

文章编号:1006-2106(2014)05-0090-05

## 津滨轻轨架空接触网雷害防治研究<sup>\*</sup>

田 雨<sup>\*\*</sup>

(中铁电气化勘测设计研究院有限公司, 天津 300250)

**摘要:**研究目的:城市轨道交通架空接触网雷电过电压危害日益突出,其供电系统架空接触网是无备用设备,雷击损坏设备时将直接影响运营安全。津滨轻轨工程是架空接触网遭受雷害最为严重的城市轨道交通工程之一,根据津滨线接触网的具体情况建立相应的数学模型,利用软件对接触网雷电闪络特性进行分析,改进津滨轻轨接触网既有防雷措施,提高其抗雷电灾害的能力,同时研制适用于城市轨道交通接触网的专用避雷器。

**研究结论:**(1)城市轨道交通供电系统采取雷电过电压防护措施有效降低了雷击过电压条件下架空绝缘子击穿闪络破损概率,降低了变电所雷击跳闸概率,达到了牵引供电系统可靠性要求,满足了运营安全性的要求;(2)国内工程中对绝缘子没有防护措施,避雷器不能防止反击跳闸,因此造成了严重的事故损失;(3)由于架空接触网绝缘子耐雷水平过低,因此并联安装带间隙金属氧化物避雷器是防止绝缘子雷击损坏的有效措施;(4)接触网钢支柱应接地,接触网系统应架设架空地线,并应尽可能靠近带电导线,但不需特别抬高;(5)变电所应采取相应措施进行雷电过电压防护;(6)本文研究成果可以应用在城市轨道交通领域。

**关键词:**城市轨道交通;架空接触网;雷害防治

**中图分类号:**TM863 **文献标识码:**A

## Research on the Lightning Protection of OCS in Tianjin – Binhai Light Rail

TIAN Yu

(China Railway Electrification Survey Design & Research Institute Co. Ltd, Tianjin 300250, China)

**Abstract: Research purposes:** Urban rail transit OCS lightning overvoltage damage is increasingly prominent. Because the power supply OCS has no standby equipment, lightning stroke will damage the equipment and thus directly influence train operation safety. Tianjin – Binhai light rail engineering is one of the most seriously lightning damaged urban transit engineering. According to the detailed status of Tianjin – Binhai line OCS, mathematical model is build. The software is applied to analyze OCS lightning flash over characteristics so as to improve OCS existing lightning protection measures and increase its ability to resist lightning disaster. Meanwhile, special lightning arrester suitable to urban transit OCS is researched and manufactured.

**Research conclusions:** (1) Urban rail transit power supply system which takes lightning overvoltage protection measures could reduce the breakage rate of OCS insulator after thorough flash – over in overvoltage, also reduce the tripping rate of substation in a lightning stroke, which could meet both the reliability requirement of tractive power supply system and safety requirement of operation. (2) Because the protection measures to the isolator are inadequate, lightning arrester could not prevent backward flashover tripping, severe accidents and damages occur. (3) OCS insulator has low lightning withstand level, it is a valid measure to install in parallel metal oxide arrester with gap to prevent insulator lightning stroke damage. (4) OCS steel mast shall be earthed and OCS shall be installed overhead earth wire and shall approach live conductor as possible as it can, but no need to lift. (5) The substation shall adopt corresponding measures to carry

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-01-15

<sup>\*\*</sup> 作者简介:田雨,1972年出生,女,高级工程师。

out overvoltage protection against lightning stroke. (6) The research result can be applied on urban mass transit rail aspect.

**Key words:** urban mass transit rail; overhead contact system; lightning protection

## 1 引言

目前我国城市轨道交通事业快速发展,北京、上海、广州、深圳、天津、南京、重庆等十余城市已建有地铁、轻轨、有轨电车等形式的城市轨道交通项目,另有长沙、杭州、宁波等城市正在积极开展筹建工作。在已经开通的项目中,有很多是建在地面及高架桥上。

地面及高架桥上架空接触网雷电过电压危害日益突出,城市轨道交通供电系统架空接触网是无备用设备,雷击损坏设备时将直接影响运营安全。根据运营情况统计资料,多个地方的城市轨道出现事故,影响列车的正常运行,造成严重的损失,给市民正常的出行带来不便,社会影响巨大。这一情况已经引起业内的广泛关注,运营部门急切需要对此进行深入研究,找出切实可行的解决方案。根据调查结果可以看出,目前国内针对该系统雷电过电压防护不甚理想,多个城市出现雷击事故,已经造成了严重的损失。

## 2 国内外现状

国内外针对城市轨道交通雷电过电压的防护研究较少,国内架空接触网的防雷设计主要依据的规范为《地铁设计规范》(GB 50157—2003),其中关于架空接触网雷电过电压防护只有如下规定:

14.3.22 架空接触网在隧道两端、为地面接触网供电的电源隔离开关处、空旷的地面区段与高架桥区段每隔 500 m 处应设置避雷器。

14.3.23 在地面区段、高架桥区段,架空接触网的架空地线应每隔 200 m 设置火花间隙;在满足条件时,架空地线也可兼作避雷线。

14.3.24 避雷器与火花间隙的工频接地电阻应不大于 10  $\Omega$ 。

条文说明中只有有如下解释:

14.3.23 架空地线兼作避雷线时,其保护范围应满足防雷要求。

2003 年以后的国内地铁工程设计基本按照《地铁设计规范》进行,但是效果不理想。其中火花间隙方案工程中应用十分不方便,已经很少采用。

国外采用架空接触网方式城市轨道交通项目主要集中在欧洲,雷电活动较弱,因此对该问题的研究较少。我国架空接触网技术是从国外引进,架空接触网的雷电过电压防护一直未开展系统的理论研究,相关

设计规范工程指导性不强,工程设计时主要参照国外经验并结合具体工程实际采取了一定的防护措施,防护设备及参数选取缺乏理论依据,结果是工程采取的防护手段多样,防护效果也较差。

本研究就是在这种背景下,针对城市轨道交通牵引供电系统开展系统研究,分析接触网雷电闪络特性,研究各类防护措施效果,研制相应的防护设备,并结合工程实际进行技术完善,最后形成适合该系统的雷电过电压防护方案,用于指导我国架空接触网的雷电过电压防护设计。

## 3 研究内容

本研究是结合天津至滨海快速轨道工程(简称津滨轻轨工程)进行的研究。津滨轻轨工程是架空接触网遭受雷害最为严重的城市轨道交通工程。津滨轻轨工程于 2001 年 5 月 18 日开工建设,2003 年 9 月 30 日建成通车。全长 45.4 km,其中高架 39.9 km,地面线 5.5 km,设中山门、一号桥、二号桥、新立镇、东丽开发区、小东庄、军粮城、钢管公司、胡家园、塘沽、泰达、市民广场、会展中心、东海路等 14 座车站。

表 1 是截至 2007 年底的事故统计结果,雷击主要发生在天津市市区与塘沽开发区之间的高架桥区间段。

表 1 截至 2007 年底津滨轻轨工程雷击事故统计表

年份 损坏情况	2004	2005	2006	2007
绝缘子损坏	10	22	31	18
直流开关跳闸闭锁 (重合闸不成功)	9	37	13	8
整流变压器雷击损坏	1	—	—	—

当雷暴云中的电荷达到一定的数量时,在云内不同部位之间或云与地面之间就形成了不断变化的电场。当电荷积聚到一定程度时,就会在云与云之间或云与地之间发生放电现象,即雷闪的发生来源于雷云内部的电荷累积。这意味着只要能够准确侦测到空间静电场的变化,就可以了解雷云电荷累积的情况。当雷暴云靠近或形成的时候,地面静电场按照一定的方式变化,在标准测量状态下(平原,平地,无尖端效应)静电场在天气晴好时的场强平均值约为 150 V/m。当雷暴云出现时,静电场的电场强度可增大到正或负 14 kV/m。单个的雷暴云层或与前方雷暴云组合时,当电场强度超过 3 kV/m 时,雷雨云发展已经成熟或

正在靠近并将会发生云闪或地闪。

根据这一工作原理,2008 年津滨轻轨公司在胡家园车辆段、新立镇停车场分别安装了两台法国苏伊士集团(Suez Group)出品的 AMEO 340 雷电侦测预警系统,该系统是一个风险探测系统,以地面静电场的物理测量理论和分析理论为基础。科学的分析所测量的数据,进而实现对半径 15 km 区域的雷暴预测。实时测量记录地面上的静电场值与变化率,并能连续启动三级雷电报警。

利用津滨轻轨沿线 2008 ~ 2010 年 AMEO 340 雷电侦测预警系统监测资料,通过对津滨轻轨线的雷电活动规律(闪电次数、雷电日、地闪密度和闪电落区分布)统计分析(如图 1 ~ 图 4 所示),进行了相应的易闪性分析,结果发现津滨轻轨监测区段是发生临界危险雷击概率、雷击大地年平均密度较大和雷电落区距离各站点及区间平均距离较小的重叠区域,该线易受雷击,是雷电防护重点区域。

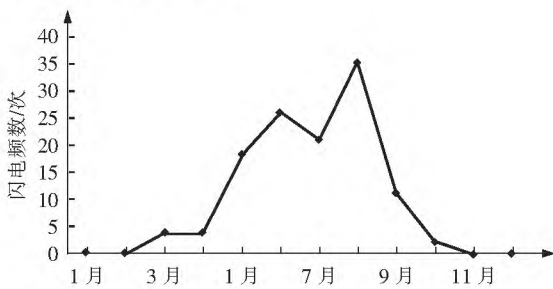


图 1 津滨轻轨工程沿线闪电日数

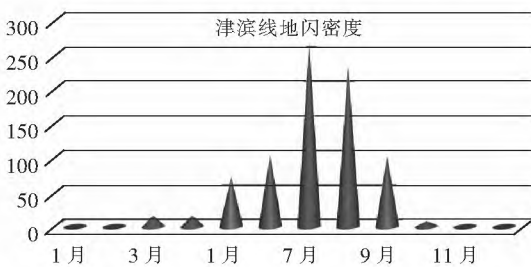


图 2 津滨轻轨工程沿线地闪密度(单位:次/km<sup>2</sup>)

目前分析系统雷电电磁暂态最为常用的软件有 CDEGS (Current distribution, Electromagnetic field, Grounding, Soil structure analysis) 和 EMTP (Electromagnetic Transient Program)。因此,在本研究中当不考虑接触网支柱接地、没有避雷线时接触网采用了 EMTP 软件进行分析;当考虑接触网支柱接地、设有避雷线时采用了 CDEGS 软件进行分析。

根据津滨线接触网的具体情况建立相应的数学模型,利用软件对接触网雷电闪络特性进行分析后,可以

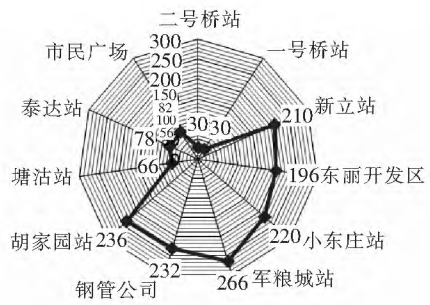


图 3 津滨轻轨工程沿线落雷密度(单位:次/km<sup>2</sup>)

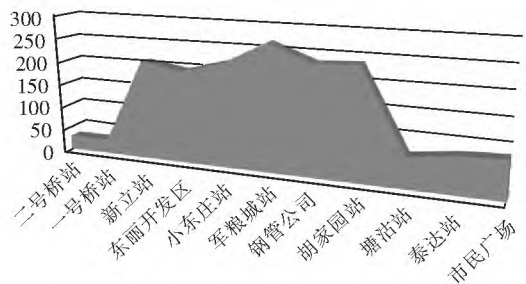


图 4 津滨轻轨工程沿线落雷密度趋势图(单位:次/km<sup>2</sup>)

得出如下结论:

(1) 由于接触网导线高度较高而绝缘子绝缘水平较低,导致接触网绝缘子雷击闪络十分严重。

津滨轻轨工程所处位置年雷电日数为 40 d,接触网未设避雷线(架空地线),基本采用高架桥模式,导线高度约 15 m,每 100 km 绝缘子闪络次数为 65.2 次/年。经过计算为 67.1 次/年,与工程实际基本吻合。津滨轻轨工程接触网绝缘子闪络情况如表 2 所示。

表 2 津滨轻轨工程接触网绝缘子闪络情况表

年雷电日数	接触网长度/km	接触网高度/m	统计年数	绝缘子闪络次数	100 km 接触网绝缘子闪络次数/年实际值
40	45	15	3	88	65.2

(2) 城市轨道交通供电系统的可靠性要求较高,一旦造成雷击故障将直接造成正常运营中断,影响市民的正常出行。因此接触网采取措施减少绝缘子闪络是十分必要的。

目前电力系统线路防雷常用的技术措施有:避雷线、线路型避雷器和绝缘子并联保护间隙。

通过采用 CDEGS 等软件的辅助计算,分析了避雷线(架空地线)在雷电过电压防护方面的作用,并结合工程实际,分析了避雷线(架空地线)与导线等高安装和避雷线(架空地线)在导线上方安装两种方案的防护效果。根据计算结果可以看出,避雷线可有效降低



绝缘子雷击闪络次数,但由于绝缘子绝缘水平过低,避雷线抬高在导线上方安装方案防护效果与等高安装相比效果相当;另外钢支柱的有效接地对雷电过电压防护作用明显。

带串联间隙金属氧化物避雷器是利用金属氧化物电阻的非线性伏安特性限制绝缘子两端的电位差,从而使绝缘子不发生闪络,串联间隙隔离了导线的工作电压,从而解决避雷器阀片长期承受线路工作电压而带来老化问题,基本上不需要定期试验和定期维护。

绝缘子保护间隙也是较为可靠的方式措施,在雷电过电压作用下,放电间隙闪络击穿,雷电能量通过保护间隙通道释放;雷电放电过后,接续的直流续流电弧在电磁力和热应力的作用下,弧根迅速转移到燃弧间隙上燃烧,直到系统保护跳闸熄灭电弧,这样就达到了保护绝缘子的目的。但由于接触网绝缘子绝缘水平过低,采用保护间隙将进一步降低绝缘水平,因此不适合在城市轨道交通供电系统接触网中应用。

4 研究成果

借鉴电力行业研究成果并考虑城市轨道交通架空接触网的特点,并依据接触网加装避雷器后不应该影响到既有接触网的结构以及接触网绝缘子的放电性能的原则,通过多次设计方案优化,最终设计成型带外串联间隙金属氧化物避雷器(以下简称 MOA1),如图 5 所示。

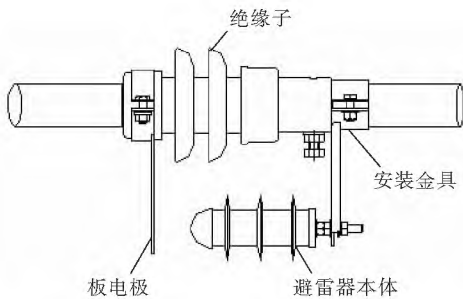


图 5 MOA1 结构示意图

MOA1 结构包括避雷器本体、板电极和安装金具三部分,其中避雷器本体顶端装有半球形金属电极,板电极与半球形电极之间构成外串联间隙,确保放电电压的稳定性。

避雷器的工作原理相同:在线路正常运行时,由于有空气间隙的隔离,避雷器本体承受很小的直流电压;在幅值足够高的感应雷或直击雷过电压作用下,空气间隙击穿,避雷器本体瞬间呈现低阻抗,释放雷电能量,限制住绝缘子两端电压水平,使绝缘子在雷电过电压作用下不会闪络击穿,雷电冲击过后,避雷器本体呈

现高阻抗,流过避雷器本体的直流续流电流被限制到很小值,空气间隙绝缘迅速得到恢复,续流电流被遮断,线路恢复到正常运行状态。

经过与津滨轻轨公司共同开展的方案比选,最终决定在军粮城 - 小东庄、小东庄 - 新立镇这两个雷害严重区段加装 MOA1 型避雷器,同时在装有避雷器的支柱增设接地极,接地极与支柱之间装有地电位均衡器。

地电位均衡器在绝缘状态下,其绝缘电阻达到 10 G $\Omega$ ;当承受电压大于 350 V 的情况下其呈现导通状态,自身最大电压降不大于 20 V。当存在雷电过电压时,地电位均衡器可导通使雷电流泄入大地;正常呈现高电阻状态,阻止杂散电流从大地泄漏。该方案很好的解决了防雷与杂散电流防护之间的矛盾。如图 6、表 3 所示。



图 6 地电位均衡器及标识符号

表 3 地电位均衡器主要技术参数表

绝缘电阻(DC100 V 时)	> 1 G $\Omega$
电容	10 pF
动作电压	350 V
导通压降	< 20 V
通流量	150 kA 8/20 $\mu$ s 60 kA 10/350 $\mu$ s

从经济性考虑,本次每隔 200 m 的支柱上安装一台避雷器。同时左线和右线交替安装。安装方案示意图如图 7 所示。地电位均衡器及避雷器实际安装情况如图 8、图 9 所示。

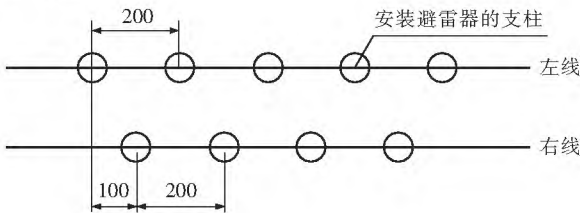


图 7 避雷器安装方案图(单位:m)

在 2009 年 5 月雨季来临前,完成军粮城至小东庄区间防护改造,共完成 86 处;完成小东庄至新立镇区



图 8 地电位均衡器安装后



图 9 避雷器安装后

间防护改造,共完成 90 处。

从 2009 年 5 月至 2010 年 9 月,经雷电改造后的军粮城至小东庄、小东庄至新立镇两个区间供电系统经历了两个雷雨季节的工程实际检验。自 2008 年陆续改造以来,津滨轻轨绝缘子损坏数量呈下降趋势。改造后平均每年绝缘子损坏数量比 2008 年以前下降 90.4%。如表 4 所示。

表 4 改造区段绝缘子损坏数量统计表

年度	2006	2007	2008 年	2009 年	2010 年
数量	27	31	38	4	2

当绝缘子发生闪络时,造成供电接触网接地短路,从而引起断路器保护跳闸并发生闭锁,造成接触网失电。以下为 2006 年至 2010 年改造区段跳闸情况统计表。改造后雷击引起的供电系统跳闸动作减少 91.7%。如表 5 所示。

表 5 改造区段跳闸数量统计表

年度	2006	2007	2008 年	2009 年	2010 年
数量	21	24	27	3	1

在津滨轻轨工程雷害最为严重的区段每隔 200 m 加装了带串联间隙金属氧化物避雷器,通过 2009 年、2010 年的观测结果,绝缘子闪络次数明显下降,且装设避雷器的绝缘子无一损坏,说明避雷器对绝缘子的有很好的效果。

## 5 结论

经研究得出如下结论:

(1)城市轨道交通供电系统采取雷电过电压防护措施有效降低了雷击过电压条件下架空绝缘子击穿闪络破损概率,降低了变电所雷击跳闸概率,达到了牵引供电系统可靠性要求,满足了运营安全性的要求。

(2)国内工程中对绝缘子没有防护措施,避雷器不能防止反击跳闸,因此造成了严重的事故损失。

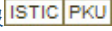
(3)由于架空接触网绝缘子耐雷水平过低,因此并联安装带间隙金属氧化物避雷器是防止绝缘子雷击损坏的有效措施。

(4)接触网钢支柱应接地,系统应架设架空地线,并应尽可能靠近带电导线,但不需特别抬高。

(5)变电所应采取相应措施进行雷电过电压防护。

## 参考文献:

- [1] GB 50157—2013, 地铁设计规范[S].  
GB 50157—2003, Code for Design of Metro[S].
- [2] GB 50057—2010, 建筑物防雷设计规范[S].  
GB 50057—2000, Code for Design Protection of Structures Against Lightning[S].
- [3] DL/T 620—1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].  
DL/T 620—1997, Overvoltage Protection and Insulation Coordination for AC Electrical Installations[S].
- [4] GB/T 10411—2005, 城市轨道交通直流牵引供电系统[S].  
GB/T 10411—2005, DC Traction Power Supply System for Urban Rail Transit[S].
- [5] GB 50490—2009, 城市轨道交通技术规范[S].  
GB 50490—2009, Technical Code of Urban Rail Transit[S].

作者: [田雨](#), [TIAN Yu](#)  
作者单位: [中铁电气化勘测设计研究院有限公司, 天津, 300250](#)  
刊名: [铁道工程学报](#)   
英文刊名: [Journal of Railway Engineering Society](#)  
年, 卷(期): 2014(5)

## 参考文献(5条)

1. [地铁设计规范](#)
2. [建筑物防雷设计规范](#)
3. [交流电气装置的过电压保护和绝缘配合](#)
4. [城市轨道交通直流牵引供电系统](#)
5. [城市轨道交通技术规范](#)

引用本文格式: [田雨](#), [TIAN Yu](#) [津滨轻轨架空接触网雷害防治研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2014(5)