文章编号:1000-5773(2013)06-0901-07

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*

程　诚[1,2],关永超[2],何　勇[2],高贵山[2],
李业勋[2],仇　旭[2],宋盛义[2]

(1.中国工程物理研究院研究生部,北京　100088;
2.中国工程物理研究院流体物理研究所脉冲功率科学与技术重点实验室,四川绵阳　621999)

摘要:采用磁探针(B-dot)测电磁轨道炮内弹道速度的方法是,基于电枢经过探针线圈时引起感应磁通变化的原理,测出系列的电枢位移-时间离散点后拟合成电枢位移曲线,然后对位移曲线时间微分得到速度曲线。在串联增强型轨道炮中,磁探针感应磁通需考虑外轨及内外轨道连接导体中电流的影响,而磁探针输出的微分信号积分后除以电流,将得到一个与电流无关、只随电枢与探针相对位置变化的比值函数。电枢磁探针或轨道磁探针的比值函数在电枢经过时分别取最大值或中值,因此比值函数的此种特征可用来判断电枢到达相应探针位置的时刻。在双轨串联增强电磁轨道炮上设计了3发条件相同的实验,分别利用电枢磁探针和轨道磁探针并结合激光干涉测速方法(VISAR),测试并拟合了位移、速度曲线。比较结果发现三者一致性较好,拟合的炮口速度与测试速度接近。磁探针尺寸及位置、轨道及电枢中的电流分布以及杂散电磁干扰等,是影响磁探针测速精度的主要因素。

关键词:电磁轨道炮;内弹道速度;磁探针;比值函数;固体电枢
中图分类号:TM153;TJ399　　**文献标识码**:A

1　引　言

电磁轨道炮内弹道速度的测试,对研究轨道/电枢相互作用机理具有十分重要的意义。电枢受电磁力加速运动是一个复杂的过程,包括电枢与轨道产生的高速摩擦磨损、烧蚀刨蚀、甚至电枢转捩等多种综合效应[1-2],会对速度和加速度产生明显影响。通过对内弹道位移和速度的测量,可分析和研究各种效应的形成机理、掌握电磁力加速的基本规律,为电磁轨道炮装置设计提供依据。目前国外已经发展了包括磁探针[3]、毫米波多普勒雷达[4]、激光干涉测速(VISAR[5]、PDV[6])、加速度计调制遥测[7]和高速摄影[8]等多种测量方法,但由于在电磁力加速过程中,受强磁场、放电电弧、机械振动以及高加速度等恶劣条件的影响,完整而精确地测量内弹道速度仍然相当困难。

本研究利用磁探针感应磁场变化的原理确定电枢的位置,并拟合位移和速度,具有测量成本低、方法简便、不受烟雾及机械振动等恶劣因素干扰的优点。磁探针广泛用于测量固体电枢和等离子电枢内弹道速度,但大多针对单轨道的简单轨道炮[3,9-10],而针对本研究涉及的双轨串联增强固体电枢轨道炮却不多见。由于外层轨道和两端用于连接内、外层轨道的连接导体一直处于导电状态,双轨串联增强轨

* **收稿日期**:2012-01-17;**修回日期**:2012-03-17
基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金(2012B0402057)
作者简介:程　诚(1986—),男,硕士研究生,主要从事电磁发射研究. E-mail:doublecc@mail.ustc.edu.cn
通讯作者:宋盛义(1967—),男,博士,研究员,主要从事电磁发射研究. E-mail:songshengyi@163.com

道炮中磁探针感应的磁场变化比简单轨道炮复杂，需考虑的因素增多，因而测试和处理方法将有所不同。由于外轨道和连接导体的存在，需引入相应的感应系数，剔除探针信号中的干扰基底。探针输出的微分信号还包含了电流变化信息，需要采用比值函数方法[3,9]消除电流变化的干扰。为比较起见，设计了 3 发条件相同的实验，分别采用了电枢、轨道两种磁探针和 VISAR 测速方法进行测量。文中首先介绍串联增强轨道炮中磁探针比值函数的测速原理，其次介绍实验方案、测量信号的处理和拟合结果，并对影响测量精度的因素进行了分析和讨论。

2 基本原理与方法

图 1 为双轨串联增强型轨道炮和磁探针阵列示意图，图中内、外两层轨道由连接导体在炮口和炮尾端串联连接，因此流经内、外层轨道、连接导体及电枢的电流相等。炮膛的高度为 h、宽度为 w，电枢和磁探针与炮尾端面的轴向距离分别记为 z_a 和 z_p。磁探针线圈输出信号正比于垂直穿过线圈平面的磁通变化率，与平行于线圈平面的磁场无关。流经轨道和电枢的电流方向不同，将分别产生不同方向的环向磁场，因此探针可以分为电枢磁探针和轨道磁探针。图 1 所示为炮体侧面视图(左)和炮尾端面视图(右)。电枢磁探针阵列排布在炮体的侧表面，位于上、下轨道的中间，距离炮膛中心轴线 z 轴的距离为 d，线圈平面垂直于电枢的运动方向，只感应电枢电流或与之同方向电流产生的 z 向磁场分量；轨道磁探针阵列排布在炮体上边缘，距离上、下轨道对称面(x-z 平面)的距离为 a，距离左、右对称平面(y-z 平面)的距离为 d，使轨道磁探针与轨道表面平行，只感应轨道电流产生的 y 向磁场分量。

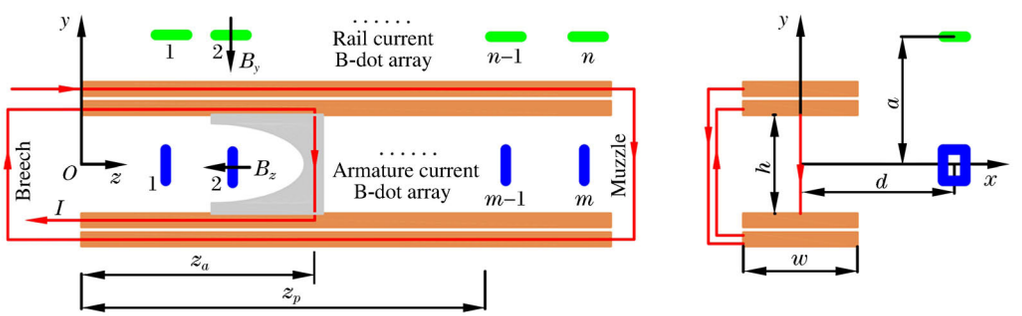


图 1 串联增强轨道炮和磁探针阵列示意图

Fig. 1 Series enhanced railgun and B-dot arrays

如果磁探针线圈尺寸相对于 a、d 足够小，可认为等效磁场中心(平均磁场的对应点)与线圈平面几何中心重合、即线圈内部磁场近似均匀。根据毕奥-萨伐尔定律，电枢电流在电枢磁探针中产生的磁通可表示为 $\Phi^{\mathrm{A}}=F^{\mathrm{A}}(z)I$[3]，其中 $z=z_{\mathrm{a}}-z_{\mathrm{p}}$ 表示电枢相对于探针的位置。如图 2(a)所示函数 $F^{\mathrm{A}}(z)$ 的取值随着电枢接近探针而逐渐增大，在经过的瞬间达到一个极大值，并随电枢的离开而逐渐减小，即电枢经过探针的瞬间，$F^{\mathrm{A}}(0)$ 应为 $F^{\mathrm{A}}(z)$ 的极大值[3]。在串联增强轨道炮中，由于炮尾和炮口内、外轨道连接导体中电流的影响，电枢磁探针实际感应的磁通 $\Phi_{\mathrm{A}}^{\mathrm{A}}$ 是电枢电流磁通 Φ^{A} 与连接导体电流磁通 $k^{\mathrm{A}}I$ 之和

$$\Phi_{\mathrm{A}}^{\mathrm{A}}=\Phi^{\mathrm{A}}+k^{\mathrm{A}}I=I[F^{\mathrm{A}}(z)+k^{\mathrm{A}}] \tag{1}$$

靠近炮尾和炮口两端的电枢磁探针感应磁通受连接导体的影响非常明显，远离两端则影响逐渐变弱，即探针对连接导体电流的感应系数 k^{A} 在两端较大、中间最小。

轨道探针感应的磁通也分为两部分，内轨道中电流引起的磁通可表示为随电流、电枢位移变化的函数 $\Phi^{\mathrm{R}}=F^{\mathrm{R}}(z)I$[3]；外轨道中电流感应的磁通为 $k^{\mathrm{R}}I$，k^{R} 是探针对外轨道电流的感应系数。$F^{\mathrm{R}}(z)$ 的取值如图 2(b)所示，随电枢的接近、远离而逐渐增大并趋于不变，电枢经过探针的瞬间 $F^{\mathrm{R}}(0)$ 应为中值[3]。轨道探针的总磁通表示为

$$\Phi_{A}^{\mathrm{R}}=\Phi^{R}+k^{\mathrm{R}}I=I[F^{\mathrm{R}}(z)+k^{\mathrm{R}}] \tag{2}$$

在简单轨道炮中没有外轨道和连接导体，(1)式、(2)式中不存在 k^{A}、k^{R} 项。(1)式、(2)式中 F^{A}、F^{R}、k^{A}、

k^R 均含有探针位置、探针及炮体结构等参数信息,而 k^A、k^R 不随时间和距离 z 变化,$F^A(z)$、$F^R(z)$由于电枢运动使 z 随时间变化,所以 $F^A(z)$、$F^R(z)$的取值与时间有对应关系。可见,只要找到 F^A 的极值点和 F^R 的中值点对应的时间,就可以确定电枢到达探针位置的时间。

由(1)式、(2)式可知,磁通和磁通变化率均与距离 z 和电流 I 相关,电流变化对磁探针微分信号判断电枢经过时间有影响,而探针微分信号积分得到的磁通相似量除以电流得到的比值函数可以消除电流变化的影响[3,9]。串联增强轨道炮的比值函数为

$$F_A^A(z) = F^A(z) + k^A, F_A^R(z) = F^R(z) + k^R \tag{3}$$

磁探针积分信号标定后可视为磁通量,因此比值函数类似于探针与炮体的互感系数。电枢位置随时间变化,比值函数也是时间的隐函数,而固定探针的 k^A、k^R 可视为常数,因此串联增强型轨道炮中 $F_A^A(z)$的极值或 $F_A^R(z)$的中值所对应的时间即为电枢到达探针的时间。根据磁探针阵列测得的电枢位移-时间离散点,采用数值拟合方法可拟合成光滑的位移-时间曲线,然后对时间微分即得到速度曲线和加速度曲线。

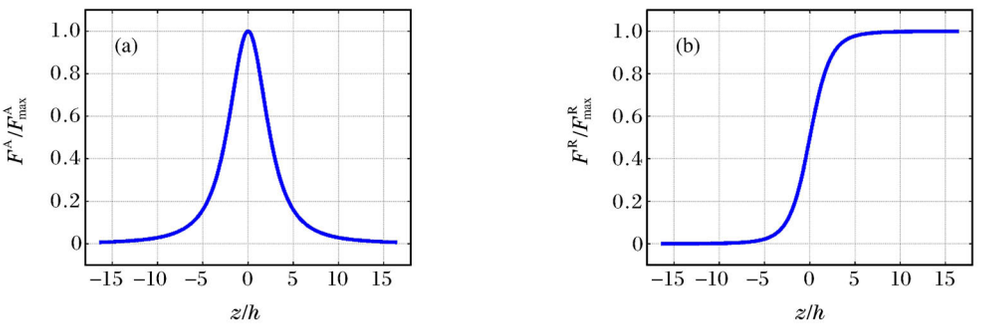


图 2 比值函数 F^A/F^A_{max}、F^R/F^R_{max}示意图(横轴为距离 z 与膛高 h 的比值)

Fig. 2 Schematic of the ratio function: F^A/F^A_{max}, F^R/F^R_{max}

(The x-axis is the ratio of the distance z to the bore height h)

3 实验装置及参数

图 3(a)所示为 20 mm×25 mm 口径、长 2.2 m 的串联增强电磁轨道炮,包括内、外两层共 4 根铜制轨道,图中炮体上边缘贴有轨道磁探针阵列。图 3(b)所示为 30 mm 长的铝制 U 形电枢。整个轨道炮系统由最大储能 1.6 MJ 的电容器组驱动。实验中所有电容器同时触发放电,电流通过同轴电缆汇流到炮尾,总电流采用 Rogowski 线圈测量,炮口电压采用分压器测量,电枢出膛的炮口速度采用远离炮口端约 3 m 的丝网靶测量。图 3(c)所示为漆包线绕制而成的磁探针。磁探针响应的特征时间由探针线圈电感与测试回路电阻的比值决定,所有探针线圈的电感均约为 0.7 μH,通过 50 Ω 匹配电阻连接示波器,因此特征响应时间远小于驱动电流约 260 μs 的上升前沿,满足测试要求。实验中探针输出的微分信号由瞬态采集卡记录,共排布电枢磁探针 16 枚,轨道探针 22 枚,与炮尾端面距离按图 1 示意的编号顺序分别列于表 1 和表 2 中。



图 3 (a) 炮体与轨道磁探针阵列;(b) U 形固体电枢;(c) 磁探针

Fig. 3 (a) Railgun and rail current B-dot array; (b) U-type solid armature; (c) B-dot

表 1 电枢磁探针阵列到炮尾距离

Table 1 The distance between armature current B-dot probes and the breech

No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)
1	182	3	242	5	451	7	827	9	1 229	11	1 466	13	1 829	15	2 005
2	203	4	336	6	625	8	981	10	1 361	12	1 700	14	1 920	16	2 092

表 2 轨道磁探针阵列到炮尾距离

Table 2 The distance between rail current B-dot probes and the breech

No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)	No.	z_p /(mm)
1	165	4	239	7	355	10	662	13	1 221	16	1 461	19	1 704	22	2 106
2	194	5	268	8	415	11	905	14	1 302	17	1 543	20	1 941		
3	210	6	312	9	496	12	1 064	15	1 382	18	1 628	21	2 023		

设计了 3 发初始条件基本相同的实验，充电电压均为 5 kV，电枢质量均打磨至 26.5 g，并保证电枢安装条件（预紧力、电枢初始位置）及轨道表面条件（间距、表面粗糙度）基本一致，分别采用激光速度干涉仪（VISAR）、电枢磁探针以及轨道磁探针 3 种方法开展内弹道测速。根据以往实验的经验，在上述相同条件约束下，可保证电流、电压、出口速度等主要结果基本相同，而内弹道过程也将基本一致，将 3 种方法得到的结果进行比较、相互验证是可信和有意义的。

4 实验结果与讨论

4.1 电流、电压与炮口速度

图 4 所示为 VISAR、电枢磁探针和轨道磁探针 3 发实验各自实测的总电流波形和炮口电压波形。图中波形基本重合，最大电流均在 320 kA 左右。电压波形在内弹道过程中稳定，表明整个过程无转捩发生，电压均在 2.17 ms 左右的出膛瞬间发生突变，丝网测得的出口速度分别为 1.30、1.32 和 1.27 km/s。以上结果说明 3 发实验的内弹道过程稳定性好、一致性有充分保证。

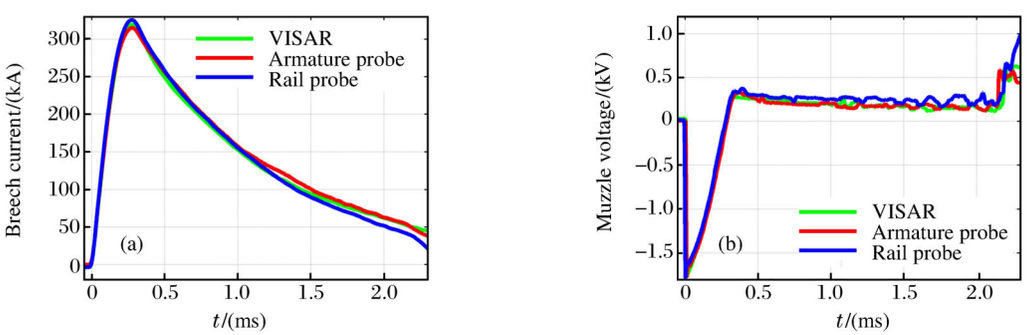


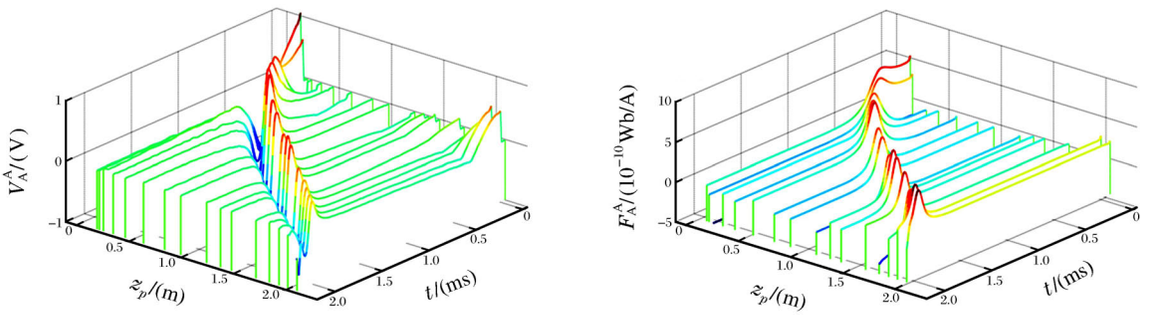
图 4 VISAR、电枢磁探针、轨道磁探针 3 种方法对应的炮尾电流波形(a)与炮口电压波形(b)

Fig. 4 The breech current (a) and muzzle voltage (b)

4.2 磁探针信号与比值函数

将电枢磁探针阵列测得的系列信号，按表 1 中所列探针编号与位置的对应关系，作图 5(a)所示的瀑布图，其中 V_A^A 为微分信号幅值，从图中可看出，靠近炮尾和炮口两端的电枢探针信号，在初始阶段受连接导体中电流变化的影响明显，产生了较大的干扰基底，而位于炮体中段的探针受到的干扰则很小。将输出微分信号数值积分并除以电流后得到如图 5(b)所示的比值函数瀑布图，从图中可看到，尽管炮尾和炮口两端探针比值函数的 k^A 值较大、基底较高，但各个比值函数的峰值点却十分明显，因此容易找到峰值对应时间，即电枢经过该探针的时间。

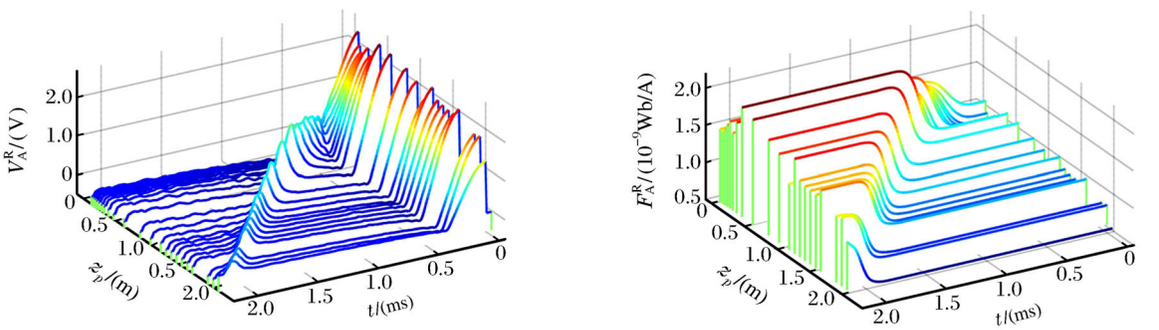
同样在轨道探针阵列的实验中,得到了如图 6 所示的输出信号和比值函数。不同于电枢探针的是,由于增强外轨的存在,启动阶段每枚探针都存在几乎相同的干扰信号。图 6(b)中电枢经过时比值函数从一个常数值变化到另一个常数值,其中间值所对应的时间即为电枢经过该探针的时间。另外,对于靠炮口端太近的探针,电枢很快出膛使电流中断、比值函数变化过程不完整,不能得到中间值点。但是此时速度很快、且电流基本变化不大,可直接通过微分信号的局部极值点确定电枢经过探针的时刻。



(a) V_A^A　　(b) F_A^A

图 5　电枢磁探针微分信号(a)和比值函数(b)瀑布图

Fig. 5　The waterfall plots of armature current B-dot traces (a) and ratio functions (b)



(a) V_A^R　　(b) F_A^R

图 6　轨道磁探针微分信号(a)和比值函数(b)瀑布图

Fig. 6　The waterfall plots of rail current B-dot traces (a) and ratio functions (b)

4.3　电枢内弹道位移与速度曲线

电枢从足够远处靠近、经过并充分远离探针时的比值函数呈现一个完整的变化过程,但炮尾探针靠近电枢启动位置,炮口探针靠近出膛位置,是电枢在有限距离范围内接近或远离探针的,因此探针比值函数的变化过程可能不完整。另外,由于在电枢启动阶段速度低,使靠近电枢起始位置探针的比值函数随时间变化很慢,峰值点或中值点不易分辨,因而电枢启动时刻很难找准;而电枢的启动位置-时间点对拟合位移和速度曲线又十分关键,因此设计了 VISAR 测速实验,以确定电枢启动时间。尽管受电弧、烟雾以及电枢融化等因素的影响,VISAR 实际只测得最初 1.0 ms 左右的位移和速度曲线(分别对应图 7(a)、图 7(b)中绿色实线),但可以明确判定电枢克服静态摩擦阻力开始启动的时间大约为 0.1 ms。结合 16 枚电枢探针和 22 枚轨道探针测得的图 7(a)圆点所示的电枢位移-时间离散点,可拟合成如图 7(a)实线所示的位移-时间曲线,对时间微分后得到如图 7(b)所示的速度-时间曲线。从图 7 中可以看到,由于发射条件相同,3 种方法得到的结果基本一致,两种探针拟合的炮口速度分别为 1.41、1.34 km/s,与实测的炮口速度(图 7(b)五角星所示)吻合程度也较高。

4.4　分析与讨论

磁探针测电枢经过时刻的精度,与磁探针的尺寸、位置、电流密度分布以及杂散电磁干扰等因素有关。轨道和电枢电流应假设为可忽略厚度的面电流、或在厚度方向呈稳恒分布,在此前提下,当电枢面

的电流平面或电流通道等效中心与电枢磁探针线圈平面重合时，比值函数 F^{A} 达到最大值；与轨道探针线圈等效磁场中心重合时，F^{R} 经历中值点。探针距轨道中轴越近(即 a、d 越小)，比值函数随 z 变化越快，幅值变化越大，信号越窄，更便于识别峰值点和中值点。但当探针线圈距轨道中轴过近且面积较小时，电流厚度不能忽视，即面电流假设可能失效，此时如果在电枢逼近并经过探针过程中电流沿厚度方向的分布随时间变化，则比值函数将随之变化，使判断电枢经过的时间产生误差。增大探针线圈面积有助于提高输出信号的幅值，但面积过大使线圈内部磁场更加不均匀，等效磁场中心不但与几何中心分离，还随 z 而变化，同样使判断电枢经过的时间产生误差。如果探针距轨道中轴距离过大，比值函数的幅度会变小且变化缓慢(半高宽变大)，在炮尾和炮口附近造成比值函数变化过程不完整、特征点不易分辨等后果。

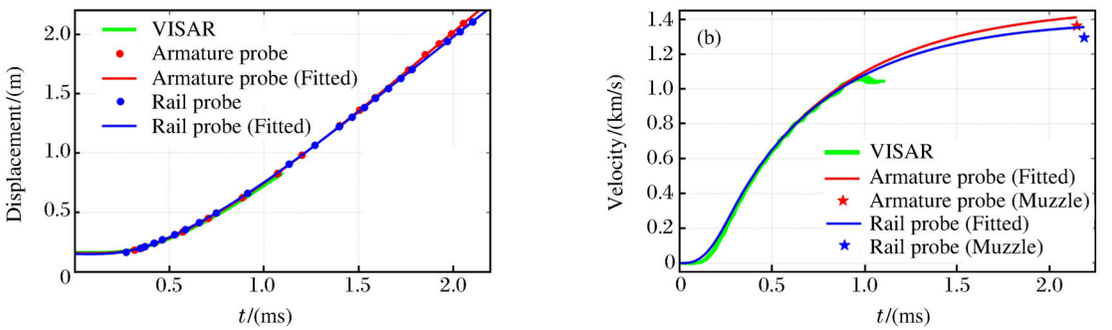


图 7 (a) 位移与时间关系；(b) 速度与时间关系

Fig. 7 (a) The measured and fitted position versus time; (b) The measured and fitted velocity versus time

针对电枢启动阶段速度小、加速度大的特点，需要增加炮尾区探针数目，以提高测试精度，要求设计尺寸小、距轨道中轴近的探针。基于上述分析，探针尺寸及位置距离的选择都必须谨慎，结合具体装置综合考虑。本实验中距离 $d=80$ mm、$a=68$ mm，线圈尺寸为 24 mm×12 mm，根据估算，电流在轨道和电枢中的趋肤深度为 2～4 mm，相对于探针线圈尺寸和距离 d 足够小，将电流分布视为面电流是合理的。由于距中轴较远，等效磁场中心与几何中心最大偏离应比线圈尺寸小得多，初步估计不超过8 mm，即离散点最大位置位移误差在约 8 mm 范围，但在炮尾区探针设计困难、数目偏少，不得不采用 VISAR 方法确定启动时刻。

另外，当探针线圈平面出现细微倾斜时有可能耦合其它方向的磁场，同时复杂电磁环境中杂散电磁波与测量系统产生随机耦合，都可能在一定程度上导致输出信号失真，实验中可以采用短路标定方式调整安装的位置和方向，以及控制信噪比的大小。

5 结 论

通过对磁探针测串联增强型电磁轨道炮内弹道速度方法的实际应用和分析讨论，得到的主要结果和结论为：

(1) 磁探针测电磁轨道炮内弹道速度是基于电枢经过探针引起探针线圈感应磁通变化的原理，首先测出一系列电枢位移-时间离散点并拟合出电枢位移-时间曲线，然后微分得到速度-时间曲线；

(2) 将磁探针输出的微分信号积分后除以电流，可得到一个能消除电流影响、只随电枢与探针相对位置变化的比值函数，当电枢经过电枢磁探针和轨道磁探针时，比值函数分别经历最大值点和中值点，对应的时间即为电枢到达探针位置的时间；

(3) 串联增强型电磁轨道炮的磁探针感应磁通受外轨道和连接导体电流的影响，得到的比值函数比简单轨道炮的比值函数增加了一个常数项，但并不影响比值函数的基本性质；

(4) 通过电枢探针和轨道探针对双轨串联增强轨道炮的实测，拟合的位移和速度曲线与 VISAR 结果基本一致，拟合的炮口速度与实测结果也吻合得较好，表明磁探针测速方法有效、可行；

(5) 影响磁探针测速精度的主要因素包括探针阵列的密度、探针线圈的尺寸及位置、安装精度和环境杂散电磁干扰等，其中探针线圈的尺寸及位置直接关系到比值函数特征点对应法的有效性，炮尾和炮口磁探针比值函数的变化过程不完整，尤其是炮尾低速阶段比值函数变化慢，特征点判读误差很大。

References:

[1] Marshall R A, Wang Y. Railguns: Their Science and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 17-18.

[2] Jing F Q, Chen J X. Dynamic High-Pressure Generation Principle and Related Technologies [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 341-342. (in Chinese)
经福谦,陈俊祥. 动高压原理与技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2006: 341-342.

[3] Parker J V. Magnetic-probe diagnostics for railgun plasma armatures [J]. IEEE T Plasma Sci, 1989, 17(3): 487-500.

[4] Schneider M, Eckenfels D, Nezirevic S. Doppler-radar: A possibility to monitor projectile dynamics in railguns [J]. IEEE T Magn, 2003, 39(1): 183-188.

[5] Asay J R, Konrad C H, Hall C A, et al. Continuous measurements of in-bore projectile velocity [J]. IEEE T Magn, 1989, 25(1): 46-51.

[6] Levinson S, Satapathy S, Elert M, et al. High-resolution projectile velocity and acceleration measurement using photonic doppler velocimetry [C]//AIP Conference Proceedings. Nashville, 2009: 585-588.

[7] Levinson S, Erengil M, Mcmullen K. Preliminary investigation of microwave telemetry on an eml projectile [J]. IEEE T Magn, 2003, 39(1): 173-177.

[8] Chakravarthy K M, Watt T J, Bourell D L. The use of high-speed video as an in-bore diagnostic for electromagnetic launchers [J]. IEEE T Plasma Sci, 2011, 39(2): 809-814.

[9] Wang Z J, He J J, Xia S G, et al. Evaluation of solid armature's in-bore position velocity and current distribution using B-dot probes in railgun experiments [J]. IEEE T Magn, 2009, 45(1): 485-489.

[10] Cao Z J, He J J, Wang Z J, et al. Research on velocity measurement of solid armature by B-dot probes in electromagnetic launch [J]. High Voltage Technology, 2006, 32(6): 56-59. (in Chinese)
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.

Measurement of Solid Armature's in-Bore Velocity Using B-Dot Probes in Series Enhanced Railgun

CHENG Cheng[1,2], GUAN Yong-Chao[2], HE Yong[2], GAO Gui-Shan[2],
LI Ye-Xun[2], QIU Xu[2], SONG Sheng-Yi[2]

(1. *Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing* 100088, *China*;
2. *Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621999, *China*)

Abstract: The solid armature's displacement and velocity can be obtained by arranging B-dot probe arrays along the barrel of a series enhanced railgun. The moment of armature arrival can be determined by an evident change in the differential signals of B-dot probes while armature passing by. However, it is difficult or even impossible to pick up the arrival moment directly because of not only armature movement but also current variety, especially for the series enhanced railgun with currents in outer rails and connecting conductors. To eliminate the influence of current variety, the ratio function is introduced, which is the ratio of the differential signal integral to the current. The ratio function of armature B-dot probe will reach a maximum when the armature arrives, while the one of rail B-dot probe will reach the median. Three shots with same initial conditions, which adopted armature probe, rail probe and VISAR respectively, were carried on a series enhanced railgun. The well agreement with each other about displacement and velocity waveforms indicated that method and measurement were valid. The accuracy of B-dot method is mainly affected by probe size and position, railgun current distribution and electromagnetic noise.

Key words: series enhanced railgun; in-bore velocity; B-dot; ratio function; solid armature