基于电流丝法的多级同步感应线圈炮电枢温升计算

牛小波1, 刘开培1, 张亚东1, 周 亮2, 令狐选霞2

(1. 武汉大学 电气工程学院, 武汉 430072; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 针对同步感应线圈炮常用的导体圆筒式电枢,结合电流丝法,建立了电枢温升计算模型;通过搭 建三级同步感应线圈炮试验平台,验证了计算模型的正确性,并分析了电枢材料和剖分设置对电枢温升计算的 影响。结果表明:发射过程中电枢的最高温升位于其底部外侧,电枢前端也有较高温升;当调节载荷使铜、铝电 枢等质量时,前者的温升虽然更高,但温升对其发射效率的影响却小于后者,这是因为铜的电阻率温度系数小 于铝;电枢的剖分设置对电枢温升的计算的影响比较明显。因此从电枢温升对发射过程的影响来看,铜电枢比 铝电枢更适合用于高速发射。

关键词:	同步	感应线圈炮;	温升;	电流丝法	去;	电枢		
中图分类	묵.	TM15	文献林	示志码:	А	doi . 10.	.11884/HPLPB201527.	095001

多级同步感应线圈炮(MSSICG)是线圈炮的一种^[1],它具有结构简单、设计灵活多样、电枢与驱动线圈之间不存在直接电接触等优点,可以通过增加驱动线圈的级数来提高弹丸出口速度,因此具有广阔的应用前景。对线圈炮的研究目前主要集中在提高线圈炮的性能上,包括提高出口速度和能量转换效率,而随着励磁线圈级数的增加,电枢的温升就会成为制约线圈炮发射性能的一个重要因素^[2-3]。目前同步感应线圈炮的电枢主要分为绕组线圈式和导体圆筒式两种。导体圆筒式电枢制作工艺简单,因此常被用在发射高速弹丸时^[4]。然而金属圆筒式电枢内的感应涡流分布不均,涡流区主要集中于电枢的尾部^[5],导致该处因涡流密度大而产生很高的温升,降低发射效率^[6-7],甚至使电枢变形或熔化^[8]。文献[9-10]利用 ANSYS 参数化设计语言(APDL)建立电枢和励磁线圈的有限元模型,通过顺序耦合的方法实现电枢的磁场-温度场有限元分析,但利用有限元分析的方法耗时较多,尤其不适用于线圈级数较多的情况。本文结合电流丝法,建立了计算电枢温升的数学模型,以二十五级驱动线圈加速电枢为例计算电枢的温升并分析了影响电枢温升计算的因素。

1 数学模型

线圈炮是由脉冲电源、高速开关、激励线圈、电枢、射弹5个主要部分组成。其工作原理主要是基于法拉第 电磁感应定律和洛伦兹力公式。驱动线圈回路导通后,回路中脉冲电流产生的瞬变磁场如图1(a)所示,根据 楞次定律,导体电枢内感应出与线圈电流方向不同的轴向涡流电流,并因线圈内磁场强度分布不同,而在不同



Fig. 1 Principle of coilgun 图 1 线圈发射器原理示意图

* 收稿日期:2015-01-22; 修订日期:2015-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51407130);教育部支撑技术项目(62501040409);中国博士后科学基金特别资助项目(2013T60737);上 海航天科技创新基金项目(SAST 201305)

作者简介:牛小波(1988-),男,硕士,从事电磁发射技术研究;1215409612@qq.com。

通信作者:张亚东(1984—),男,副研究员,从事脉冲功率技术、电磁发射技术、电磁屏蔽技术研究;yd0439@qq.com。

部位上感应出强度不同的电流,如图 1(b)所示。磁场与 该涡流的相互作用使得电枢在洛伦兹力的作用下沿炮 管向炮口方向推进,当电枢到达合适的位置时,导通下 一级线圈以同样的方式推动电枢,直至最后一级线圈将 射弹射出。基于该原理,可通过不断增加激励线圈的级 数而使电枢获得较大的出口速度。目前分析线圈炮性 能的方法主要包括电流丝法和有限元法,其中电流丝法 原理简单、易于编程且求解快速,因而使用较广泛^[12]。 因此本文采用该方法来分析电枢的温升。

在线圈炮的发射过程中,由于趋肤效应,导体圆筒 式电枢内的感应涡流沿轴向分布不均^[12],电流丝法的基 本思想就是将电枢划分为 m 个同心圆环,则当圆环的轴 向截面足够小时,可认为感应电流在该截面上是分布均 匀的。这意味着可用 m 个同心电流丝环路来等效原电 枢,基于电流丝法的模型如图 2 所示。通过列写电路方 程和运动方程便可求解。



Fig. 2 Equivalent circuit of current filament method 图 2 电流丝模型的等效电路图

1.1 电路方程

根据 Kirchhoff 定理,建立第 i 级激励线圈的回路方程

$$U_{i} = R_{ci}I_{ci} + L_{ci}\frac{dI_{ci}}{dt} + \sum_{k=1}^{i-1}M_{ccki}\frac{dI_{ck}}{dt} + \sum_{j=1}^{m}\frac{d}{dt}(M_{caij}I_{aj})$$
(1)

式中: U_i 为第 i 级激励线圈的端电压; R_{ci}和L_{ci}分别为第 i 级激励线圈的内阻和电感; I_{ci} 为第 i 级激励线圈的 电流; M_{cobi} 为第 k 级激励线圈与第 i 级激励线圈之间的互感; M_{caij} 为第 i 级激励线圈与电枢中第 j 个电流丝之 间的互感; I_{aj} 为电枢中第 j 个电流丝的电流; k, i 为激励线圈的级数变量; j 为电枢中电流丝的个数变量; m 为 电枢中电流丝总数。

式(1)中第 i 级激励线圈的端电压满足

$$U_{i} = U_{i0} - \frac{1}{C_{i}} \int_{t_{i}}^{t} I_{ci} dt \quad (t \ge t_{i})$$

$$\tag{2}$$

式中:Ci为第i个驱动线圈的储能电容值。

同样,根据Kirchhoff 定理,建立第 j 个电流丝的回路方程

$$R_{aj}I_{aj} + L_{aj} \frac{dI_{aj}}{dt} + \sum_{k=1}^{i} \frac{d}{dt} (M_{ackj}I_{ck}) + \sum_{k=1, k\neq j}^{m} M_{aajk} \frac{dI_{ak}}{dt} = 0$$
(3)

式中: R_{aj} , L_{aj} 分别是第j(j取1~m)个电流丝环路的等效电阻和等效电感; M_{aajk} 为电枢中第j个电流丝与第k个电流丝之间的互感。

由于各级线圈之间、各个电流丝环路之间保持相对静止,因此各级线圈之间、各个电流丝环路之间的互感 梯度为零,式(1)和式(3)的微分项展开得

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(M_{\mathrm{caij}}I_{\mathrm{aj}}) = I_{\mathrm{aj}} \frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{caij}}}{\mathrm{d}z} \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} + M_{\mathrm{caij}} \frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{aj}}}{\mathrm{d}t} = I_{\mathrm{aj}} \frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{caij}}}{\mathrm{d}z} v + M_{\mathrm{caij}} \frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{aj}}}{\mathrm{d}t}$$
(4)

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(M_{\mathrm{ackj}}I_{\mathrm{ck}}) = I_{\mathrm{ck}} \frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{ackj}}}{\mathrm{d}z} \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} + M_{\mathrm{ackj}} \frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{ck}}}{\mathrm{d}t} = I_{\mathrm{ck}} \frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{ackj}}}{\mathrm{d}z}\upsilon + M_{\mathrm{ackj}} \frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{ck}}}{\mathrm{d}t}$$
(5)

整理式(1)~(5)并写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}\mathbf{U} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}\mathbf{R}_{c} \ \mathbf{Q}^{T} & v \ \mathbf{Q}\dot{\mathbf{M}}_{ca} \\ \dot{v}\mathbf{M}_{ac} \ \mathbf{Q}^{T} & \mathbf{R}_{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}\mathbf{I}_{c} \\ \mathbf{I}_{a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Q}\mathbf{L}_{c} \ \mathbf{Q}^{T} & \mathbf{Q}\mathbf{M}_{ca} \\ \mathbf{M}_{ac} \ \mathbf{Q}^{T} & \mathbf{L}_{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{I}}_{c} \\ \dot{\mathbf{I}}_{a} \end{bmatrix}$$
(6)

其中:

$$\mathbf{R}_{c} = \begin{bmatrix} R_{c1} & 0 \\ R_{c2} & \\ 0 & R_{cn} \end{bmatrix}_{n \times n}^{r}, \qquad \mathbf{L}_{c} = \begin{bmatrix} L_{c1} & M_{cc12} & \cdots & M_{cc1n} \\ M_{cc21} & L_{c2} & \cdots & M_{cc2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{cn1} & M_{ca12} & \cdots & \dot{M}_{ca1m} \\ \dot{M}_{ca21} & \dot{M}_{ca22} & \cdots & \dot{M}_{ca2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{M}_{can1} & \dot{M}_{can2} & \cdots & \dot{M}_{canm} \end{bmatrix}_{n \times m}^{r}, \qquad \mathbf{M}_{ca} = \begin{bmatrix} M_{ca11} & M_{ca12} & \cdots & M_{ca1m} \\ M_{ca21} & M_{ca22} & \cdots & \dot{M}_{ca2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{can1} & M_{can2} & \cdots & \dot{M}_{canm} \end{bmatrix}_{n \times m}^{r}, \qquad \mathbf{M}_{ca} = \begin{bmatrix} M_{ca11} & M_{ca12} & \cdots & M_{ca1m} \\ M_{ca21} & M_{ca22} & \cdots & M_{ca2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{can1} & M_{can2} & \cdots & M_{canm} \end{bmatrix}_{n \times m}^{r},$$

$$\boldsymbol{M}_{ac} = \boldsymbol{M}_{ca}^{\mathrm{T}}; \qquad \boldsymbol{M}_{ac} = \boldsymbol{M}_{ca}^{\mathrm{T}}$$
(7)

考虑到矩阵维数随着导通的线圈级数的增大而增大,所以引入矩阵Q,即

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{i \times n} (i = 1, 2, \cdots, n)$$
(8)

1.2 运动方程

根据虚功原理可知电枢沿轴向所受的电磁力为

$$F_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ci} I_{aj} \frac{\mathrm{d}M_{acij}}{\mathrm{d}z}$$
(9)

根据牛顿第二定律可得电枢的运动方程为

$$m_{a} \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} I_{ci} I_{aj} \frac{\mathrm{d}M_{acij}}{\mathrm{d}z}$$
(10)

式中:m。为电枢的质量;v为电枢的运动速度。

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} = v \tag{11}$$

联立方程(1)~(11)即构成电流丝法数学模型,结合数值计算的方法,利用 Matlab 编程即可实现 n 级线圈 炮的动态发射过程仿真。

1.3 温升计算数学模型

考虑到线圈炮的发射过程时间极短,认为发射过程是绝热的,因此根据欧姆定律得

$$RI^{2} = c_{p}(t)m_{p}\frac{\partial T}{\partial t}$$
(12)

式中: cp(t)为电枢材料的比热容,认为是随温度变化的; mp为电枢中电流丝的质量; T为温度; R为电枢中电流丝的电阻; I为电流。

材料的比热容在室温和熔化温度之间是相对恒定的^[1],但为了更准确地计算电枢材料的温升,仍然引用文 献[1]中给出的电枢材料比热容与温度之间的简单关系模型,而通常研究更多的是铝电枢和铜电枢在室温下的 发射过程,因此列写铝和铜的比热容从室温到熔化温度的变化

$$\begin{cases} c_{\rm AI}(T) = 0.819 \exp(3.07 \times 10^{-4} T) & (293 \text{ K} \leqslant T \leqslant 933 \text{ K}) \\ c_{\rm Cu}(T) = 0.333 \exp(3.917 \times 10^{-4} T) & (293 \text{ K} \leqslant T \leqslant 1356 \text{ K}) \end{cases}$$
(13)

式中: c_{Al}(T), c_{Cu}(T)分别为铝和铜的比热容。

忽略影响电枢材料电阻率的磁致电阻效应而只考虑影响其电阻率的最主要因素即温升,电枢导体材料的 电阻率满足关系式

$$\rho_1 = \rho_2 \left(1 + \beta \Delta T \right) \tag{14}$$

式中: ρ_1 , ρ_2 分别是线圈炮发射前后电枢的电阻率; β 为电枢材料的电阻温度系数,铜和铝分别取 4.1×10⁻³ K⁻¹ 和 4.2×10⁻³ K⁻¹; ΔT 为温升。

将铜和铝的电阻温度系数代入式(14)可得两种材料受热后体电阻率的变化,即

由于将整个发射过程认为是绝热的,因此在每个时间步后第 k 个电流丝环路的温度(T_{k,n})为

$$T_{k,n} = \frac{I_{k,n-1}^2 R_{k,n-1} \Delta t}{m_n c_{k,n-1}} + T_{k,n-1}$$
(16)

式中: $I_{k,n-1}$ 为第 k 个电流丝在第 n-1 个时间步内的电流; $R_{k,n-1}$ 为第 k 个电流丝在第 n-1 个时间步内的电阻; $T_{k,n-1}$, $T_{k,n}$ 分别为第 k 个电流丝在第 n-1 和第 n 个时间步内的温 度; $c_{k,n-1}$ 为第 k 个电流丝在第 n-1 个时间步内的比热容; Δt 为一个时间步长。

然后将第 n 个时间步内的温度 T_n代入式(13)~(15)可 求得在该时间步后的比热容、电阻率和电阻并继续下一时间 步的计算,因此利用电流丝法计算温升的基本流程如图 3 所 示。

2 试验验证

为了验证本文同步感应发射器软件编辑的正确性,搭建 了三级同步感应线圈发射器试验平台,采用三级线圈发射器 将5kg的铝筒电枢发射至23m/s。三级线圈及电枢的结构 如图4所示;采用高速摄影仪捕捉电枢的运动轨迹进行测 速,效果如图5所示;电枢试验速度拟合曲线和仿真速度曲 线的比较如图6所示。在速度达20m/s之前,两曲线吻合 程度较好,超过该值后开始出现偏差。这是由于试验中高速 摄影仪的拍摄精度无法满足要求,以至于电枢速度达到该值 后,高速摄影仪捕拍摄的电枢照片轮廓越来越模糊,难以准 确判断出电枢的位置,从而造成了速度测试曲线尾部的误差。



Fig. 3 Flow chart of armature temperature rise calculation 图 3 电枢温升计算流程图

确判断出电枢的位置,从而造成了速度测试曲线尾部的误差。由上述试验结果可知,本文所建立的模型及所编 程序是正确的。



在上述试验中,计算得到的电枢最高温升只有 2.3 ℃,且由于电枢在一个开放环境下,铝电枢的传热非常快,试验后基本感觉不到电枢的温度变化。因此本试验由于电源能量有限,电枢出口速度不高,未能达到验证 电枢温升的效果,电枢温升问题的研究需要进一步开展试验验证。本文对电枢的温升开展了仿真研究。

3 温升仿真结果

根据建立的同步感应线圈炮的数学模型,在 MATLAB 中编程实现其动态过程的仿真。驱动线圈共 25 级,每级的储能电容值为 240 μF,充电电压为 4 kV,电枢采用质量为 1 kg 的圆筒式铝电枢,初始温度设为 20 ℃。图 7 为电枢采用的均匀剖分设置;图 8 为计算出的电枢温升分布;图 9 为从 25 级线圈中随机选取的几级

线圈的电流曲线;图 10 为铝电枢的速度曲线。



图 9 铝电枢时选取的线圈电流曲线

图 10 铝电枢的速度曲线

定义线圈炮的能量转换效率为电枢(包括载荷)的出口动能与储能电容初始储能之比,即

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\frac{1}{2}nCU^2} = \frac{mv^2}{nCU^2}$$
(17)

根据式(17)分别计算铝电枢在考虑温升和不考虑温升时的效率,结果如表1所示。

表 1 圆筒式铝电枢的仿真结果

Table 1Simulation results of	cylindrical	aluminum	armature
------------------------------	-------------	----------	----------

temperature rise considered	velocity at muzzle/(m \cdot s ⁻¹)	maximum temperature rise/°C	efficiency/%
yes	83.0	6.7	7.17
no	87.5	_	7.97

由于考虑了电枢因发热而损耗的能量,电枢的出口速度减小,能量的转换效率降低。另外,从图 8 中可看 出电枢的最高温升点位于电枢底部的最外侧,温升沿轴向从底端到前端呈逐渐减小的趋势,而在最前端出现温 升增大的趋势。但由于本文中电枢的加速时间短、出口速度小,所以电枢经加速后温升并不是很明显,对发射 过程的影响也并不是很明显,但可以预测随着发射级数的继续增加,出口速度继续增大,电枢的温升将会对发 射过程产生明显的影响。

4 影响温升计算的因素

在电枢的发射过程中,有诸多因素能够影响电枢温升的计算,比如电枢材料的热导率、电枢的剖分设置、是 否考虑电枢热量的辐射、所加载驱动电流的大小等。本文中仅仅分析电枢材料和剖分设置对电枢温升计算的 影响,其中电枢材料包括铜和铝;剖分设置包括剖分是否均匀和剖分密度大小。

4.1 电枢材料

为了分析铜电枢和铝电枢各自在发射过程中的温升计算,假设两种材料的电枢的质量相等,铝电枢的温升

分布如图 8 所示,铜电枢的温升分布如图 11 所示;在考虑温升情况下两种材料电枢的速度曲线如图 12 所示; 为直观地对比两种材料的电枢在考虑温升后的发射性能,将仿真结果归结为表 2。

夜 4 两种树种的电他的历县结本	表:	2 两	种材	料的	电枢	的仿	真结	i果
------------------	----	-----	----	----	----	----	----	----

Table 2 Simulation results of cylindrical armature of different materials						
motorial	velocity/	maximum	efficiency with considering	efficiency without considering		
material	$(m \cdot s^{-1})$	temperature rise/°C	temperature rise/ %	temperature rise/ %		
copper	103	14.0	11.05	12.15		
aluminum	83	6.7	7.17	7.97		

从计算结果可知,当两电枢的体积相等而通过调节载荷使其质量相等时,铝电枢的出口速度明显低于铜电 枢,因此铝电枢在炮管内的发热时间更长。虽然由于铝电枢中感应涡流小,最高温升并没有铜电枢大,但由于 铜的电阻率温度系数远小于铝,因此温升对铜的电阻率的影响小于铝,尤其当高速发射导致电枢温升很大时, 温升差别将更加明显。因此在高速发射条件下推荐使用铜电枢。



4.2 剖分设置

由于励磁线圈磁场在电枢内部有较明显的趋肤效应,导致电枢内的电流密度分布不均,所以在对电枢进行 剖分时,电枢的剖分密度和剖分均匀性会对温升的计算结果有一定的影响。

为分析剖分的均匀性对温升计算的影响,以铝电枢(未加载荷)为例,将电枢外侧剖分细致而将内侧剖分稀 疏,即采取如图 13 所示的不均匀剖分;计算得到的铝电枢的温升分布如图 14 所示。



为了直观地体现剖分均匀性对电枢温升计算的影响,将铝电枢(未加载荷)采用图 7 和图 13 所示的两种剖 分设置的计算结果归结为表 3。 表 3 剖分均匀性对铝电枢温升计算的影响

Table 3	Influence of subdivision homoger	neity on aluminum arma	ture temperature rise calculation
division	velocity/($m \cdot s^{-1}$)	efficiency/%	maximum temperature rise/°C
uniform	143.0	6.40	11.8
ununiform	142.5	6.35	12.6

为了直观体现剖分密度对电枢温升计算的影响,仍以铝电枢为例,采用均匀剖分,只是将径向剖分数改为 2,轴向剖分数不变,计算的结果如表 4 所示。

Table 4	Simulation result of	' aluminum	armature w	vith different	density	uniform subdivision	ı.

division	velocity/($m \cdot s^{-1}$)	efficiency/ %	maximum temperature rise/°C
uniform 3(radial)×15(axial)	143.0	6.40	11.8
uniform $2(radial) \times 15(axial)$	143.2	6.41	11.0

由表 3 和表 4 可知,电枢剖分的均匀性和细致程度对电枢发射效率的计算结果影响并不是很大,但是对 电枢温升的计算结果影响却较明显,尤其是当电枢加速至 km/s 以上时,必须考虑电枢的温升问题,该结论有 利于指导高速电磁线圈发射器电枢的设计。

5 结 论

本文基于电流丝法建立了多级同步感应线圈炮的电枢温升计算模型,搭建了三级线圈炮的试验平台,验证 了所建模型和编制软件的正确性,然后建立了 25 级同步感应线圈发射器仿真模型,对圆筒电枢的加速特性和 温升特性进行了计算,并从电枢材料和剖分设置两方面分析了其对温升计算的影响。结果表明:在感应线圈炮 的发射过程中,由于趋肤效应,电枢内感应出的涡流分布不均匀,最高温升分布于电枢底部的外侧,另外电枢前 端外侧也会有较高的温升;通过调节载荷使得两种电枢的质量相等时,虽然铝电枢的发热时间更长,铜电枢的 温升却高于铝电枢,这是因为铜电枢内的感应涡流要远大于铝电枢。然而由于铜的电阻率温度系数要小于铝, 因此温升对铜电枢发射效率的影响小于铝电枢。因此,在实现高速发射时,从电枢温升对发射过程的影响来 看,铜电枢比铝电枢更具优势。另外,受目前试验条件的限制,无法实现高速,电枢温升并不明显,因此需进一 步完善试验条件以验证电枢温升计算模型的正确性。

参考文献:

- [1] 王莹,肖峰.电炮原理[M].北京:国防工业出版社,1995:93-97. (Wang Ying, Xiao Feng. Theory of electric gun. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 93-97)
- [2] Kou B Q, Huang X Z, Wu H X, et al. Thrust and thermal characteristics of electromagnetic launcher based on permanent magnet linear synchronous motors[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 2009, **45**(1): 358-362.
- [3] Engel T G, Nunnally W C, Gahl J M. High-efficiency helical coil electromagnetic launcher[R]. Directorate for Information Operations and Reports, Dept of Electrical Engineering, College of Engineering, University of Missouri, Columbia, 2006.
- [4] Aubuchon M S, Lockner T R, Turman B N. Results from Sandia National Laboratories/Lockheed Martin electromagnetic missile launcher (EMML) [J]. IEEE Trans on Magnetics, 2005, 41(1): 75-78.
- [5] Marder B. SLINGSHOT—a coilgun design code[R]. SAND2001-1780, 2001.
- [6] Zhang Y D, Ruan J J, Wang Y, et al. Armature performance comparison of an induction coil launcher[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2011, 39(1): 471-475.
- [7] 张朝伟,邓启斌,汤磊,等. 同步感应线圈炮电枢特性分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2011, 17(3):14-18. (Zhang Chaowei, Deng Qibin, Tang Lei, et al. Armature characteristics analysis of synchronous induction coilgun. *Journal of Gun Launch & Control*, 2011, 17(3): 14-18)
- [8] Barmada S, Musolino A, Raugi M, et al. Analysis of the performance of a multi-stage pulsed linear induction launcher[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2001, 37(1): 111-115.
- [9] 邹本贵,曹延杰,王成学,等. 单级同步感应线圈炮电枢的磁场-温度场有限元分析[J]. 电机与控制学报,2011, 15(2): 42-46. (Zou Bengui, Cao Yanjie, Wang Chengxue, et al. Finite element analysis of magnetic-thermal fields for armature in single-stage synchronous induction coilgun. *Electric Machines and Control*, 2011, 15(2): 42-46)
- [10] 关晓存,李治源,赵然,等. 线圈炮电枢电磁-热耦合仿真分析[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 2267-2271. (Guan Xiaocun, Li Zhiyuan, Zhao Ran, et al. Magnetic-thermal coupling simulation analysis for armature in coilgun. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23 (8): 2267-2271)

- [11] Liu S B, Ruan J J, Peng Y, et al. Improvement of current filament method and its application in performance analysis of induction coilgun
 [J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2011, 39(1): 382-389.
- [12] 赵科义,李治源,程树康,等. 同步感应线圈炮内磁场及涡流场的有限元分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 492-495. (Zhao Keyi, Li Zhiyuan, Cheng Shukang, et al. Finite element analysis of magnetic field and eddy field in synchronous induction coilgun. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(3): 492-495)

Calculation of temperature rise of armature in multi-stage synchronous inductive coilgun based on current filament method

Niu Xiaobo¹, Liu Kaipei¹, Zhang Yadong¹, Zhou Liang², Linghu Xuanxia²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Shanghai Mechanical-Electronic Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The conductor cylinder armature is commonly used in synchronous induction coilgun. A model is developed to calculate the temperature rise of the armature based on the current filament method. The correctness of the model is verified by setting up a 3-stage synchronous induction coilgun test platform. The influence of the armature material and division setting on the temperature rise is analyzed. The result shows that the maximum temperature rise of the armature concentrates in the exterior surface of the tail, and there is a high temperature rise in the front of the armature. When the payload is adjusted to make the quality of the copper armature and the aluminum armature equal, the temperature rise of the former is higher while the influence of the temperature rise on its emission efficiency is lesser than the latter, because the temperature coefficient of resistivity of copper is less than that of aluminum. In addition, the influence of division setting on the calculation results is obvious. From the point of view of influence of the temperature rise on the emission process, the copper armature is more suitable for high-speed emission than aluminum armature.

Key words: multi-stage synchronous inductive coilgun; temperature rise; current filament method; armature PACS: 41.75. Lx; 91.25. Qi; 84.30. Sk