

磁探针位置及角度偏移对电磁发射过程测试的影响*

武晓康, 鲁军勇, 李 玉, 李湘平

(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:简化电磁发射装置中的导轨和电枢为线电流下的直导体,建立发射装置的物理模型。利用毕奥-萨伐尔定律和感应电动势原理,推导出磁探针线圈中心放置点的磁感强度。假设线圈范围内的磁场为均匀磁场,计算得到磁探针线圈产生的电动势。以此设计测量所用的磁探针,并和测试数据对比验证模型的正确性。在多次试验中发现,发射过程中装置振动导致磁探针距离变化和角度偏转问题。测量并分析三组单次发射中的故障测试状态。仿真和实验数据表明:小范围距离变化没有使磁探针的测试性能失效,但角度偏移对下一步的速度拟合带来误差干扰,且随着角度增大拟合速度逐步减小。

关键词:电磁发射;毕奥-萨伐尔定律;磁探针

中图分类号:TM835 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)06-037-06

Influence of changing magnetic probe's distance and angle in testing electromagnetic launch

WU Xiaokang, LU Junyong, LI Yu, LI Xiangping

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

Abstract: Simplified rails and armature as straight conductor with line current, the model of electromagnetic launcher was established. The magnetic intensity of the magnetic probe coil center position was calculated by using Biot-Savart law and the principle of induction electromotive force. Under the assumption that the magnetic field is a uniform magnetic field, the electric potential of the coils was elaborated. An applied probe was designed and the model was verified by comparing with the test data. The issue that probe's distance change and angle deflection under vibration was raised, the fault states in three groups single shot were measured and analyzed. Simulation and experimental data show that the magnetic probe do not cause failure with a small range of distance variation, while the angle deflection has an interferer on fitting velocity, with the deflection adding the fitting velocity falling.

Key words: electromagnetic launch; Biot-Savart law; magnetic probe

电磁发射技术以电能为发射能源,突破了常规化学发射的火力限制^[1-3]。国内的研究大多以原理验证为牵引,许多研究还停留在实验室阶段,对于工程化和实际应用还少有涉及。海军工程大学马伟明院士在30多年的综合电力技术的积累上,率先提出了混合储能技术来降低连续发射时电网功率需求,这一技术路线使得电磁发射在发射质量和速度上向工程应用迈出了一大步。电枢在膛内运动速度的变化规律,不仅关系到电枢的射击距离,也影响到其射击精度。因而对电枢膛内运动速度的测量是一项重要研究课题。目前高速摄像和X光机的测试设备昂贵,且只能测量出

口瞬间的速度、无法获得电枢在装置内的整体运动过程;多普勒雷达对场地要求较高,且信号衰减大;而磁探针阵列因简单易行,成本低廉被广泛用于测量电磁发射中的速度^[4-6]。

磁探针的核心部分是一个很小的导体环形线圈,经铰链后输出信号。电枢在通电电流产生的安培力作用下沿着导轨运动,而导轨和电枢上的电流会在其周边产生磁场,通电电流的变化和电枢的运动带动发射装置周边磁场不断变化^[7]。如果在固定位置放置一个磁探针,磁探针线圈上产生的感应电动势会随着电枢运动的变化而改变。测探针一直是电磁发射中重要的测量仪

* 收稿日期:2016-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207162,51407191,51307176);国家部委基金资助项目(613262);国防科技重点实验室基金资助项目(9140C840409140C84026)

作者简介:武晓康(1990—),男,河北邯郸人,博士研究生,E-mail:172896292@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

器^[8-10],国内外关于磁探针的性能研究集中于单次发射的测试效果。然而,随着发射能级的提高,装置的受力也会随之增加。安装在装置上的磁探针,尤其是接近出口位置上的磁探针,会随着发射装置振动有着位置的移动和角度的偏转。本文主要考虑电磁发射中装置振动导致磁探针距离变化和角度偏转后的工作状态,分析其对电磁发射过程测试的影响。

1 发射装置模型及周边磁场

发射装置为上下导轨,方形口径,采用固体电枢。发射上下导轨的间距为 h ,导轨宽度为 w 。建立如图 1 所示的坐标系,导轨沿着 X 轴放置,电枢运动到的位置为 $x(t)$,发射始端为坐标原点。磁探针位于两轨道间的中心面上,位置固定,设其中心点为 P ,坐标为 $(x_p, d, 0)$ 。

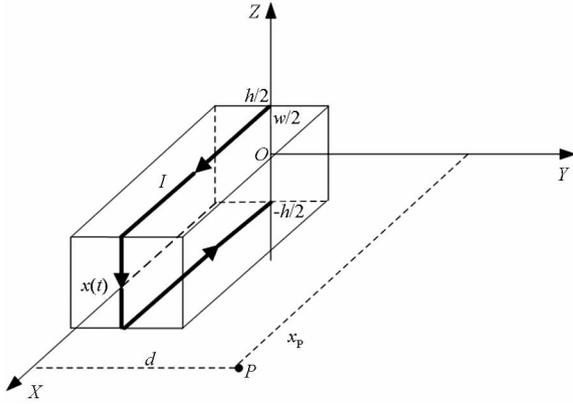


图 1 电磁发射装置的坐标系

Fig. 1 Coordinate system of electromagnetic launcher

为简化模型做如下假设:在固体区域内和轨道内的电流为线电流,导轨和电枢都可以看作长直导体。直流导体在空间任意一点的磁感强度为:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (1)$$

其中:磁感强度 B 的方向为沿着以直导线为中心轴、 a 为半径的圆周切线,其指向与电流方向满足右手螺旋规则; θ_1 和 θ_2 分别为直导线两端的电流元与他们到 P 点径矢的夹角。

1.1 电枢产生的磁感强度

电枢电流元坐标为 $(x, 0, z)$ 。因为电枢是运动的,则 $x = x(t)$ 。设电枢到 P 点的径矢距离为:

$$R_1 = \sqrt{d^2 + (x_p - x)^2} \quad (2)$$

电枢端点到 P 点的径矢距离为:

$$R_2 = \sqrt{R_1^2 + (h/2)^2} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)中,得到电枢电流产生的磁感强度为:

$$B_a = \frac{\mu_0 I}{4\pi R_1} \left(\frac{h}{2R_2} - \frac{-h}{2R_2} \right) = \frac{\mu_0 I h}{4\pi R_1 R_2} \quad (4)$$

式(4)求出的是电枢在 P 点产生的总磁感强度,在各轴向的分量为:

$$\begin{cases} B_{ax} = \frac{\mu_0 I h}{4\pi R_1 R_2} \cdot \frac{d}{R_1} \\ B_{ay} = \frac{\mu_0 I h}{4\pi R_1 R_2} \cdot \frac{(x_p - x)}{R_1} \\ B_{az} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

1.2 导轨产生的磁感强度

设导轨到 P 点的径矢距离为:

$$R_3 = \sqrt{d^2 + (h/2)^2} \quad (6)$$

导轨两端点到 P 点的径矢距离分别为 R_2 , R_4 。其中, R_2 与式(2)中相同, R_4 为:

$$R_4 = \sqrt{R_3^2 + x_p^2} \quad (7)$$

得到的导轨在 P 点产生的磁感强度为:

$$B_{r1} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R_3} \left(\frac{x_p - x}{R_2} - \frac{x_p}{R_4} \right) \quad (8)$$

在各轴向的分量为:

$$\begin{cases} B_{x1} = 0 \\ B_{y1} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R_3} \left(\frac{x_p - x}{R_2} - \frac{x_p}{R_4} \right) \cdot \frac{h}{2R_3} \\ B_{z1} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R_3} \left(\frac{x_p - x}{R_2} - \frac{x_p}{R_4} \right) \cdot \frac{d}{R_3} \end{cases} \quad (9)$$

下导轨产生的磁感强度大小和上导轨产生的磁感强度大小相同,只是在各个方向分量不同。 $B'_{x1} = B_{x1} = 0$, $B'_{y1} = B_{y1}$, $B'_{z1} = -B_{z1}$ 。上下导轨在 P 点产生的合磁场强度分量为:

$$\begin{cases} B_{rx} = 0 \\ B_{ry} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R_3} \left(\frac{x_p - x}{R_2} - \frac{x_p}{R_4} \right) \cdot \frac{h}{R_3} \\ B_{rz} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

在 P 点的总磁场强度为:

$$\begin{cases} B_x = B_{ax} \\ B_y = B_{ay} + B_{ry} \\ B_z = 0 \end{cases} \quad (11)$$

假设 P 点周围小范围内为均匀磁场,以 P 为中心点,面积为 A ,匝数为 N 的线圈。在恒定电流下分别在 X, Y 方向上产生的感应电动势为:

$$\begin{aligned} e_x &= -NA \frac{dB_x}{dt} \\ &= \frac{\mu_0 N A I h d}{4\pi} \cdot v(t) \cdot [x_p - x(t)] \cdot \frac{R_1^2 + 2R_2^2}{R_1^4 R_3^2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$e_y = -NA \frac{dB_y}{dt} = \frac{\mu_0 NAI \cdot h \cdot v(t)}{4\pi} \cdot \frac{(x_p - x)^2 - R_2^2}{R_3^2 R_2^3} + \frac{\mu_0 NAI \cdot h \cdot v(t)}{4\pi} \cdot \frac{(x_p - x)^2 (R_1^2 + 2R_2^2) - R_1^2 R_2^2}{R_1^4 R_2^3} \quad (13)$$

2 磁探针设计及安装

根据第 1 节计算分析,导轨和电枢在 P 点处产生两个方向的磁场,那么以 P 点为圆心的线圈可以由垂直于发射平面和平行于发射平面两种摆放方式来产生感应电势。垂直导轨放置方式为:电枢和磁探针距离最短时,磁探针输出为正负电压的过零点。平行导轨放置方式为:电枢和磁探针距离最短时,磁探针输出为电压峰值。

在发射过程有着复杂电磁场环境下,磁探针产生感应的电动势可能会超过仪器的测量范围,导致采集系统得到的波形是平顶波,从而无法辨识电枢经过磁探针的时间。而过零点检测具有唯一性,因此选择磁探针垂直发射面的放置方式,如图 2 所示。

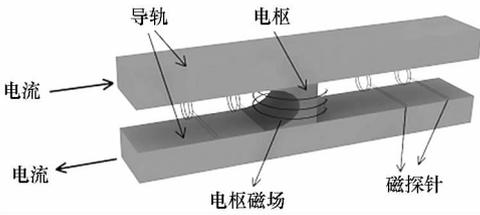


图 2 磁探针放置方式

Fig. 2 Placement of the magnetic probe

根据上文中磁探针感应原理和本实验室电磁发射过程中电流的波形、装置预留孔径的大小,计算了线圈的磁通,自助设计并绕制了实验使用的磁探针,如图 3 所示。

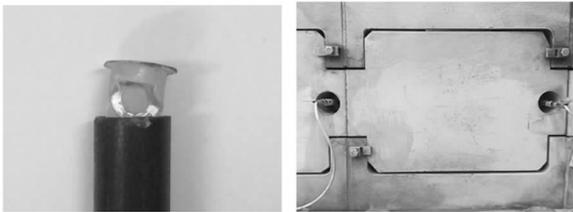


图 3 磁探针实物及安装

Fig. 3 Magnetic probe and fixed probes

在实验平台中沿着 X 轴在距离导轨发射起点 2 m 处放置磁探针,实验条件见表 1。

表 1 实验条件

Tab. 1 Experimental conditions

实验参数	数值
加载电流/mA	1.5
电枢速度/(m/s)	1500
离轨道间距/mm	100
线圈位置/m	2
线圈直径/mm	5
匝数	10

给发射装置加载恒定电流 1.5 mA,电枢运动到 2 m 前后的速度为 1500 m/s。采用表 1 中的参数,代入 MATLAB 中建立的数学模型,与得到的实验数据进行对比,结果如图 4 所示。

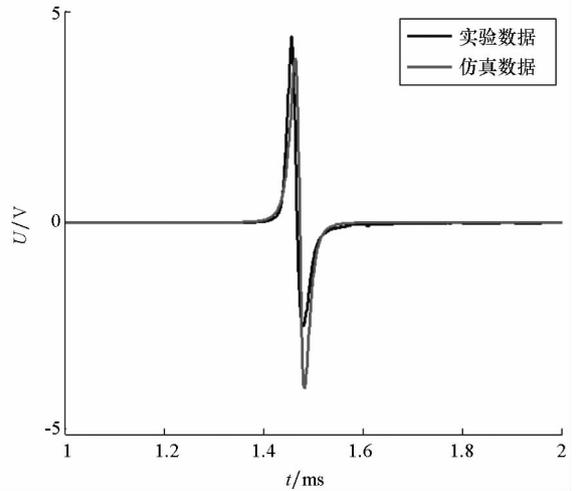


图 4 实验数据和仿真数据对比

Fig. 4 Comparison between experimental data and simulation data

从图 4 可以看出实验数据和仿真数据的波形基本一致,表明根据模型设计的磁探针符合本发射装置的应用条件。在过零点时间上略有差别,实验数据的峰值比仿真数据高,实验数据的谷值比仿真数据低。这些微小差异主要是由数学模型与实际参数的取值误差以及电磁发射中电流、阻力的变化,还有采集系统的采样精度等因素产生。

3 实验设计与分析

在多次电磁发射实验过程中,发现距离出口越近,磁探针所测数据越不稳定,如图 5 所示。发射过程中装置整体的振动带来的冲击主要导致两种状况:一个是磁探针感应波形不稳定,如图 5 第四通道所示;一个是磁探针数据丢失,如图 5 第五通道所示。且随着发射次数的增多,采用磁探针数据拟合得到的速度逐步偏低的趋势。从式(13)可知,线圈的面积和匝数和产生的电动势成线性比例,在

发射中装置的振动不会对磁探针的面积和匝数有影响,但会导致磁探针的角度以及与导轨的距离有所变化。因此有必要分析其对磁探针性能的影响。

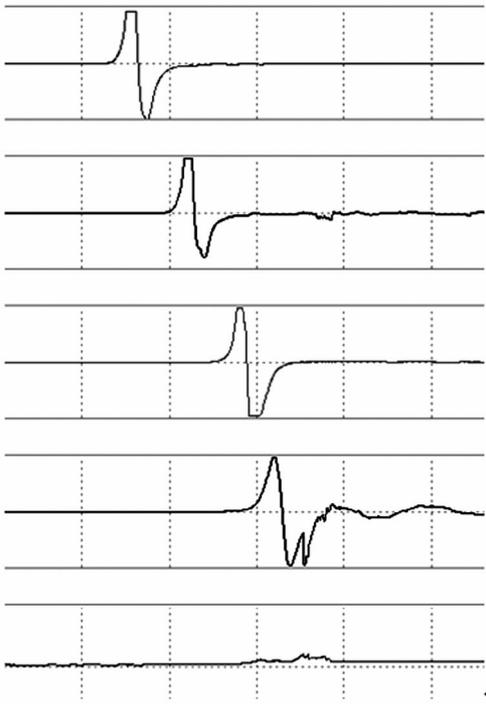


图 5 磁探针阵列测量波形

Fig. 5 Waveform of magnetic probes array

3.1 仿真分析

采用单一变量法来分析距离变化和角度偏转变化对磁探针性能的影响,主要设有三个指标:

- 1) 峰值电压:线圈产生的电压最大值。
- 2) 峰谷时间:最大电压值和最小电压值对应的时间间隔。
- 3) 过零时刻:感应电压为零的时刻。

考虑振动对位移的影响,对磁探针移动下的性能进行检测。在其他条件和表 1 相同时,线圈放置距导轨距离分别选择 90 mm, 95 mm, 100 mm, 105 mm, 110 mm 五组,如表 2 所示,在 MATLAB 中分析计算磁探针放置位置对峰值电压和峰谷时间的影响。

表 2 线圈放置距离对比

Tab. 2 Comparison of placed distance of coils

因素	磁探针序号				
	1	2	3	4	5
距离 L/mm	90	95	100	105	110
峰值电压 U/V	4.952 7	4.231 4	3.643 2	3.158 9	2.755 9
峰谷时间 t/ms	0.061	0.064	0.067	0.071	0.074

根据式(12)可知,磁探针峰值感应电压和其

距导轨距离成比例关系,峰谷时间逐步增大。通过仿真计算得到的表 2 数据及图 6 的对比表明:距离越远,峰谷时间越大,峰值电压幅值越小。峰谷时间短,可以减少过零点的时间误差,这表明在磁探针使用时,在条件允许下尽量靠近导轨。

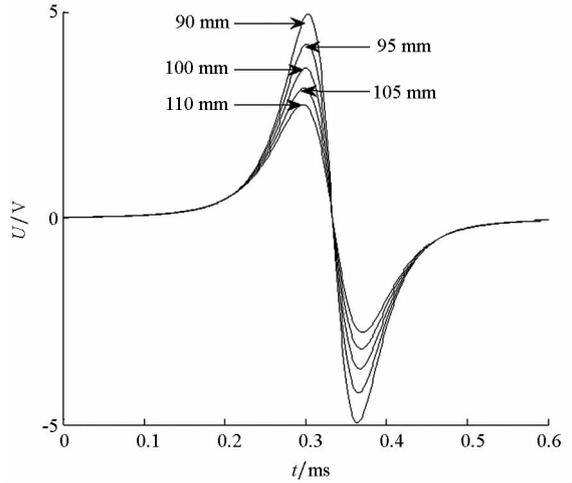


图 6 距离对感应电压的影响

Fig. 6 Influence of distance to induced voltage

装置在振动下会导致线圈沿着中轴线转动从而导致线圈有一定的偏角。仿真实验模拟在初速度一定的情况下,磁探针有一定偏角下的测试性能。在表 1 其他实验条件不变时,磁探针的偏转角选择 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 五组,如表 3 所示,在 MATLAB 中计算运动电枢对峰值电压和峰谷时间的影响。

表 3 磁探针偏转角度对比

Tab. 3 Comparison of different angles of magnetic probes

因素	磁探针序号				
	1	2	3	4	5
偏转角度 $r/(\circ)$	15	30	45	60	75
峰值电压 U/V	3.518 0	3.392 8	3.143 7	2.898 1	2.656 0
峰谷时间 t/ms	0.067	0.068	0.068	0.069	0.069

根据式(12)、式(13)可知,磁探针的峰值感应电压和其偏转角度之间没有直接的线性关系,需要先计算磁探针线圈面积 A 在 X 轴上的投影面积,然后代入式(12)计算磁探针的峰值感应电压。通过仿真计算得到的表 3 数据及图 7 中感应电压随时间变化的规律表明:角度偏转越大,峰值电压幅值越小,峰谷时间也随之增大。而随之变化的是磁探针感应电压的过零时刻向后偏移。

从仿真结果来看,振动造成的距离变化没有对磁探针的过零点产生影响,而角度变化对过零点造成影响。

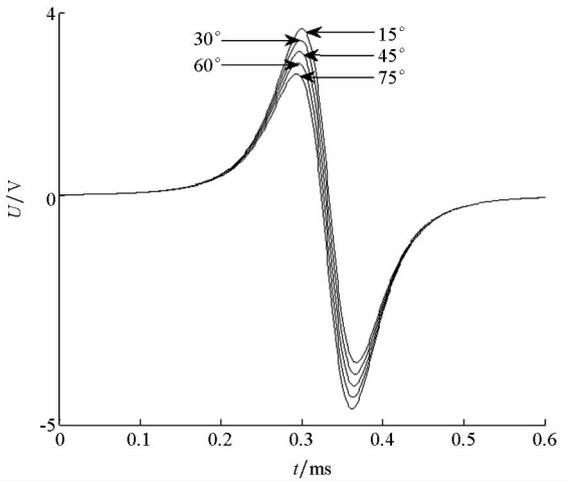


图7 角度对感应电压的影响

Fig.7 Influence of angle to induced voltage

3.2 试验对比

为了验证磁探针角度偏转和离导轨距离两种故障状态对测试性能的影响。在磁探针正确安装下,选取发射实验平台中间部位的五个磁探针测得的数据作为参考数据。

为验证距离是否对感应电压、谷峰时间、过零时刻有影响,第一组实验是在参考实验的基础上依次把磁探针向外拉出一定距离,即在 90 mm 基础上,依次往外拉出 5 mm,测量磁探针的感应电压相关数据。

为验证角度偏转是否对感应电压、谷峰时间、过零时刻有影响,第二组实验为在参考实验的基础上对靠近装置尾部的三个磁探针依次旋转 15°,测量它们的感应电压相关数据。

第三组实验为在参考实验的基础上对靠近装置尾部的三个磁探针依次旋转 30°,测量它们的感应电压相关数据。

电枢在经过不同标号磁探针时速度不一样,若保证电源放电的电流波形一致,在每次发射中经过相同序号的磁探针的速度是一样的。由式(13)可知,影响磁探针感应波形的重要因素之一就是电流。有必要对放电电流的波形一致性进行分析。

实验中脉冲电源控制器对放电电流的控制误差在 100 A 以内,和单个模块峰值电流 100 kA 相比,其误差系数 $\eta = 100/100\ 000 = 0.1\%$ 。放电电流波形的变化在误差范围内,从而可以认为电流在多次实验中保持一致。但为了最大限度减少放电电流波形不一致导致的误差,先后分别对三组实验做了 10 次放电,分别从中选取与参考放电电流误差最小的 2 次作为实验数据。

实验所测得的数据如表 4 所示。实验中,为

方便比较,统一把第一个磁探针过零时刻设为起始时间。

表4 实验数据
Tab.4 Experimental data

因素	磁探针序号				
	1	2	3	4	5
参考数据					
峰值电压 U/V	4.227	4.990	4.969	4.966	4.974
峰谷时间 t/ms	0.068	0.064	0.059	0.048	0.040
过零时刻 t/ms	0	0.204	0.368	0.527	0.668
增加距离 L/mm	0	5	10	15	20
第一组					
峰值电压 U/V	4.236	4.266	4.278	4.309	4.331
峰谷时间 t/ms	0.068	0.067	0.062	0.051	0.043
过零时刻 t/ms	0	0.201	0.366	0.529	0.664
偏转角度 $r/(^\circ)$	0	0	15	15	15
第二组					
峰值电压 U/V	4.247	4.966	4.778	4.799	4.881
峰谷时间 t/ms	0.068	0.067	0.062	0.051	0.043
过零时刻 t/ms	0	0.202	0.370	0.532	0.672
偏转角度 $r/(^\circ)$	0	0	30	30	30
第三组					
峰值电压 U/V	4.213	4.971	4.306	4.484	4.562
峰谷时间 t/ms	0.065	0.063	0.058	0.050	0.041
过零时刻 t/ms	0	0.201	0.376	0.540	0.683

从表 4 中第一组数据和参考数据对比来看,当磁探针和轨道距离增大时,感应电压的峰值减少,峰谷时间增加,在过零时刻上有微小偏差,但没有过多影响。

从表 4 中第二组、第三组数据和参考数据对比来看,在角度偏转时,并没有和角度的余弦值成比例,主要原因是线圈偏转之后,不仅对电枢的磁场产生感应电压,也对轨道的磁场产生了感应电压。并且角度偏转对磁探针的过零点检测误差偏大,时间数据对下一步的速度拟合造成了内膛速度降低的误差,如图 8 所示。

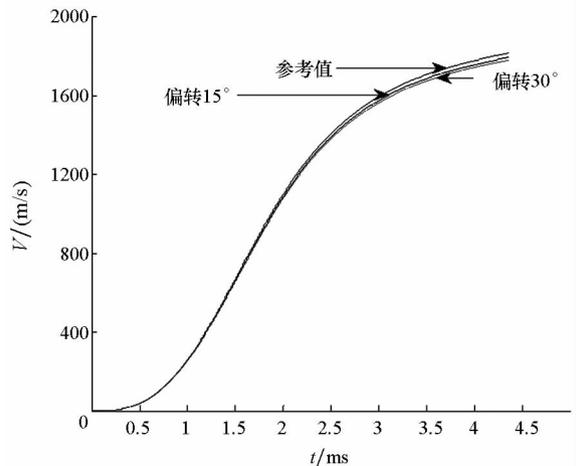


图8 实验速度拟合对比

Fig.8 Comparison of angle of the coils

4 结论

通过在实验平台上测试磁探针垂直导轨放置方式的性能,验证了所建模型的正确性。设计实验分析了电磁发射中振动导致的磁探针距离变化和角度偏转是否影响电磁发射过程的检测性能。仿真以及实验对比结果说明,在小范围距离变化产生的误差是在可接受范围内。并没有影响到对速度的测量。所测数据表明在振动条件下的角度偏转变化产生的时间误差会使得磁探针测量的出口速度的准确性降低。下一步有必要结合发射装置设计新型的磁探针以提高测量的鲁棒性。

参考文献 (References)

- [1] 王莹,肖峰.电炮原理[M].北京:国防工业出版社,1995:416-419.
WANG Ying, XIAO Feng. The theory of electric gun[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 416-419. (in Chinese)
- [2] 雷银照.轴对称线圈磁场计算[M].北京:中国计量出版社,1991:195-229.
LEI Yinzhao. Calculation of axisymmetric magnetic field of coil[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1991: 195-229. (in Chinese)
- [3] 李迎生.小口径电磁轨道炮内弹道特性初步研究[D].南京:南京理工大学,2007:34-36
LI Yingsheng. Primary study on interior ballistics of a small-caliber electromagnetic railgun [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007: 34-36. (in Chinese)
- [4] 曹昭君,何俊佳,王子建,等.电磁发射中固体电枢的磁探针测速方法研究[J].高电压技术,2006,32(6):56-59.
CAO Zhaojun, HE Junjia, WANG Zijian, et al. Research on velocity measurement of solid armature by B-dot probes in electro-magnetic launch [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 56-59. (in Chinese)
- [5] 程诚,关永超,何勇,等.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[J].高压物理学报,2013,27(6):901-907.
CHENG Cheng, GUAN Yongchao, HE Yong, et al. Measurement of solid armature's in bore velocity using B-dot probes in series enhanced railgun [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(6): 901-907. (in Chinese)
- [6] 王咸斌,徐伟东,袁伟群,等.电磁发射中固体电枢的磁探针测速误差[J].强激光与粒子束,2014,26(4):288-293.
WANG Xianbin, XU Weidong, YUAN Weiqun, et al. Inaccuracy in measuring solid armature velocity by B-dot probe in electromagnetic launch [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4): 288-293. (in Chinese)
- [7] 刘福才,李欢,王大正,等.基于B探针的膛内电枢速度测量系统研究[J].兵工学报,2014,35(6):762-768.
LIU Fucui, LI Huan, WANG Dazheng, et al. Research on velocity measurement of solid armature in electromagnetic launch based on B-dot probes [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(6): 762-768. (in Chinese)
- [8] 李菊香,苏子舟,国伟,等.基于B探针的轨道炮电枢位置测量及研究[J].火炮发射与控制学报,2014,35(2):40-44.
LI Juxiang, SU Zizhou, GUO Wei, et al. Measurement and study of electromagnetic rail gun armature position based on B-dot probe [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2014, 35(2): 40-44. (in Chinese)
- [9] Cao R G, Li J, Jiao Q J, et al. Analysis and measurement of transient currents in railgun with loop probes [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1479-1483.
- [10] Crawford M, Stefani F, Motes D. B-dot sensors to determine axial location of rail-to-armature current [C]// Proceedings of International Symposium on electromagnetic launch technology, Belgium, 2010.