

## 基于灰色模型的电磁轨道发射装置温度研究\*

李松乘, 鲁军勇, 程 龙, 吴羿廷

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**在电磁发射过程中导轨温度受众多因素影响,而其中部分因素很难进行精确分析,为此运用灰色系统的分析方法对电磁轨道发射装置温度进行研究。为获取模型所需实验数据,搭建电磁轨道发射装置测试系统,并借此测量发射过程中的电流、导轨温度、出口速度等数据。由于测量仪器限制,借助 ANSYS 有限元仿真对测得的导轨温度数据进行修正,以获得导轨内表面温度。基于经典 GM(1, N) 模型与 Simpson 公式,提出一种改进型灰色模型,并以此方法对导轨温度展开研究,进一步选取同能级试验,对不同位置处各因素温升贡献度进行讨论。结论为进一步深入研究导轨温度提供参考和依据。

**关键词:**电磁发射;导轨;数据采集系统;ANSYS;改进型灰色模型

**中图分类号:**TM836 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)05-090-08

## Research on temperature of electromagnetic rail launcher based on gray model

LI Songcheng, LU Junyong, CHENG Long, WU Yiting

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** During the electromagnetic launch process, the temperature of the rail is affected by many factors and it is difficult to analyze some factors accurately. Based on this, the gray system was used to study the temperature of the electromagnetic launcher. In order to obtain the experimental data needed for the gray model, the electromagnetic launcher data collection system was built, and such data as the current, the rail temperature, the launch speed and other factors concerned were collected. Due to the limitations of measuring instruments, the ANSYS finite-element simulation was adopted to correct the measured rail temperature data to obtain the inner surface temperature of the rail. Based on the classical GM(1, N) and Simpson formula, an improved gray model was proposed, and the rail temperature was studied by this method. The same energy level test was conducted to discuss the contribution of temperature rise of various factors at different locations. The conclusion provides a reference and basis for further research on the temperature of the rail.

**Keywords:** electromagnetic launch; rail; data collection system; ANSYS; improved gray model

电磁发射技术可将电磁能转化为被发射物的动能,具有弹丸出膛速度精确可控的优势,在防空、反导以及对地支援方面具有极其广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。随着电磁轨道发射技术由实验室转向军事应用,对其进行评价的体系也逐步建立,其中连发能力尤为重要,而导轨温升是评价连发能力的关键依据<sup>[4]</sup>。在电磁轨道发射装置连发过程中,导轨的温度将出现显著上升,其热量积累不仅将增大导轨的电阻从而进一步降低弹丸的发射效率<sup>[5]</sup>,还会使得导轨及电枢出现烧蚀熔化等现象,因此有必要对连发过程中导轨的温度展开深入研究。

导轨热量积累的来源非常复杂,主要包括脉

冲电流产生的焦耳热、电枢与导轨之间滑动接触产生的摩擦热、电枢与导轨之间接触电阻产生的焦耳热等<sup>[6]</sup>。伴随发射过程的进行,电枢的磨损与烧蚀熔化现象的发生将会改变接触电阻与滑动摩擦系数,同时导轨积累的热量又会影响其中的电流分布,进一步影响热量的产生。由于发射过程极快(仅为数毫秒),现有的测试手段很难对发射过程中的所有参数进行检测,发射过程是典型的灰色系统。无论是通过有限元仿真的方法还是数值计算的方法,以往的研究均建立在不同的理想假设条件下<sup>[7-8]</sup>,很难完整地反映出各因素对导轨温升的不同影响。本文基于灰色系统理论,利用 ANSYS 有限元仿真将测量数据进行修正,并

\* 收稿日期:2019-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51522706,51607187);国家重点基础研究发展计划资助项目(613262)

作者简介:李松乘(1993—),男,河北涿州人,博士研究生,E-mail:1453150687@qq.com;

鲁军勇(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:jylu@xinhuanet.com

提出了基于 Simpson 公式改进的 GM(1, N) 模型; 基于改进模型与修正后数据, 建立轨道温度与不同影响因素间的映射关系, 为电磁轨道发射装置的导轨温度研究提供新的方法与思路。

### 1 发射装置测量系统

为获取发射过程中的不同数据, 搭建测试平台分别对发射过程中的导轨温度、电枢质量、弹丸配重质量、激励电流以及发射出口速度进行测量。发射装置采用长 3 m、宽 60 mm、高 20 mm 的铜合金作为导轨, 采用 C 形电枢进行试验, 于电枢前端加装配重块, 其结构如图 1 所示。



图 1 电枢及配重块示意

Fig.1 Schematic diagram of armature and counter weight

电枢形状固定, 质量由于加工工艺有小幅波动, 弹丸由电枢与配重块构成, 使用高精度电子秤分别对电枢与配重块进行称重测量。发射过程中的脉冲电流由罗氏线圈测量并利用数据采集仪采集得到, 如图 2 所示。导轨温度与发射速度分别使用光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 温度传感器与 B-dot 磁探针阵列测量。

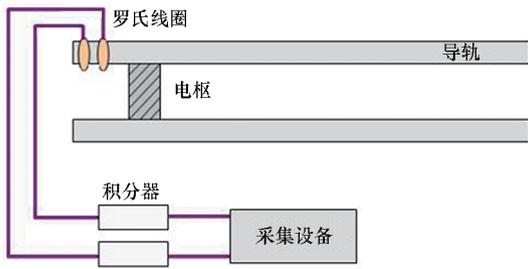


图 2 电流采集系统示意

Fig.2 Schematic diagram of the current acquisition system

#### 1.1 温度测量系统

对导轨温度的测量选用 FBG 温度传感器, 光纤传感技术具有光纤传输的不易受到电磁干扰、灵敏度高、信号传输损耗小等优点。FBG 结构如图 3 所示。

温度和应变的变化均可以对 FBG 产生影响, 其中心波长的漂移量为

$$\Delta\lambda_b = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial d} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial d}\right) \Delta d + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T \quad (1)$$

式中,  $\Lambda$  为光栅周期,  $n_{\text{eff}}$  为光纤纤芯针对自由空间中心波长的折射率,  $d$  为光栅长度,  $T$  为温度。

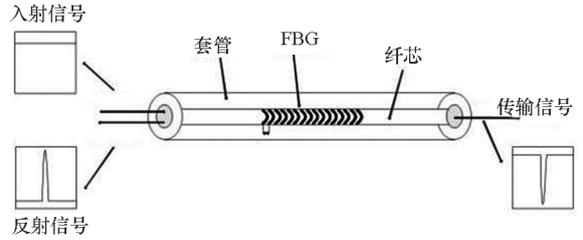


图 3 FBG 结构

Fig.3 Structure schematic diagram of FBG

在实际应用中为了补偿由于应变变化带来的温度值的波动, 需要对温度的测量进行应变校准<sup>[9]</sup>。

由于电流以及速度的趋肤效应, 电流主要集中在导轨的内表面以及电枢表面上, 因而无法在导轨与电枢接触面上进行 FBG 的布设, 故在不影响导轨结构强度的基础上在其背面及侧边顶部加工 1.6 mm × 1 mm 的凹槽用来布设 FBG。FBG 布设示意如图 4 所示。

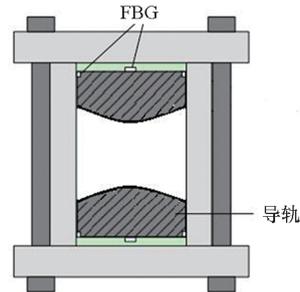


图 4 FBG 布设方式

Fig.4 FBG temperature sensor layout

导轨具有对称结构, 可认为其上下导轨温度分布一致, 因此仅于上导轨的背面与侧面分别安装 6 组 FBG 传感器 (p1 ~ p6), 将轨道全场设置为无量纲长度 1, 其相对位置如表 1 所示。

表 1 FBG 相对位置

Tab.1 Relative positions of FBG

编号	p1	p2	p3	p4	p5	p6
相对位置	0.1	0.3	0.45	0.55	0.7	0.9

FBG 温度传感器布设前使用标准二等铂电阻温度传感器对其进行标定, 为防止导轨的应变对其造成影响, 于其外部设置包层。封装标定后其响应时间为 100 ~ 150 ms, 测量精度为 ±0.3 °C。

#### 1.2 B-dot 磁探针阵列

磁探针阵列测速方法是在导轨方向布设若干

磁探针探头,当电枢经过相应布设位置时,将在磁探针线圈中输出感应信号,通过检测各 B-dot 探头输出信号的时刻可获得电枢运动的位置-时间离散关系,采用最小二乘拟合方法对电枢位置-时间离散关系点进行拟合,继而获取速度、加速度等运动状态<sup>[10-11]</sup>。

驱动力  $F = (1/2) L' I^2$ , 电感梯度  $L'$ 、电枢摩擦阻力、气动阻力等均正比于驱动力,则加速度与  $I^2$  成正比,设加速度为

$$a = \frac{L'}{2m - \mu} I^2 = KI^2 \quad (2)$$

其中,  $I$  为电流,  $m$  为电枢质量,  $\mu$  为阻力系数,  $K$  为正比例系数。速度  $v$  可表示为加速度  $a$  对时间  $t$  的积分

$$v = \int KI^2 dt + v_0 \quad (3)$$

其中,  $v_0$  为初始速度。位移  $l$  可表示为  $v$  对时间  $t$  的积分

$$l = \iint KI^2 dt^2 + L_0 = Kf(t) + L_0 \quad (4)$$

其中,  $L_0$  为初始距离,  $f(t)$  为  $I^2$  对时间  $t$  的两次积分。由此可见,位移  $l$  与  $f(t)$  及初始距离  $L_0$  相关。由此获得位移  $l$  的函数拟合矩阵

$$\begin{bmatrix} f(t_1) & t_1 & 1 \\ f(t_2) & t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f(t_n) & t_n & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $t_i$  为电枢喉部位置运动到第  $i$  个 B 探头下方的时刻,  $f(t_i)$  为  $t_i$  时刻  $I^2$  对时间  $t$  的两次积分所得数值。采用最小二乘法对拟合矩阵进行函数拟合,得到位移  $l$  与时间  $t$  曲线,对电枢位移曲线进行微分可得电枢速度曲线。

## 2 导轨温度场数据修正

光纤光栅在试验过程中不能实现对导轨内表面温度的直接采集。为获得导轨内表面温度场数据,建立导轨的有限元模型,并对其进行温度场仿真。若 FBG 测量点的温度仿真结果与测试结果吻合,则可认为导轨内表面的实际温度与仿真温度也相吻合。

### 2.1 导轨热量计算

导轨所产生的热量可以分为电阻热和摩擦热两种来源。为简化有限元模型,对其做出如下假设:①由于发射时间仅为数毫秒,在发射过程中可以不考虑导轨内部的热量交换以及与周围环境的热量传导;②发射过程中不考虑电枢的磨损与融

化,认为摩擦系数为恒定值;③认为滑动电接触所产生热量全部传导到导轨上。

电枢在发射过程中的位移表示为

$$l = \frac{L'}{2m} \iint I^2 dt^2 \quad (6)$$

导轨上产生的焦耳热可以表示为

$$Q_{R1} = \iint I(v, t)^2 \rho_0 (1 + \beta T) dt dv \quad (7)$$

其中,  $\rho_0$  为导轨材料在零度时的电阻率,  $\beta$  为电阻温度系数。根据直流接触电阻的定义,滑动接触电阻可以表示为  $R_c = \frac{\rho_a l_c}{A_c}$ , 其中  $\rho_a$  为接触表面两侧材料的平均电阻率,  $l_c$  为接触电阻层的厚度,  $A_c$  为实际接触面积。由接触电阻产生的热量可以表示为  $Q_{R2} = R_c \int I(t)^2 dt$ 。

脉冲电流对电枢的推力可以表示为  $F(t) = \frac{1}{2} L' I^2(t)$ , C 形电枢对导轨的正压力<sup>[12]</sup>可以表示为

$$F_c(t) = \frac{1}{2} \alpha L' I^2(t) \cos \theta + F_p \quad (8)$$

其中,  $\alpha$  为电枢尾部受到电磁力转换为正压力的系数,  $F_p$  为电枢与导轨过盈配合产生的预应力,  $\theta$  为电枢尾部所受电磁力与导轨间的夹角,则导轨由于摩擦吸收的总热量可以表示为  $Q_f = \int \mu F_c(t) v(t) dt$ 。

### 2.2 导轨温度数据修正

以某次发射试验为目标进行仿真,其发射电流峰值为 460 kA, 上升时间为 4.5 ms, 保压调波时间为 0.8 ms, 下降时间为 3.7 ms, 激励电流波形如图 5 所示。

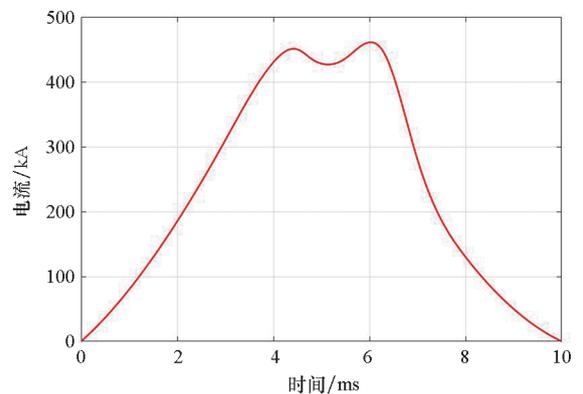
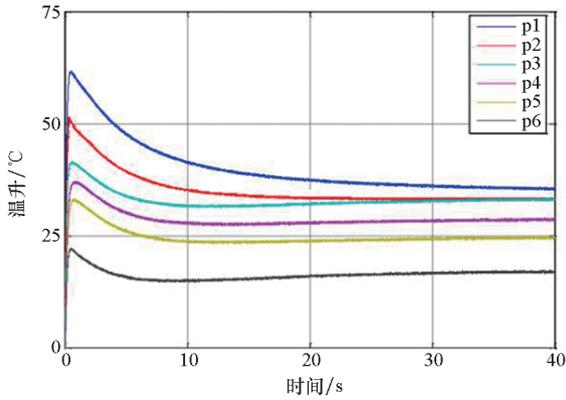


图 5 激励电流波形

Fig. 5 Excitation current waveform

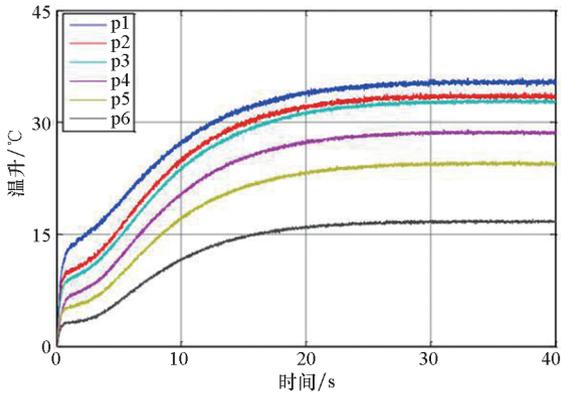
发射能级为 0.75 MJ, 利用磁探针阵列测得出口速度为 1991.8 m/s。通过在装置导轨上布

设的 6 组 FBG 可以得到发射过程中的温度数据,发射后 40 s 内温升数据如图 6 所示。



(a) 导轨侧面温度变化曲线

(a) Curve of the rail side temperature



(b) 导轨背面温度变化曲线

(b) Curve of the rail back temperature

图 6 导轨温度变化曲线

Fig.6 Curves of the rail temperature

在发射后导轨侧面温升迅速,达到峰值后逐步降低至平衡温度,而导轨背面温度逐步上升直至平衡温度。为获得导轨内表面的温度数据,对导轨建立有限元模型,并利用 ANSYS 对其进行电磁-温度耦合分析。将仿真分为两部分进行,分别计算电阻热与摩擦热再将两者相叠加。

由于软件限制,无法对通电的运动物体求解,以 p2 位置为例,进行如下等效:通过  $l = \frac{L'}{2m} \iint F^2 dt^2$  可以计算出电枢到达 p2 点的时刻为 4.2 ms,则 p2 点截面处需加载 4.2 ms 后的激励电流。发射结束后 p2 截面处温度场分布如图 7 所示。

通过图 6 可以看出,由于集肤效应与摩擦热的作用,温升最高处位于导轨内表面顶点,仿真求得导轨侧面温度为 71.091 °C,与试验误差为 3.817%。导轨侧面布设 FBG 位置温度与导轨最高温升较为接近。进一步求解冷却过程中及达到平衡温升时的导轨温度,发射后 10 s 温度分布如

图 8 所示。

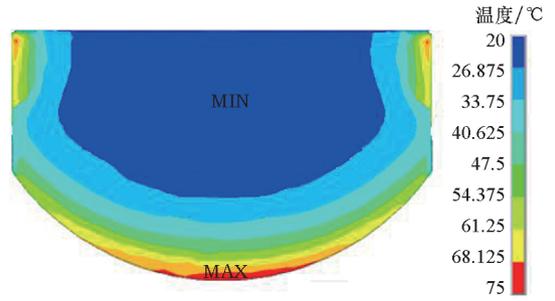


图 7 p2 位置轨道截面温度分布云图

Fig.7 Temperature distribution of rail section at p2 position

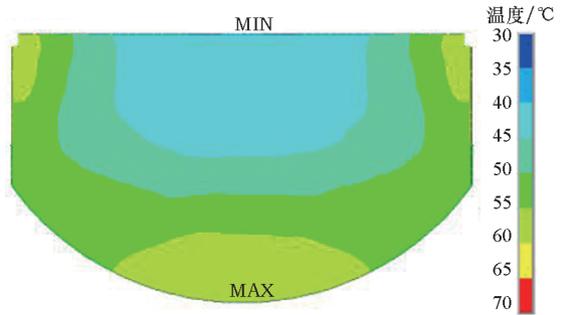


图 8 10 s 时刻 p2 位置轨道截面温度分布云图

Fig.8 Rail temperature distribution of p2 position at 10 s

发射后 10 s 导轨的最低温度与最高温度位置没有发生改变,仿真所得导轨背面与侧面温度分别为 44.104 °C、56.267 °C,与试验数据误差分别为 1.261%、3.915%。达到平衡温度后仿真得到导轨温度为 35.129 °C,与试验测得数据误差为 2.419%。使用同样方法求解其他位置的截面温度分布,设 data1、data2 分别为发射后导轨侧面仿真温度与对应位置 FBG 采集温度,data3、data4 分别为 10 s 时刻导轨侧面仿真温度与对应位置 FBG 采集温度,data5、data6 分别为导轨背面仿真温度与对应位置 FBG 采集温度,其对比如图 9 所示。

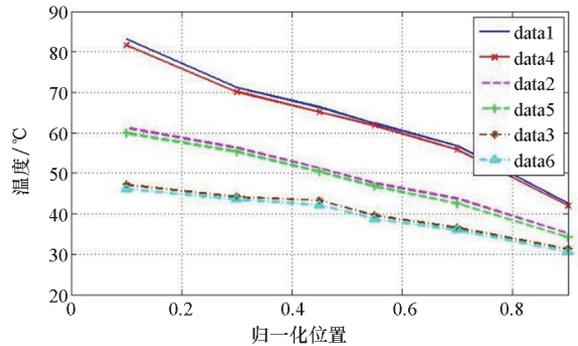


图 9 仿真与试验对比

Fig.9 Comparison between simulation and experiment

由图 9 可以看出,导轨温度仿真数据与实测

数据均吻合较好,最大误差出现在发射结束后 p1 位置,误差为 4.19%,可认为仿真可以真实地反映出导轨的温度分布情况。依据仿真结果,依次采集 p1 ~ p6 截面处导轨内表面最高温度,并进一步使用灰色模型进行分析。

### 3 导轨温升 GM(1,N) 模型

#### 3.1 基于 Simpson 的 GM(1,N) 模型

当一个系统受不同因素之间相互影响,且部分影响因素未知致使不能进行准确的建模时,此系统被称为灰色系统,该系统视不确定量为灰色量。运用灰色模型理论可以通过小数量样本充分发掘各因素间的潜在联系,可以较为准确地对模型的发展进行预测<sup>[13-15]</sup>。经典 GM(1,N) 模型中包含有  $N$  个行为因子,称这  $N$  个行为因子为原始序列,记为  $x_i^{(0)} = (x_i^{(0)}(1), x_i^{(0)}(2), \dots, x_i^{(0)}(n))$ ,其中  $i=1,2,\dots,N$ 。灰色系统可以通过对原始序列的累加而逐步使灰色量白化,即消除其不确定性。 $x_i^{(1)}$  为  $x_i^{(0)}$  的一阶累加序列,其中

$$x_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x_i^{(0)}(j), k = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

其对应的白化微分方程即影子方程为

$$\frac{dx_i^{(1)}(t)}{dt} + wx_i^{(1)}(t) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(t) \quad (10)$$

式中,  $w$  与  $b_i$  均为常数参数。称  $x_i^{(0)}(k) + wx_i^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k)$  为 GM(1,N) 模型,其与白化微分方程相等价。

在经典灰色模型中取  $x_i^{(1)}$  的均值数列  $z_1^{(1)}(k) = 0.5x_1^{(1)}(k) + 0.5x_1^{(1)}(k-1)$ ,当  $x_i^{(1)}$  序列非线性时,由此带来的误差将会较大,为减小误差,使用 Simpson 展开来重新构造  $z_1^{(1)}(k)$ 。

将区间  $[k, k+1]$  均分为  $n$  等份,则计步长  $h = 1/n$ ,在区间上的每一个节点即为  $x_m = k + ph$ 。在每一个划分而成的小区间内使用 Simpson 公式,可以得到

$$\begin{aligned} z^{(1)}(k) &= \int_k^{k+1} f(x) dx = \sum_{i=1}^{n-1} \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \\ &= \frac{h}{6} \sum_{i=0}^{n-1} [f(x_i) + 4f(x_{i+0.5}) + f(x_{i+1})] \\ &= \frac{h}{6} [f(k) + 4 \sum_{i=0}^{n-1} f(x_{i+0.5}) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(k+1)] \end{aligned} \quad (11)$$

由于试验数据的不连续性并且具有较强的波动性,为获得在区间  $[k, k+1]$  上的  $f(x)$ ,最多可

对  $x_1^{(1)}(k+1)$  进行  $N-1$  次多项式拟合,即  $f(x) = p_1 x^{N-1} + p_2 x^{N-2} + \dots + p_{N-1} x + p_N$ ,从而求出  $z_1^{(1)}(k)$  的表达式。

进一步令

$$Y = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \dots \\ x_1^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$u = [w, b_2, b_3, \dots, b_N]^T \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} -z_1^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & \dots & x_N^{(1)}(2) \\ -z_1^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & \dots & x_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -z_1^{(1)}(n) & x_2^{(1)}(n) & \dots & x_N^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad (14)$$

则有 GM(1,N) 的灰微分方程  $Y = Bu$ ,如果存在  $(B^T B)^{-1}$ ,则有

$$\hat{u} = [\hat{w}, \hat{b}_2, \hat{b}_3, \dots, \hat{b}_N]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (15)$$

白化方程的解为

$$\begin{aligned} x_1^{(1)}(t) &= e^{-wt} [x_1^{(1)}(0) - t \sum_{i=2}^N b_i x_j^{(1)}(0) + \\ &\quad \sum_{j=2}^N \int b_j x_j^{(1)}(t) e^{wt} dt] \end{aligned} \quad (16)$$

当  $x_j^{(1)}$  变化幅度很小时,可以将  $\sum_{j=2}^N b_j x_j^{(1)}(k_i)$  看作灰常量,则其进行时间响应可以表示为

$$\begin{aligned} \hat{x}_1^{(1)}(k+1) &= e^{-wt} \left[ x_1^{(1)}(0) - \frac{1}{w} \sum_{j=2}^N b_j x_j^{(1)}(k_{i+1}) \right] + \\ &\quad \frac{1}{w} \sum_{j=2}^N b_j x_j^{(1)}(k_{i+1}) \end{aligned} \quad (17)$$

其还原式为

$$\hat{x}_1^{(0)}(i+1) = \hat{x}_1^{(1)}(i+1) - \hat{x}_1^{(1)}(i) \quad (18)$$

#### 3.2 导轨温度改进型灰色模型

基于有限元仿真修正后的导轨内表面温度数据,建立发射装置的温度灰色模型。由于导轨首端温升较为明显,代表性较为显著,以 p1 处温度为例进行建模分析。由于轨道热量在连发过程中存在积累,故基于单发试验或连发试验的首发数据进行分析。为尽量保证每次试验过程中导轨的状态一致,对发射完毕的导轨进行清洁。主要测试的数据有:导轨温度、电枢质量、弹丸配重质量、激励电流、发射出口速度。利用 Simpson 改进型 GM(1,N) 公式对其进行建模分析。

其中导轨 p1 处最大温度为特征数据序列  $x_1^{(0)}$ ,其他初始状态参数为相关序列,记为  $x_i^{(0)}(k), i=1,2,\dots,5, k=1,2,\dots,6$ 。电枢质量为

$x_2^{(0)}$ , 弹丸配重质量为  $x_3^{(0)}$ ; 认为激励电流波形相同且其各分段时间均等, 其峰值数据为  $x_4^{(0)}$ ; 发射出口速度为  $x_5^{(0)}$ 。利用已测得的 100 次试验数据进行分析, 对  $x_1^{(0)}$  与  $x_i^{(0)}$  建立灰色模型。首先将试验数据进行无量纲处理, 如表 2 所示。

表 2 无量纲化试验数据  
Tab. 2 Dimensionless test data

	$x_1^{(0)}$	$x_2^{(0)}$	$x_3^{(0)}$	$x_4^{(0)}$	$x_5^{(0)}$
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.511	0.995	1.671	1.180	0.986
3	1.808	0.995	1.174	1.342	1.273
4	1.802	0.999	1.156	1.337	1.275
5	1.489	0.999	1.162	1.134	1.083
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	1.745	0.999	1.154	1.282	1.218

理论上可以对  $x_1^{(1)}(k)$  进行最多 99 次多项式拟合, 但其计算量较大, 当使用 5 次多项式拟合时, 其精度达到 99.82%, 求出其拟合函数为

$$f(x) = 0.07333x^5 - 0.1102x^4 + 0.5715x^3 - 1.204x^2 + 2.528x - 0.795 \quad (19)$$

对任一区间  $[k, k+1]$  的划分数  $n$  将改变结果的精度, 因此分别对  $n=2, 3, \dots, 20$  时的结果进行讨论, 如图 10 所示。

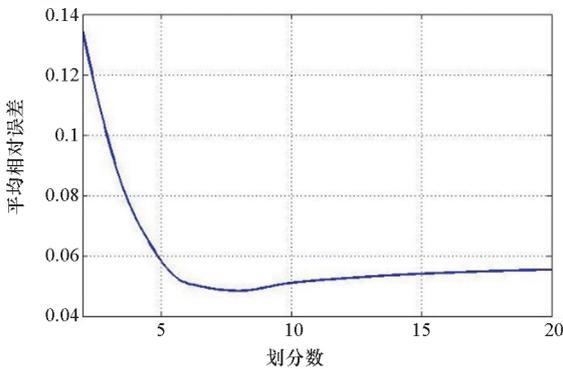


图 10 拟合平均相对精度

Fig. 10 Average relative accuracy of the fitting results

由图 10 可以看出, 模型的平均相对精度并非随着区间划分次数的增多而逐渐上升的, 当区间划分次数为 8 时, 模型的平均相对精度最高, 为 4.85%。关于导轨 p1 位置的温度的改进型灰色模型可表示为

$$x_1^{(1)} = 3.4735x_3^{(1)} - 4.9499x_2^{(1)} - 11.453x_4^{(1)} + 14.238x_5^{(1)} + 0.49263e^{-2.0299t} (10.048x_2^{(1)} - 7.0509x_3^{(1)} + 23.248x_4^{(1)} - 28.902x_5^{(1)} + 2.0299) \quad (20)$$

其还原序列为  $\{1.0, 1.4872, 2.0704, 1.9613, 1.5339, \dots, 1.7245\}$ , 其与原始序列的相对误差分别为  $0, 0.0158, 0.145, 0.0884, 0.0301, \dots, 0.0117$ , 平均相对误差为 3.04%。运用经典 GM(1, N) 模型得到的还原序列与原始序列相对误差分别为  $0, 0.688, 0.168, 0.1245, 0.0687, \dots, 0.0481$ , 平均相对误差为 14.21%。改进型 GM(1, N) 模型精度显著高于经典模型。

使用同样的方法可以求出 p2 ~ p6 位置处的温度灰色模型, p2 ~ p6 处灰色模型平均精度分别为 4.36%, 3.67%, 3.95%, 2.64%, 2.19%。

### 3.3 同能级试验导轨温度分析

在 100 次试验中可以按照弹丸总质量、出口速度与发射能级三者的相互关系将同能级试验数据进行提取并展开不同因素对导轨温升贡献度的分析。选取其中 0.5 MJ 能级试验进行分析, 同能级试验时激励电流相同, 可将电流项省略, 其中导轨 p1 处最大温度为特征数据序列  $x_1^{(0)}$ , 电枢质量为  $x_2^{(0)}$ , 弹丸配重质量为  $x_3^{(0)}$ , 发射出口速度为  $x_4^{(0)}$ , 将试验数据无量纲化如表 3 所示。

表 3 同能级试验无量纲化数据

	$x_1^{(0)}$	$x_2^{(0)}$	$x_3^{(0)}$	$x_4^{(0)}$
1	1.0000	1.000	1.0000	1.0000
2	1.0131	0.998	0.9992	1.0021
3	0.9571	0.996	0.8776	1.1722
4	0.9493	0.999	0.8813	1.1702
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
39	0.9162	0.999	0.4837	1.3214

使用基于 Simpson 展开公式的改进型 GM(1, N) 进行求解, 经过计算发现区间划分次数为 6 时精度最高, 可以得到白化微分方程

$$\frac{dx_1}{dt} + 3.7868x_1 = 0.0181x_2 + 1.6793x_3 - 2.1282x_4 \quad (21)$$

其还原序列与原始序列的平均相对误差为 1.39%。由白化微分方程可知<sup>[16]</sup>, 电枢质量变化很小, 故其对导轨温度影响较小, 而弹丸配重质量对导轨温度有正向升高作用, 发射出口速度有负向降低作用。即在同能级下, 发射质量越大, 导轨温度越高; 发射速度越大, 导轨温度越低。该结果同样可以由电磁轨道发射装置电枢推力公式  $F = \frac{1}{2}L'I^2$  与动量定理  $Ft = mv$  得出:

$$I^2 t = \frac{4E_k}{L'v} \quad (22)$$

式中,  $E_k$  为发射目标物动能,  $t$  为弹丸在膛内运行时间。在固定  $E_k$  的情况下可以得出相同的结论。

使用同样方法对 p2 ~ p6 位置温度进行求解, 可以得到不同因素对导轨温升的贡献度, 如图 11 所示。

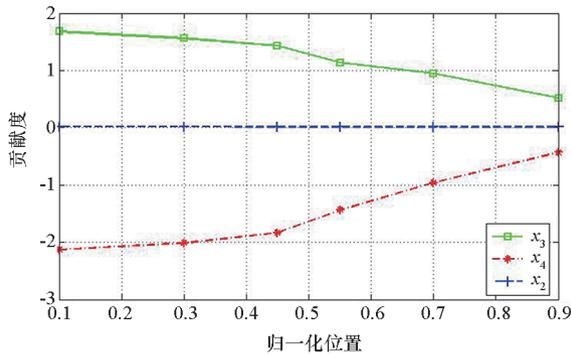


图 11 不同因素贡献度

Fig. 11 Contribution of different factors

通过图 11 可以看出沿导轨方向, 无论是何种影响因素, 其对导轨温升的影响都逐渐降低, 其中出口速度的贡献度绝对值下降较快, 电枢质量贡献度基本不变。导轨首端受发射出口速度影响较大, 受弹丸配重质量影响相对更小。产生上述结果主要是因为: 当发射出口速度较小时, 导轨通电时间更长, 导轨间通流产生更多的焦耳热。电枢与导轨间的摩擦热主要由摩擦力做功产生, 而速度的不同并不会显著改变摩擦力做功大小。不同因素的贡献度变化速率不同, 在发射装置尾部发射出口速度贡献度为  $-0.4323$ , 弹丸配重质量贡献度为  $0.5165$ , 此处导轨温度受发射出口速度的影响小于弹丸配重质量的影响。

## 4 结论

通过搭建电磁轨道发射装置测试系统, 对发射装置导轨温度、弹丸出口速度等关键数据进行测量, 并基于测量数据构建导轨温升的改进型灰色模型系统。由于温度测量限制, 运用 ANSYS 有限元对导轨温度场进行仿真, 进而得出位于不同测量截面的温度数据, 进一步利用 FBG 温度测量数据进行了仿真准确性的验证。仿真结果的最大误差出现在发射结束后 p1 位置处, 最大误差为  $4.19\%$ 。基于此, 本文将仿真得到的导轨内表面温度看作导轨的真实温度数据, 以此对温度测试系统结果进行修正。进一

步将修正后的导轨内表面仿真温度数据进行无量纲化, 并基于 Simpson 公式与多项式拟合方法提出了一种改进型的 GM(1, N) 模型, 建立导轨温升的灰色模型。结果表明当区间划分次数为 8 时, 模型精度较高, 平均相对误差为  $4.85\%$ , 显著优于经典灰色模型。

基于所建立灰色模型系统, 针对同能级试验条件下不同实验因素的贡献度进行了分析, 结果表明: 同能级试验下, 弹丸配重质量越大, 导轨温度越高; 发射出口速度越大, 导轨温度越低。进一步针对不同实验因素对不同位置处导轨的温升贡献度展开分析, 结果表明, 无论是何种影响因素其对导轨温升的影响沿导轨方向均逐渐降低, 其中出口速度的贡献度绝对值下降较快, 电枢质量贡献度较为稳定且总体最小。

## 参考文献 (References)

- [1] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5.  
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5. (in Chinese)
- [2] Fair H D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 158-164.
- [3] Fair H D. The science and technology of electric launch [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 25-32.
- [4] Ma W M, Lu J Y. Thinking and study of electromagnetic launch technology [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1071-1077.
- [5] 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.
- [6] Noel A P, Bauer D P, Hisle R E. Electromagnetic and thermal performance validation of finned rails for EML launch[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 450-453.
- [7] 巩飞, 翁春生. 电磁轨道炮滑动电接触的热效应[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1): 91-96.  
GONG Fei, WENG Chunsheng. Thermal effect of sliding electrical contact in electromagnetic railgun [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(1): 91-96. (in Chinese)
- [8] Smith A, Ellis R L, Bernardes J S, et al. Thermal management and resistive rail heating of a large-scale naval electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 235-240.
- [9] Farahi F, Webb D J, Jones J D C, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain: cross-sensitivity consideration [J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(2): 138-142.

- [10] Cao R G, Xu X C. Analysis of the velocity and current measurement method based on B-dot probes for the rail gun[J]. IEEE Transactions of Plasma Science, 2017, 45(6): 981–989.
- [11] Zhang H, Xia L S, Shen Y, et al. Analysis and process of B-dot waveforms in a high-current injector [J]. IEEE Transactions of Plasma Science, 2016, 44(5): 790–794.
- [12] 武晓康, 鲁军勇, 李玉, 等. 电磁发射中导轨温度时空分布规律的实验研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1982–1987.  
WU Xiaokang, LU Junyong, LI Yu, et al. Experimental study on temporal and spatial distribution of rails temperature in electromagnetic launch [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1982–1987. (in Chinese)
- [13] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 174–180.  
LIU Sifeng, DANG Yaoguo, FANG Zhigeng, et al. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2010: 174–180. (in Chinese)
- [14] 何满喜, 王勤. 基于 Simpson 公式的 GM(1,N) 建模的新算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 199–202.  
HE Manxi, WANG Qin. New algorithm for GM(1,N) modeling based on Simpson formula [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(1): 199–202. (in Chinese)
- [15] Liu S F, Lin Y. Grey information: theory and practical applications[M]. London: Springer-Verlag, 2006: 7–12.
- [16] 张祎, 杨春霞, 杨栋, 等. 基于灰色模型的电磁轨道发射实验电枢初速分析[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(3): 482–486, 491.  
ZHANG Yi, YANG Chunxia, YANG Dong, et al. Analysis on initial velocity of armature of electromagnetic rail launching experiment based on grey model [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(3): 482–486, 491. (in Chinese)