

上海电力大学继续教育学院

批注 [C1]: 华文行楷 小初号字 居中

专升本本科毕业设计

批注 [C2]: 华文宋体 小初号字 居中



题目: XX 城市轨道交通防雷分析与对策

教学站点: _____

专业: 电气工程及其自动化

年 级: _____

学生姓名: _____

学 号: _____

指导教师: _____

批注 [C3]: 宋体 四号字 居中

20 年 月 日

批注 [C4]: 宋体 四号字 靠右对齐

摘要

批注 [个人用户5]: 字体字号: 宋体加粗三号字体

本文主要阐述接触网雷害分析及防雷措施。接触网是电气化铁道系统必不可少的主要设施之一，特点是没有备用线路，发生任何事故，都将中断铁道运营。接触网线路长，穿越山陵旷野，遭受雷电袭击的机率大，容易受雷击导致电气设备损坏。接触网没有避雷线，接触网上装有少量的避雷器，其工作接地直接接在钢轨上，或接入轨道电路的扼流变压器线圈中点。这样的简单方式对防止雷电过电压是不够的。针对铁路电网结构及特点，研究雷电过电压及其保护措施，保证铁路电网的安全运行，减少雷击损失。这不仅对铁路运输具有重要的经济意义，也对加快社会物质流动和经济建设步伐具有重要的意义，也是工程实际中需要研究解决的关切问题。

我国客运专线建设速度加快，所经地区地理、气象、气候条件差别较大，情况复杂，如果接触网不设避雷线，易遭受雷击引起损坏。为保证接触网运行的高可靠性，结合我国电气化铁道现状，提出接触网系统防雷的改建建议。通过分析和理论计算，对客运专线接触网系统防雷进行研究。

关键词: 轨道交通防雷保护避雷装置

批注 [个人用户6]: 字体字号: 宋体加粗小四号;

批注 [个人用户7]: 字体字号: 宋体细体小四号,
行间距: 多行倍距: 1.25

要求: 论文摘要是论文的重点概述，要以浓缩的形式概括课题的研究内容，文字要简练、明确。内容要包括目的、方法、结果和结论。单位制一律换算成国际标准计量单位制，除特殊情况外，数字一律用阿拉伯数码。文中不允许出现插图。

摘要字数不要超过 500 字;

关键词至少 3 个，但不要超过 5 个

目录

1.绪论.....	4
1.1 轨道交通防护雷击保护的重要性.....	4
1.2 雷击产生的原因及雷击保护原理.....	4
2. 轨道交通接触线上电装置防雷保护.....	6
2.1 接触网是牵引供电系统的重要组成部分.....	6
2.2 避雷器的作用.....	7
2.3 避雷线的作用.....	8
2.4 避雷器设置的分析.....	8
3.轨道交通接触网防雷措施的分析.....	11
3.1 直接雷击接触网.....	11
3.2 雷电反击过电压.....	12
4. XX 市轨道交通 5 号线雷击故障分析及防雷措施.....	13
4.1 事故概况.....	13
4.2 事故原因分析.....	14
4.3 防雷对策与措施.....	15
5.结论.....	17
参考文献.....	18
致谢.....	19
附录.....	20

批注 [个人用户8]: 字体字号: 宋体加粗小三号字体

批注 [个人用户9]: 若无附录此标题可不要

1. 绪论

1.1 轨道交通防护雷击保护的重要性

交通通信系统的传输设备、程控交换机、专用通信设备、无线通信设备和 UPS 电源等都是传输和处理数据信息的核心设备,这些设备对外的连接线路存在着绝缘强度低,过电压和过电流耐受能力差,对电磁干扰敏感等弱点。一旦建筑物受直击雷或附近区域发生雷击雷电过电压和雷击电磁脉冲会通过供电线路、通信线路、接收天线、空间电磁感应等途径侵入建筑物内,将威胁到城市交通通信系统的正常工作和安全运行。

地铁是城市公共交通的重点发展方向,大量的微电子设备在地铁行业中得到应用,大规模集成电路的采用使系统技术得到了极大提高,但集成电路本身有着在防雷性能的不如以前使用的机电制设备,一般来讲集成度越高,其设备的耐用能力也越低,设备大都处于室内,也容易遭受雷击,其原因大多是雷电电磁脉冲过电压沿传输线侵入室内设备造成的。雷击、闪电会在输入/输出电源线上产生瞬间高压、大电流,影响用户网络系统、服务器、计算机、信号继电联锁、计算机联锁、区间自动闭塞等铁路信号智能化供电设备及精密设备的稳定运行,严重时会造成设备损坏。近几年来,防雷、接地系统的设计理念不断更新,有关新材料、新工艺也得到很大发展。

1.2 雷击产生的原因及雷击保护原理

雷电是大气中的一种自然现象,大气不完全呈分子或原子状态,经常是带电的,正负电荷之间的放电现象,就形成了闪电,并发出雷声。

由于光速很快、约每秒三十多万公里,而声速每秒只有三百多米,所以我们一般先看到闪电,后闻到雷声。每一次雷暴雷电所产生的电压可高达几万伏,甚至几十万伏。

说到雷击,积雨云与地面之间的电荷交换便是雷击。在雷击过程中,尖端放电扮演了非常重要的角色,由于电荷大量聚集于尖端,并且尖端与富集电荷的积雨云之间距离较之其他部分小,使得尖端与积雨云之间电势差普遍大于尖端以外的其他部分,因此积雨云与尖端更容易发生放电,尖端的存在使得雷击发生的条件大大降低。

尖端可以是高楼上面的避雷针,可以是山顶上的一棵大树,甚至可以是平地上打伞的人。合理利用尖端放电的知识可以有效降低雷击对我们造成的伤害。在高楼上装上避雷针,人为地增大大楼的尖端避雷针遭雷击的概率,通过避雷针将积雨云内的电荷安全的导入大地,从而避免楼体遭雷击时的巨大危害。高压输

批注 [个人用户10]: 一级标题字体字号: 均为宋体加粗小三号;

居中对齐;

后面每一新章节标题要求都相同。

批注 [个人用户11]: 二级标题字体字号: 宋体加粗四号;

靠左对齐;

后面每个二级标题要求都相同。

批注 [个人用户12]: 具体内容: 字体字号: 宋体细体小四号;

开头空两格, 行间距: 多行倍距: 1.25。

电线上方都会平拉一根导线，这根导线不是输电用的，而是接地的，作用就相当于楼上的避雷针，也是利用尖端放电原理，将下面的输电线屏蔽，在遭到雷击的时候，将电荷导入大地，从而避免雷击对输电线路两端电气设备的破坏。

雷击的研究对以后将要从事土建工作的我们来说至关重要，熟悉雷击的相关原理，并将其应用到将来的工作中去，定会发挥巨大的作用，避免一些不必要的损失。

防雷，是指通过组成拦截、疏导最后泄放入地的一体化系统方式以防止由直击雷或雷电电磁脉冲对建筑物本身或其内部设备造成损害的防护技术。它由外部雷电防护系统和内部雷电防护系统两部分组成。避雷针是最常见的直击雷防护装置。当雷云放电接近地面时它使地面电场发生畸变，在避雷针的顶端，形成局部电场强度集中的空间，以影响雷电先导放电的发展方向，引导雷电向避雷针放电，再通过接地引下线和接地装置将雷电流引入大地，从而使被保护物体免遭雷击。避雷针冠以“避雷”二字，仅仅是指其能使被保护物体避免雷害的意思，而其本身恰恰相反，是“引雷”上身。接地的目的是：(a)使连接到地的导体具有等于或近似于大地（或代替大地的导电体）的电位；(b)引导入地电流流入和流出大地（或代替大地的导电体）。通用的接地系统主要包括铜包钢接地系统、长效高导活性离子接地系统等，而在接地单元与帝王链接工艺上通用热熔焊接施工工艺。等电位连接是指将分开的装置、诸导电物体等用等电位连接导体或电涌保护器连接起来以减小雷电流在它们之间产生的电位差。

2. 轨道交通接触线上电装置防雷保护

批注 [个人用户13]: 一级标题要求同前;
每一新章节要从新的一页开始。

2.1 接触网是牵引供电系统的重要组成部分

绝大部分裸露于自然环境中且没有备份、需要采用必要的大气过电压防护措施。如果缺少防护措施或措施不当,可能引起绝缘子损坏,造成线路跳闸,直接影响电气化铁道运营。同时雷击产生的侵入波过电压通过接触网传入牵引变电所,可能引起所内电气设备的损坏造成更大的事故。我国地域广大,因雷击导致人员伤亡、设备损坏的事故屡见不鲜。

根据牵引供电系统运营部门统计数据进行分析,目前开通的电气化铁道中部分线路雷击事故比较频繁,所以应重视接触网的防雷设计,以运输安全为目标,以系统优化、综合防护、防雷减灾的原则进行接触网防雷设计。

根据雷电日的数量分为4个等级的区域:年平均雷电日在20d及以下地区为少雷区,年平均雷电日在20d以上,40d及以下地区为多雷区,年平均雷电日在40d以上、60d及以下地区为高雷区,年平均雷电日在60d以上地区为强雷区。接触网的防雷措施主要是安装避雷器和架设架空避雷线,同时做好必要的接地。具体规定为:

(1)吸流变压器的原边应设避雷装置;

(2)高雷及强雷区下列位置设避雷装置;分相和站场端部的绝缘关节、长度2,000 m及以上隧道的两端、长度大于200m的供电线或AF线连接到接触网上的连接处。

(3)强雷区设置独立避雷线,保护角为 $0\sim 45^\circ$ 。

多数接触网采取以下防雷措施:高架区段不架设地线,而是利用高架桥接地扁钢来达到接地保护目的;车场线架设架空地线,架空地线或接地扁钢引至牵引变电所的接地母排上,构成闪络保护回路;接触网各绝缘子接地端的金属底座、开关底座、腕臂底座等均与架空地线或接地扁钢相连;接触网上网开关处设避雷器;高架桥接触网每隔500 m设一处避雷器,并将桥墩内部钢筋网作为其接地体,接地电阻小于 $10\ \Omega$ 。由于采用的防雷措施具有一定的局限性,已不能满足现代城轨系统高运行可靠性的要求。

如图1-1是XX接触网防雷设计示意图,其中接触网每隔500 m安装一台避雷器;避雷器和桥墩桩基钢筋连接,平时处于断开状态,当有雷电发生时,避雷器导通将雷电流泄入大地。



图 1-1 接触网避雷器示意图

由于支撑接触网的支架、构件均未直接接地，当雷电发生时，雷电流不能快速泄入大地，支柱电位升高，而接触网则被避雷器钳制了较低电位，使绝缘子两段电位差很大，从而造成绝缘子闪络，引起馈线开关保护动作。绝缘子在雷击过程中温度变化较大，在绝缘子表面和内部出现较大温差而造成绝缘子损坏。通过模拟计算可知：支柱不接地时反击电位不削减，而支柱接地时反击电位削减趋势很明显。由此可见支柱接地对防雷的作用是非常明显和重要的。

2.2 避雷器的作用

避雷器的作用是用来保护电力系统中各种电器设备免受雷电过电压、操作过电压、工频暂态过电压冲击而损坏的一种电器。避雷器的类型主要有保护间隙、阀型避雷器和氧化锌避雷器。保护间隙主要用于限制大气过电压，一般用于配电系统、线路和变电所进线段保护。阀型避雷器与氧化锌避雷器用于变电所和发电厂的保护，在 500kV 及以下系统主要用于限制大气过电压，在超高压系统中还将用来限制内过电压或作内过电压的后备保护。

接触网工作的额定电压为 15kV 但在某种情况下会出现大大超过 15kV 的电压，称为过电压。过电压分为操作过电压和大气过电压。大气过电压是指在接触网附近，发生雷击时使接触网产生的过电压。这种峰值很高的过电压会使绝缘子闪络、击穿而发生短路事故，造成接触网设备损坏，当安装了避雷器后，它能及时地将雷电引入大地。

2.3 避雷线的作用

线架设在杆塔顶部，其作用是保护线路导线，减少雷击机会，提高线路耐雷水平，

批注 [个人用户14]: 每章所用各种图形都要居中，大小以打印时能够看清楚为好，不要太大或太小，图序号和图的含义要按章节排序，如此图是第一章的，则图序号为“图 1-1 接触网避雷器示意图”，用五号宋体。如果还有更多的图则按“图 1-2 XXXX”依次类推排序。在论文中如图 1-1 要和相应的图 1-1 对应起来。后面各章节均要这样处理。

降低线路雷击跳闸次数，从而提高线路运行的安全可靠性和保证连续供电。根据线路的重要性以及线路通过地区的雷电活动情况，每条线路可在杆塔上架设一条或两条避雷线。山区宜采用较小的保护角；重冰区的线路则不宜采用过小的保护角；双避雷线线路，两避雷线间距离不应超过避雷线与导线间垂直距离的 5 倍。避雷线一般采用镀锌钢绞线。镀锌钢绞线是采用镀锌高碳钢丝同心绞合而成，具有一定的防腐蚀能力，机械强度较高。常用的截面是 25、35、50、70 平方毫米。导线的截面越大，使用的避雷线截面也越大。避雷线也会因风吹而振动，常易发生振动的地方通常装有防振锤。近年来，国外超高压线路有采用良导线架空地线的趋势，主要采用铅包钢线，它具有强度高、不生锈、又有适当的导电率的优点。一般用绝缘子使之与杆塔相互绝缘，利用间隙引导雷电流入地，这样，可利用架空地线作为载波通道并减少电能感应损耗。

2.4 避雷器设置的分析

对于一般高雷区通常采用局部关键点设置避雷装置进行接触网防雷。在有雷击发生时只要避雷器的冲击放电电压小于接触网绝缘子的冲击放电电压就会动作以避免变电所馈线断路器跳闸。同时，由于避雷器动作后吸收了雷电能量，绝缘子、支柱的等值阻抗上受到的冲击电压仅为避雷器的残压，提高了接触网的耐雷电冲击水平。接触网用避雷器应体积小、重量轻、结构简单、安装方便其保护水平应与接触网的绝缘水平配合良好，特别是带间隙避雷器的 50% 冲击放电电压与接触网绝缘子的放电特性一致，且正、负极性的分散性要小其保护距离应尽可能大，其密封性、防爆性、耐污性、可靠性要求较高，不同于一般设置在变电所内的避雷器。目前接触网常用的避雷器为带脱离器的氧化锌避雷器，系统标称电压的有效值为 27.5 kV，额定电压有效值为 42 kV，持续运行电压有效值为 34 kV，陡波冲击电流残压为 138 kV，雷电冲击电流残压为 120 kV，操作冲击电流残压为 98 kV。虽然设置避雷器对提高接触网的防雷击水平有一定作用，但必须认识到接触网安装避雷器的不足之处和其在整个牵引供电系统防雷保护作用的局限性。接触网上安装的避雷器保护范围有限，只能防止其保护范围内的接触网绝缘闪络、机车车顶保护电器动作，接触网用氧化锌避雷器大都采用带串联间隙的结构，其复合绝缘子长度短。污秽条件下的工频电压耐受能力低可能会增加污闪事故率，如大密集安装避雷器则每年的预防试验和维修工作量极大，维修费用也将大大增加牵引变电所馈线侧设有避雷装置且设有自动重合闸装置，即使雷击造成馈线断路器跳闸，1~2s 后自动重合闸可恢复供电。综上所述，接触网上安装避雷器的保护距离和发挥的作用有限，只能作为牵引供电系统防雷技术措施的一种补充。防雷与线路所在地形、气象条件密切相关，不同的地域差异较大，同一地域中线路经过的不同地形也有一定差别，因此应在防雷设计时充分考虑这些因素，

同时也应清楚认识到，由于雷击发生的时间和地点以及雷击强度的随机性，对雷击的防范难度很大，要达到阻止和完全避免雷击事故的发生是不可能的，只能将雷电灾害降低到最低限度，大大减小被保护的接触网和牵引变电设备遭受雷击损害的风险。在接触网上安装避雷器时，应根据线路及其具体情况，充分分析安装避雷器的利弊，综合考虑，适量安装。

2.4.1 避雷器自身过电压防护问题

避雷器是过电压保护电器，其自身仍存在过电压防护问题。对于能量有限的过电压如雷电过电压和操作过电压，避雷器泄流能起限压保护作用。对能量是无限（有补充能源）的过电压，如暂态过电压（工频过电压和谐振过电压的总称），其频率或为工频或为工频的整数倍或分数倍，与工频电源频率总有合拍的时候，如因某些原因而激发暂态过电压，工频电源能自动补充过电压能量，即使避雷器泄流过电压幅值不衰减或只弱衰减，暂态过电压如果进入避雷器保护动作区，势必长时反复动作直至热崩溃，避雷器损坏爆炸，因此暂态过电压对避雷器有致命危害。如果已将全部暂态过电压限定在保护死区内不受其危害的避雷器，称之为暂态过电压承受能力强，反之称暂态过电压承受能力差。对暂态过电压危害有效防护办法是加结构性能稳定的串联间隙将全部暂态过电压限定在保护死区内，使避雷器免受其危害。串联间隙氧化锌避雷器有此独具优点。6.2 避雷器自身对电力系统不安全影响保护间隙和管型避雷器在间隙击穿后，保护回路再没有有限流元件，保护动作都要造成接地故障或相间短路故障，保护作用增多电力系统故障率，影响电力系统的正常、安全运行。应用氧化锌避雷器，从根本上避免保护作用产生接地故障或相间短路故障，且不用自动重合闸装置就能减少线路雷害停电事故。

2.4.2 避雷器自身对电力系统不安全影响

保护间隙和管型避雷器在间隙击穿后，保护回路再没有有限流元件，保护动作都要造成接地故障或相间短路故障，保护作用增多电力系统故障率，影响电力系统的正常、安全运行。应用氧化锌避雷器，从根本上避免保护作用产生接地故障或相间短路故障，且不用自动重合闸装置就能减少线路雷害停电事故。

2.4.3 避雷器其连续雷电冲击保护能力

有时高压电力装置可能遭受连续雷电冲击，连续雷电冲击是指两次雷电入侵波间隔时间仅数百 μs 至数千 μs ，间隔时间极短。碳化硅避雷器保护动作既泄放雷电流也泄放工频续流，切断续流时耗最大达 $10000\mu\text{s}$ ，一次保护循环时间要远大于 $10000\mu\text{s}$ 才能恢复到可进行再次动作能力，故碳化硅避雷器没有连续雷电冲

批注 [个人用户15]: 三级标题：字体字号：宋体加粗，小四号；
靠左对齐不要空格。

击保护能力。氧化锌避雷器保护动作只泄放雷电流，雷电流泄放（小于 100 μ s）完毕，立即恢复到可进行再次动作能力，故氧化锌避雷器具有连续雷电冲击保护能力，这对于多雷区或雷电活动特殊强烈地区的防雷保护尤为重要。综上所述，接触网上安装避雷器的保护距离和发挥的作用有限，只能作为牵引供电系统防雷技术措施的一种补充。防雷与线路所在地形、气象条件密切相关，不同的地域差异较大，同一地域中线路经过的不同地形也有一定差别，因此应在防雷设计时充分考虑这些因素；同时也应清楚认识到，由于雷击发生的时间和地点以及雷击强度的随机性，对雷击的防范难度很大，要达到阻止和完全避免雷击事故的发生是不可能的，只有将雷电灾害降低到最低限度，大大减小被保护的接触网和牵引变电设备遭受雷击损害的风险。在接触网上安装避雷器时，应根据线路及其具体情况，充分分析安装避雷器的利弊，综合考虑，适量安装。

3.轨道交通接触网防雷措施

3.1 直接雷击接触网

接触网遭受雷击的频度与线路所处地区的年平均雷电日数有关。一般来说年平均雷电日数增大则每平方公里大地 1 年的雷击次数也随之变大根据国际大电网会议 33 委员会推荐计算：接触网侧面限界为 3m，承力索距轨面平均高度为 7m，则单线接触网遭受雷击次数 $N=0.122 \times T_d \times 1.3$ ，复线接触网遭受雷击次数 $N=0.244 \times T_d \times 1.3$ ， T_d 为年平均雷电日数。雷击接触网主要产生过电压。当雷击接触网支柱时，雷电流沿支柱入地并在支柱上产生冲击过电压，该值与支柱的冲击接地电阻和雷电流幅值及支柱等值电感相关（为非线性的正比），同时雷电通道产生的电磁场迅速变化，在线路上产生与雷电流极性相反的感应电压，该值与接触网导线高度、雷电流平均值成正比。冲击过电压和感应过电压的叠加值随着接触网支柱的接地电阻升高而升高即引起闪络的雷电流幅值和绝缘子闪络概率随接触网支柱的接地电阻而增加。当雷击接触网支柱时，雷电流沿支柱入地在接触网支柱上产生的冲击电压为：

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3-1)$$

上式中： R —支柱冲击接地电阻，取 $R=10$ 欧；

L —支柱感应电感。

(1) 雷击接触网线材时接触网上产生过电压，如该值达到接触网支持绝缘子的冲击放电电压时形成绝缘子闪络，雷电流经支柱、接地线、钢轨等入地，过电压随之降低。雷电流的概率分布，雷电中有多个带电中心，且有 90% 的雷电为负极性，其余为正极性。一般情况下，一次雷击有多次放电，持续时间约为 0.1~0.2s。雷电流幅值及其累积概率分布 DL /T620-1997《流电气装置的过电压保护和绝缘配合》中规定：雷电流幅值的概率除下所述地区以外的我国一般地区雷电流幅值超过嘶概率可按式求得：

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (3-2)$$

上式中： P ——雷电流幅值概率； I ——雷电流幅值(kA)。

(2) 陕南以外的西北地区、内蒙古自治区的部分地区憾类地区的平均年雷暴日数一般在 20 d 及以下。

批注 [个人用户16]: 公式必须用公式编辑器输入，公式要按章节排序，序号要靠右对齐，然后将公式居中，后面各章节都要这样处理。

4.XX 市轨道交通 2 号线故障分析及防雷建议

4.1 事故概况

11 号线嘉定北站 20#支柱避雷器故障

7 月 14 日 8 时 20 分, 接触网维修班接到工务巡视人员电话通知, 某站上行线 20#支柱 (k110+064) 上的避雷器断裂, 工区人员到达现场后发现, 避雷器炸裂、引线搭接在 1#至 3#道岔渡线的承力索上, 炸裂的避雷器低于导线下方约 600mm, 影响电力机车通过 I、II 道渡线, 不影响电力机车通过 I 道、II 道正线。9 时 18 分至 9 时 40 分将避雷器连同引线一同拆除。

4.2 事故原因分析

4.2.1 事故造成影响

(1) 绝缘子损坏, 造成线路跳闸, 直接影响电气化铁道运营;

(2) 雷击造成接触网线坠落, 使轨道电路发生红光带;

(3) 产生跨步电压;

(4) 接触网设备遭受雷击导致变电所跳闸, 严重时会造成接触网设备的损坏, 从而使整个供电臂停电, 影响运输安全;

(5) 雷击产生的侵入波过电压通过接触网传入牵引变电所, 可能引起所内电气设备的损坏造成更大的事故。

(6) 雷击支柱时耐雷击水平

当承力索平均高度 $hm = 7\text{m}$, 平腕臂对地高度 $hm = 7.6\text{m}$, 支柱高度 $hz = 8\text{m}$, 支柱冲击接地电阻 $R = 10\Omega$, $Lt = 0.84 \times 7.56\mu\text{H}$ 时, $LI = 22.67\text{kA}$ 。

根据式(3-2) 可以算出雷电流超过 I 的概率 $P = 55.3\%$ 。

雷击承力索时耐雷击水平

$$I_2 = 350/100 = 3.5 \text{ kA} \quad (4-1)$$

建弧率 η

$$\eta = (4.5E^{0.75} - 14) \times 10^{-2} = 4.5 \times (25/0.5)^{0.75} - 14 = 0.71 \quad (4-2)$$

E —绝缘子串的平均运行电压 (有效值) 梯度, kV/m 。

$$N_T = N \times \eta (GP_1 + P_2) = 25 \times 0.71 \times (1/4 \times 0.553 + 3/4 \times 0.912) = 14.6 \text{ 次} \quad (4-3)$$

(7)雷击支柱时耐雷击水平

当承力索平均高度 $h_m=7m$ ，平腕臂对地高度 $h_m=7.6m$ ，支柱高度 $h_z=8.0m$ ，支柱冲击接地电阻 $R=10\Omega$ ， $L_t=0.84\times 7.56\mu H$ 时， $I_t=22.67 kA$ 。

根据式(3-2)可计算出雷电流超过 I 的概率 $P=55.3\%$ 。

(8) 雷击承力索时耐雷击水平

$$I_2=350/100=3.5 \text{ (kA)} \quad (4-4)$$

建弧率 η

$$\eta = (4.5E^{0.75-14}) \times 10^{-2} = [4.5 \times (25/0.5)^{0.75-14}] = 0.71$$

式中： E ——绝缘子串的平均运行电压（有效值）梯度，KV/m。

跳闸率：（以年平均雷暴日 60 天计算）

$$NT=N\times\eta \text{ (GP}_1\text{+P}_2\text{)} \quad (4-5)$$

式中：

通过以上计算可知，在平原地区每 100Km 的电气化铁道线路，每年由于承力索遭受雷击引起跳闸的次数约为 15 次，这给客运专线的安全运行带来了隐患。

4.2.2 事故分析

通过以上对事故的分析判断及计算结果得出下面结论：

(1)回流线安装高度过低，在设计中，一般回流线架设高度在上下腕臂底座之间、比承力索架设高度低且回流线接地每隔 1~2Km 一处接地电阻为 10Ω ，其只能起到架设耦合地线的防雷作用。

(2)当支柱或架空地线遭受雷击时，雷击过电压将首先击穿附加线间架与混凝土的保护层，经支柱向大地泄露。

4.3 防雷对策与措施

(1)全线架设架空地线。

架空地线采用柱顶方式安装，距平腕臂 2m，保护角采用 $200\sim 300$ ，安装示意图如图 2 示。架空地线间架与接地引线连接糠地线与支柱钢筋相连，通过支柱底部接地孔接地。保证雷击过电压及时通过接地引下线泄漏至大地中，从而有效防止直击雷。每条公里架设避雷线增加投资约 2 万元。虽然增加部分投资但是对于电气化铁道的安全有着至关重要的作用；

(2)增加接地数量和降低接地电阻。

(3)适当增设避雷器。

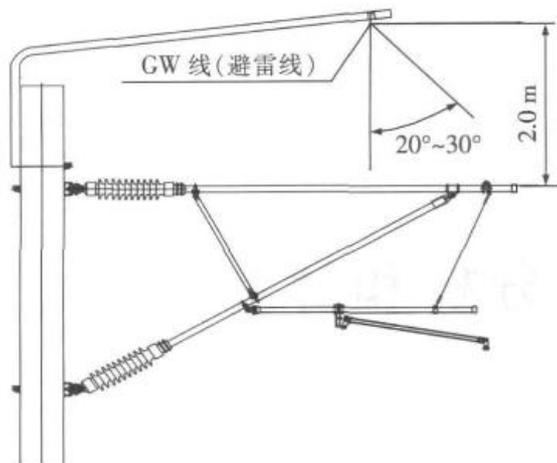


图 4-1 接触网避雷线示意图

对于一般高雷区通常采用局部关键点设置避雷装置进行接触网防雷。在有雷击发生时只要避雷器的冲击放电电压小于接触网绝缘子的冲击放电电压就会动作以避免变电所馈线断路器跳闸。同时，由于避雷器动作后吸收了雷电能量，绝缘子、支柱的等值阻抗上受到的冲击电压仅为避雷器的残压，提高了接触网的耐雷电冲击水平。

接触网用避雷器应体积小、重量轻、结构简单、安装方便其保护水平应与接触网的绝缘水平配合良好，特别是带间隙避雷器的 50%冲击放电电压与接触网绝缘子的放电特性一致，且正、负极性的分散性要小其保护距离应尽可能大，其密封性、防爆性、耐污性、可靠性要求较高，不同于一般设置在变电所内的避雷器。

目前接触网常用的避雷器为带脱离器的氧化锌避雷器，系统标称电压的有效值为 27.5 kV，额定电压有效值为 42 kV，持续运行电压有效值为 34 kV，陡波冲击电流残压为 138 kV，雷电冲击电流残压为 120 kV，操作冲击电流残压为 98 kV。

虽然设置避雷器对提高接触网的防雷击水平有一定作用，但必须认识到接触网安装避雷器的不足之处和其在整个牵引供电系统防雷保护作用的局限性。接触网上安装的避雷器保护范围有限，只能防止其保护范围内的接触网绝缘闪络、机车车顶保护电器动作，接触网用氧化锌避雷器大都采用带串联间隙的结构，其复合绝缘子长度短。污秽条件下的工频电压耐受能力低可能会增加污闪事故率，如大密集安装避雷器则每年的预防试验和维修工作量极大，维修费用也将大大增加牵引变电所馈线侧设有避雷装置且设有自动重合闸装置，即使雷击造成馈线断路器跳闸，1~2s 后自动重合闸可恢复供电。

综上所述，接触网上安装避雷器的保护距离和发挥的作用有限，只能作为牵

引供电系统防雷技术措施的一种补充。防雷与线路所在地形、气象条件密切相关，不同的地域差异较大，同一地域中线路经过的不同地形也有一定差别，因此应在防雷设计时充分考虑这些因素，同时也应清楚认识到，由于雷击发生的时间和地点以及雷击强度的随机性，对雷击的防范难度很大，要达到阻止和完全避免雷击事故的发生是不可能的，只能将雷电灾害降低到最低限度，大大减小被保护的接触网和牵引变电设备遭受雷击损害的风险。在接触网上安装避雷器时，应根据线路及其具体情况，充分分析安装避雷器的利弊，综合考虑，适量安装。

5. 结论

本文主要针对铁路接触网雷害分析及防雷措施进行论述。接触网上安装避雷器的保护距离和发挥的作用有限,只能作为牵引供电系统防雷技术措施的一种补充。防雷与线路所在地形、气象条件密切相关,不同的地域差异较大,同一地域中线路经过的不同地形也有一定差别,因此应在防雷设计时充分考虑这些因素,同时也应清楚认识到,由于雷击发生的时间和地点以及雷击强度的随机性,对雷击的防范难度很大,要达到阻止和完全避免雷击事故的发生是不可能的,只能将雷电灾害降低到最低限度,大大减小被保护的接触网和牵引变电设备遭受雷击损害的风险。在接触网上安装避雷器时,应根据线路及其具体情况,充分分析安装避雷器的利弊,综合考虑,适量安装。

综上所述,建议在高雷区、强雷区,接触网在下列地点应采用氧化锌避雷器防护:分相和站场端部的绝缘锚段关节,长度 2000m 及以上隧道的两端,长度大于 200m 的供电线或自耦变压器供电线连接到接触网上的接线处,对于峡谷等落雷概率大的工点、土壤电阻率高且降低难度大的区段应重视防雷方案设计,强雷区应设置避雷线在 27.5 kV 电缆的接头及电缆终端处设置氧化锌避雷器,切实作好避雷器和避雷线的接地,保障避雷设施正常运行。

批注 [个人用户18]: 要求:

结论是对整个研究工作进行归纳和综合而得出的总结,对所得结果与已有结果的比较和课题尚存在的问题,以及进一步开展研究的见解与建议。结论必须完整、准确、鲜明。

若写展望与见解建议,要分二级标题来写。

若不写展望,则不分二级标题。字数至少要一页纸,700~800 字左右。

参考文献

- [1] 段睿智.接触网与电子设施防雷技术[M].上海:国防科技大学出版社.2008.
- [2] 千万聚.高速电气化铁路接触网[M].成都西南交通大学出版社, 2002
- [3] 吴泉源.接触网防雷系统[M].湖南:国防科技大学出版社.1995.
- [4] 于增.接触网防雷技术研究[J].铁道工程学报, 2002
- [5] 何新贵.接触网防雷技术[M].北京:国防工业出版社.1999
- [6] 刘明光, 接触网的防雷简化分析[J]., 铁道学报, 1996,18 (3): 122-124
- [7] 国家标准.建筑物防雷设计规范 GB50057-94 (2000 年版) [S].北京:中国计划出版社, 2001, (2).
- [8] 中南建筑设计院主编.建筑物防雷设计安装 99D562 [M].北京:中国建筑标准设计研究所出版, 1999, (12).

批注 [个人用户19]: 参考文献要求:

一级标题: 宋体加粗三号

参考文献必须按所给格式撰写, 书籍应有书名、出版社、作者等, 杂志文章应有文章名、杂志名、期数、引用页码、作者等信息。参考文献至少要 8 篇以上, 但不要超过 15 篇。

参考文献字体字号为宋体五号。

致谢

本论文的完成，得益于上海电力大学老师传授的知识，使本人有了完成论文所要求的知识积累，更得益于导师 XXX 从选题的确定、论文资料的收集、论文框架的确定、开题报告准备及论文初稿与定稿中对字句的斟酌倾注的大量心血，在此对导师 XXX 表示感谢！

在这里，还要特别感谢在就读专升本三年学习期间给我诸多教诲和帮助的上海电力大学的各位老师，你们给予我的指导和教诲我将永远记在心里！

感谢和我一起共同学习了 3 年的同学，是你们让我们一起度过了充满快乐与温馨的三年学习时光，“君子和而不同”，愿我们以后的人生都可以充实、多彩与快乐。

批注 [个人用户20]: 致谢要求:

谢辞应以简短的文字对在课题研究和设计说明书（论文）撰写过程中曾直接给予帮助的人员（例如指导教师、答疑教师及其他人员）表示自己的谢意，这不仅是一种礼貌，也是对他人劳动的尊重，是治学者应有的思想作风。