基于现有设备的地铁接触网防冰方案研究

童岩峰[1]，徐利剑[2]，许小军[2]，刘　立[3]

（1. 南京铁道职业技术学院，江苏 南京 210031；
2. 南京地铁运营有限责任公司供电分公司，江苏 南京 210031；
3. 中国铁路上海局集团有限公司南京供电段，江苏 南京 210031）

摘要：探讨了一种基于地铁现有牵引供电系统设备的接触网直流防冰方案，建立了防冰回路的简化结构并进行了仿真计算，分析了该方案实际应用的可行性。

关键词：牵引供电系统；接触网；直流；防冰

Research on anti-icing scheme of Metro catenary based on existing equipment

TONG Yanfeng[1], XU Lijian[2], XU Xiaojun[2], LIU Li[3]

（1. Nanjing Institute of Railway Technology, Nanjing 210031, China;
2. Power Supply Branch of Nanjing Metro Operation Co., Ltd., Nanjing 210031, China;
3. Nanjing Power Supply Section of China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., Nanjing 210031, China)

Abstract: This paper discusses A DC anti-icing scheme for OCS based on the existing traction power supply system of metro, establishes the simplified structure of anti icing circuit, carries out simulation calculation, and analyzes the feasibility of practical application of the scheme.

Key words: traction power supply system; overhead contact system; direct; anti-icing

0　引言

接触网一旦覆冰，将影响受电弓和接触网间的相互作用，引起取流不畅、电弧烧伤等问题，严重时会导致中断行车，对地铁牵引供电系统的安全运行有直接影响。因此接触网覆冰时须采取相应的除冰措施，或者是要有防止接触线覆冰的措施。目前，接触网除冰可分为大电流热力融冰、机械除冰和自然被动防冰等几种方式。大电流热力融冰在地铁主要是采用开行压道车利用负荷电流防冰、安装额外的融冰装置或是利用能馈系统融冰；机械除冰国内主要采用安装刮冰受电弓、人工打冰等形式；自然被动防冰主要是在导线表面涂抹憎水性的防覆冰涂料。

开行压道车防冰会增加人员工作和车辆损耗，工人除冰费时费力，涂抹防冰涂料则有很大的局限性。本文将探讨一种基于地铁供电系统现状、不增加额外设备和操作方便的接触网防冰方案。

1　防冰电流的计算

解决导线覆冰的最好方法是防冰，就是让导线持续流通较大电流，导线保持焦耳发热，从而保证不形成覆冰。考虑电流传输产生的焦耳热主要有这些方面的损失：对流热损失Q_1、蒸发产生

地铁接触网触冰方案研究（YZ19013）

的热损失Q_2、水滴从冰点温度升高到稳态温度所吸收的热Q_3和导线辐射热损失Q_4。

$$Q_1=Ah(t_s-t_a) \tag{1}$$

式中，A为单位长度导线的表面积；h为导线表面对流换热系数；t_s为导线表面温度；t_a为环境温度。

$$Q_2=\frac{0.622AL_v h\left[e(t_s)-e(t_a)\right]}{C_a P_a} \tag{2}$$

式中，L_v为蒸发潜热，取2 260 kJ/kg；P_a为标准大气压；C_a为空气比热，取1 005 J/（kg·K）；$e(t)$为温度t时的饱和蒸汽压。

$$Q_3=2\alpha_1\alpha_2 rv\omega C_w(t_F-t_a) \tag{3}$$

式中，α_1、α_2分别为水滴和导线的碰撞率和捕捉率；r为导线半径；v为风速；ω为空气含水量；C_w为水滴比热，取4.216 5 kJ/（kg·K）；t_F为水的凝固温度。

$$Q_4=A\varepsilon\delta T^3{}_a(t_s-t_a) \tag{4}$$

式中，ε为黑体辐射系数，取0.95；δ为玻尔兹曼常数，5.67×10^{-8} W/（$m^2\cdot K^4$）。

如果恰好达到平衡，即

$$I^2R=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4 \tag{5}$$

式中，R为导线单位长度的电阻值。

把保证导线不覆冰的最小电流称为临界防冰电流，其表达式为

$$I=\sqrt{\frac{Q_1+Q_2+Q_3+Q_4}{R}} \tag{6}$$

当考虑风速5 m/s、环境温度268 K和空气含水量5 g/m^3时，接触线迎风面水滴碰撞率和捕捉率分别取为0.9和0.5，对流换热系数取10 J/（$m^2\cdot K$），导线表面与环境温差10℃。将接触线CT-120的单位长度表面积40.5×10^{-3} m^2、半径6.45×10^{-3} m和单位长度电阻值0.15×10^{-3} Ω/m代入式（6）中计算可知，防冰电流为

$$I=\sqrt{\frac{4.05+2.8+2.08+0.42}{0.15\times10^{-3}}}=250\ \text{A} \tag{7}$$

通过上面的分析可知，防冰电流大小与风速、环境温度和空气含水量等多种因素有关，关于铁路接触网CTMH120接触线临界防冰电流随风速和环境温度变化曲线如图1所示。

从图1中可以看出，在环境温度－5 ℃、风速5 m/s时，防冰电流在260 A左右，这与计算结果是相符的。

另外，从目前现场应用的开行压道车防冰的情况看，南京地铁开行一列压道车就已经达到了防冰的效果。通过现场观察，空车运行的正常电流在1 600 A左右，地铁柔性接触网在正线区段往往采用“双承力索+双接触线+双辅助馈线”的方式，有6根导线并联载流，那么每根导线上的电流约为267 A，这也印证了计算结果没有问题。

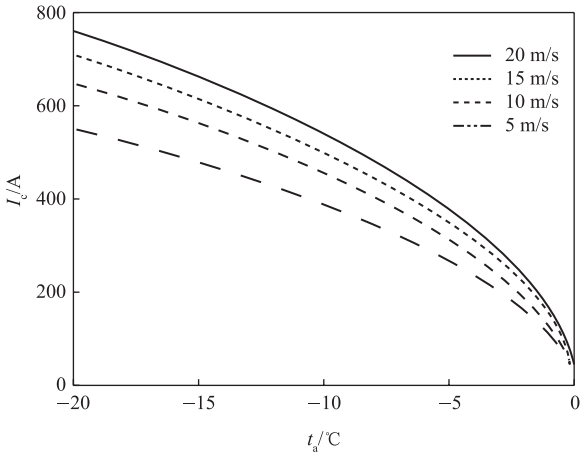

图 1　防冰电流变化曲线

Fig. 1 Variation curve of anti-icing current

2　防冰方案分析

地铁在运营过程中一般不会出现接触网覆冰的现象，但运营结束后，车辆都回库了，夜间几个小时在恶劣天气下最易结冰。目前的除冰措施主要有人工除冰结合热力融冰的方式。在严寒天气时，接触网不停电，接触网工要经常观察出库线的接触网是否覆冰，如果覆冰要用异物处理杆敲击除冰，若覆冰严重还要用异物杆在接触线表面涂抹防覆冰涂料；乘务部门开行空车压道，利用车辆的负荷电流保证接触线不覆冰。

通过前面的计算分析，在南京地区冬季普遍的外部条件下，截面积120 mm^2的接触线防冰电流是250 A，那么只要接触线中持续流通的电流大于250 A，就可达到导线防冰的目的。

图2是地铁直流供电示意图，一条地铁线路有若干座牵引变电所，每座牵引变电所有两套整

流机组并联供电，将35 kV交流电变换成1 500 V直流电，直流正母线通过馈线断路器和上网隔离开关为接触网供电，钢轨通过回流电缆和负极隔离开关接到负母线上，在上网点接触网的两个供电臂间设置有电分段来进行电气上的隔断，在电分段上又并联有越区隔离开关（正常供电时打开）来保证故障情况下的供电。

接触网线路覆冰一般出现在地上的柔性接触网，而地下隧道由于温度较高，刚性接触网一般不会出现结冰现象，一条地铁线路哪些区段可能出现接触网覆冰是比较明确的。

在地铁运营结束之后，针对那些容易覆冰的接触网区段，选择其首端的牵引变电所作为电源点，如图3中的牵引所A，整流机组正常供电；末端牵引变电所作为左右线接触网的连接点，如图3中的牵引所C，整流机组退出运行；中间各牵引变

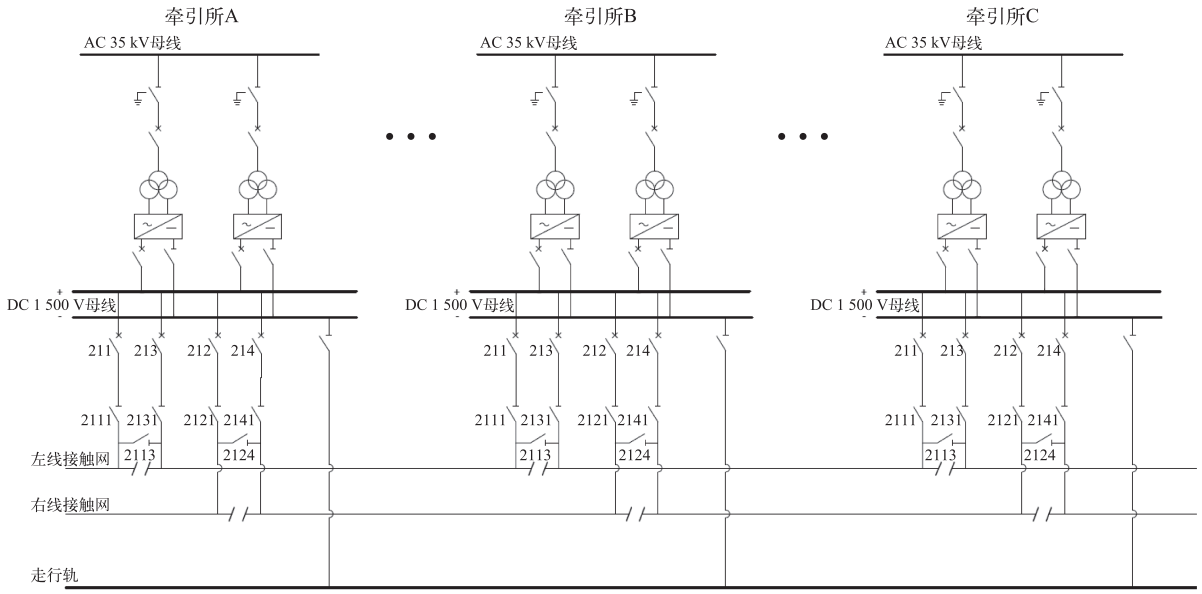

图 2　地铁直流系统供电示意图

Fig. 2 Power supply diagram of Metro DC system

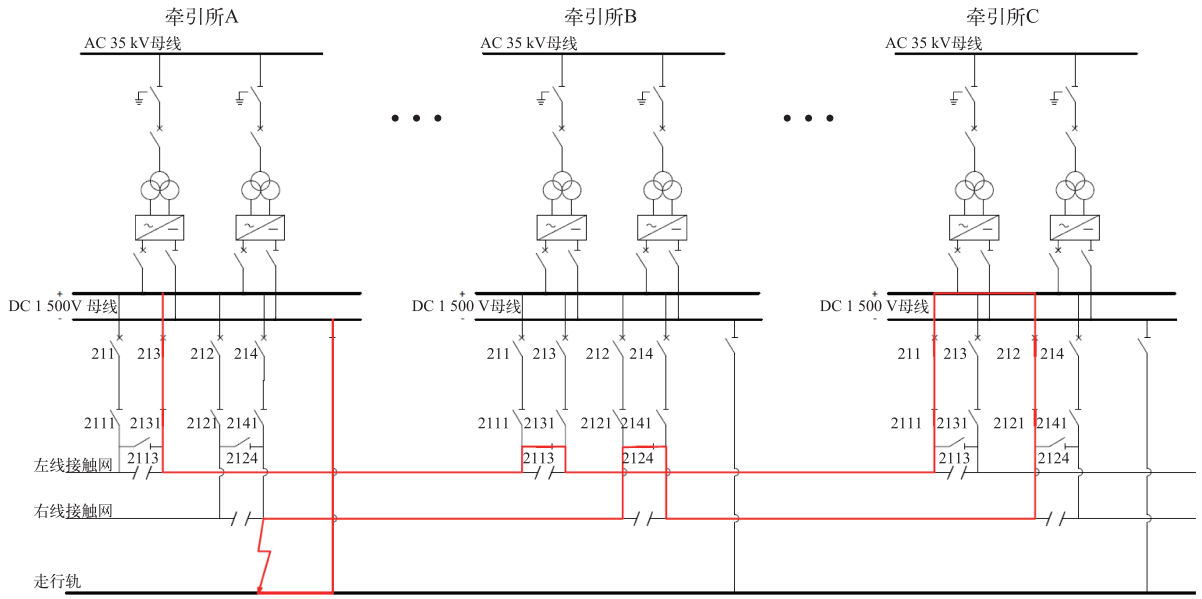

图 3　防冰方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of anti icing scheme

电所全部退出，如图3中的牵引所B所代表的各所，不仅整流机组退出运行，直流馈线开关也断开。

图3中，牵引所C处211、2111、212和2121开关处于闭合状态，其他断开，通过直流母线将左右线接触网短接；牵引所B处越区隔离开关2113和2124闭合，将各段接触网连接起来；牵引所A处213和2131开关以及负极柜隔离开关闭合，其他开关断开，并通过短接线将右线接触网与钢轨进行连接。这时左线接触网和直流正母线连接，右线接触网和直流负母线连接，构成一个直流回路。

这个回路的电源是直流1 500 V，只要算出接触网的直流电阻值，就可得到回路电流有多大，只要单根接触线上的电流超过250 A，就可起到防冰效果。

3　仿真计算

以南京地铁2号线建立仿真模型，其牵引所分布示意图如图4所示。

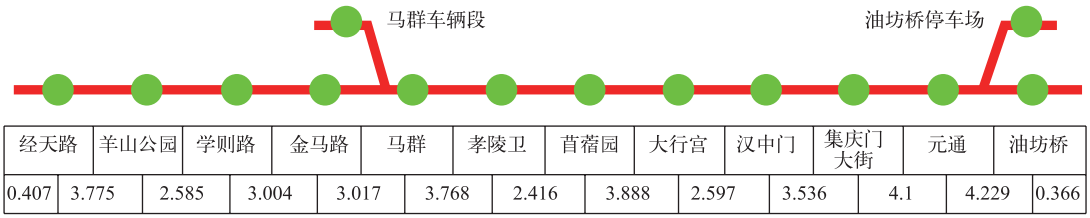

图 4　南京地铁 2 号线牵引所分布

Fig. 4 Distribution of traction stations of Nanjing Metro Line 2

南京地铁2号线全长37.9 km，地面和高架线路15.8 km，地下线路22.1km，图4中标出的站点是建有牵引变电所的站点。

南京地铁2号线的柔性接触网主要集中在经天路至钟灵街区段，柔性接触网采用“双承力索+双接触线+双辅助馈线”的方式，有6根导线并联载流，采用的都是120 mm^{2}截面积的导线。

假设各导线的电阻率相同，按导线电阻率0.017 68 Ω·mm^2/m计算，柔性接触网的单位直流电阻为0.025 Ω/km。刚性接触网的汇流排电阻率0.032 9Ω·mm^2/m，标称界面2 213 mm^2，计算出刚性接触网的单位直流电阻为0.015Ω/km。

由于钟灵街站没有牵引所，就以其下一个牵引所孝陵卫作为电源点，以末端的经天路牵引所作为左右线接触网的连接点。

那么在经天路到孝陵卫的这个区段，地上长度约15.3 km、地下约1 km。上下行线路连接后，接触网电阻为R=15.3 × 2 × 0.025+1 × 2 × 0.015=0.795 Ω，线路电流为I=1 500 ÷ 0.795=1 887 A，单根接触线上的电流I_c=1 887 ÷ 6=314 A。

如果左右线接触网的连接点选择在其他牵引所，则计算结果如下表所示。

表　接触网防冰仿真计算结果

Tab. Simulation results of catenary anti-icing

序号	电源点	接触网连接点	接触网电阻/Ω	接触网电流/A	单线电流/A
1	孝陵卫	经天路	0.795	1 887	314
2	苜蓿园	经天路	0.868	1 729	288
3	大行宫	经天路	0.984	1 524	254
4	汉中门	经天路	1.06	1 415	236

可以看出，线路过长，导线上的电流就达不到防冰电流，也起不到防冰效果。将孝陵卫、苜蓿园或大行宫牵引所作为防冰的电源点都是合适的。

4　可行性分析

该方案能否可行，除了电流大小外，还有一些其他方面需要考量，比如操作是否方便、经济是否合理及安全是否可靠等。

1）供电可靠性分析。直流馈线保护中的热过负荷保护整定值一般是2 000 A，为了防止保护动作导致开关跳闸，防冰运行时电源点的馈线电流宜控制在2 000 A以内，同时为了达到

单线250 A的防冰电流，又需要馈线电流不小于1 500 A，因此电流应处在1 500 A~2 000 A的范围之内。这个要求通过选择合适的电源点和连接点是容易达到的。

2）操作复杂程度分析。变电所开关的投退均通过电调完成，倒闸步骤增加，一定程度上加大了电调的工作量。该方案中有一路接触网连接负母线，需要现场作业，有两种方法比较容易实现。一种是在接触网挂接封线与钢轨连接，由于环境温度较低，70 mm^2的软铜线能够安全载流300 A，那就至少需要安装6组封线；另一种方式是在馈线柜出线侧与负极柜之间安装临时电缆。总体来说不需要特殊的作业手段，仍属于日常工作范围。

3）防冰范围分析。该方案有一个明显的缺陷，就是车辆段的库线是一个盲区，范围如图5所示。即便是把车辆段的牵引所作为电源点或连接点，由于库线较多，电流被分流，导线上的电流将达不到防冰电流。因此，这一范围内的接触网仍需要人工除冰。

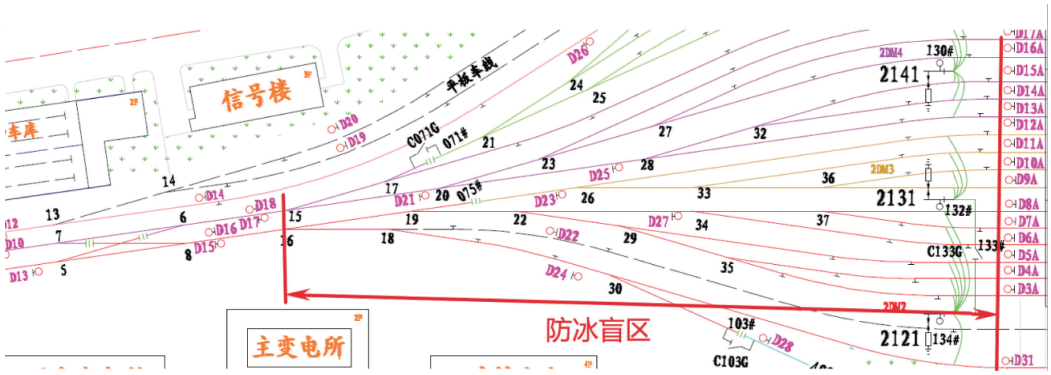

图 5　车辆段中的防冰盲区

Fig. 5 Anti-ice blind area in Depot

4）防冰成本分析。如果按停运后夜间防冰运行3 h、接触网电流1 800 A计算，将消耗8 100 kW·h电，电费5 103.81元。电费成本与开行压道车相当，但在减少车辆损耗、供电设备损耗方面更具优势。

5　结束语

接触网覆冰是地铁接触网较常见的自然灾害，有效的防冰和融冰手段可以更好地保证地铁供电系统的安全运行。本文阐述了一种地铁接触网防冰方案，该方案基于现有供电系统，不增加额外设备，通过常规手段改变系统运行方式，达到直流电流热力防冰的效果，并通过仿真计算和分析验证了该方案的可行性。**EA**

参考文献

[1] 郭蕾．接触网覆冰机理和在线防冰方法的研究[D]．成都：西南交通大学，2013．

[2] 郭华，范红疆，董晓冬，等．客专铁路接触网交流融冰方案研究及工程验证[J]．电气化铁道，2015(3)：27-30．

[3] 刘健．基于能量循环的城市轨道交通接触网融冰技术研究[D]．北京：北京交通大学，2018．

[4] 马水生．电气化铁路接触网防融冰方案研究[D]．成都：西南交通大学，2015．

[5] 常跃飞．直流融冰及试验过程中的问题分析[J]．贵州电力技术，2017(6)：44-46．

作者简介

董岩峰

董岩峰（1980—），男，讲师，从事轨道交通供电方面的教学工作。

（收稿日期：2020-10-29）