

磁浮接触轨电脉冲除冰的试验研究

欧阳虹¹, 蒋兴良², 涂振华¹, 陈宇², 杨帆¹, 胡琴²

(1. 湖南磁浮交通发展股份有限公司, 长沙 410041;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 在冬季, 长沙磁浮接触轨的覆冰会导致列车停运, 目前国内外缺乏磁浮接触轨除冰的技术和经验。通过分析电脉冲除冰技术, 根据磁浮接触轨的特点, 提出了 2 种磁浮接触轨电脉冲除冰方案。同时研制了电脉冲除冰的电源装置, 设计了磁浮接触轨除冰用的平面脉冲线圈。冲击摆试验结果表明: 增大线圈尺寸、提高脉冲电压、减小线圈与目标物之间的间隙、提高目标物的电导率、增大涡流, 能够有效增大脉冲力, 提高除冰效率。据此优化了除冰装置的技术参数, 进行人工气候室的模拟试验, 从而证明电脉冲技术可以有效去除接触轨目标区域 15 mm 的雨淞覆冰。

关键词: 磁浮; 覆冰; 接触轨; 电脉冲; 除冰

Experimental Study on Electro-impulse De-icing of Maglev Contact Rail

OUYANG Hong¹, JIANG Xingliang², TU Zhenhua¹, CHEN Yu², YANG Fan¹, HU Qin²

(1. Hunan Maglev Transportation Development Co., Ltd., Changsha 410041, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Icing on the contact rail of magnetic levitation line in Changsha city often occurs in winter, causing the line to be out of service. So far, the technical measures and experiences for de-icing of the contact rail of magnetic levitation line are lacking at home and abroad. By analyzing electro-impulse de-icing techniques and according to the characteristics of the maglev contact rail, we put forward two electro-impulse de-icing schemes of the maglev contact rail. At the same time, we developed a power supply device for electro-impulse de-icing and designed a plane impulse coil for de-icing of maglev contact rail. The impact pendulum test shows that the measures, such as increasing the size of the coil, increasing the impulse voltage, reducing the gap between the coil and the target, improving the electrical conductivity of the target, and increasing the eddy current, can increase the impulse force effectively and improve the de-icing efficiency. Moreover, the technical parameters of the deicing device were optimized. Then the simulation test of the artificial climate chamber was carried out. The results show that the electro-impulse technology can remove 15 mm glaze ice in the target area of the contact rail effectively.

Key words: magnetic suspension; icing; contact rail; electro-impulse; de-icing

0 引言

近年来, 随着全球气候变暖, 冬季降雪频率降低、冻雨天气频繁, 暴露于野外环境的各种结构物面临大气覆冰的严重危害^[1-4]。电网覆冰、飞机覆冰、风力发电机覆冰造成的各种灾害和故障时有发生, 大气结构物覆冰的影响面越来越广, 磁浮接触轨也面临大气覆冰的严重危害^[5]。在冰冻雨雪天气下,

接触轨的覆冰将影响磁浮列车运行时的受流质量, 严重时甚至导致磁浮列车无法正常运行。

21 世纪初, 我国仅有采用德国技术的上海磁浮列车线路在营, 缺乏关于接触轨防除冰的技术积累。随着 2016 年国产长沙磁浮快线的开通, 以及 11 条磁浮线路列入规划或开工建设, 接触轨覆冰已成为影响磁浮列车安全运营的重要问题。

本文在分析机械除冰、电热防冰、憎水涂料防冰、电流融冰等数十种防冰除冰技术措施和方法的基础上, 发现电脉冲在磁浮接触轨除冰中具有应用前景。电脉冲除冰(electro-impulse de-icing, EIDI)时间很短, 通过对电路优化, 可保证每次储能、除冰

基金资助项目: 湖南省科技重大专项 (160 km/h 快速磁浮列车研制与示范) (2018GK1010)。
Project supported by Major Science and Technology Special Project of Hunan Province (Development and Demonstration of 160 km/h Fast Maglev Train) (2018GK1010).

时间在 1 s 内, 而融冰方式通常需数小时, 除冰速度较慢。电脉冲除冰能耗为 0.85 kJ/kg 和 2.3 kJ/m², 融冰能耗为 335 kJ/kg 和 904 kJ/m², 电脉冲除冰在能耗和效率方面相比融冰具有显著优势的^[6-7]。

EIDI 技术提出至今已有 70~80 年的历史, 但目前仍未在飞机除冰以外的其他领域成熟应用。第二次世界大战前, 居住在伦敦的德国人鲁道夫·戈德施密特(Rudolf Goldschmidt)首次提出 EIDI 概念^[8]。

20 世纪 50 年代, 电脉冲技术用于各种工业过程中的金属成形^[9-10], 直到 1965 年, 前苏联的 I. A. Levin 发现利用电脉冲对大气结构物除冰存在可行性。因此, 前苏联开始了飞机电脉冲除冰系统的研发。迄今为止, 前苏联和俄罗斯已研究开发了 4 代飞机电脉冲除冰系统, 目前主要安装在伊尔(Il-yushin, 简称 Il)系列飞机上^[11]。

受前苏联电脉冲除冰系统研发成果的影响, 法国、英国、美国也开始投入科研力量研究开发 EIDI 系统。20 世纪 70 年代末, 美国以威奇托州立大学(Wichita State University, WSU)为代表的研究团队历时 10 余年, 开发了 1 套应用于 EIDI 系统的电路参数设计程序, 并进行了多项包括发动机进气口与机翼等部位在内的除冰试验, 论证了电脉冲除冰系统对飞机飞行性能的影响^[12], 但没有俄罗斯的研究完善, 其研究在理论和应用上均不具有普遍性。

1982—1991 年, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)重启了电脉冲除冰技术研究计划, 对电脉冲除冰技术进行了深入的试验研究和系统试飞, 验证了电脉冲除冰技术的可行性^[13-15]。

20 世纪 90 年代, 在英、法、德、意等国共同努力下, 飞机电脉冲除冰技术取得了一系列实用性研究成果。但由于经费与技术等原因, EIDI 的研究与发展再次进入低迷。

我国对 EIDI 技术的研究起步较晚。1993 年南京航空航天大学裘燮纲研究了电脉冲装置的参数设计^[16]。但由于该技术研究的难度巨大以及缺少经费支持, 一直没有引起重视。直至 21 世纪初, 由于全球节能的需要与飞机除冰系统多样化, 我国才逐渐意识到 EIDI 在各个领域均具有较好的应用前景。

国内外的电气化铁路通常是通过接触网和“第三轨”2 种供电方式, 而磁悬浮列车则是通过“钢铝复合接触轨”进行供电。我国在运的磁悬浮列车目前数量不多, 故轨道交通中覆冰、除冰的研究主

要集中在接触网和运行轨道上; 此外, 由于轨道交通覆冰问题带来的停运较输电线路覆冰引发的停电问题影响小、危害小。故有关磁悬浮列车的接触轨覆冰、除冰的关注较小, 相关研究不多。

本文根据磁浮接触轨的结构特性, 针对磁浮接触轨的覆冰问题, 从电脉冲产生的原理和除冰的机理开始, 通过理论分析和试验摸索, 提出了磁浮接触轨电脉冲除冰方案, 研制了电脉冲线圈, 开发了可重复产生电脉冲的电源装置。本文研究对于电脉冲除冰在各个领域的应用研究具有重要参考价值。

1 电脉冲除冰原理

电脉冲除冰是一种机械脉冲式除冰, 原理如图 1、图 2 所示。图 1 中, 电源(BT)通过开关(K)向储能电容器(C)充电, 由可控硅(SCR)触发产生指令, 然后通过储能电容器向脉冲线圈(L)放电, 在脉冲线圈中产生一个高幅值窄脉冲磁场, 置于脉冲线圈磁场内的目标物(O, 在本文中 O 表示为接触轨)感生出涡流, 涡流在接触轨表面产生作用时间为微量级、大小为几十至数千牛顿的斥力^[17], 见图 3。斥力使接触轨表面在弹性变形范围内产生小振幅、高加速度的运动, 从而使接触轨表面覆冰被击碎松解, 继而被气流吹走脱落。除冰过程结束后, 若结冰现象继续发生, 可重复进行上述除冰过程。

EIDI 电路电流类似于 RLC 阻尼电路的响应。为防止电容器组反向放电, 需加设钳位二极管(D₀)

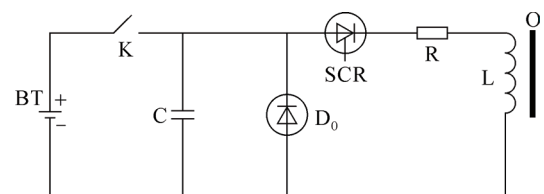


图 1 电脉冲除冰系统电气原理图

Fig.1 Electrical schematic diagram of EIDI system

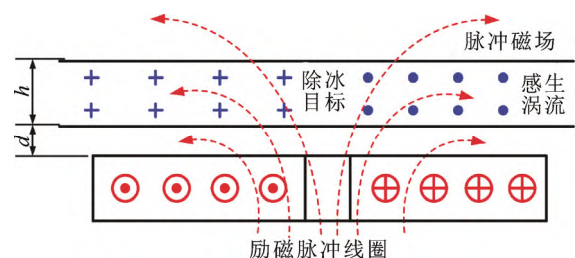


图 2 由电脉冲除冰系统产生的磁场和感生涡流

Fig.2 Magnetic field and eddy current generated by EIDI system

保护电容器组。

电脉冲除冰的关键是除冰装置与接触轨的配合与参数优化, 主要有脉冲除冰装置激励电源参数设计、脉冲线圈形式与尺寸确定及脉冲线圈与接触轨间的间隙选择、接触轨的材料性质与厚度及冰的性质与厚度等对电脉冲除冰系统脉冲电流、脉冲电磁场和冲击力脉冲幅值和脉冲宽度等的影响^[18-22]。

研究发现: 脉冲电流幅值越高、脉冲宽度越窄, 产生的脉冲力除冰效果越明显, 但对于接触轨, 脉冲电流将产生的电感制约了脉冲幅值和宽度的控制。因此, 接触轨电脉冲除冰系统的理论模型和脱冰准则的建立是接触轨电脉冲除冰的关键理论。

2 接触轨电脉冲除冰

2.1 接触轨除冰方案

如图 4 所示, 长沙磁浮快线使用 HP-C100 钢铝复合 C 形接触轨系统。该系统主要由钢铝复合接触轨、中间接头、膨胀接头、电连接、中心锚结、端部弯头、绝缘安装支架、过渡弯头、分段绝缘器等附件构成。“钢铝复合接触轨”是由不锈钢型钢带(型号为 06Cr19Ni10)与铝合金型材通过塑性加工方法复合而成的导电轨(如图 4 所示), C 型轨的截面为 100 mm², 钢带厚度为 4.5 mm, 标准轨制造长度为 11.7 m, C 型轨内阻为 0.014 62 Ω/km。

接触轨系统安装在线路两侧, 分为正负极, 一侧电压为直流 1 500 V(正极), 一侧电压为 0 V(负极), 用于给机车提供连续不断的电能, 列车受电靴与接触轨静态接触压力为(130±10) N。接触轨在冬季冻雨气候条件下运行过程中, 其覆冰情况如图 5 所示。接触轨覆冰将影响列车受电靴取流过程, 从而导致列车运行故障。

根据接触轨的结构特性, 同时考虑电脉冲除冰技术的特点, 针对接触轨电脉冲除冰, 本文提出了 2 种除冰方案。

方案 1: 集中式随车除冰方案, 即接触轨的电脉冲除冰装置采用集中一体式的结构设计, 装置整体安装于列车转向架等既有结构之上, 随车运行实现对受电轨的在线除冰。

集中式随车除冰方案如图 6 所示, 电容器组、脉冲线圈等组件安装在磁悬浮机车受电靴安装架, 并随列车同步运行, 电容器组通过与其电气连接的受电靴在线取能充电, 以实现脉冲线圈(如图 7 所示)的重复放电; 放电频率与列车行驶速度相配合,

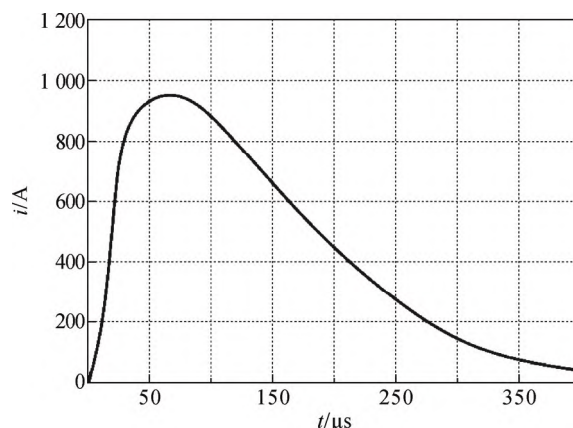


图 3 电脉冲除冰系统产生的电流波形

Fig.3 Current waveform generated by EIDI system

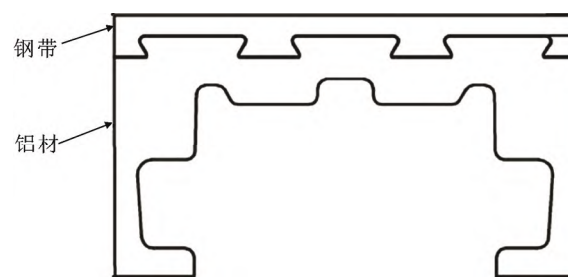


图 4 钢铝复合接触轨

Fig.4 Steel-aluminum composite contact rail



图 5 受流面的结冰情况

Fig.5 Icing on current receiving surface

使单次放电的除冰范围可连续覆盖整段覆冰的接触轨; 电容器组通过多个高能脉冲电容器的串并联组成, 串联可提高放电电压, 并联可提高放电电流, 需根据单次脉冲的除冰长度及列车运行速度调整电容器组的串并联构成方式以达到除冰范围、除冰频率与列车运行速度的优异配合。

方案 2: 预埋线圈式除冰方案, 即在 C 形接触轨的内侧预先安装脉冲线圈, 如图 8 所示。预埋线圈式激励除冰系统由分布安装于 C 型受电轨内侧的预埋线圈和随车移动的除冰装置共同构成。除冰装

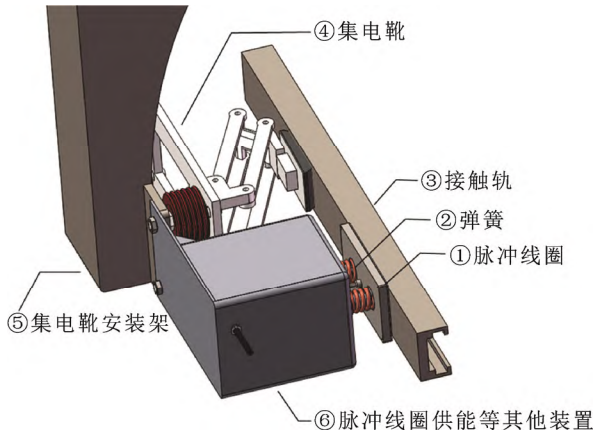


图6 集中式随车除冰方案示意图

Fig.6 Schematic diagram of embedded coil deicing scheme

置构成部件与方案1(图7)的整体结构与除冰原理相似, 仅将线圈基板与装置系统分离, 并采用安装有簧片的供电臂实现对预埋线圈的供电。

轨道电脉冲除冰装置采用脉冲发生线圈与装置分离的设计, 线圈以一定间隔分布安装于C型受电轨内侧。除冰激励装置随车运行, 当线圈与装置供电触点接触时, 对线圈放电实现除冰操作。

2.2 参数设计与优化

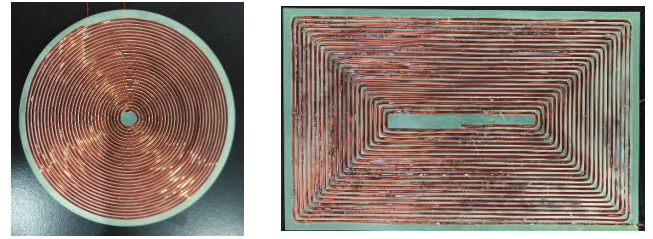
1) 测试用脉冲激励源

为优化除冰装置的参数并分析各个参数的影响, 本文专门设计制作了脉冲激励源。激励源有变压器、调压器、整流器、充放电电容以及相应的隔离保护装置。调压器输入电压为交流 220 V, 可调电压为交流 0~250 V。变压器输入电压 220 V, 变比为 220/2 000。交流电通过桥式整流器后直接对电容充电, 此外采用的阵列式电容可以调节电容值及其储存的能量。

2) 脉冲线圈的影响

在充电电压 1 000 V, 充电电容 600 μF , 线圈与目标物间隙 2.5 mm 的条件下, 固定线圈的内径尺寸, 调整线圈分布密度从而改变线圈的匝数, 并对电脉冲力进行测量, 见图 9。由图 9 可知: 脉冲线圈产生的力与线圈匝数呈线性关系, 匝数越多, 其实际的线圈外径(D)越大每 100 J 产生的脉冲力矩越大; 脉冲线圈匝数越多产生的电感越大, 相应地在接触轨上感生的涡流值也越大, 单位能耗产生的脉冲力增大; 脉冲线圈直径大感应涡流也大, 从而产生的脉冲力增大。

随着线圈匝数增多, 其电感增大, 脉冲线圈产生的峰值电流逐渐降低, 如图 10 所示。接触轨很厚



(a) 圆形单层线圈

(b) 方形单层线圈

图7 电脉冲除冰方案中圆形和方形线圈

Fig.7 Circular and square coils in EIDI schemes

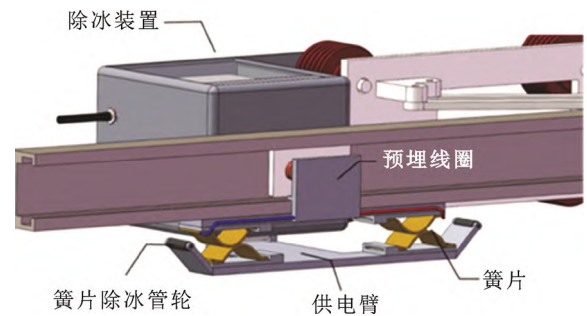


图8 预埋线圈式除冰方案示意图

Fig.8 Schematic diagram of embedded coil deicing scheme

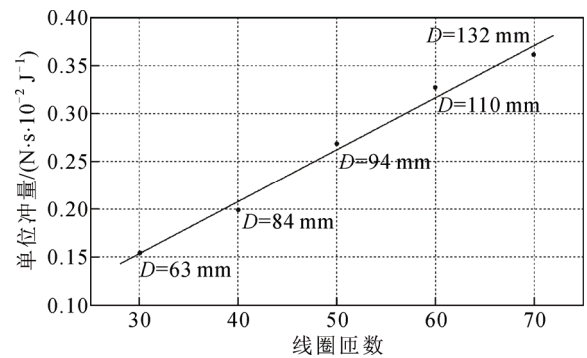


图9 线圈尺寸对单位冲量的影响

Fig.9 Influence of coil size on unit impulse

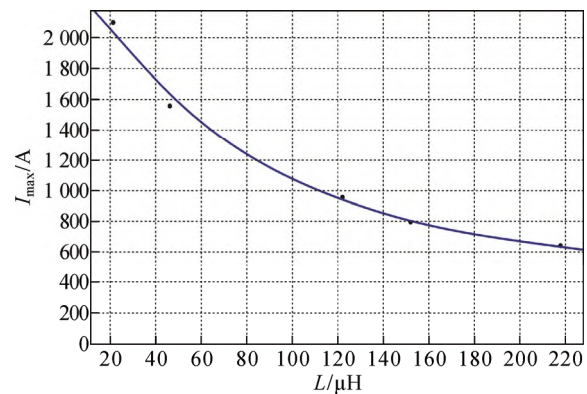


图10 电流峰值随电感值的变化

Fig.10 Change of current peak value with inductance value

且刚性很大, 不易发生弹性形变, 除冰需要很大的脉冲力, 应合理增大脉冲线圈外径和线圈匝数, 但其重量和体质也相应增加, 这对于磁浮接触轨除冰线圈的安装、运动取电提出更高要求。因此, 必须优化脉冲线圈的设计。

3) 电容电压的影响

在电脉冲除冰系统设计, 特别是磁浮接触轨在线移动除冰方案中, 采用单线圈重复脉冲除冰方式, 应优化确定脉冲线圈所需能量, 即优化储能电容器的电压和电容, 电容器储能与电压和电容的关系为

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

式中: C 为电容器电容, F ; U 为充电电压, V ; W 为电容器储存能量, J 。

由脉冲力矩随电容储能量的测试结果可知, 每 100 J 的脉冲力随电容及储能的增大而降低, 而实际除冰需要的力随接触轨覆冰长度的增加而增大。

图 11 为脉冲电流峰值与电容电压关系图。由图 11 可知, 脉冲电流峰值与电压呈线性关系, 要求提高除冰范围, 必须提高电容电压, 但电容电压的提高受很多因素的限制, 例如在电压超过 3 kV 时除冰目标存在明显振动, 必须限制除冰的机械振动, 同时应合理优化电容、电压和储能。

4) 间隙距离的影响

除冰线圈与接触轨之间的间隙(d)是可控制的, 但相应会增加技术难度。间隙越小越好, 但实际上难以使其达到很小, 线圈端面是平面, 磁浮接触轨覆冰表面也是平整的, 为实现线圈和接触轨的近距离接触创造了条件。为防止脉冲力作用时线圈与接触轨相碰, 应有合理的间隙。但间隙太大产生的感应涡流减小, 导致涡流产生的脉冲电磁力减小, 如图 12 所示。因此接触轨除冰线圈应尽靠近接触轨。

由于接触轨表面有冰, 若采用集中式随车除冰方案, 线圈将放置在冰面之外, 其间隙可能由于严重覆冰造成很大间隙, 如冰厚 20 mm 时, 间隙大于 20 mm, 其脉冲力降低 85%。这对脉冲线圈和激励电源的设计和优化带来巨大困难。因此, 本文提出采用 C 型接触轨内表面与脉冲线圈贴紧的方式。

5) 材料的影响

不同的材料导电率也有一定区别, 而材料的导电率对电脉冲力也存在一定影响。图 13 为材质及厚度对电脉冲力影响规律的测试结果, 其单次除冰能耗为 192 J($U=800 V, C=600 \mu F$), 线圈外径为 36 mm,

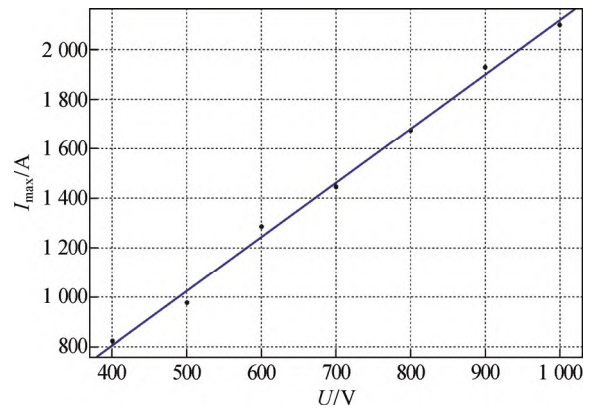


图 11 脉冲电流峰值与电容电压的关系

Fig.11 Relationship between impulse current peak and capacitor voltage

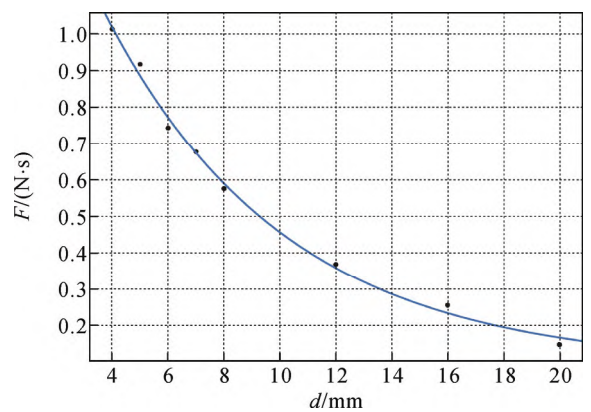


图 12 脉冲力与间隙的关系

Fig.12 Relationship between gap and pulse force

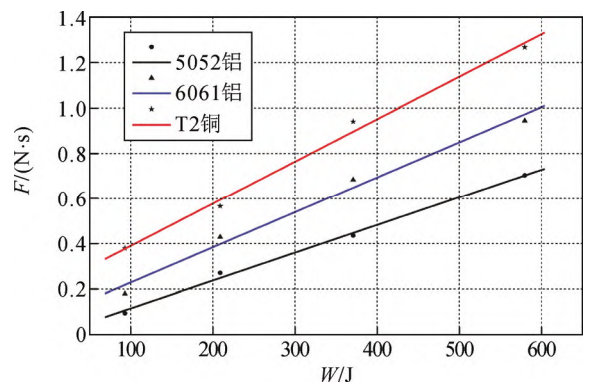


图 13 材料对脉冲力的影响

Fig.13 Effect of materials on pulse force

匝数为 40, 线圈与目标物的间隙为 2.5 mm。设铜质材料电导率为参考的 100%, 则 6061-T6 铝的电导率为 43%, 5052 铝的电导率为 30%, 产生的电脉冲力比与电导率相近。选用优良导电材质作为目标物可以有效提高能量的利用率。

基于电脉冲除冰的电磁力学关系，结合接触轨刚性较大的特点，考虑电脉冲线圈尺寸、线圈的电路参数、放电电容的电压和能量、间隙距离和除冰目标的材料导电率等关键因素，可通过图 14 所示流程来设计接触轨电脉冲除冰方案的具体参数。

首先，明确除冰对象，包括接触轨覆冰类型、覆冰厚度、除冰长度；根据除冰对象明确所需的脉冲力和单次除冰中所需要的总能量；进而设计线圈的结构，其中包括匝数、漆包线线径、线圈内径、线圈外径及线圈的固定方式和布置位置；通过对电路、电磁场的分析，设计脉冲除冰系统各电气参数，并完成开关的控制硬件设计；将完成的除冰系统进行除冰试验，观察并记录试验结果；根据试验结果进一步调整线圈、电路的具体参数，再次进行除冰试验后，比较试验结果，优化各项参数；最终完成方案设计。

3 接触轨电脉冲除冰试验

结构物覆冰分为雨淞、雾淞、混合淞、霜、雪，其中结构物的雨淞覆冰粘附力最大，即雨淞覆冰最难除去。故本文在人工气候室对方形铝板和接触轨样段进行了雨淞覆冰试验，将除冰对象放入人工气候室覆冰 1~2 h。参考国际标准 ISO 12494—2017 的覆冰要求^[23]，调节人工气候室各系统分别使温度为 -6 °C~0 °C，风速为 4~6 m/s，覆冰水滴半径可控区间为 7.5~100 μm，在该覆冰条件下，可得到粘附力较大的雨淞覆冰。除冰试验时温度为重庆室温，约 10 °C。试验分别采用饼形单层线圈和方形单层线圈(如图 6 所示)。试验时激励电源装置电压为直流 800 V，方形铝板线圈为 25 匝，圆盘外径为 36 mm；接触轨脉冲线圈为 45 匝，其圆盘外径为 80 mm，漆包线直径为 0.7 mm。

通过排液法和天平分别测得覆冰的体积和质量，最后分别得到铝板上的平均覆冰密度为 0.84 g/cm³，接触轨上的平均覆冰密度为 0.81 g/cm³，故本文中试验覆冰均为雨淞。

在图 3 脉冲电流下，铝板整体所受脉冲力峰值约为 1 950 N，置于 200 mm×200 mm 方形铝板中央直径为 35 mm 的线圈在 $t < 1/30$ s 内除去其表面 20 mm 的雨淞覆冰(见图 15)，除冰速度快、效果优异，除冰面积约达到脉冲线圈自身面积的 40 倍，且再次调节脉冲宽度和脉冲幅值，圆形线圈的除冰面积可达 100 倍以上。因此，电脉冲除冰的关键是根据除

冰目标合理设置脉冲宽度和幅值。

由图 16 接触轨样段除冰测试结果可知：在脉冲幅值 800 A、半峰值时间 143 μs 的脉冲电流下，宽 100 mm、长 300 mm 接触轨表面的 15 mm 雨淞覆冰通过一次电脉冲可完全去除，接触轨整体所受脉冲力峰值约为 3 200 N。由于接触轨很厚，感应产

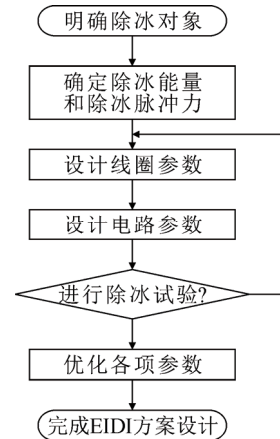


图 14 电脉冲除冰方案设计流程图

Fig.14 Flow chart of EIDI scheme design

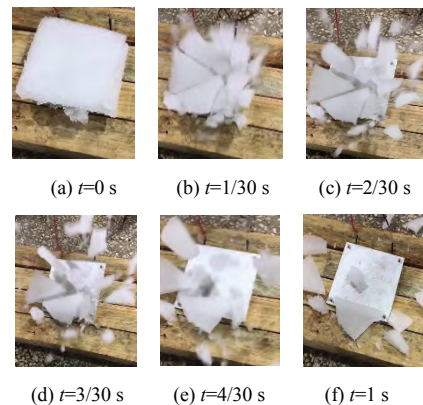


图 15 铝板电脉冲除冰试验

Fig.15 EIDI experiment of aluminum plate

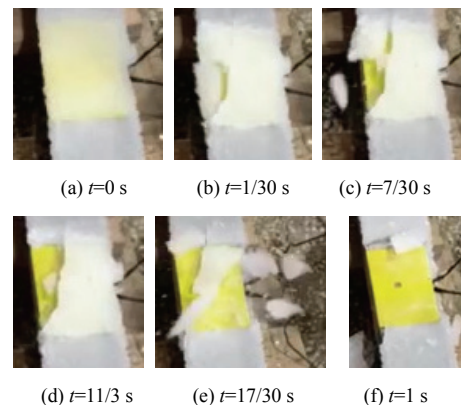


图 16 接触轨电脉冲除冰试验

Fig.16 EIDI test of contact rail

生的脉冲力引起接触轨表面蠕变受到限制, 脉冲力的传递困难, 除冰长度只有 300 mm, 接触轨内置线圈除冰的除冰面积仅为自身面积的 6 倍。

对接触轨进行强度校验, 在试验中脉冲力的作用下, 接触轨受最大拉应力为 1.74 MPa, 小于钢铝复合接触轨的最小抗拉强度 235 MPa。根据文献[20]提出的脱冰准则, 本文除冰过程中主要考虑除冰时能达到的最大应力和覆冰与接触轨之间的法向正应力, 即拉应力。若在覆冰区域, 满足式(2)即可脱冰。经研究, 钢与覆冰的最小法向正应力约 0.4 MPa, 即满足除冰要求。

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_U} \geq 1 \quad (2)$$

式中: σ_r 为除冰时最大拉伸应力(也可以是最大等效应力), MPa; σ_U 为接触轨与覆冰间的拉应力, MPa。

理论和试验发现, 优化脉冲宽度和提高脉冲幅值均可提高接触轨的除冰范围和效果, 且将脉冲线圈安装在接触轨取电线夹之间, 并随列车移动, 可实现接触轨电脉冲的动态除冰。

4 结论

磁浮快线存在覆冰的安全隐患, 国内外目前没有相关的研究和除冰融冰的经验。本文研究发现:

1) 针对接触轨的结构和布置方式, 本文提出了 2 种接触轨除冰方案: 集中式随车除冰方案, 即接触轨的电脉冲除冰装置采用集中一体式的结构设计; 预埋线圈式除冰方案, 即在 C 形接触轨的内侧预先安装脉冲线圈。

2) 本文自行绕制了平面脉冲线圈, 通过试验发现, 脉冲作用随着线圈尺寸的增大而增大, 但同时将占据更大空间。

3) 通过冲击摆试验发现: 提高充电电压、减小线圈与目标物的距离、提高目标物的电导率, 可有效提高脉冲力峰值, 并提高除冰范围和除冰效率。

4) 通过人工气候室对接触轨样段试验结果表明, 优化后的电脉冲装置能够对铝板和接触轨进行有效除冰, 证明电脉冲除冰是一种可用于接触轨的除冰方法, 这种方法也可应用于其他类似场景, 具有良好的开发和应用前景。

参考文献 References

[1] 蒋兴良, 张志劲, 胡 琴, 等. 再次面临电网冰雪灾害的反思与思考[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 463-469.

JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, HU Qin, et al. Thinkings on the re-strike of ice and snow disaster to the power grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 463-469.

[2] 山 霞, 舒乃秋. 关于架空输电线除冰措施的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 25-27.

SHAN Xia, SHU Naiqiu. Discussion on methods of de-icing for overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 25-27.

[3] 舒立春, 杨 晨, 胡 琴, 等. 风力发电机叶片加热循环控制除冰数值仿真研究[J]中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7149-7155.

SHU Lichun, YANG Chen, HU Qin, et al. The numerical study of electrothermal de-icing cycle controlled method for wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7149-7155.

[4] 滑申冰, 冯双磊, 靳双龙, 等. 基于邻域法对覆冰预报产品的评估[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1450-1457.

HUA Shenbing, FENG Shuanglei, JIN Shuanglong, et al. Evaluation of transmission line icing prediction products based on fraction skill score[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1450-1457.

[5] 王永亮. 电气化铁路隧道微波除冰仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

WANG Yongliang. The simulation of microwave deicing in electrified railway tunnels[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2017.

[6] 蒋兴良, 易 辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

JIANG Xingliang, YI Hui. Icing and protection of transmission line[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2001.

[7] 刘和云. 架空导线覆冰与脱冰机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.

LIU Heyun. Icing and deicing mechanism of overhead transmission line[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2001.

[8] 杜 骞. 电脉冲除冰系统设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

DU Qian. Design and research on electro-impulse de-icing system[D]. Nanjing, China: Nanjing Aeronautics and Astronautics University, 2009.

[9] 熊 奇, 唐红涛, 王沐雪, 等. 2011 年以来电磁成形研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1171-1181.

XIONG Qi, TANG Hongtao, WANG Muxue, et al. Research progress of electromagnetic forming technique since 2011[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1171-1181.

[10] 李成祥, 杜 建, 陈 丹, 等. 基于电磁脉冲成形技术的电缆接头压接装置的研制及实验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2941-2950.

LI Chengxiang, DU Jian, CHEN Dan, et al. Development and experimental study of cable joint pressure connecting device based on the electromagnetic pulse forming technology[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2941-2950.

[11] 李清英. 电脉冲除冰系统的实验、理论与设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

LI Qingying. Research on the experiments, theories, and design of the electro-impulse de-icing system[D]. Nanjing, China: Nanjing Aeronautics and Astronautics University, 2012.

[12] ZUMWALT G W. Icing tunnel tests of electro-impulse de-icing of an engine inlet and high-speed wings[J]. AIAA Journal, 1985.

[13] NELEPOVITZ D, ROSENTHAL H, ROCKHOLT H. Test and analysis of electro-impulse de-icing systems in turbine engine inlets[C]// 26th Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA: AIAA, 2013:

- 11-14.
- [14] EGBERT R I, SCHRAG R L, BERNHART W D, et al. An investigation of power line de-icing by electro-impulse methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 3(4): 1855-1861.
- [15] Innovative Dynamics Inc. Electro-magnetic expulsion de-icing system: US6102333A[P]. 2000-08-15.
- [16] 裘燮纲, 郭宪民. 电脉冲除冰系统参数的合理选择[J]. 南京航空航天大学学报, 1993, 25(2): 211-218.
QIU Xiegang, GUO Xianmin. Parameter selection of electro-impulse de-icing systems[J]. Journal of Nanjing Aeronautical Institute, 1993, 25(2): 211-218.
- [17] 吴小华, 杨堤, 张晓斌, 等. 飞机电脉冲除冰系统的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(4): 1064-1066, 1078.
WU Xiaohua, YANG Di, ZHANG Xiaobin, et al. Modeling and simulation of aircraft electro-impulse de-icing system[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(4): 1064-1066, 1078.
- [18] ENDRES M, SOMMERWERK H, MENDING C, et al. Experimental study of two electro-mechanical de-icing systems applied on a wing section tested in an icing wind tunnel[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2017, 8(3): 429-439.
- [19] ZHANG Z Q, SHEN X B, LIN G P, et al. Dynamic response analysis of the multi-excitation structure of electro-impulse deicing system[C] //2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS). Beijing, China: IEEE, 2016: 955-960.
- [20] JIANG X L, WANG Y Y. Studies on the electro-impulse de-icing system of aircraft[J]. Aerospace, 2019, 6(6): 67.
- [21] WANG Y Y, JIANG X L. Design research and experimental verification of the electro-impulse de-icing system for wind turbine blades in the Xuefeng Mountain natural icing station[J]. IEEE Access, 2020, 8: 28915-28924.
- [22] 何青, 吕锡锋, 赵晓彤. 激励条件下高压输电线路除冰技术应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2997-3003.
HE Qing, LÜ Xifeng, ZHAO Xiaotong. Research on application of de-icing technology on high voltage transmission line under the condition of incentive[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2997-3003.
- [23] ISO. Atmospheric icing of structures: ISO 12494—2017[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2017.



OUYANG Hong

欧阳虹

1973—, 男, 高级技师

研究方向为供电系统运营与维护

E-mail: 228827617@qq.com



JIANG Xingliang

Ph.D., Professor

Corresponding author

蒋兴良(通信作者)

1961—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事能源装备安全与灾害防御研究

E-mail: xljiang@cqu.edu.cn

收稿日期 2021-01-13 修回日期 2021-06-28 编辑 卫李静