

运载火箭电磁阀漏磁特性量化研究与 极性检测系统设计

徐文晓, 卢 颀, 李 璨, 张学英

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 传统的运载火箭电磁阀极性测试往往通过“耳听手摸”的方式, 故存在漏检误检、测试记录不可量化及数据追溯、无法精准判读、测试效率低等问题; 因此对运载火箭典型姿控电磁阀开展了漏磁性能的测量与量化分析, 掌握阀体各部位漏磁场分布规律、漏磁场随距离衰减变化规律、电磁阀之间漏磁场相互影响情况, 并提出了一种非接触式的可视化电磁阀极性检测系统设计方法, 采用三冗余敏感探头采编设计保证极性检测准确性, 经试验测试验证, 实现了无需精确安装即可 100% 检测电磁阀动作及时序动作精准判读, 提升了电磁阀极性检测能力和测试效率; 该系统已成功应用于大型运载火箭的总装测试流程中, 对于提升运载火箭自动化测试水平具有重要意义。

关键词: 运载火箭; 电磁阀; 漏磁性能; 极性检测

Quantitative Study on MFL Characteristics of Launch Vehicle Solenoid Valves and Design of Polarity Detection System

XU Wenxiao, LU Di, LI Can, ZHANG Xueying

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Traditional testing methods for solenoid valve polarity of launch vehicles are often detected through the method of “listening and touching”, which has problems such as missed detection and false detection, inability to accurately interpret, and low testing efficiency. Therefore, typical attitude control solenoid valves were carried out to measure and quantitatively analyze the magnetic leakage performance, and grasp the distribution of magnetic leakage fields in various parts of the valve body and the attenuation law of leakage magnetic fields with distance. A non-contact visual polarity detection system design method for electromagnetic valves was proposed, and three redundant sensitive probes for sampling and programming design were used to ensure the accuracy of polarity detection. Through the verification of experimental testing, it achieves 100% detection of electromagnetic valve actions and accurate interpretation of timely actions without precise installation, which improves the polarity detection ability and testing efficiency of solenoid valves. This system is successfully applied on the testing process of large launch vehicles, and it is of great significance to improve the automation testing level for launch vehicles.

Keywords: launch vehicle; solenoid valves; magnetic flux leakage (MFL) characteristics; polarity detection

0 引言

目前运载火箭各部段遍布很多电磁阀, 包括增压输送电磁阀、姿控发动机电磁阀等, 为确保电磁阀极性安装及控制的正确性, 需要在火箭出厂前总装测试时对电磁阀的极性进行测试。围绕电磁阀的安装极性, 依据不同需求, 制定了多种电磁阀极性测试方法。比如, 通过现场人员靠近电磁阀处听取动作声音的方法, 或是在喷管出口处加测试工装绑扎扎气球, 并在带气状态下通过观察气球充放气状态来判断电磁阀极性正确性。这种测试方法工作量较大, 部分喷管距离地面较远, 气球较小不容易观察, 而且带气状态下误操作容易损伤箭上产品。

为改进运载火箭出厂测试阶段电磁阀极性测试过于依赖现场人员的“耳听手摸”检测方法, 解决极性测试记录不可

量化、不可追溯等问题, 研制了多种非接触式的电磁阀极性检测系统, 有效提升了电磁阀极性测试的量化测试水平。2017年和2018年, 有研究团队通过非接触式的霍尔感应被测电磁阀动作时的漏磁场强度变化的方法, 实现电磁阀极性测试的自动检测^[1-2]。在此基础上, 又将无线传感网络技术与电磁阀极性检测系统相结合, 进一步提高了系统部署的灵活性与测试覆盖范围^[3]。2020年, 基于声音检测和声音定位技术的新型非接触、集中式的电磁阀极性检测系统, 也进一步丰富了电磁阀极性检测的技术实现手段^[4]。

目前在运载火箭电磁阀极性测试中应用最多依然是基于漏磁感应的非接触式电磁阀极性检测系统。但该类系统尚存在如下两方面问题, 极大影响了该类系统在使用中的检测准确性和部署灵活性^[5-6]。

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2023-11-30。

作者简介: 徐文晓(1994-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 徐文晓, 卢 颀, 李 璨, 等. 运载火箭电磁阀漏磁特性量化研究与极性检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 7-13.

首先,电磁阀阀体不同部位的漏磁性能存在较大差异,且漏磁场强度随着相对阀体距离的增大大幅衰减,这些对基于漏磁感应的电磁阀极性检测系统敏感元件在电磁阀上的安装位置提出了很高的要求。然而,目前对运载火箭上所需开展电磁阀极性测试的常用类型姿控电磁阀还缺少漏磁特性量化研究,为电磁阀极性检测系统设计提供必要的基础^[7-8]。

其次,运载火箭总装完成后电磁阀通常都处于多层镀铝薄膜的包覆状态,难以观测到电磁阀漏磁性能最好的部位,更为电磁阀极性检测系统敏感元件的准确安装增加了难度^[9-10]。另外,部分特殊部位的电磁阀有时也会出于安全性的考虑,在火箭总装时加装一些防护支架,这样也致使很多采编一体式的极性检测系统(体积稍大)难以实现“贴近”安装,从而极大地影响了检测效果。

因此,本文将首先针对运载火箭常用的典型姿控电磁阀开展漏磁性能的测量与量化分析,研究阀体各部位漏磁场分布情况、漏磁场随距离衰减变化情况、电磁阀之间漏磁场相互影响情况以及多层镀铝薄膜包覆对漏磁场影响情况^[11]。其次,本文设计电磁阀极性检测系统,从探头采编模式、安装结构以及电磁阀接通判定阈值模型的训练算法等方面,全面提升检测能力。

1 姿控电磁阀漏磁特性量化研究

原有基于非接触电磁感应方法研制的运载火箭电磁阀极性检测系统所面临的检测准确性问题究其原因还是对被测对象的漏磁性能缺乏必要的认识,包括:典型电磁阀的漏磁场分布情况、电磁阀漏磁场随距离的衰减情况、镀铝薄膜包覆对电磁阀漏磁场的影响以及电磁阀之间漏磁场的相互影响等^[12-13]。

目前运载火箭电磁阀极性检测系统主要应用于飞行段使用的姿控调节电磁阀上,其典型产品包括如表 1 所示的 3 类电磁阀。

表 1 3 类典型姿控电磁阀的用途及性能指标

类别	A 类	B 类	C 类
用途	用于驱动产生 60 N 姿控力	用于驱动产生 150 N 姿控力	用于驱动产生 300 N 姿控力
供电/V	DC 27	DC 27	DC 27
内阻/ Ω	42	29	24

本文使用专有磁场测量仪器(规格:CH-1800)逐项对 3 类电磁阀的漏磁特性开展测量与分析。

1.1 电磁阀漏磁场分布情况测量与分析

首先,如图 1 所示,对电磁阀各部位进行描述。

经测量,得到 3 类电磁阀接通时表面漏磁场分布情况,如表 2 所示。

经测量与分析,可以得到如下结果:

1) 3 类电磁阀接通时产生的漏磁场分布是相对稳定的,多次反复加电测量后,在同一位置的漏磁场场强基本保持不变;



图 1 电磁阀各部位描述示意图

表 2 3 类电磁阀表面漏磁场强度测量结果 Gs

位置	A 类	B 类	C 类
顶部	-20	-70	+80
上颈沿	-38	-110	+260
左(右)	-24	-25	+100
前	-36	-89	+89
后	-22	-22	+70
下颈沿	+19	+19	-25
底部	+10	+11	-20

2) 根据磁场测量仪器 CH-1800 的使用说明,负值表明为 S 极,正值表明为 N 极。因此, A 类和 B 类电磁阀顶部为 S 极,底部为 N 极,而 C 类电磁阀恰好相反,顶部为 N 极,底部为 S 极;

3) 3 类电磁阀接通时漏磁场最强的部位均处于上颈沿位置。

1.2 电磁阀漏磁场随距离衰减情况测量与分析

为进一步摸清 3 类电磁阀漏磁场随距离衰减变化规律,以电磁阀上颈沿位置方向(该位置电磁阀表面漏磁场强度最大)为测量对象,继续使用磁场测量仪器 CH-1800,分别在距离上颈沿位置表面 0、1、2、5、7、10、20 cm 处进行漏磁场强度测试。

具体测试结果如表 3 和图 2 所示。

表 3 3 类电磁阀漏磁场随距离衰减测量结果

距离/cm	A 类		B 类		C 类	
	漏磁强度 /Gs	衰减率 /%	漏磁强度 /Gs	衰减率 /%	漏磁强度 /Gs	衰减率 /%
0	-38	0	-110	0	+260	0
1	-20	47.4	-62	43.6	+160	38.5
2	-11	71.1	-34	69.1	+70	73.1
5	-5	86.8	-11	90	+22	91.5
7	-2	94.7	-4	96.4	+6	97.7
10	-1.2	96.8	-1.9	98.3	+2.8	98.9
20	-0.2	99.5	-0.4	99.6	+0.7	99.7

经测量与分析,可以得到以下结果:

1) 3 类电磁阀接通时的漏磁场强度均会随距离的增大,呈现快速衰减的情况;

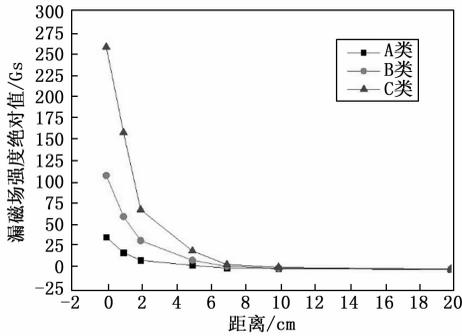


图 2 3 类电磁阀漏磁场随距离衰减曲线

2) 当距离被测电磁阀上颈沿位置超过 10 cm 时, 3 类电磁阀接通时的漏磁场强度将衰减至临近外界环境的磁场强度, 电磁阀极性检测系统已难以捕捉其开关切换的磁场变化。

1.3 电磁阀之间漏磁场的相互影响分析

根据 1.2 节中的测量结果, 进一步分析了当使用电磁阀极性检测系统测试两个相近电磁阀时, 是否会产生误检测的情况, 即: 研究在使用电磁阀极性检测系统时, 电磁阀之间的最小间距以及不同间距与电磁阀开关判定阈值设置之间的对应关系^[14-17]。

首先综合如下两方面因素:

1) 根据运载火箭总装操作手册, 一般情况下电磁阀之间的安装间距不会小于 5 cm, 以保证电磁阀安装、拆卸与更换操作的便利性;

2) 结合 1.2 节的分析结果, 当两个电磁阀之间的距离超过 10 cm 时, 其中一个电磁阀上安装的极性检测系统将难以捕捉另一个电磁阀开关切换的磁场变化, 即: 当两个电磁阀之间的距离超过 10 cm 时, 两个电磁阀之间的相互影响可忽略不计。

由此, 本文仅对两个电磁阀的间距处于 5~10 cm 之间的情况加以分析。具体分析方法为: 假定有 X 和 Y 两只电磁阀 (二者既可以是同一类型, 也可以是不同类型), 用电磁阀 X 在某距离上的漏磁场强度除以电磁阀 Y 的表面漏磁场强度, 即可得到当 X 接通时, Y 上安装的电磁阀极性检测系统所能感应到的相对磁场变化率。这个相对磁场变化率就是本文用于评估两个电磁阀之间相互影响的指标参数。具体计算结果如表 4 所示。

表 4 不同间距下两个电磁阀之间的相对磁场变化率

电磁阀 Y \ 电磁阀 X		电磁阀 X 接通时, 电磁阀 Y 所能感应到的相对磁场变化率/%								
		A 类			B 类			C 类		
间距/cm		5	7	10	5	7	10	5	7	10
电磁阀 X	A 类	13.2	5.3	3.2	4.5	1.8	1.1	1.9	0.8	0.5
	B 类	28.9	10.5	5	10	3.6	1.7	4.2	1.5	0.7
	C 类	57.9	15.8	7.4	20	5.5	2.5	8.5	2.3	1.1

由表 4 可以分析得到如下结果:

1) 在间距在 5 cm 左右时, C 类电磁阀接通时对其它两

类电磁阀上的极性检测系统以及 B 类电磁阀接通时对 A 类电磁阀上的极性检测系统均存在较大干扰 (其相对磁场变化超过 20%), 因此, 建议任意两个电磁阀之间的间距至少保持在 7 cm 以上;

2) 在两个电磁阀间距较近 (处于 5~10 cm 之间) 时, 相对磁场变化率与电磁阀极性检测系统内部设置的电磁阀接通判定阈值存在如下关系: 电磁阀 Y 上极性检测系统内部设置的电磁阀接通判定阈值须大于电磁阀 X 接通时电磁阀 Y 所能感应到的相对磁场变化率乘以电磁阀 Y 表面最大的漏磁强度。

1.4 镀铝薄膜包覆对电磁阀漏磁场的影响分析

在运载火箭总装完成后, 所有电磁阀均处于镀铝薄膜的包覆状态。因此, 本文首先使用 1.1 节相同的测量方法对单层镀铝薄膜包覆下 3 类电磁阀的漏磁场强度进行了复测, 复测结果显示在相同电磁阀部位测量到的漏磁场强度与无包覆状态基本一致^[18-19]。

为进一步研究多层镀铝薄膜包覆对电磁阀漏磁场的影响, 且更为直观体现多层镀铝薄膜包覆下对电磁阀极性检测系统检测效果的影响, 通过相同判定阈值条件下电磁阀极性检测系统的最大可感应距离开展试验分析, 分别对 3 类电磁阀在包覆有 1、2、4、8 和 16 层镀铝薄膜情况下电磁阀极性检测系统的最大可感应距离进行测量。具体测量结果如表 5 所示。

表 5 多层包覆下 3 类电磁阀最大可感应距离列表

包裹层数	A 类/cm	B 类/cm	C 类/cm
1	3.0	4.6	8
2	2.9	4.5	8
4	2.9	4.3	7.9
8	2.9	4.3	7.8
16	2.8	4.3	7.8

经测量与分析, 可以得到如下结果: 在使用镀铝薄膜对电磁阀进行包覆时, 随着包裹层数的增加, 电磁阀极性检测系统的最大可感应距离略有减小, 但考虑到包裹层数增加必然也会导致系统与电磁阀的间距略微增大, 因此, 多层镀铝薄膜包覆对电磁阀漏磁场的影响可忽略不计。

2 电磁阀极性检测系统设计

基于第 1 节中对运载火箭电磁阀的漏磁特性研究与测试结果, 设计一种电磁阀极性测试系统, 采用非接触式的磁感应传感器从空间上获取电磁阀动作时产生的磁场, 从而确定被测电磁阀的开关状态, 并通过记录、判读每个电磁阀的动作时间, 实现在不改变火箭任何状态的情况下, 完成火箭总装完成后的电磁阀极性检测任务^[20]。

为解决总装包覆后电磁阀漏磁部位辨识难、部分位置传感器安装性能差以及易受总装厂环境磁场变化影响等系统检测不准、不好用的问题, 在前面针对运载火箭动力系统电磁阀漏磁性能的研究成果基础上, 对原有电磁阀极性检测系统在探头采编模式、安装结构以及电磁阀接通判定阈值

模型的训练算法等方面进行设计。

2.1 系统架构设计

如图 3 所示,设计一种非接触式可视化电磁阀极性测试系统,包括极性识别无线传感器、指示灯板、无线中继器、无线主节点及上位机监控终端。在运载火箭各个部位的电磁阀旁就近安装无线传感器节点,用于敏感电磁阀动作时磁场的变化,将传感数据通过无线中继器转发至无线主节点,无线主节点连接上位机监控终端实现实时显示及与理论动作对比的数据判读。同时当传感器检测到对应的电磁阀动作后,即点亮该电磁阀对应的显示装置,通过指示灯板的亮灭直观实时显示电磁阀的动作及编号,且通过现场录制监控视频来进行记录以供追溯。

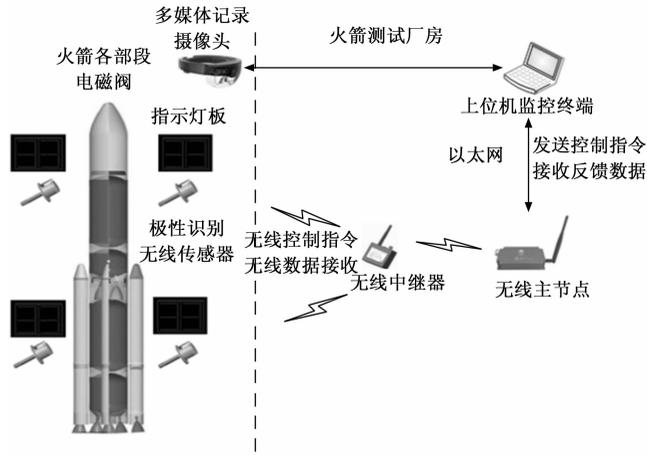


图 3 电磁阀极性检测系统架构设计示意图

2.2 三冗余阵列式敏感探头设计

总装后由于电磁阀外层的多层镀铝薄膜包覆,在电磁阀极性检测系统安装时较难判断敏感探头最佳贴放位置,特别是通过对运载火箭动力系统 3 类典型电磁阀的漏磁性能研究发现,电磁阀的不同位置所产生的漏磁效应差别较大,原有单敏感元件的探头设计经常会由于安装位置的选取不当而造成电磁阀动作的漏检和漏判。

为降低电磁阀极性检测系统对总装人员安装部署的准确性要求,消除多层包覆后对安装位置准确性的影响,采用三敏感元件、阵列式的探头板设计,并通过传感器终端侧的择优选择,提高电磁阀极性检测系统的检测能力。

具体设计如图 4 所示。利用霍尔传感器检测三路磁场的输入,并按照“与基准值(即:传感器加电伊始测量到的环境磁场强度)差值绝对值最大”为准则,确定“最佳”的检测信号,最终输出给传感器终端用于电磁阀开关状态的判定。

2.3 电磁阀动作识别数据处理方法

电磁阀采集到磁场强度后,需要考虑环境磁场、三冗余探头关系等因素,开展合理的滤波及数据处理,防止误判断。传感器软件的具体算法流程步骤如下:

传感器上电初始化后,敏感探头首先捕捉采集 n 次周围环境磁场强度 $T_{01}, T_{02}, \dots, T_{0n}$, 转换为等效电压值 U_i

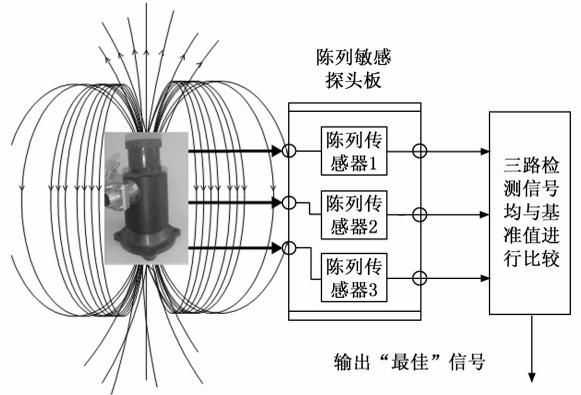


图 4 三敏感元件、阵列式传感器示意图

$= \frac{T_i}{d}$ (其中 d 为传感器电极板间距离), 将其传输给数据处理单元, 数据处理单元进行滤波处理得到电磁阀动作磁场电压基准阈值, 最大程度地排除地磁场环境的干扰:

$$U_0 =$$

$$\frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=1}^n U_{0i} \right) - \max(U_{01}, U_{02}, \dots, U_{0n}) - \min(U_{01}, U_{02}, \dots, U_{0n}) \right]$$

电磁阀通断动作时, 极性识别无线传感器的三冗余阵列式磁敏感探头分别敏感采集 n 次电磁阀通断动作时不同部位的磁场强度, $T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1n}, T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2n}, T_{31}, T_{32}, \dots, T_{3n}$, 转换为等效电压值 $U_i = \frac{T_i}{d}$, 再进行滤波处理得到磁场电压值分别记作 U_1, U_2, U_3 。

$$U_1 =$$

$$\frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=1}^n U_{1i} \right) - \max(U_{11}, U_{12}, \dots, U_{1n}) - \min(U_{11}, U_{12}, \dots, U_{1n}) \right]$$

$$U_2 =$$

$$\frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=1}^n U_{2i} \right) - \max(U_{21}, U_{22}, \dots, U_{2n}) - \min(U_{21}, U_{22}, \dots, U_{2n}) \right]$$

$$U_3 =$$

$$\frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=1}^n U_{3i} \right) - \max(U_{31}, U_{32}, \dots, U_{3n}) - \min(U_{31}, U_{32}, \dots, U_{3n}) \right]$$

根据磁场强度判断电磁阀动作状态:

如果磁场电压值 $\min(U_1, U_2, U_3)$ 大于电磁阀动作磁场电压基准阈值 U_0 , 则认为电磁阀动作状态为闭合;

如果磁场电压值 $\min(U_1, U_2, U_3)$ 小于电磁阀动作磁场电压基准阈值 U_0 , 则认为电磁阀动作状态为断开。

2.4 极性测试装置灵活安装结构设计

在运载火箭总装时往往会对一些关键部位的电磁阀采取加装防护支架的措施, 而有时由于火箭自身架构或其它箭载产品与电磁阀相互之间的位置关系较为复杂, 原有一体化的电磁阀极性检测系统也经常面临安装难的问题。因此, 为提升电磁阀极性检测系统的实用性和部署的灵活性, 提出了探头与系统的柔性连接设计, 实现测试人员便捷安装, 如图 5 所示。

2.5 基于无线的测试数据传输链路设计

基于 Zigbee 和 TDMA 时分机制的无线协议, 对 50 只

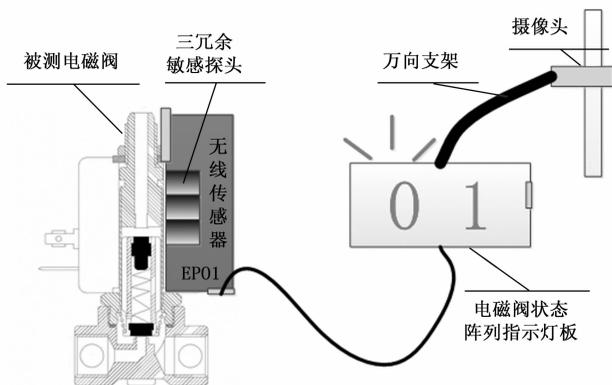


图5 敏感探头与系统的柔性连接设计

极性识别传感器进行无线组网, 开展对时精度和数据采集回传时延的测试。无线控制器节点发起统一对时, 依次获取传感器数据, 具体无线通信传输方式如下:

主节点和无线信号中继器的下行数据(发送至无线传感器终端的数据)以广播方式发出, 当有多个无线传感器终端入网后, 不存在下行数据冲突的情况。对于上行数据(无线传感器终端发送至主节点)无线传感器终端以主从方式发出, 及所有无线传感器终端向同一个主节点发送数据, 为防止多个无线传感器终端同时向主节点上传数据可能造成的数据冲突, 所有无线传感器终端一律采取节拍式数据上传。由主节点向各无线传感器终端发送时统信号和发送间隔时间, 其中时统信号每隔一分钟发送一次, 无线传感器终端根据该基准时间进行内部计时, 并根据设备编号顺序向主节点发送数据。

对无线传输链路的每个环节进行测试及计算验证如下:

- 1) 上位机监控终端软件将计算机本地时间以广播的方式发送到每个无线传感器终端, 无线传感器终端获取到主机的同步时间时间差为不大于 1 ms;
- 2) 无线传感器终端使用 16 MHz、10 ppm 晶振, 每分钟的计时误差最大为 1 ms;
- 3) 无线传感器终端从基准发送时间起至发送完成一个数据包最长时间为 10 ms;
- 4) 从无线传感器终端数据包发送完成至无线主机接收完一个数据包最长时间为 10 ms。

基于以上数据, 将无线传感器终端上传轮询时间间隔设置 30 ms, 理论情况下 50 个节点传输共需 1.5 s。经 5 次轮询测试, 50 只节点数据全部回传周期最大为 1.512 s, 且未出现无线数据丢失情况, 具体测试结果如表 6 所示。因

表6 无线传输链路采集数据回传时延

测试次数	50 只节点数据全部回传周期/s
第一次	1.505
第二次	1.496
第三次	1.478
第四次	1.485
第五次	1.512

此, 电磁阀极性测试系统可以满足不少于 50 个传感器的无线组网, 同时所有传感器向上位机上报参数的总传输时延不大于 2 s。

2.6 兼顾普适与特殊情境下的阈值模型训练与评估

对于电磁阀开和关切换过程中磁场变化差值的阈值判定算法是电磁阀极性检测系统的核心, 而其中最重要的就是如何给定一个合适的阈值设置。特别是期望能够获得一个普遍适用于火箭不同部位、同类电磁阀的“普适”阈值。

2019 年, 有研究团队提出了一种基于 K-Medoids 算法的电磁阀极性检测阈值模型训练方法^[5], 但该算法仅适用于单个电磁阀阈值的独立训练, 且没有考虑两个电磁阀距离相近时对阈值模型的影响。本文拟在该算法基础上, 综合多个同类电磁阀阈值的统计分析并相近距离下的下限评估, 进一步提高电磁阀极性检测系统阈值模型的普适性。(K-Medoids 算法是一种机器学习中的无监督学习算法, 也是基于划分方法的一种聚类算法, 并在削弱某些孤立点影响上具有显著优势。)

具体的算法流程如下:

- 1) 以电磁阀开和关两种状态为目标簇, 以某只电磁阀的极性检测数据为对象, 任意选取两个不同的中心点(选取 $k=2$);
- 2) 按照“距离中心点最近”的原则, 将剩余的 $N-2$ 个点分配到当前两个中心点所代表的不同簇中, 实现聚类目标;
- 3) 反复迭代更新中心点, 以改进优化聚类质量: 选取“与当前中心点绝对差值最小”为准则, 设置代价函数, 在第 i 次迭代中遍历所有 $N-2$ 个点与当前中心点的代价函数值, 选取最小值所对应的点作为第 $i+1$ 次迭代中的最新中心点;
- 4) 重复 2) 和 3) 的过程, 直到两个中心点不再发生变化或已达到设定的最大迭代次数; 此时, 计算得到的最新两个中心点就是该电磁阀开和关的门限值, 二者的差就是差分阈值的设置模型;
- 5) 为产生更“普适”的阈值模型, 对所有同类电磁阀的阈值模型进行统计分析, 选取其数据平均值作为最终的阈值模型;
- 6) 最后视情对距离相近(间距在 10 cm 以内)的电磁阀, 根据 1.3 节中提出的相对漏磁场变化率, 对“普适”阈值模型是否满足下限要求情况进行单独评估。

3 试验验证

3.1 总装阶段电磁阀动作阈值摸底试验验证情况

电磁阀极性检测系统在火箭动力系统总装阶段开展了动作阈值摸底试验, 被测电磁阀涉及辅助动力系统和增压输送系统, 全部处于总装完成后状态(全部带有 多层镀铝薄膜覆盖、部分装有防护支架), 如图 6 所示。

经多次重复测试, 对电磁阀进行了极性识别的阈值摸底试验, 得到极性识别的电压阈值, 测试结果如表 7、表 8 所示。阈值设置后, 电磁阀极性检测系统经过电磁阀单点

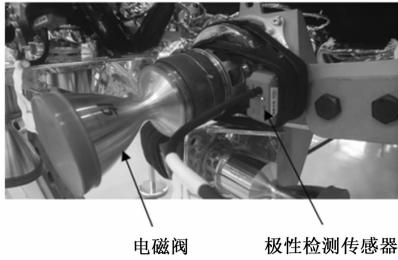


图 6 总装阶段电磁阀阈值摸底试验状态图

动作、时序控制及带气动作的流程自动控制 3 轮次试验项目考核, 均实现 100% 检测成功, 对电磁阀极性检测装置安装位置的精确度要求大幅降低, 并且适应复杂结构下的电磁阀极性检测装置的快速灵活部署需求。

表 7 辅助动力电磁阀动作电压阈值测试结果

电磁阀编号	传感器阈值/V	测试结果
1	0.08	正常
2	0.08	正常
3	0.08	正常
4	0.08	正常
5	0.08	正常
6	0.08	正常
7	0.08	正常
8	0.08	正常
9	0.08	正常
10	0.08	正常
11	0.08	正常
12	0.08	正常
13	0.06	正常
14	0.06	正常
15	0.06	正常
16	0.06	正常
17	0.06	正常
18	0.06	正常

表 8 增压输送电磁阀动作电压阈值测试结果

电磁阀编号	传感器阈值/V	测试结果
1	0.08	正常
2	0.05	正常
3	0.08	正常
4	0.06	正常
5	0.05	正常
6	0.05	正常
7	0.05	正常
8	0.08	正常
9	0.06	正常
10	0.08	正常
11	0.08	正常

3.2 出厂测试阶段电磁阀极性动作检测及精度测试

电磁阀极性检测系统参加运载火箭出厂测试, 在控制

系统时序步序测试、总检查阶段, 对各个流程时间段的电磁阀动作极性进行自动识别、动作时序比对测试。

现场实际安装及测试如图 7 所示, 对测试过程进行实时监测及视频录像以供追溯, 通过 LED 指示灯板实时、准确、直观地显示 18 个电磁阀的动作情况及电磁阀编号, 100% 全部正确检测到电磁阀开闭动作。



图 7 电磁阀极性测试试验状态图

测试结束后对传感器节点采集到的电磁阀动作时序数据结果与理论时序表进行比对分析, 经判读, 精度误差小于 50 ms, 满足使用要求, 具体测试结果如表 9 所示。

后续, 还可对实时记录的视频画面上指示灯板上的编号数字开展图像自动识别, 实现全流程的自动化判读。

表 9 电磁阀极性检测系统参加火箭出厂测试结果

电磁阀编号	动作状态	传感器日志记录时间/s	时序表要求/s	与时序表误差/s	测试结果
13	闭合	210.922	210.9	0.022	正常
5	闭合	210.910	210.9	0.01	正常
14	闭合	210.865	210.9	-0.035	正常
15	闭合	210.917	210.9	0.017	正常
16	闭合	210.922	210.9	0.022	正常
1	闭合	210.931	210.9	0.031	正常
2	闭合	210.920	210.9	0.02	正常
3	闭合	210.918	210.9	0.018	正常
6	闭合	210.935	210.9	0.035	正常
8	闭合	210.908	210.9	0.008	正常
4	闭合	210.872	210.9	-0.028	正常
7	闭合	210.910	210.9	0.01	正常
11	闭合	211.114	211.1	0.014	正常
18	闭合	211.135	211.1	0.035	正常
9	闭合	211.122	211.1	0.022	正常
10	闭合	211.138	211.1	0.038	正常
12	闭合	211.059	211.1	-0.041	正常
17	闭合	211.066	211.1	-0.034	正常
11	断开	221.132	221.1	0.032	正常
9	断开	221.119	221.1	0.019	正常
13	断开	221.096	221.1	-0.004	正常
16	断开	221.078	221.1	-0.022	正常
18	断开	221.082	221.1	-0.018	正常
1	断开	221.145	221.1	0.045	正常
2	断开	221.128	221.1	0.028	正常
6	断开	221.114	221.1	0.014	正常

续表

电磁阀编号	动作状态	传感器日志记录时间/s	时序表要求/s	与时序表误差/s	测试结果
7	断开	221.128	221.1	0.028	正常
8	断开	221.135	221.1	0.035	正常
10	断开	221.074	221.1	-0.026	正常
12	断开	221.133	221.1	0.033	正常
14	断开	221.140	221.1	0.04	正常
15	断开	221.121	221.1	0.021	正常
17	断开	221.097	221.1	-0.003	正常
3	断开	221.125	221.1	0.025	正常
4	断开	221.109	221.1	0.009	正常
5	断开	221.148	221.1	0.048	正常
9	闭合	252.728	252.7	0.028	正常
13	闭合	252.655	252.7	-0.045	正常
5	闭合	252.736	252.7	0.036	正常
6	闭合	252.711	252.7	0.011	正常
8	闭合	252.688	252.7	-0.012	正常
12	闭合	252.718	252.7	0.018	正常
14	闭合	252.726	252.7	0.026	正常
15	闭合	252.681	252.7	-0.019	正常
16	闭合	252.673	252.7	-0.027	正常
17	闭合	252.705	252.7	0.005	正常
18	闭合	252.719	252.7	0.019	正常
1	闭合	252.722	252.7	0.022	正常
2	闭合	252.668	252.7	-0.032	正常
3	闭合	252.742	252.7	0.042	正常
7	闭合	252.665	252.7	-0.035	正常
4	闭合	252.730	252.7	0.03	正常
11	闭合	252.666	252.7	-0.034	正常
10	闭合	252.674	252.7	-0.026	正常
10	断开	254.685	254.7	-0.015	正常
11	断开	254.688	254.7	-0.012	正常
14	断开	254.744	254.7	0.044	正常
16	断开	254.687	254.7	-0.013	正常
18	断开	254.69	254.7	-0.01	正常
1	断开	254.656	254.7	-0.044	正常
2	断开	254.748	254.7	0.048	正常
5	断开	254.738	254.7	0.038	正常
9	断开	254.743	254.7	0.043	正常
12	断开	254.708	254.7	0.008	正常
13	断开	254.667	254.7	-0.033	正常
15	断开	254.711	254.7	0.011	正常
17	断开	254.711	254.7	0.011	正常
3	断开	254.726	254.7	0.026	正常
4	断开	254.685	254.7	-0.015	正常
6	断开	254.719	254.7	0.019	正常
7	断开	254.715	254.7	0.015	正常
8	断开	254.687	254.7	-0.013	正常

4 结束语

本文对运载火箭典型姿控电磁阀开展了漏磁性能的测量与量化分析, 掌握了阀体各部位漏磁场分布情况、漏磁

场随距离衰减变化情况、电磁阀之间漏磁场相互影响情况以及多层镀铝薄膜包覆对漏磁场影响情况。同时以此为基础, 从三冗余探头采编模式、灵活安装结构等方面, 提出了一种电磁阀极性检测系统设计方法, 并在运载火箭出厂测试中进行了试验验证, 实现了系统一次性安装到位、100%精准检测的目标, 全面提升了该类系统的检测能力和测试效率, 促进提升了运载火箭自动化测试水平。

参考文献:

- [1] 徐利杰. 一种运载火箭发动机电磁阀回路极性自动测试系统 [P]. 北京: CN104133151B, 2017-3-15.
- [2] 曹雷团. 基于漏磁原理的非接触式动力系统极性测试系统 [P]. 北京: CN105629095B, 2018-9-28.
- [3] 白冰, 张宏德, 赵心欣, 等. 基于 WSN 的运载火箭电磁阀极性测试系统设计与实现 [J]. 导弹与航天运载技术, 2019, 5 (2): 84-88.
- [4] 李强. 航天运载器智能检测技术研究与应用 [J]. 导弹与航天运载技术, 2020, 6 (6): 95-98.
- [5] 于晨. 一种基于 K-Medoid 算法的电磁阀极性检测方法 [P]. 北京: CN109725218A, 2019-5-7.
- [6] 赵新航, 韩飞, 兰旭东, 等. 运载火箭电磁阀判读算法设计 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (6): 252-258.
- [7] 张卫东, 刘玉玺, 刘汉兵, 等. 运载火箭姿态控制技术的发展趋势和展望 [J]. 航天控制, 2017, 35 (3): 85-89.
- [8] 张驰, 陆永华, 梁立鹏, 等. 基于双霍尔传感器的磁性小球悬浮控制系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 86-90.
- [9] 李茂, 黄兵, 黄辉, 等. 运载火箭全链路极性检测方法研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2021 (5): 128-132.
- [10] 张聪, 王业强, 沈汝澄, 等. 面向运载火箭的极性控制管理研究与实践 [J]. 航天工业管理, 2020 (7): 47-50.
- [11] 李越. 基于多源信息融合技术的电磁阀测试系统 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [12] 武威. 应用于电磁阀极性判断的系统设计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [13] 李双礁. 一种电磁阀极性快速判断装置的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [14] 张子剑, 王岷, 龚博, 等. 基于漏磁原理的非接触式电磁阀检测技术应用研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2017 (3): 101-106.
- [15] 吴德会, 刘志天, 王晓红, 等. 表面缺陷的方向性对漏磁场分布的影响 [J]. 物理学报, 2017 (4): 293-304.
- [16] 崔禹, 楼雨涵, 王刚, 等. 基于 COMSOL 直流电磁阀电磁仿真计算 [J]. 机械工程与自动化, 2022 (4): 93-97.
- [17] 周恒保, 辛高波, 丁秀峰, 等. 新一代运载火箭时序控制系统设计 [J]. 上海航天, 2016, 33 (s1): 107-111.
- [18] 尹爱军, 董雷, 张波, 等. 温度对漏磁信号影响的研究 [J]. 测控技术, 2018 (10): 81-84.
- [19] 叶立军, 王新萌, 朱虹, 等. 基于光星模拟器的星敏感器安装极性测试方法 [J]. 飞控与探测, 2021, 4 (2): 66-72.
- [20] 魏京芳, 李宏安, 郑文松, 等. 末修姿控系统极性检测仪设计 [J]. 导弹与航天运载技术, 2005 (3): 50-53.