

民航机场机坪高杆灯垂直度受温度影响分析

倪新建

北京中航空港建设工程有限公司 北京 101304

摘要：聚焦民航机场机坪高杆灯垂直度受温度影响的科学问题。本文系统阐释材料热膨胀系数、温度梯度变形及季节温差沉降等基础理论，剖析温度速率应力、环境耦合放大效应等影响机制，并提出安装时段优化、复合材料选型、动态补偿装置设计等适应性控制措施，最终构建“监测-分析-调控”全周期温度适配体系，保障高杆灯在复杂机坪环境中长期垂直度稳定。

关键词：民航机场机坪；高杆灯垂直度；温度影响

引言：民航机场机坪高杆灯是保障飞行安全的关键照明设施，其垂直度稳定性直接关系航空器起降安全。然而，机坪区域昼夜温差显著、紫外线辐射强、地面热辐射反射复杂，导致杆体易产生热梯度变形、基础沉降偏移等问题。系统分析温度对高杆灯垂直度的影响规律，发展针对性控制技术，对提升机场设施运行可靠性具有重要意义，是当前民航工程领域亟待解决的关键问题。

1 民航机场机坪高杆灯垂直度与温度作用基础理论

民航机场机坪高杆灯垂直度受温度影响的基础理论需从材料属性、结构特性及环境交互三方面展开。金属杆体在温度变化下产生热胀冷缩，其热膨胀系数直接影响结构应力分布；例如，高碳钢因热膨胀系数较高，在昼夜温差作用下易产生更大结构应力，增加杆体局部弯曲风险，这种材料特性差异需在选材阶段重点考量。

(1) 温度梯度变形：机坪区域因地面热辐射反射与空气对流差异，形成垂直方向温度分层；杆体上部受阳光直射温度较高，下部靠近地面温度较低，产生自上而下的温度梯度。该梯度导致杆体产生弯曲力矩，长期积累可能引发不可逆塑性变形，影响垂直度稳定性，需通过优化杆体截面设计或增设热缓冲层缓解。(2) 季节温差沉降：冬季低温引发地基土壤收缩，夏季高温导致土壤膨胀，这种周期性体积变化通过基础传递至杆体，造成垂直度偏移；若基础与杆体连接部位设计不当，温差应力集中易产生微裂纹，加剧垂直度偏差，需采用弹性连接件或可调式支座适应基础变形。(3) 温度速率应力：快速温度波动（如寒潮过境）使杆体表面温度骤降，内外部温差增大，瞬态热应力可能超过材料屈服极限，引发局部形变。此瞬态效应需通过材料疲劳特性与结构阻尼设计综合控制，例如采用高韧性钢材或增设阻尼装置，以维持长期垂直度稳定。这些理论分析为高杆灯垂直度受温度影响的机理研究提供了基础框架，需结合后续监

测技术与优化策略实现系统化解决方案，最终保障高杆灯在复杂温度环境中的安全运行与精准定位。

2 温度对机坪高杆灯垂直度的影响机制

2.1 温度变化引发的材料热变形特性

机坪高杆灯垂直度稳定性与材料热变形特性紧密相关，金属杆体受温度波动影响遵循热胀冷缩规律，但不同材质的热膨胀系数差异直接影响结构形变程度。高碳钢因热膨胀系数较高，在昼夜温差作用下易产生显著形变，可能引发垂直度偏差；而低碳钢形变幅度较小，适用于温差较小区域。选材时需综合评估成本与性能，避免过度形变导致垂直度失控。温度变化速率对材料瞬态效应影响显著，快速降温时，杆体表面与内部形成梯度温差，局部应力集中可能引发微裂纹或塑性变形；若瞬态应力超过材料疲劳极限，将加速结构老化，影响垂直度长期稳定性。因此，需通过材料疲劳试验优化选型，例如采用高周疲劳测试验证材料抗温度冲击能力，确保在极端温度变化中维持结构完整性。材料热变形与结构设计的耦合效应需重点分析，杆体截面形状影响热变形分布，圆形截面因各向同性特性，热变形更均匀；矩形截面易在角部产生应力集中^[1]。连接节点刚度及基础约束条件也会影响热变形传递路径。通过结构优化设计，如采用变截面杆体平衡刚度分布，或增设阻尼节点吸收热变形能量，可有效缓解热变形对垂直度的影响，提升整体结构可靠性，实现温度适应性控制。

2.2 温度作用下高杆灯结构应力分布

温度作用下高杆灯结构应力分布受多重因素交织影响，需从热弹性力学与材料科学视角解析。金属杆体在温度升降过程中，因热膨胀系数差异产生内部应力；例如，高碳钢与低碳钢在相同温差下，前者因热膨胀系数更高，局部应力累积更显著，易在连接节点或截面突变处形成应力集中带，加剧垂直度偏移风险。温度梯度

引发的非均匀热膨胀是应力分布的关键诱因，机坪环境中，杆体上部直接暴露于日光辐射，温度较高；下部靠近地面，受地面反射热及空气对流影响，温度较低。这种垂直方向的温度差导致杆体产生弯曲力矩，形成“上热下冷”的应力梯度场，长期作用可能引发不可逆的塑性变形。结构连接部位的应力传递机制需重点考量，基础与杆体连接处若存在刚度不匹配，温度变化引发的地基沉降或膨胀会通过连接点放大应力波动，导致局部疲劳损伤。此外，杆体截面形状对热应力分布具有显著影响，圆形截面因各向同性特性，热应力分布更均匀；而矩形截面易在角部形成应力集中，需通过倒角设计或增设加强肋缓解。在温度作用下的结构应力分布需通过材料优化、截面设计及连接节点强化实现系统性调控，以保障高杆灯垂直度长期稳定。

2.3 温度梯度导致的垂直度偏移规律

温度梯度引发的垂直度偏移是机坪高杆灯在温度变化中的典型表现。杆体不同部位受热不均，导致热膨胀程度差异，形成“上热下冷”或“向阳侧热背阴侧冷”的梯度分布。这种非均匀热膨胀直接转化为结构内部的弯曲力矩，驱动杆体向低温区域偏移。偏移规律受杆体几何形态与材料特性共同制约，细长杆体因抗弯刚度较低，对温度梯度更敏感，偏移量随长径比增大而显著增加；而短粗杆体因刚度较高，偏移量相对较小。材料热膨胀系数的各向异性也会影响偏移方向，若杆体沿长度方向的热膨胀系数高于径向，则偏移量随温度升高而增大；反之则可能呈现反向偏移趋势。环境因素与温度梯度的耦合效应需重点关注，风载、日照角度变化及地面反射率差异均会动态调整温度梯度分布模式。例如，午后强日照下，杆体向阳侧温度迅速升高，背阴侧温度较低，形成横向温度梯度，导致杆体向背阴侧偏移；夜间降温时，地面辐射冷却使杆体下部温度低于上部，形成垂直方向梯度，引发向地面的偏移趋势。这种动态偏移规律需通过长期监测与模型预测实现精准评估，为垂直度维护提供科学依据。

2.4 环境温度波动的影响放大效应

环境温度波动通过多维度交互作用显著放大高杆灯垂直度偏差，需从材料疲劳、结构响应及环境耦合三方面深入解析。（1）材料疲劳累积效应方面：温度频繁升降使金属杆体经历热胀冷缩循环，微观裂纹在焊缝、连接节点等应力集中区域加速萌生与扩展；例如，昼夜温差超过15℃的机坪区域，杆体连接节点处的焊缝易因热应力循环产生微裂纹，长期累积可能导致结构刚度退化，垂直度偏移风险增加，需通过定期无损检测监控裂

纹发展。（2）结构动态响应方面：温度波动引发杆体热应力梯度，叠加风载、振动等外部激励时，可能触发共振效应。强风期间杆体受横向力作用，若同时遭遇温度骤降，热应力与机械应力叠加，偏移量可能呈非线性增长，需通过动态响应模型量化应力叠加效应。（3）环境因素协同作用方面：地面反射热辐射、空气对流强度及日照角度变化调整杆体温度分布；夏季午后强日照下，杆体向阳侧温度骤升，背阴侧温度较低，形成横向温度梯度；若叠加阵风扰动，偏移趋势可能放大，形成不稳定状态^[2]。需通过多物理场耦合模型量化温度波动与风载、日照等环境因素的协同放大效应，为精准维护提供理论支撑，确保高杆灯长期垂直度稳定。

3 机坪高杆灯垂直度温度适应性控制措施

3.1 高杆灯垂直度温度响应监测方法

机坪高杆灯垂直度温度响应监测需构建多维动态感知体系，以精准捕捉温度变化引发的形变特征。监测方法应聚焦热-力耦合效应的实时追踪，通过非接触式与接触式传感器协同实现数据融合。激光扫描技术可实现杆体三维形变的高精度捕捉，通过定期扫描生成点云数据，对比分析温度变化前后的垂直度差异；红外热成像则能直观呈现杆体温度分布状态，识别局部过热或温度梯度异常区域，为偏移风险预警提供可视化依据。多传感器数据融合是提升监测可靠性的关键，加速度传感器可实时监测风载振动对垂直度的影响，结合温度传感器数据，量化环境因素与温度波动的协同效应。数据采集频率需根据环境条件动态调整，在昼夜温差显著的区域，应提高夜间低温时段的数据采集密度，以捕捉热胀冷缩引发的瞬态形变。监测数据的处理需引入环境温度补偿算法，消除温度对测量值的干扰；通过建立温度-形变映射模型，可反演真实垂直度状态，为维护决策提供科学依据。这种动态监测体系需与智能预警系统联动，实现偏移趋势的早期识别与主动干预，保障高杆灯长期垂直度稳定。

3.2 结构热变形补偿设计优化

结构热变形补偿设计优化需通过材料、结构、连接三维度协同，实现温度适应性提升。材料层面，低热膨胀系数合金或复合材料是核心，如碳纤维增强复合材料热膨胀系数仅为钢材1/10，可大幅降低温度升降引发的形变量；同时需考虑材料耐候性，通过添加合金元素或涂层处理增强抗腐蚀能力，延长使用寿命。结构形态优化聚焦刚度分布调节，采用变截面杆体设计，根部加粗以增强基础稳定性，顶部渐细以减轻热膨胀应力集中，通过刚度梯度平衡热应力分布。连接节点处增设柔性缓冲

层,如橡胶垫片或弹性金属网,可吸收温度变化引发的位移,减少刚性约束导致的疲劳损伤。动态补偿机制引入可实现主动调控,在杆体中段设置液压伸缩杆或记忆合金驱动器,通过机械方式抵消热变形量;此类装置需与温度传感器联动,实时采集温度数据并自动调整补偿力度,形成闭环控制系统。设计优化需结合机坪环境温度波动特性,通过有限元模拟验证不同季节、昼夜温差下的形变响应,确保补偿措施在全周期温度变化中维持垂直度稳定,构建从材料到结构的系统性防护体系,提升高杆灯长期运行可靠性。

3.3 耐温型材料选型与应用

耐温型材料选型需在热稳定性与长期耐久性间实现精准平衡,是机坪高杆灯垂直度控制的核心技术支撑。低热膨胀材料应用方面,碳纤维增强复合材料热膨胀系数仅为钢材1/10,在昼夜温差超20℃区域可显著抑制杆体形变;其抗紫外线老化性能需通过加速老化试验验证,确保在强日照下不发生性能退化,维持结构长期稳定性。耐候性优化需结合机坪环境特性,耐候钢通过添加铬、镍等合金元素,在提升抗腐蚀能力的同时保持低热膨胀特性,适配多雨高湿区域;硅酸盐基涂层通过形成致密氧化膜,有效隔绝水分、盐分侵蚀,延长材料在温度交替环境中的使用寿命。复合结构互补可放大性能优势,碳纤维-铝合金复合杆体通过外层铝合金提供结构强度,内层碳纤维抑制热膨胀,实现刚度与热稳定性平衡;连接节点采用梯度材料过渡设计,如镍铬合金与陶瓷基复合材料渐变层,可缓解因材料热膨胀系数差异引发的应力突变,提升整体结构在温度波动中的可靠性^[3]。选型过程需基于机坪实测温度、湿度、紫外线强度等数据,通过材料性能数据库比对与热循环试验、疲劳测试等实验验证,确保耐温型材料在全周期温度变化中维持垂直度稳定,保障高杆灯长期安全运行。

3.4 安装施工中的温度适配工艺

安装施工中的温度适配工艺需贯穿基础施工至杆体安装全流程,以降低温度变化对垂直度的潜在影响,是

保障高杆灯长期稳定运行的关键。(1)施工时段选择:需结合区域气候特征,优先选择昼夜温差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的时段开展关键工序;如北方冬季施工应避免凌晨低温时段,防止混凝土初凝期受冻;南方夏季则需规避正午高温,避免钢材热膨胀引发拼接误差,减少初期形变风险。

(2)材料预处理:钢材安装前实施热浸镀锌+耐候涂层双防护工艺,增强抗腐蚀能力并延缓温度交替导致的性能退化;连接螺栓采用扭矩扳手分级预紧,配合温度补偿算法动态调整预紧力,确保 -30°C 至 60°C 温变范围内夹紧力波动 $\leq 5\%$,避免热胀冷缩引发松动或应力集中。

(3)连接工艺优化:采用激光对中仪实现毫米级垂直度校准,结合温度传感器实时监测杆体形变;节点处增设弹性垫片与记忆合金补偿器,形成双重位移吸收机制,有效消纳 $\pm 20\text{mm}$ 温度位移量,维持结构稳定性;全程同步记录温度、形变、预紧力数据,构建温度-形变关联档案,为全周期维护提供精准依据。这些工艺需与材料选型、结构优化协同,构建全周期温度适配体系,最终实现垂直度长期稳定控制目标。

结束语:未来,通过集成物联网智能监测系统实现杆体温度、形变数据的实时采集与云端同步,结合大数据温度-形变预测模型对杆体垂直度变化趋势进行精准预判,辅以主动式热补偿装置自动调节杆体应力分布,可构建“监测-预测-调控”的闭环管理体系。此体系将推动民航机场设施向智能化、自适应化方向升级,形成动态响应环境变化的垂直度稳定机制,为航空器起降安全提供更可靠的技术保障。

参考文献

- [1]杨盛华,冯嵩,李建,等.基于安全节能理念的机场高杆灯无电弧配电箱的设计[J].电子制作,2020,28(21):13-15.
- [2]谢源.LED照明在机场航站楼照明的应用分析[J].当代电力文化,2024(10):123-125.
- [3]安志成,王玉龙.青岛胶东国际机场机坪高杆灯照明系统节能减排方案[J].现代建筑电气,2022,13(5):42-45.