

港口供配电系统雷电防护与接地电阻优化设计

王代栋

宁波舟山港股份有限公司北仑第二集装箱码头分公司 浙江 宁波 315800

摘要：本文聚焦港口供配电系统雷电防护与接地电阻优化设计，分析了雷电对港口的直击雷、感应雷、地电位反击三种危害形式，指出雷电防护系统设计缺陷、接地系统核心问题及监测运维机制不完善等现存问题。从接闪器优化配置、浪涌保护器分级防护、屏蔽与等电位连接设计三方面提出雷电防护策略，同时给出接地电阻优化设计，涵盖基础参数确定、高电阻率土壤优化方案及移动设备接地优化，保障港口供配电系统安全稳定运行。

关键词：港口供配电系统；雷电防护；接地电阻；防雷设计；优化策略

引言：港口作为货物运输与贸易的关键枢纽，其供配电系统的稳定运行至关重要。雷电作为影响港口供电安全的重要因素，可能以直击雷、感应雷、地电位反击等多种形式对供配电系统造成损害，引发设备故障、火灾甚至爆炸等严重后果，威胁港口作业安全与效率。本文将深入剖析雷电危害，探寻现存问题根源，并提出针对性的雷电防护与接地电阻优化设计策略，以提升港口供配电系统的安全性与可靠性。

1 雷电对港口供配电系统的危害形式

1.1 直击雷危害

直击雷作为雷电危害中最为直观且猛烈的一种形式，是指雷电直接击中港口供配电系统的设备或线路。当直击雷现象发生时，其携带的巨大雷电流会在极短瞬间通过被击中的物体。这一过程中，会产生极高的电压以及强大的电流冲击，这种冲击力对电气设备的破坏力极大。以港口变压器为例，若雷电直接击中它，强大的电流极有可能使变压器绕组瞬间烧毁，导致变压器彻底损坏。而变压器作为港口电力供应的关键设备，其损坏会直接影响整个港口的电力供应，使港口诸多作业陷入瘫痪。不仅如此，直击雷还可能引发火灾和爆炸等灾难性事故，严重威胁港口人员生命安全和财产安全。另外，直击雷产生的电磁脉冲具有强大的干扰能力，会对附近电子设备的正常运行造成严重影响，导致数据丢失、系统故障等问题频发，影响港口正常运转。

1.2 感应雷危害

感应雷是由于雷云放电时，在附近导体上引发的静电感应和电磁感应现象。在港口供配电系统里，感应雷会在电线、电缆等导体上感应出过电压和过电流。虽然感应雷所产生的过电压和过电流强度相较于直击雷要弱一些，但它们同样会对电气设备造成不容忽视的损害^[1]。例如，感应雷过电压会加速电气设备绝缘的老化进程，

降低设备原本的绝缘性能，进而增加设备出现故障的概率。对于港口中那些敏感的电子设备，像控制计算机、通信设备等，感应雷产生的电磁干扰影响更为显著。它可能导致这些设备工作异常，出现数据错误、通信中断等情况。一旦出现这些问题，会严重影响港口的自动化控制和信息传输，降低港口作业的效率和准确性。

1.3 地电位反击危害

在雷电天气中，地电位升高会对与之相连的电气设备产生反击作用，这便是地电位反击危害。当雷电流通过接地装置流入大地时，会使接地装置附近的地电位急剧升高。如果电气设备的接地与该接地装置相连，且设备与接地装置之间存在过大的电位差，就会引发地电位反击。地电位反击带来的危害是多方面的，一方面，它可能导致电气设备的金属外壳带电，这对在附近操作的人员构成了极大的安全威胁，随时可能发生触电事故。另一方面，它会对电气设备内部的电子元件造成严重损坏，影响设备的正常运行。以港口的起重机等大型设备为例，若其接地不良，在雷电天气中就极易遭受地电位反击，导致设备出现故障，进而影响港口的装卸作业效率，造成经济损失。

2 港口供配电系统雷电防护与接地现存问题

2.1 雷电防护系统设计缺陷

部分港口的雷电防护系统设计存在不合理之处，一些设计没有充分考虑港口的实际环境和设备特点，导致防雷措施不能有效发挥作用。例如，接闪器的布置不合理，不能全面覆盖需要保护的区域，使得部分设备处于防雷盲区。浪涌保护器的选型和安装也不规范，有的浪涌保护器的参数与设备不匹配，无法有效抑制雷电过电压；有的安装位置不当，不能及时对过电压进行防护。此外，雷电防护系统的整体设计缺乏系统性，各防雷部件之间的协调配合不够，降低了防雷效果。

2.2 接地系统存在的核心问题

接地系统是港口供配电系统雷电防护的重要组成部分，但目前存在一些核心问题。接地电阻过大是常见问题之一，过大的接地电阻会导致雷电流不能及时有效地泄入大地，增加设备遭受雷击的风险。在一些港口，由于土壤电阻率较高或接地装置施工不当，接地电阻难以满足设计要求。接地装置的腐蚀问题也比较严重，长期暴露在潮湿、盐雾等恶劣环境中，接地体容易生锈腐蚀，导致接地电阻增大，影响接地性能。另外，接地系统的连接不可靠，存在松动、虚接等情况，也会降低接地效果^[2]。

2.3 监测与运维机制不完善

目前，许多港口对供配电系统雷电防护与接地的监测和运维机制不够完善。缺乏有效的监测手段，不能及时掌握雷电防护设备和接地系统的运行状态。例如，没有安装实时监测接地电阻的装置，无法及时发现接地电阻的变化。在运维方面，存在维护不及时、不彻底的问题。对防雷设备的检查和维修缺乏定期性和系统性，一些设备出现故障后不能及时得到修复。同时，运维人员的专业素质参差不齐，对雷电防护和接地技术的掌握不够深入，影响了运维工作的质量。

3 港口供配电系统雷电防护设计

3.1 接闪器优化配置

接闪器作为雷电防护体系中的首道关键防线，其优化配置对于港口供配电系统的安全稳定运行起着决定性作用。在进行配置时，必须全面且深入地考量港口的建筑布局特点、设备分布状况以及当地的雷电活动规律。针对港口内那些高大的建筑物和承担重要功能的设备，避雷针往往是较为适宜的接闪器选择。不过，避雷针的高度并非随意设定，其保护范围也需要经过严谨精确的计算。只有确保避雷针的高度和保护范围科学合理，才能切实有效地全面保护目标，避免雷电直接击中建筑物和设备，从而防止因直击雷引发的设备损坏、火灾甚至爆炸等严重后果。而在港口的一些开阔区域，例如堆场，避雷带或避雷网则能发挥更好的防护作用。避雷带和避雷网应沿着建筑物屋顶边缘或者那些容易遭受雷击的部位进行敷设，形成一个连续且严密的保护网络。另外，接闪器与引下线之间的连接质量也不容忽视，必须保证连接可靠，这样才能使雷电流顺利传导至大地，避免因连接问题导致雷电流积聚，进而引发安全事故。

3.2 浪涌保护器（SPD）分级防护设计

浪涌保护器在抑制雷电过电压方面扮演着举足轻重的角色，采用分级防护设计能够显著提升其防护效果。

在港口供配电系统这个复杂的网络中，不同设备对雷电过电压的敏感程度以及其重要性存在较大差异。因此，需要根据这些实际情况，合理挑选浪涌保护器的级别和参数。在总配电室这个电力输入的关键节点，安装一级浪涌保护器十分必要，它能够承担起泄放大部分雷电过电压的重任，为整个供配电系统提供初步且重要的保护。而在分配电箱以及设备前端，安装二级和三级浪涌保护器则能进一步降低过电压的幅值，形成多层次的防护体系。浪涌保护器的选型必须严格符合相关标准，其通流容量、残压等关键参数要与被保护设备精准匹配^[3]。同时，安装位置和接线方式也不容小觑，只有确保安装位置合理、接线方式正确，浪涌保护器才能在雷电来袭时正常发挥其抑制过电压的功能，保障港口供配电系统的稳定运行。

3.3 屏蔽与等电位连接设计

屏蔽和等电位连接是提升港口供配电系统抗干扰能力、防止地电位反击的重要技术手段。对于港口的电缆线路而言，采用金属管或金属线槽进行屏蔽是一种行之有效的方法。将电缆妥善包裹在金属管或金属线槽内，能够形成一道有效的屏障，大大减少外界电磁场对电缆的干扰。在建筑物内部，各种金属管道、电缆桥架等金属部件众多，若它们之间存在电位差，在雷电天气下就可能引发危险。因此，对这些金属部件进行等电位连接，并将它们与接地装置可靠连接，能够消除不同金属部件之间的电位差，避免因电位差引发的放电现象。对于电气设备，同样需要进行等电位连接，将设备的金属外壳、机架等与接地系统紧密连接。这样，当地电位升高时，就不会因电位差对设备造成损坏。通过科学合理的屏蔽和等电位连接设计，港口供配电系统能够在复杂的电磁环境中保持稳定运行，有效提高系统的安全性和可靠性。

4 港口供配电系统接地电阻优化设计

4.1 接地系统设计基础参数确定

结合港口环境与规范要求，明确接地系统设计核心参数，为优化设计提供依据。首先确定接地电阻目标值，根据GB50057-2010《建筑物防雷设计规范》，港口变电站工作接地、保护接地、防雷接地共用接地网，接地电阻 $\leq 4\Omega$ ；弱电系统（如PLC、通信）接地电阻 $\leq 1\Omega$ ；移动设备（岸桥、场桥）接地电阻 $\leq 10\Omega$ 。其次确定土壤电阻率测试方法与频次，采用四极法测试港口不同区域土壤电阻率，测试深度 ≥ 2 米，覆盖变电站、码头作业区、仓储区等关键区域，每季度测试1次，雷雨季节增加至每月1次，记录土壤含水率、温度等参数，建立

电阻率数据库,某港口通过测试发现,码头区域土壤电阻率夏季为 $120\Omega \cdot m$,冬季因干旱升至 $250\Omega \cdot m$,为季节调整接地方案提供依据。最后确定接地体材料参数,优先选用耐腐蚀材料,水平接地极采用铜包钢扁钢(铜层厚度 $\geq 0.25mm$,截面 $\geq 120mm^2$),垂直接地极采用铜包钢棒(直径 $\geq 20mm$,长度2.5-3米),沿海高盐雾区域选用钛合金接地极(耐腐蚀寿命 ≥ 30 年),确保接地体长期稳定运行。

4.2 高电阻率土壤接地优化方案

针对港口高电阻率土壤($> 100\Omega \cdot m$),采用“物理改良+结构优化+新型材料”组合方案降低接地电阻。物理改良方面,对接地网周围2米范围内土壤进行换土处理,更换为低阻土壤(如黏土、黑土,电阻率 $\leq 50\Omega \cdot m$),或添加膨润土降阻剂(pH值6-8,与土壤混合比例1:3),形成低阻区域,某港口变电站通过换土+降阻剂处理,接地电阻从 8Ω 降至 3.5Ω ;干旱季节采用深井注水(钻孔深度与垂直接地极一致,注入盐水或降阻液),保持土壤含水率 $\geq 20\%$,可使接地电阻降低30%-40%。结构优化方面,采用“水平接地极+多组垂直接地极+深井接地”复合接地网,水平接地极间距增大至10-15米,避免屏蔽效应;垂直接地极数量按土壤电阻率调整,电阻率100-200 $\Omega \cdot m$ 时,每5米设置1根,超200 $\Omega \cdot m$ 时每3米设置1根;深井接地深度 ≥ 10 米,井内敷设铜包钢接地极,填充降阻剂,某港口码头通过该结构,接地电阻从 15Ω 降至 4.2Ω 。新型材料应用方面,采用电解离子接地极(内置电解盐,通过缓释技术释放离子),适用于极端高阻土壤($> 500\Omega \cdot m$),可使接地电阻降低60%-80%;或采用石墨基柔性接地体(可弯曲,适应复杂地形),在码头岸线弧形区域敷设,某港口通过该材料,解决岸线接地难题,接地电阻稳定在 3.8Ω 。

4.3 移动设备接地优化设计

针对岸桥、场桥等移动设备接地难题,构建“设备本体-轨道-固定接地网”一体化接地系统。设备本体接地方面,岸桥、场桥金属框架作为自然接地体,在设备关键部位(如驾驶室、变频器柜)设置专用接地端子,端

子采用不锈钢材质(304材质),表面钝化处理,防止腐蚀;接地端子与设备金属框架采用螺栓连接,接触电阻 $\leq 0.05\Omega$,同时涂抹导电膏,增强导电性,某港口岸桥经改造后,设备本体接地电阻从 5Ω 降至 2Ω 。轨道接地优化方面,码头轨道两端装设垂直接地极(铜包钢棒,长度2.5米),接地电阻 $\leq 4\Omega$;轨道接头处采用铜排跨接(铜排截面 $\geq 50mm^2$),跨接长度 $\geq 100mm$,螺栓紧固并做防腐处理,降低接头接触电阻,某港口轨道经跨接改造后,接头接触电阻从 0.6Ω 降至 0.08Ω ;每隔50米,用铜电缆(截面 $\geq 70mm^2$)将轨道与固定接地网连接,形成可靠接地通路^[4]。动态接地监测方面,在移动设备接地端子与轨道连接点安装智能接地电阻传感器(精度 $\pm 5\%$,测量范围0-10 Ω),通过LoRa无线通信将数据上传至监控平台,实时监测接地电阻变化,当电阻超 10Ω 时自动报警,某港口通过该监测系统,及时发现2起轨道接地故障,避免雷击损坏设备。

结束语

港口供配电系统的雷电防护与接地电阻优化设计是保障港口安全高效运营的关键环节。通过合理配置接闪器、分级设置浪涌保护器、做好屏蔽与等电位连接等雷电防护措施,以及科学确定接地系统基础参数、针对高电阻率土壤和移动设备采用优化设计方案,能够有效降低雷电对港口供配电系统的危害,减少设备故障和安全事故的发生。未来,随着技术的不断进步,港口雷电防护与接地设计将更加完善,为港口的持续稳定发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]袁耀.智能配电系统在港口工程中的应用[J].中国水运(上半月),2023(1):36-38.
- [2]杨佳辉,王玉玺,随权,等.考虑频率越限风险的氢能港口配电网灾后应急调度[J].电测与仪表,2025,62(6):81-92.
- [3]武冰洁.港口供电系统可靠性的影响因素分析及改进措施[J].价值工程,2019,38(2):114-116.
- [4]韩松,孟祥辉.无功功率补偿装置在港口供配电系统中的应用[J].电力系统装备,2021(2):15-16.