

电磁轨道发射系统电枢膛内速度实时检测方法研究

宋耀东¹, 李明¹, 陈丽艳¹, 王端¹, 钟和清²

(1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047;

2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 电枢出口速度的稳定性是电磁轨道发射系统的关键性能指标; 电磁发射试验过程中对电枢进行实时速度检测并实施反馈控制是提高这一关键指标的有效方法; 采用差分式 B 探针作为电枢在发射器膛内运动速度检测的传感器, 运用运算放大器、电压比较器以及门电路组成实时检测模块和脉宽比较模块, 提取电枢经过 B 探针的时刻并实时判断电枢速度是否达到所设定的阈值; 该实时速度检测过程延时时间不超过 2 微秒, 其输出结果可用于电磁轨道发射系统电枢速度反馈控制。

关键词: 差分式 B 探针, 实时速度检测, 电磁轨道发射

Study on Real-time Detection Method of Armature Velocity of Electromagnetic Rail Launch System

Song Yaodong¹, Li Ming¹, Chen Liyan¹, Wang Duan¹, Zhong Heqing²

(1. 27th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The stability of the armature exit velocity is the key performance indicators of the electromagnetic rail launch system. It is an effective way to improve this key indicator by real-time speed detection and feedback control in electromagnetic launch test. The differential B-dot is used as the sensor for the velocity detection of the armature in the emitter. The operational amplifier, voltage comparator and gate circuit are used to make the real-time detection module and pulse width comparison module, extract the time of the armature through B-dot and determine whether the armature velocity reaches the set threshold. The real-time speed detection process is delayed by $2\mu\text{s}$, the output results provide input to the feedback control decision of the armature velocity of the electromagnetic rail launch system.

Keywords: differential B-dot; real-time speed detection; electromagnetic rail launch

0 引言

电枢出口速度的稳定性是电磁轨道发射系统的关键性能指标^[1]。电磁发射试验过程中对电枢进行实时速度检测并实施反馈控制是提高这一关键指标的有效方法^[2]。对电枢运动速度实施反馈的前提是对电枢的膛内运动速度进行实时准确测量^[3]。

从 20 世纪 60 年代起, B 探针在等离子体内部磁场测量等大电流设备中得到广泛应用。1986 年, Bauer 等在电磁发射实验中将测得的 B 探针信号表示成位移有关的常微分方程, 结合电流波形测得了连续的电枢位置和速度^[4]。目前对电枢在膛内的运动速度的测量方法一般采用在发射器中预埋 B 探针, 利用模数转换芯片对 B 探针的感应电压波形进行采样, 通过算数运算计算出电枢经过 B 探针的时刻, 最后计算出电枢的速度^[5]。这种方法必须得到电枢膛内运

动的全部有效信息后, 才能通过数字信号分析处理得出电枢的运动速度, 不是对电枢速度的实时检测, 不能满足电枢速度闭环控制的需求^[6]。

本文采用差分式 B 探针作为电枢在发射器膛内运动速度检测的传感器, 运用运算放大器、电压比较器以及门电路组成实时检测模块和脉宽比较模块, 提取电枢经过 B 探针的时刻并实时判断电枢速度是否达到所设定的阈值。整个处理过程延时不超过 2 微秒, 可实现对电枢运动速度的实时检测, 可作为电磁轨道发射电枢速度反馈控制决策的依据。

1 差分 B 探针工作原理

B 探针是由缠绕在绝缘材质骨架上的铜漆包线支撑, 是较小的导体环线圈。线圈和支撑杆组成一个 B 探针装置。由于被测磁场变化, 该线圈内的磁通会产生变化, 从而产生感应电动势, 即该感应电压与通过线圈的磁通变化率成正比^[7-8]。B 探针根据法拉第电磁感应原理工作, 磁场随电枢运动而向前扩展, 变化的磁场在 B 探针中感应出变化信号, 因此 B 探针信号的变化特征能够反映出电枢的位置。

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-06-28。

作者简介: 宋耀东(1982-), 男, 河南获嘉人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电磁发射技术方向的研究。

其感应电压^[9]遵循式 (1) 所示:

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -nA \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

其中: V 是线圈两端感应电动势, Φ 是通过线圈的磁通, A 是线圈的面积, n 是线圈的匝数。其原理如图 1 所示。

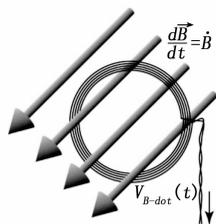


图 1 B 探针的工作原理图

差分磁探针组件包括印制板骨架和差分磁探针, 如图 2 所示。每一个差分磁探针包括两个磁探针和印制板骨架, 印制板骨架分为若干布线层, 通过印制板印刷工艺在多个布线层上绕制两个多匝线圈, 而且两个磁探针的绕线方向相反。

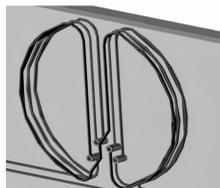


图 2 单个差分磁探针组件组成图

将差分探针水平安装在电磁炮导轨面正上方, 如图 3 所示。当电枢经过差分探针的几何中心时对应的感应电压过零, 以此作为电枢到达该位置的标志, 通过间距已知的一组差分探针来确定电枢的速度。这种差分探针的方法可以有效排除电磁干扰等对输出波形的影响, 得到良好的波形, 从而达到良好的测速效果, 可用于单轨或多轨增强型电磁轨道炮。

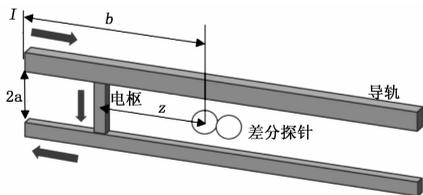


图 3 差分式 B 探针在轨道炮的安装位置

在电枢移动的过程中, 假设电枢速度相对于差分探针两个线圈的值很大, 感应过程中的电流视为恒定值, 则轨道的电流和电枢的电流由于电枢位置的变动都会两个线圈内产生磁通的变化, 进而感应出电压^[10], 将两个线圈的电压反向串联并输出到示波器, 得到差分电压的波形。通过理论推导及仿真分析得到差分探针感应电压波形如图 4 所示。

图 4 中的 x 轴表示电枢位置, y 轴表示电枢经过该探针时的感应差分电压。在 $x=0$ 位置, 即电枢经过差分探针两个线圈的物理中心点时, y 轴差分电压值为 0。可以检测上升沿过零点和最大值至最小值过零点两种方法来判断电枢

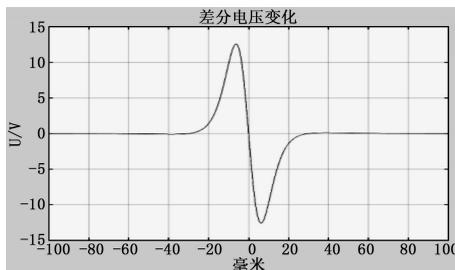


图 4 差分探针感应电压波形图

是否经过探针, 本文为了能够快速检测并反馈电枢状态, 采用检测上升沿过零点来判断电枢是否经过该探针位置。因此检测输出电压从过零点到最大值, 这个过零点时刻即为电枢经过探针时刻。沿着轨道面上方隔一定距离布置一系列的差分探针时, 就可以得到电枢运动速度并得到其速度变化情况。通过差分方法消除了干扰磁场信号, 使得信号的特征点更为清晰和明确, 解决了发射器膛内速度测量精度差、特征点不明显等问题。

2 膛内速度实时检测系统设计

膛内速度实时检测系统由序列差分式 B 探针线圈、实时检测模块以及脉宽比较模块三部分构成, 组成示意图如图 5 所示。

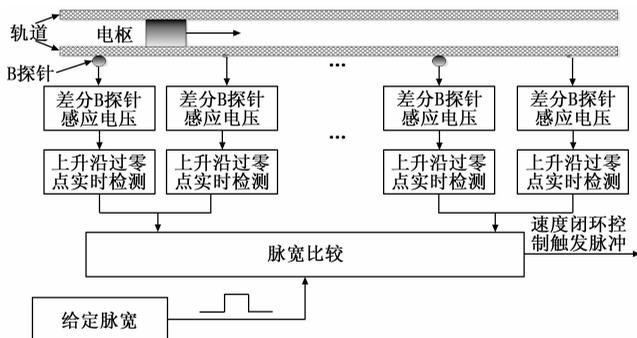


图 5 膛内速度实时检测系统组成图

差分式 B 探针线圈放置于电磁轨道发射器的预留位置, 当电枢到达该线圈所在位置时, 线圈上感生出电压信号通过屏蔽线传输到上升沿过零点实时检测模块; 上升沿过零点实时检测模块对线圈感应电压波形进行放大、变换、压缩后输入到脉宽比较电路; 脉宽比较电路将两路 B 探针之间的时间差与设定的时间进行比较, 如果 B 探针时间差小于设定时间, 则输出触发脉冲。

2.1 序列差分式磁探针线圈设计

序列差分式磁探针线圈放置于发射器预留位置, 该位置相距一般为 0.1~0.2 m, 位置示意如图 5 所示。B 探针长度可根据发射器进行调整, 原则上尽可能接近发射器中心位置。探针插入发射器的测量孔内, 其底座部分通过 BNC 连接器与发射器固连, 避免发射器冲击振动对设备造成影响。B 探针线圈由漆包线绕制而成, 线圈接头通过双绞线的方式引入骨架内孔, 并经由套管内的细孔连结至接线

端子, 线圈骨架及套管采用绝缘性能良好的四氟材料。

电磁发射过程中的电磁场很强, 所以 B 探针线圈可以做到很小。在线圈设计中, 应尽量减小线圈的尺寸, 以减小对发射器结构强度造成的影响。为了正确测试变化的磁场, B 探针线圈设计应该从以下 4 个方面的因素进行综合考虑:

1) B 探针的分布密度直接影响了速度变化曲线的精度。由于 B 探针采用位移与时间的比值测得平均速度, 所以 B 探针的密度越高, 速度测量的精度越好;

2) B 探针信号采集设备采样速率越高, 对峰值时刻或过零点时刻采样的准确度越高, 计算所得的速度值误差越小;

3) B 探针尺寸要尽量小, 使其空间分辨率更高, 同时不影响发射器结构强度;

4) B 探针灵敏度要足够高, 即要求线圈匝数多, 线圈截面积大, 从而速度曲线的波峰越陡, 以利于快速检测。

2.2 实时检测模块

本文采用 B 探针感应电压的上升沿过零点实时检测, 包括两级信号放大电路、波形变换电路和脉宽压缩电路。

2.2.1 两级信号放大电路

信号放大电路将 B 探针感应到的信号幅值进行放大, 根据前端 B 探针感应幅值及后端处理电路输入来确定放大倍数, 本文采用两级放大, 由放大器 A1 和 A2 组成, 放大器采用低噪声快速运放 THS4551, THS4551 是美国德州仪器公司的新型快速放大器, 具有低失真、高斜率、低噪声和超过 2 GHz 的增益带宽积。该电路的放大倍数由 $(R_3/R_2) \times (R_6/R_5)$ 决定, 本文采用放大倍数 $k=10$ 。两级信号放大电路如图 6 所示, 第一运算放大器 A1 对差分 B 探针感应电压 V_{in} 进行反向比例放大。第二运算放大器处于饱和放大状态, 第二运算放大器的输出信号为 F_2 。

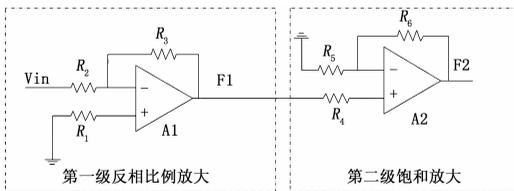


图 6 两级信号放大电路

2.2.2 波形变换电路

波形变换电路通过比较器将正弦波变换为脉冲信号, 以便后续电路准确检测波形上升沿。波形变换电路如图 7 所示。第一级变换电路为负电压比较电路, 由比较器 L1 和反向器 N1 组成。比较器采用 LM311, 该比较器是一款灵活性较高的电压比较器, 能工作于 5 V 到 30 V 的宽电压范围, 此灵活性使之可以驱动 DTL、RTL、TTL 或 CMOS 等逻辑电路。比较器 L1 的反相输入端为图 6 放大器 A2 的输出 F_2 , L1 的同相输入端为负比较电压, 本文取 -1.5 V; L1 的输出信号接反向器 N1, N1 的输出信号为 $F_2 - PFPY$ 。第二级变换电路为正电压比较电路, 由比较器 L2 和反向器

N2 组成。比较器 L2 的正相输入端为图 6 放大器 A2 的输出 F_2 , L2 的反相输入端为正比较电压, 本文取 1.5 V; L2 的输出信号接反向器 N2, N2 的输出信号为 $F_2 + PFPY$ 。比较器 L2 的输出 $F_2 + P$ 预留到下一步脉宽压缩电路使用。

此模块分别输出两个方波 $F_2 + PFPY$ 和 $F_2 - PFPY$ 。 $F_2 + PFPY$ 在差分 B 探针信号小于 1.5 V 时为高电平, 在差分 B 探针信号大于 1.5 V 时为低电平。 $F_2 - PFPY$ 在差分 B 探针信号大于 -1.5 V 时为高电平, 在差分 B 探针信号小于 -1.5 V 时为低电平。

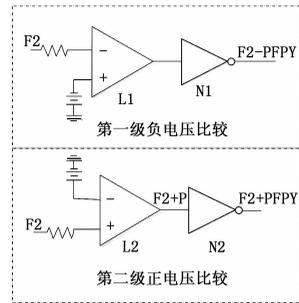


图 7 波形变换电路

2.2.3 脉宽压缩电路

脉宽压缩电路将波形变换电路所得到的脉冲信号进一步压缩, 以免后续脉宽比较模块的输入出现重叠波形的情况。脉宽压缩电路如图 8 所示, 由 RS 触发器 R1 和异或门 XOR1 组成。RS 触发器采用三态 RS 触发器集成电路 CD4044B, 该电路在使能状态下, 低电平触发有效。 $F_2 + PFPY$ 与 $F_2 - PFPY$ 分别作为 R1 的 S 端和 R 端的输入信号, R1 的输出为 $F_2 PULSE$ 。 $F_2 PULSE$ 在差分 B 探针电压小于 0 时为高电平, 在差分 B 探针电压大于 0 时为低电平。

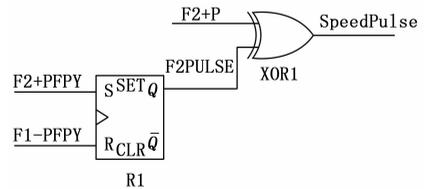


图 8 脉宽压缩电路

异或门 XOR1 的两个输入信号分别为 $F_2 + P$ 、 $F_2 PULSE$, $F_2 + P$ 在差分 B 探针感应电压小于零时为高电平, 在差分 B 探针电压大于零时为低电平。异或门 XOR1 的输出为 Speedpulse。差分 B 探针电压大于零而小于 1.5 V/10 时 Speedpulse 为高电平, 其他时刻 Speedpulse 为零。Speedpulse 的上升沿时刻与差分 B 探针的上升沿过零点时刻相同, 1.5 V/10 越小, Speedpulse 的脉冲宽度越小。

2.3 脉宽比较电路

在两路差分 B 探针距离一定的情况下, 速度与电枢通过两路探针的时间差呈反比。假设弹丸达到速度阈值时, 弹丸经过两路探针的时间差为 Δt_0 , 如果弹丸经过两路探针的时间差 t 大于 Δt_0 , 则速度小于阈值; 如果弹丸经过两路探针的时间差 t 小于 Δt_0 , 则速度大于阈值。

脉宽比较电路图如图 9 所示, 由或门 OR1、计数器 JS、异或门 XOR2 和与门 AND1 组成。计数器 JS 采用 CD74HCT4020, 该计数器是 14 态脉冲计数器, 能够快速灵活地对脉冲信号进行计数。脉宽比较电路的处理逻辑为假设两路差分 B 探针上升沿过零点检测模块的输出信号分别为脉冲 A, 脉冲 B。脉冲 A, 脉冲 B 分别为或门 OR1 的输入信号, OR1 的输出信号为脉冲 C, 脉冲 C 的前后两个上升沿分别与脉冲 A 和脉冲 B 的上升沿时刻一致。脉冲 C 为二进制计数器 JS 的输入, JS 会在脉冲的上升沿时刻发生状态翻转, 则二进制计数器的输出脉冲 E 的脉宽为弹丸经过两路差分 B 探针的时间差。

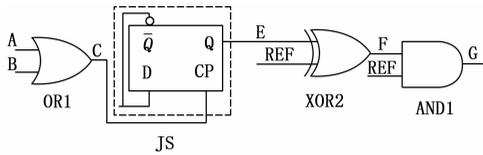


图 9 脉宽比较电路图

标准脉冲 REF 的脉宽为 Δt_0 。脉冲 E 与标准脉冲 REF 作为异或门 XOR2 的输入信号, XOR2 的输出信号为脉冲 F, F 与 REF 作为与门 AND1 的输入信号, AND1 的输出为信号 G。

当脉冲 E 的脉宽比脉冲 REF 的脉宽大时, 信号 G 会一直维持低电平状态, 代表弹丸运行速度没有超过阈值, 时序如图 10 所示。

当脉冲 E 的脉宽比脉冲 REF 的脉宽小时, 信号 G 会在 t_2 时刻输出一个上升沿脉冲, 代表弹丸运行速度已经超过阈值。第二与门 AND2 的输出信号 G 可作为反馈环节的触发信号, 时序如图 11 所示。

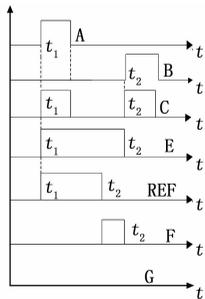


图 10 电枢速度未达到设定值时序图

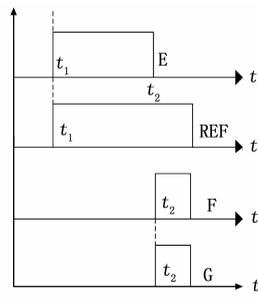


图 11 电枢速度达到设定值时序图

2.4 延迟时间分析

由上述可知, 整个处理电路由 2 级放大电路、1 级比较电路、1 级反向门电路、1 级 RS 触发电路、2 级异或门电路、1 级或门电路、1 级计数器电路和 1 级与门电路组成。各种门电路的典型延迟时间如表 1 所示。可知整个处理电路的延迟时间为 1.149 s。假设电枢速度为 2000 m/s, 那么在反馈延迟时间内电枢仅行进了 2.3 mm, 满足实时控制的要求。

3 实验结果

按照本文图 5 搭建实验系统, 采用 4 通道泰克示波器

MSO3034 采集各个节点波形, 实验结果如图 12~14 所示。

表 1 门电路典型延迟时间

典型电路	典型器件	典型延迟时间/ns
放大电路	THS4551	500
比较电路	LM311	200
反向门电路	74S04	5
RS 触发器	CD4044B	80
异或门电路	74s86	10
或门电路	74S08	7.5
计数器	CD74HCT4020	30
与门电路	74S09	6.5

图 12 中, CH1 为差分式 B 探针原始感应电压波形, 波形接近于正弦波, 幅值为 1.2 V; CH2 是经过放大电路的 B 探针感应电压波形, 幅值为 12 V; CH3 为波形变换电路输出波形, 通过比较器将正弦波变换为矩形波脉冲; CH4 为脉宽压缩电路输出波形, 进一步压缩波形以避免脉冲重叠现象发生。从图中可以看出, 所设计的电路能够有效进行上升沿过零实时检测。

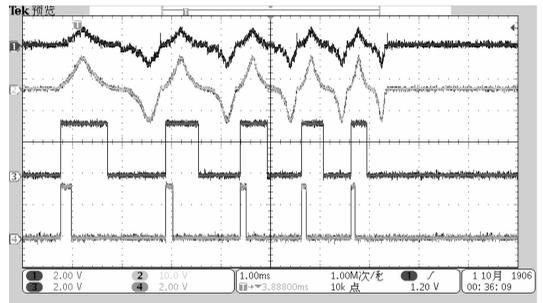


图 12 放大电路/波形变换/脉宽压缩电路输出波形图

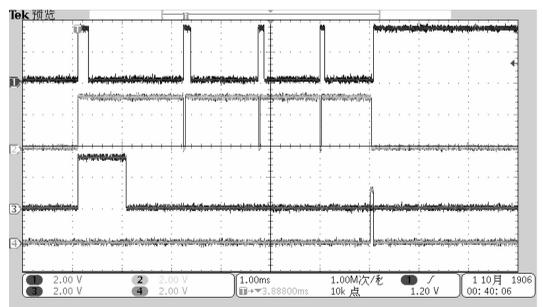


图 13 波形比较电路输出波形图

图 13 中, CH1 为脉宽压缩电路输出波形, 对应图 11 中的波形 C, 即序列 B 探针感应电压的过零点时刻脉冲; CH2 为脉宽比较电路 JS 计数器的输出, 对应图 11 和图 12 中的波形 E, 即相邻两个 B 探针过零点时刻差值; CH3 为输入参考脉宽, 对应图 11 和图 12 中的波形 REF, 可根据速度控制情况自行设定; CH4 为输出触发电路, 对应图 12 中的波形 G, 该输出可作为速度实时控制电路的输入。该结果表明所设计的电路能够实时检测速度并输出触发脉冲给

(下转第 22 页)