

防水型潜水照明灯具密封结构与电路防护技术

高 贺 郭森林 李扬军

浙江凯耀照明有限责任公司 浙江 海宁 314400

摘 要:为解决水下环境对潜水照明灯具的防护难题,提升其运行可靠性,本文聚焦防水型潜水照明灯具的密封结构与电路防护核心技术,结合不同水下环境特性,系统分析灯具工作环境与腐蚀机理,明确防水密封及电路防护关键性能要求。从密封结构设计基础、典型结构优化入手,阐述静态、动态及多腔体密封技术要点;围绕电路防短路、防漏电、浪涌防护等核心技术,提出模块防潮绝缘与水下接地等电位设计方案,优化防护系统集成布局。通过技术梳理与优化设计,为潜水照明灯具提升水下稳定性、耐腐蚀性及防护可靠性提供技术支持,适配各类水下作业场景需求。

关键词:防水型;潜水照明灯具;密封结构设计;电路防护技术

引言:水下作业对潜水照明灯具的密封与电路防护性能提出严苛要求,淡水、近海、深海等不同环境的侵蚀作用及高压低温特性,易导致灯具密封失效、电路故障。当前灯具在复杂水下环境中仍存在防护可靠性不足、适配性欠佳等问题,制约水下作业效率与安全性。本文基于实际应用需求,系统研究密封结构与优化方法,深入剖析电路防护核心技术,构建高效防护体系,旨在解决水下灯具防护痛点,为其在各类水下场景的稳定应用提供理论与技术参考。

1 防水型潜水照明灯具基础理论与性能要求

1.1 潜水照明灯具的工作环境

潜水照明灯具工作环境复杂,涵盖淡水湖泊、近海浅滩、深海探测等场景,不同环境侵蚀作用差异明显。淡水环境中,水体矿物质、微生物易在灯具表面结垢,长期附着影响密封面贴合度;近海高盐度海水兼具腐蚀性与导电性,对金属壳体、密封接口侵蚀极强,易引发金属锈蚀、密封材料老化失效。深海环境叠加高压、低温特性,压力随深度每增加10米提升0.1MPa,易致密封结构形变,低温还会降低密封材料弹性,加剧渗漏风险。

1.2 防水密封核心性能指标

防水密封是潜水照明灯具的核心保障,关键性能指标需贴合实际应用。耐压性能需匹配潜水深度,常规水下作业灯具耐压需达0.5-10MPa,深海探测灯具则需20MPa以上,确保额定压力下无渗漏、不变形。耐温性能需适应-20℃至60℃温差,夏季浅水环境光照易使灯具升温,冬季或深海温度偏低,密封材料需在此区间保持稳定弹性,避免热胀冷缩产生密封间隙。耐老化性能需抵御光、氧、水的长期作用,户外及浅水环境灯具需耐受紫外线,防止密封橡胶开裂变硬;长期浸泡场景下,密封材料需具备抗水解性,避免溶胀、强度下降,保障使

用寿命不低于5000小时。

1.3 电路防护关键技术要求

水下高导电环境对电路防护提出严苛要求,核心需覆盖短路、漏电、浪涌三大风险点。防短路通过优化电路布局、采用防水绝缘材料实现,内部电路模块独立封装,导线接口用防水端子,阻断水体引发的正负极连通,同时配置熔断装置,过载时快速切断电路。防漏电要求电路与壳体间绝缘电阻不低于2MΩ,通过强化绝缘涂层、增设绝缘隔板,防止电流泄漏至壳体,海水环境中漏电不仅会导致灯具故障,还可能威胁水下作业人员安全。防浪涌需抵御供电波动与电磁干扰,水下作业多采用蓄电池或舰载电源,电压波动易产生浪涌电流,需配置TVS管、压敏电阻等元件吸收瞬时过电压,避免驱动电路、光源模块损坏,保障灯具稳定运行^[1]。

2 潜水灯具密封结构设计基础及优化

2.1 防水型潜水照明灯具密封结构设计基础

防水型潜水照明灯具密封结构设计要以环境适配性与结构稳定性为核心,依托基础设计原则与关键要素构建合规方案,具体核心要点如下:(1)设计核心原则。要遵循适配性原则,确保密封结构与灯具壳体、内部组件的尺寸精度匹配,避免因装配间隙导致密封失效;遵循压力平衡原则,结合潜水深度对应的水压参数,设计具备压力承载能力的结构形式,防止高压下密封面变形;遵循兼容性原则,保证密封结构与灯具散热、光学性能互不干扰,兼顾密封效果与灯具整体运行效率。(2)密封材料选型依据。结合工作环境参数筛选材料,重点关注材料的弹性模量、耐介质性与力学稳定性,确保在长期浸泡、温度波动环境下不发生溶胀、老化、开裂;优先选用压缩永久变形量小的材料,保障密封面长期贴合紧密;同时考量材料与壳体材质的相容性,避免发生化学

反应影响密封性能。(3)壳体与密封结构适配要点。壳体密封部位需采用精密加工工艺,保证密封面平整度与粗糙度达标,减少密封间隙;合理设计密封槽结构,明确槽宽、槽深与密封件的配合公差,确保密封件安装后可充分填充间隙;针对壳体拼接处,采用一体化密封设计思路,减少密封薄弱点。(4)深度适配设计要点。根据额定潜水深度计算水压载荷,确定密封结构的承压等级;浅深度场景侧重基础密封与防腐蚀设计,中深深度场景需强化密封结构的抗压强度,优化密封件截面形状与安装方式,提升结构抗形变能力。

2.2 典型防水密封结构设计与优化

针对潜水灯具不同密封场景的需求,对典型密封结构进行针对性设计优化,提升密封可靠性与环境适应性,具体优化方向如下:(1)静态密封结构优化。优化密封面接触压力分布,通过调整密封件压缩量,使接触压力均匀覆盖密封区域,避免局部压力不足导致渗漏;改进密封槽结构形式,采用阶梯式密封槽设计,增加密封接触面积,形成多重密封屏障;优化密封件安装固定方式,防止长期使用中密封件发生位移,提升结构稳定性。(2)动态密封结构优化。针对灯头旋转、线缆引出等动态部位,采用组合式密封设计,结合动密封件与静密封件的优势,平衡运动灵活性与密封效果;优化动态密封件的润滑方案,选用适配介质的专用润滑剂,减少运动摩擦对密封件的损耗,延长使用寿命;合理设计运动间隙,避免间隙过大导致密封失效,同时防止间隙过小影响运动顺畅性。(3)多腔体密封结构优化。采用独立腔体密封设计,对灯具内部电路腔、光源腔分别设置密封结构,防止单一腔体密封失效后蔓延至其他区域;优化腔体间的隔离结构,设置导流槽与缓冲空间,降低窜水风险;同步优化腔体密封接口的衔接方式,确保整体密封性能一致。(4)抗干扰性能优化。针对振动、冲击等外部干扰,强化密封结构与壳体的连接强度,采用加固式安装结构,避免密封面因振动产生松动;优化密封材料的抗疲劳性能,选用耐振动冲击的材质,减少反复受力导致的材料老化破损^[2]。

3 潜水照明灯具电路防护核心技术

3.1 电路防短路与防漏电防护设计

电路防短路与防漏电防护通过结构设计与技术配置构建双重防护体系,核心技术要点如下:(1)电路布局优化。采用分区隔离布局,将功率、控制、接口模块分隔并设置独立绝缘腔体,遏制单一区域故障蔓延;合理规划导线走向,避免交叉缠绕挤压,预留散热与检修空间,降低导线破损短路风险;关键节点采用冗余布线,

提升电路运行稳定性。(2)短路防护配置。配置参数精准匹配的熔断元件,明确熔断阈值与响应时间,确保过载或短路时快速切断电路;采用自恢复保险丝替代传统熔断丝,适配反复启停场景以减少维护成本;在电路主干与分支节点分别设置防护元件,实现分级防护。(3)漏电防护设计。强化电路与壳体的绝缘隔离,提升绝缘层厚度及耐压等级,契合水下作业标准;配置漏电检测模块,实时监测对地泄漏电流,超安全阈值时触发预警或断电机;优化电路接口密封设计,阻断水体侵入引发的漏电隐患。(4)元件选型与固定。选用防水达标、耐腐蚀性强的密封式封装元件,规避裸露引脚短路风险;通过卡扣、灌胶固定元件与导线,防止振动冲击导致位移、引脚脱落,保障电路连接可靠性。

3.2 浪涌与过电压防护技术

浪涌与过电压防护针对水下供电波动及电磁干扰特性,结合TVS管、压敏电阻应用特性构建高效防护链路,核心技术要点如下:(1)防护元件选型适配。依据电路额定电压、工作电流及浪涌耐受需求,筛选匹配参数的TVS管,明确反向击穿电压、钳位电压与峰值脉冲电流指标,确保快速吸收瞬时过电压;压敏电阻选用无极性、响应快速型号,适配交直流供电场景,兼顾常态绝缘与浪涌防护性能。(2)防护元件布局设计。将TVS管、压敏电阻并联于电路输入端及关键模块两端,靠近接口安装以缩短浪涌电流泄放路径;避免与核心芯片直接串联,防止元件失效影响电路正常运行;多元件协同配置时合理划分防护等级,实现浪涌能量分级泄放。(3)辅助防护链路搭建。搭配限流电阻与电感元件,与TVS管、压敏电阻构成复合防护电路,限制浪涌电流幅值以保护防护元件;在电源模块与负载间设置滤波电路,抑制高频浪涌干扰,提升抗干扰能力;优化接地路径,确保浪涌能量快速泄放至地。(4)防护元件稳定性保障。选用耐高低温、耐老化元件适配水下极端环境,避免性能衰减;对元件进行灌封密封,隔绝水体湿气防止引脚氧化;电路设计中预留元件替换空间,便于后期维护。

3.3 电路模块的防潮绝缘处理技术

电路模块防潮绝缘处理从材料选用、工艺优化入手,构建全方位防潮屏障,保障长期浸泡下的绝缘性能,核心技术要点如下:(1)防潮绝缘材料选用。优先采用耐水解、绝缘稳定的灌封胶填充模块间隙,形成致密防护层;模块表面喷涂固化后膜层均匀、附着力强的三防漆,抵御湿气与盐分侵蚀;接口部位采用绝缘密封垫,兼顾密封与绝缘性能。(2)灌封工艺优化。灌封前对模块干燥除水除杂,避免气泡影响防护效果;采用真空灌封工

艺, 确保胶液充分填充缝隙无死角; 精准控制固化温度与时间, 保障胶层硬度及绝缘性能, 杜绝固化不完全导致的防潮失效。(3) 模块结构防潮设计。模块壳体采用密封式结构, 预留透气阀平衡内外气压, 防止温差引发壳体变形与湿气侵入; 优化插拔式密封接口, 搭配绝缘密封圈提升防潮密封性; 模块内部设置导流槽, 及时排出少量侵入湿气避免积聚。(4) 绝缘性能强化措施。提升线路板绝缘等级, 选用高耐温、高绝缘基板材料, 优化线路间距防止爬电; 线路板表面做防焊处理, 覆盖关键线路与焊点增强防潮绝缘能力。

3.4 水下接地与等电位连接防护设计

水下接地与等电位连接适配水下导电环境, 通过科学布局与处理消除电位差漏电风险, 核心技术要点如下:(1) 接地系统设计。采用单点接地方式, 避免多点接地形成电位差与电流环流; 选用截面积充足、耐腐蚀性强的接地导体, 确保接地电阻达标以满足电流泄放需求; 缩短导体长度优化路径, 降低电阻与电感提升泄放效率。(2) 等电位连接配置。将灯具壳体、模块外壳、金属接口等导电部件等电位连接, 形成统一等电位体消除电位差; 选用柔性导电材料作为连接导体, 适配结构形变保障连接可靠; 关键部位采用压接或焊接工艺, 提升导电性与稳定性。(3) 接地防护优化。在接地回路设置检测模块, 实时监测电阻与连接状态, 失效时触发预警; 针对深海高压环境强化导体耐压性能, 避免绝缘层击穿; 对导体水体接触部位做防腐处理, 防止氧化导致电阻增大。(4) 与密封结构协同设计。接地接口采用密封式设计并搭配绝缘密封件, 阻断水体侵入; 协调接地与密封结构安装位置, 避免导体破坏密封层; 多腔体灯具各腔体接地系统独立, 通过等电位导体实现整体协同, 兼顾密封与防护^[3]。

4 电路防护系统的集成与优化设计

电路防护系统集成与优化需兼顾防护可靠性、结构适配性与运行效率, 贴合潜水灯具紧凑化、耐极端环境

的实际需求, 核心要点如下:(1) 兼容性集成设计。统筹防护电路与照明驱动模块的安装空间, 采用模块化集成方案, 使防护元件与驱动芯片、光源模块布局紧凑且互不干扰, 确保信号传输稳定, 避免防护电路影响灯具光学与散热性能。(2) 小型化布局优化。选用微型化防护元件, 精简电路链路结构, 减少防护系统占用空间, 适配潜水灯具小巧的壳体设计; 优化线路走向, 缩短元件间连接距离, 降低线路损耗与干扰风险。(3) 功耗与效率平衡。筛选低功耗防护元件, 搭配高效滤波电路, 在保障防护效果的同时控制功耗, 延长蓄电池供电时长; 优化防护电路启停逻辑, 避免非工作状态下的无效能耗。(4) 极端环境冗余优化。针对深海高压、低温环境, 增加防护元件冗余配置, 关键模块采用双路防护设计; 强化电路与密封结构的协同适配, 确保集成后不破坏壳体密封完整性, 提升系统整体抗干扰能力^[4]。

结束语: 本文围绕防水型潜水照明灯具密封结构与电路防护技术展开全面研究, 明确了不同水下环境的防护重点, 优化了密封结构设计方案与电路防护技术路径, 实现防护系统与灯具整体性能的协同适配。研究成果可有效提升灯具水下耐候性与运行稳定性, 但在极端深海环境的长效防护方面仍有提升空间。未来可聚焦新型密封材料与智能化防护电路研发, 进一步强化技术适配性, 推动潜水照明灯具在水下探测、作业等领域的升级应用。

参考文献:

- [1]金浩然,刘俊良,梁海莲,顾晓峰.面向碳纳米管集成电路的新型静电放电防护结构研究[J].电子与封装,2025,25(10):68-73.
- [2]胡凛,谢霞平,曹浩龙,付清轩.塑封和密封集成电路结构分析方法及案例研究[J].电子质量,2024(9):28-35.
- [3]周俊良.防水型潜水照明灯具密封结构与电路防护技术[J].灯与照明,2025,49(6):98-100.
- [4]李庆云.防爆照明灯具结构特点及应用探究[J].上海轻工业,2025(4):137-139.