

110kV钢结构变电站健康监测与安全性能评估

吴昊 柴俊 王晨杰 吴善进 黄雄健
国网上海市电力公司市北供电公司 上海 200072

摘要: 为科学判定钢结构变电站运营阶段结构健康状态,保障电力设施长期安全稳定运行,以110kV彭家变电站为工程实例,开展钢梁应变、结构沉降与倾角、振动加速度、风速风向、温湿度五大维度健康监测。结果表明:监测期内由可变荷载与偶然作用引起的钢梁最大应力为12.428MPa,应力比为0.036,结构无不均匀沉降与整体倾斜风险,振动加速度、风荷载、温湿度等环境作用效应微弱,结构整体处于安全稳定状态。本文构建的监测方案、数据分析方法、评估体系及运维建议,可为同类钢结构变电站运营期安全与耐久性评估提供技术参考。

关键词: 钢结构变电站;健康监测;数据预处理;状态识别;安全管控

1 引言

自2010年以来,钢结构变电站凭借其施工速度快、抗震性能好等优势在电力建设工程中逐步推广^[1-3]。但钢结构相较于混凝土结构整体偏柔性,在长期运营过程中易受外部荷载、环境侵蚀、设备振动等因素影响,易出现整体失稳、局部变形、材料老化、节点损伤等问题,直接威胁建筑物的安全性与耐久性。因此,开展钢结构变电站运营期间结构健康监测,通过多维度数据采集、标准化分析、科学评估与可视化呈现,建立一套系统、精准、可落地的安全性与耐久性评估方法,对保障电力系统稳定运行、延长变电站使用寿命具有重要意义。

现有研究多聚焦于钢结构变电站设计阶段的安全性、与耐久性指标构建,针对运营期长期监测数据的分析、评估、可视化及全周期运维管控的系统性研究相对不足。本文以110kV彭家变电站为工程实例,开展数据预处理、特征提取、数据分析、综合安全评估研究,为同类钢结构变电站全生命周期安全运维提供理论支撑与工程应用借鉴。

2 监测方案与数据概况

2.1 监测对象与内容

本次监测对象为110kV彭家变电站,位于上海市宝山区菊太路与宝太路交叉口,主体为二层钢框架结构体系。监测内容覆盖结构自身响应与外部环境作用两大维度,具体包括:钢梁应力与应变、结构沉降与倾斜、振动加速度、风速风向以及温湿度。

2.2 监测设备与监测点布设

本次健康监测共布设12台无线应变计于一、二层关键钢梁支座与跨中位置,采用结构胶粘贴于钢梁下翼缘板上表面,用于监测钢梁应力与应变;布设6个沉降与倾角测点,传感器采用磁致式静力水准计和无线双轴倾角

计,按建筑四角及中部均匀布置;加速度计布置在二层开关室关键位置,实现X、Y双向振动响应监测;风速风向监测仪布设在屋顶女儿墙内侧风场敏感区域;同时布设5台温湿度监测设备,一层布置4台、二层布置1台,覆盖主变室、配电室、开关室等关键区域,形成覆盖钢梁应力受力、结构变形、振动响应、风环境及室内温湿度的全方位结构健康监测体系。

2.3 数据采集与概况

监测数据采集频率设置如下:应变、沉降、倾角、风速风向为1小时/次;温湿度为3小时/次;振动加速度为10分钟/次。累计生成有效原始数据超280万条,数据覆盖季节转换、设备调试、常态运行等多种工况,具备良好的连续性与代表性。

3 监测数据预处理与特征提取

3.1 数据预处理

为保障分析结果准确可靠,以“剔除干扰、还原真实”为核心,对原始数据开展预处理。

异常值剔除主要包括三类异常数据:设备故障类(零值、恒定值、突变跳变值)、环境干扰类(极端天气、施工扰动引起的非自然波动)、人为操作类(设备调试、校准产生的非工况数据)。

缺失值增补按缺失时长分级处理:短时缺失(≤ 24 小时)采用线性插值法补全;长时缺失(> 24 小时)采用相邻点位均值法结合工况修正补全;长期大面积缺失需保留缺失标记并在报告中注明影响。

数据降噪采用分类处理原则:振动加速度、风速风向采用移动平均法平滑处理;钢梁应力应变采用小波变换法剔除高频噪声;沉降、倾角、温湿度采用简单滤波法剔除个别数值跳动,最大限度保留真实结构响应特征。

3.2 特征提取

在预处理基础上，多源数据特征提取是智能诊断的关键步骤^[4]，该环节可筛选出供状态识别与安全评估的核心指标。指标分为结构类与环境振动类两大类。

结构类特征指标包括：（1）钢梁应力应变：提取最大绝对值应变、平均应变、换算应力比、波动幅度、变化趋势率等；（2）沉降：提取相对沉降极值、波动幅度、日均沉降变化量、稳定区间等；（3）倾角：提取X、Y向倾角极值、波动范围、平均倾角、变化率等。

环境与振动类特征指标包括：（1）振动加速度：取X/Y向振动加速度均方根、最大峰值、平均值、峰值频次等；（2）风速风向：取最大阵风风速、风向分布、主导风向占比等；（3）温湿度：取温度极值、平均温度、湿

度极值、平均湿度、变化幅度等。

4 健康监测结果

4.1 应力应变监测结果

本次共布设12台无线应变计，覆盖一、二层关键钢梁部位。结果显示：各测点应变绝对值为 $18.91\mu\epsilon\sim 60.33\mu\epsilon$ ，监测曲线整体平稳，无急剧突变、持续增大等异常特征，仅伴随环境引起的小幅正常波动。由可变荷载与偶然作用引起的最大应力为 12.428MPa ，应力比为 0.036 ，远低于钢材屈服强度，结构无屈服、塑性变形风险。同一钢梁支座测点应变略大于跨中测点，受力分布符合简支钢梁力学规律，与设计预期完全一致。监测结果如图4.1所示：

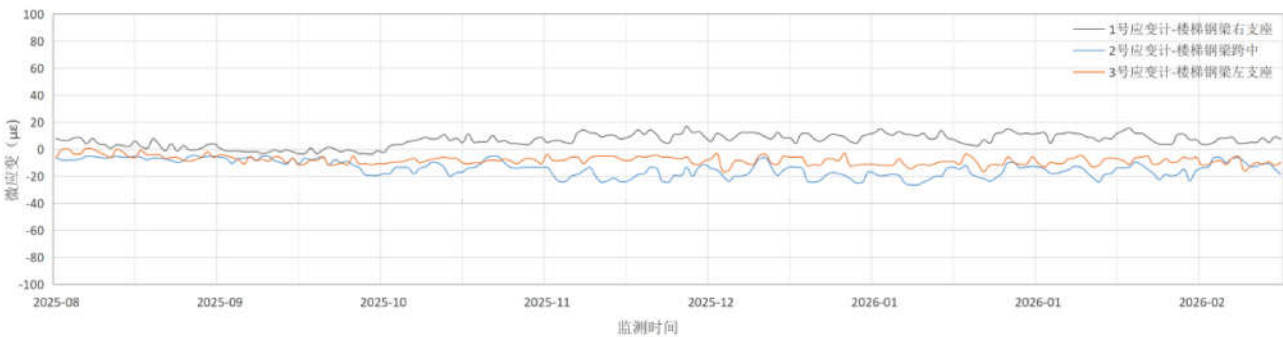


图4.1 应变监测结果

结合环境温度同步监测数据，选取典型测点开展应变-温度耦合特性分析（如图4.2所示）。结果表明，钢梁应变与环境温度二者变化趋势总体同步，但应变响应表现出一定的滞后特征，这与钢结构热胀冷缩及结构动力响应的时滞效应相符。目前结构的基准应变保持稳定，温度的周期波动仅引发钢梁微幅应变响应，排除了设备荷载或结构损伤导致的异常变形。此外，曲线规律也验证了本变电站钢框架支座、节点约束形式合理，能够有

效释放温度变形，结构构造设计满足长期服役要求。

同时，应变-温度耦合分析结果可为变电站长期健康监测提供基准修正模型。钢结构变电站柔性较大，温度应变会掩盖微小的损伤应变信号，在后续长期监测、损伤识别、预警阈值设定中，可基于本次实测的温度-应变对应关系，对原始应变数据进行温度效应剔除修正，消除环境温度干扰。

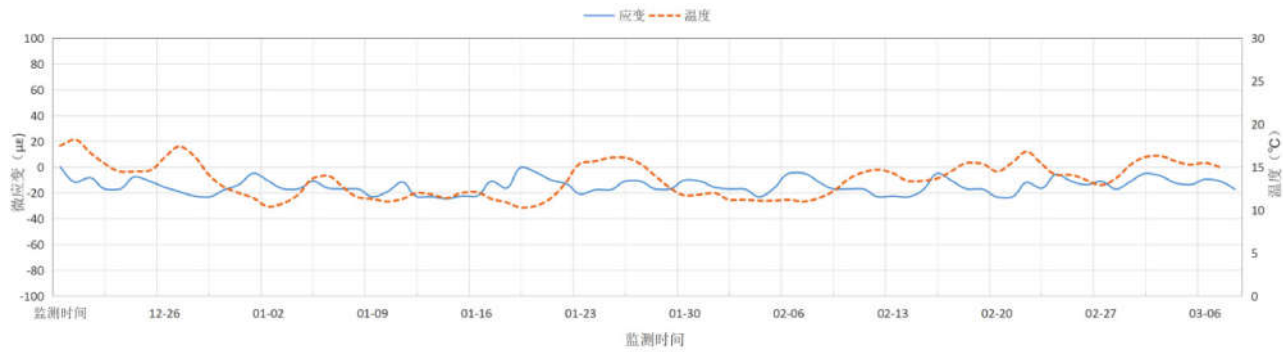


图4.2 应变-温度耦合曲线

4.2 沉降与倾斜监测结果

本次共布设6个测点，采用磁致式静力水准计和无线

双轴倾角计监测结构沉降与倾斜。沉降监测结果表明：以1号为基准开展相对沉降分析，2~6号测点相对沉降基

本稳定,最大波动幅度约3mm,属于正常使用状态下的合理变形。倾角监测结果表明:X、Y向倾角变化控制在 $-0.05^{\circ}\sim+0.05^{\circ}$,远低于规范限值,曲线以高频微幅波动为主,无单向倾斜、局部损伤迹象,表明变电站结构整体稳定,无不均匀沉降、整体倾斜风险。

4.3 振动加速度监测可视化结果

振动加速度计布置于二层开关室内,结果显示:振动加速度均方根值稳定在 $0.0003\sim 0.0004\text{m/s}^2$,X、Y向振动能量水平基本一致;瞬时峰值最高 0.006m/s^2 ,远低于建筑工程容许振动规范限值,结构振动安全可控,不影响设备稳定运行,如图4.3所示。

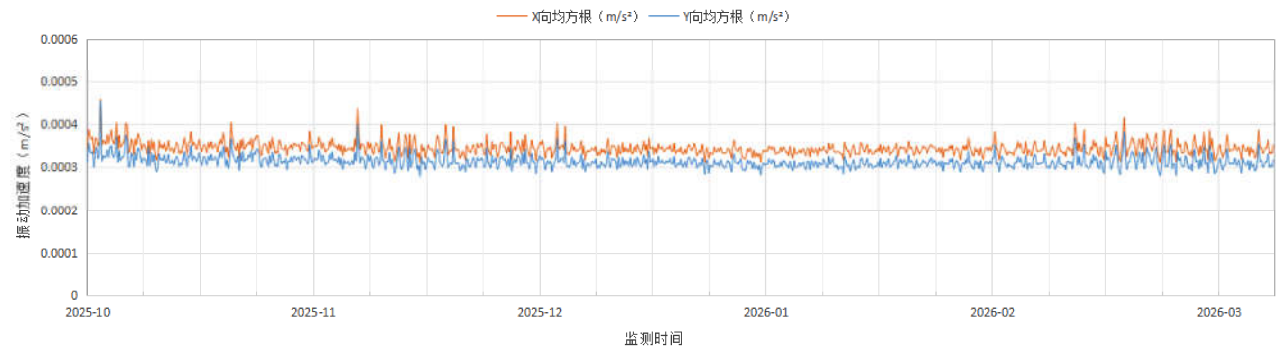


图4.3 振动加速度均方根曲线

4.4 风向风速监测结果

风向风速仪设置在屋顶东北角,监测结果显示:风向呈无规则高频波动,无固定主导风向,符合城市厂区受周边建筑遮挡的典型风场特征,如图4.4所示;日常风速稳定在 $0\sim 3\text{m/s}$,属微风级别,瞬时阵风最高约 8m/s ,

集中于冷空气活动时段,如图4.5所示。

风速与振动加速度峰值无明显同步关联,即使在阵风条件下,结构振动仍处于极低水平,风荷载对结构影响极其微弱。

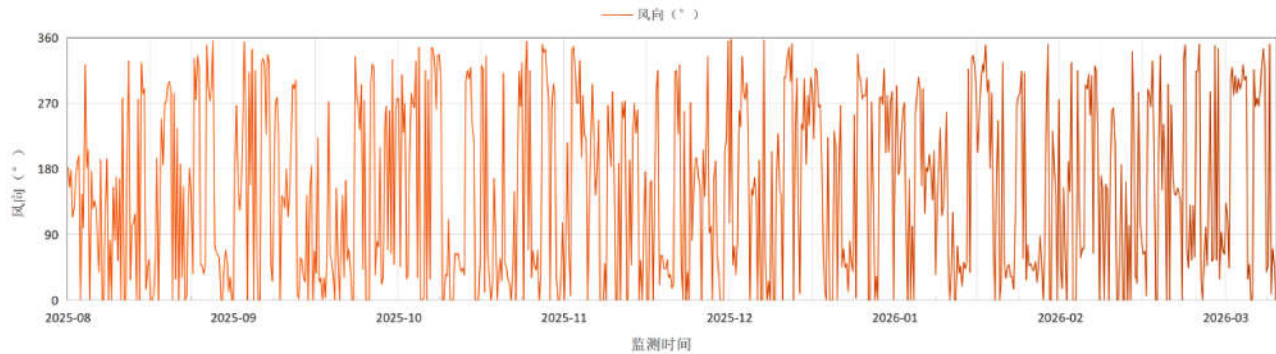


图4.4 风向监测曲线

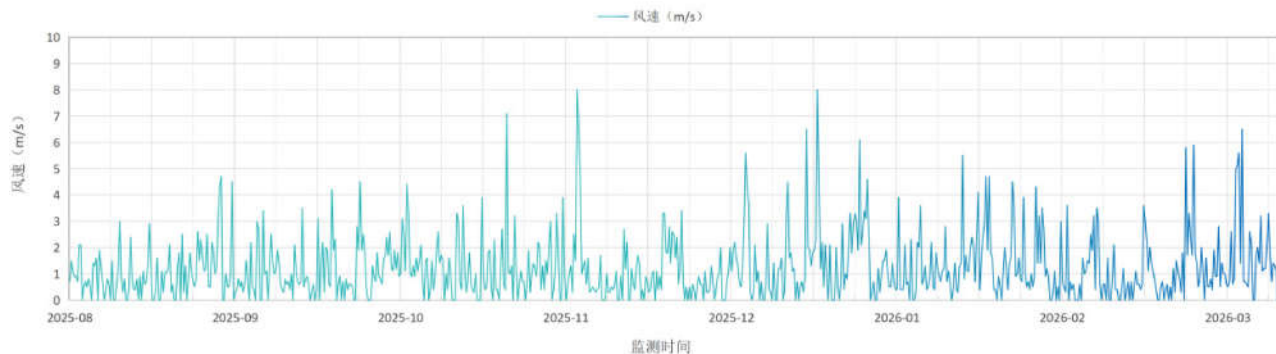


图4.5 风速监测曲线

4.5 温湿度监测可视化结果

温湿度计监测结果表明:温度整体稳定在 $5^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$,呈现冬季缓慢下降、初春逐步回升的季节性规律,波动幅度可控;湿度变化区间为 $30\%\sim 80\%$,受通风、设备散热、外部天气影响略有波动,但无极端高湿、结露等不利环境。温湿度变化平缓,未引发结构异常热胀冷缩、材料加速老化等问题,为结构长期稳定提供良好环境条件。

5 安全管控与运维建议

5.1 分级运维体系

(1)短期:建议一年内维持现有监测频次不变,持续跟踪钢梁应变、结构沉降与倾角等核心指标变化趋势,按季度对传感器与采集仪进行外观检查及精度校准,避免因支架松动、管线老化等问题影响数据准确性;同时规范设备启停与电网切换操作,减少不必要的瞬时振动扰动;每半年对钢梁开展一次外观巡检,重点排查防腐涂层剥落、焊缝缺陷及螺栓松动等问题,及时消除早期安全隐患。

(2)中期:建议五年内根据健康监测数据平台,实现历史数据追溯、对比分析与年度报告编制,每1~2年结合设备工况开展钢梁承载力简易复核,新增设备前必须完成结构验算;每年雨季前开展屋顶防水与密封检查,防止积水、渗漏引发结构损伤,同步完善安全预警机制、明确响应流程并定期组织应急演练;同时需进行钢结构防腐翻新,保障长期防腐效果。

(3)全寿命周期:设计使用年限内应严格禁止超出原设计要求的荷载增加,设备改造须经专业单位完成承载力复核;建议结构运行前10年保持常态化监测,10年后根据状态评估结果优化监测频次;严格管控基础周边施工活动并定期复测地基沉降;设备更新优先选用低振动型号,最大限度降低结构疲劳损伤风险。

5.2 特殊情况应急处置建议

当监测指标突发超出预警阈值、数据呈现持续增大趋势,或现场检查发现结构损伤迹象时,应立即启动应急处置流程。首先暂停相关区域设备运行,避免荷载进一步增加加剧结构风险;同步提高监测频次,实时跟踪数据变化动态;尽快委托专业单位开展现场检测与病害成因分析;根据检测结论采取针对性加固、修复等处理措施,经结构复核达标后,方可恢复设备正常运行。

6 结束语

本次110kV彭家变电站健康监测覆盖结构响应与环境参数五大维度,数据预处理与特征提取方法科学可靠,可有效剔除噪声、补全缺失、提炼核心指标,满足钢结构变电站结构状态识别与安全评估需求。

监测结果表明:变电站钢梁由可变荷载与偶然作用引起的应力水平极低、受力均匀合理;钢梁应变与环境温度总体趋势同步且存在响应滞后,温度波动引起正常微幅应变,本次耦合分析结果可用于监测数据的温度修正,提升损伤识别精度;结构沉降与倾角变形微小且无持续发展趋势;振动响应远低于规范限值,风环境与室内温湿度条件稳定,对结构无不利影响,整体结构安全稳定。

钢结构变电站柔性特征显著,运营期易受荷载、环境、设备运行等耦合因素影响,应建立“短期严控、中期维护、全寿命保障”的分级运维体系,通过常态化监测、定期巡检、防腐维护与荷载管控,保障结构满足设计使用年限要求。当监测指标出现异常突变或现场发现结构损伤时,应立即执行停机、加密监测、专业检测、加固修复的应急处置流程,可有效防范结构安全风险,确保变电站持续稳定运行。

论文《110kV钢结构变电站健康监测与安全性能评估》由国网上海市电力公司科技项目《基于结构健康监测的钢结构变电站运维期间主体结构综合评估关键技术研究》(项目编码:520914250002)出资资助。

项目组承诺本论文仅作为科技项目《基于结构健康监测的钢结构变电站运维期间主体结构综合评估关键技术研究》(项目编码:520914250002)的成果产出。特此声明。

参考文献

- [1]李长城.110kV变电站土建施工质量管理探讨[J].建材与装饰,2020(6):236-237.
- [2]王红宾,高纪云.变电站土建结构设计存在问题及处理对策[J].建筑技术开发,2021(6):7-8.
- [3]庄承锟,邱新宇,罗业雄,等.智能监测系统在钢结构变电站中的应用[J].智能制造研究与应用,2026,2(2):68-69+72.
- [4]毕思泉.基于物联网的220kV变电站智能监测系统设计研究[J].电气技术与经济,2025,(12):4-6.