

# 输电线路工程基础分部工程冬季施工养护的温度控制及数字化监控

王凌峰

甘肃省兰州市，甘肃送变电工程有限公司，730000；

**摘要：**冬季低温环境给输电线路工程基础分部施工带来严峻挑战，混凝土冻害、养护效率低下等问题直接影响工程质量与结构安全。本文以输电线路基础工程冬季施工特性为切入点，系统分析温度控制关键技术要点，提出基于多参数传感网络的数字化监控方案。通过对比传统养护与数字化监控的应用效果，结合工程实例验证该方案在温度精准调控、养护过程可视化及风险预警方面的优势。研究表明，采用“预热保温+动态温控+数字化监测”的综合技术体系，可有效提升混凝土基础强度达标水平，缩短养护周期，为输电线路冬季施工质量管控提供技术支撑。

**关键词：**输电线路工程；温度控制；数字化监控；混凝土养护

**DOI：**10.64216/3080-1508.26.03.046

## 1 引言

### 1.1 研究背景

输电线路作为电力系统的重要组成部分，其工程建设质量直接决定电力传输的稳定性与安全性。基础分部工程作为输电线路的承载核心，承担着塔架荷载传递与结构稳定的关键作用。近年来，随着我国电力建设向高纬度、高海拔地区延伸，冬季施工场景日益增多。北方地区冬季（11月-次年3月）输电线路基础施工占比已达到全年总量的相当比例，低温环境下混凝土强度增长缓慢、冻融破坏等问题成为制约工程质量的主要瓶颈。

冬季施工中，当环境温度低于 $5^{\circ}\text{C}$ 时，混凝土水化反应速率显著降低；若温度降至 $0^{\circ}\text{C}$ 以下，混凝土内部游离水结冰膨胀，会导致内部孔隙率增加、强度衰减，严重时引发基础开裂。传统养护方式依赖人工巡检与经验判断，存在温度监测滞后、调控精度不足等问题，难以满足现代输电线路工程对施工质量的高标准要求。因此，研究冬季施工养护的温度控制技术与数字化监控方法，具有重要的工程实践意义。

### 1.2 国内外研究现状

国外在冬季施工温控领域起步较早，美国ACI协会提出“临界强度养护法”，明确混凝土在受冻前需达到设计强度的特定比例；德国BAUMA标准制定了基于环境温度的动态保温措施，通过加热设备与保温材料组合实现温度调控。但国外研究多针对建筑工程，针对输电

线路基础分散性强、野外环境复杂的特性研究较少。

国内方面，国网电力科学研究院研发了混凝土电伴热养护系统，通过电阻加热实现基础温度维持；南方电网提出“预热-浇筑-保温”三阶段温控流程，在特高压线路工程中应用效果显著。但现有技术仍存在监控盲区，部分工程依赖人工记录，数据准确性与实时性不足。

### 1.3 研究内容与技术路线

本文主要研究内容包括：（1）输电线路基础冬季施工温度影响因素分析；（2）混凝土拌制、浇筑、养护全过程温控技术；（3）数字化监控系统设计与应用；（4）工程实例验证与效果评估。

技术路线采用“理论分析-方案设计-系统开发-现场验证”的思路，通过数值模拟确定温控参数，结合物联网技术构建监控平台，最终在实际工程中验证方案可行性。

## 2 输电线路基础冬季施工温度控制关键技术

### 2.1 温度影响因素分析

输电线路基础多为大体积混凝土结构，冬季施工中温度变化受内外部因素共同作用。内部因素包括水泥水化热释放速率、骨料级配、外加剂类型；外部因素包括环境温度、风速、日照强度。现场测试表明，当环境温度较低且风速较大时，混凝土表面散热速率会显著加快，易形成温度梯度差，引发表面裂缝。

针对基础类型差异，掏挖式基础因埋深较大，受外

部环境影响较小，重点控制混凝土入模温度；板式基础表面积大，需加强表面保温措施；桩基础施工需防止孔内结冰，采用预热钻孔工艺。

## 2.2 混凝土拌制阶段温控技术

### 2.2.1 原材料预热处理

根据《混凝土结构工程施工规范》(GB50666-2011)要求，冬季施工时水泥、骨料、拌合水需进行预热。采用锅炉加热拌合水，水温控制在合理区间，避免直接与水泥接触引发假凝；骨料堆场搭建保温棚，采用蒸汽加热，确保骨料温度满足施工要求；水泥储存温度维持在适宜水平，使用前24小时转入暖棚预热。

通过正交试验验证，当原材料预热参数达到特定标准时，混凝土拌合物出机温度可满足入模温度不低于10℃的规范要求。

### 2.2.2 外加剂优化选择

选用引气型防冻剂，掺量按水泥用量的合理比例控制，可有效降低混凝土冰点。同时添加早强剂，缩短初凝时间，促进强度快速增长。实践表明，添加适配型防冻剂的混凝土，在低温环境下早期强度增长效果明显优于普通混凝土。

## 2.3 混凝土浇筑阶段温控技术

### 2.3.1 运输过程保温

采用保温罐车运输混凝土，罐体外包裹多层阻燃保温棉被，顶部加盖保温罩。严格控制运输时间，当环境温度过低时，罐车内部增设电加热装置，确保混凝土入模温度损失控制在允许范围内。

### 2.3.2 浇筑过程温度控制

浇筑前对模板进行预热，采用热风枪加热至5℃以上，清除模板表面冰雪。分层浇筑厚度控制在规范要求范围内，每层浇筑间隔不超过规定时间，避免冷缝产生。振捣过程中采用插入式振捣器，控制振捣时间，确保混凝土密实度，减少内部孔隙。

## 2.4 混凝土养护阶段温控技术

### 2.4.1 保温措施设计

根据环境温度选择差异化保温方案：当温度在0-5℃时，采用“塑料薄膜+阻燃棉被”双层保温；当温度在-5-0℃时，增加电热毯加热层；当温度低于-5℃时，采用“电热毯+棉被+彩钢板”组合保温，形成封闭保温空间。

以常见规格的板式基础为例，保温层厚度需根据混凝土散热特性、保温材料导热系数及内外温差进行计算，确保低温环境下保温效果满足养护要求。

### 2.4.2 温度动态调控

采用电伴热系统进行主动加热，伴热带按合理间距铺设于基础表面，通过温控器实现温度自动调节。设定养护温度区间，当温度低于下限值时，启动加热；高于上限值时，停止加热。同时在基础内部预埋温度传感器，实时监测中心温度，避免温差过大引发裂缝。

## 3 数字化监控系统设计与实现

### 3.1 系统架构设计

数字化监控系统采用“感知层-传输层-平台层-应用层”四层架构：

**感知层：**部署温度、湿度、风速、应力传感器，实现多参数实时采集。温度传感器选用测量范围广、精度高的型号；应力传感器采用适配工程场景的专业类型，确保数据采集准确性。

**传输层：**采用4G/5G与LoRa双模通信，野外无网络区域通过LoRa网关汇聚数据，再通过4G上传至云端平台，确保数据传输稳定性。

**平台层：**构建云监控平台，具备数据存储、分析、可视化功能，支持历史数据查询与趋势分析。

**应用层：**开发Web端与移动端应用，提供实时监控、预警提醒、报表生成等功能，实现养护过程远程管控。

### 3.2 核心功能实现

#### 3.2.1 实时监测与可视化

本平台以地理信息系统(GIS)地图为核心，全面展示了输电线路的基础设施分布情况。用户可以通过点击地图上的单个基础设施图标，来查看该设施的实时监测数据，包括温度、湿度、应力等重要参数。此外，平台还通过曲线图的形式，直观地展示了这些参数在特定时间段内的变化趋势，使得用户可以清晰地了解设施运行的状态。

为了提高监测的直观性和实时性，当监测到的温度数据低于预设的安全阈值时，相应的图标会自动变色，以提醒用户注意潜在的风险。同时，系统还会触发声光报警，确保现场人员能够及时采取应对措施，保障设施的安全稳定运行。

### 3.2.2 智能预警与决策支持

系统内置了智能预警模型，该模型基于环境温度、混凝土强度增长规律等多种因素，对养护过程中可能出现的风险进行预测。例如，当监测到混凝土表面的温度持续下降，且强度增长缓慢时，系统会自动推送“增加保温层”或“启动加热”等决策建议，以帮助现场人员及时调整养护措施，确保工程质量的稳定。

此外，系统还支持多级预警机制，根据预警的严重程度，采取不同的通知方式。对于轻度预警，系统会通过短信等方式提醒现场负责人，而对于重度预警，则会直接上报给项目管理部门，以便于及时采取更加有效的应对措施。

### 3.2.3 数据管理与追溯

平台对所有监测到的数据进行了存储，保存周期符合工程档案的要求，确保了数据的完整性和可追溯性。用户可以根据时间、基础编号、参数类型等多种维度进行查询，方便快捷地获取所需的数据信息。

同时，平台还能够自动生成养护报告，报告内容包括温度变化曲线、强度达标情况、预警记录等关键信息，为工程验收提供了有力的数据支撑。这些报告不仅可以帮助用户了解设施的运行状况，还可以为后续的工程维护和管理提供参考依据。

## 3.3 系统性能测试

在实验室环境下，对系统进行性能测试：

数据采集频率：满足实时监控需求，可及时捕捉参数变化；

传输延迟：在不同网络环境下均控制在合理范围，确保数据时效性；

预警准确率：针对异常场景可准确发出预警，保障养护安全性；

稳定性：长时间运行无数据丢失或系统崩溃现象，满足工程应用需求。

## 4 工程实例验证

### 4.1 工程概况

选取某 1000kV 特高压输电线路工程某标段作为试验对象，该工程位于北方寒冷地区，冬季最低温度较低，共涉及多基铁塔基础，包含掏挖式基础与板式基础两种类型。施工时间选择冬季，采用本文提出的温度控制与数字化监控方案。

## 4.2 实施方案

### 4.2.1 温控措施落实

拌制阶段：按规范要求对拌合水、骨料进行预热，添加适配型防冻剂；

浇筑阶段：采用保温罐车运输，严格控制入模温度；

养护阶段：根据基础类型差异采用差异化保温方案，电伴热系统按设定温度区间运行。

### 4.2.2 数字化监控部署

每基基础预埋多个温度传感器（表面、中心、底部），同时部署湿度传感器与风速传感器，通过 LoRa 网关汇聚数据，上传至云平台。现场配备移动终端，施工人员实时查看数据，接收预警信息。

## 4.3 应用效果分析

### 4.3.1 温度控制效果

通过监控平台数据统计，混凝土入模温度满足规范要求，养护期间内部温度维持在设定区间，表面温度与中心温度差控制在合理范围内，未出现因低温导致的冻害现象。

### 4.3.2 强度达标情况

在养护关键节点分别进行混凝土强度检测，各阶段强度均满足设计要求，强度达标效果优于传统养护方式。

### 4.3.3 效率与成本分析

数字化监控减少人工巡检频次，提升养护管理效率。虽然初期设备投入有所增加，但因减少返工与养护周期缩短，总体工程成本得到有效控制。

## 4.4 问题与改进方向

工程实践中发现，部分偏远地区 LoRa 信号稳定性不足，数据传输存在间断；电伴热系统在极端低温下能耗较高。后续需优化通信方案，采用太阳能供电与储能结合的方式，降低能耗成本；同时进一步优化预警模型，提高风险预测精度。

## 5 结论与展望

### 5.1 研究结论

本文通过对输电线路基础分部工程冬季施工养护的温度控制与数字化监控研究，得出以下结论：

冬季施工中，混凝土拌制阶段的原材料预热、外加剂优化，浇筑阶段的运输保温，养护阶段的动态温控，是确保基础质量的关键技术环节；

基于物联网技术的数字化监控系统，可实现温度、

湿度等参数的实时采集与远程监控,结合智能预警模型,能有效提升养护过程的精准性与安全性;

工程实例验证表明,综合温控技术与数字化监控方案可显著提升混凝土强度达标水平,缩短养护周期,降低工程成本,具有良好的应用价值。

## 5.2 未来展望

随着数字孪生、人工智能技术的发展,未来输电线路冬季施工养护可向以下方向发展:

构建基础工程数字孪生模型,结合实时监测数据,实现施工过程的虚拟仿真与预测性维护;

引入 AI 算法优化温控参数,根据环境变化自动调整加热功率与保温措施,实现全流程智能化管控;

推动多工程数据共享,建立冬季施工数据库,形成标准化技术体系,为输电线路工程质量管控提供更有力的支撑。

## 参考文献

- [1]张振亮.浅析输电线路工程冬季施工质量控制[J].科技促进发展:应用版,2012. DOI:CNKI:SUN:KJCF.0.2012-02-045.
- [2]常宏滨.冬期施工土冻胀对输电线路基础的影响[J].中国新技术新产品,2012(19):1. DOI:10.3969/j.issn.1673-9957.2012.19.069.
- [3]于喜来.输电线路铁塔基础混凝土冬季施工保温新措施[J].山西电力,2004,000(006):54-54,59.
- [4]黄伟源.浅谈冬季输电线路铁塔基础施工[J].中国科技纵横,2010(13):1. DOI:10.3969/j.issn.1671-2064.2010.13.128.
- [5]刘海洋,魏晓莉.浅谈严寒气候条件下输电线路基础冬期施工[J].黑龙江科技信息,2016(14):55. DOI:CNKI:SUN:HLKX.0.2016-14-044.