

不同初始温度下脉冲大电流直线电机驱动性能研究

康 凯^{1,2,3}, 徐伟东^{1,3}, 徐 蓉^{1,3}, 袁伟群^{1,3}, 严 萍^{1,3}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190)

摘要: 两条金属轨道间的滑块在大电流的驱动下可获得高速, 滑块与轨道接触界面的热特性影响接触状况和系统性能。本文利用电加热装置对轨道进行预加热, 通过预加热来模拟电机连续推进下的热量累积。在滑块型号、质量、驱动电流基本一致的前提下, 进行不同初始温度条件下的电机单次启动试验。通过温度、驱动电流、电压、运动速度等数据对大电流直线电机的性能进行分析, 研究结果对于连续运行试验和避免转换研究具有一定理论指导意义和工程应用参考价值。

关键词: 脉冲大电流; 预加热; 直线电机; 滑块

DOI: 10.12067/ATEEE1803042 **文章编号:** 1003-3076(2018)11-0069-07 **中图分类号:** TM89

1 引言

在脉冲大电流直线电机驱动过程中, 滑块具有高初始速度(数 km/s)、高出口动能(几十 MJ 级), 数 MA 驱动电流会在轨道中产生大量热, 引起轨道温度升高, 尤其是驱动过程时间极短(几 ms), 热量扩散较慢, 滑块与轨道接触界面温升明显。在多次连续驱动条件下, 轨道热量大量积累, 温升效果更加明显^[1]。轨道温度升高时, 轨道的相关特性, 如硬度、电导率等发生相应变化, 进而影响驱动性能。美国海军学院 Smith 等人^[2,3]的研究表明, 脉冲电源系统总能量的一部分以轨道和滑块热量的形式损失, 从而影响了效率; 另外, 轨道累计热量导致温度升高, 会引起轨道材料烧蚀熔化等现象, 影响驱动器材料的机械性能, 甚至可能引起刨削和转捩, 影响驱动效率和性能, 严重的情况可能导致驱动失败。因此, 研究温度升高对直线电机驱动性能的影响具有重要意义^[4-6]。

美国陆军实验室 Powell 等人针对直线电机 2D 模型的热分布进行了研究^[7,8], 对轨道截面的电磁场分布和热扩散行为进行了分析, 但计算过程中并未考虑滑块的影响。Zhao 等人^[9,10]利用商业软件 Comsol 和 Fluent 相结合, 计算 3D 瞬态情况下, 不同

位置和尺寸的冷却管道的轨道热分布。仿真结果表明, 冷却管道可有效地使轨道温度下降 10℃ ~ 50℃。此外, 美国海军学院、德国空气动力学和流体技术研究所^[11,12]、伊朗^[13-15]等均对脉冲大电流直线电机热现象的数值计算进行了研究。

巩飞等人^[16,17]建立了三维模型, 对金属滑块的电流熔化波烧蚀过程进行了计算, 得到了电流熔化波的形成及传播过程。李鹤等人^[18,19]针对 3D 静止模型仿真分析了滑块和轨道接触面的热现象, 指出最高温度出现在滑块与轨道接触部分前端两侧区域, 摩擦热对温升的影响较小, 但可能是起始运动阶段滑块接触面熔化的主要因素。徐伟东等人^[6]利用解析方法计算了直线电机的温升, 并结合仿真结果, 指出了温升对于滑动电接触性能的影响规律。

总体上看, 对于脉冲大电流直线电机热现象的研究, 多集中在滑块结构设计、电磁场和力学特性、滑块烧蚀等方面的数值计算, 而实际的试验较少。关于温度场的研究, 大多集中在静态条件下滑块和导轨接触面的传热情况, 或采用高频电流模拟滑块附近的温度场, 对于瞬态过程中温度的研究则较少, 试验也主要集中于单次推进过程研究。

本文利用电加热装置对轨道进行预加热, 通过调节加热装置的功率和加热时间达到控制初始温度

收稿日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51237007)、国家自然科学基金面上项目(51577178)

作者简介: 康 凯(1990-), 男, 黑龙江籍, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术;
袁伟群(1976-), 男, 江苏籍, 研究员, 博士, 研究方向为脉冲功率技术(通讯作者)。

的目的,使得驱动初始阶段枢轨接触界面具有一定的初始温度,通过预加热来模拟电机连续推进下的热量积累,并且利用温度在线测量装置,实时监测温度变化。在驱动电流、滑块质量和型号保持一致的前提下,进行不同初始温度(15℃,50℃,100℃)条件下的直线电机驱动试验。通过测量温度变化、驱动电流、电机首端和尾部电压、滑块运动速度等数据,对不同初始温度条件下的枢轨接触状态、驱动效率和性能进行分析。

2 测量系统设计

需要测量的参数主要包括温度、滑块运动速度、驱动电流、电机首端电压、电机尾部电压等,其中利用热电偶测量温度,利用磁探针(B-dot)方法间接测量滑块运动速度,利用 Rogowski 线圈测量驱动电流,利用分压器测量电机首端电压、电机尾部电压。

2.1 轨道温度测量

直线电机驱动电流大,滑块运动速度高,驱动时内部环境非常复杂,与轨道接触的测温元件会经受脉冲大电流的冲击,可能会造成测温元件饱和或损坏,因此,准确测量直线电机的温度变化比较困难。通常测量温度的手段有热电偶测温^[1]、红外测温^[20]、光纤测温^[21,22]等。考虑到电机结构、测量需求及成本等因素,本次试验选用热电偶测温。

本次试验采用 K 型热电偶测温,测温范围在 0℃~1300℃ 之间,基本误差为 ±0.75%,通过轨道打孔的方式安装热电偶,在长 2070mm 的轨道上对称打孔,结构如图 1 所示,距驱动器尾部 450mm 处并列打两个孔,其中上方孔深度为 8mm,其余所有孔深均为 7mm,从距轨道尾部 500mm 处开始,每间距 210mm 打一个孔,共计 9 个未穿透孔,编号依次为 1~9。

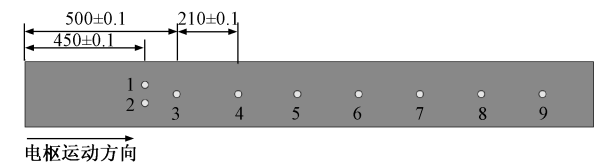


图 1 轨道热电偶安装位置结构图
Fig. 1 Position of thermocouple of rail

加工后的轨道如图 2 所示,利用高温导热胶 Omega-bond 600 将热电偶探头固定在轨道上,其传热系数 68.14W/(m²·K),最高耐受温度 1427℃,并且具有良好的电绝缘、抗震和防老化特性,安装热电偶如图 3 所示。



图 2 实际加工轨道
Fig. 2 Practical rail

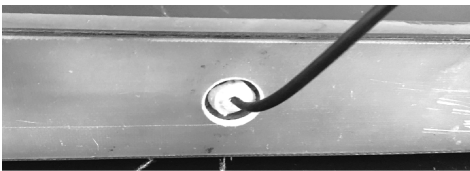


图 3 高温导热胶
Fig. 3 High temperature conducting adhesive

通过以上测量装置可以在一定响应时间(300~500ms)范围内实时测量轨道温度,进而研究轨道温度与电机驱动性能的关系。

2.2 滑块运动速度测量

滑块运动速度的测量对研究轨道和滑块的相互作用机理具有十分重要的意义。滑块受电磁力推动的加速运动是一个复杂的过程,通过对滑块运动位置和速度的测量,可分析和研究滑块与轨道产生的高速摩擦、磨损、烧蚀刨削、滑块转捩等多种现象,掌握电磁力加速的基本规律,为直线电机的设计提供依据^[23]。

目前国内外已研制出包括磁探针、毫米波多普勒雷达、激光干涉测速、高速摄影等多种测量方法。其中磁探针方法中探针结构简单,制作成本低,安装方便,具有不受烟雾及机械振动等恶劣因素干扰的优点,在滑块位置和速度测量中得到了广泛应用^[24-26]。

磁探针测量滑块速度的原理如下:当滑块通过磁探针线圈时引起感应磁通的变化,测出一系列的滑块位移-时间离散点后拟合成滑块位移曲线,然后对位移曲线时间微分后得到速度曲线。本次试验设计的磁探针分布图如图 4 所示,在口径为 20mm×30mm、长度为 2070mm 的轨道上,从距电机首端 50mm 处开始,每相隔 180mm 均匀排布磁探针 10 枚,实验中探针输出的微分信号由瞬态采集卡记录。

2.3 驱动电流测量

在进行驱动试验时,轨道电流的测量采用外积分 Rogowski 线圈(简称罗氏线圈)在汇流排处测量。罗氏线圈作为一种非接触式电流互感器,测量时与

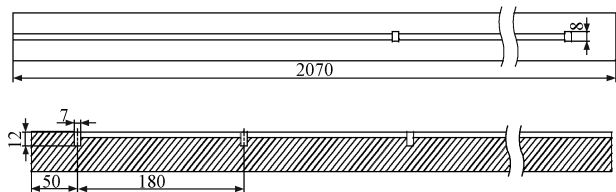


图4 磁探针分布

Fig. 4 Distribution of magnetic diagnostic probe

被测电流回路无直接电气联系,绝缘结构简单,性价比高,广泛应用于强流脉冲的测试领域^[26]。

罗氏线圈由细导线均匀绕制在柔性或硬质的非铁磁性骨架上构成。测量时,载导体穿过罗氏线圈,导体电流的变化使得通过线圈的磁通量变化,线圈的输出端产生感应电压,且数值正比于被测电流的变化率。当输出端电压经积分器“积分”后则可以计算出被测电流。

3 驱动试验与结果分析

3.1 实验条件

实验室室温为 15℃,通过加热装置对轨道进行预加热,将轨道初始温度分别加热到 50℃ 和 100℃,并维持在预加热温度,当开展驱动试验时,将加热装置断开,确保驱动回路和加热回路无电连接。热电偶测量的温度信号经过转换后在示波器界面显示,便于观察和记录试验过程中轨道温度的变化。

整个系统由最大储能达 3MJ 的电容器组驱动,通过改变充电电压的幅值来调节模块储能及输出电流的大小。本试验主要探究轨道不同初始温度对直线电机驱动性能的影响,因此设计了除初始温度以外其他条件基本相同的试验,充电电压均为 1800V,滑块均采用经优化后的 C 型结构,质量约为 42.3g,并保证滑块安装条件(预紧力、滑块初始位置)及轨道表面条件(间距、表面粗糙度)基本一致。

3.2 试验结果与分析

驱动电流和电机首端电压如图 5 所示。不同温度条件下的驱动电流基本一致,驱动电流峰值 I_{\max} 为 457kA,平顶电流值约为 411.3kA (90% I_{\max}),平顶电流宽度约为 1.12ms。根据电机首端电压和驱动电流曲线,可判断出滑块脱离轨道时刻约为 1.82ms。通过电机首端电压信号和驱动电流信号,可以得到滑块与轨道之间接触界面的接触阻抗曲线。

(1) 轨道温升

热电偶测温点如图 1 所示,测温点 1~6 安装热

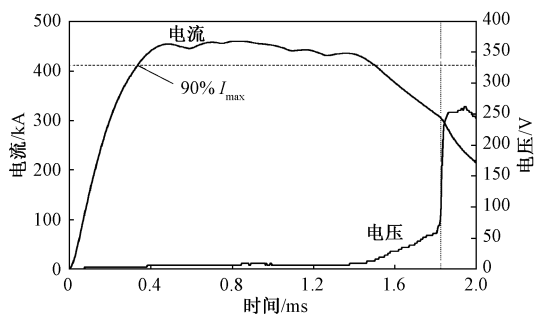


图5 驱动电流和电机首端电压

Fig. 5 Driving current and motor terminal voltage

电偶,由于结构原因,测温点 7~9 未安装热电偶。测量获得实时温度数据,通过各个测温点的温度数据,得到不同初始温度下各测温点的最大温升,结果如图 6 所示。以测温点 3 为例,轨道初始温度为 15℃ 时,温升为 10.2℃;轨道初始温度为 50℃ 时,温升为 11.34℃;轨道初始温度为 100℃ 时,温升为 12.33℃;其他测温点也显示出同样的温度变化规律,轨道初始温度越高,温升越大。

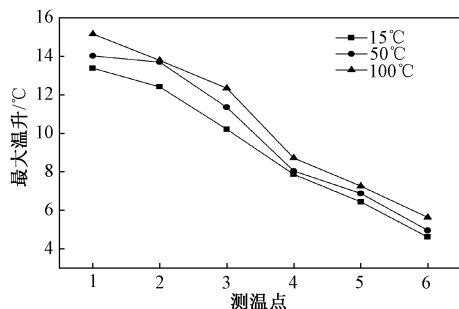


图6 不同测温点最大温升

Fig. 6 Max temperature rise of different points

由图 6 可以看出,越接近电机尾部位置,轨道温升越大。温升主要由驱动电流、接触电阻和时间三个因素决定,造成这种现象主要有两方面原因:①在滑块起始运动时,滑块与轨道的接触形式属于固态-固态金属接触,实际接触面积远小于宏观接触面积,接触电阻较大,产生的热量正比于接触电阻,因此温升高。随着电流的增加,接触压力逐渐增大,同时伴随着温度上升滑块表面材料会逐渐软化,实际接触面积持续增加,因此接触电阻逐渐下降,温升会有所下降。②滑块起始运动时速度小,也就是说,越接近滑块起始运动位置,热量积累的时间越长,所以温升高。

(2) 滑块脱离轨道速度

利用磁探针测出一系列的滑块位移-时间离散

点后拟合成滑块位移曲线,然后对位移曲线时间微分后得到速度曲线,结果如图 7 所示。由于磁探针不能恰好安装在电机首端位置,因此不能完全测得滑块脱离轨道时刻的速度,通过曲线拟合可得到在 1.82ms 时刻滑块的速度约为 1732.3m/s。

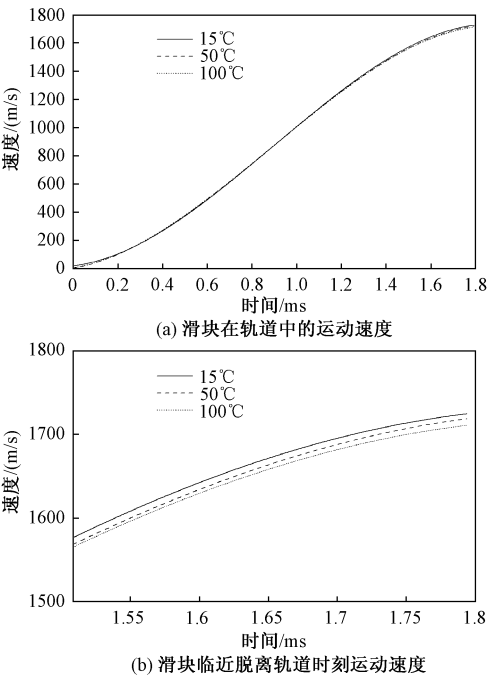


图 7 滑块的运动速度
Fig. 7 Velocity of slider

由图 7(a) 滑块运动速度曲线可知,从滑块起始运动到 0.335ms 时刻(90% I_{\max} 时刻),电流上升,滑块所受电磁力增加,克服枢轨界面静摩擦力,滑块缓慢加速;0.335ms 时刻到 1.506ms 时刻,电流从上升沿 90% I_{\max} 到下降沿 90% I_{\max} 阶段,枢轨接触状态良好,滑块运动速度急剧增加;1.506ms 时刻到滑块脱离轨道时刻,电流下降,电磁力减小,滑块运动速度缓慢增加。

从图 7(a) 可以看出,即使在不同初始温度条件下,滑块运动速度呈现较好的一致性。但是从图 7(b) 可以看出,不同初始温度条件下滑块的运动速度稍有不同,如在 1.791ms 时刻,15℃、50℃ 和 100℃ 初始温度下,滑块的速度分别为 1725m/s、1719m/s 和 1711m/s,由此可知,初始温度越高,滑块速度会稍有下降。

初始温度不同,滑块速度不同,主要是由于初始温度越高,轨道和接触界面的电阻都会更大,系统以热量形式损失的能量多,而系统的总能量是一致的,因此滑块动能减少,速度降低。

(3) 滑块脱离轨道时间

通过电机首端电压和驱动电流曲线,可判断出滑块脱离轨道时刻,不同初始温度条件下的电机首端电压如图 8 所示。在 1.506ms 时刻之前,电机首端电压低于 10V,在此时刻之后,电机首端电压呈现先缓慢增加,后迅速增加的趋势,电机首端电压急剧增大的转折点对应的的时间即是滑块脱离轨道时刻,从图 8(b) 可以看出 $t_A < t_B < t_C$,表明轨道初始温度升高,滑块脱离轨道时间会有所延长。

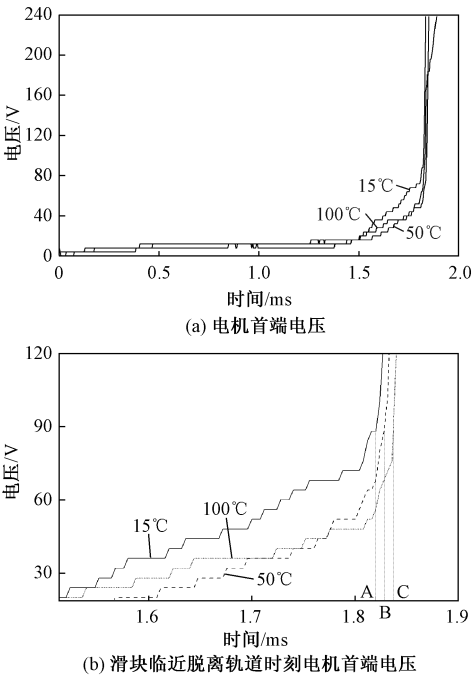


图 8 电机首端电压
Fig. 8 Motor terminal voltage

造成滑块脱离轨道时间稍有不同的原因主要是由于滑块运动速度的差异,通过图 7 可知,初始温度越高,滑块运动速度会稍有下降,相同轨道的条件下,滑块脱离轨道时间会延迟。

(4) 接触电阻

接触电阻是反映滑块和轨道滑动电接触性能的一个重要指标,接触电阻的大小和驱动电流、接触面温度、预紧力等因素有关。试验所获得的电机首端电阻曲线如图 9 所示,可以看出接触电阻是变化的。

在 $t = 0$ 时刻,滑块与轨道的接触形式属于固态-固态金属接触,接触压力对接触电阻的作用起主导地位,接触压力仅由初始预紧力提供,实际接触面积小于宏观接触面积,所以接触电阻较大。随着电流的增加,电磁力增加,接触压力逐渐增大,同时伴随着温度上升滑块表面材料会逐渐软化,实际接触

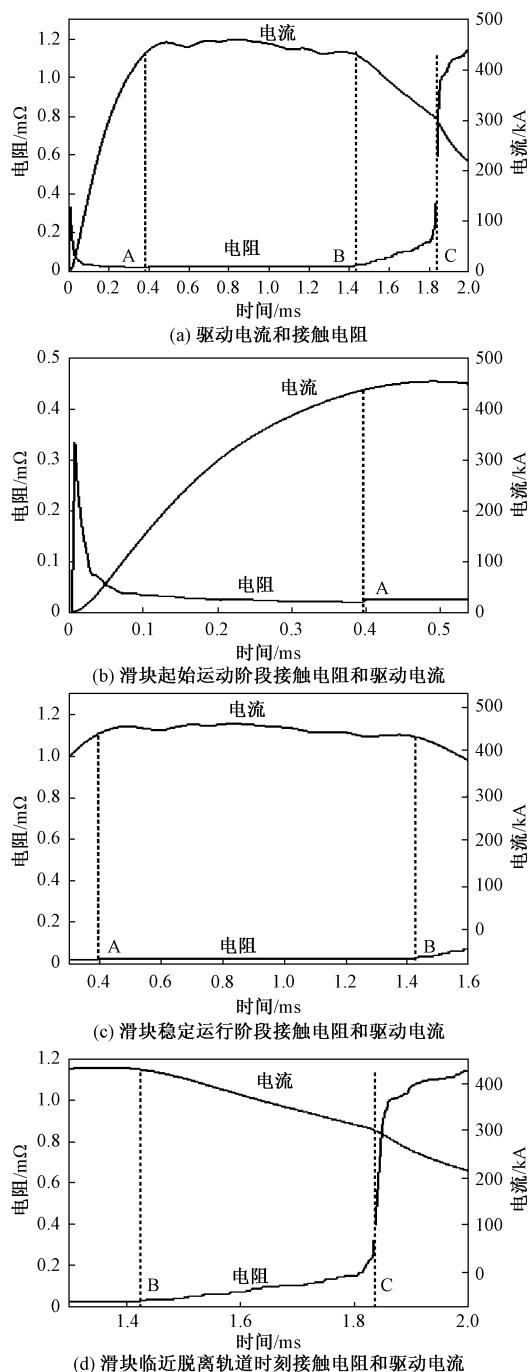


图9 接触电阻和驱动电流

Fig. 9 Contact resistance and driving current of slider

面积持续增加,因此接触电阻逐渐下降,直到 A 点达到最小值,其变化规律如图 9(b)所示。

在整个过程中,滑块由于受大电流加热作用,温度一直保持上升,而温度升高对接触电阻有两方面影响:①能使接触面材料软化增大接触面积而减小接触电阻;②造成电阻率增大。在 A ~ B 阶段,驱动电流处于平顶期,接触压力几乎不变,滑块运动速度高,滑块运动速度和轨道温升对接触电阻的影响相

互制约,所以接触电阻变化较小,如图 9(c)所示。

在 B ~ C 时间段内,枢轨接触阻抗逐渐增加。由于驱动电流下降,C 型滑块两翼间的电磁力变小,接触压力下降,当接触压力与材料软化作用带来的接触面积增加效应不再明显时,电阻率的增大效应逐渐占主导作用,使接触电阻呈现近似线性增加的趋势,如图 9(d)所示。

不同初始温度条件下的接触电阻如图 10 所示。转捩点 P 的变化主要是由于电流的下降引起的,电流下降一方面会使得处于液态金属接触状态的滑块和轨道的接触应力下降,造成实际接触面积减小,而另一方面电流下降会在接触面上感应出反向涡流,将液态金属从接触面上拖拽出来,使接触状态恶化,因此 P 点亦称为接触转捩点^[29]。由图 10 可以看出,不同初始温度条件下,转捩时刻会有所不同,初始温度越高,转捩点会延迟,主要是由于温度升高,导轨、滑块以及接触界面的电阻都会有所增加,驱动电流会降低,又通过图 7(b)可知,滑块速度会下降,因此导致到达转捩位置的时间延迟。

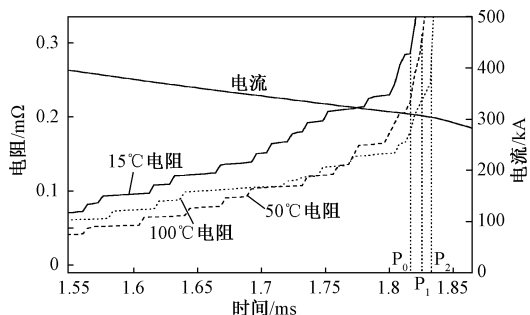


图10 不同初始温度条件下的接触电阻

Fig. 10 Contact resistance of different initial temperatures

4 结论

(1) 通过对比分析可知,在轨道初始温度为 15℃、50℃和 100℃的条件下,驱动后轨道的温升也有所不同,初始温度越高,轨道温升越大;而且越接近电机尾部位置,轨道温升越大。

(2) 在不同初始温度条件下,滑块运动速度呈现较好的一致性,在驱动电流上升阶段滑块速度缓慢增加,驱动电流平顶阶段滑块速度迅速增加,驱动电流下降阶段滑块速度又缓慢增加。但是在不同初始温度条件下,滑块速度仍有少量差距,初始温度越高,滑块脱离轨道速度会稍有下降。

(3) 通过电机首端电压和驱动电流曲线,可判断出滑块脱离轨道时刻。在良好滑动电接触阶段,

电机首端电压基本不变,随后电压呈现先缓慢增加,后迅速增加的趋势,电机首端电压急剧增大的转折点对应的的时间即是滑块脱离轨道时刻。通过试验结果分析可知,轨道初始温度越高,滑块脱离轨道时间会有所延长。

(4) 接触电阻大小主要受驱动电流、轨道和滑块的温度影响。温度对接触电阻的影响是两方面的,一方面既能使接触面材料软化增大接触面积而减小接触电阻,另一方面又会造成电阻率增大。而驱动电流影响接触压力的大小是通过改变枢轨接触面积实现的,总之,在初始温度 100℃ 以内,接触电阻受驱动电流的影响更大。

(5) 不同初始温度时,转捩时刻会有所不同,通过试验结果分析可知,初始温度升高,转捩点会相应延迟。

轨道初始温度影响驱动过程中的轨道温度、滑块运动速度,滑块脱离轨道时间、转捩时间等,在连续驱动条件下,热量积累势必影响驱动性能,因此有必要对轨道进行热管理。

参考文献 (References):

- [1] Motes D, Keena J, Womack K, et al. Thermal analysis of high-energy railgun tests [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40 (1): 124-130.
- [2] Smith A N, McGlasson B T, Bernardes J S. Heat generation during the firing of a capacitor-based railgun system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43 (1): 190-193.
- [3] Nearing J C, Huerta M A. Skin and heating effects of railgun current [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25 (1): 381-386.
- [4] Stefani F, Levinson S, Satapathy S, et al. Electrodynamic transition in solid armature railguns [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (1): 101-105.
- [5] 刘传谱, 袁伟群, 严萍, 等 (Liu Chuanpu, Yuan Weiqun, Yan Ping, et al.). 重复推进滑动电接触的试验研究 (Experimental study of sliding electrical contacts in a multi shot railgun) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2010, 22 (4): 923-926.
- [6] 徐伟东, 袁伟群, 陈允, 等 (Xu Weidong, Yuan Weiqun, Chen Yun, et al.). 电磁轨道驱动器连续驱动的滑动电接触 (Sliding electrical contact performance of electromagnetic launcher system in rapid fire mode) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2012, 24 (3): 668-672.
- [7] Powell J D, Zielinski A E. Ohmic heating in a double-taper sabot-armature [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (1): 153-157.
- [8] Powell J D, Zielinski A E. Two-dimensional current diffusion in the rails of a railgun [R]. US Army Research Lab, 2008.
- [9] Zhao H, Souza J A, Ordonez J C. Thermal model for electromagnetic launchers [J]. Electromagnetic Launcher, 2008, 7: 59-64.
- [10] Zhao H, Souza J A, Ordonez J C. Three-dimensional launch simulation and active cooling analysis of a single-shot electromagnetic railgun [J]. Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2014, 90 (12): 1312-1327.
- [11] Bozic O, Giese P. Aerothermodynamic aspects of railgun-assisted launches of projectiles with sub- and low-earth-orbit payloads [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43 (1): 474-479.
- [12] Lancelle D, Bozic O. Thermal protection, aerodynamics and control simulation of an electromagnetically launched projectile [A]. 2014 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology [C]. 2014. 1-6.
- [13] Ghassemi M, Pasandeh R. Thermal and electromagnetic analysis of an electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (3): 1819-1822.
- [14] Ghassemi M, Barsi Y M. Effect of liquid film (indium) on thermal and electromagnetic distribution of an electromagnetic launcher with new armature [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (1): 408-413.
- [15] Ghassemi M, Ghassemi A, Ziabasharhagh M. Thermal stress analysis of the rails and the armature of an electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (1): 293-297.
- [16] 李昕, 翁春生 (Li Xin, Weng Chunsheng). 块状固体电枢非稳态电磁效应的三维数值模拟 (Three-dimensional numerical simulation of the non steady state electromagnetic effect of a lump solid armature) [J]. 弹道学报 (Journal of Ballistics), 2009, 21 (1): 103-106.
- [17] 李昕 (Li Xin). 电磁轨道炮电枢特性理论研究 (Theoretical study on armature characteristics of electromagnetic rail gun) [D]. 南京: 南京理工大学 (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology), 2009.
- [18] 李鹤, 雷彬, 吕庆敖, 等 (Li He, Lei Bin, Lv Qing'ao, et al.). 电磁轨道炮电枢接触界面温度场仿真研究 (Simulation of temperature distribution on contact surface of armature for electromagnetic railgun) [J]. 润滑与密封 (Lubrication and Sealing), 2012, 37 (11): 22-26, 38.
- [19] Li He, Lei Bin, Lv Qing'ao, et al. Analysis on thermal character of interface between rail and armature for electromagnetic railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma

- Science, 2013, 41 (5): 1426-1430.
- [20] 张玉燕, 王微, 王振春, 等 (Zhang Yuyan, Wang Wei, Wang Zhenchun, et al.). 基于红外辐射原理的高速滑动电接触温度测量 (Temperature measurement on high speed sliding electrical contact based on principle infrared radiation) [J]. 光学学报 (Acta Optica Sinica), 2013, 33 (11): 1112004.
- [21] 于海鹰, 李琪, 索琳, 等 (Yu Haiying, Li Qi, Suo Lin, et al.). 分布式光纤测温技术综述 (Performance analysis of distributed fiber sensing technology) [J]. 光学仪器 (Optical Instrument), 2013, 35 (5): 90-94.
- [22] 周广丽, 鄂书林, 邓文渊 (Zhou Guangli, E Shulin, Deng Wenyan). 光纤温度传感器的研究和应用 (Development and application of optical fiber temperature sensor) [J]. 光通信技术 (Optical Communication Technology), 2007, (6): 54-57.
- [23] 程诚, 关永超, 何勇, 等 (Cheng Cheng, Guan Yongchao, He Yong, et al.). 磁探针方法测串联增强型固体电枢电磁轨道炮内弹道速度 (Measurement of solid armature's in-bore velocity using B-dot probes in series enhanced railgun) [J]. 高电压物理学报 (Chinese Journal of High Pressure Physics), 2013, 27 (6): 901-907
- [24] 曹昭君, 何俊佳, 王子建, 等 (Cao Zhaojun, He Junjia, Wang Zijian, et al.). 电磁发射中固体电枢的磁探针测速方法研究 (Research on velocity measurement of solid armature by B-dot probes in electromagnetic launch) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2006, 32 (6): 56-59.
- [25] 刘福才, 李欢, 王大正, 等 (Liu Fucan, Li Huan, Wang Dazheng, et al.). 基于B探针的膛内电枢速度测量系统研究 (Research on velocity measurement of solid armature in electromagnetic launch based on B-dot probes) [J]. 兵工学报 (Acta Armamentarii), 2014, 35 (6): 762-768.
- [26] 徐伟东, 袁伟群, 谢克瑜, 等 (Xu Weidong, Yuan Wei-qun, Xie Keyu, et al.). 电枢膛内位置及速度的直接接触式测量方法 (Direct measurement of position and velocity of armature inside electromagnetic launcher) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (4): 1110-1115.
- [27] Ray W F. Rogowski transducers for high bandwidth high current measurement [A]. IEE Colloquium on Low Frequency Power Measurement and Analysis (Digest No. 1994/203) [C]. 1994. 10/1-10/6.
- [28] 戴建华, 李开成 (Dai Jianhua, Li Kaicheng). 基于Rogowski线圈的大电流测量 (Heavy current measurement based on Rogowski coil) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2002, 28 (1): 1-3.
- [29] 陈允, 徐伟东, 袁伟群, 等 (Chen Yun, Xu Weidong, Yuan Wei-qun, et al.). 电磁发射中铝电枢与不同材料导轨间的滑动电接触特性 (Sliding electrical contact between aluminum armature and different materials rails in railgun) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2013, 39 (4): 937-942.

Study on driving performance of high current linear motor with different initial temperature

KANG Kai^{1,2,3}, XU Wei-dong^{1,3}, XU Rong^{1,3}, YUAN Wei-qun^{1,3}, YAN Ping^{1,3}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The slider between two metal rails can get high speed under the drive of large current, and the thermal characteristics of the contact interface between the slider and the rails can affect the contact condition and the system performance. In this paper, the electric heating device is used to heat the rails, simulating the continuous heat accumulation of the motor by preheating. In the case that the slider type, mass, and driving current are basically consistent, the single starting test of motor is carried out with different initial temperature conditions. The performance of high current linear motor is analyzed by the data of temperature, driving current, voltage and motion speed and so on, laying a theoretical foundation and data support for continuous running test and avoiding transition.

Key words: pulse high current; preheating; linear motor; slider