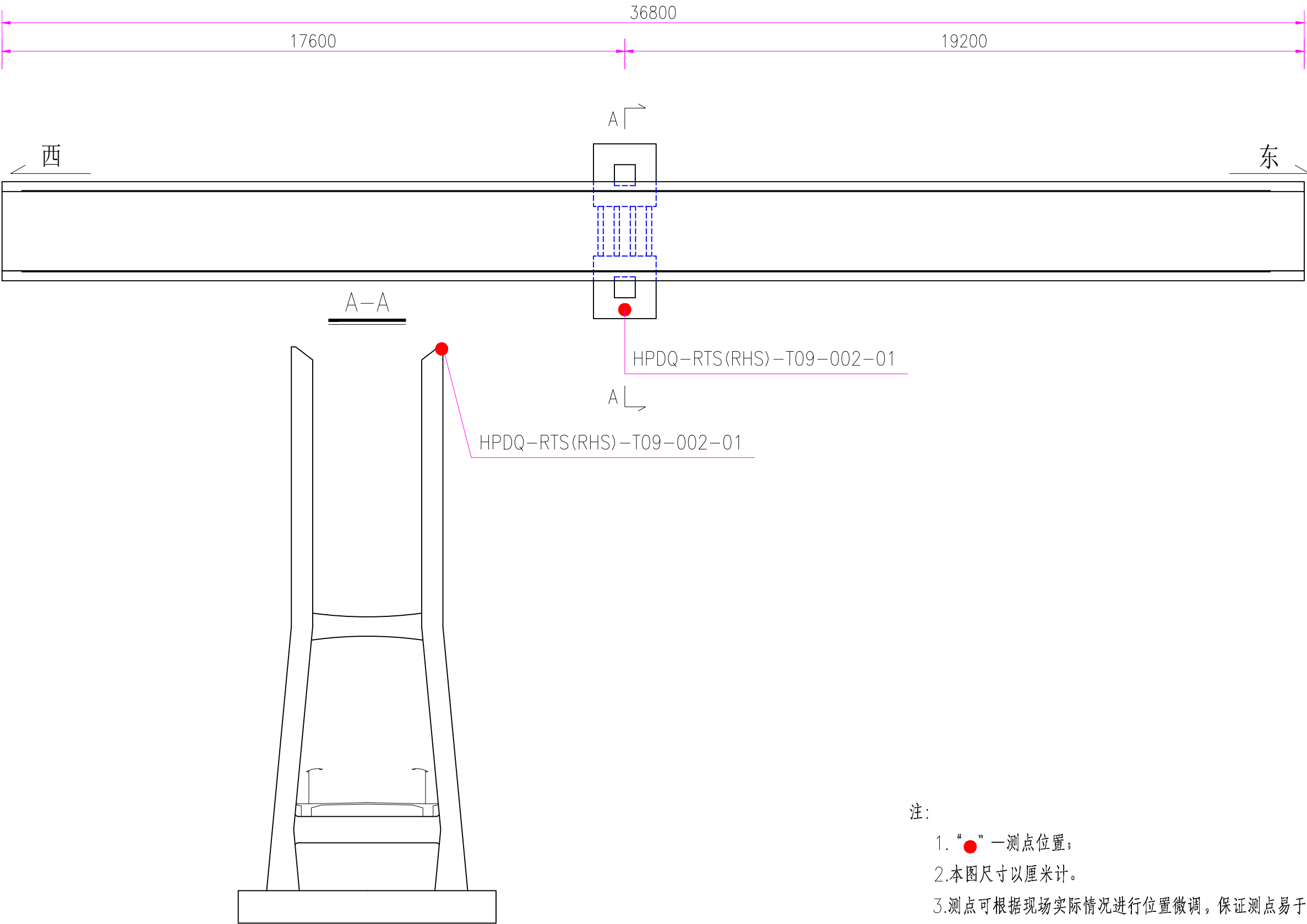
索塔锚固区环境温湿度测点布点图



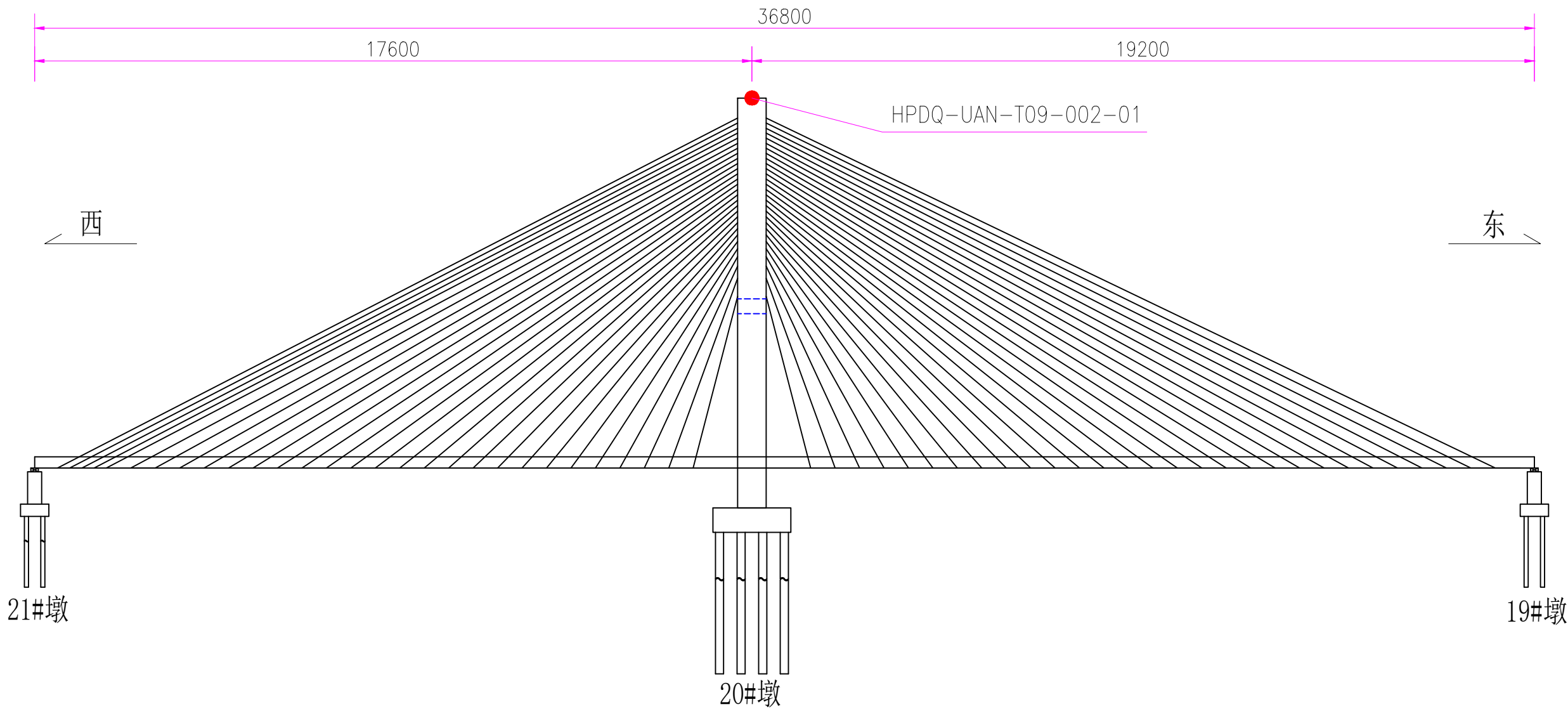
索塔锚固区环境温湿度监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-RTS(RHS)-T09-002-01	南侧主塔塔顶

- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2. 本图尺寸以厘米计。
 - 3. 测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

索塔锚固区环境温湿度测点布置图



塔顶风速风向测点布点图



塔顶风速风向监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-UAN-T09-002-01	南侧主塔塔顶

- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

其他

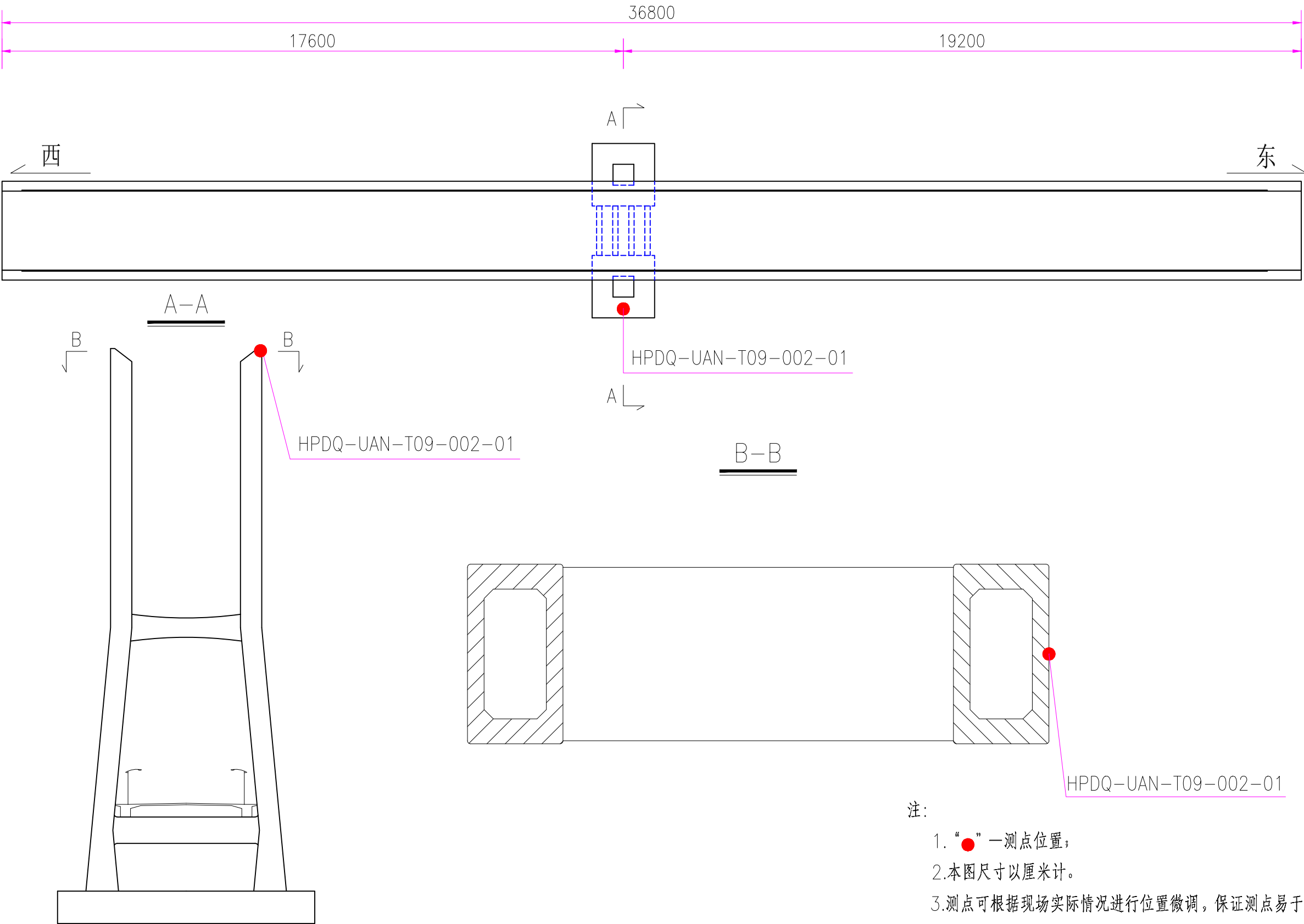
交通工程

建筑

道路

专业会签

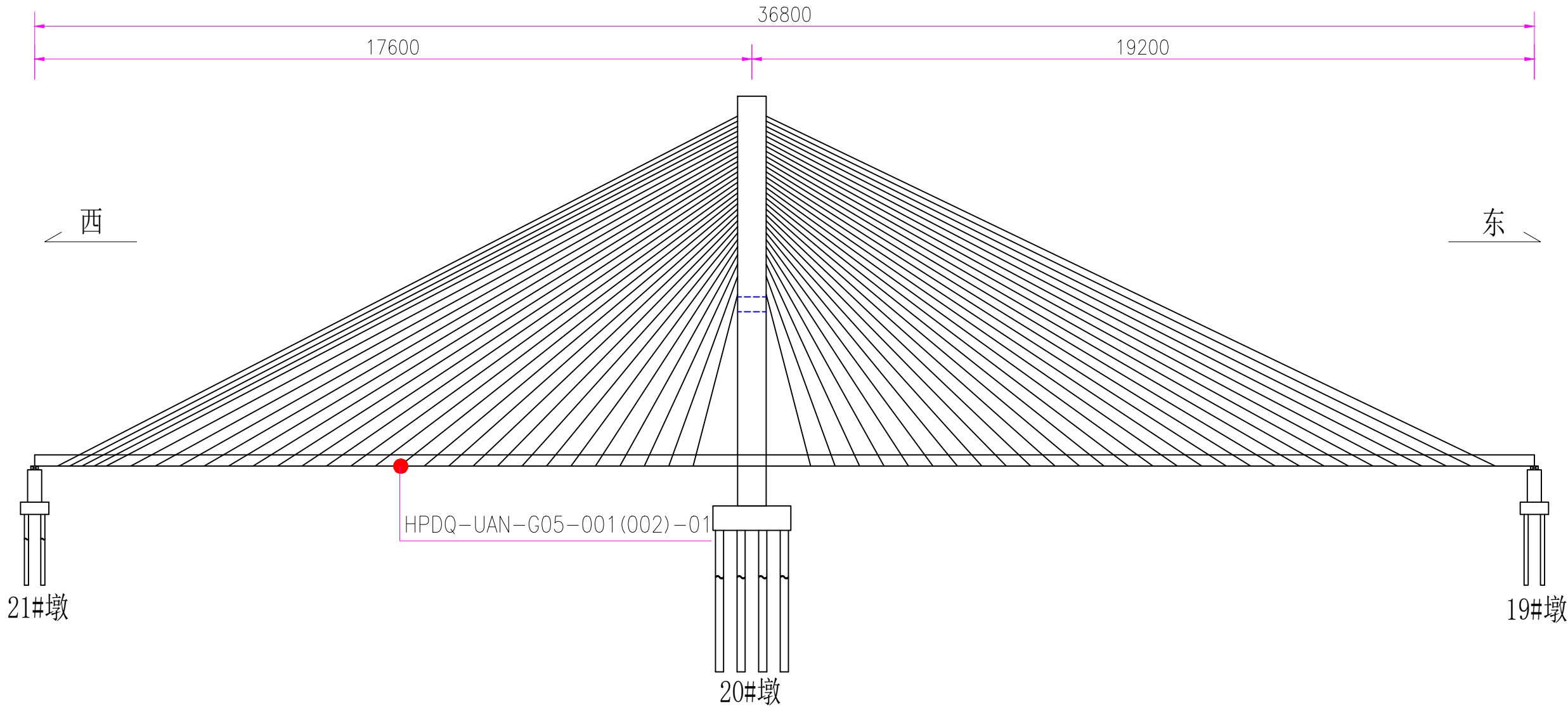
塔顶风速风向布置图



- 注:
- “●”一测点位置;
 - 本图尺寸以厘米计。
 - 测点可根据现场实际情况进行位置微调,保证测点易于安装。

浙江数智交院科技股份有限公司	和平大桥结构健康监测系 统升级改造项目施工图设计	塔顶风速风向测点布置图	设计	杨世杰	复核	周超	一审	陆潇雄	二审	陈露晔	编号	2026QT190269
				杨世杰		周超		陆潇雄		陈露晔	图号	SI-3-16

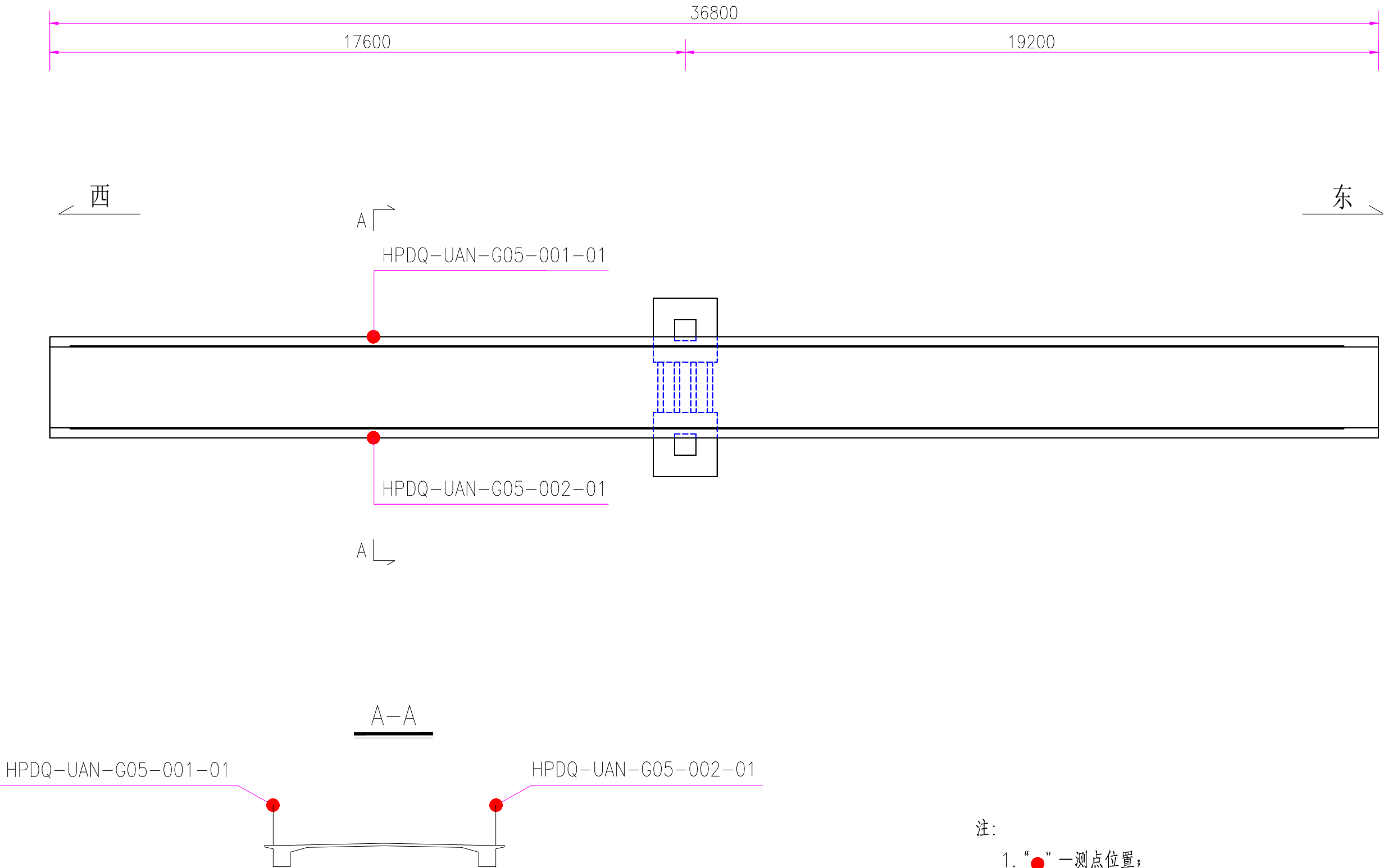
桥面风速风向测点布点图



桥面风速风向监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-UAN-G05-001-01	主桥西侧跨中北侧
HPDQ-UAN-G05-002-01	主桥西侧跨中南侧

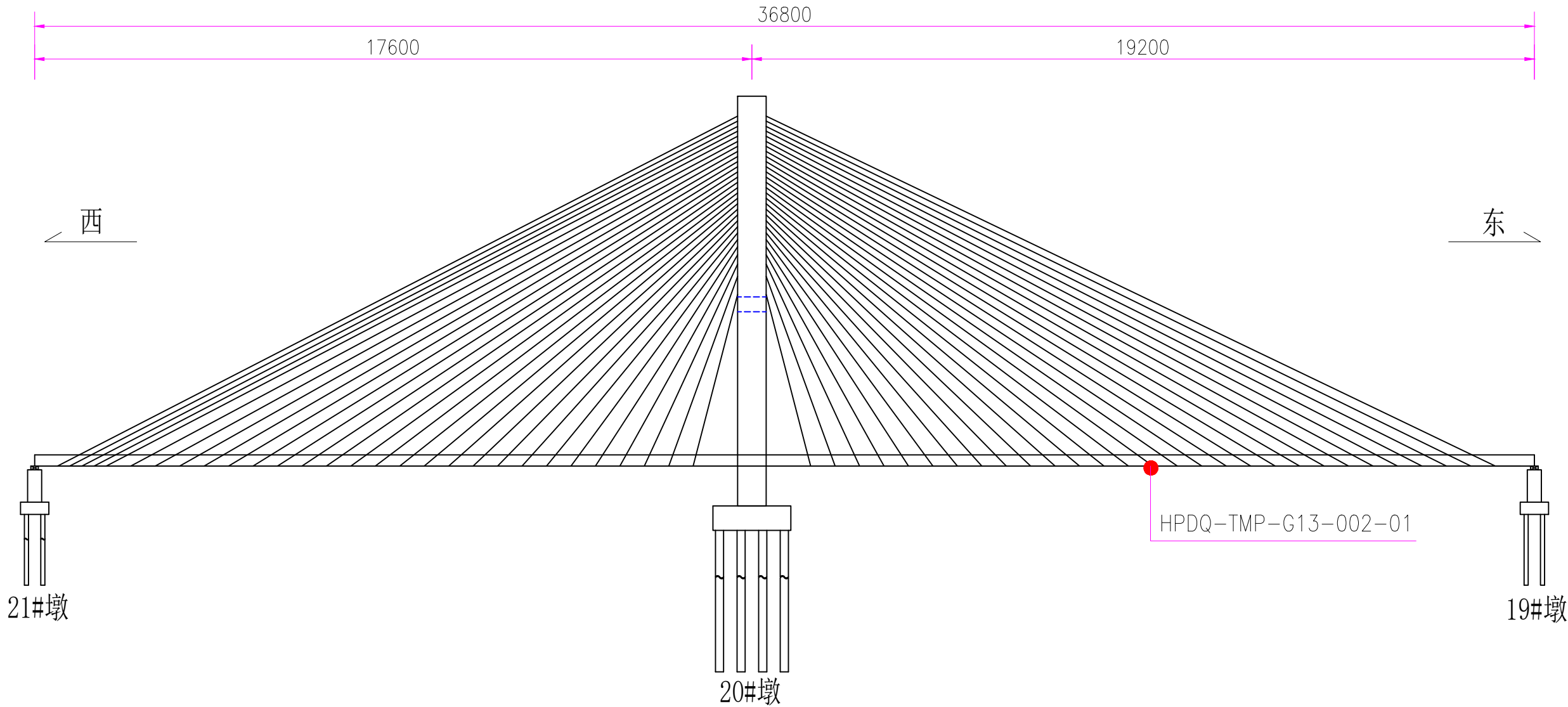
- 注：
- “●”一测点位置；
 - 本图尺寸以厘米计。
 - 测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

桥面风速风向测点布置图



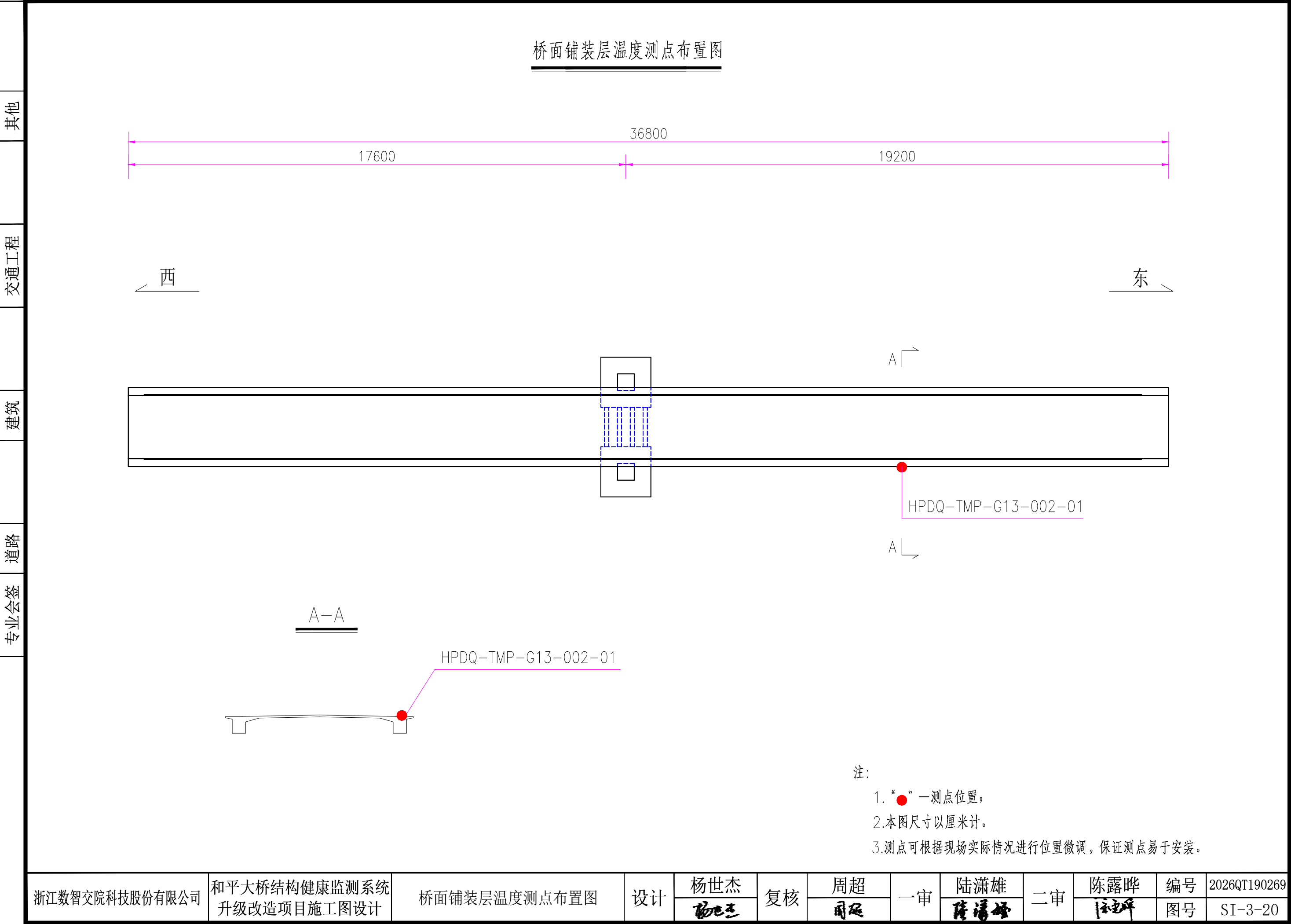
- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

桥面铺装层温度测点布点图

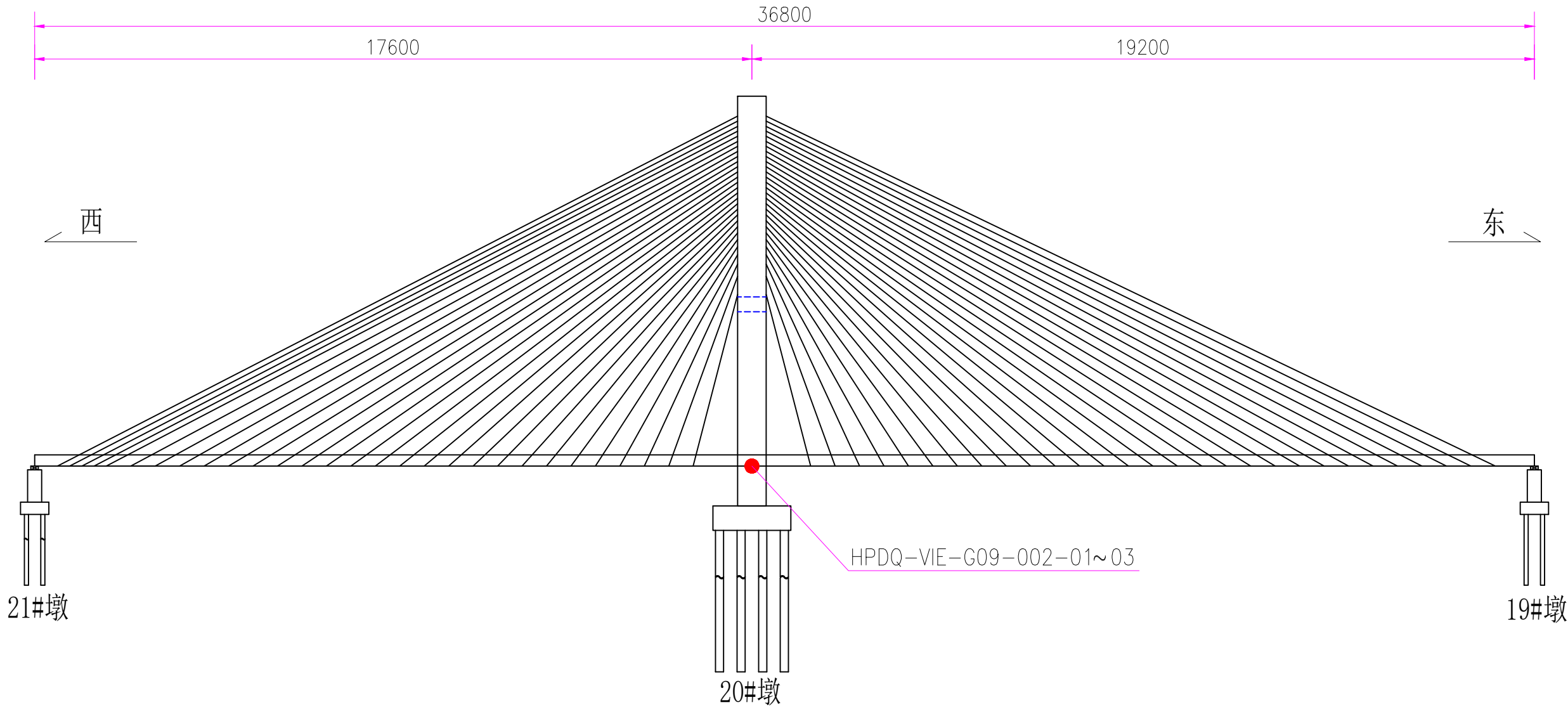


桥面铺装层温度监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-TMP-G13-002-01	主桥桥面东侧跨中

- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。



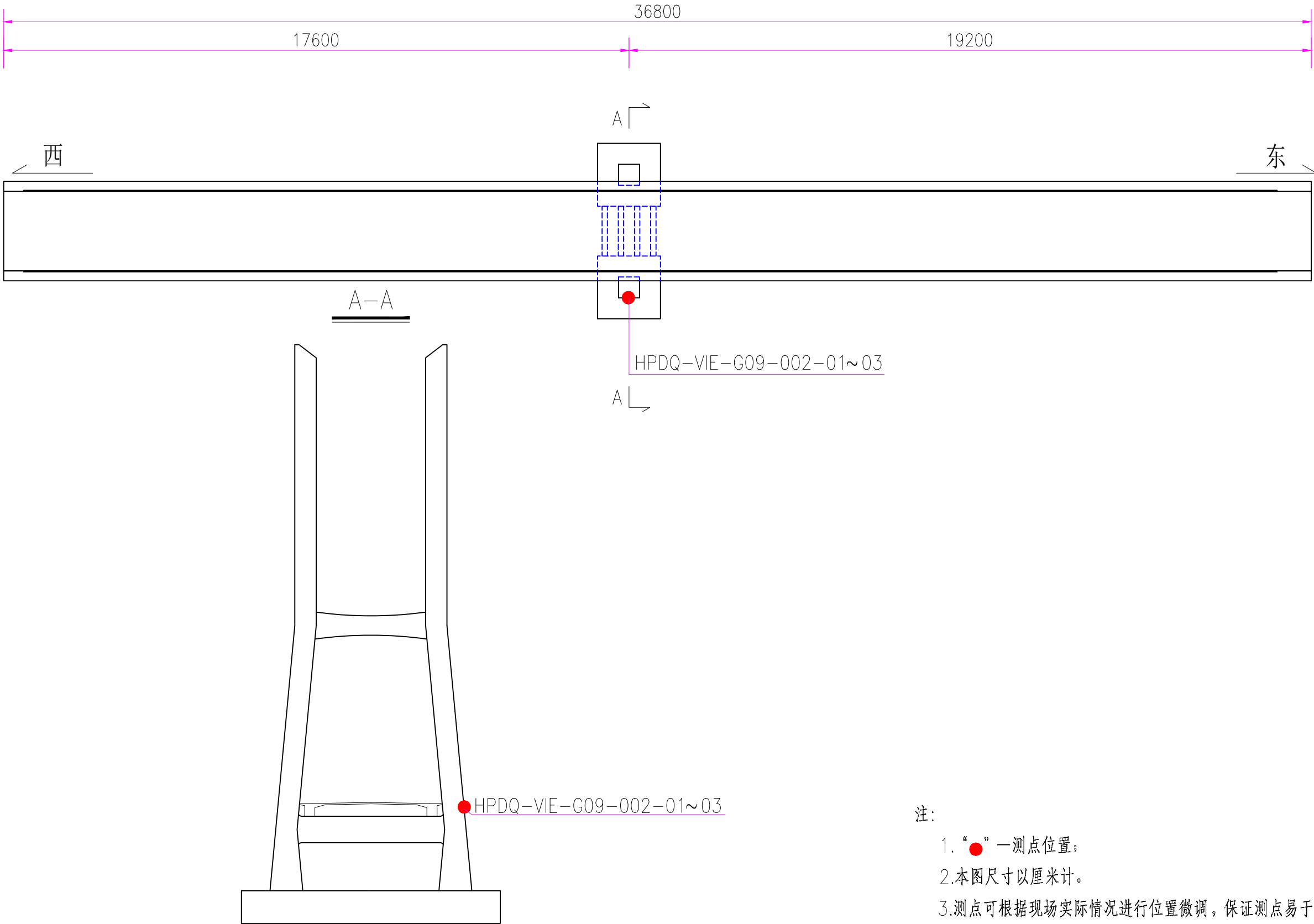
地震动测点布点图



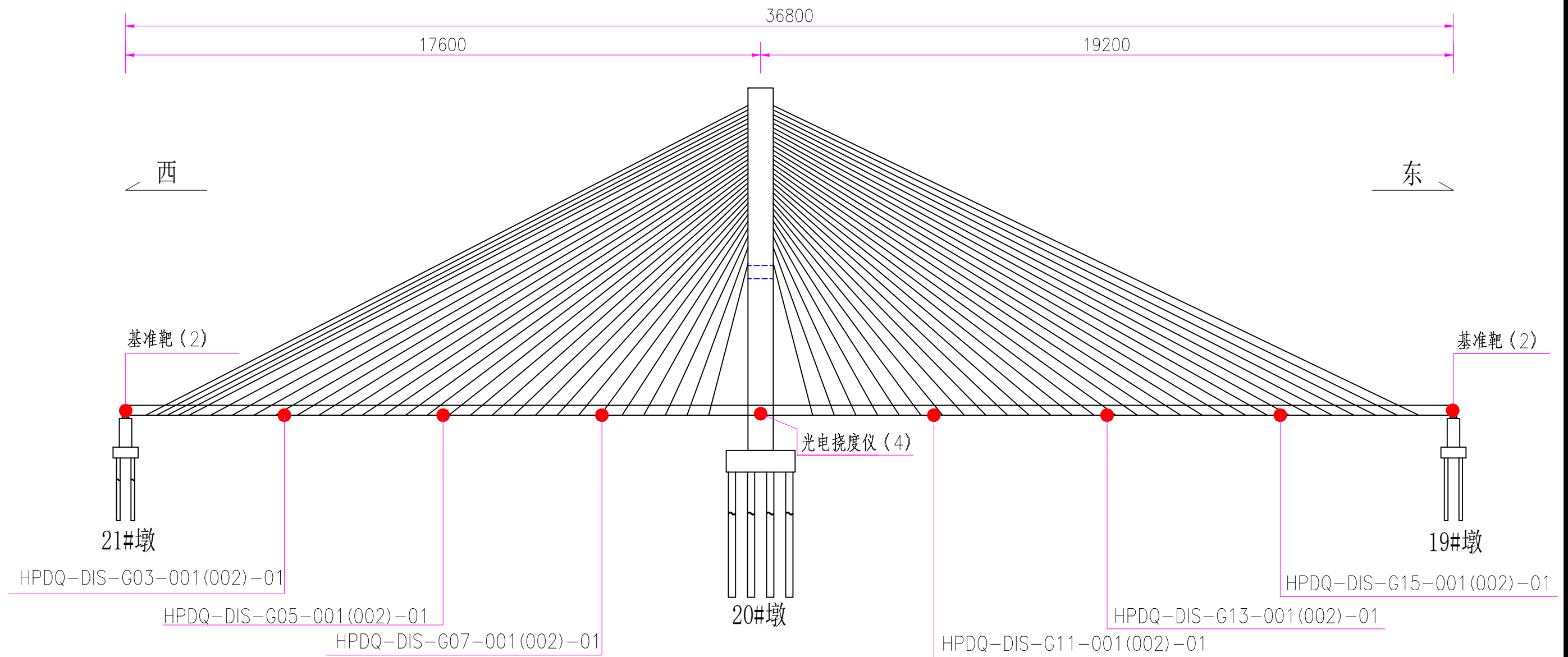
地震动监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-VIE-G09-002-01	南侧主塔侧
HPDQ-VIE-G09-002-02	南侧主塔侧
HPDQ-VIE-G09-002-03	南侧主塔侧

- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2. 本图尺寸以厘米计。
 - 3. 测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

地震动测点布置图



主梁竖向位移测点布点图



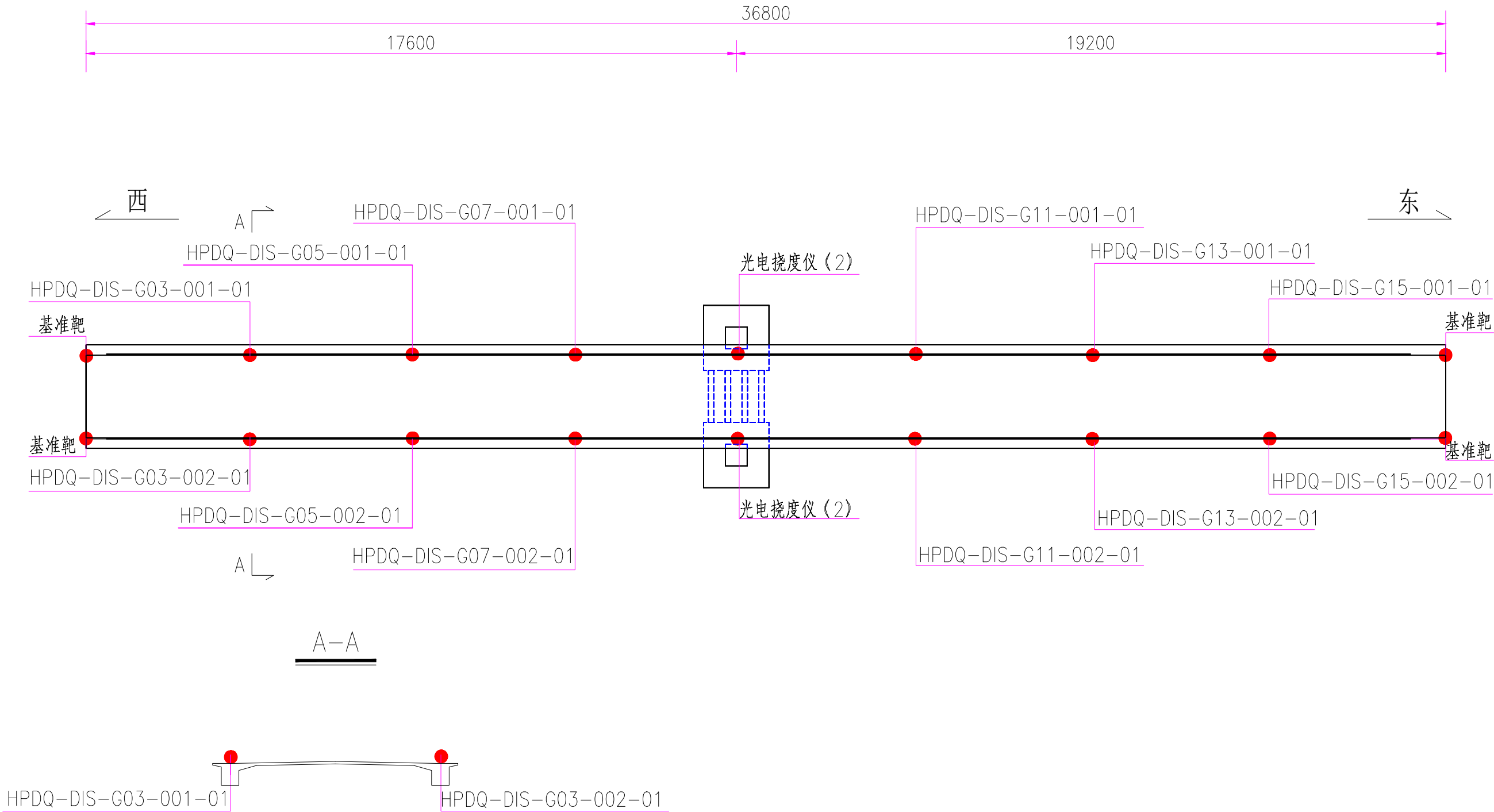
主梁竖向位移监测测点布置表

传感器编号	位置描述	传感器编号	位置描述
HPDQ-DIS-G03-001(002)-01	主桥西侧1/4跨处	HPDQ-DIS-G11-001(002)-01	主桥东侧1/4跨处
HPDQ-DIS-G05-001(002)-01	主桥西侧1/2跨处	HPDQ-DIS-G13-001(002)-01	主桥东侧1/2跨处
HPDQ-DIS-G07-001(002)-01	主桥西侧3/4跨处	HPDQ-DIS-G15-001(002)-01	主桥东侧3/4跨处

注：

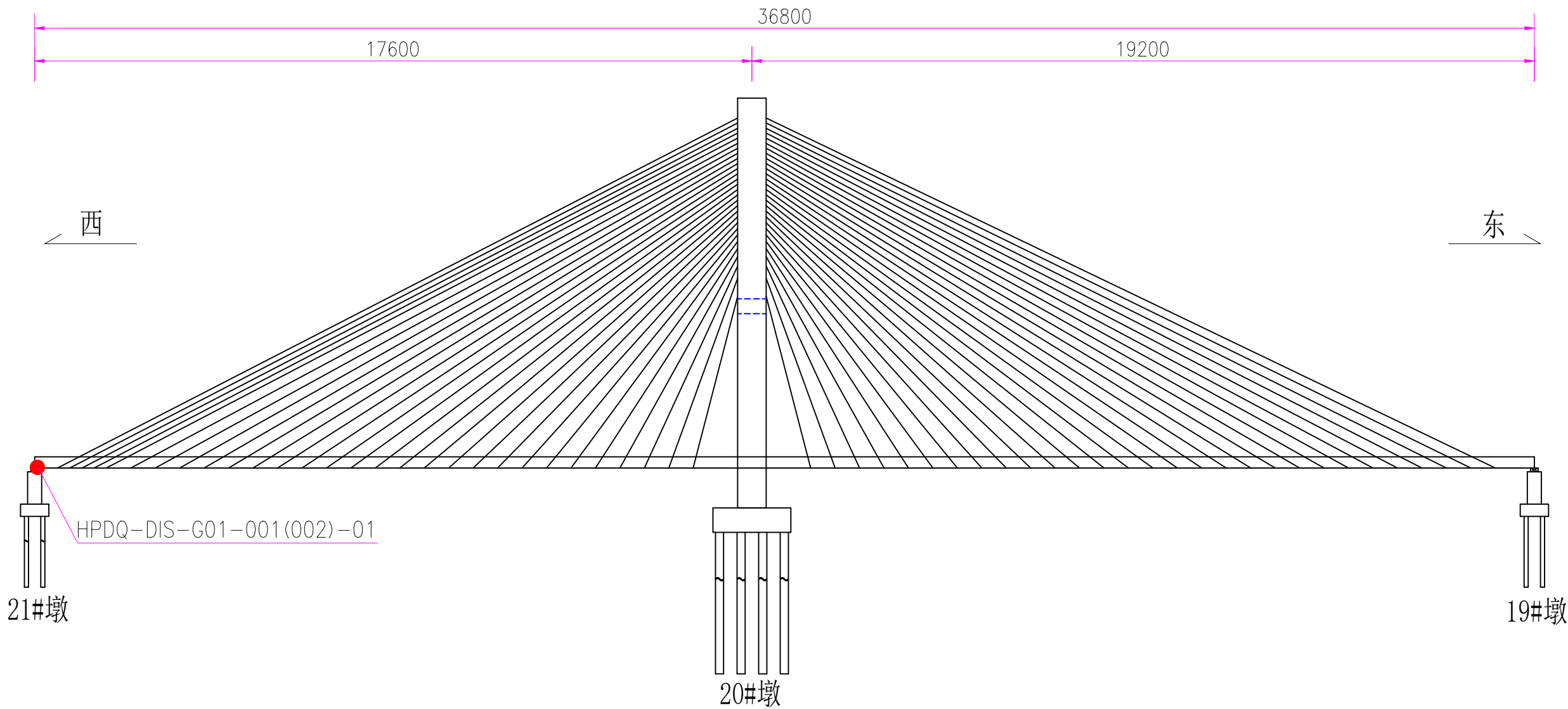
1. “●”一测点位置；
2. 本图尺寸以厘米计。
3. 测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

主梁竖向位移测点布置图



注：
1. “●”一测点位置；
2.本图尺寸以厘米计。
3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

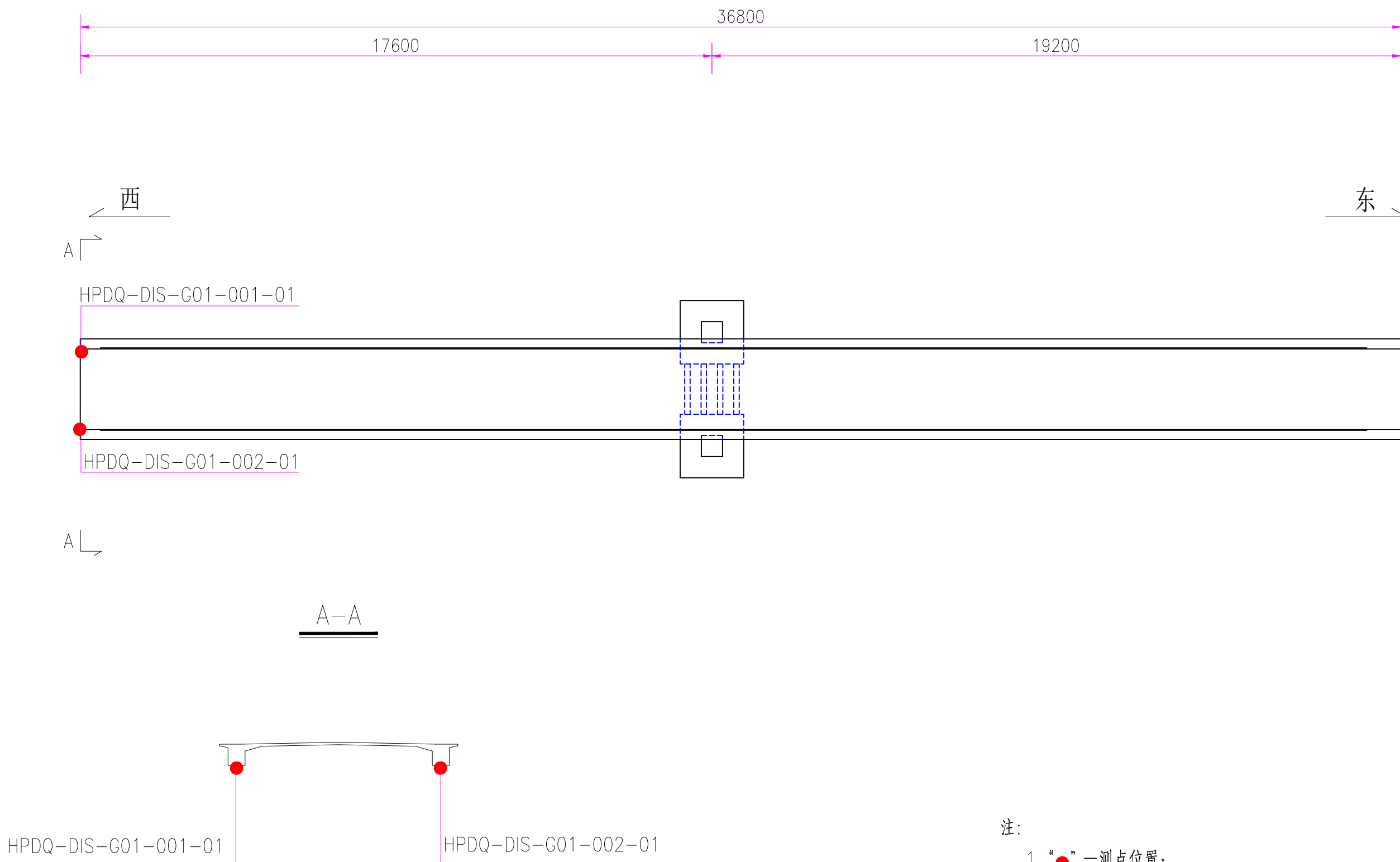
支座位移测点布点图



支座位移监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-DIS-G01-001-01	21#墩北侧
HPDQ-DIS-G01-002-01	21#墩南侧

- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

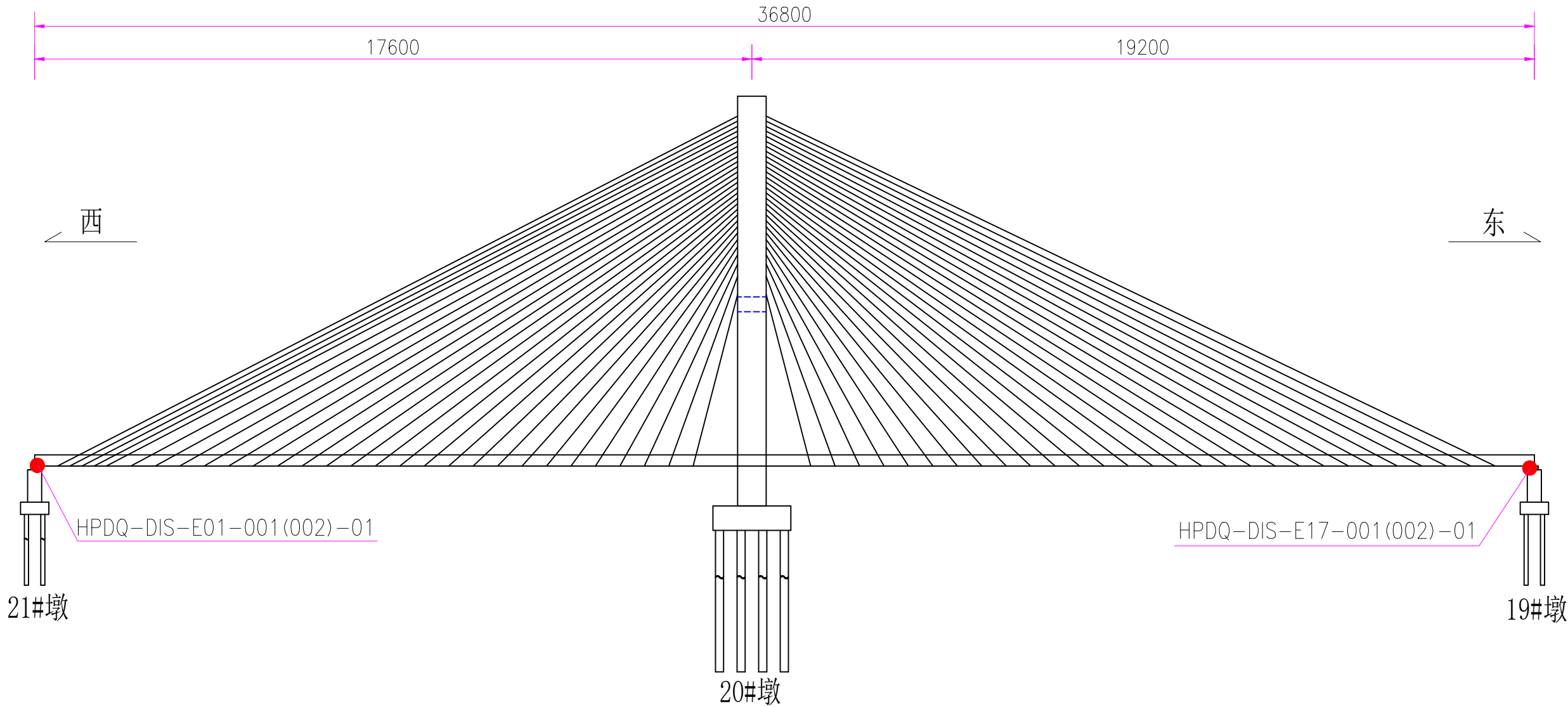
支座位移测点布置图



注:

1. “●” — 测点位置；
2. 本图尺寸以厘米计。
3. 测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

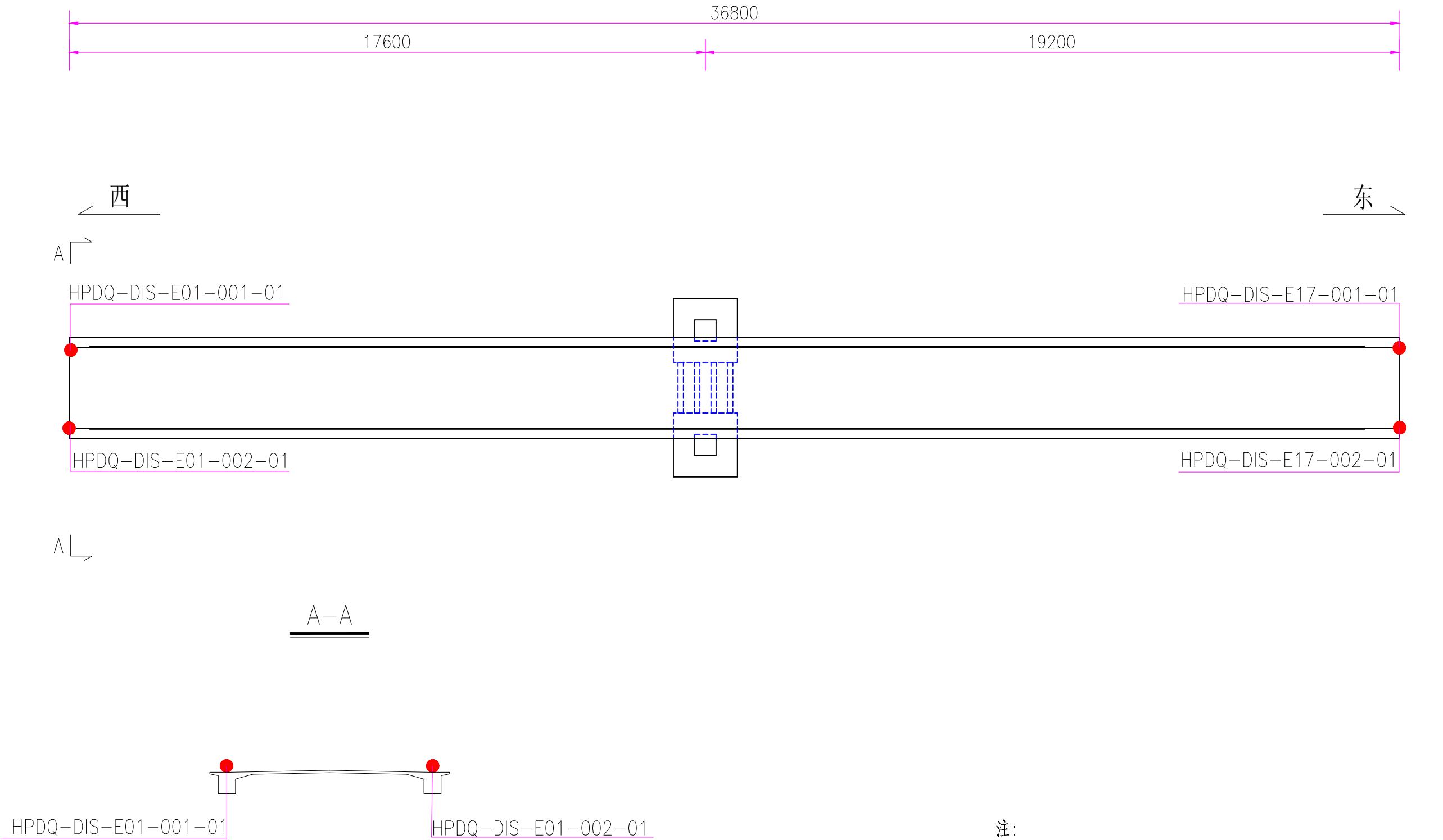
梁端位移测点布点图



梁端位移监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-DIS-E01-001-01	21#墩北侧
HPDQ-DIS-E01-002-01	21#墩南侧
HPDQ-DIS-E17-001-01	19#墩北侧
HPDQ-DIS-E17-002-01	19#墩南侧

- 注：
- “●”一测点位置；
 - 本图尺寸以厘米计。
 - 测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

梁端位移测点布置图



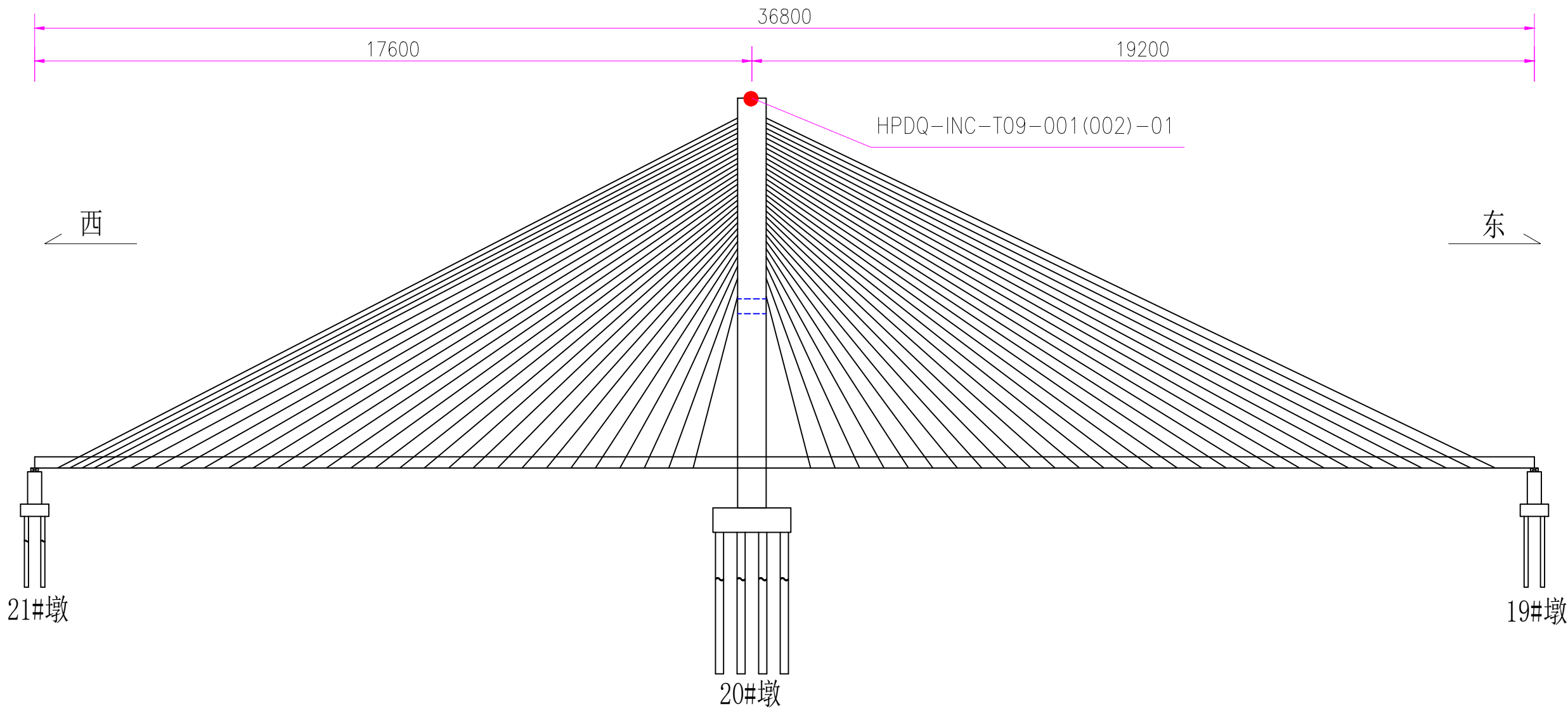
注：

1. “●”一测点位置；

2.本图尺寸以厘米计。

3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

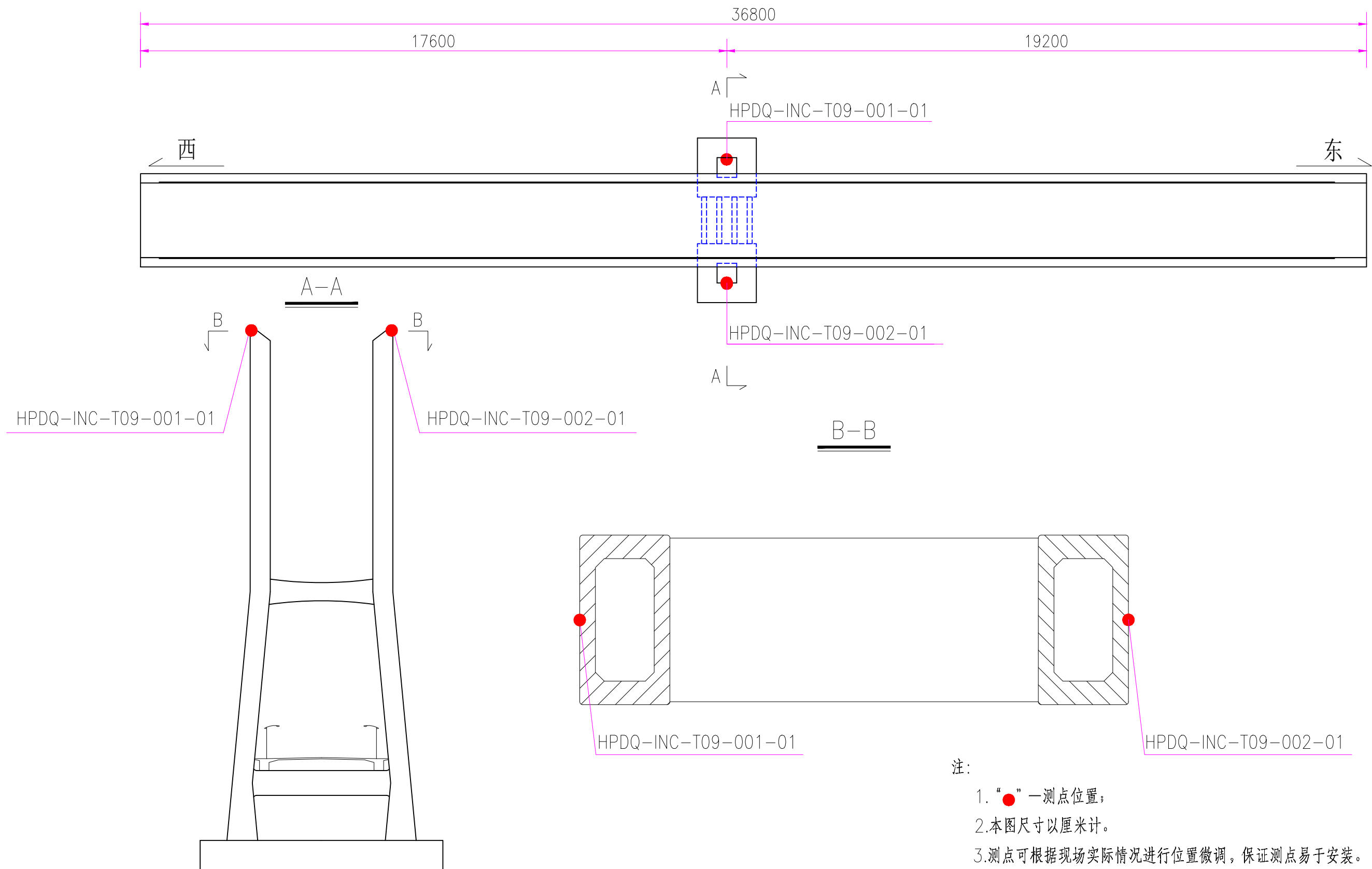
塔顶偏位测点布点图



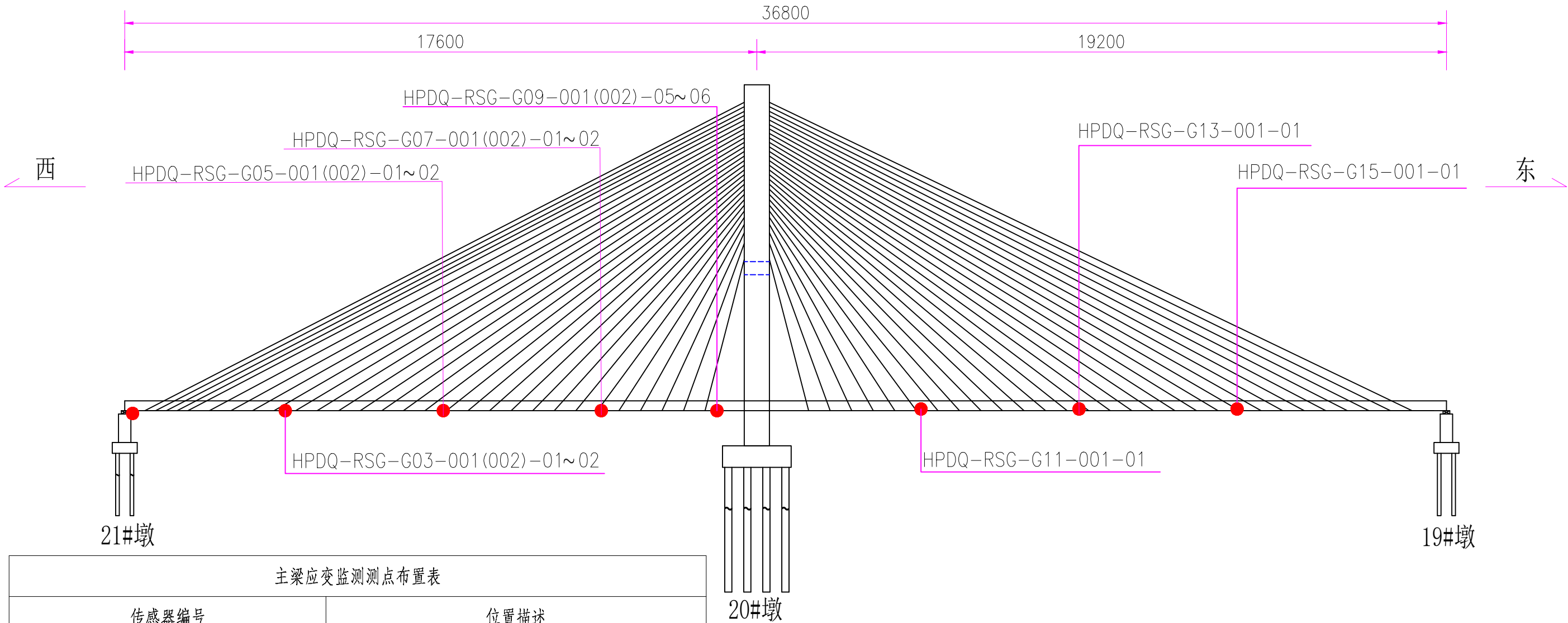
塔顶偏位监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-INC-T09-001-01	北侧主塔塔顶
HPDQ-INC-T09-002-01	南侧主塔塔顶

- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

塔顶偏位测点布置图



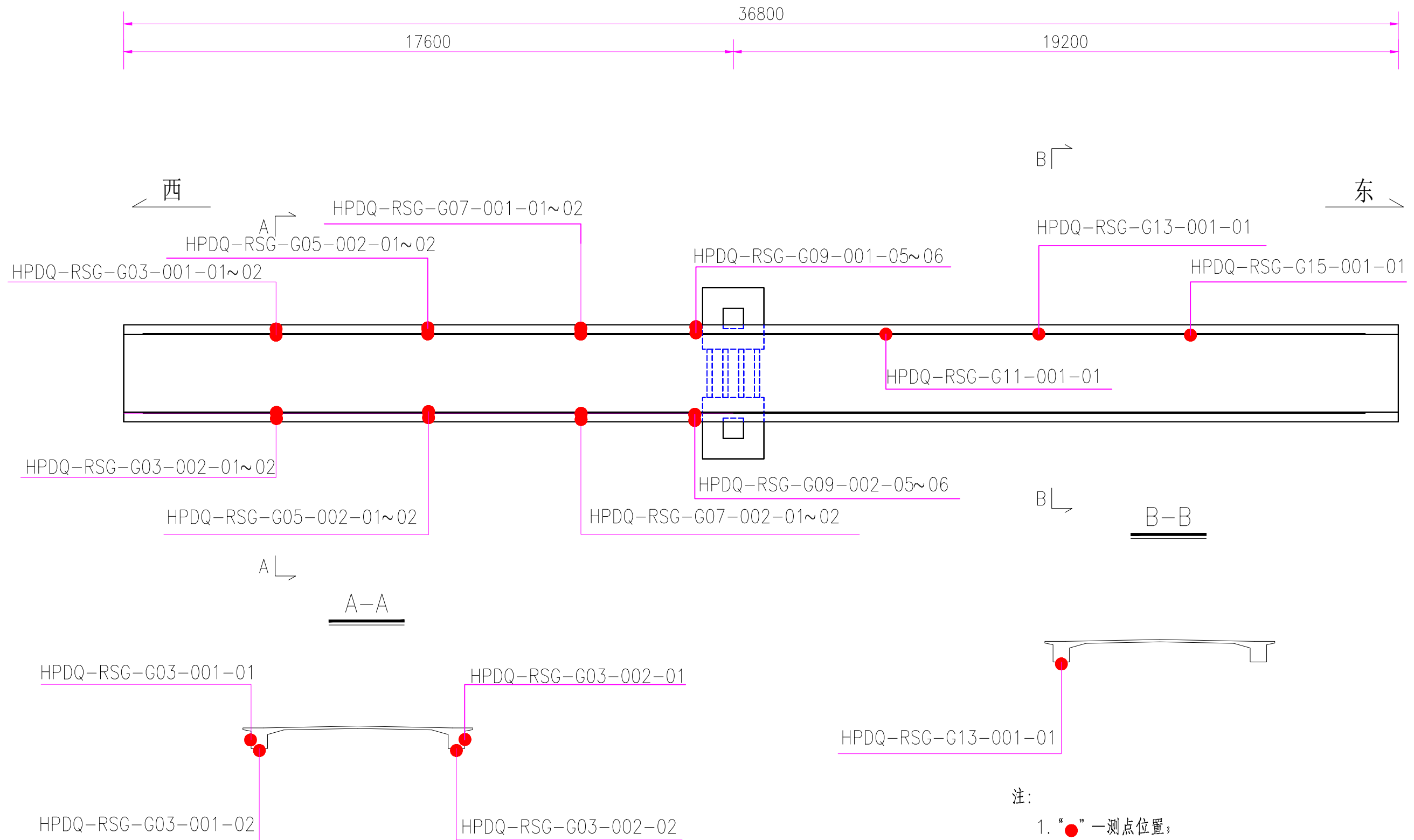
主梁应变测点布点图



主梁应变监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-RSG-G03-001(002)-01~02	主桥北（南）侧纵梁西侧1/4跨底(腹)板
HPDQ-RSG-G05-001(002)-01~02	主桥北（南）侧纵梁西侧1/2跨底(腹)板
HPDQ-RSG-G07-001(002)-01~02	主桥北（南）侧纵梁西侧3/4跨底(腹)板
HPDQ-RSG-G09-001(002)-05~06	主塔西侧北（南）侧梁底(腹)板
HPDQ-RSG-G11-001-01	主桥北侧纵梁东侧跨1/4跨内侧腹板
HPDQ-RSG-G13-001-01	主桥北侧纵梁东侧跨1/2跨内侧腹板
HPDQ-RSG-G15-001-01	主桥北侧纵梁东侧跨3/4跨内侧腹板

注：
1. “●”一测点位置；
2.本图尺寸以厘米计。
3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

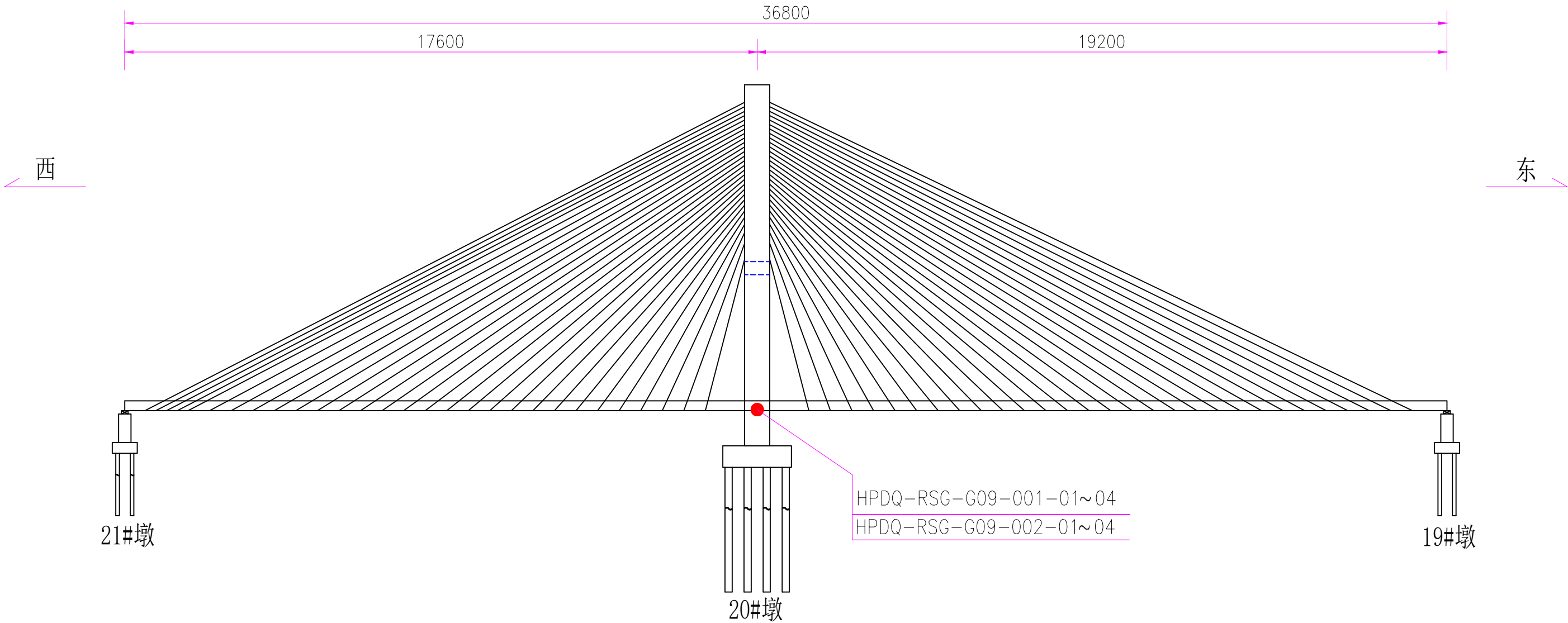
主梁应变测点布置图



注:

1. “●”一测点位置;
2. 本图尺寸以厘米计。
3. 测点可根据现场实际情况进行位置微调, 保证测点易于安装。

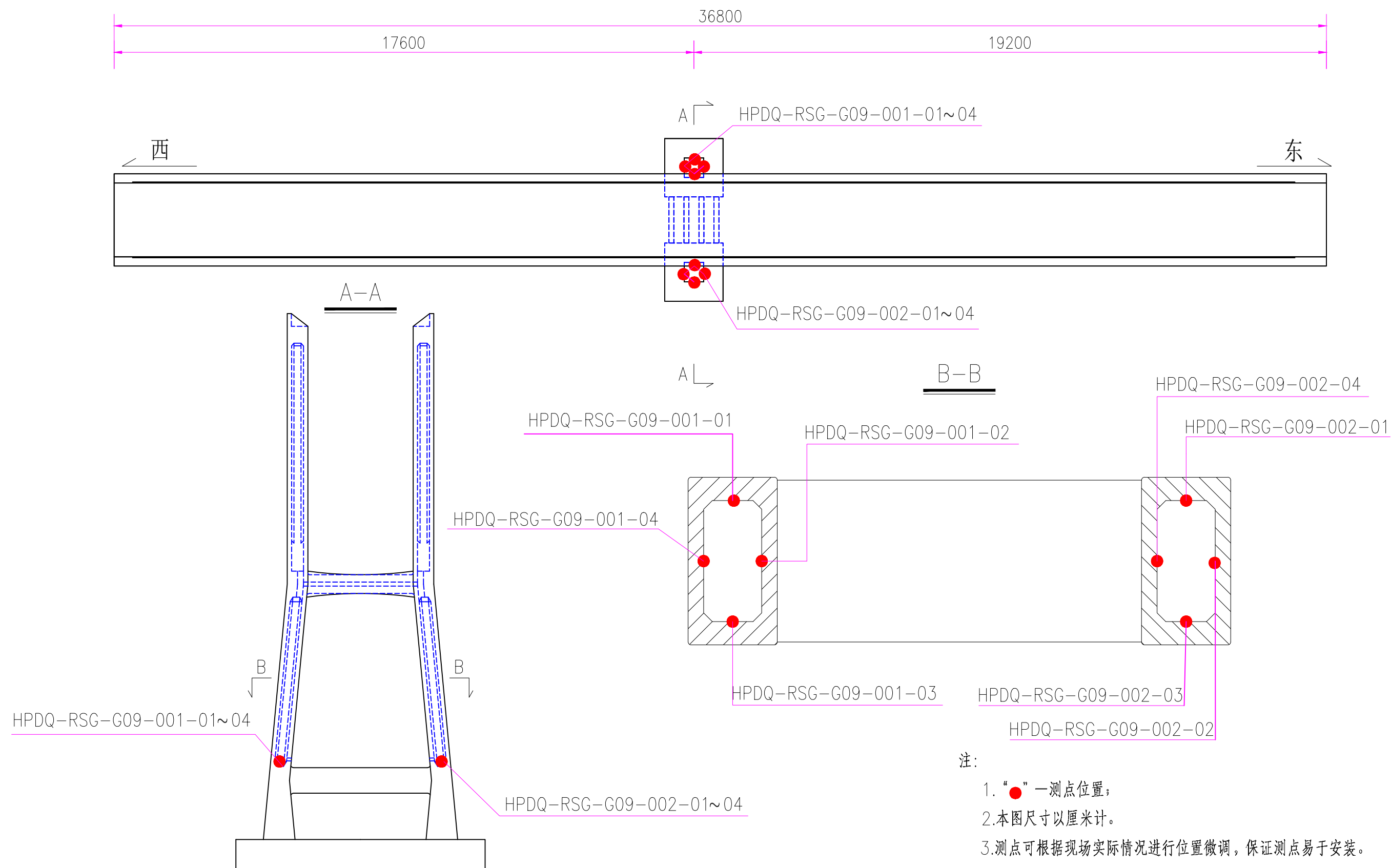
索塔应变测点布点图



索塔应变监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-RSG-G09-001-01~04	主塔北侧塔柱东、南、西、北侧壁
HPDQ-RSG-G09-002-01~04	主塔南侧塔柱东、南、西、北侧壁

- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

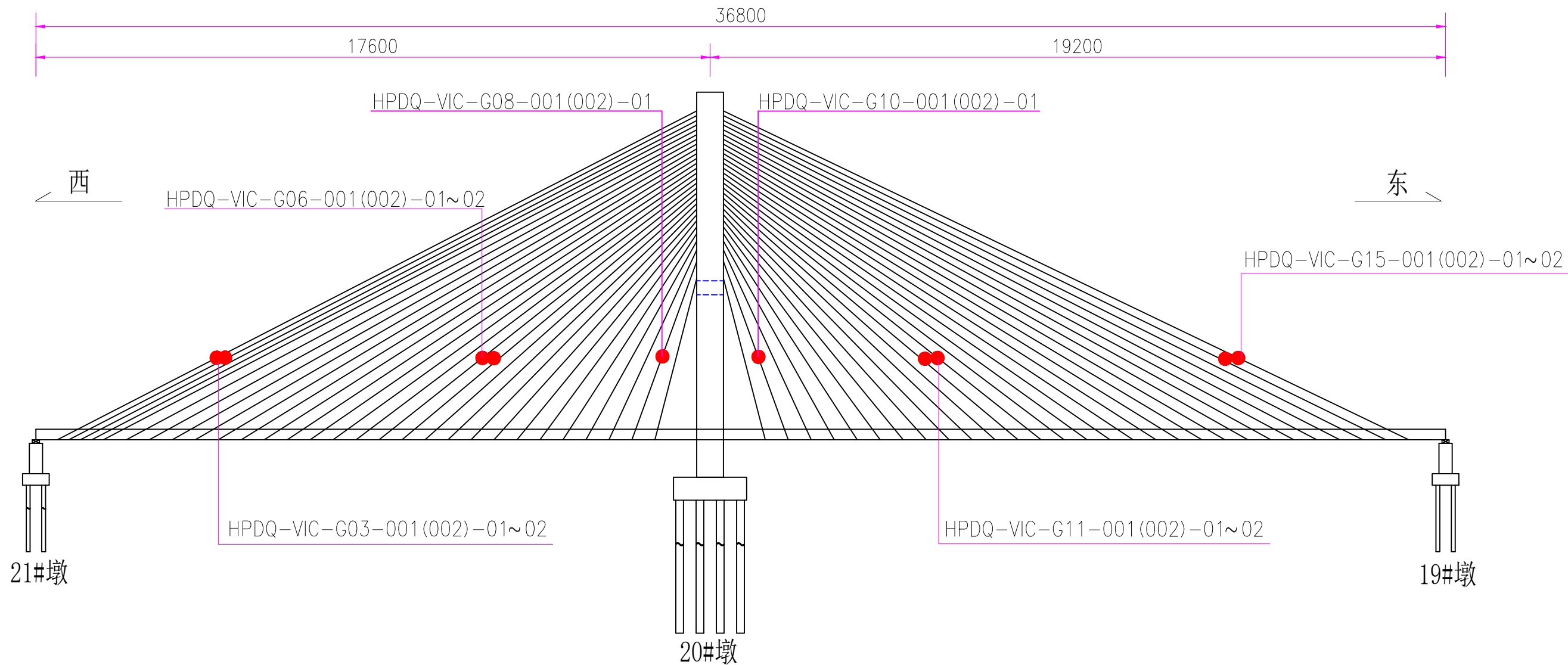
索塔应变测点布置图



注：

1. “●” — 测点位置；
2. 本图尺寸以厘米计。
3. 测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

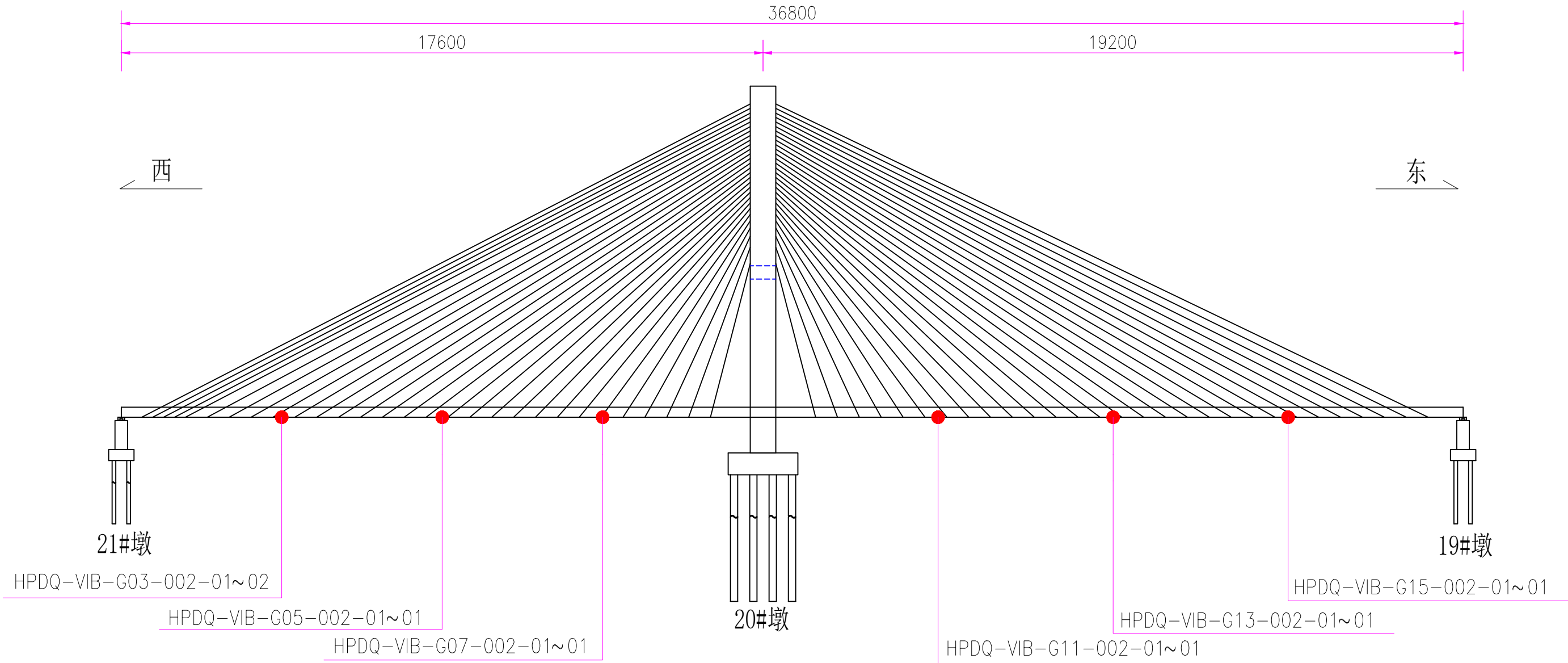
索力测点布点图



索力监测测点布置表			
传感器编号	位置描述	传感器编号	位置描述
HPDQ-VIC-G03-001-01~02	主桥西侧N29#(N28#)拉索	HPDQ-VIC-G11-001-01~02	主桥东侧N13#(N12#)拉索
HPDQ-VIC-G03-002-01~02	主桥西侧S29#(S28#)拉索	HPDQ-VIC-G11-002-01~02	主桥东侧S13#(S12#)拉索
HPDQ-VIC-G06-001-01~02	主桥西侧N13#(N12#)拉索	HPDQ-VIC-G15-001-01~02	主桥东侧N29#(N28#)拉索
HPDQ-VIC-G06-002-01~02	主桥西侧S13#(S12#)拉索	HPDQ-VIC-G15-002-01~02	主桥东侧S29#(S28#)拉索
HPDQ-VIC-G08-001(002)-01	主桥西侧N2#(S2#)拉索	HPDQ-VIC-G10-001(002)-01	主桥东侧N2#(S2#)拉索

- 注：
- “●”一测点位置；
 - 本图尺寸以厘米计。
 - 测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

主梁振动测点布点图



主梁振动监测测点布置表			
传感器编号	位置描述	传感器编号	位置描述
HPDQ-VIB-G03-002-01~01	主桥西侧1/4跨处	HPDQ-VIB-G11-002-01~01	主桥东侧1/4跨处
HPDQ-VIB-G05-002-01~01	主桥西侧1/2跨处	HPDQ-VIB-G13-002-01~01	主桥东侧1/2跨处
HPDQ-VIB-G07-002-01~01	主桥西侧3/4跨处	HPDQ-VIB-G15-002-01~01	主桥东侧3/4跨处

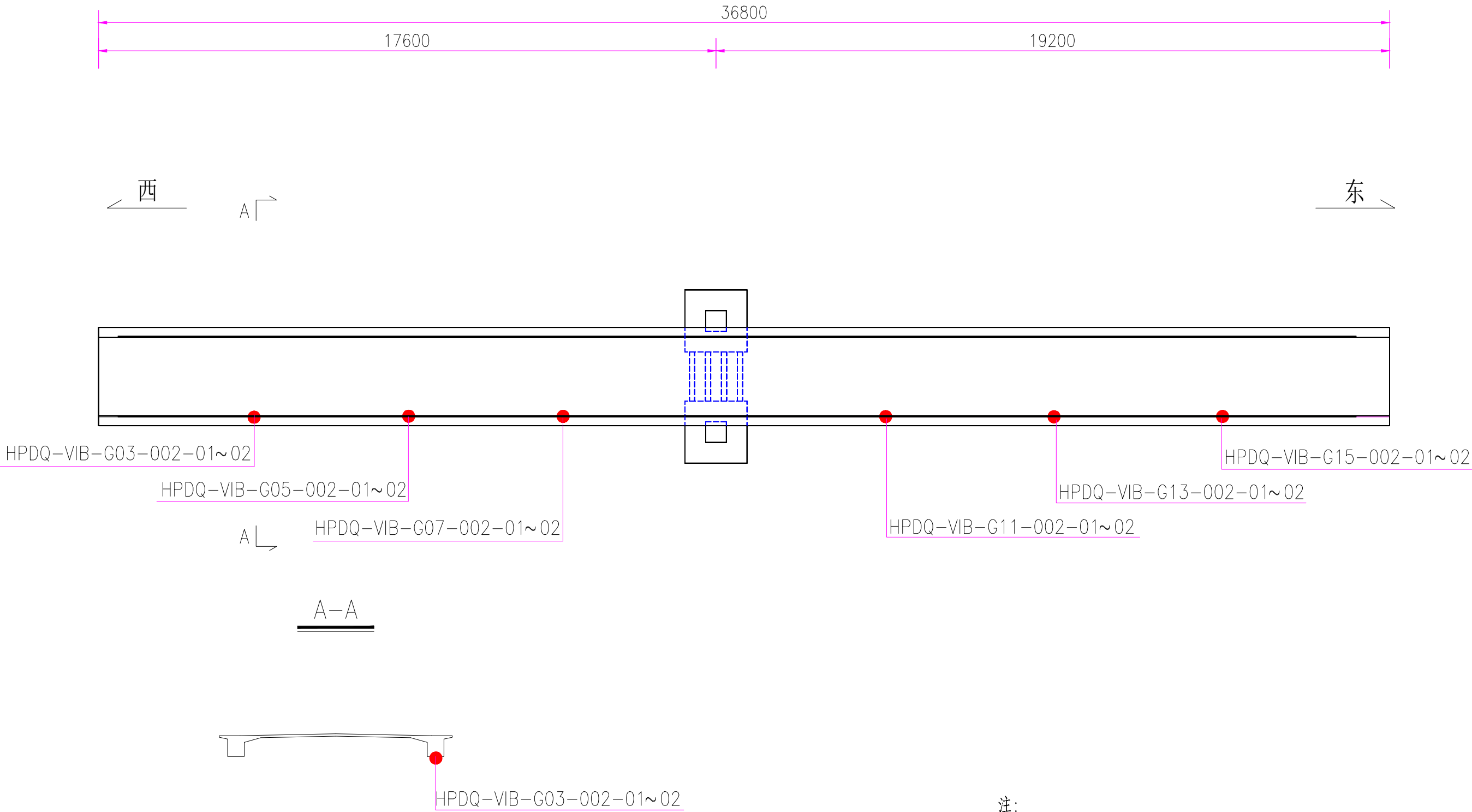
注：

1. “●”一测点位置；

2.本图尺寸以厘米计。

3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

主梁振动测点布置图



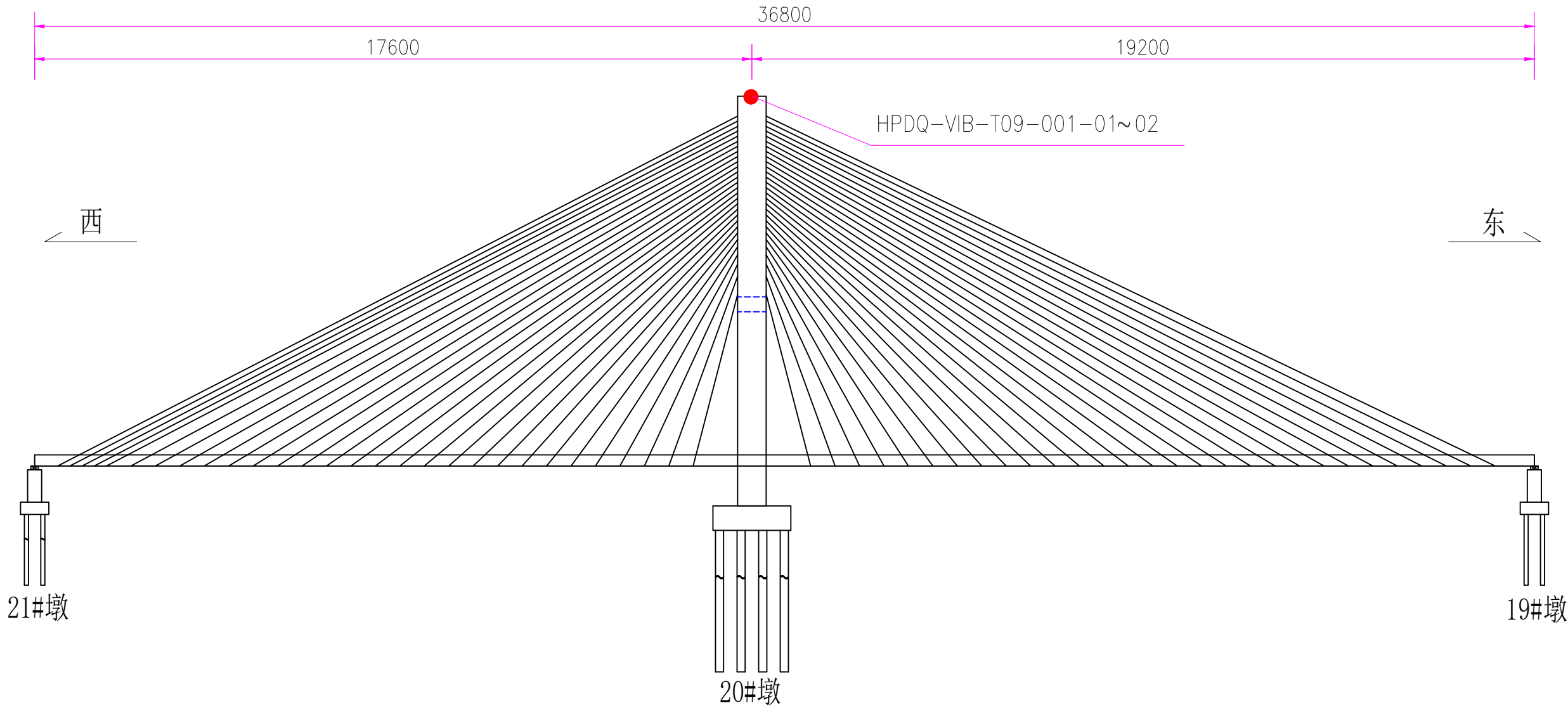
注：

1. “●”一测点位置；

2.本图尺寸以厘米计。

3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

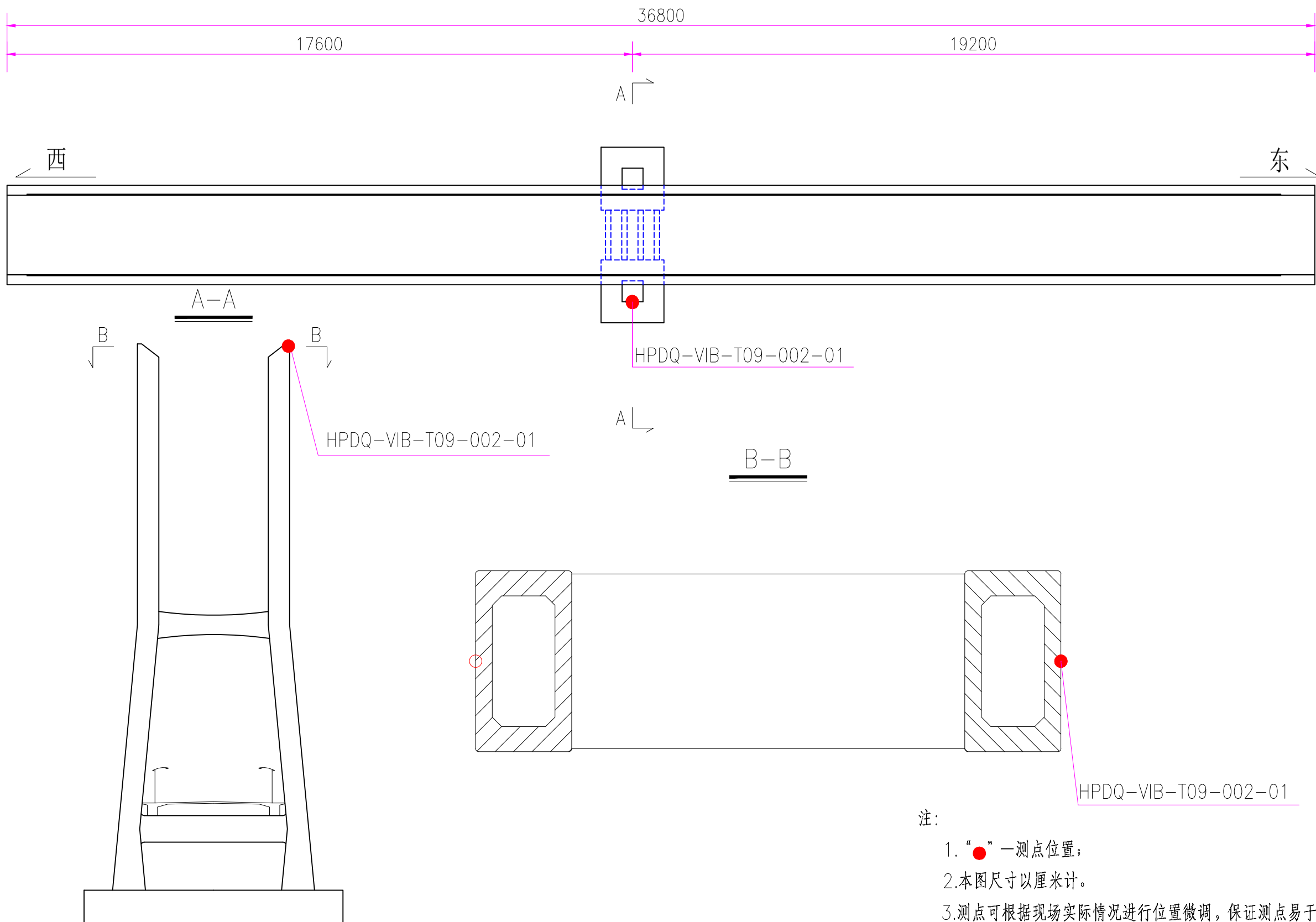
主塔振动测点布点图



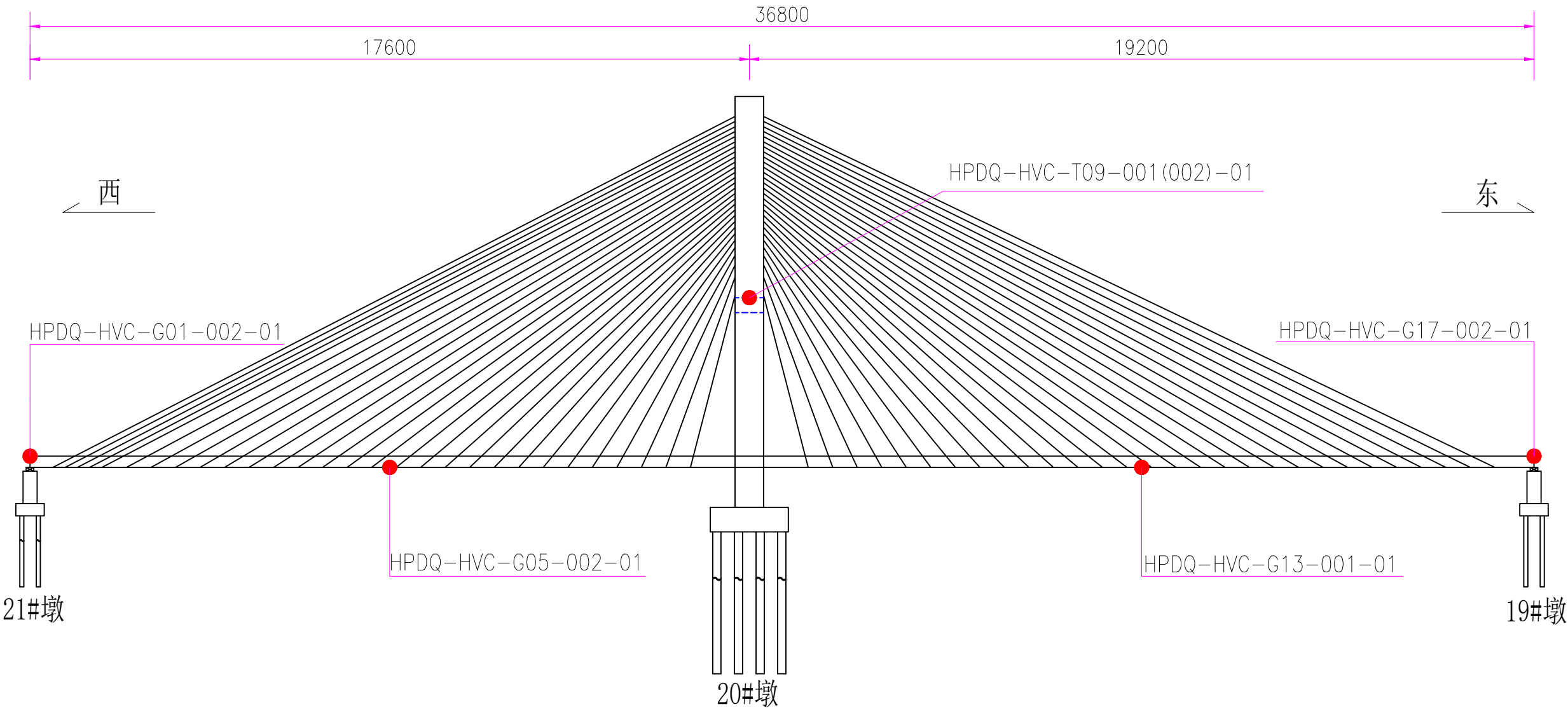
主塔振动监测测点布置表	
传感器编号	位置描述
HPDQ-VIB-T09-002-01	南侧主塔塔顶
HPDQ-VIB-T09-002-02	南侧主塔塔顶

- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

主塔振动测点布置图



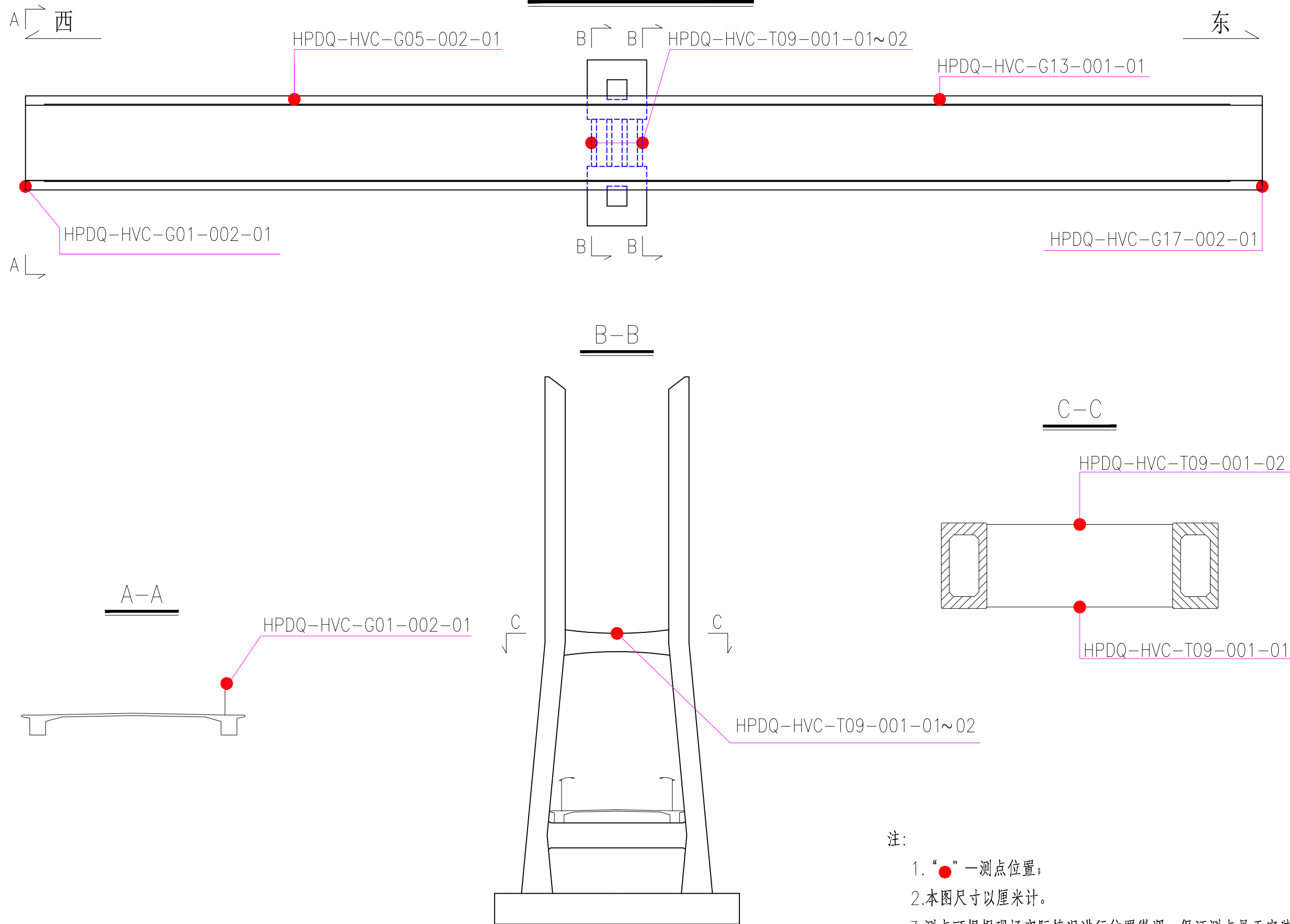
视频监控测点布点图（一）



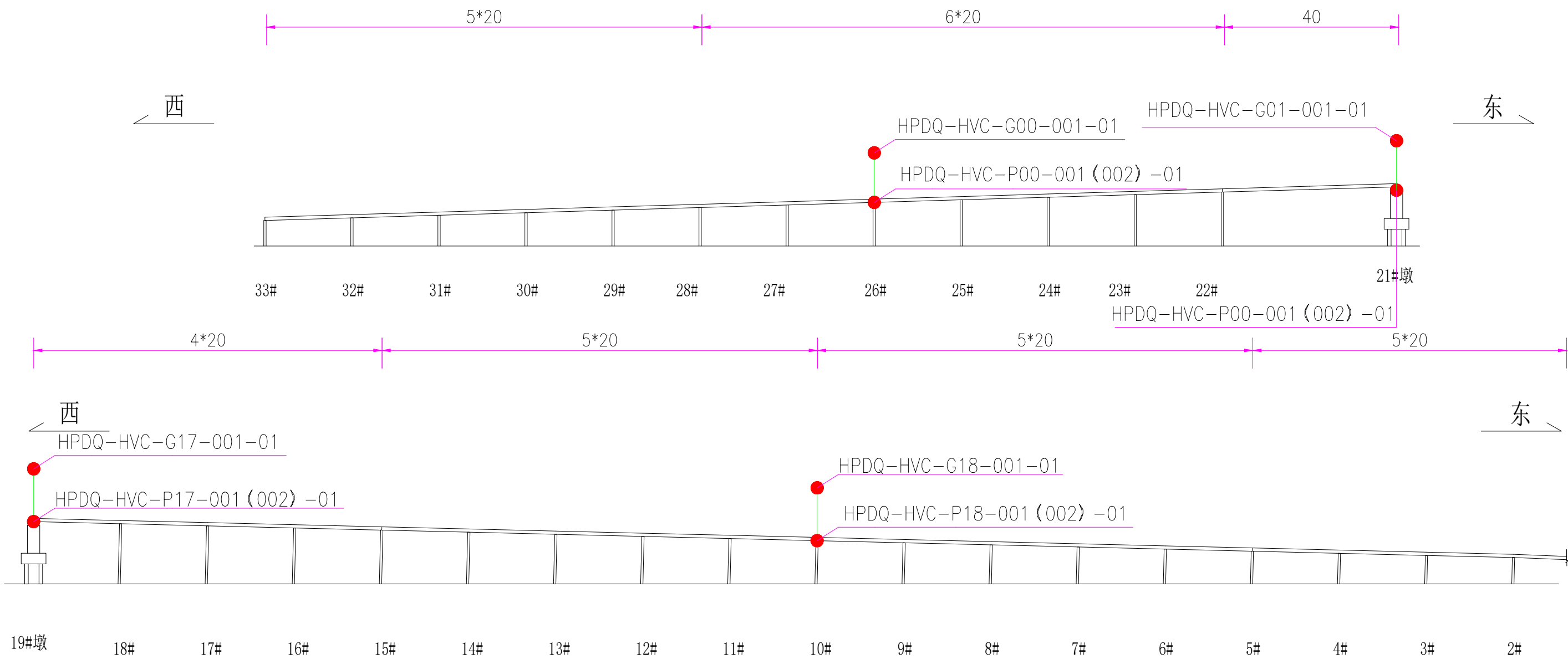
视频监控测点布置表			
传感器编号	位置描述	传感器编号	位置描述
HPDQ-HVC-G01-002-01	主桥桥面西侧桥头南侧边	HPDQ-HVC-T09-001-02	主塔上横梁东侧边
HPDQ-HVC-G05-001-01	主桥桥面西侧跨中北侧边	HPDQ-HVC-G13-001-01	主桥桥面东侧跨中北侧边
HPDQ-HVC-T09-001-01	主塔上横梁西侧边	HPDQ-HVC-G17-002-01	主桥桥面东侧桥头南侧边

- 注：
- 1. “●”一测点位置；
 - 2.本图尺寸以厘米计。
 - 3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

视频监控测点布置图（一）



视频监控测点布点图（二）



视频监控测点布置表			
传感器编号	位置描述	传感器编号	位置描述
HPDQ-HVC-P17-001(002)-01	主桥19#北(南)侧桥下	HPDQ-HVC-G17-001-01	主桥桥面东侧桥头北侧边
HPDQ-HVC-P18-001(002)-01	主桥10#北(南)侧桥下	HPDQ-HVC-G18-001-01	主桥桥面10#北侧边
HPDQ-HVC-P00-001(002)-01	主桥26#北(南)侧桥下	HPDQ-HVC-G00-001-01	主桥桥面26#北侧边
HPDQ-HVC-P01-001(002)-01	主桥21#北(南)侧桥下	HPDQ-HVC-G01-001-01	主桥桥面21#北侧边

注：
1. “●”一测点位置；
2.本图尺寸以厘米计。
3.测点可根据现场实际情况进行位置微调，保证测点易于安装。

其他

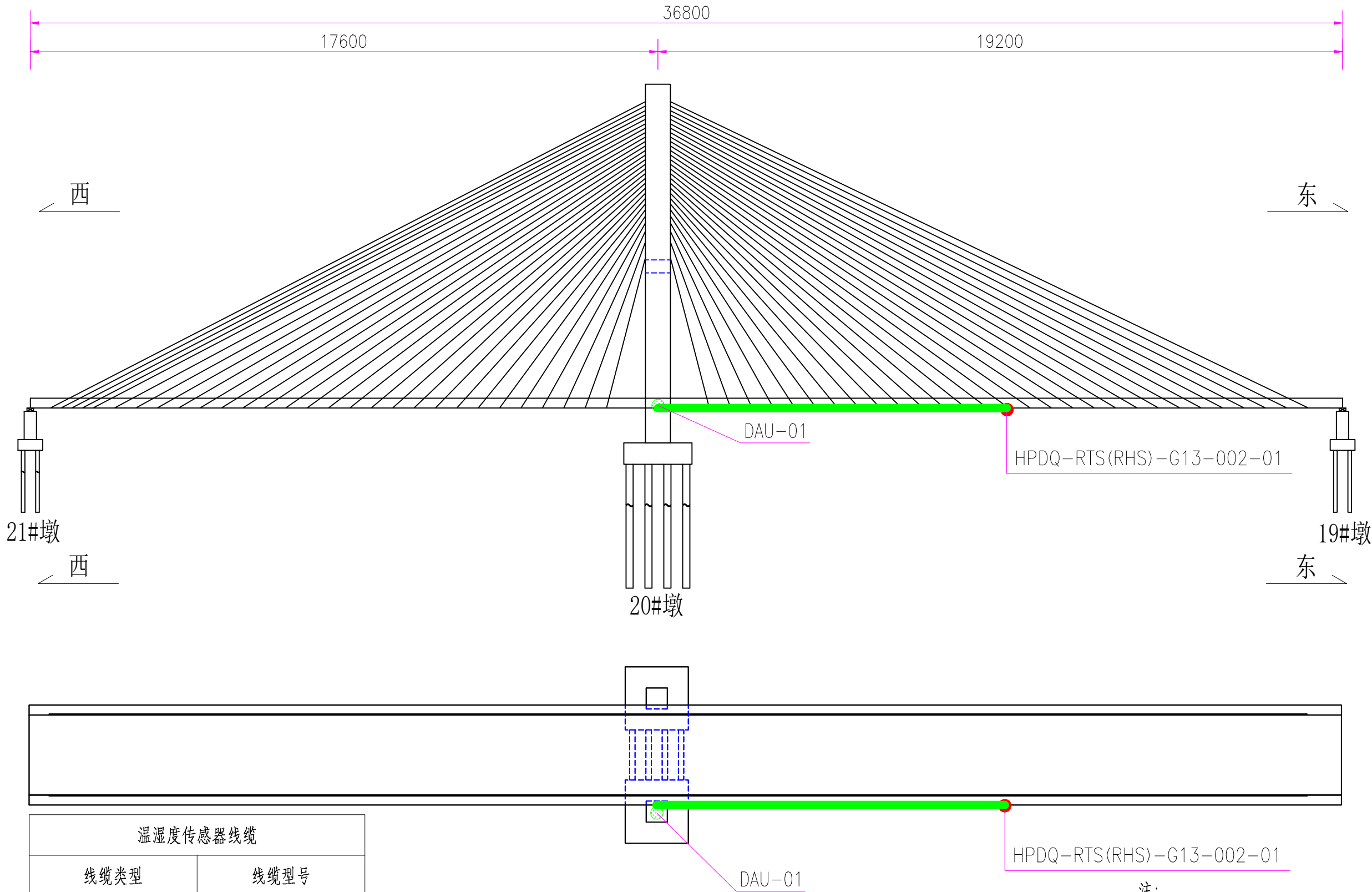
交通工程

建筑

道路

专业会签

桥址区环境温湿度走线图



温湿度传感器线缆	
线缆类型	线缆型号
信号线缆	RWP 4x0.5

注：
1. “●” 测点位置；“—” 走线路径。

浙江数智交院科技股份有限公司

和平大桥结构健康监测系
统升级改造项目施工图设计

桥址区环境温湿度走线图

设计

杨世杰
杨世杰

复核

周超
周超

一审

陆潇雄
陆潇雄

二审

陈露晔
陈露晔

编号
图号

2026QT190269
SI-4-1

其他

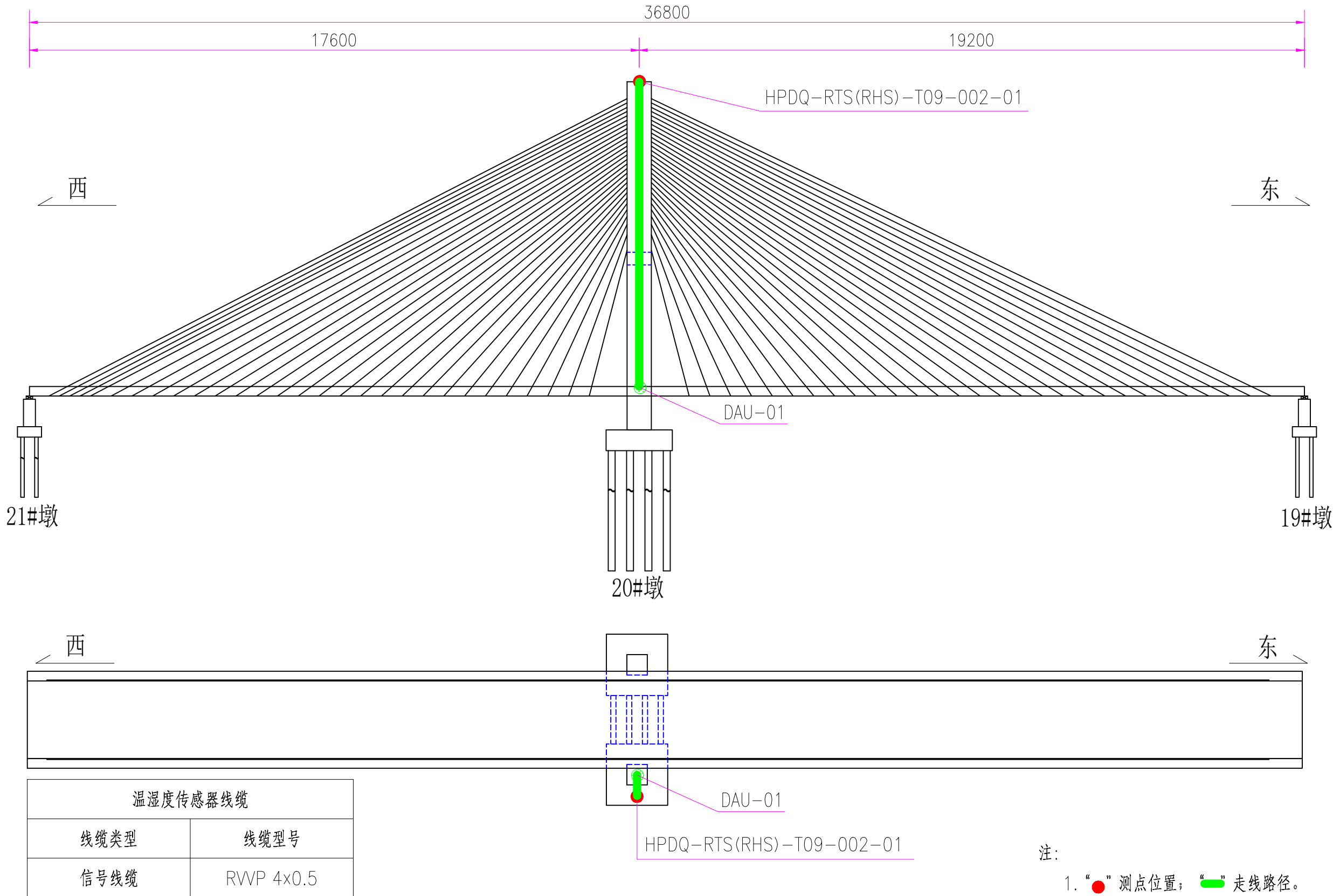
交通工程

建筑

道路

专业会签

索塔锚固区环境温湿度走线图



其他

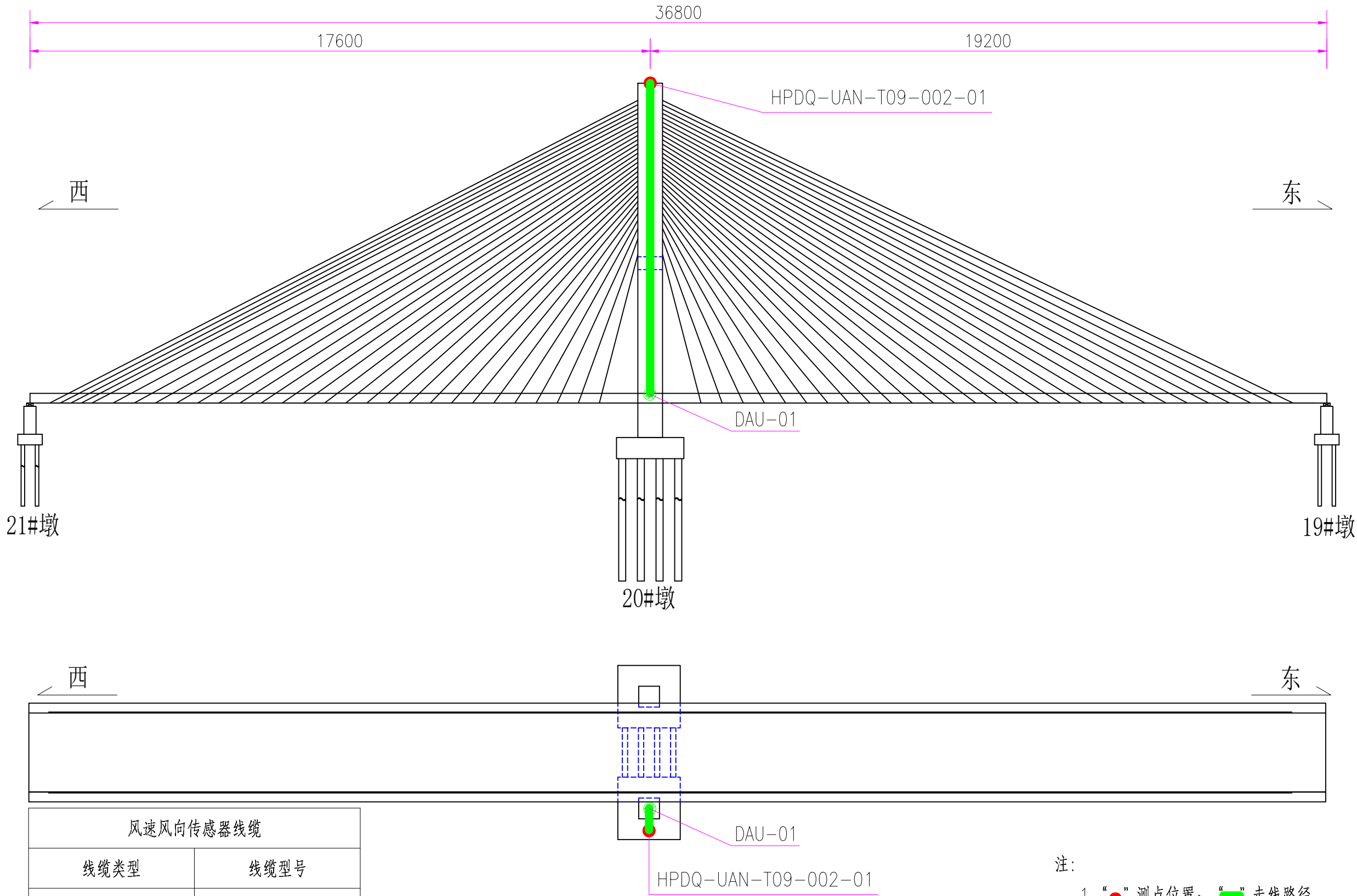
交通工程

建筑

道路

专业会签

塔顶风速风向走线图



其他

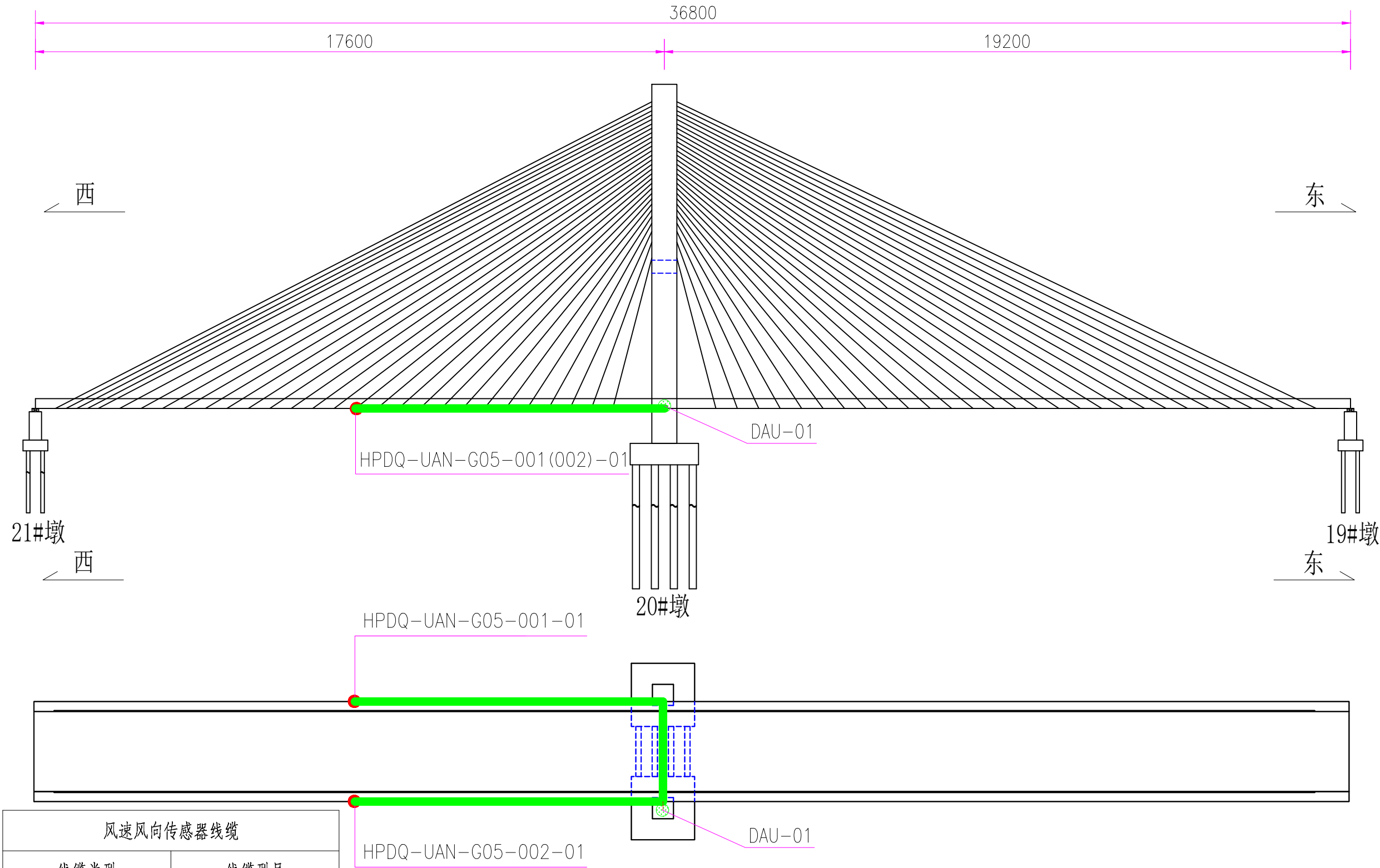
交通工程

建筑

道路

专业会签

桥面风速风向走线图



风速风向传感器线缆	
线缆类型	线缆型号
信号线缆	RWVP 4x0.5

注：
1. “●” 测点位置；“—” 走线路径。

其他

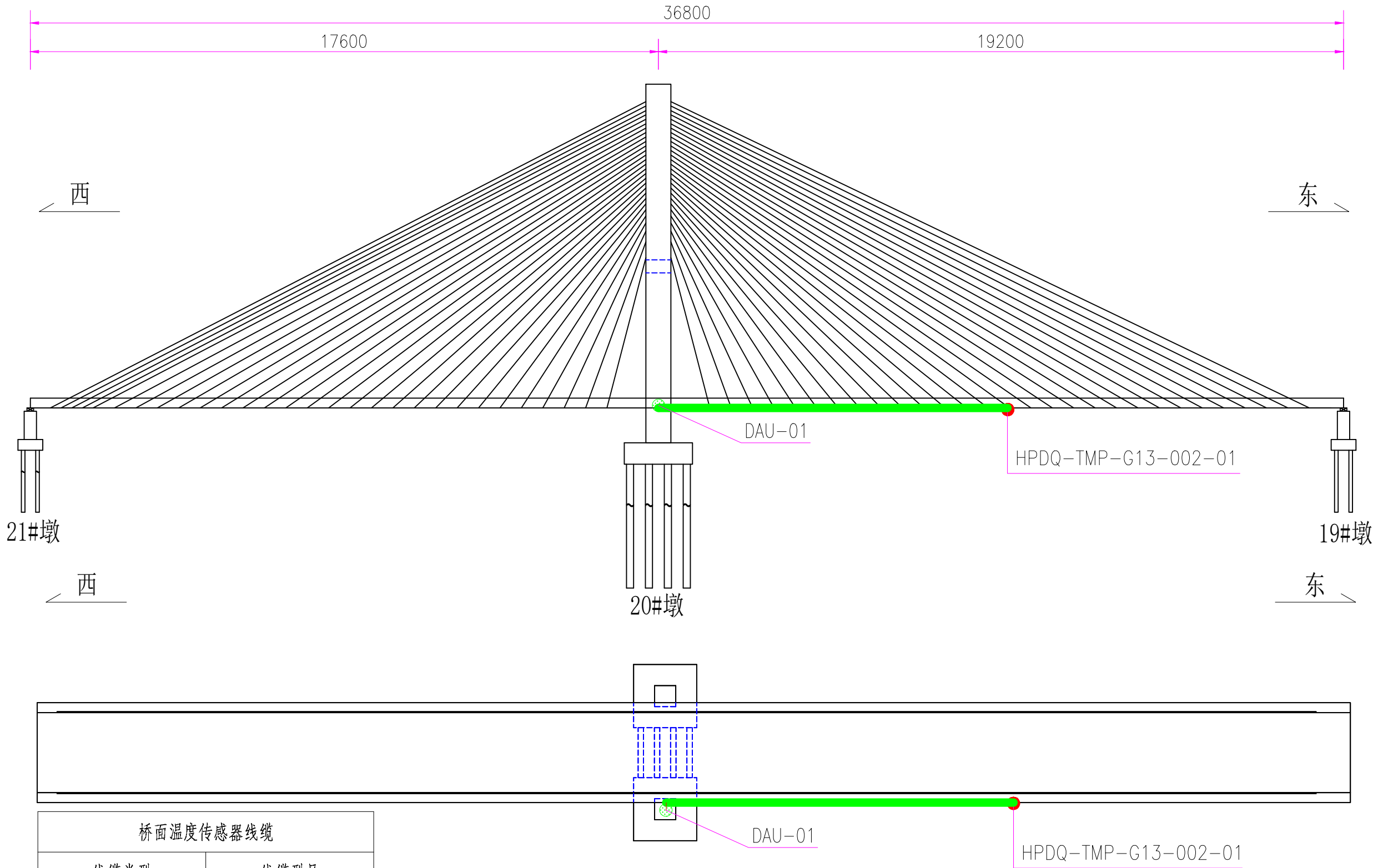
交通工程

建筑

道路

专业会签

桥面铺装层温度走线图



桥面温度传感器线缆	
线缆类型	线缆型号
信号线缆	RWP 4x0.5

注：
1. “●” 测点位置；“—” 走线路径。

其他

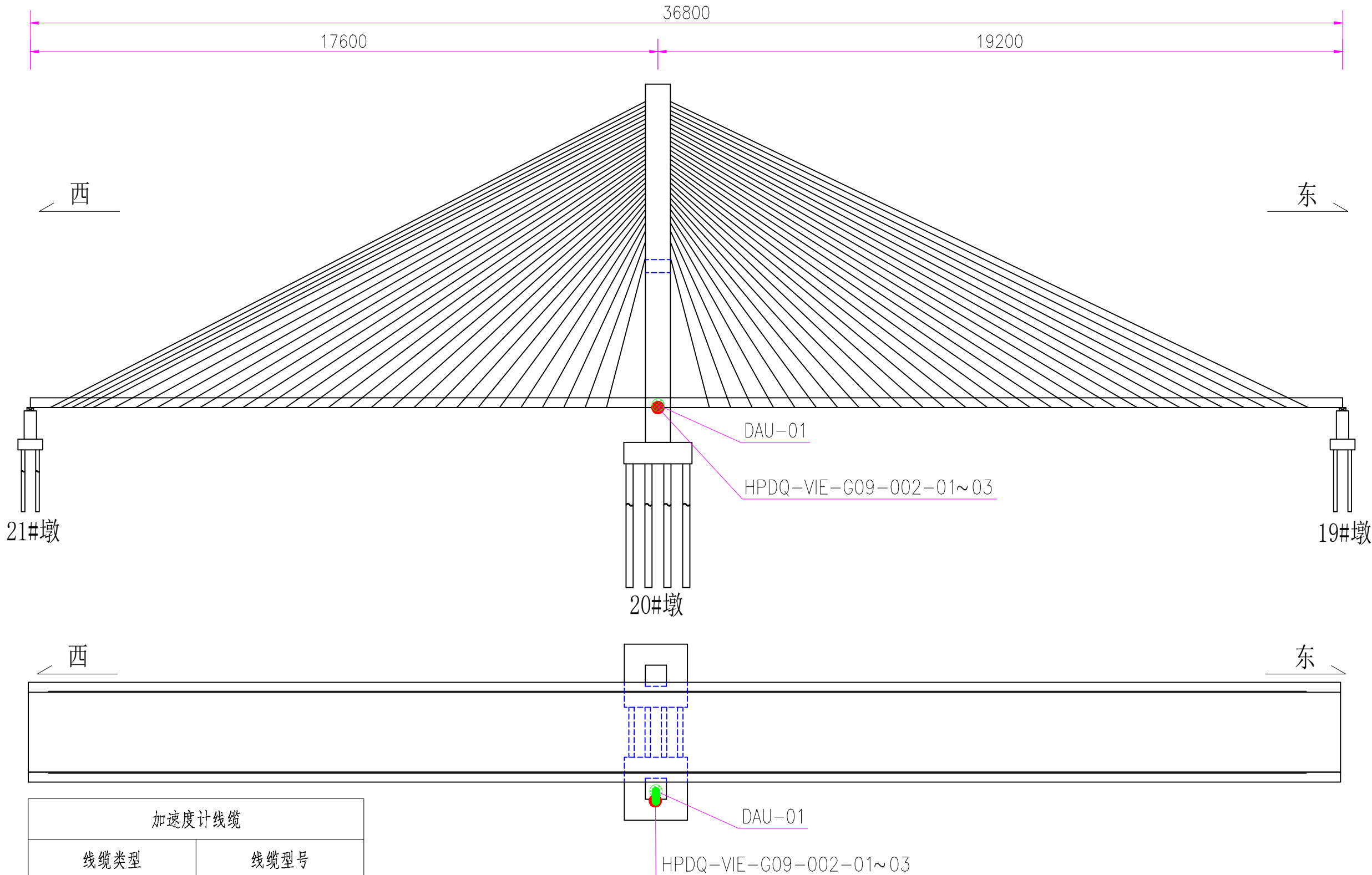
交通工程

建筑

道路

专业会签

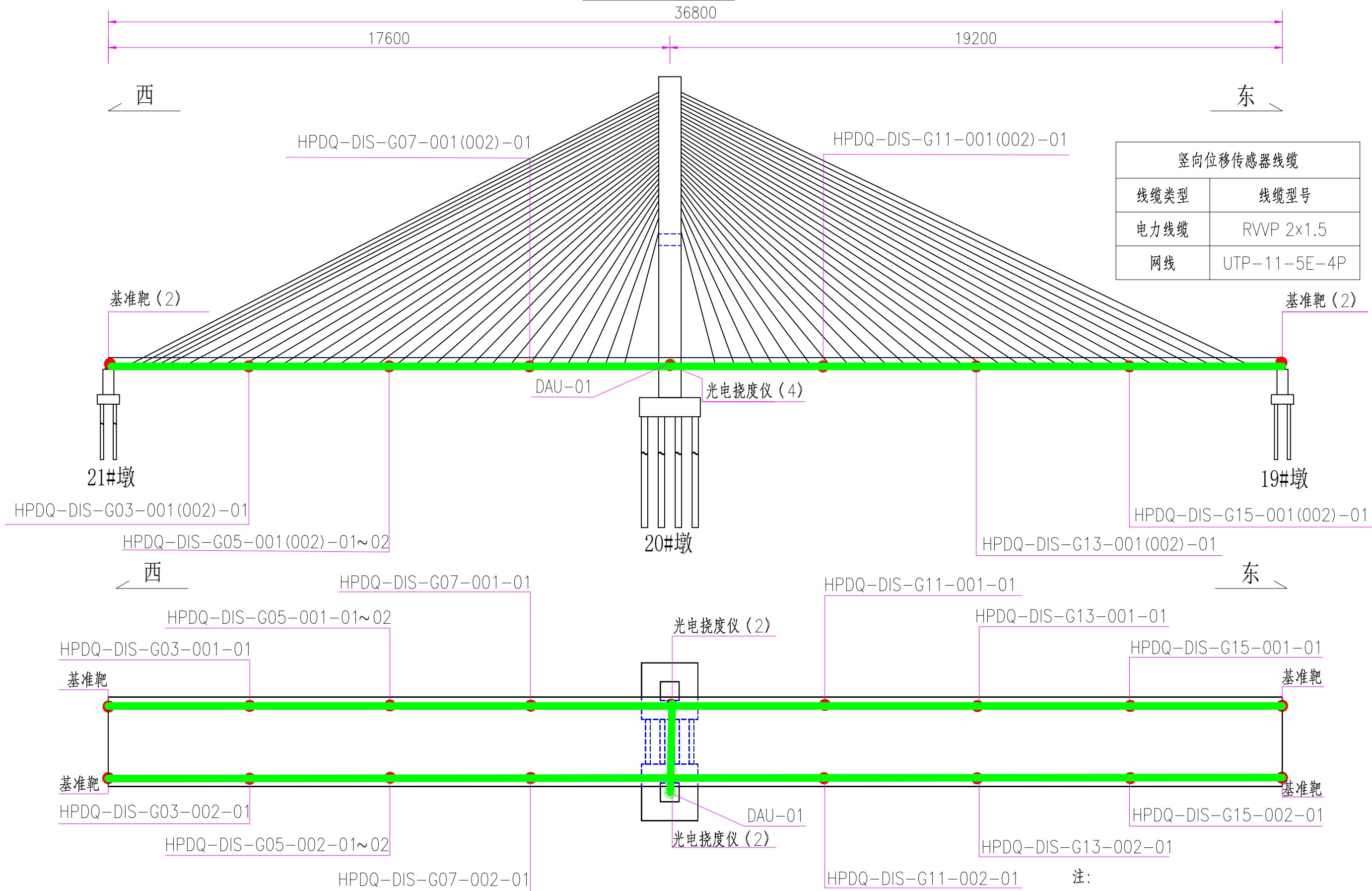
地震动走线图



加速度计线缆	
线缆类型	线缆型号
信号线缆	SYV 50-2-1

注：
1. “●” 测点位置； “—” 走线路径。

主梁竖向位移走线图



其他

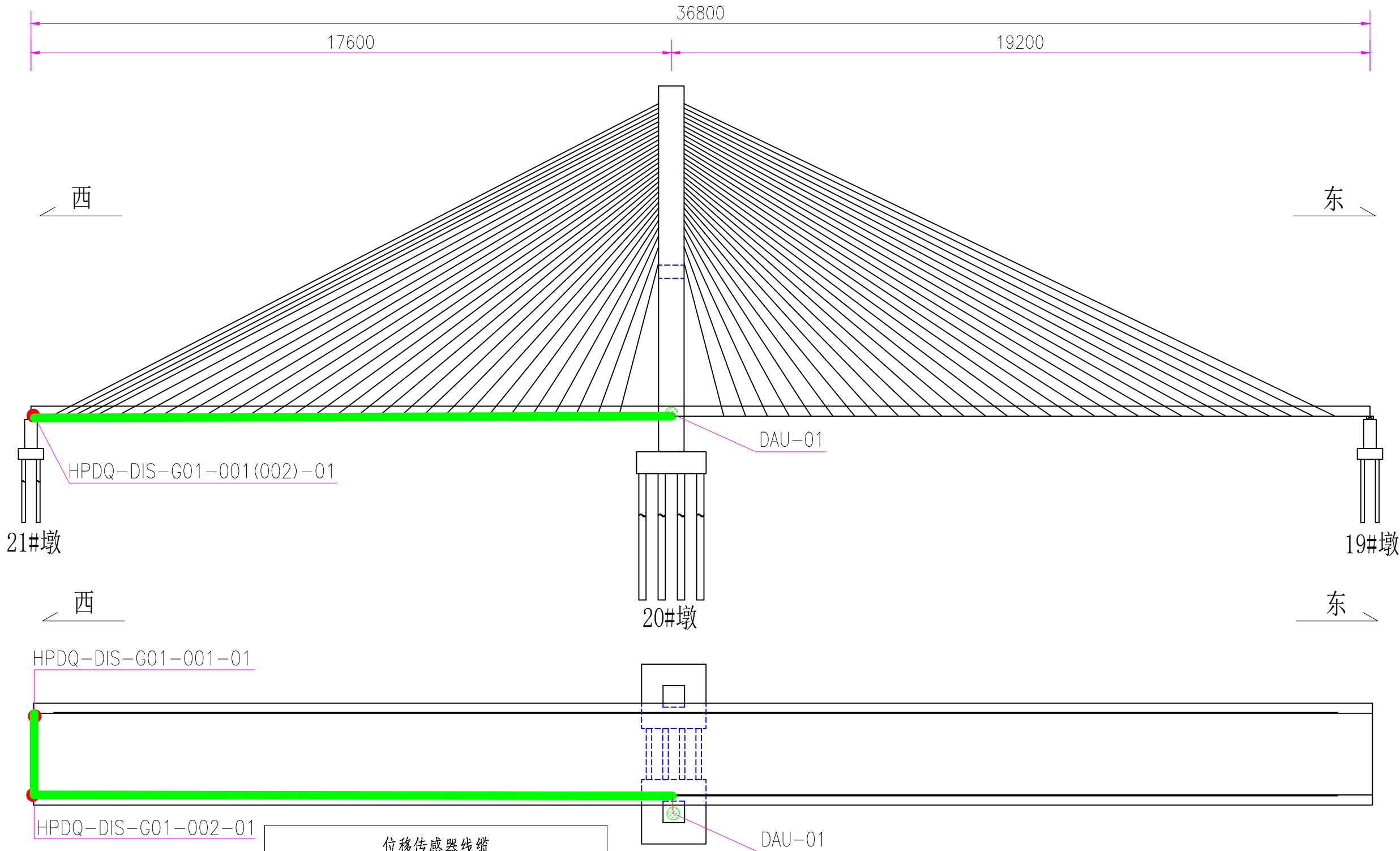
交通工程

建筑

道路

专业会签

支座位移走线图



位移传感器线缆	
线缆类型	线缆型号
信号线缆	RVP 4x0.5

注：
1. “●” 测点位置；“—” 走线路径。

其他

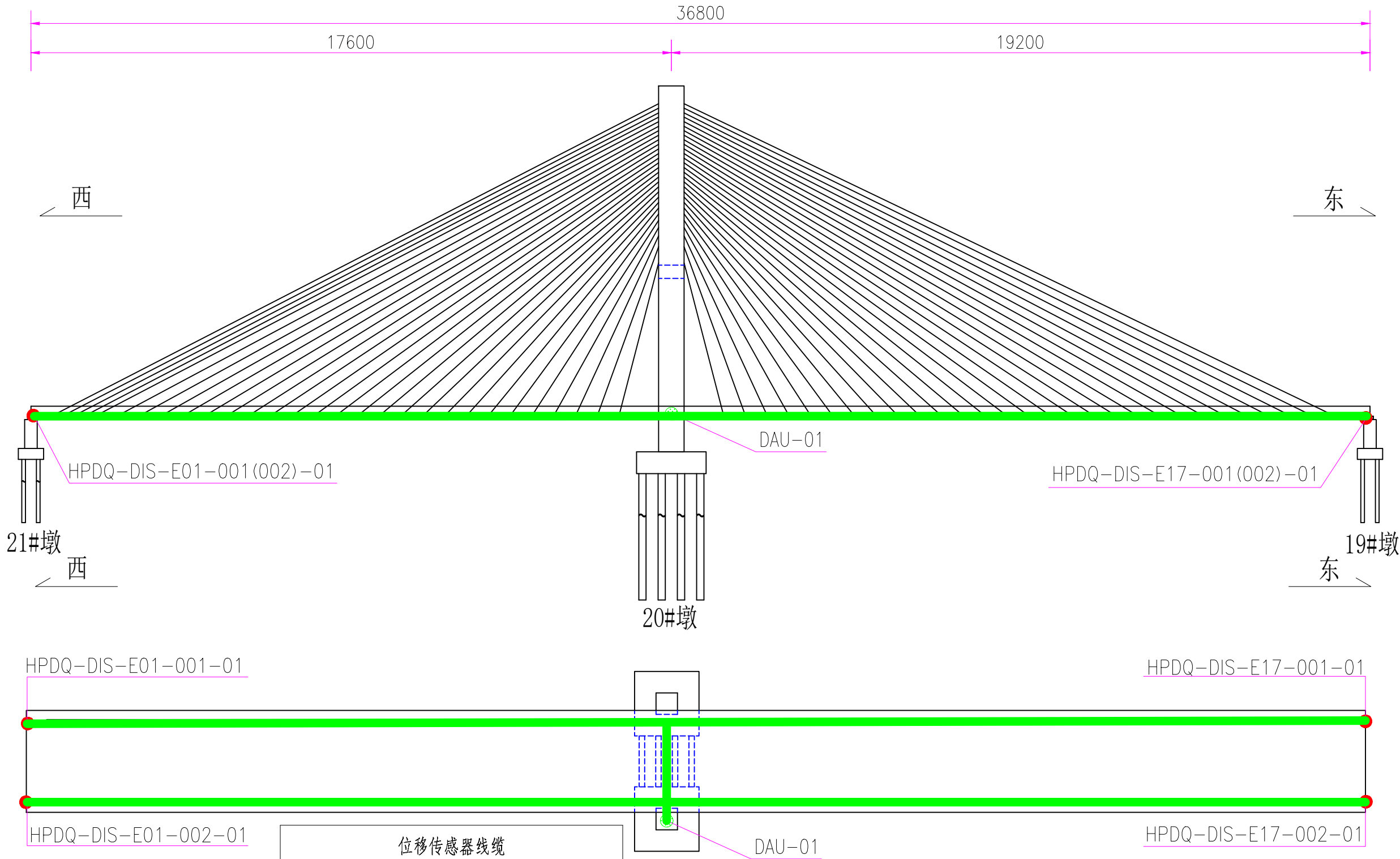
交通工程

建筑

道路

专业会签

梁端位移走线图



注：
1. “●” 测点位置；“—” 走线路径。

其他

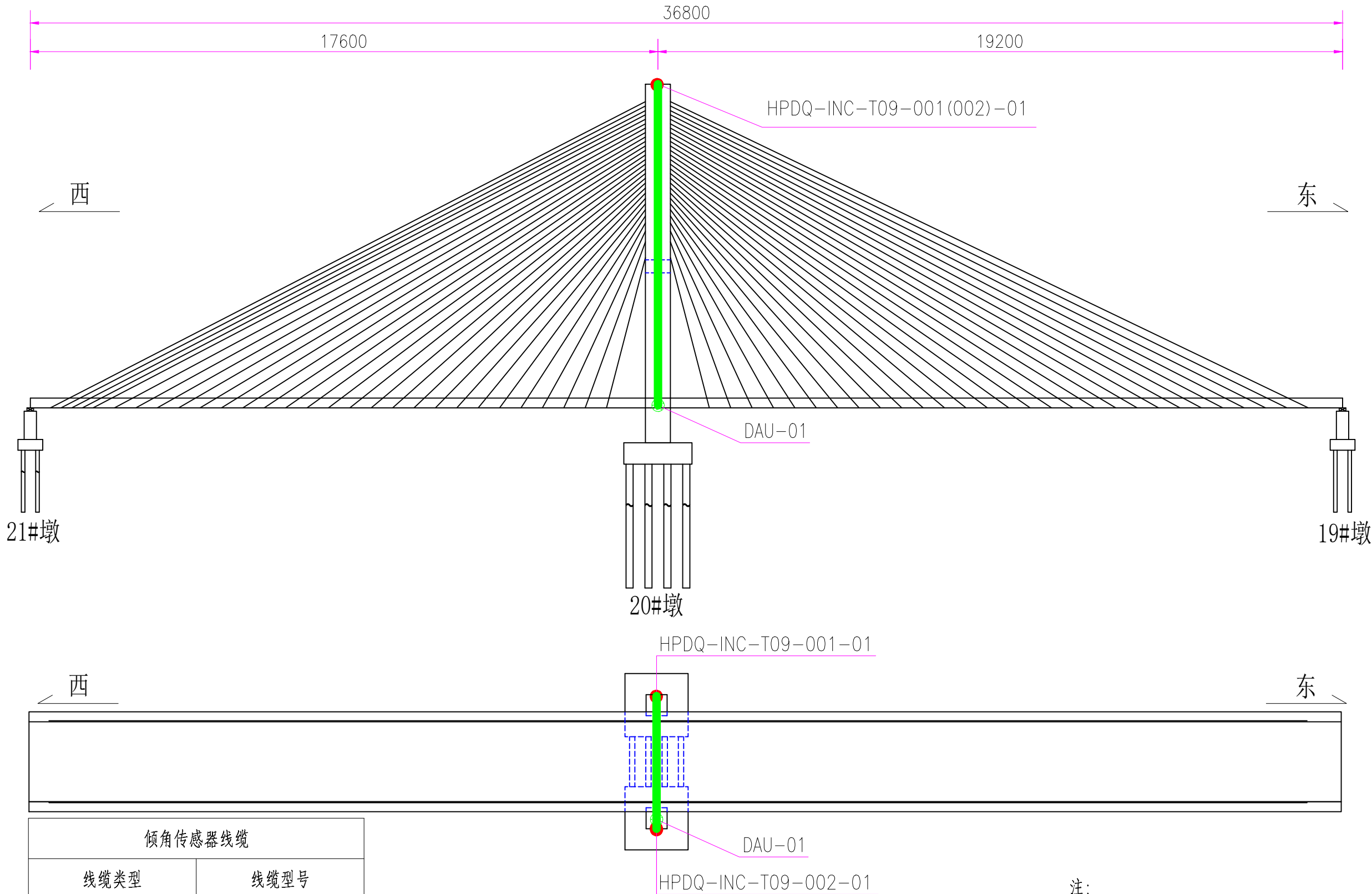
交通工程

建筑

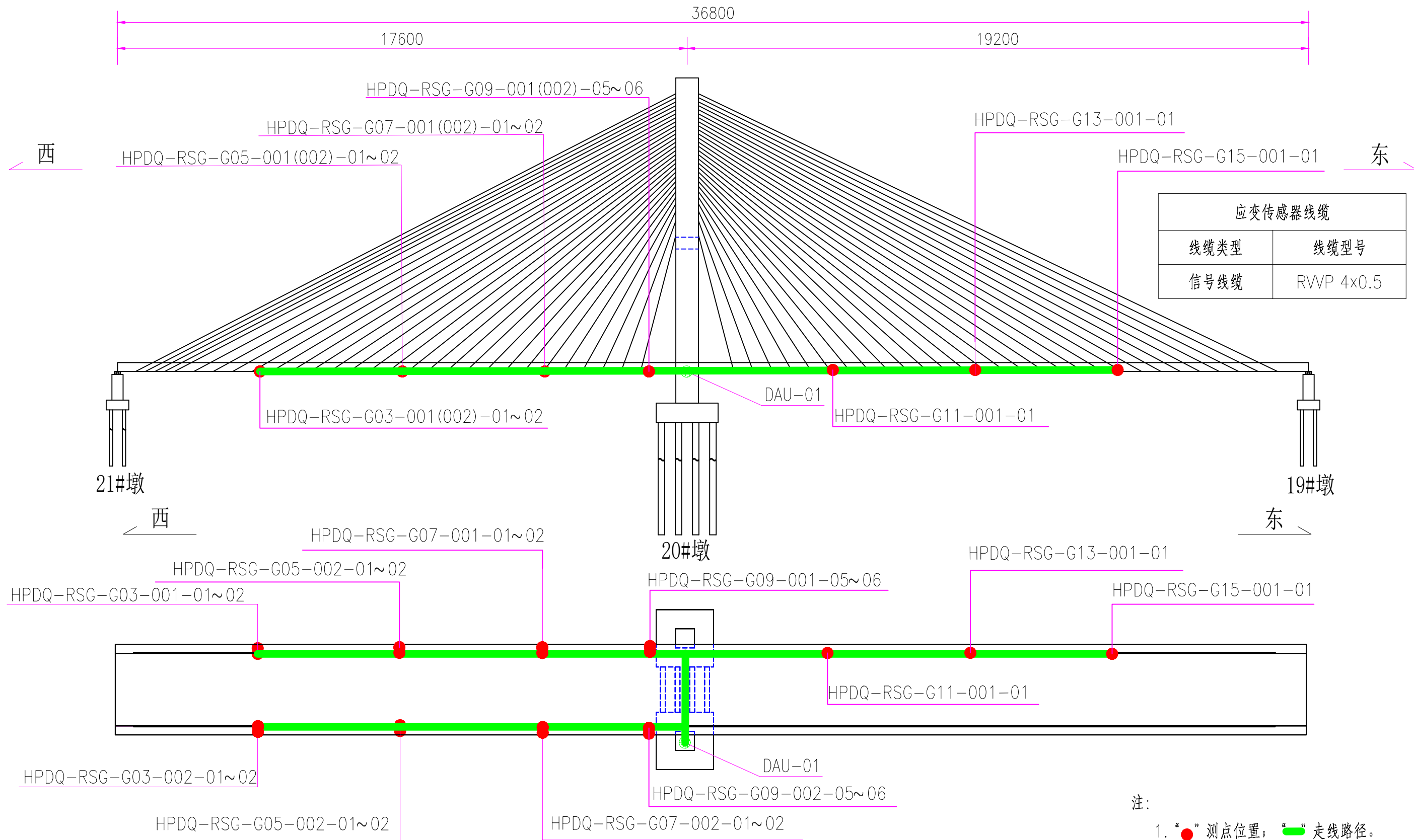
道路

专业会签

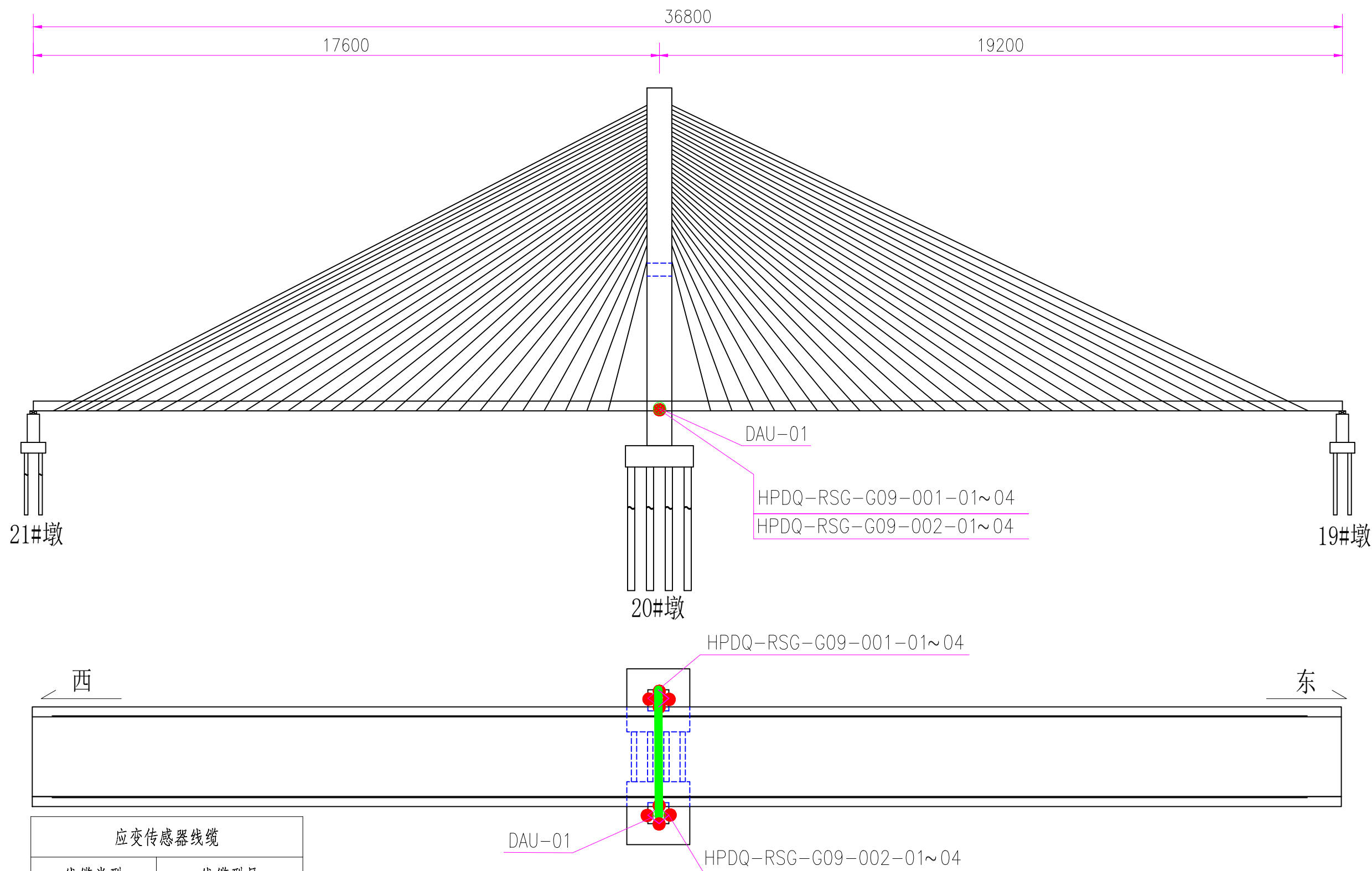
塔顶偏位走线图



主梁应变走线图



索塔应变走线图



注：
1. “●” 测点位置；“—” 走线路径。

其他

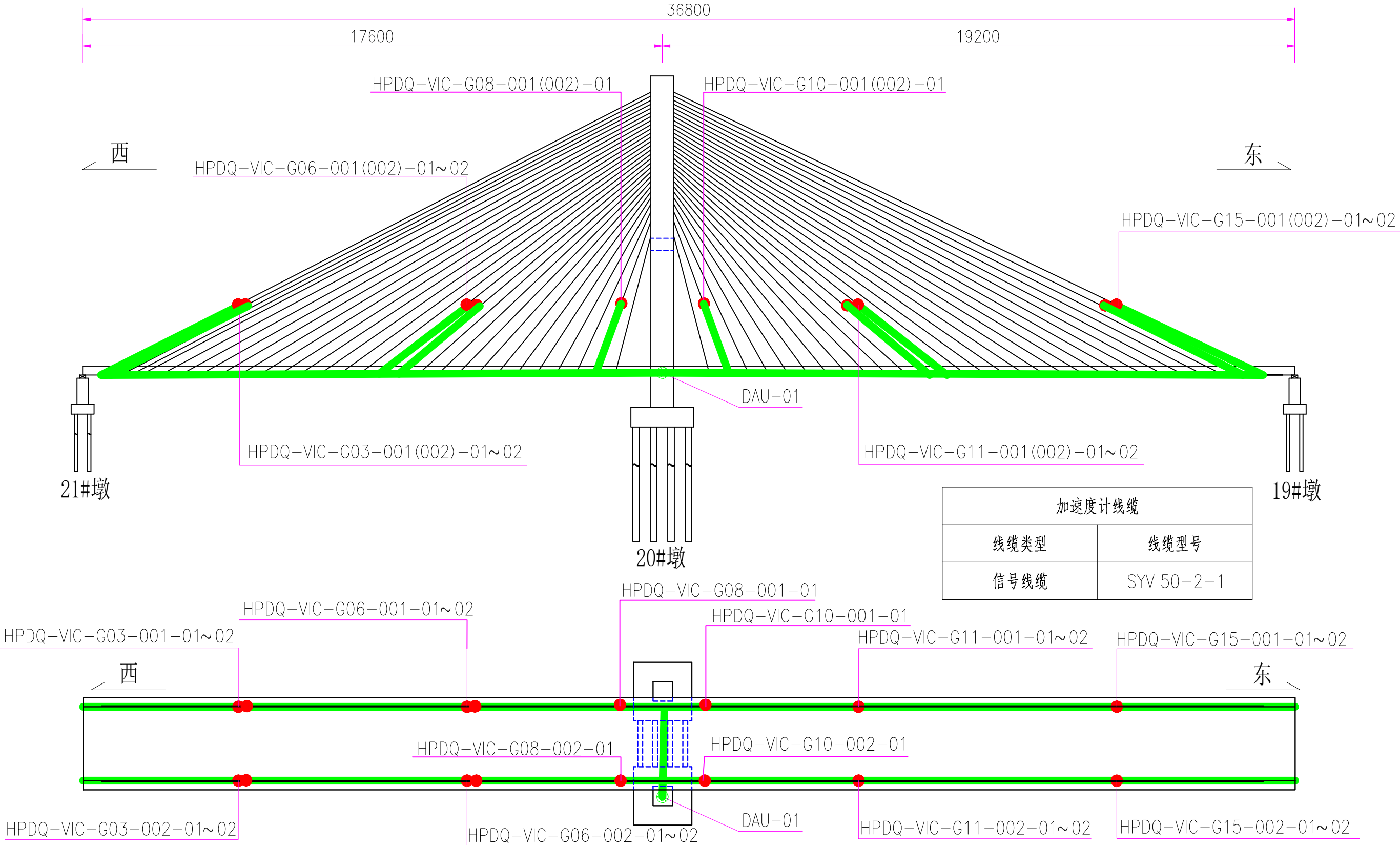
交通工程

建筑

道路

专业会签

索力监测走线图



注：
1. “●” 测点位置；“—” 走线路径。

浙江数智交院科技股份有限公司

和平大桥结构健康监测系统
升级改造项目施工图设计

索力监测走线图

设计

杨世杰
杨世杰

复核

周超
周超

一审

陆潇雄
陆潇雄

二审

陈露晔
陈露晔

编号
图号

2026QT190269
SI-4-13

其他

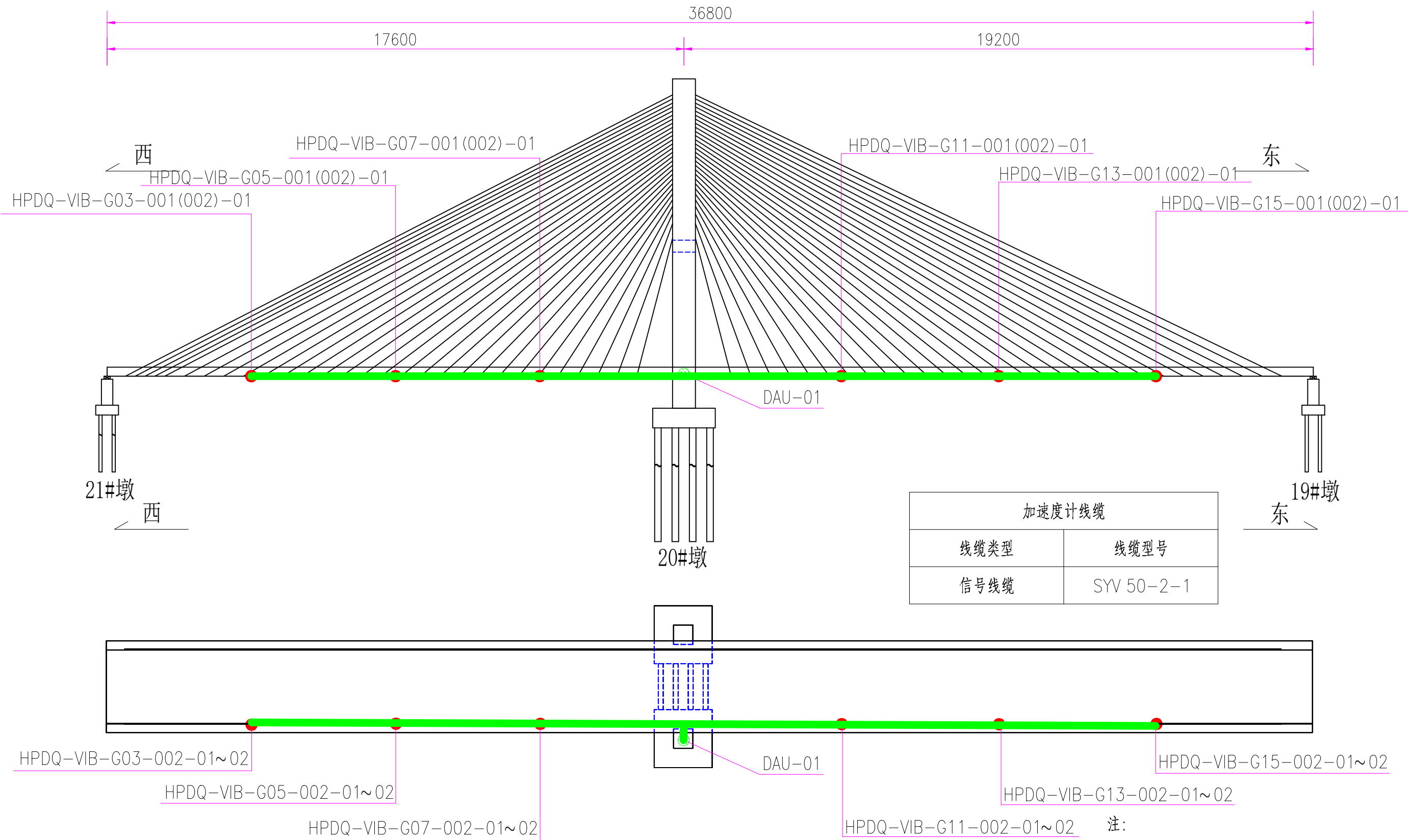
交通工程

建筑

道路

专业会签

主梁振动监测走线图



其他

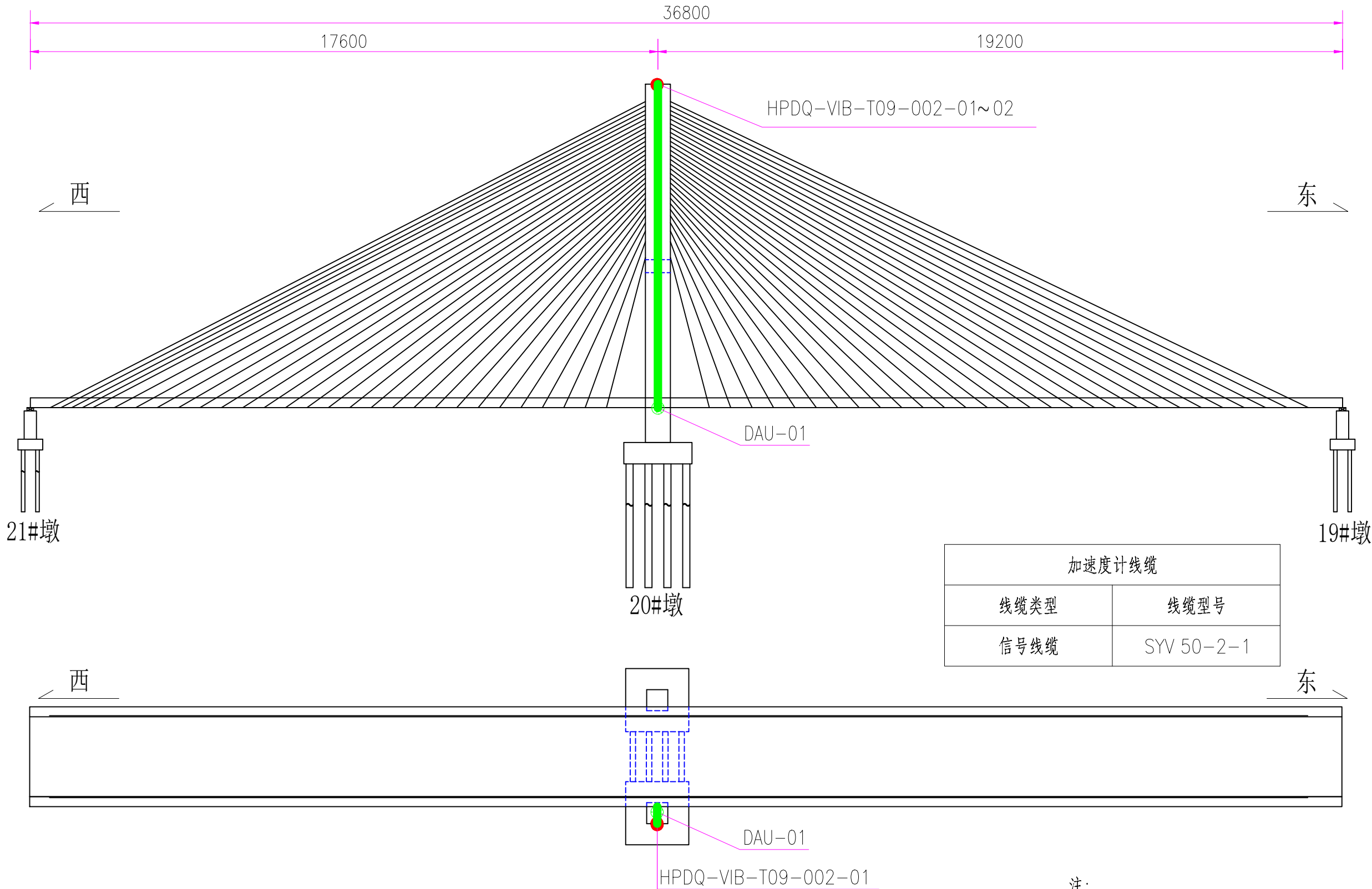
交通工程

建筑

道路

专业会签

主塔振动走线图



浙江数智交院科技股份有限公司

和平大桥结构健康监测系统
升级改造项目施工图设计

主塔振动走线图

设计

杨世杰
杨世杰

复核

周超
周超

一审

陆潇雄
陆潇雄

二审

陈露晔
陈露晔

编号
图号

2026QT190269
SI-4-15

其他

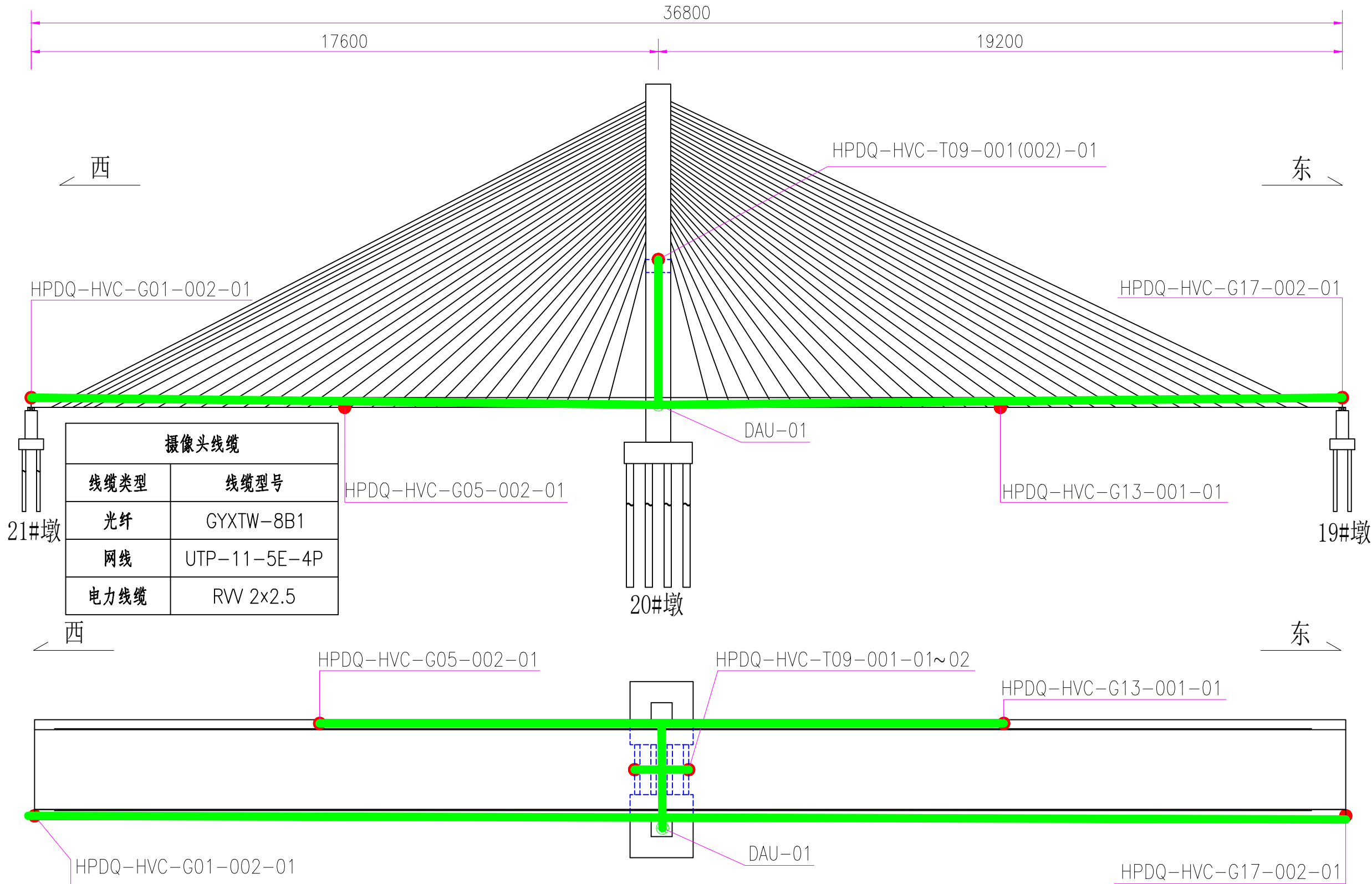
交通工程

建筑

道路

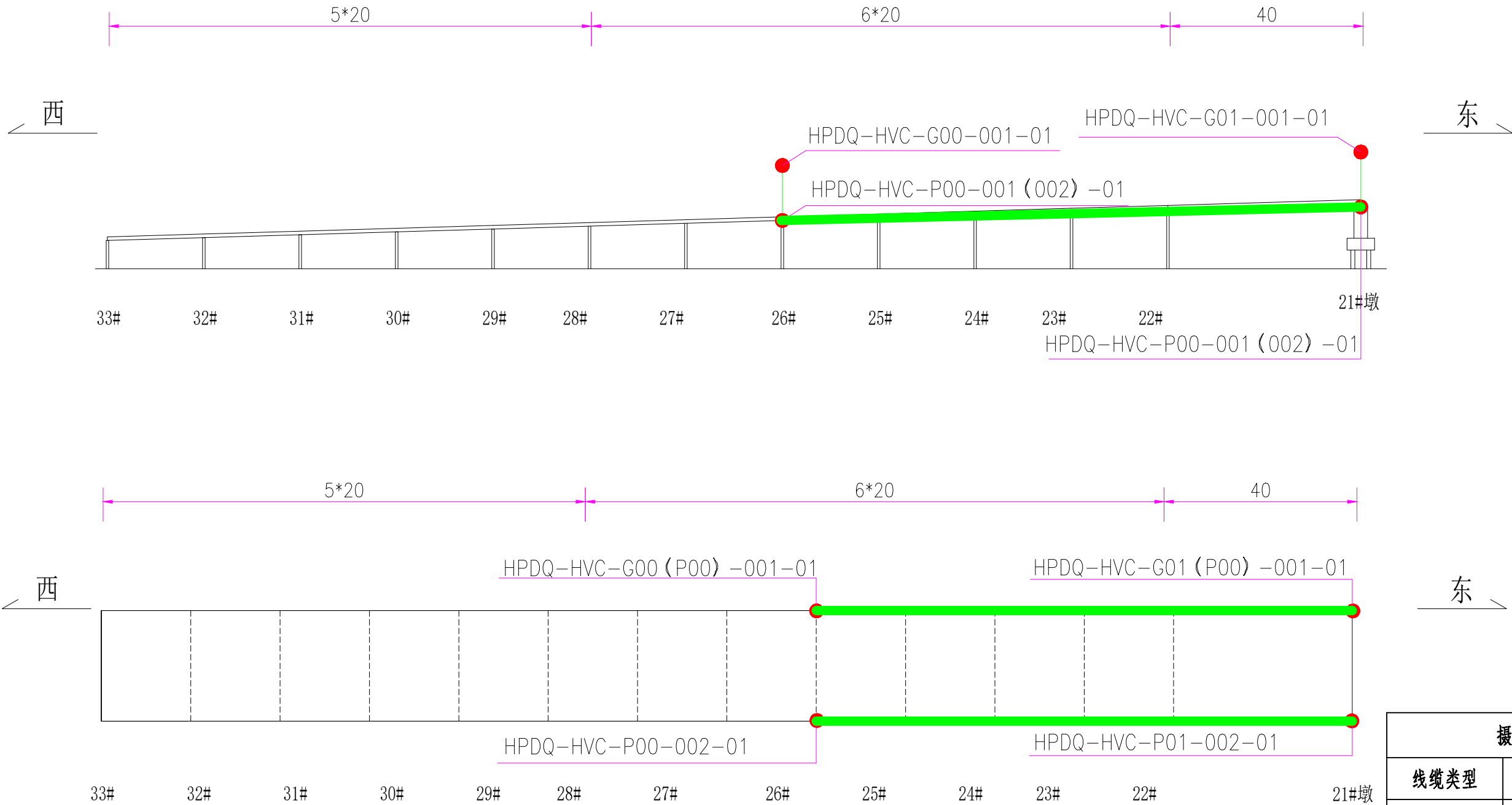
专业会签

视频监控测点走线图（一）

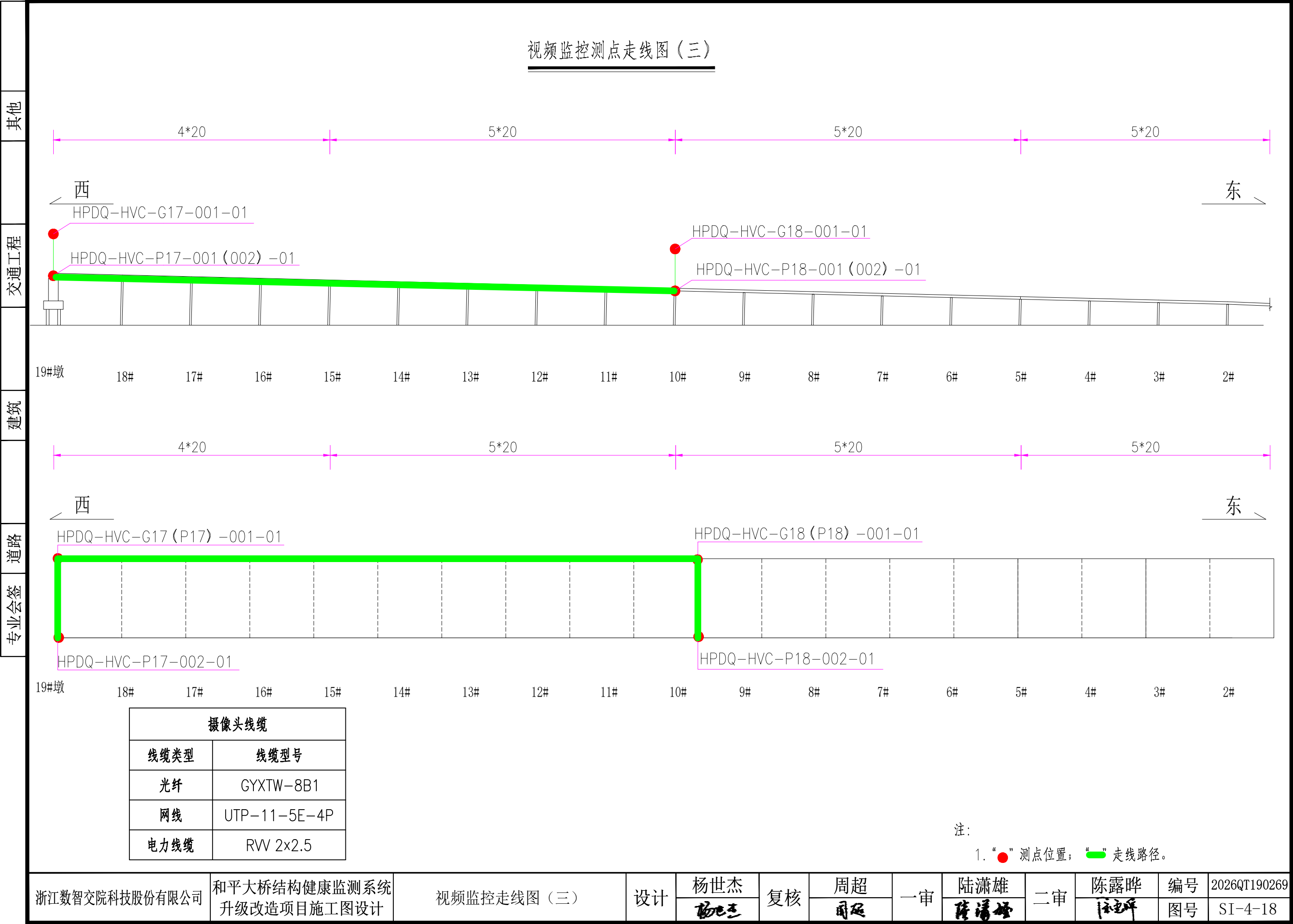


注：
1. “●” 测点位置；“—” 走线路径。

视频监控测点走线图（二）

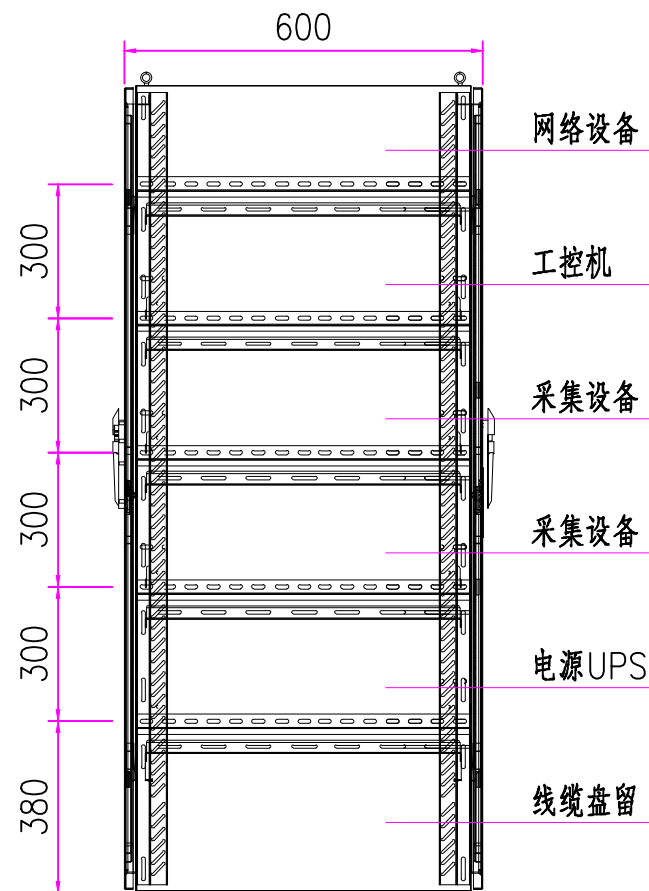


注：
1. “●” 测点位置；“—” 走线路径。

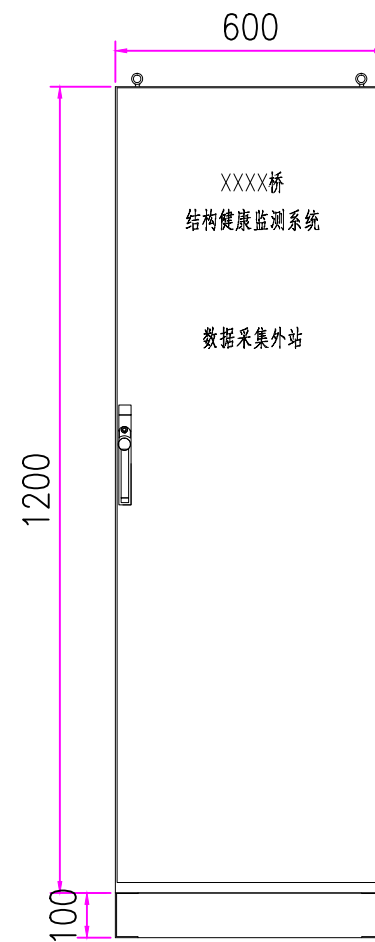


数据采集外站机柜安装图

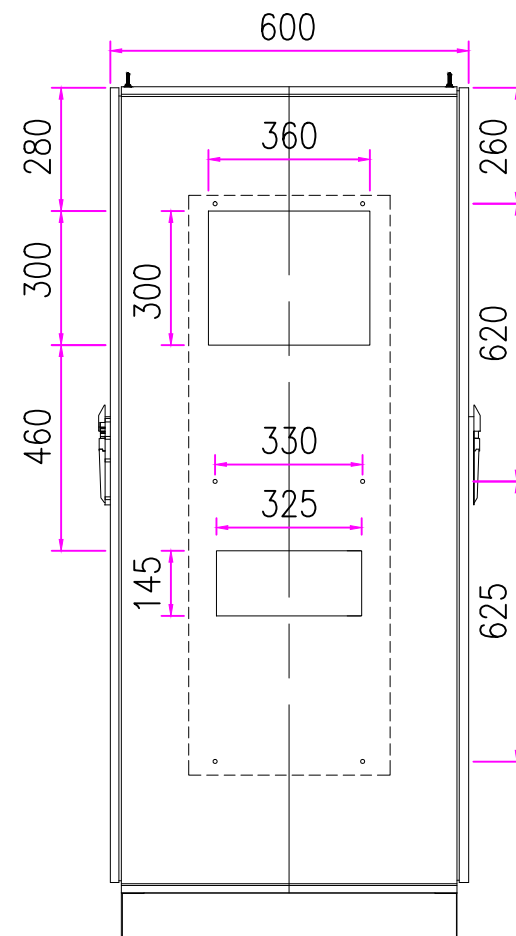
机柜主体框架



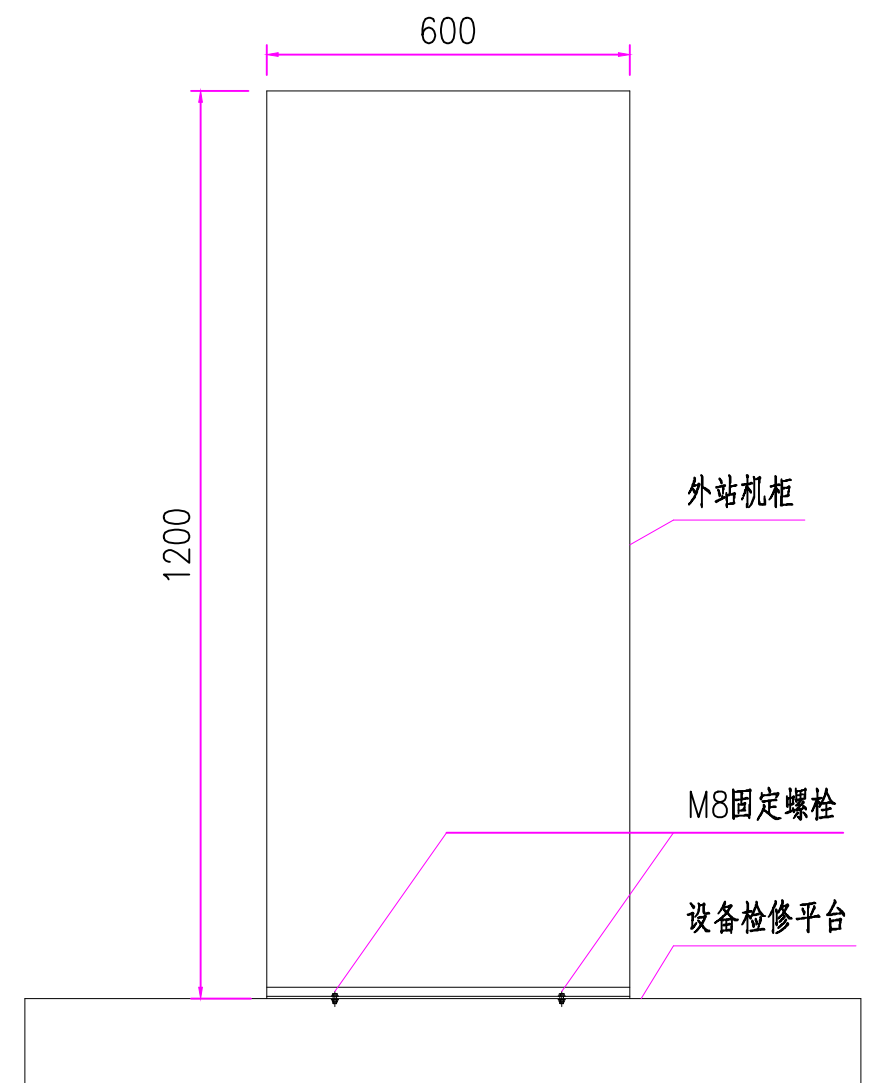
机柜主体框架



机柜侧板预留空调安装孔



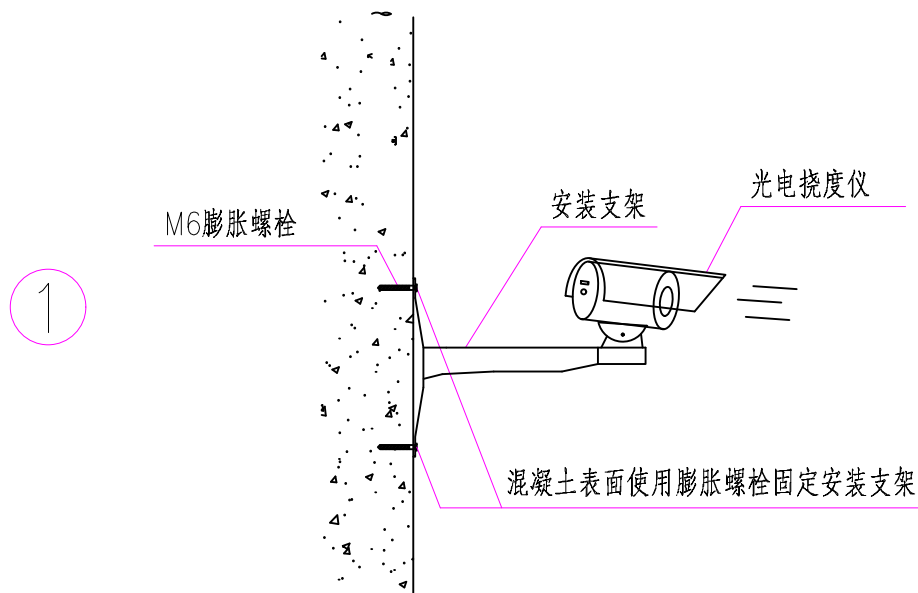
机柜侧视图



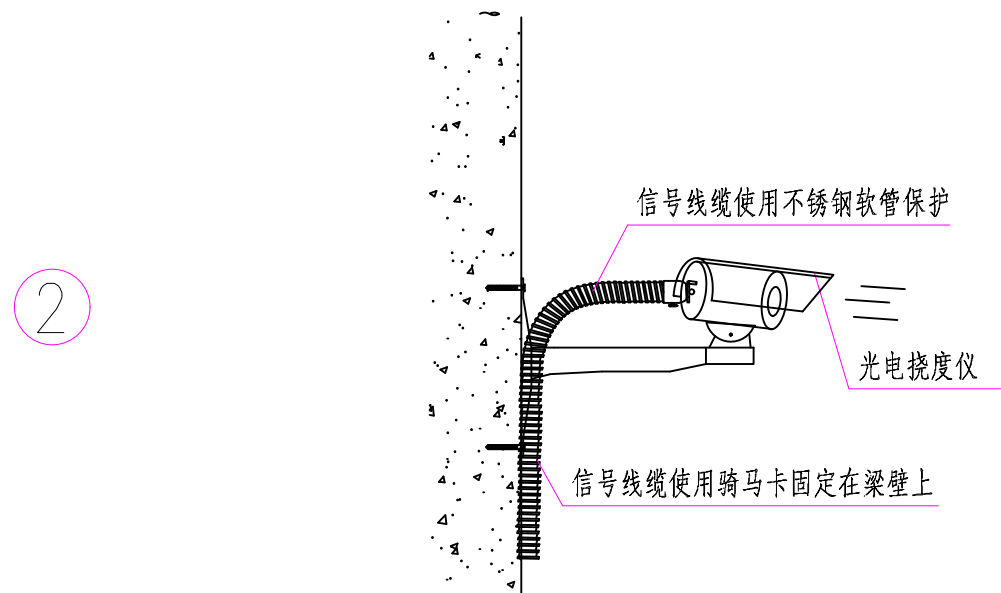
注：

1. 本图尺寸以毫米计。
2. 机柜尺寸600X800X1600（宽X深X高），底部预留10cm高固定底座。
3. 机柜侧板安装空调，底部进线孔在施工结束后进行密封处理。
4. 机柜整体可拆卸，安装时主体框架进行焊接固定。
5. 内部配置：19英寸立柱4根；活动层板5块；安装纵梁5根；底部三段式进线板。

光电挠度仪安装图

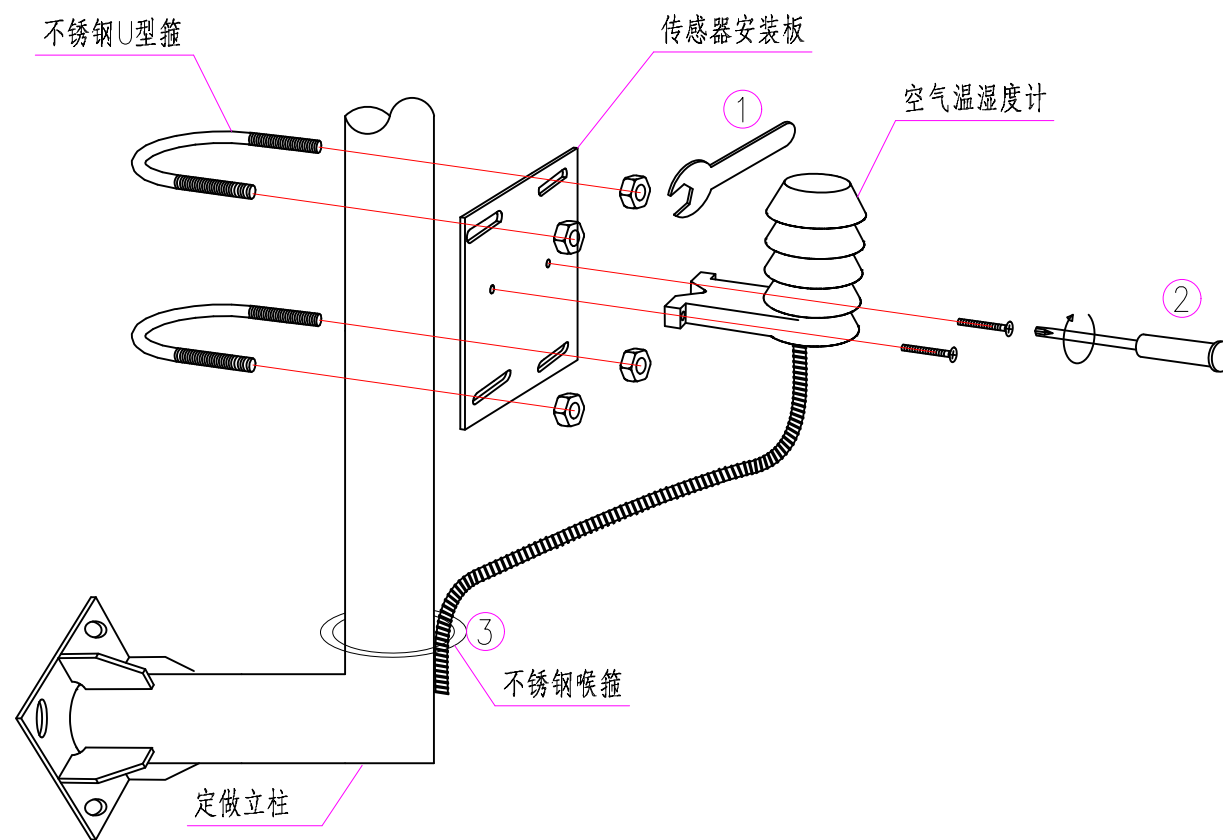


1. 测量、放样，根据图纸确定安装位置和安装方向。
2. 安装前使用水平尺在安装位置标注参考线，确保支架水平偏差不大于3度。
3. 混凝土表面安装时，安装支架使用M6膨胀螺栓固定在被测构件上。



1. 光电挠度仪安装时需使用调试软件检查观测目标靶，确保观测点目标靶位置在可视范围内。
2. 光电挠度仪观测范围可通过专用支架上万向节调整方向，确定观测范围后紧固。
3. 传感器信号线缆接头部位需要焊接，使用热缩管保护。
4. 传感器信号线缆使用不锈钢软管保护，使用骑马卡固定在梁壁上,确保线缆敷设美观。
5. 必须在规定位置标注传感器编号,便于维修更换。

温湿度计安装图



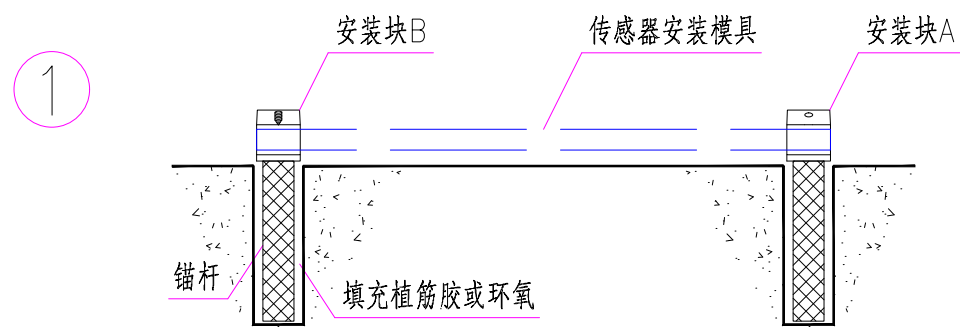
安装方法：

1. 传感器安装板使用不锈钢U型箍固定在定做立柱上，U型箍规格根据现场实际情况选用。
2. 空气温湿度计使用配套支架防尘罩固定在安装板上。
3. 传感器信号线缆使用镀锌刚软管保护，接头处焊接。
4. 信号线缆敷设时使用不锈钢抱箍固定在定做立柱上，固定间隔0.2米，线缆敷设尽可能隐蔽，不影响美观。
5. 梁内、塔内空气温湿度计使用自攻螺丝和膨胀管固定在塔壁和箱梁内壁上。

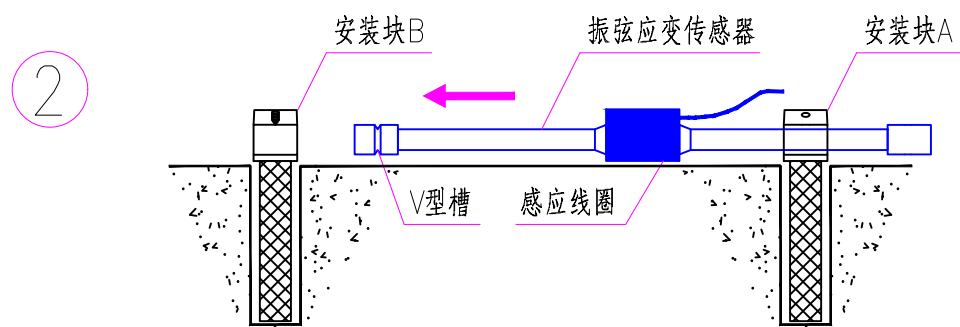
注：

1. 本图尺寸以毫米计。

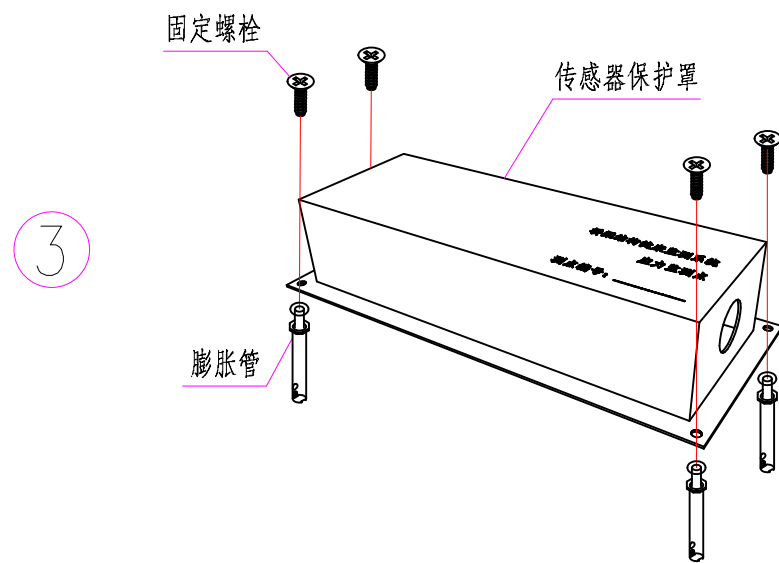
振弦式应变计安装图



1. 测量安装位置，使用传感器安装模具定位安装块在被测物表面钻孔，清除安装孔内尘土。
2. 钻孔内填充植筋胶或环氧，将安装块锚杆固定在钻孔内。
3. 待植筋胶或环氧完全凝固后，拆除安装模具。



1. 按上图所示方向装入传感器，套上线圈并固定卡箍。
2. 传感器固定时，需使用便携式读数仪进行检验。
3. 先将应变计有V形槽的一段用螺钉固定，调节另一端使之达到预期的初始读数。
4. 初始读数稳定后使用螺丝固定。

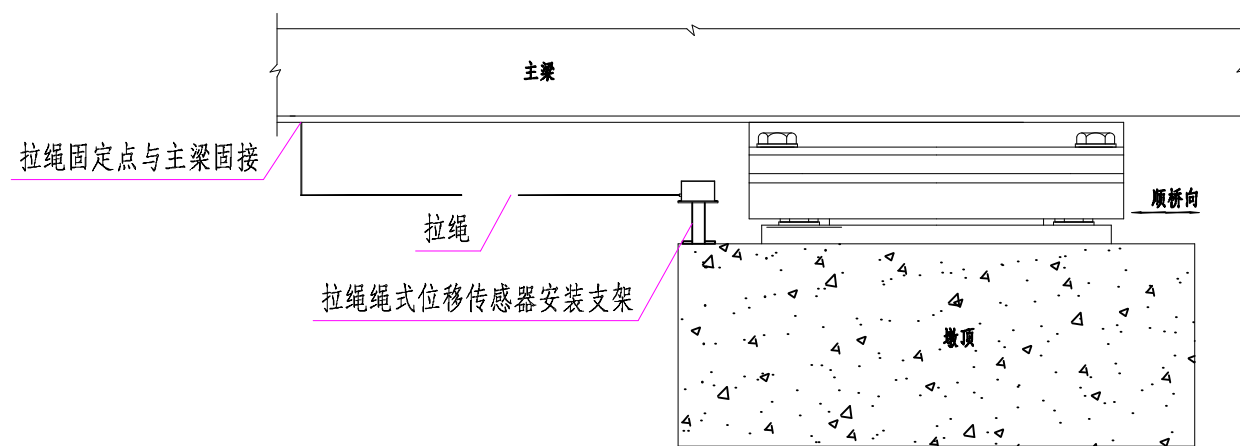
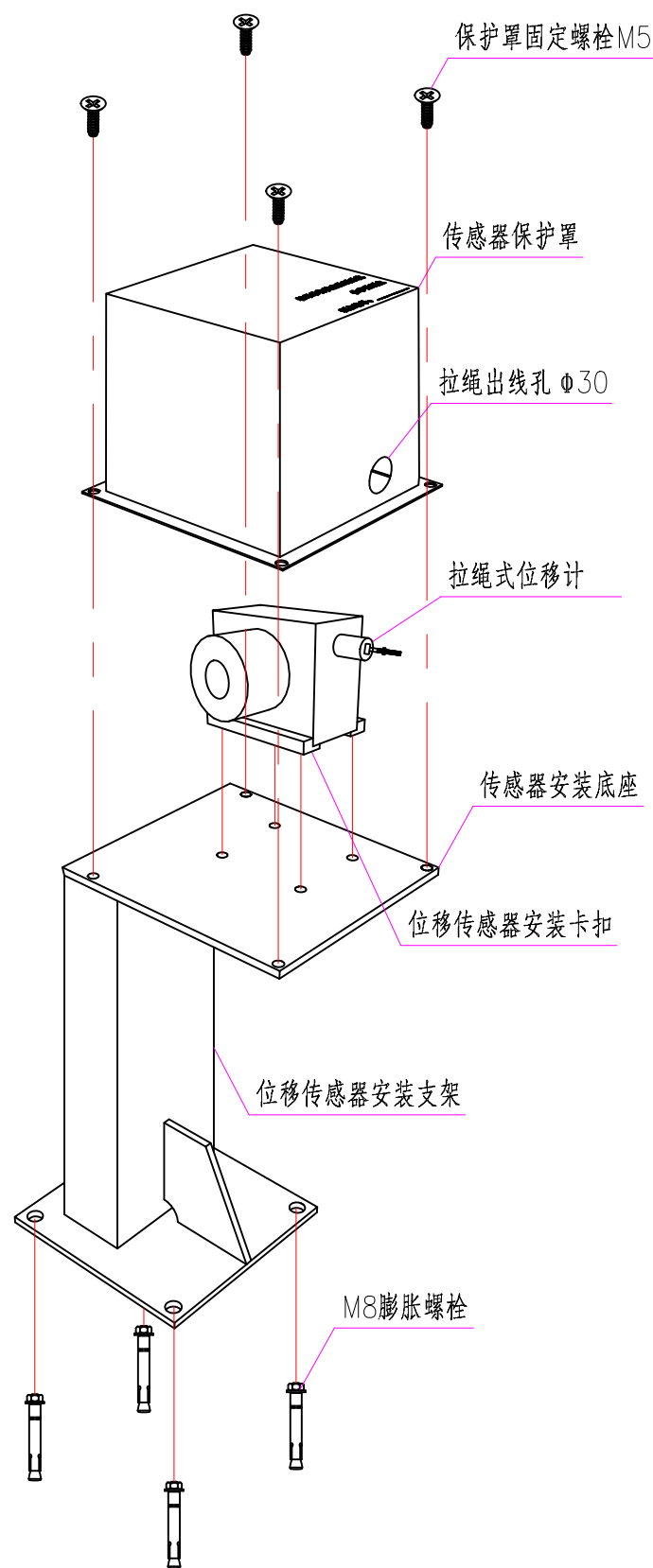


1. 传感器保护罩使用膨胀管固定在混凝土构件表面。
2. 保护罩预留 $\Phi 22$ 出线孔，安装PG13防水接头，用于传感器信号线缆布设。
3. 传感器信号线缆接头部位需要焊接，使用热缩管保护，接线部位收纳在保护罩内。
4. 保护罩安装完成后，必须在规定位置标注传感器编号,便于维修更换。

注：

1. 传感器接线参照振弦式应变计接线图。
2. 传感器保护罩尺寸详见应变/温度传感器安装配件加工图。
3. 应变计通常读数范围是400~1200，如果仪器设计用于测量拉应变，可将应变计活动端向内轻压（应避免相对扭转，以免损坏应变计），将读数调整到650左右。如果仪器设计用于测量压应变，可将应变计活动端向外轻推，将读数调整到950左右。调整完毕后，将自由端固定。

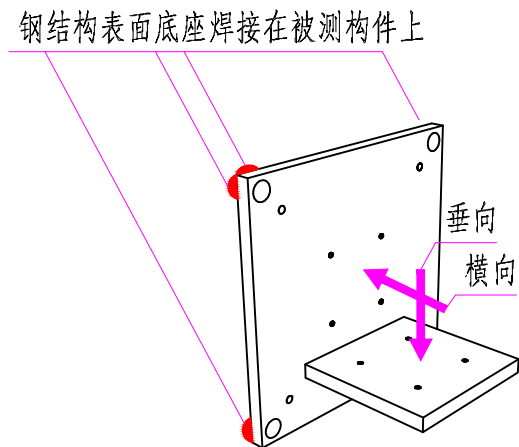
拉绳式位移计安装图



安装方法:

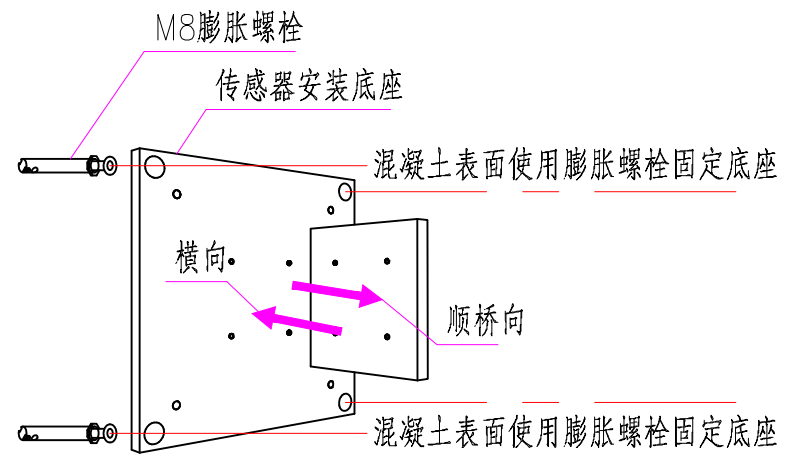
1. 安装前清洁安装底座端面, 传感器安装部位填充结构胶加固。
2. 加速度计使用M5不锈钢螺丝固定安装底座上, 确保连接稳固。
3. 传感器通电测试正常后, 使用M5内六角螺丝固定保护罩。
4. 保护罩预留 $\Phi 30$ 拉绳出线孔, 拉绳在空间范围保持平直, 偏差不大于 $\pm 3^{\circ}$ 。
5. 保护罩预留 $\Phi 22$ 出线孔, 安装PG13防水接头, 用于传感器信号线缆敷设。
6. 传感器信号线缆接头部位需要焊接, 使用热缩管保护, 接线部位收纳在保护罩内。
7. 传感器检验后, 必须在规定位置标注传感器编号, 便于维修更换。

加速度计安装图（一）

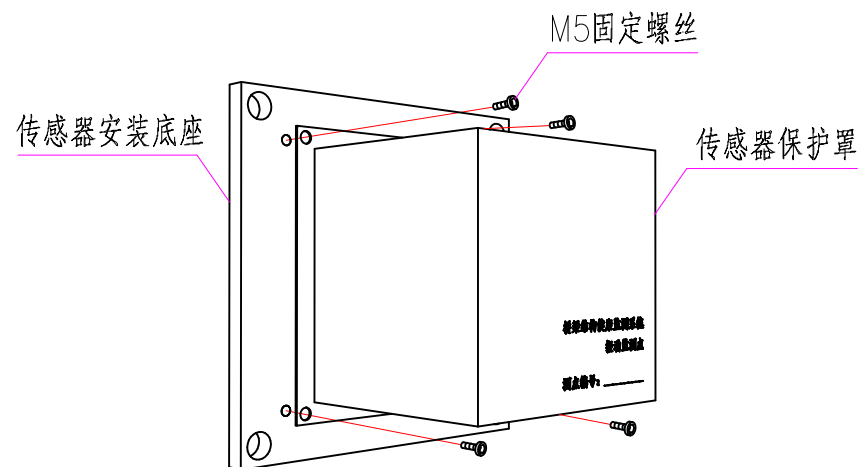
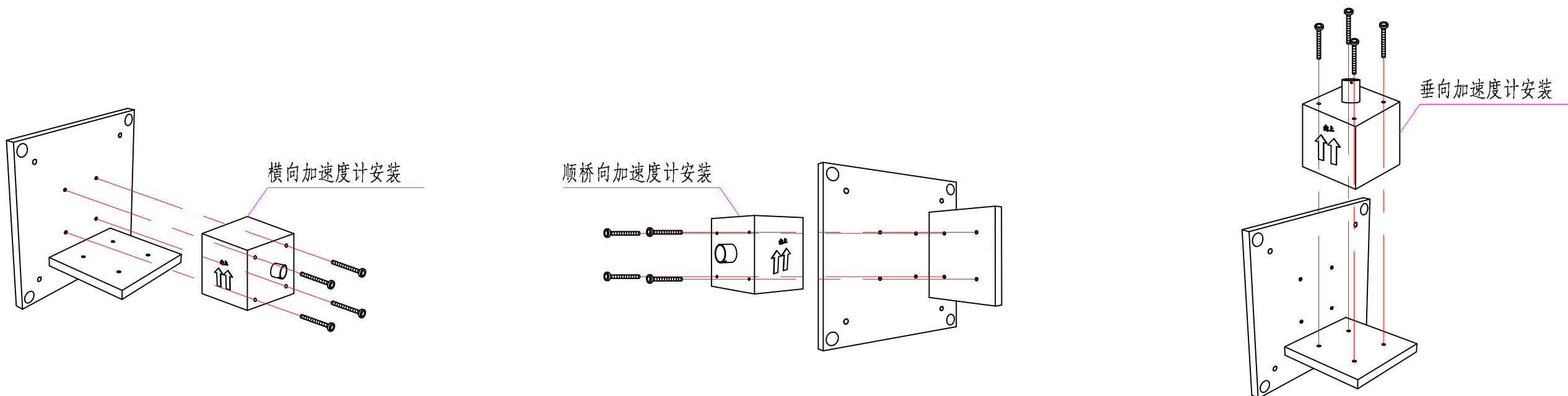


传感器底座安装方法：

1. 测量、放样，根据图纸确定安装位置和安装方向。
2. 通过改变底座方向来确定传感器测量方向。
3. 混凝土表面安装时，安装底座使用M8膨胀螺栓固定在被测构件上。。
4. 钢结构表面安装时，安装底座焊接在被测构件上，焊接后进行防腐处理。
5. 混凝土表面和钢结构表面传感器底座统一定制，加工尺寸详见加速度计安装配件加工图。



加速度计安装图（二）



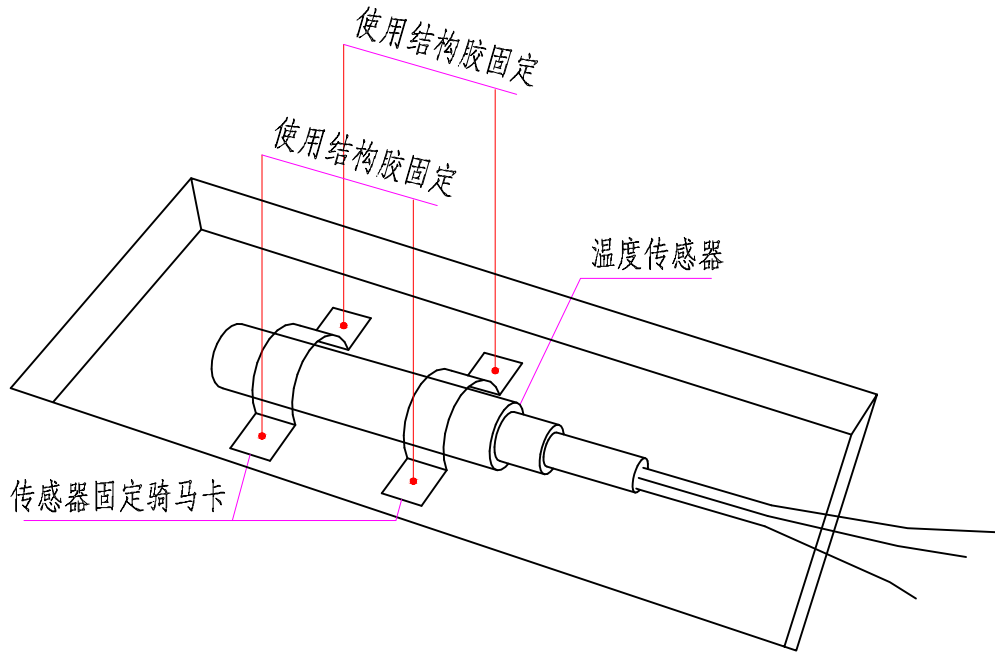
安装方法：

1. 传感器安装在底座上，安装前必须清洁安装面。
2. 传感器使用M4不锈钢螺栓固定在底座上，安装前在传感器与底座之间使用结构胶进行加固。
3. 安装时需注意安装方向与传感器出厂标定方向是否一致。
4. 传感器安装后通电测试，确保正常使用后安装保护罩，保护罩使用M5内六角螺丝固定在安装底座上。
5. 保护罩预留 $\Phi 22$ 出线孔，安装PG13防水接头，用于传感器信号线缆布设。
6. 传感器信号线缆接头部位需要焊接，使用热缩管保护，接线部位收纳在保护罩内。
7. 保护罩安装完成后，必须在规定位置标注传感器编号，便于维修更换。

注：

1. 传感器接线参照加速度计接线图。
2. 安装底座、保护罩尺寸详见加速度计安装配件加工图。

路面温度传感器安装图



- 安装方法：
- 1. 测量安装位置进行标记，尽可能选取在护栏边缘处，要求安装位置不影响行车，且不易被破坏。
 - 2. 在安装位置开槽，开槽尺寸10mmX50mm，开槽深度10mm。
 - 3. 温度传感器在槽内使用骑马卡固定。
 - 4. 传感器安装后使用环氧树脂进行回填，确保不渗水，不影响美观。
 - 5. 安装完成后及时测量检验。
 - 6. 传感器信号线缆接头部位需要焊接，使用热缩管保护，接线部位收纳在线管或桥架内。
 - 7. 传感器信号线缆在路面使用地面线槽进行保护，沿护栏处走线进机柜。
 - 8. 传感器检验后，在线缆端部挂传感器铭牌,便于后期维修更换。

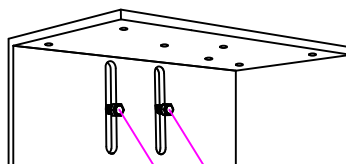
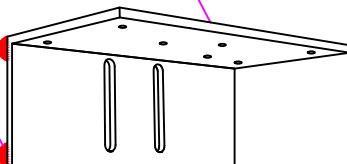
注：
1. 传感器接线参照温度传感器接线图。

浙江数智交院科技股份有限公司	和平大桥结构健康监测系统 升级改造项目施工图设计	路面温度传感器安装图	设计	杨世杰	复核	周超	一审	陆潇雄	二审	陈露晔	编号	2026QT190269
				杨世杰		周超		陆潇雄		陈露晔	图号	SI-5-8

倾角传感器安装图

钢结构表面底座焊接在被测构件上

1



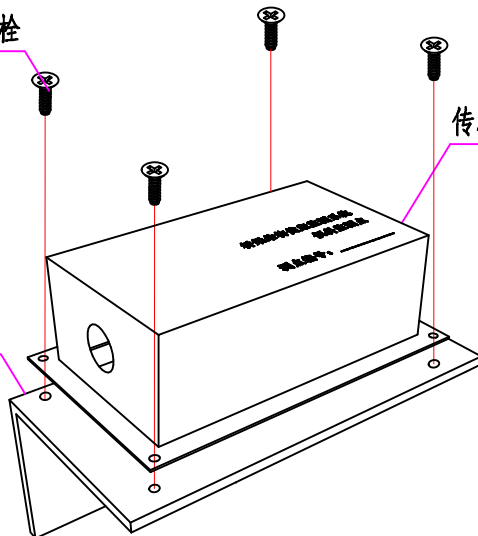
混凝土表面使用膨胀螺栓固定底座

1. 测量、放样，根据图纸确定安装位置和安装方向。
2. 安装前使用水平尺在安装位置标注参考线，确保底座安装水平偏差不大于 1° 。
3. 混凝土表面安装时，安装底座使用M8膨胀螺栓固定在被测构件上。。
4. 钢结构表面安装时，安装底座焊接在被测构件上，焊接后进行防腐处理。

M5安装螺栓

3

传感器安装底座



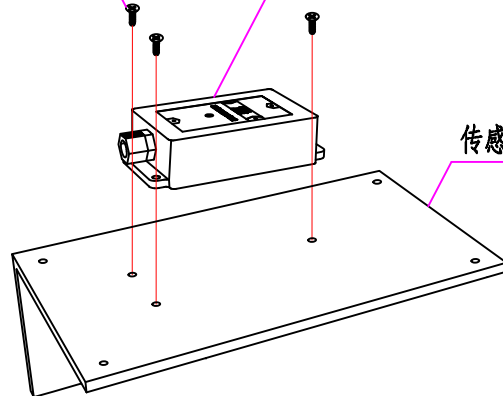
传感器保护罩

1. 传感器安装后通电测试，确保正常后使用M5内六角螺丝将保护罩固定在安装底座上。
2. 保护罩预留 $\Phi 22$ 出线孔，安装PG13防水接头，用于传感器信号线缆布设。
3. 传感器信号线缆接头部位需要焊接，使用热缩管保护，接线部位收纳在保护罩内。
4. 保护罩安装完成后，必须在规定位置标注传感器编号,便于维修更换。

传感器固定螺栓M4

倾角传感器

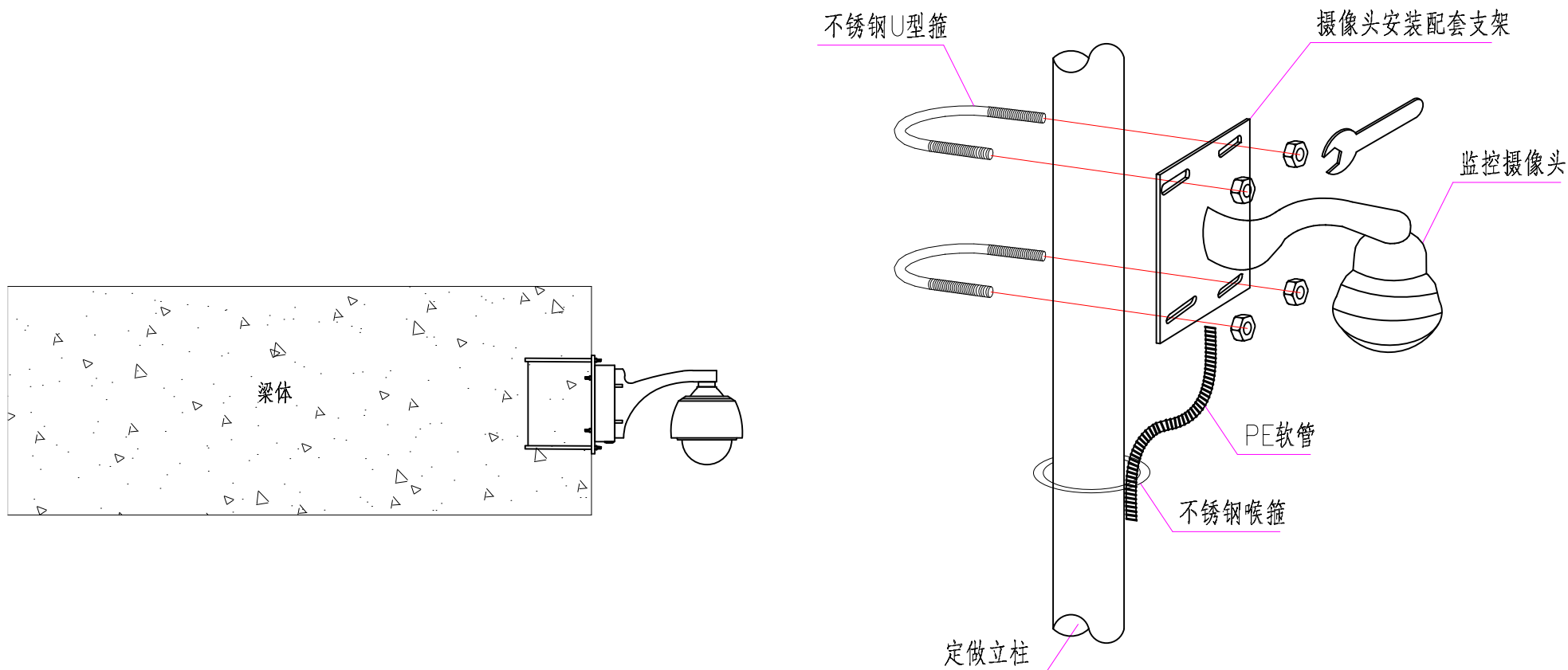
2



传感器安装底座

1. 传感器安装在底座上，安装前必须清洁安装面。
2. 传感器使用M4不锈钢螺栓固定在底座上，安装前在传感器与底座之间使用结构胶进行加固。
3. 安装时需注意安装方向，安装过程中使用水平尺测量，确保水平角偏差不大于 1° 。
4. 传感器采集数据前，应选取干扰因素最少的时间段通过调试软件进行置零处理。

监控摄像头安装图



注：

- 1.本图尺寸以毫米计。
- 2.监控摄像头使用U型抱箍安装在立柱上。
- 3.传感器信号线缆使用PE软管保护，使用不锈钢抱箍固定在立柱上，固定间隔0.5米。
- 4.传感器信号线缆敷设应尽可能隐蔽，不影响美观
- 5.传感器接线参照监控摄像头接线图。
- 6.传感器保护罩尺寸详见监控摄像头安装配件加工图。

其他

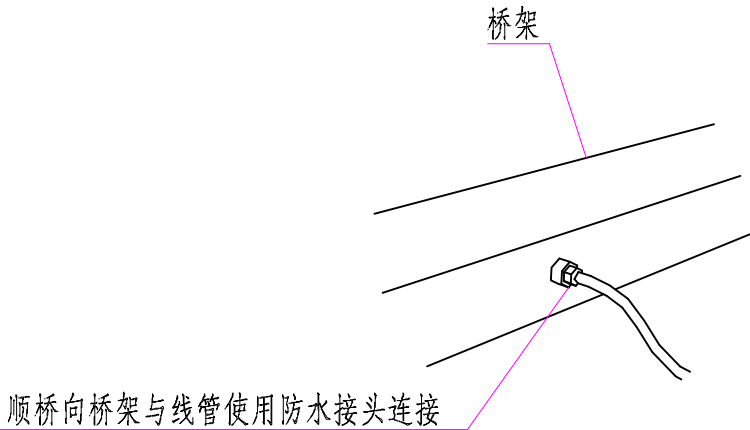
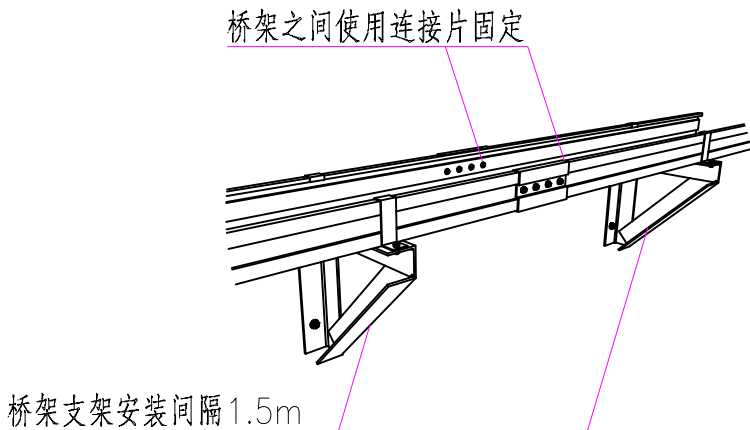
交通工程

建筑

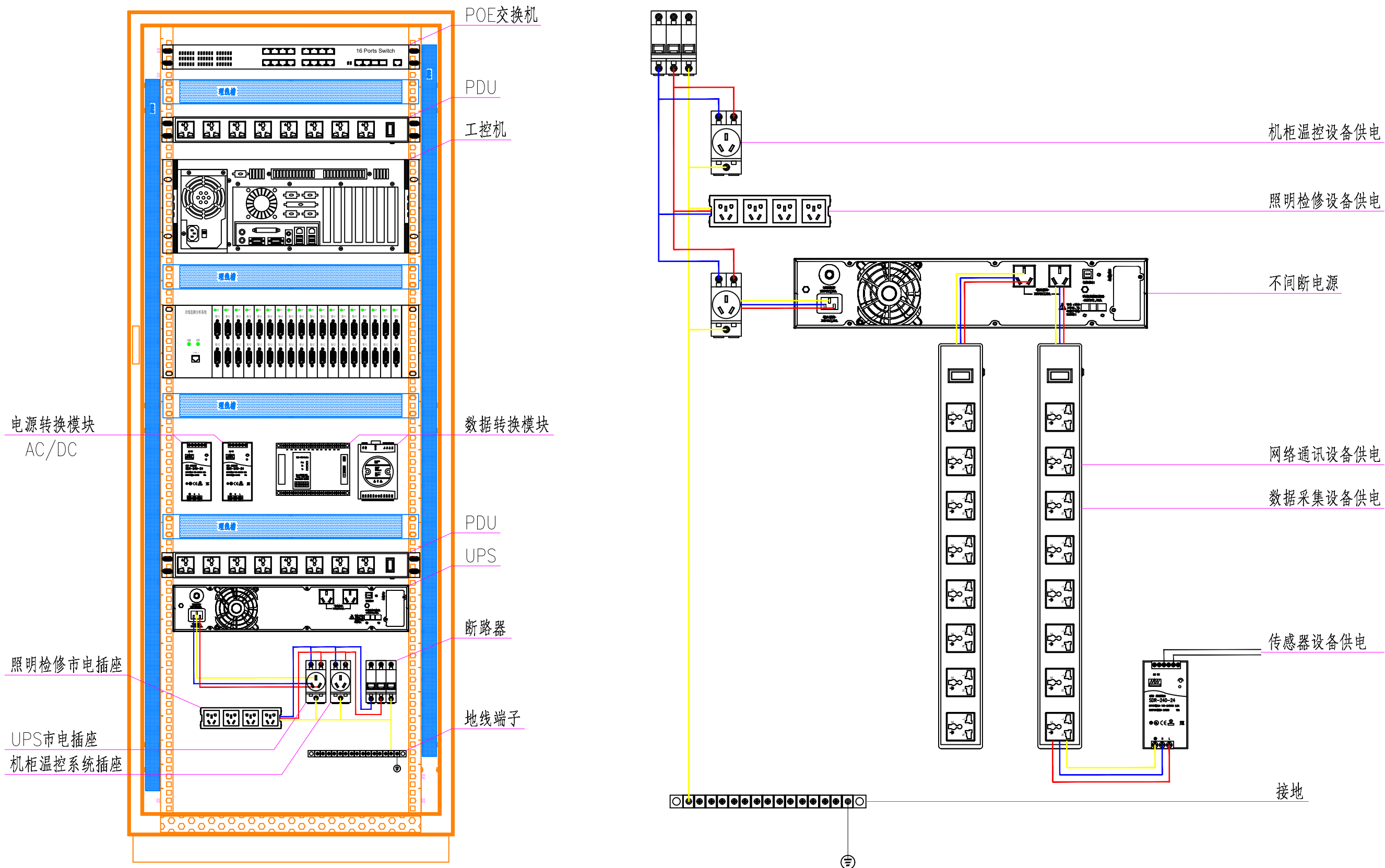
道路

专业会签

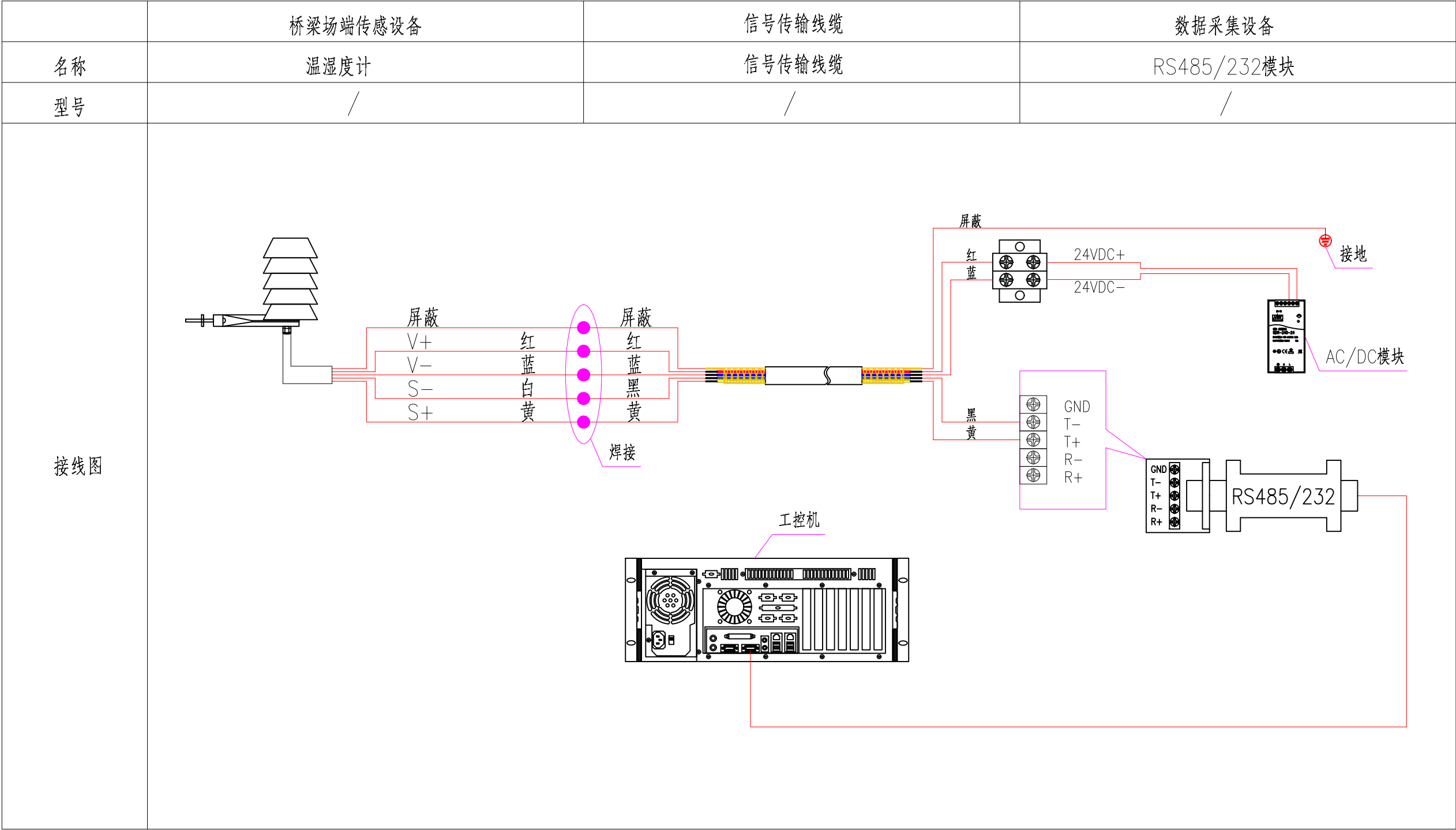
桥架及线缆防护安装图



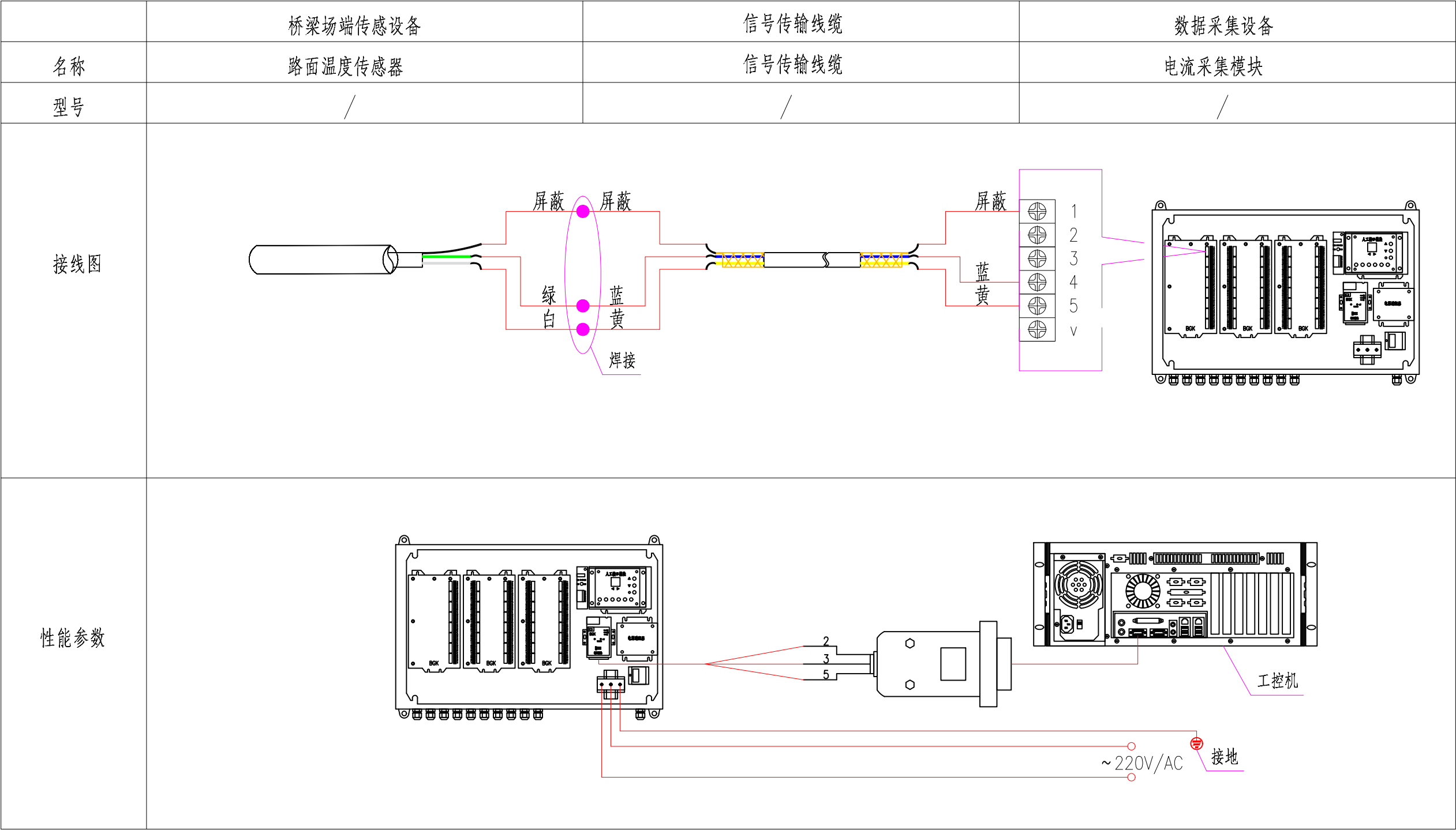
数据采集外站机柜配电图



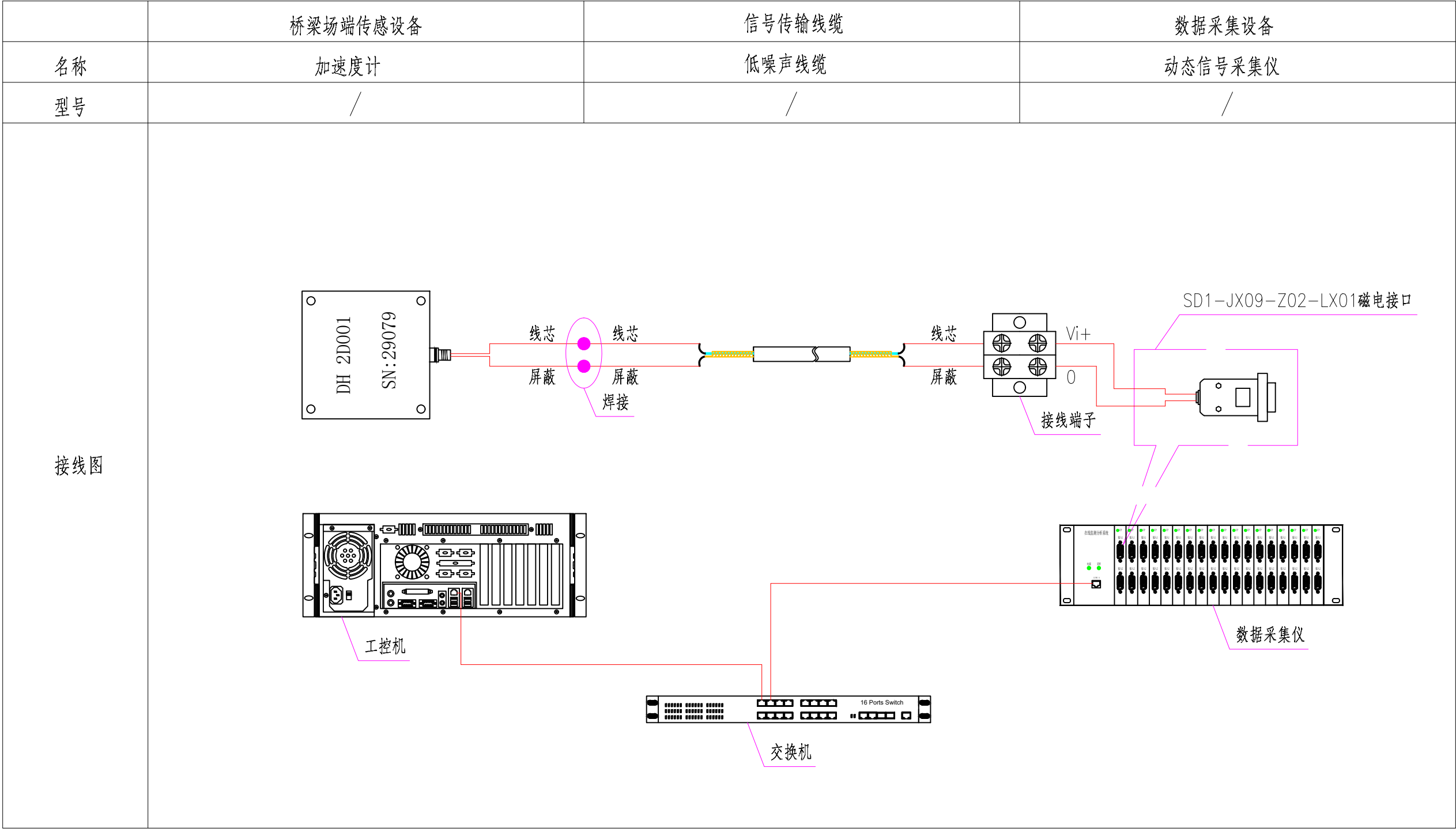
温湿度计接线图



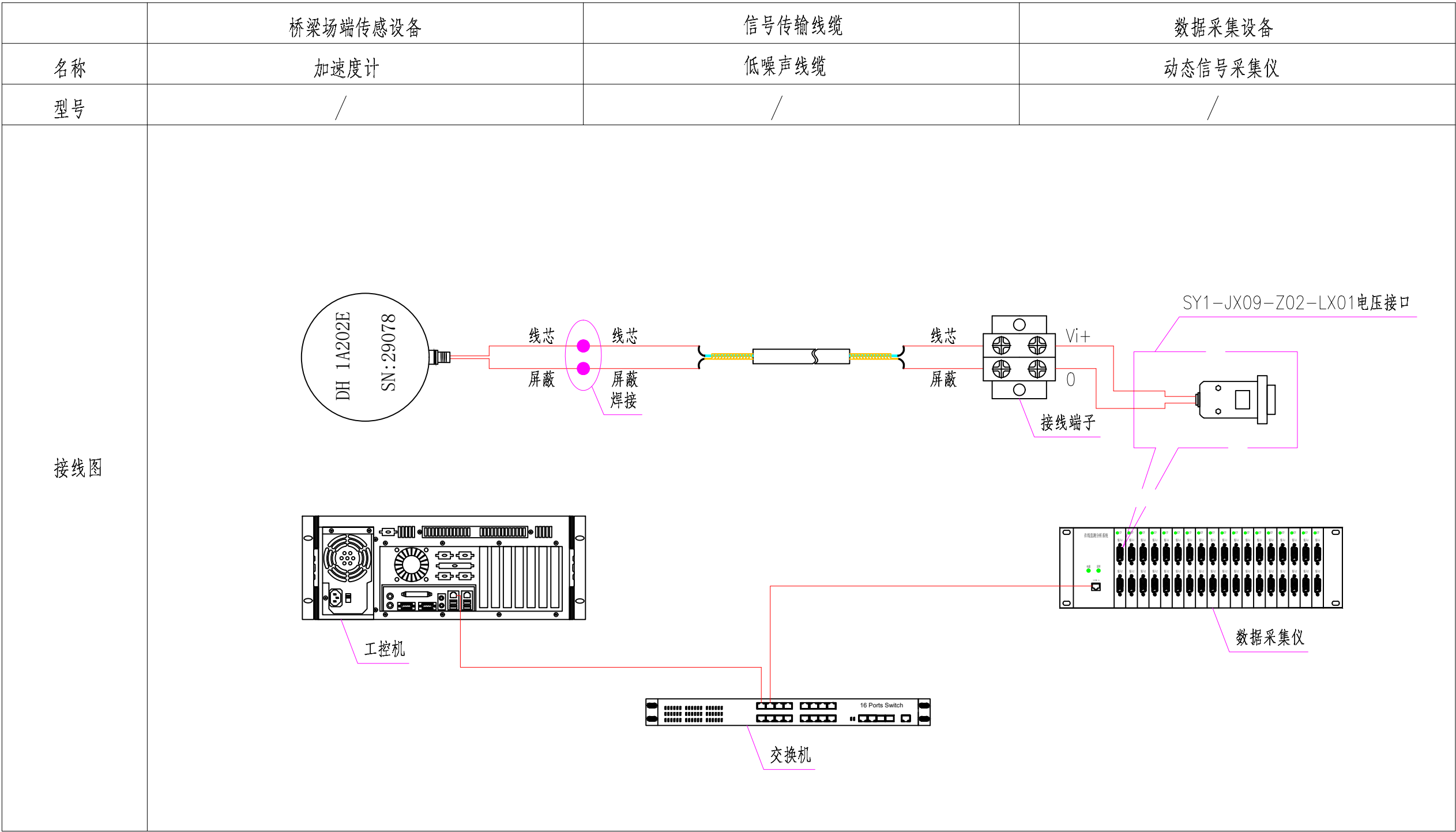
路面温度传感器接线图



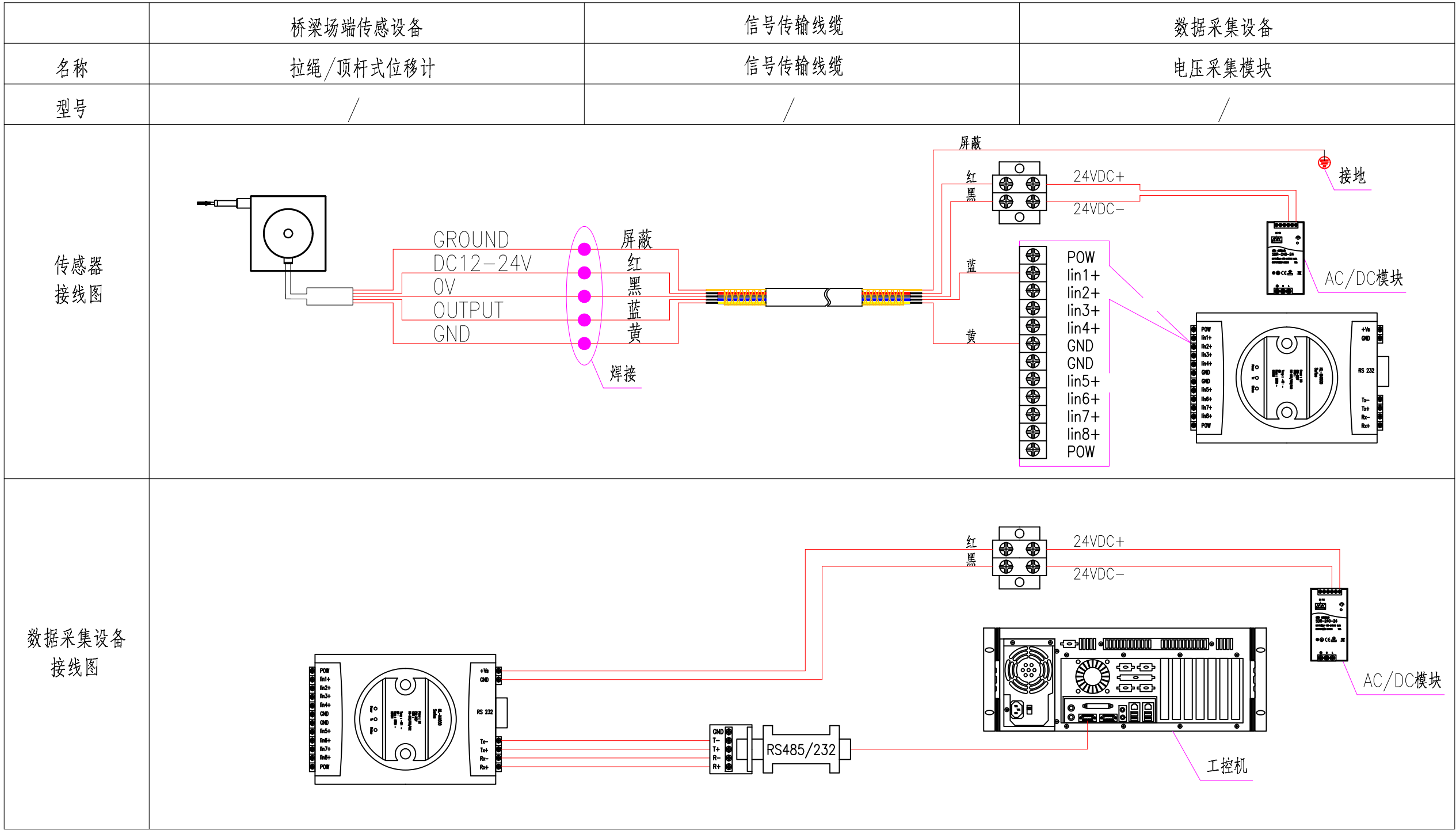
加速度计接线图（一）



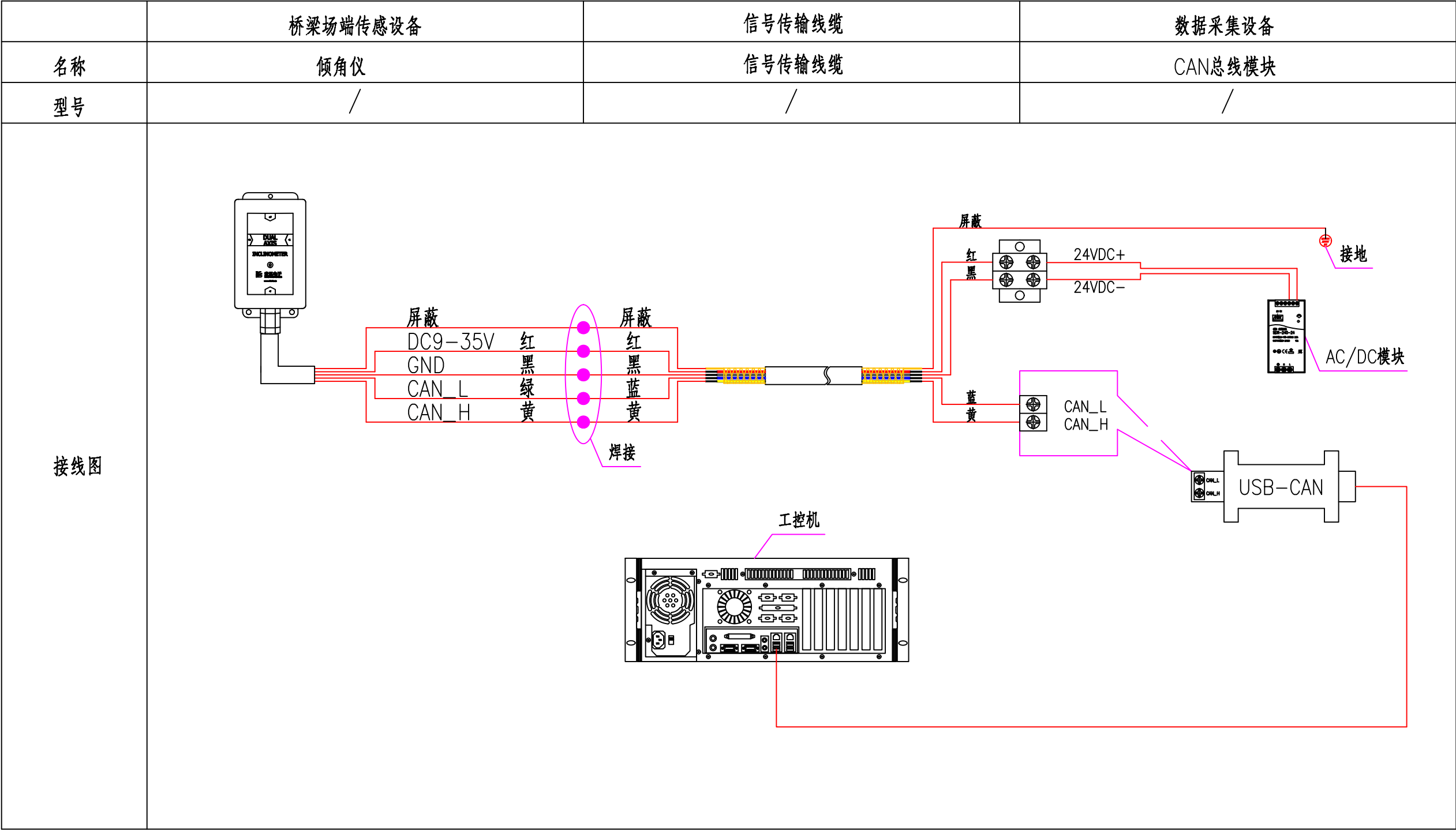
加速度计接线图（二）



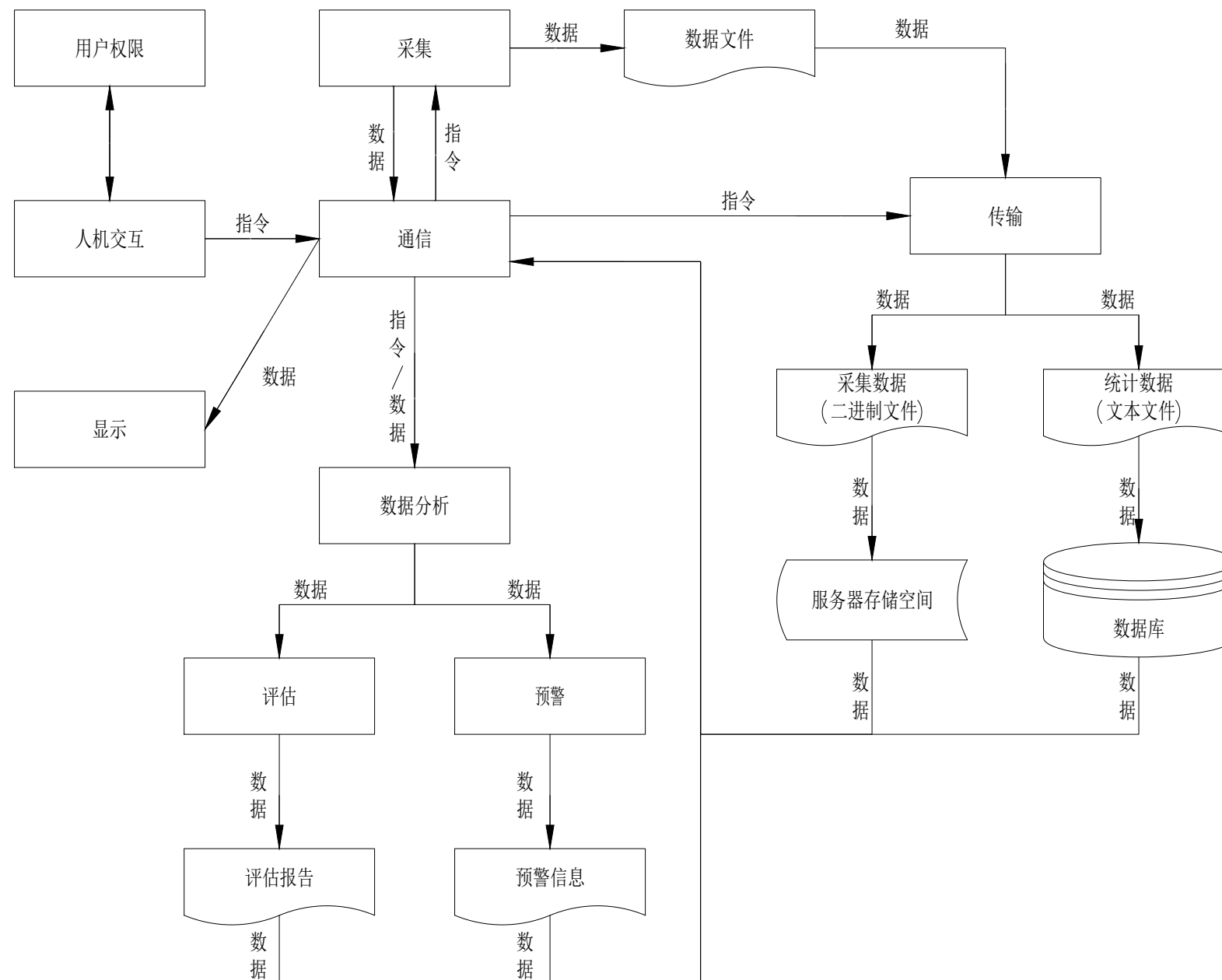
拉绳/顶杆时位移计接线图



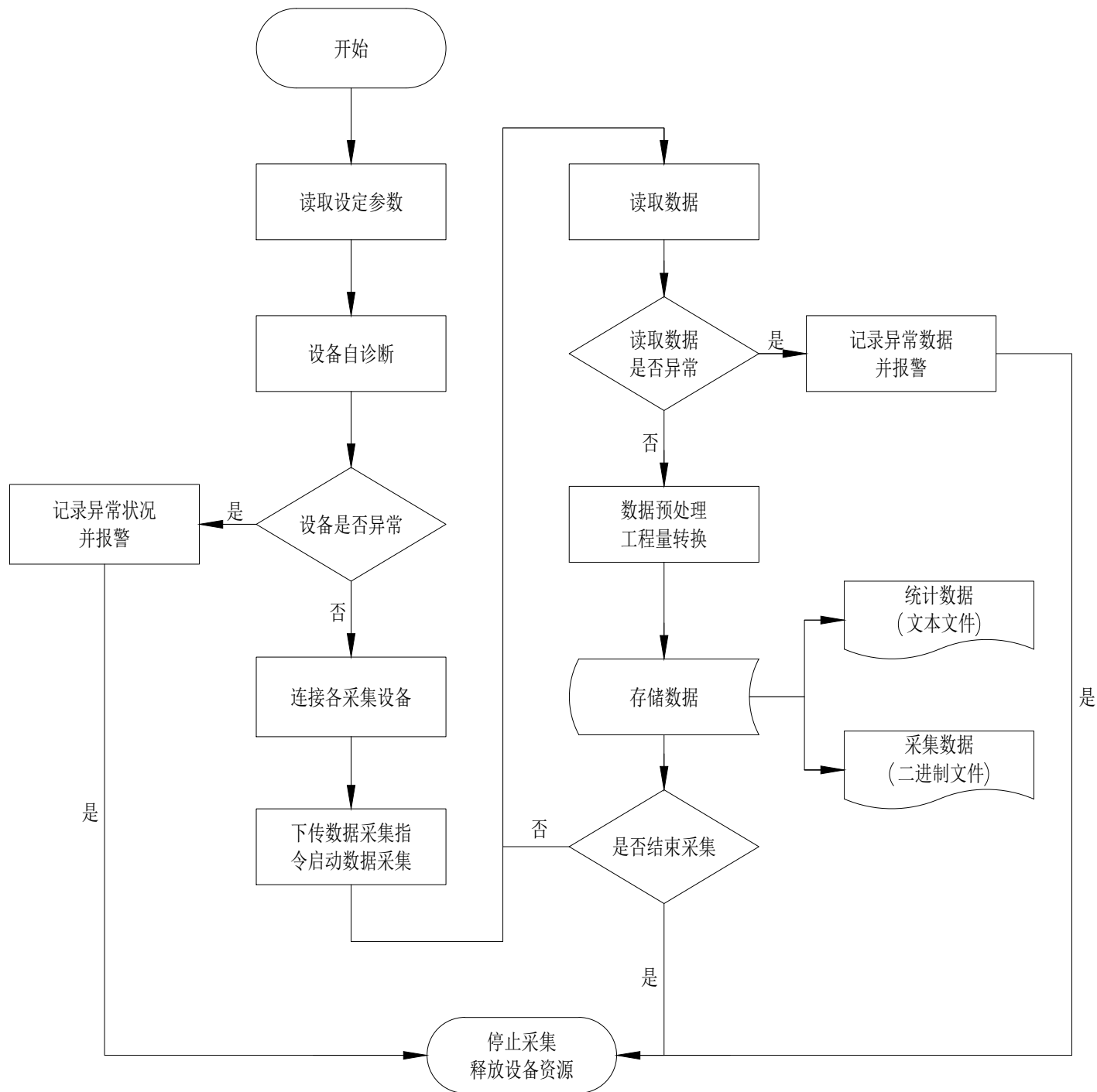
倾角传感器接线图



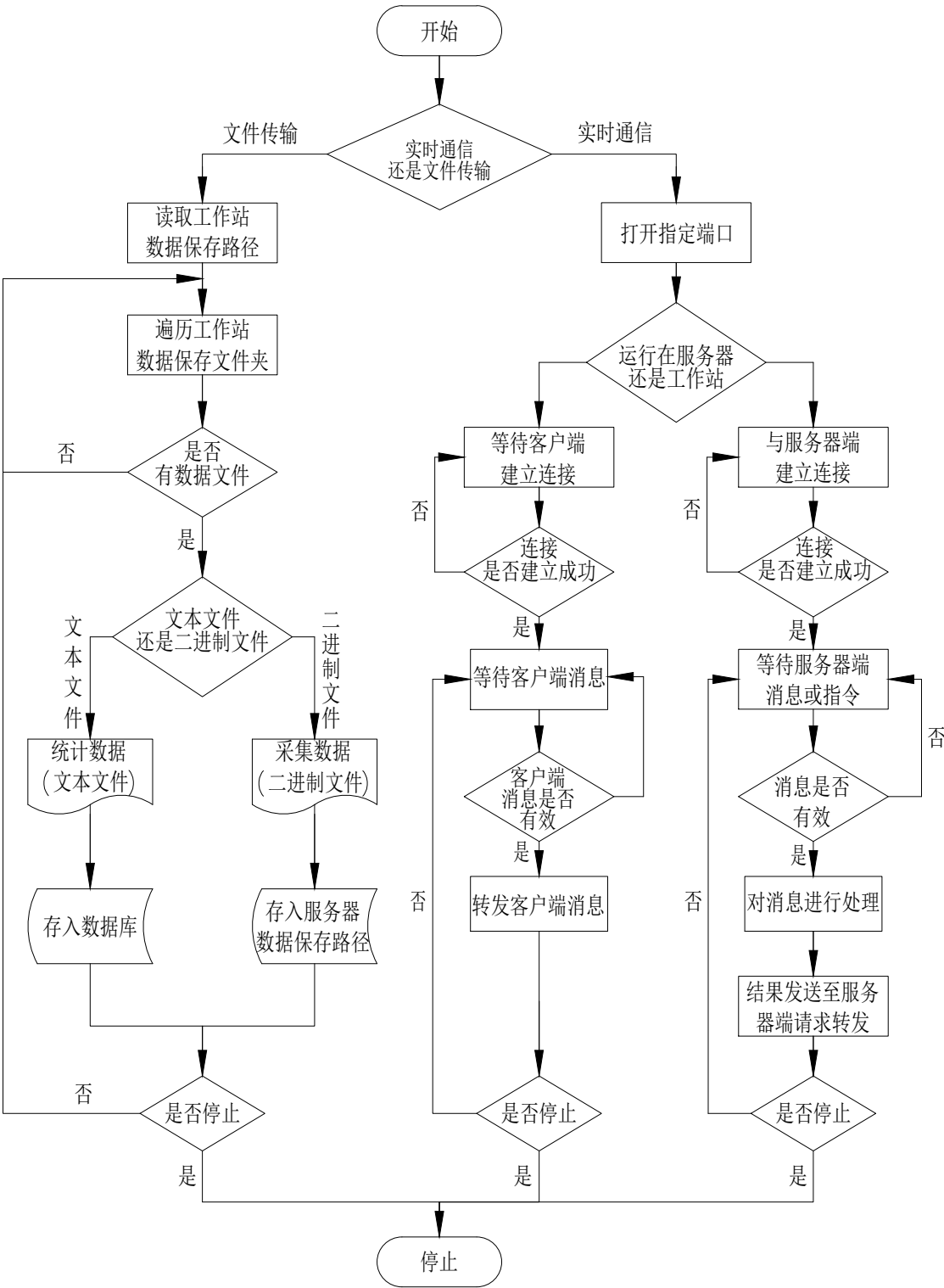
数据处理与控制系统逻辑拓扑图



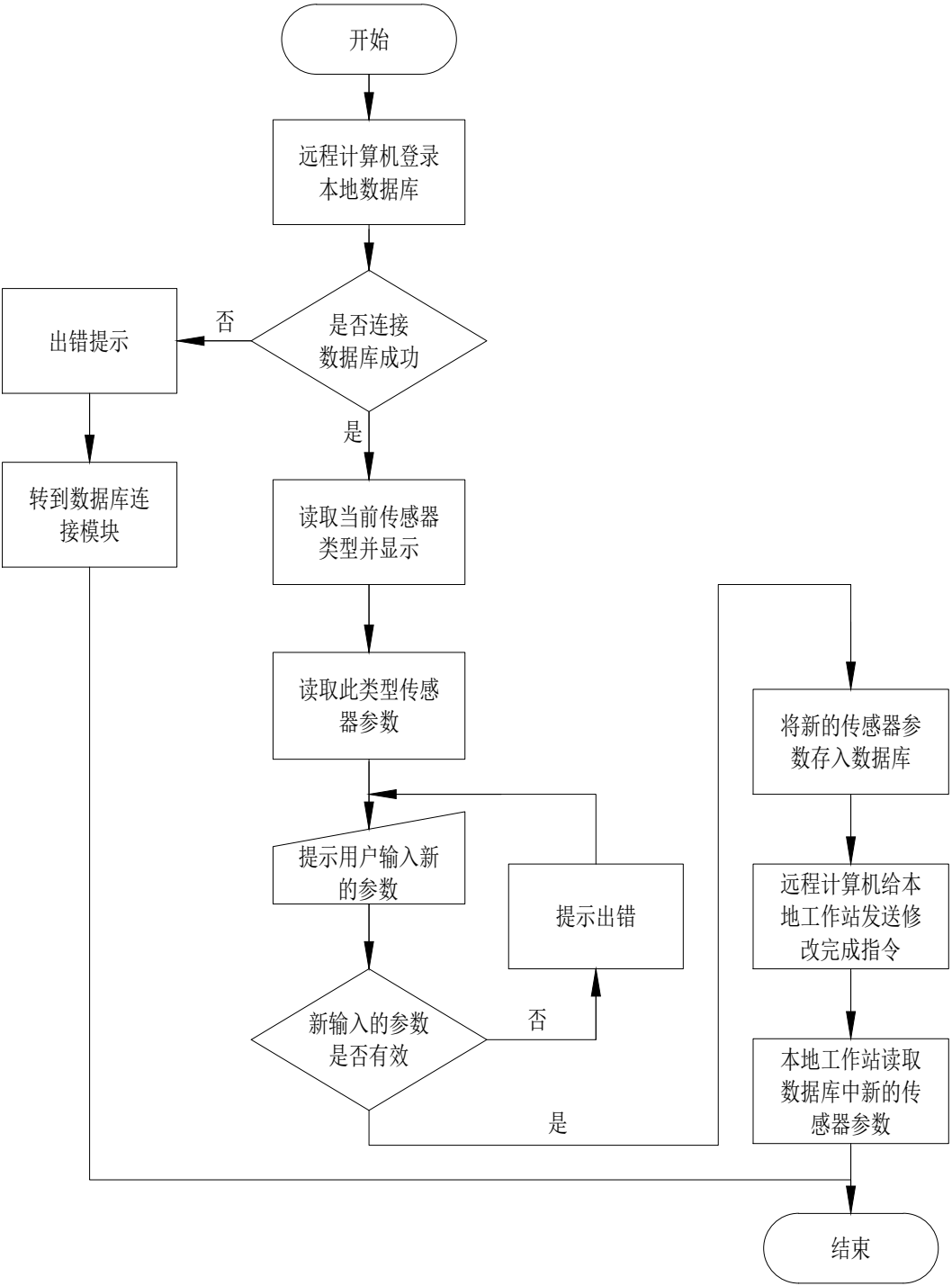
采集软件流程图



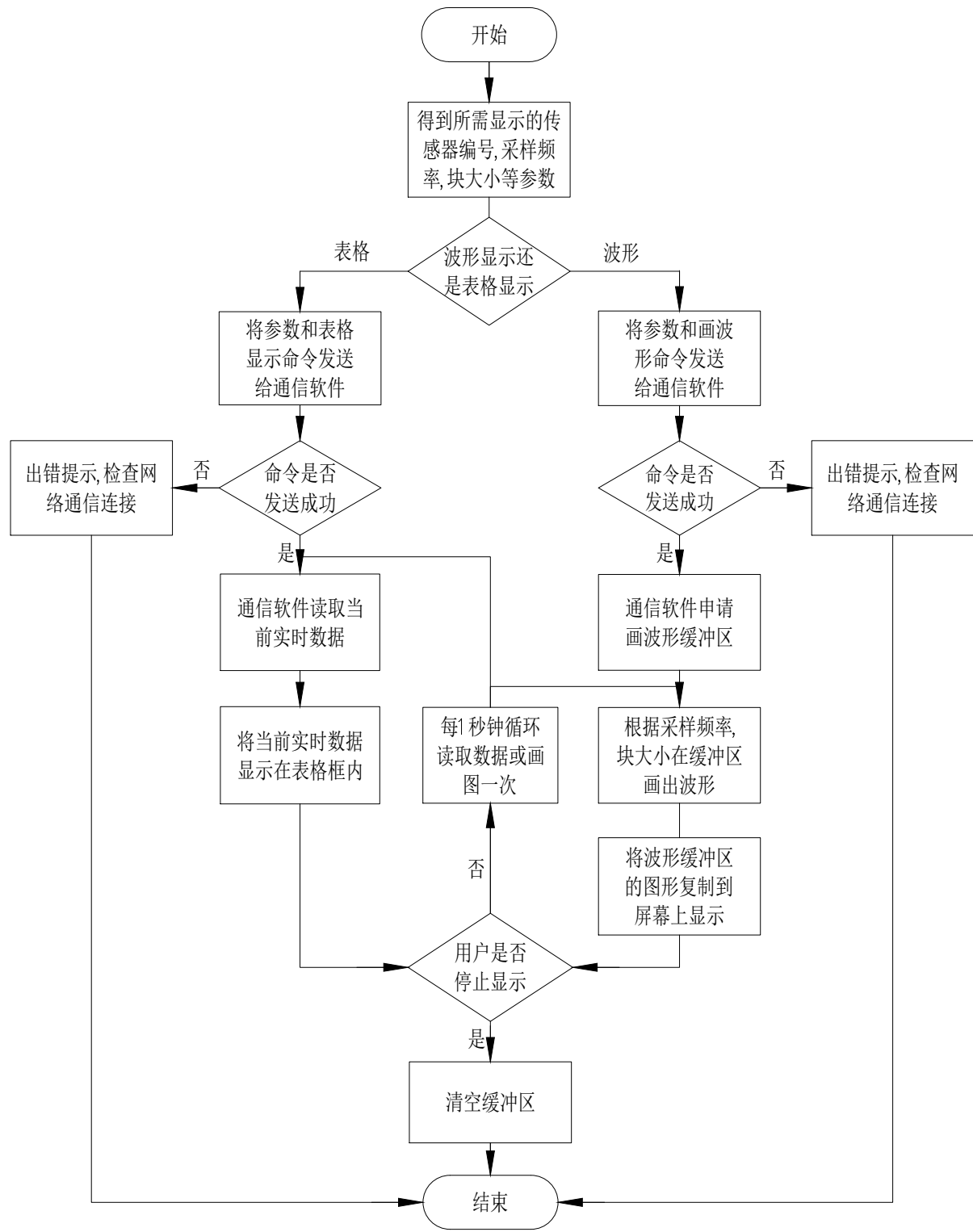
通讯软件流程图



传感器参数远程控制模块



实时显示模块



人机交互界面模块

