

航天发动机智能定位极性测试系统设计

任仲强, 贺 雷, 张红霞, 马兵兵, 曹建忠, 刘 坤, 张建培

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘要: 针对传统航天发动机装配极性测试中存在工作效率低、易出错、数据可追溯性差, 以及极性不一致的隐患等问题, 设计了一种智能定位极性测试仪系统; 系统采用霍尔传感器采集电磁阀电场, 微压传感器采集喷管出口压力, 采样电阻采集回路电流等关键技术, 通过航天发动机智能定位极性测试软件实现数据一致性判读, 确保发动机安装极性正确、提高测试性能、降低维护成本、优化设计和促进技术发展, 为航天器高频发射提供了有力保障。

关键词: 发动机; 极性; 霍尔传感器; 微压传感器; 智能定位

Design of Intelligent Polarity Test System for Space Engine Positioning

REN Zhongqiang, HE Lei, ZHANG Hongxia, MA Bingbing, CAO Jianzhong,

LIU Kun, ZHANG Jianpei

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to solve the problems of low work efficiency, error-prone, poor data traceability and inconsistent polarity in the traditional aerospace engine assembly polarity test, an intelligent positioning polarity tester system was designed. The system adopts key technologies such as Hall sensor to collect the electric field of solenoid valve, micro pressure sensor to collect nozzle outlet pressure, sampling resistance to collect loop current, etc., and realizes data consistency interpretation through the intelligent positioning polarity test software of the space engine, so as to ensure the correct polarity of the engine installation, improve the test performance, reduce maintenance costs, optimize the design and promote the development of technology, and provide a strong guarantee for the high-frequency emission of the spacecraft.

Keywords: spacecraft; polarity; hall sensor; micro pressure sensor; intelligent positioning

0 引言

2020 年, 织女星 (VEGA) 运载火箭点火起飞, 前三级正常工作, 第四级液体上面级点火后偏离飞行轨道, 最终任务失败^[1]。经过调查, 确认发射失败是由于火箭上面级内电缆接错导致, 在火箭总装和最终验收的检验环节未能发现这一问题。国内外航天领域屡次因发动机极性错误导致火箭发射失利的发生, 为此在航天火箭发动机、卫星发动机以及其他具有多发动机协调工作的领域, 对发动机装配过程中极性测试提出测试化、精准化、智能化的需求。近些年, 随着航天产品发射密度不断提高, 生产装配周期不断压缩, 同时对产品质量须高标准严要求, 为此对产品装配过程中的发动机极性测试提出了较为苛刻的要求。随着发动机装配数量的增多, 发动机装配过程中, 发动机极性测试以往单靠工人手动操作, 工作效率低、易出错、数据可追溯性差, 尤其在

高密度发射的任务形势下, 国内关于智能极性测试的相关研究至今没有相关论述, 只有关于霍尔测试工装研制方面的方案。霍尔测试工装只是单一形式测试发动机的电场强度, 相对以前吸附小铁片的方式具有了可量化性。智能极性测试通过霍尔测试发动机电场、微压测试发动机喷口压力及驱动电路中采集回路电流 3 种方式, 在同一时刻进行数据判读, 保证发动机极性装配无误, 增加装配判读的可靠性, 克服了单一方式测试极性无法进行判读对比的缺陷。通过航天发动机智能定位极性测试, 确保发动机安全、提高性能、降低维护成本、优化设计和促进技术发展, 为航天器的成功发射和稳定运行提供了有力保障。

1 系统结构及原理

智能定位极性测试系统由电磁阀控制器、嵌入式数据采集器系统、光耦控制系统、电源系统、测试电缆网

收稿日期:2024-12-13; 修回日期:2025-01-16。

作者简介:任仲强(1980-),男,硕士,高级工程师。

通讯作者:马兵兵(1982-),男,硕士,研究员。

引用格式:任仲强,贺 雷,张红霞,等. 航天发动机智能定位极性测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10):15-22, 110.

系统、极性测试系统及移动测试台等部分组成^[2]。各系统集成后上位机通过自主开发的脉冲发控软件,下发电磁阀动作时序,控制电磁阀动作。智能极性测试系统通过嵌入式数据采集器自动采集电磁阀工作状态,将采集到的电磁阀开关状态的极性测试数据送到数据采集器,数据采集器通过以太网通讯方式,将极性测试数据上传到上位机,通过数据分析软件进行分析。上位机通过数据分析软件进行智能判读,根据测试数据及指令发控情况判读智能极性测试结果。整个系统组成如图 1 所示。感知模块采集到的信号送入采集系统,通过通信模块传输到计算模块,实现极性智能分析。

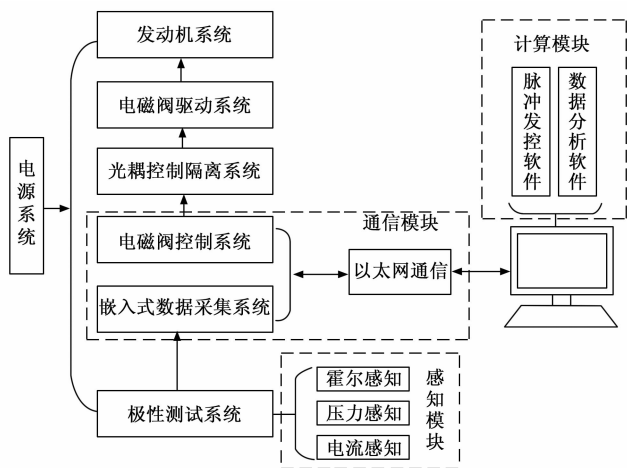


图 1 智能定位极性测试系统组成原理图

电源系统分别给各系统提供不同电压等级的电源。上位机包含脉冲发控软件和数据分析软件,脉冲发控软件通过以太网给电磁阀控制器发送指令,通过光耦控制系统驱动电磁阀驱动系统,从而实现对发动机系统的打开与关闭。同时嵌入式数据采集系统实时采集驱动回路电流,极性测试系统实时判读发动机动作信号,并通过嵌入式数据采集系统进行数据采集,通过上位机进行回路极性判读。以获取整个发控系统的极性测试结果^[3],保证整个装配过程中极性测试时能够准确无误。

2 系统硬件设计

2.1 极性测试系统设计

极性测试系统通过感知发动机电磁阀工作过程中的磁场,以及感知发动机喷口处的压力,两种测试方式同时进行,以精确判断电磁阀是否工作。通过采用霍尔传感器表贴于电磁阀线圈壳体外部感知电磁阀磁场变化^[4]。当电磁阀动作时,外部场强变化,霍尔传感器从而捕获电磁场强度,转换成电压信号输送到嵌入式采集系统。同时在发动机喷口处布置微压传感器,当电磁阀打开时,有气体通过电磁阀所控制的管路,在喷管口处有气流流出,并有一定的压力被微压传感器敏感到,将该变化量转化为传感器的模拟输出。嵌入式数据采集系

统通过采两种传感器信号,通过不同原理测试方式精密配合,能够精确测试发动机电磁阀工作磁场变化、喷管微压变化,从而判断电磁阀安装位置是否正确,判读发动机是否工作。再通过与控制系统的控制指令对比确认各台发动机的极性。极性测试系统主要包括霍尔传感器和微压传感器,系统组成原理如图 2 所示。

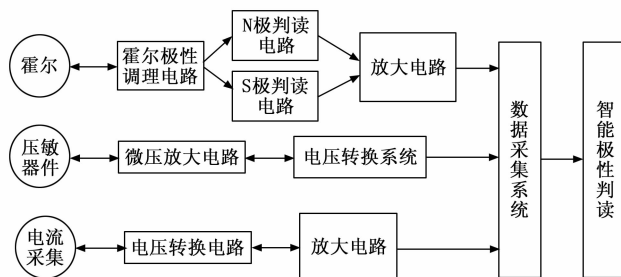


图 2 极性测试系统组成原理图

霍尔传感器测试电路设计,采用高敏感度的霍尔敏感元件 44E,对采集的信号进行调制解调,然后对微弱信号进行放大^[5],最终通过解调器进行输出,输出前对信号进滤波处理。详细的电路如图 3 所示。

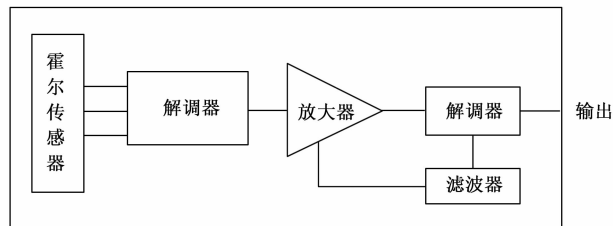


图 3 霍尔传感器电路示意图

微压传感器设计,采用三端稳压器,将+12 V 的输入电源在通过开关二极管 V_1 后、稳压到约 7.5 V 的电压,给压力敏感芯体电桥和放大电路供电;开关二极管 V_1 、 V_2 起保护整个电路的作用,防止电源的反接;放大电路采用高精度仪表放大器,对压力敏感芯体输出的毫伏电压信号进行放大调理; R_3 、 R_4 、 R_5 组成分压电路给高精度仪表放大器提供参考电位,用于传感器零位输出调整;电阻 R_6 、 R_7 为放大器增益调整电阻,电容 C_1 、 C_2 、 C_3 为电源滤波电容,电容 C_4 做为芯片的信号滤波。传感器电路详细情况如图 4 所示。

2.2 嵌入式数据采集器设计

嵌入式数据采集器具备 32 路模拟采集通道设计,采控单元在整个嵌入式数据采集系统中处于核心位置^[6],主要完成物理硬件的模拟量采集及数字量控制。系统中数据传输控制主要分为两个方面,一方面是采控单元与上位机之间的数据通信,一方面是与数字量控制模块及模拟量采集模块之间的时序控制。嵌入式采集系统原理组成如图 5 所示。

整个嵌入式数据采集系统采用模块化的设计方案,

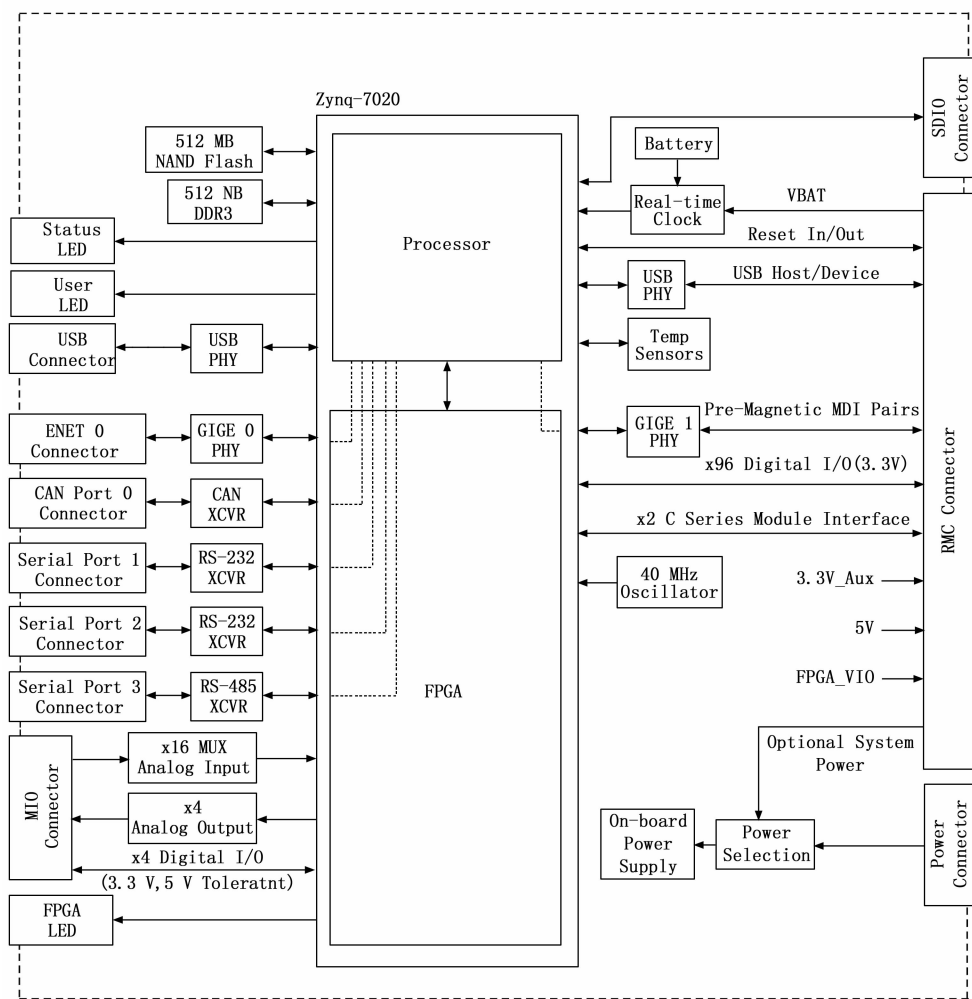


图 6 电磁阀控制器主控原理图

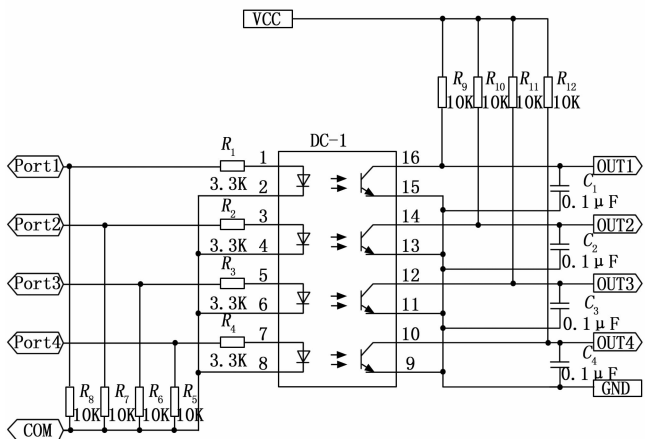


图 7 光耦控制系统原理图

能^[12]。驱动电路断电时，通过电阻和二极管构成的释放电路快速放电，恢复电容初始状态。通过选择电容器和电阻器型号，调节电容器充电时间，实现对电磁阀额定电流维持时间的调节，通过可变电阻器阻值变化调节电阻网络分压比值，最终实现对电磁阀节能电流的调节

设计。

详细的电磁阀驱动电路如图 8 所示， U_1 为三端稳压器， U_2 为比较器， U_3 为信号放大器， Q_1 、 Q_2 为场效应管， D_1 、 D_2 、 D_3 为二极管， $R_1 \sim R_9$ 为固定电阻器， R_{10} 、 R_{11} 为可调电阻器。电磁阀驱动系统中设置采样电阻 R_7 ，用来采集回路中的电流值，通过放大器 U_3 对采样电阻上的电压信号进行放大，放大倍数可以通过调整电阻 R_8 和 R_9 的阻值进行匹配。电流信号通过采样电阻，以电压形式送到嵌入式采集器，上位机软件按照放大倍数进行换算，得到电流值。

2.6 电源系统设计

智能极性测试仪中包含电磁阀控制系统、嵌入式数据采集器系统、光耦控制系统、发动机系统等，各系统采用的电压等级各不相同，所需功率差异较大。电源系统根据各个系统的需求，设计出不同等级和容量的电源系统。电源系统供电原理如图 9 所示。

电源系统工作时，电源模块经过电源转换单元，把输入为 AC220 V 交流电转换成直流电，并且分别转换

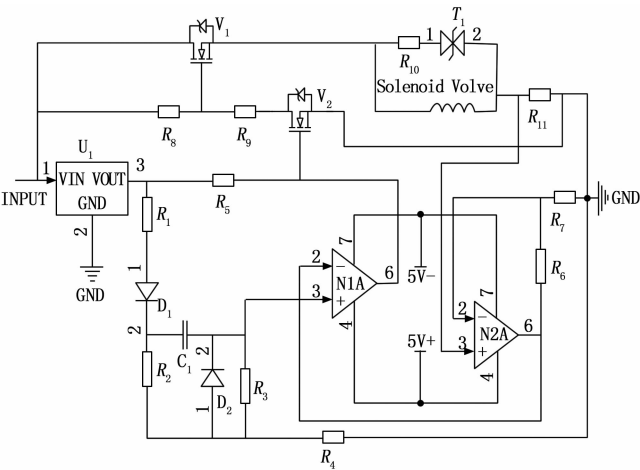


图 8 电磁阀驱动系统原理图

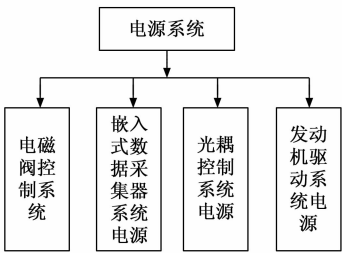


图 9 电源供电系统图

成不同的直流电压，直流电压转换后输出为+27、+5、+3.3、+12和-5 V等，供给不同的系统。电源系统的供电通过固态继电器实现对+27 V电路通断，用1个机械继电器实现1路+5 V和1路-5 V的电路通断，用1个机械继电器实现1路+3.3 V的通断，用1个机械继电器实现1路+12 V的通断。

+27 V电源为电磁阀驱动电源，工作电流为1.2~1.5 A，电源的电流供电容量调节为3 A。 ± 5 V工作电流为 ± 500 mA，电源的电流供电容量调节为 ± 1 A。 ± 3.3 V工作电流为160 mA，电源的电流供电容量调节为0.5 A。 ± 12 V工作电流为20 mA，电源的电流供电容量调节为100 mA。电源供电系统原理如图10所示。



图 10 电源转换单元原理图

3 系统软件设计

智能极性系统的软件平台架构采用插件模式设计，各个功能模块，均可按需定制开发，平台配置常规的配置、采集、保存、显示等常规模块，针对不同的关键参

数开放数据分析处理模块，极大方便进行数据分析处理，以及报告生成。采集存储数据配合数据回放软件，可以进行离线数据分析等工作。软件在 Windows 系统下，以图形化的编程语言 LabView 为基础进行开发。根据软件功能其软件分为上位机脉冲控制软件、上位采集软件和极性判读功能。详细的系统软件的上位机架构如图 11 所示。

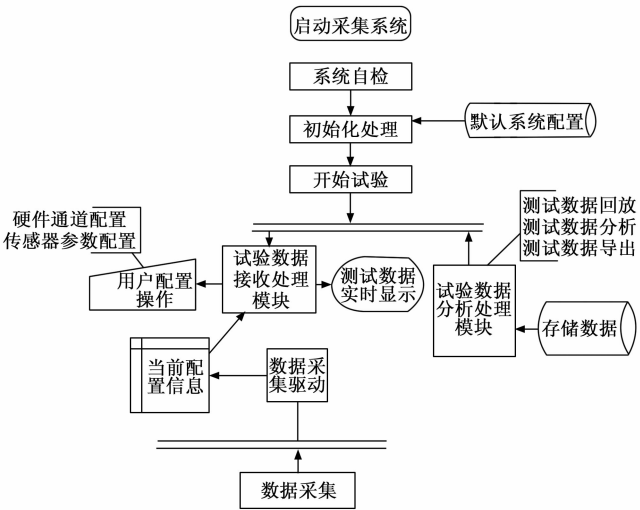


图 11 测发控软件架构

3.1 上位机脉冲控制软件设计

脉冲控制软件具备动态模式、静态模式两种阀门脉冲控制方式，动态模式下软件能够支持 txt、Excel 波形格式文件的导入，通过编程功能实现电磁阀的连续发控。载入波形数据文件后，在脉冲控制软件左下方的表格中会显示载入的波形数据^[13]，相应的脉冲信息动态模式下的发控界面如图 12 所示。静态模式下能够实现自定义脉冲发控，通过手动点击方式，实现对单个电磁阀的发控功能。具备“全部置高”或“全部置低”功能。静态模式下的控制如图 13 所示。

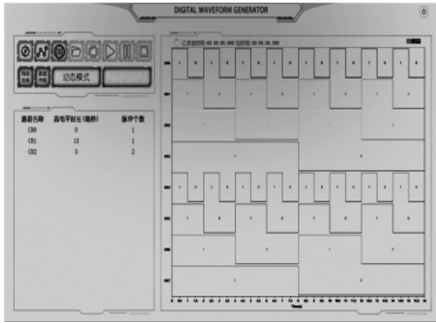


图 12 动态模式下发控界面示意图

3.2 上位机采集软件设计

采集软件平台基于 NI LabVIEW 2016 Run-Time-Engine 进行开发。软件主界面分为 4 个功能块，分别为



图 13 静态模式控制布局图

工具栏、功能选择区、功能操作区和关键参数监测区。

工具栏中有 6 个按钮,如图 14 所示,用户管理功能用来设置管理员、操作人员的登陆信息及用户权限;打开项目、保存项目和另存项目功能用来配置相应的项目信息,包括系统设置信息、通道配置信息、波形界面配置以及关键参数监测区的配置;设备连接功能用来与测试设备建立连接,软件在启动时默认执行该功能;下载设置功能用来在“通道配置”及“虚拟通道”功能页面配置相应的通道信息,点击“下载设置”按钮后,系统会依据配置信息建立采集任务^[14];通过点击“开始采集”按钮后,软件开始数据采集任务。具备在“关键参数监测区”与“波形显示”功能页面中可监测各通道的波形曲线与数据变化;为了数据分析及数据回放,软件具备“开始保存”“暂停保存”或“停止采集”相应操作。实现对数据的存储功能。



图 14 操作工具栏

3.3 霍尔传感器测量软件设计

当电流流过电磁阀时,电磁阀壳体周围产生电磁场,霍尔传感器通过测量垂直于电流方向的磁场,感应出相应的电动势^[15]。理论分析直导线周围的磁场计算如为公式(1)所示:

$$H(r) = \frac{I}{2\pi r} \quad (1)$$

I 为电线中流过的电流 (A), r 为距离导线中心的距离 (mm)。

磁感应强度 B 与磁场强度 H 之间的关系见公式(2):

$$B = \mu_0 H \quad (2)$$

μ_0 为导磁率。

电磁阀壳体采用的软磁合金牌号为 1J117, 根据国家关于软磁合金标准 GB/T 14986.2-2018.4 规定, 在

不同磁场强度 (A/m) 时的磁感应强度值 B_{240} 的值为 0.9 A/m。电磁阀的阀芯与壳体装配后, 其气息磁阻如公式(3)所示:

$$R_\delta = \frac{\delta_h}{\mu_0 \times S} \quad (3)$$

δ_h 为气隙长度, $\delta_h = 0.12$ mm; μ_0 为空气的磁导率为 $0.4 \pi \times 10^{-6}$ H/m;

S 为相对磁极面的面积如公式(4)所示:

$$S = \pi R^2 \quad (4)$$

R 为磁极的半径大小为 3.3 mm;

由公式(3)和(4)得气隙磁阻大小:

$$R_\delta = \frac{\delta_h}{\mu_0 \times S} = \frac{0.12}{1.25 \times 10^{-9} \times (\pi \times 3.3^2)} = 0.00281 \times 10^9 (1/H)$$

电磁阀的漏磁系数 σ , 根据经验得到公式(5):

$$\sigma = 1 + R_\delta \frac{G_\sigma}{4} = 1 + R_\delta \frac{g \times l_k}{4} \quad (5)$$

G_σ 气隙漏磁导如公式(6)所示:

$$G_\sigma = g \times l_k \quad (6)$$

g 为单位漏磁导如公式(7)所示:

$$g = \frac{2\pi\mu_0}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (7)$$

R_2 为电磁阀壳体内半径, 为 6.9 mm; R_1 为电磁阀衔铁半径, 为 3.5 mm。

最大漏磁 B_s 如公式(8)所示:

$$B_s = \sigma \times B_{240} \quad (8)$$

由公式(5)~(8)所得最大漏磁:

$$B_s = 9\ 630 \text{ GS}$$

3.4 微压传感器软件设计

微压传感器通过在整个测量范围内多个校准点, 校准点包括零点、测量上限点和下限点。通过多次压力循环校准试验, 在任一校准点上分别取 n 个正行程试验数据, 计算每个校准点上正行程、反行程试验数据的平均值和总的平均值^[16]。正行程平均值如公式(9)所示:

$$\bar{Y}_{Ui} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{Uij} \quad (9)$$

$\bar{Y}_{Uij}$ 为正行程第 i 个校准点第 j 次的示值 ($i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, 3, \dots, n$); n 为重复试验的次数, m 为校准点的个数。

反行程平均值如公式(10)所示:

$$\bar{Y}_{Di} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_{Dij} \quad (10)$$

Y_{Dij} 为反行程第 i 个校准点第 j 次的示值 ($i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, 3, \dots, n$);

总平均值如公式(11)所示:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{2} (\bar{Y}_{Ui} + \bar{Y}_{Di}) \quad (11)$$

压力传感器的理论工作直线计算采用端点连线平移法, 计算端点的连线方程如公式 (12) 所示:

$$Y_{EP} = \frac{\bar{Y}_L \cdot X_H - \bar{Y}_H \cdot X_L}{X_H - X_L} + \frac{Y_H - Y_L}{X_H - X_L} \cdot X \quad (12)$$

X_H 为压力测量的上限值, X_L 为压力测量的下限值, $\bar{Y}_H$ 为压力测量的上限值平均值, $\bar{Y}_L$ 为压力测量的下限值平均值。

根据公式 (9) ~ (12), 拟合理想线性公式方程, 如公式 (13) 所示:

$$Y = a + bX \quad (13)$$

线性公式中 a 为截距, a 的方程如公式 (14) 所示:

$$a = \frac{\bar{Y}_L \cdot X_H - \bar{Y}_H \cdot X_L}{X_H - X_L} + \frac{1}{2} (|\bar{Y}_{U_i} - Y_{EP}|_{\max} - |\bar{Y}_{D_i} - Y_{EP}|_{\max}) \quad (14)$$

线性公式中的斜率 b 如公式 (15) 所示:

$$b = \frac{\bar{Y}_H - \bar{Y}_L}{X_H - X_L} \quad (15)$$

4 试验结果与分析

4.1 试验步骤和方法

1) 常温常压下, 洁净厂房内, 根据测量参数要求安装所有传感器, 传感器引出线根部不得松动脱落, 不允许打结。并在系统装配时安装就位。电磁阀压接前必须确认电磁阀电缆的分机编号与发动机编号对应无误。

2) 电磁阀引出线和电磁阀电缆压接完毕后, 将电磁阀电缆插头一端连接一根工艺电缆, 检查电缆压接良好后。在 20℃ 下进行进行电磁阀回路绝缘测试, 使用直流 250 V 兆欧表进行测试, 兆欧表黑表笔端接电磁阀工艺电缆端, 红表笔端接电磁阀壳体, 测各电磁阀与机壳间的绝缘性能。用数字万用表 (要求精度达 0.1 Ω), 黑表笔端接工艺电缆上的电磁阀引线负端, 红表笔端接工艺电缆上的电磁阀引线正端, 测试各电磁阀阻值。绝缘与导通阻值合格后, 将电磁阀电缆与驱动系统进行连接。

3) 进行智能极性测试。霍尔传感器吸附在电磁阀线圈壳体外部, 微压传感器布置于发动机喷口。连接控制及测试工艺电缆, 启动智能极性测试仪系统, 同时对系统通 0.2 MPa 的氮气, 根据预定的发控程序, 对电磁阀进行逐个动作^[17]。智能极性测试仪与系统的连接如图 15 所示。

4) 上位机脉冲控制软件具备手动控制、时序发控两种功能。手动控制通过点击电磁阀控制软件上位机界面的虚拟按钮, 依次打开、关闭各发动机电磁阀, 完成极性检查过程的手动控制操作。时序发控模式下, 在上位机中自动下载 txt 或 Excel 时序文件给电磁阀控制器, 按要求程控调节电磁阀电源的工作电压值, 与协作机器

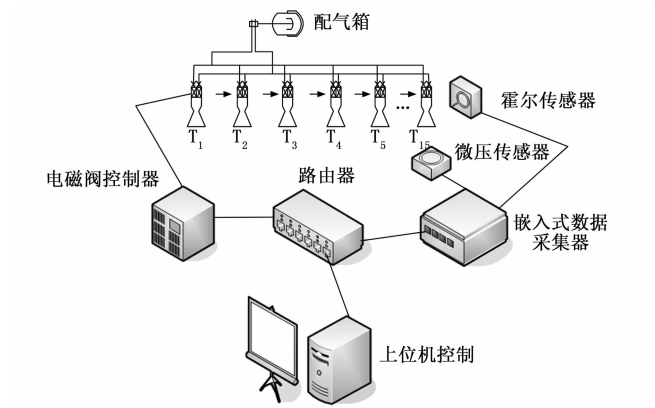


图 15 智能极性测试系统的连接示意图

人实时通讯, 按照极性检查顺序打开、关闭各发动机电磁阀, 自动完成发动机电极极性检查任务。

智能极性测试系统具备发动机电极极性数据自动判读功能, 结合发动机电磁阀发控指令, 对采集的电磁阀电流曲线进行分析计算, 判读光标之间的最大工作电流、吸合时间; 判读电磁阀工作时的磁场、发动机喷管微压数据, 给出极性测试合格与否的结论; 自动生成 Excel 或 Word 测试记录表, 并按通讯协议要求网络发布固定格式的测试报表; 储存动力系统电磁阀电流、压力、磁场、微压极性测试数据库, 智能识别发动机电极故障, 并及时提出警告和报警。详细的智能极性判读流程见图所示。具体极性测试流程如图 16 所示。

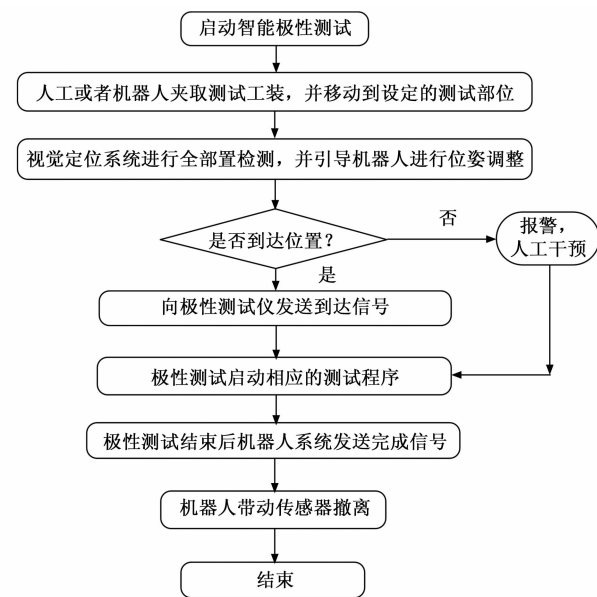


图 16 智能极性测试流程图

4.2 试验数据

根据发动机组件舱上标识, 霍尔传感器和微压传感器布置于发动机喷口, 嵌入式数据采集单元通过采集电流信号、智能霍尔传感器、微压传感器信号, 精确测试发动机电磁阀工作电磁场变化、喷管微压变化等, 来判

断电磁阀安装位置是否正确、判读发动机是否工作。智能极性测试系统通过与电磁阀控制子系统的控制指令与采集到的电流信号、霍尔传感器信号及微压传感器信号进行对比，确认各台发动机的极性是否一致。上位机脉冲控制主要对发动机电磁阀进行驱动控制，同时上位机采集软件对阀门的开关状态进行显示^[18]。试验过程中脉冲控制如图 17 和图 18 所示。电磁阀动作电流示数及气压示数如表 1 所示。



图 17 电磁阀控制器发控图

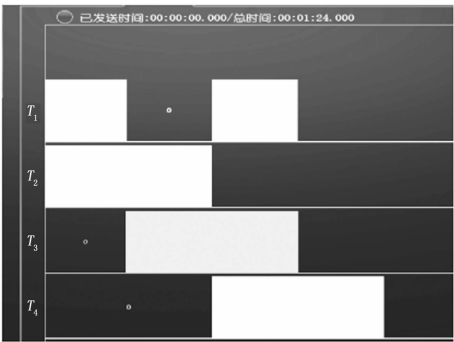


图 18 电磁阀控制器脉冲图

表 1 电磁阀测试数据表

序号	代号	电磁阀电 流/A	气压/MPa	霍尔传感 器/GS	极性判读
1	T1	1.400	0.19	1 358	一致
2	T2	1.404	0.18	1 289	一致
3	T3	1.409	0.19	1 366	一致
4	T4	1.412	0.20	1 380	一致
5	T5	1.415	0.19	1 378	一致
6	T6	1.416	0.18	1 299	一致
7	T7	1.413	0.17	1 356	一致
8	T8	1.415	0.19	1 367	一致
9	T9	1.404	0.20	1 355	一致
10	T10	1.399	0.19	1 379	一致
11	T11	1.410	0.19	1 298	一致
12	T12	1.413	0.17	1 348	一致
13	T13	1.414	0.18	1 377	一致
14	T14	1.420	0.19	1 363	一致
15	T15	1.411	0.20	1 349	一致

4.3 试验结果分析

通过智能极性测试仪对系统进行发控，每动作一个电磁阀，霍尔传感器会相应的采集到电磁阀的电磁场信号，信号包络范围为 1 200~1 500 GS；同时系统会给发动机通气，在电磁阀打开的同时微压传感器会感知到发动机喷管喷出的气体压力，压力值在 0.2 MPa±0.1 MPa 的包络范围内。信号采集后通过上位机进行智能对比，判读出发控指令、电磁阀动作、霍尔传感器、微压传感器整个回路相应一致^[19]。由表 1 的数据可知，智能极性测试仪系统的电磁阀控制器、嵌入式数据采集器、直流电源、测试电缆、采集分析及电磁阀手动、脉冲控制符合型号设计要求^[20]。

5 结束语

智能极性测试系统可同时利用多种传感器数据，提高航天发射中的数据处理能力，从而提高测控的精度和可靠性。可以通过多源信息融合，实现对航天发动机极性的全方位监测和预警，及时发现异常情况并采取相应措施，提高任务的安全性。实现对航天发动机极性的全覆盖的测控，提高测控覆盖率，减少测控盲区。总之，智能极性测试技术在航天发动机极性测试中的应用可以大大提高测控的精度、可靠性和覆盖率，降低航天发射的成本和风险，具有重要的应用价值和广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 徐丹丹, 雷 宁. 织女星火箭固体发动机研制故障综述 [J]. 固体火箭技术, 2021, 44 (3): 311-320.

[2] 李颖春, 姜 丹. 基于大数据技术的航天数据可视化系统设计 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12 (32): 6-10.

[3] 张 玮. 航天装备测试技术发展与应用 [J]. 科技与创新, 2023 (16): 170-175.

[4] 封锡凯, 李 伟, 李 辉. 电磁阀启闭特性非接触测量方法研究 [J]. 火箭推进, 2011, 37 (3): 65-67.

[5] 吴 敏, 潘春荣. 一维卷积神经网络在磁铁矿分选中的应用 [J]. 有色金属, 2023 (4): 129-140.

[6] 黄伟群, 李信合. 基于电流磁效应的定子反嵌测量系统设计 [J]. 家电科技, 2022 (6): 47-49.

[7] 王 勤, 汤小兰. 舰艇光电侦察系统嵌入式数据采集器设计 [J]. 舰船科学技术, 2022, 40 (5): 122-125.

[8] 刘 浩. 基于 STM32F407 的电磁阀控制器设计 [J]. 煤矿机电, 2022, 43 (2): 69-73.

[9] 陈昌勇, 张良俊. 一种基于 FPGA 的多面阵雷达时序控制器设计 [J]. 电讯技术, 2022, 62 (7): 978-983.

[10] 闫晓金, 王腾腾. 一种小卫星连接分离机构电机致动控制器设计 [J]. 北华航天工业学院学报, 2023 (4): 1-4.

(下转第 110 页)

个领域都具有重要意义,能够为科学研究提供可靠的数据基础,为实际应用提供决策支持。在此次研究中,通过匹配策略与粗差剔除算法相结合,成功地降低了错误匹配和重复匹配的风险,确保了匹配控制点的精确性与有效性。粗差剔除算法在这一过程中发挥了关键作用,有效滤除了那些可能干扰匹配精度的异常数据点,为后续的影像处理和地理空间分析奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 王高杰,郝向阳,苗书锋.一种视觉导航影像特征点整体匹配算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(22):255-263.
- [2] 邹融平,朱斌,王晨阳,等.基于残差伪李生卷积互相关网络的异源遥感图像匹配算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(12):458-466.
- [3] 宗慧琳,袁希平,甘淑,等.改进AKAZE算法的泥石流区无人机影像特征匹配[J].测绘通报,2023(2):91-96.
- [4] CHEN Q Y, FENG D Z. Feature matching of remote-sensing images based on bilateral local-global structure consistency[J]. IET Image Processing, 2023, 17(14): 3909-3926.
- [5] 陈军,马世岩,陈玲,等.基于等角边界距离相似性的遥感影像面状图斑匹配研究[J].地球信息科学学报,2022,24(11):2234-2244.
- [6] 张昆,王涛,张艳,等.一种基于面阵摆扫式航空影像的特征匹配方法[J].地球信息科学学报,2022,24(3):522-532.
- [7] 姚永祥,段平,李佳,等.联合对数极坐标描述与位置尺度特征的无人机影像匹配算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(8):1271-1278.
- [8] 刘伟玉,万一,张永军,等.基于相位均匀卷积的LiDAR深度图与航空影像高效匹配方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(8):1309-1317.
- [9] 高孟豪,郭立君,张荣,等.基于匹配线索回归的侧面脊柱关键点检测[J].激光与光电子学进展,2024,61(4):327-334.
- [10] 王明军,易芳,李乐,等.自适应局部邻域特征点提取和匹配的点云配准[J].红外与激光工程,2022,51(5):431-440.
- [11] 潘峰,沈建新,秦顺,等.融合GMS的ORB特征点提取与匹配算法[J].计算机工程与设计,2022,43(8):2244-2251.
- [12] 王浩桐,郭中华.锚框策略匹配的SSD飞机遥感图像目标检测[J].计算机科学与探索,2022,16(11):2596-2608.
- [13] 王炎,刘根旺,张晰,等.多时相SAR船只目标的特征点匹配方法对比分析[J].计算机应用,2023,43(s2):186-190.
- [14] 曹现刚,袁娜,王鹏,等.面向煤矸体体积检测的图像特征匹配算法研究[J].煤炭技术,2023,42(2):175-178.
- [15] 黄妍妍,盖绍彦,达飞鹏.三支空间变换注意力机制的图像匹配算法[J].系统工程与电子技术,2023,45(11):3363-3373.
- [16] 张珊,张卡,赵立科,等.结合网状描述符和单应约束的近景影像直线匹配[J].地球信息科学学报,2022,24(11):2186-2197.
- [17] 杨威,曹金山,张欢,等.拓扑结构引导的遥感影像匹配外点去除算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(18):427-435.
- [18] 谢勋伟.累积结构特征描述的多模态遥感影像匹配[J].电讯技术,2022,62(12):1780-1785.
- [19] 王丽娜,梁怀丹,王中石,等.面向可见光和SAR影像配准的特征点检测[J].光学精密工程,2022,30(14):1738-1748.
- [20] 姜三,罗海涵,危迟,等.特征聚类与霍夫投票约束下影像匹配粗差剔除[J].测绘科学,2023,48(11):69-81.
- [11] 程翔,常浩然,刘岩.单片集成光耦隔离式驱动芯片[J].光学精密工程,2023,31(7):1022-1030.
- [12] 郭显鑫,马文博,汪晓文,等.基于光耦的脉冲指令开关机控制电路[J].电源技术与设计,2019,43(9):1536-1538.
- [13] 崔城诚,陈伟,张璇,等.基于Labview的流量控制系统开发[J].自动化技术与应用,2023,42(6):143-145.
- [14] 石英,陈心浩,倪文军,等.基于FPGA与LabVIEW的虚拟示波存储系统设计与实现[J].实验室研究与探索,2023,42(4):21-33.
- [15] 黄伟群,李信合,宋洁乐,等.基于电流磁效应的定子反嵌测量系统设计[J].家电科技,2022(6):47-59.
- [16] 鹿文龙,王刚.基于PGA900的薄膜微压传感器研究[J].电子产品世界,2022,29(1):52-55.
- [17] 司毅,杨威,杜爱华,等.基于Labview的天线自动测试系统设计与实现[J].舰船电子对抗,2023(1):117-120.
- [18] 谢艳,贾雨龙,郝红斌,等.基于C#和RS485的分布是多点位温湿度监控系统设计[J].自动化控制理论与应用,2022(8):13-22.
- [19] 毛开梅,黄晓明,邹星,等.面向对象的计算机监控软件程序设计方法[J].微型电脑应用,2018,34(10):40-42.
- [20] 王振华,萧耀友.某型导弹控制系统电池自动测试仪设计[J].中国设备工程,2018(12):119-120.