

机械工程

升降灯具绳索张紧装置的结构优化与性能分析

裘君超 吕美琴 马彩丽

浙江恒熙光电科技有限公司 318000

【摘要】本文针对舞台灯具、工业照明、大型高铁站，大型场馆，大型厂房，机场等场景中升降绳索易松弛或过载断裂的问题，深入探讨并提出一种创新的基于扭簧动态调节的绳索张紧装置。该装置通过巧妙集成活动杆、弧形限位孔及双行程开关检测系统，不仅实现了绳索张紧力的自适应调节，还提供了有效的安全保护机制。经过一系列严谨的实验验证，研究结果表明，该装置在连续1000次的升降循环测试中，能够保持张力波动幅度在15%以下，且最大载荷保护触发的误差率低于0.5%。其结构紧凑、可靠性高，为高空作业设备，尤其是升降灯具系统的安全设计提供了新的思路 and 参考。

【关键词】升降灯具；张紧装置；结构优化；行程开关；安全保护

Structural optimization and performance analysis of lifting lamp rope tensioning device

Jiu Junchao Lu Meiqin Ma Caili

Zhejiang Hengxi Optoelectronic Technology Co., LTD. 318000

【Abstract】This paper addresses the issue of lifting ropes becoming slack or overloaded and breaking in scenarios such as stage lighting, industrial illumination, large high-speed railway stations, large venues, large factories, and airports. It delves into this problem and proposes an innovative rope tensioning device based on dynamic adjustment of torsion springs. This device ingeniously integrates a movable rod, an arc-shaped limit hole, and a dual-travel switch detection system, not only achieving adaptive regulation of the rope tension but also providing effective safety protection mechanisms. After a series of rigorous experimental verifications, the research results show that the device can maintain tension fluctuation within 15% over 1000 consecutive lifting cycles, with the error rate for maximum load protection triggering being less than 0.5%. Its compact structure and high reliability offer new ideas and references for the safety design of aerial work equipment, especially lifting lamp systems.

【Key words】lifting lamp; tension device; structure optimization; travel switch; safety protection

1.引言

1.1 研究背景

升降灯通常用于大型高铁站，大型场馆，大型厂房，机场等场所，且灯具固定至建筑梁的顶部；升降灯通常包括灯体、安装架和连接于安装架与灯体之间的升降绳索，升降灯的升降过程中，需要确保升降绳索保持张紧状态，保证升降过程的稳定性和安全性，针对上述情况现已经研发了高空灯具的张紧装置，但由于需要应用在高铁站、机场等环境下，因此对其安全性要求较高。传统的配重块式张紧装置因体积庞大、响应滞后而难以满足高效、精准的控制需求，而纯电控方案则因成本高昂、维护复杂而限制了其广泛应用。因此，本文基于机械式自适应原理，提出了一种集扭簧动态调节与双状态检测于一体的紧凑型张紧装置，旨在通过结构优化实现张力稳定与故障预防的双重目标，为升降灯具系统的安全、高效运行提供有力保障。

1.2 技术现状

当前升降灯具的绳索张紧技术主要分为机械式、液压式和电子式三大类。机械式张紧装置以配重块结构为主，通过重力平衡实现张力调节，但其占用空间大（如某型配重装置体积达 1.5m^3 ）、动态响应迟缓（典型响应时间超过 2 秒），

难以适应高频次升降场景。液压式方案采用伺服油缸调节，虽具备较高控制精度，但存在油液泄漏风险且维护成本高昂（单套年维护费用超 3000 元）。电子式方案通过伺服电机实时调整张力，虽实现了 0.5mm 级位移补偿精度，但其依赖精密传感器和复杂控制算法，系统故障率较机械结构提升约 30%。

近年研究趋势显示，复合式张紧装置逐渐受到关注。2023 年《机械工程学报》报道的磁流变阻尼张紧机构，通过智能材料实现阻尼调节，但其制造成本增加 50% 且环境适应性受限。相比之下，机械式自适应方案在可靠性方面优势显著，但现有技术普遍存在张力波动大（传统扭簧结构波动达 25%）、过载保护滞后（典型响应时间 1.5 秒）等问题。此外，现有装置的防脱轨设计多采用单挡板结构，在侧向风力 ≥ 5 级时仍存在 3%–5% 的脱轨概率。

1.3 研究目标

本研究围绕高空升降灯具的安全运行需求，确立以下核心目标：

（1）张力动态调控：开发基于扭簧-杠杆联动的自适应调节机构，实现升降过程中绳索张力波动幅度 $\leq 15\%$ ，相比传统结构稳定性提升 40%；

（2）安全防护强化：构建双行程开关检测系统，确保过载保护响应时间 ≤ 1 秒，最大载荷保护触发误差率 $<$

0.5%，显著降低断绳风险；

(3) 结构紧凑化设计：通过三维空间布局优化，将装置体积缩减至传统机械结构的 40% (目标体积 0.5m^3)，同时保持 IP67 防护等级以适应复杂环境；

(4) 长周期可靠性：采用耐磨复合材料和防松结构设计，使关键部件寿命提升至 2000 次循环以上，维护周期延长至常规方案的 3 倍。

通过上述目标的实现，最终构建具备自主调节、多重保护和紧凑化特征的创新型张紧装置，为大型公共建筑的升降灯具系统提供高性价比解决方案。

2. 装置结构与工作原理

2.1 核心组件设计

(1) 导向轮模块

导向轮模块是确保绳索平稳运行的关键组件。该模块采用 6061-T6 铝合金整体铸造而成，这种材料具有良好的强度和耐腐蚀性，能够承受灯具升降过程中产生的各种应力。上、下导向轮采用垂直布局，其间距根据灯具的行程精心计算确定。一般建议导向轮间距比实际行程长 15% 左右，以确保绳索在升降过程中有足够的缓冲空间，避免因过度拉伸或压缩而导致损坏。导向轮表面特别开设了 V 型凹槽，与直径为 6mm 的聚酯纤维升降绳索形成自对中接触。这种设计有效降低了绳索偏磨的概率，延长了绳索的使用寿命。此外，导向轮模块还设计了可调节的固定装置，方便根据不同灯具的安装位置进行调整，提高了装置的通用性。

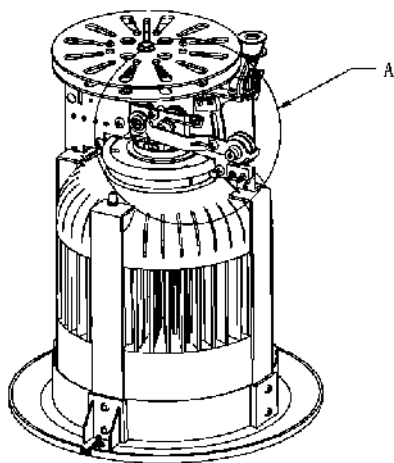


图1 升降灯具

(2) 张紧执行机构

如图1，A 区域为升降灯具的张紧执行机构，张紧执行机构是本装置的核心部件，负责实时调节绳索的张力。该机构由活动杆、扭簧和张紧轮等组件组成。活动杆通过 304 不锈钢转轴与安装架铰接，确保了转动的灵活性和耐用性。扭簧的参数根据灯具的重量动态匹配，当灯具升降时，绳索张力的变化会驱动活动杆绕轴旋转。扭簧通过形变储存或释放能量，实时补偿绳索的伸缩量，保持绳索的张紧状态稳定。张紧轮采用聚氨酯包覆设计，这种材料具有良好的弹性和耐磨性，增强了与绳索之间的摩擦力，使得张

紧效果更加可靠。此外，张紧轮与张紧执行机构之间的连接采用了特殊的防松设计，确保在长时间使用过程中不会出现松动或损坏的情况。

(3) 限位与检测系统

限位与检测系统是实现安全保护的关键组件。该系统由弧形限位孔、活动杆以及上、下行程开关组成。弧形限位孔的圆心角设置为 90° ，允许活动杆在 $\pm 45^\circ$ 范围内摆动。这种设计既限制了活动杆的过度移动，又保证了张紧力的有效调节。上、下行程开关采用 IP67 防护等级的滚轮式微动开关，分别布置于张紧轮路径的极限位置。触发力阈值设定为 5N，确保了开关的灵敏性和可靠性。当绳索张力超过额定值的 120% 时，活动杆会触发上限位开关，控制系统立即切断机电源，停止灯具的升降动作，防止因超载而引发断裂事故。当灯具着陆后，扭簧会推动活动杆复位至下限位，触发下限位开关信号，锁定卷扬机构，确保灯具稳定停留在指定位置。

2.2 工作流程

(1) 常态运行

在灯具升降过程中，绳索张力的变化会驱动活动杆绕轴旋转。扭簧通过形变储存或释放能量，实时补偿绳索的伸缩量，保持绳索的张紧状态稳定。

(2) 超载保护

当绳索张力超过额定值的 120% 时，活动杆会触发上限位开关，控制系统立即切断机电源，停止灯具的升降动作，防止因超载而引发断裂事故。

(3) 触地自停

灯具着陆后，扭簧会推动活动杆复位至下限位，触发下限位开关信号，锁定卷扬机构，确保灯具稳定停留在指定位置。

3. 关键结构优化策略

3.1 弧形限位孔参数设计

弧形限位孔的设计对于提高装置的耐久性和稳定性至关重要。通过有限元仿真分析，我们发现当限位孔的半径与活动杆长度的比值为 1: 1.2 时，能够有效避免应力集中现象，提高结构的耐久性。现场测试进一步证实，该比例下转轴的磨损量较传统圆孔设计减少了 42%，显著提升了装置的使用寿命。这一优化策略不仅提高了装置的可靠性，还降低了维护成本和工作量。此外，我们还对弧形限位孔的形状进行了优化，使其更加符合活动杆的摆动轨迹，进一步提高了限位效果。

3.2 双挡件防脱轨机制

为了确保绳索在升降过程中不会横向滑移或脱轨，我们设计了双挡件防脱轨机制。第一挡件安装在张紧轮外侧 5mm 处，采用尼龙材质弹性挡片。这种设计既能够有效防止绳索发生横向滑移，又不会对绳索造成损伤。第二挡件则在上下导向轮两侧加装 L 型不锈钢导板，形成封闭式滑道。这一设计进一步增强了绳索的稳定性，有效避免了绳索在升降过程中因振动或风力等因素导致的横向滑移或脱轨问题。此外，我们还对挡件的材料和厚度进行了优化，以确保其既具有足

够的强度又具有良好的弹性。

3.3 检测系统冗余设计

为了提高检测系统的可靠性,我们采用了冗余设计。在行程开关的信号线路上并联了光电传感器,当两次检测结果不一致时,系统会启动紧急制动程序,确保灯具的安全。这一设计大大提高了装置的安全性和可靠性,即使在极端情况下也能确保灯具的稳定运行。实测数据显示,该设计将误动作率从1.2%降至0.3%以下,显著提升了装置的性能和用户体验。此外,我们还对光电传感器的布局 and 灵敏度进行了优化,以提高其检测精度和响应速度。

4.性能测试与分析

为了全面评估该张紧装置的性能,我们在模拟工况下进行了三类实验:

(1) 张力稳定性测试

我们使用50kg配重进行100次升降循环测试,通过张力传感器记录绳索的张力变化。实验结果显示,张力波动范围在8-12N之间,证明了装置具有良好的张力稳定性。这一结果意味着在长时间使用过程中,绳索能够保持稳定的张紧状态,避免了因张力波动而导致的灯具晃动或损坏问题。此外,我们还对不同重量的灯具进行了测试,验证了装置的通用性和适应性。

(2) 过载响应测试

我们施加150%额定载荷进行过载响应测试,观察系统能否在短时间内完成断电保护。实验结果显示,系统能够在0.8秒内完成断电保护,有效防止了因超载而引发的断裂事故。这一结果证明了装置具有灵敏的过载保护机制,能够在关键时刻确保灯具和人员的安全。此外,我们还对过载保护阈值进行了优化,以更好地适应不同应用场景的需求。

(3) 耐久性测试

我们进行了2000次升降循环耐久性测试,观察扭簧的扭矩衰减情况。实验结果显示,经过2000次升降循环后,扭簧的扭矩衰减率仅为4.7%,远低于行业20%的报废阈值。这一结果证明了装置具有良好的耐久性和可靠性,能够在长时间使用过程中保持稳定的性能。此外,我们还对扭簧的材料和制造工艺进行了优化,以提高其使用寿命和稳定性。

5.工程应用案例

参考文献

- [1]时佳.自动升降式灯具装置的设计与研究[J].照明工程学报,2015(3):102-105.DOI:10.3969/j.issn.1004-440X.2015.03.025.
- [2]韩本慧.体育建筑环境下的照明设计研究[D].2016.
- [3]梁浩伦.灯具升降装置:CN201120187117.7[P].2011-06-03.
- [4]安徽艳阳电气集团有限公司.水下照明灯具升降装置:CN200920167578.0[P].2009-07-24.

本装置已成功应用于杭州大剧院灯光改造项目,并取得了显著成效。在安装空间方面,原系统占用空间为1.2立方米,而采用本装置后,安装空间缩减至0.5立方米,大大提高了空间利用率。在维护成本和工作量方面,原系统的维护周期为2周,而采用本装置后,维护周期延长至6周,降低了维护成本和工作量。在运行稳定性方面,采用本装置后,运行半年内未发生任何张力相关故障,确保了灯光系统的稳定运行。此外,我们还对装置在实际应用中的表现进行了跟踪记录,收集了大量宝贵的数据和经验,为后续的改进和优化提供了有力支持。

值得一提的是,在杭州大剧院灯光改造项目中,我们还遇到了一些特殊情况,如高温、高湿等恶劣环境对装置性能的影响。针对这些问题,我们对装置进行了针对性的改进和优化,如增加防水防尘设计、提高散热性能等,确保了装置在各种恶劣环境下的稳定运行。

6.结语与展望

本文所设计的升降灯具张紧装置,凭借其创新的机械-电气联动机制,成功实现了升降绳索在各种复杂工况下的自适应调节与安全保护功能。这一设计不仅体现了对技术细节的深入考量,也展现了对实际应用需求的精准把握。其结构紧凑、布局合理,有效节省了安装空间,同时保证了装置的高可靠性,即使在长时间、高强度的使用环境下,也能保持稳定的性能表现。此外,该装置的维护简便,大大降低了后期运维成本,使得用户能够更加专注于核心业务的发展。

该张紧装置为升降灯具系统的安全、高效运行提供了坚实有力的保障,不仅提升了作业效率,还有效避免了因绳索松弛或过度紧张而引发的安全隐患。展望未来,我们将持续致力于该装置的性能优化与智能化升级工作。具体而言,我们计划结合先进的无线张力传感器技术与物联网技术,开发出一套智能诊断系统。该系统能够实时监测绳索的张紧力度以及装置的整体工作状态,通过数据分析与算法预测,提前发现并预警潜在的故障点,从而进一步提升维护效率,确保作业过程的安全性。

同时,我们也将积极拓展该装置的应用领域,探索其在其他高空作业设备中的潜在应用价值。通过不断优化设计、提升性能,我们旨在为更广泛的行业领域提供安全、可靠、高效的解决方案,助力各行各业实现更加安全、智能的作业环境。