

单级电磁感应线圈发射器温升研究*

熊 敏¹, 张亚东¹, 龚宇佳², 张 虎²

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 武汉 430072; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074)

摘 要: 同步感应式线圈型电磁发射器主要采用脉冲电流对线圈直接供电, 其实际工作过程中电枢和线圈会产生温升, 这是当前制约线圈发射器向小型化、高速发展的一个主要因素。本文通过建立电磁线圈的温升模型, 对于单次触发的情况, 分别利用 Comsol 和自编程序 Coilgun 进行计算, 并搭建相应的试验平台进行验证。采用直接耦合方式的 Comsol 计算结果最为准确, 也能考虑材料参数随温度的变化。仿真得到电枢的温升大约为 4.2 °C, 线圈最大温升为 7.7 °C。由于热电偶温度传感器的测量延迟性与采样频率的限制, 电枢温度试验曲线未能测量到仿真曲线中出现的温度最大值点, 可记录到整个试验过程中温度变化曲线, 其变化形势以及最终稳定的温度与仿真的基本一致, 误差最大为 6.1%, 说明了仿真的准确性。为后续进行多级线圈连续发射奠定基础。

关键词: 电磁线圈; 温升计算; 温升试验; 实时测温

中图分类号: TM15

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190300

Study on temperature rise of electromagnetic coil launcher

Xiong Min¹, Zhang Yadong¹, Gong Yujia², Zhang Hu²

(1. School of Electrical and Automation Chemistry, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Electric Power Research Institute Co Ltd, Wuhan 430074, China)

Abstract: Synchronous induction coil launcher mainly uses pulse current to supply power directly to the coil. The temperature rise of armature and coil will occur in the actual working process, and it is a major factor restricting the development of coil launcher to miniaturization and high speed. In this paper, the temperature rise model of electromagnetic coil is established. For single trigger, Comsol and self-programmed Coilgun are used to calculate, and the corresponding test platform is built to verify the temperature rise. The Comsol method with direct coupling is the most accurate method, and the change of material parameters with temperature can also be considered. The simulation results show that the temperature rise of armature is about 4.2 °C and the maximum temperature rise of coil is 7.7 °C. Because of the limitation of measurement delay and sampling frequency of thermocouple temperature sensor, the armature temperature test curve can not measure the maximum temperature point in the simulation curve, it can record the temperature change curve in the whole test process. The change of temperature and the final stable temperature are basically consistent with that of the simulation. The maximum error is 6.1%, which shows the accuracy of the simulation. This study lays a foundation for subsequent multi-stage coil continuous launching.

Key words: electromagnetic coil; temperature rise calculation; temperature rise test; real-time temperature measurement

电磁发射技术是指将电能转换成电磁能, 利用电磁力加速物体使其达到规定速度的现代发射技术^[1-2]。对线圈发射器的研究主要集中在提高其性能上, 包括提高出口速度和效率。随着激励线圈级数的增多, 电枢的温升就会变成制约其发射性能的一个主导因素^[3-4]。导体圆筒式电枢的制作工艺相对简单, 但其内部的感应涡流分布不均匀, 涡流区主要集中在电枢的尾部^[5], 导致该处因涡流过大产生较大的温升, 降低线圈发射器的发射效率^[6-7], 甚至使电枢变形或熔融^[8]。牛小波等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, 计算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^[9]。西北机电工程研究所的张涛对六级同步感应线圈炮的温度场进行了研究, 采用电流丝法构建电磁-热耦合仿真模型。在多物理场

* 收稿日期: 2019-08-15; 修订日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977152); 湖北省自然科学基金项目(2019CFB430)

作者简介: 熊 敏(1994—), 男, 硕士, 从事电磁发射技术研究; 1376758757@qq.com。

仿真中考虑单向耦合和双向耦合的情况下计算温度分布,得到电枢高温上升的区域位于外表面和后部。单向耦合计算的温升高于双向耦合计算的温升。计算结果表明,温升改变了材料的导电性,并且电枢中的电流重新分布,因此导致局部温度降低^[10]。

上述研究表明,电磁感应线圈发射器工作在电磁场-温度场相互耦合作用的复杂环境中。因此本文对线圈发射器的温度场采用了多种方法进行仿真,并结合仿真进行了相应的测量,为后续抑制温升奠定一个基础。

1 数学模型

1.1 线圈炮基本工作原理介绍

由于集肤效应的影响,电枢轴向剖面上感应电流的分布是不均匀的。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,可以认为感应电流在该截面上是均匀分布的,即用 m 个“电流丝”环路来等效原电枢。假设励磁线圈共有 k 级。在线圈炮发射过程中励磁电流是瞬变的,以电阻、自感、互感、电感梯度等为参数,可建立各级线圈的集总参数模型(图 1),最后归结为非线性变系数常微分方程的初值问题^[11-12]。

根据 Kirchhoff 电压定理,将系统方程用矩阵形式表示为

$$(L+M) \frac{dI}{dt} = V_c - RI - v \frac{dM}{dx} I \quad (1)$$

电容器电压和励磁电流之间的关系为

$$C \frac{dV_c}{dt} = -I_d \quad (2)$$

线圈发射器系统的运动控制方程为

$$m_p \frac{dv}{dt} = \sum_{p=1}^m \sum_{d=1}^n I_p I_d \frac{dM_{pd}}{dx} \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (4)$$

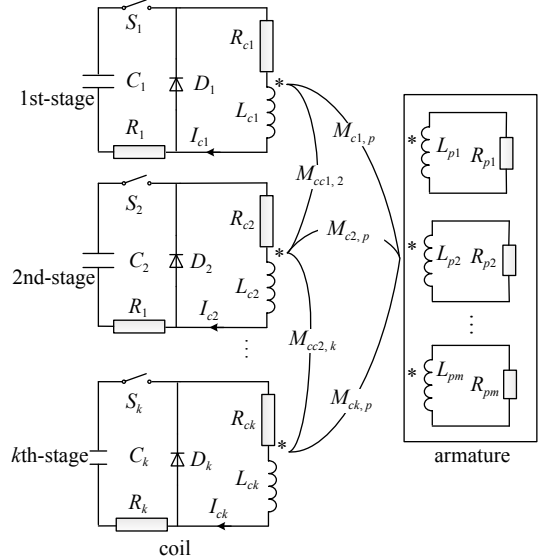


Fig. 1 Lumped parameter model of class k synchronous induction coil transmitter

图 1 k 级同步感应线圈发射器的集总参数模型

式中: I 为线圈和电枢电流丝电流构成的列向量; R 为线圈电阻和电枢电流丝电阻构成的对角矩阵; L 为电流丝电感和线圈电感构成的对角矩阵; M 为线圈间、电流丝间以及线圈与电流丝之间的互感; C 和 V_c 分别是电容器的电容值及其端电压向量; x 和 v 分别是电枢的运动速度和位置; m_p 是电枢质量。对于非线性变系数常微分方程的初值问题的求解采用四阶龙格库塔算法进行求解,便可得到整个发射过程中电枢温度、线圈温度随时间的变化情况。

1.2 温升对材料特性的影响

采用电流丝模型法计算时,考虑了每个步长里温度对材料电阻率与比热容的影响,根据温度计算结果改变下一步长的电阻率与比热容,其中,铜导体与铝导体的材料参数随温度变化式如下式所示。式中 T 表示温度,单位 $^{\circ}\text{C}$ 。

$$C_{Al} = 819 \times e^{0.000374 \times (273+T)} \quad (5)$$

$$\rho_{Al} = 2.63 \times 10^{-8} \times [1 + 0.00429 \times (T - 20)] \quad (6)$$

$$C_{Cu} = 834 - 4007 \times \lg(273 + T) + 4066 \times \lg(273 + T)^2 - 1463 \times \lg(273 + T)^3 + 179.7 \times \lg(273 + T)^4 \quad (7)$$

$$\rho_{Cu} = 1.72 \times 10^{-8} \times [1 + 0.00393 \times (T - 20)] \quad (8)$$

1.3 基于 Coilgun 的单次脉冲放电理论温升计算

线圈示意图及外电路图如图 2 所示,电磁感应线圈发射器参数如表 1 所示。

完全不散热情况下电枢的理论均匀温度计算如下:电枢中产生的总热量可以采用电流丝法计算得到,将电枢电流丝产生的热量相加,可以得到 $Q_a = 294.6343 \text{ J}$,假设热量传导均匀且不与外界进行热交换,根据式(9)可以算出, $\Delta T_a = 0.42 \text{ K}$ 。

$$Q_a = cm\Delta T_a \quad (9)$$

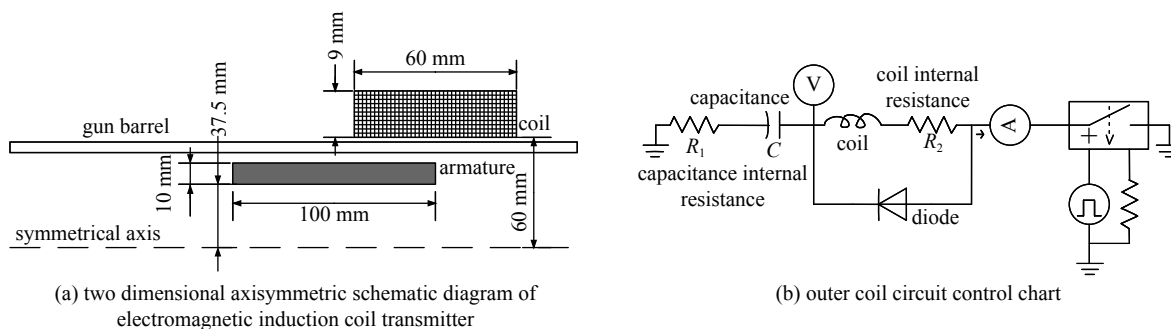


Fig. 2 single stage electromagnetic induction coil transmitter model and corresponding parameters

图 2 单级电磁感应线圈发射器模型及相应参数

表 1 电磁感应线圈发射器参数

Table 1 Electromagnetic induction coil launcher parameters

internal diameter/mm	thickness/mm	length/mm	turns	internal diameter/mm	length/mm	capacitance/mF	voltage/V
armature				coil		power supply	
37.5	10	100	26	60	60	2	1300

同理,线圈中产生的总热量可以计算得到 $Q_c=1397\text{ J}$, $\Delta T_c=7.78\text{ K}$ (图 3)。

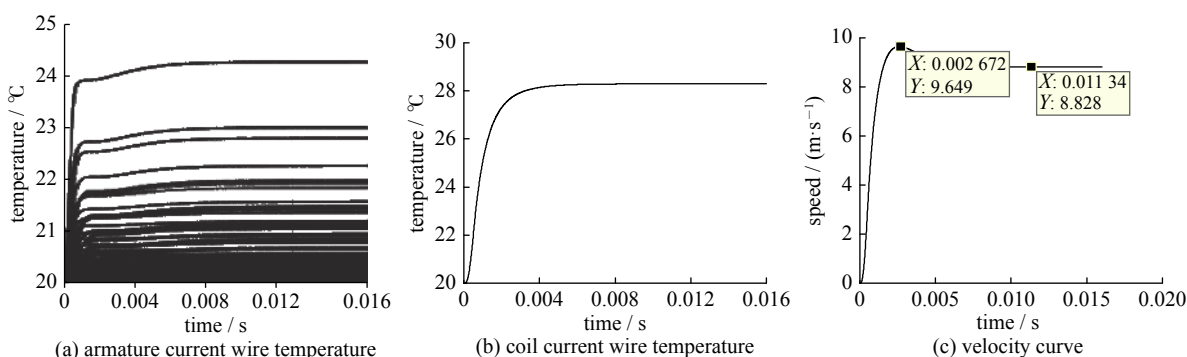


Fig. 3 Temperature rise of coil and armature and armature speed curve

图 3 线圈和电枢温升变化以及电枢速度曲线

2 基于 Comsol 的单次脉冲放电温升计算

2.1 散热系数的确定

电磁线圈发射器中产生的热量主要是通过线圈与电枢的对流换热与热辐射散发出去。对流换热系数的大小不仅与电枢和线圈表面的形状有关,也与附近空气流体的物理性质有关。线圈与电枢的辐射系数可以由公式(10)计算。线圈与电枢表面对流换热系数的计算过程中若不考虑表面几何参数,可以视作发射器电枢与线圈表面的散热系数只和外部空气的流动速度及周围环境温度有关,可由公式(10)计算。

$$h_r = \sigma \varepsilon (T_m^2 + T_0^2) (T_m + T_0) \quad (10)$$

$$\beta = 14(1 + 0.5 \sqrt{\omega_i}) \sqrt{T_0/25} \quad (11)$$

式中: h_r 为辐射换热系数; σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数; ε 为线圈或电枢的辐射率; T_m 为分析实体的温度; T_0 为环境温度; β 为对流散热系数; ω_i 为空气流速。

当空气流速为 0 时,对流换热系数的计算与环境温度有关,式(11)可简化为

$$\beta = 14\sqrt{T_0/25} \quad (12)$$

当电枢温度变化范围不大时可认为辐射散热系数不变,试验模型满足此条件。并且试验中为了方便测量电枢的温度,将电枢进行固定,视为空气流速为 0,综合考虑电枢的对流换热与辐射散热,取散热系数 $\alpha=11.4(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1})$ 。

2.2 基于 Comsol 的线圈触发温升计算

Comsol 多物理场仿真采用直接耦合的方式。设置初始条件与边界条件,仿真得到单级线圈发射器模型的电

磁-温度场结果。在 Comsol 多物理场仿真中采用二维轴对称模型计算,环境温度设置为 20 ℃,计算环境同样视为绝热,最后仿真得到线圈电流波形和电枢速度波形如图 4 所示。由图可知,电枢的最高速度为 8.569 m/s,出口速度为 8.286 m/s。线圈电流峰值为 5 861.5 A。其中,需要注意的是,在 Comsol 中搭建耦合模型,电流的测量需要一个安培计,此处流过安培计的电流即是通过线圈的电流。

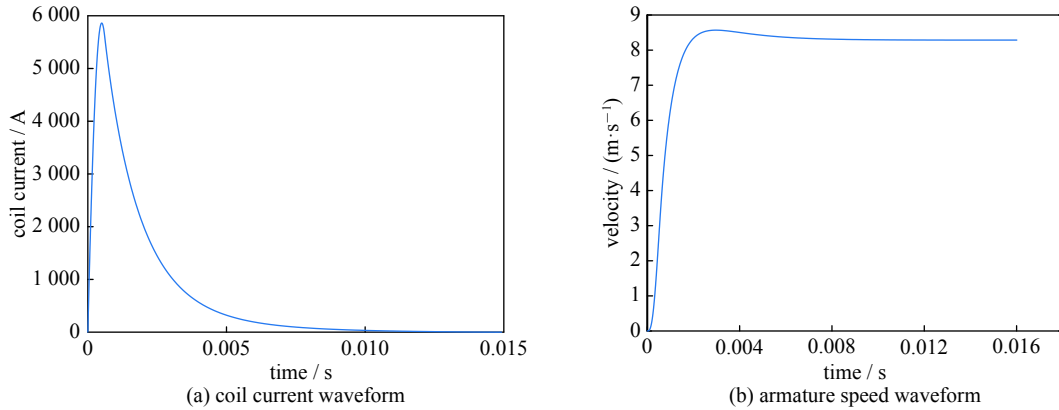


Fig. 4 Calculation results of motion field of coil launcher

图 4 线圈发射器运动场计算结果

Comsol 与基于电流丝法的程序计算结果如表 2 所示。

表 2 单级电磁感应线圈发射器结果对比

Table 2 Comparison of single stage electromagnetic induction coil transmitter results

method	comsol multiphysical field simulation	current wire model method
outlet velocity/(m·s ⁻¹)	8.286	8.827
maximum speed/(m·s ⁻¹)	8.569	9.644
maximum coil temperature/°C(t=0.016 s)	28.03	28.29
armature maximum temperature/°C(t=0.016 s)	24.10	24.23
maximum coil temperature/°C(whole process)	28.05	28.29
armature maximum temperature/°C(whole process)	25.41	24.23

对比上述计算结果,两者计算结果基本一致。Comsol 仿真中采用直接耦合方式,计算结果应当是最准确的。在电流丝模型法中,计算过程未能考虑模型的热传导与散热过程,因此线圈的温度与电流丝的温度均高于其他仿真方法。最后确定选择 Comsol 作为仿真的软件,其可以考虑散热情况,也能与试验较好地验证。

单级电磁感应线圈发射器的磁场分布和温度分布如图 5 所示。取电枢底部外侧的单元与线圈导线内部的单元求解单元,电枢底部最外侧的坐标为(0.047 5, 0),取电枢底部外侧单元坐标为(0.047 499 9, 0.000 01),线圈导线内部的单元坐标为(0.06, 0),分别求取电枢底部与线圈导线内部的温度随时间变化的曲线,位置示意图与求得的温度随时间变化曲线如图 6 所示。

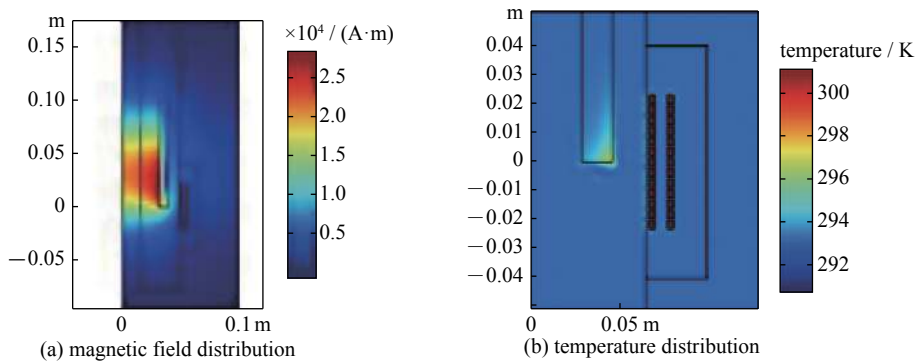


Fig. 5 Single-stage coil emitter results (t= 0.016 s)

图 5 单级线圈发射器结果 (t=0.016 s)

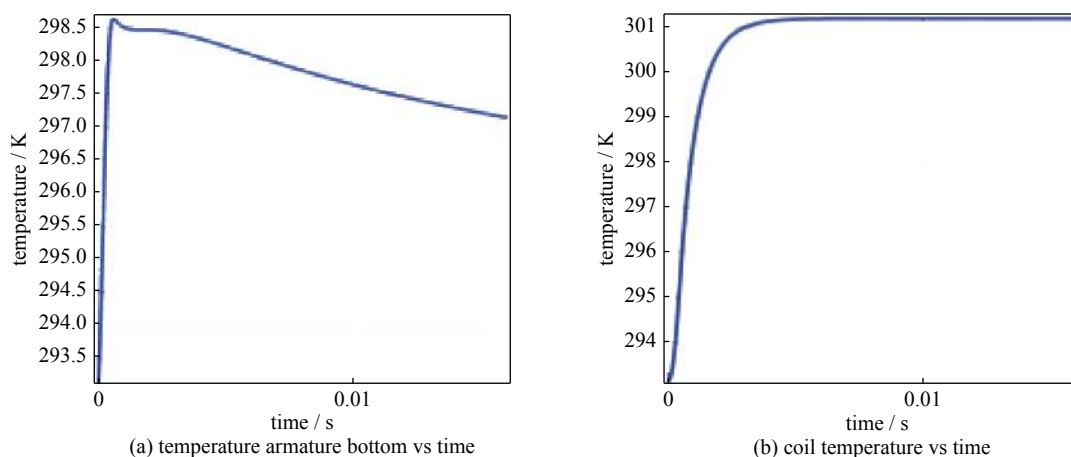


Fig. 6 Temperature variation of a specific unit over time

图 6 特定单元温度随时间变化图

由图 5 和图 6 可知,电枢尾部外侧单元在 $t=0.016$ s 时出现最高温,温度为 297.25 K,即 24.10 °C,并且温升沿轴向从底端到前端也呈逐渐减小的趋势,符合电磁感应理论规律。线圈导线部分温度为 301.18 K,即 28.03 °C,对比温度变化曲线仍然可以看出,线圈内导线的散热过程比电枢散热要慢很多,由于线圈导线由环氧树脂包裹,环氧树脂导热性较差,并且导线内部温度分布较为均匀,导线内基本无热传导过程,因此导线部分温度下降较慢。而电枢外即为空气,既存在散热也存在电枢内的热传导,因此电枢温度下降较快。通过对比线圈电流丝的温度变化曲线与前文图 3 中的线圈特定单元温度随时间变化曲线可以看出,线圈电流丝温度基本在 0.007 s 时达到最高点,两者结果基本相同。

3 单次脉冲放电试验

3.1 试验设备及方法

试验采用脉冲电容放电回路,本次实验中电容值为 2 mF,充电至 3 kV。图 7 为试验电容放电回路等效电路。

采用温度传感器测量电枢与线圈的温度,多路温度传感器测的温度经温度采集卡通过串口数据线传送到计算机显示。本文采用的圆柱式温度传感器有两种,一种是 PT100,一种是 PT1000,测温范围均为 $-50\sim 200$ °C,精度均为 A 级 ($0.15+0.002|T|$,其中 $|T|$ 为实测温度的绝对值),两种传感器的电阻不同,所用到的温度采集卡不同。温度采集软件能够实时显示各路温度传感器传送的温度数据,并可以自动记录各路温度传感器测量的温度和对应的时间,其采集界面如图 8 所示。试验环境温度为 13.5 °C。

为了方便测量电枢的温度,试验采用电枢固定的方法对单级电磁感应线圈发射器的温度进行测量试验。在电枢中布置温度传感器如图 9 所示。编号 3, 4, 5, 6 为 PT100,编号 1, 2 为 PT1000 传感器。

为了准确地测量线圈的温度,设计制作一种线圈将热电偶温度传感器预埋进线圈内。线圈制作方面,使用层压玻璃丝布环氧筒作为内模具,表面打磨后,涂刷环氧树脂;根据设计参数要求,使用耐热等级为 F 级,绝缘强度大于 3 500 V 的漆包铜线作为绕组绕线,规格为 $1.8\text{ mm}\times 2.8\text{ mm}$,层间绝缘采用 2 层玻璃丝带,单层的绝缘强度大于 8 000 V。封包时在绕组表面刷环氧树脂,使用玻璃丝带缠绕在表面并涂刷环氧树脂,端部使用环氧树脂和玻璃丝带绝缘,最后灌装环氧树脂胶。最后做好的线圈如图 10(b) 所示。

3.2 单级脉冲放电温升试验结果分析

由于试验过程中线圈与电枢的底部平齐,并设置电枢固定不动,因此仿真需重新进行,试验线圈电流与 Comsol 中仿真电流对比如图 11 所示。

从图 11 可以看出,线圈电流峰值误差在 1% 以内,在峰值上和波形上试验和仿真的差距不大。采用操作最为简单的 Comsol 仿真与试验结果进行对比,电枢静止,严格按照试验方法进行操作,最后得到仿真的线圈温度与电枢温度曲线与试验的线圈温度与电枢温度曲线对比如图 12 所示。

对于电枢温度测量,电枢温度测量结果满足电枢尾部内侧温度小于电枢尾部外侧温度,符合电枢感应涡流从

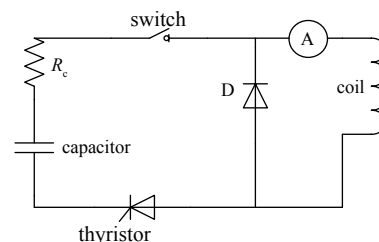


Fig. 7 Test capacitor discharge circuit diagram

图 7 试验原理图

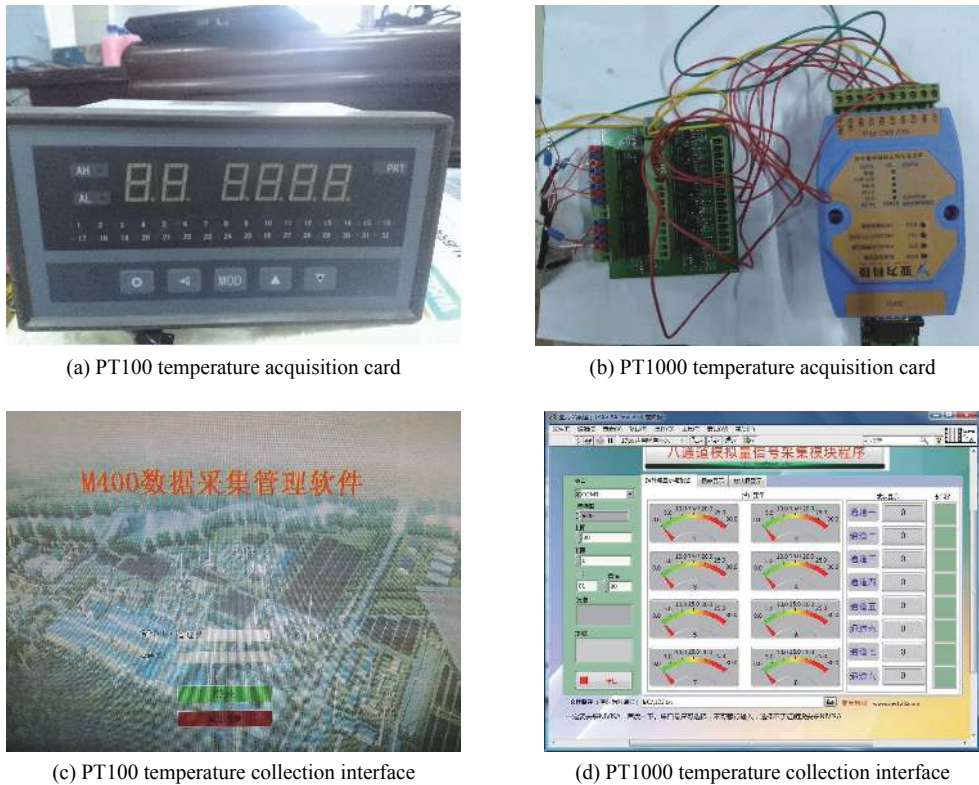


Fig. 8 Temperature acquisition section

图 8 温度采集部分

尾部外侧往对称中心减小的理论。本次试验模型为了测量方便,固定电枢将电枢底部与线圈底部平齐,因此本次试验过程中距离电枢尾部 1 cm 的电枢外侧测点温度最高。并且由于热电偶温度传感器的测量延迟性与采样频率的限制,电枢温度试验曲线无仿真曲线中的最值点,电枢尾部外侧、电枢尾部内侧与距离电枢尾部 1 cm 的电枢外侧的仿真曲线与测量曲线的稳定值误差均在 1% 以内,具体数值如表 3 所示。

对于线圈温度测量,同样由于热电偶温度传感器的测量延迟性与采样频率的限制热电偶本身的测量误差,线圈导线温度测量中同样存在测量曲线最高点时间比仿真曲线最高点迟,仿真时线圈在 100 s 时的温度是 18.38 °C,在测量时线

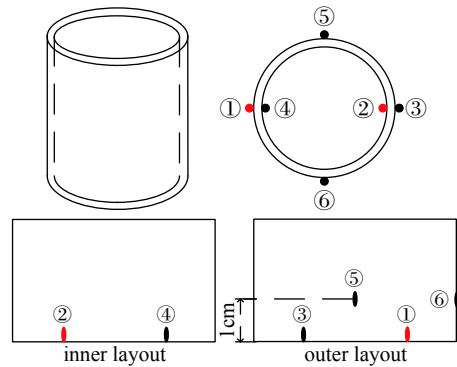
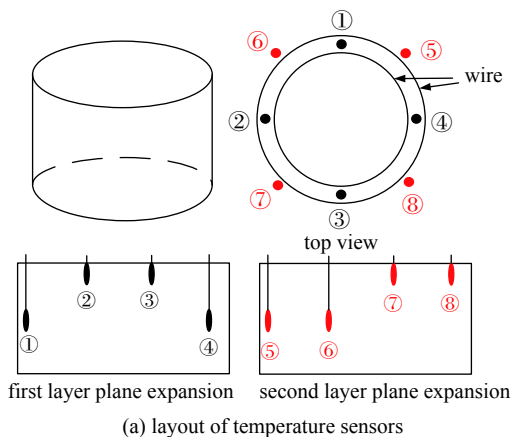


Fig. 9 Layout of temperature sensors

图 9 电枢中温度传感器布置图



(a) layout of temperature sensors



(b) photo of coils

Fig. 10 Arrangements and photo of coil temperature sensors

图 10 线圈温度传感器布置图与实物图

圈的在 100 s 时的温度是 17.25 °C，试验测量值小于仿真值，仿真与试验测量稳定温度的误差在 10% 以内。线圈温度测量滞后与温度测量比实际偏低的主要原因是为了避免温度传感器直接接触导线造成匝间短路，实际线圈制作时温度传感器与线圈导线之间布置了一层玻璃丝布带，温度传导需要一定时间。

结合试验测量电流与单级电磁感应线圈发射器的温度场测量结果可以看出，虽然试验过程中的温度测量的滞后性与测量温度偏低无法避免，从电流波形和峰值及温度随时间变化曲线和最后的稳定值来看，可认为单级电磁感应线圈发射器的电磁-温度场仿真计算结果是准确的，试验验证了本节的单级电磁感应线圈发射器的电磁-温度场仿真计算方法是可行的。

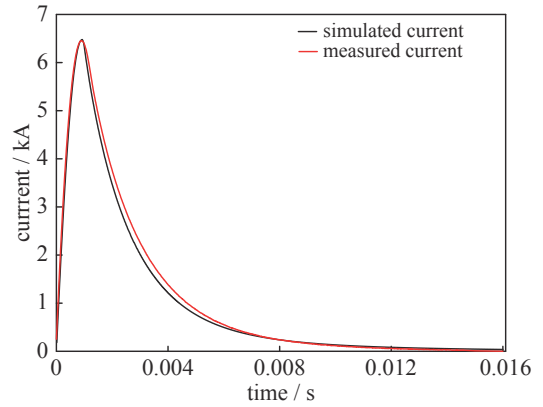


Fig. 11 Pulse discharge waveforms

图 11 脉冲放电波形

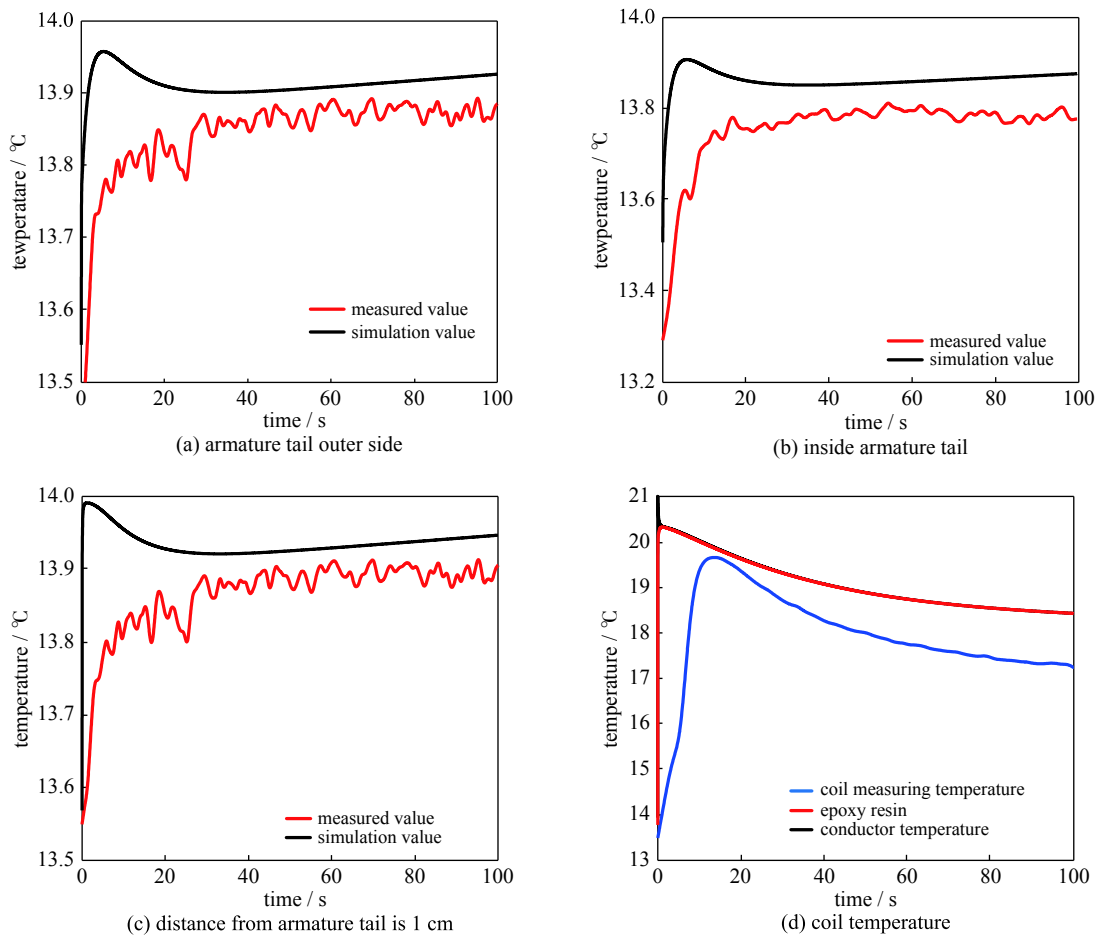


Fig. 12 Model temperature measurements

图 12 模型温度测量结果

4 结 论

利用电流丝法，并结合材料的热特性，结合自编程序 Coilgun，以及利用 Comsol 可以获得线圈发射器发射过程中电枢和线圈的温升情况，结论如下：

(1) 根据电磁线圈发射器单次脉冲放电温升计算的仿真结果可以得到，模型参数统一化后对比仿真结果，电流丝模型法未考虑电流丝之间的热传导与电枢和线圈的散热问题，因此与 Comsol 相比，其计算得到的温升最大；Comsol 多物理场仿真采用直接耦合计算单级感应线圈发射器的温度场，与理论电磁-温度场计算方法接近。

表 3 单级感应线圈发射器单次脉冲放电试验结果 ($t=100\text{ s}$)
 Table 3 Single pulse discharge test results of single-stage induction coil transmitter ($t=100\text{ s}$)

	test temperature/ $^{\circ}\text{C}$	simulation temperature/ $^{\circ}\text{C}$	error/%
armature tail outer side	13.85	13.926	0.55
inside armature tail	13.78	13.86	0.58
1 cm from armature tail	13.91	13.947	0.27
coil wire	17.25	18.38	6.1

(2)电磁线圈发射器单次脉冲放电温升试验时,电枢固定以方便测量电枢的温度,热电偶温度传感器预埋进线圈内以方便测量线圈温度。试验结果表明,实际测量的电流与仿真电流基本一致,在考虑温度传感器测量滞后性与采样频率的误差下,线圈与电枢的温度误差小于 10%,电磁线圈发射试验结果验证了电磁线圈发射器的电磁-温度场仿真结果。

参考文献:

- [1] Sterling T L, Salmon J, Becker D J, et al. How to build a Beowulf[M]. Cambridge: MIT Press, 1999.
- [2] Wang Y, Marshall R. Physics of electric launch[M]. Beijing: Science Press, 2004: 11-19.
- [3] Quan K B, Zhen H X, Hongxing W, et al. Thrust and thermal characteristics of electromagnetic launcher based on permanent magnet linear synchronous motors[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 2009, 45(1): 358-362.
- [4] Engel T G, Nunnally W C, Gahl J M. High-efficiency helical coil electromagnetic launcher[R]. Columbia: University of Missouri, 2006.
- [5] Marder B. SLINGSHOT—A coilgun design code[R]. SAND2001-1780, 2001.
- [6] Zhang Y D, Ruan J, Wang Y, et al. Armature performance comparison of an induction coil launcher[J]. *IEEE Trans 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 characteristic analysis of synchronous induction coil gun[J]. *Journal of Artillery Launch and 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 Magnetics*, 2001, 37(1): 111-115.
- [9] 牛小波, 刘开培, 张亚东, 等. 基于电流丝法的多级同步感应线圈炮电枢温升计算[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 095001. (Niu Xiaobo, Liu Kaipei, Zhang Yadong, et al. Armature temperature rise calculation of multi-stage synchronous induction coil gun based on current filament method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 095001)
- [10] Zhang T, Su Z, Guo W, et al. Research on the temperature field of multistage synchronous induction coilgun[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(7): 1295-1301.
- [11] 刘守豹, 阮江军, 杜志叶, 等. 感应线圈炮性能的场路结合分析[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(12): 1-7. (Liu Shoubao, Ruan Jiangjun, Du Zhiye, et al. Field circuit analysis of induction coil gun performance[J]. *Journal of electrical technology*, 2010, 25(12): 1-7)
- [12] 刘守豹, 阮江军, 彭迎, 等. 改进电流丝法及其在感应线圈炮场路结合分析中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(30): 128-134. (Liu Shoubao, Ruan Jiangjun, Peng Ying, et al. Improved current wire method and its application in the combination analysis of induction coil battery[J]. *Chinese Journal of electrical engineering*, 2010, 30(30): 128-134)