

运载火箭电磁阀数据采集及故障诊断系统研究

赵帅杰¹, 周虎¹, 梁宽¹, 戴李刚¹, 马莉², 徐昕^{3,4}

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 2. 西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000;

3. 中国航天科技集团商业火箭有限公司, 上海 201101;

4. 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 针对运载火箭电磁阀测试问题, 对运载火箭电磁阀数据采集系统展开了研究; 采用了高速 AD 等技术, 进行了电磁阀数据采集系统的硬件设计, 实现了针对箭上电磁阀电流的多通道、可扩展采集; 基于系统硬件进行了软件设计, 完成了对硬件数据存储、数据发送等功能控制, 实现了对电磁阀通断状态的判断及电流数据特征值的分析; 针对电磁阀电流的数据分析与故障诊断问题, 建立了基于环境参数的电磁阀电流差分方程仿真模型, 通过电流仿真模型建立求解环境参数的非线性规划模型, 并采用了差分进化算法对模型进行求解; 进行了电磁阀数据采集系统的多通道采集实验, 验证了系统硬件采集功能及软件通断动作判断等功能的可行性; 进行了电磁阀故障模拟实验, 故障情况下直接相关环境参数的偏差均大于 35%, 而非直接相关参数的偏差均小于 10%, 验证了系统算法求解环境参数的可行性。

关键词: 运载火箭; 电磁阀; 电流采集; 故障诊断; 非线性规划模型; 差分进化算法

Research on Data Acquisition and Fault Diagnosis System for Electromagnetic Valves in Launch Vehicles

ZHAO Shuaijie¹, ZHOU Hu¹, LIANG Kuan¹, DAI Ligang¹, MA Li², XU Xin^{3,4}

(1. Shanghai Aerospace Electronics Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, China;

3. China Aerospace Science and Technology Commercial Launch Vehicle Group Co., Ltd., Shanghai 201101, China;

4. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To address the testing challenges of electromagnetic valves in launch vehicles, this paper makes a comprehensive study on the data acquisition system for these valves, utilizes technologies such as high-speed AD, designs the hardware design of the electromagnetic valve data acquisition system, achieves multi-channel, expandable acquisition of the current in the vehicle's electromagnetic valves, designs the system software based on the system hardware, achieves the functions of hardware data storage and transmission, and realizes the judgement of the on-off state of the electromagnetic valve and the analysis of current data. For the current data and fault diagnosis of the electromagnetic valve, it presents a simulation model of the current differential equation based on environmental parameters, builds a nonlinear programming model for solving environmental parameters through a current simulation model, and employs a differential evolution algorithm to solve the model. Multi-channel acquisition experiments of the electromagnetic valve data acquisition system verify the feasibility of the system's hardware acquisition function and software on-off action judgment function. Fault simulation experimental results of the electromagnetic valve show that under fault conditions, the deviation of directly related environmental parameters is greater than 35%, while the deviation of non-related parameters is less than 10%, confirming the feasibility of the system's algorithm for solving environmental parameters.

Keywords: launch vehicle; electromagnetic valve; current acquisition; fault diagnosis; nonlinear programming model; differential evolution algorithm

收稿日期: 2025-02-28; 修回日期: 2025-03-31。

作者简介: 赵帅杰(1998-), 男, 硕士, 助理工程师。

通讯作者: 梁宽(1998-), 男, 硕士, 助理工程师。

引用格式: 赵帅杰, 周虎, 梁宽, 等. 运载火箭电磁阀数据采集及故障诊断系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(5): 125

- 133.

0 引言

运载火箭是宇航工业的基础,卫星、飞船、航天探测器的发射均依托于运载火箭^[1]。新的国际态势与行业发展趋势要求运载火箭具备更高的载荷、更短的发射周期、更高的可靠性^[2]。因此,快速准确地针对箭上器件进行故障检测具有非常重要的作用。

箭上电磁阀是一种大量运用于运载火箭发动机、辅助动力、增压输送等系统的重要器件^[3],其能否正确工作关系到火箭发射的成败^[4]。电磁阀通常用来描述一个阀门机构,其内部装有圆筒形金属芯柱塞的多重缠绕的线圈,该线圈有一定电流通过时产生电磁力驱动金属芯柱运动,从而控制阀门状态^[5]。电磁阀在执行动作时,分析其驱动电流呈现的电流特性是对电磁阀进行故障检测和评估的主要手段之一^[6-7],运载火箭整箭测试阶段普遍采用该方式。

在国内多个运载火箭型号中,针对电磁阀电流采集与分析的方法为采集并存储整个测试阶段电磁阀电流数据,在事后使用数据处理软件对数据进行初步分析并进行人工判读^[8]。而随着箭上电磁阀数量的增加与火箭测试周期的缩短,传统方案的存储空间要求过大、网络数据量过大、判读用时过久等缺点变得不可忽视。因此,为满足对电磁阀驱动电流进行更快速高效准确的数据采集和分析的需求,本文设计了一种改进的运载火箭电磁阀数据采集系统,并对其实现方式及参数优化进行了研究。

1 系统组成及原理

1.1 系统组成

系统包括硬件、软件两部分。硬件为电磁阀数据采集设备,用于采集多路箭上电磁阀测试过程中经过的电流信号,将其转换为数字信号,同时具备数据存储器件及数据发送器件。其中,箭上电磁阀的被采集接口通过箭地电缆与单机的采集接口连接,单机通过以太网与上位机连接,控制核心、数据存储器件、数据发送器件、其它外围器件均在地面单机内主控板上,而采集接口位于单机内可扩展插槽中。软件为嵌入式电磁阀数据处理软件,固化于硬件控制核心中,用于控制硬件数据采集及存储操作,处理硬件设备采集到的数字信号,判断电磁阀是否发生动作并分析动作特征,将分析结果编码并输出至上位机。

1.2 电磁阀基本结构及故障诊断原理

电磁阀主要由线圈、阀芯、活塞、弹簧、阀体等工作部件组成^[9],一个简易的电磁阀结构如图 2 所示。

基于电磁阀的工作过程,其可划分出六种工作阶段^[10]。线圈未加电情况下,阀芯受弹簧推力保持其位置稳定,电磁阀处于断电状态;线圈加电后,电流逐渐上升,由于电磁感应线圈对阀芯产生磁力,该过程称为

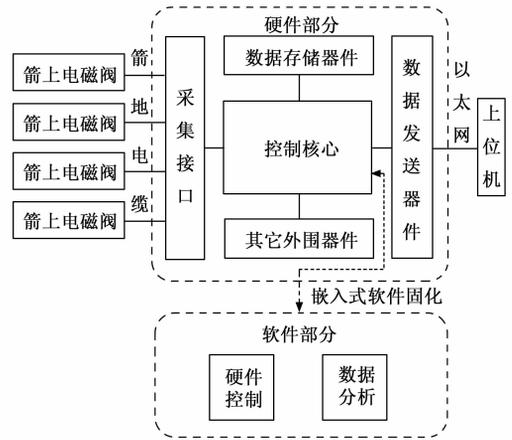


图 1 系统组成示意图

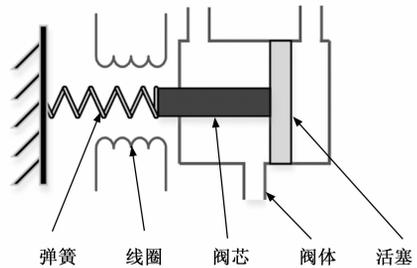


图 2 电磁阀原理示意图

吸合触动过程;随着电流增大,磁力超过一定值时,阀芯受磁力驱动克服摩擦力与弹簧弹力开始运动,该过程称为吸合运动过程;阀芯受磁力保持稳定时,电磁阀处于通电保持状态;断电后,磁力开始下降,该过程称为释放触动过程;磁力下降至一定值时,弹簧弹力克服磁力与摩擦力使得阀芯开始运动,该过程称为释放运动过程,并最终经过此过程返回断电状态。

经过线圈的电流与激励电压的关系可表示为:

$$U = iR + \frac{dLi}{dt} \quad (1)$$

式中, U 为外部激励电压, R 为回路总电阻, L 为磁路电感, i 为线圈电流。

在电磁阀工作过程中,阀芯位置影响磁路电感^[11]:

$$L = \frac{D_0}{C_0 - x} \quad (2)$$

式中, x 为阀芯位移, C_0 、 D_0 为磁路结构参数。

根据电磁感应定律,线圈对阀芯产生的电磁力可表示为^[12-13]:

$$F_e = -\frac{i^2}{2} \frac{dL}{dx} \quad (3)$$

式中, F_e 表示线圈对阀芯产生的电磁力。

在吸合触动过程中,阀芯位置为 0,摩擦力与电磁力方向相反,阀体限位结构对阀芯的压力与电磁力相反,系统力平衡方程可写为:

$$F_e - kx_0 - F_f = -F_p \quad (4)$$

式中, F_p 表示电磁阀壳体限位结构对阀芯产生的阻止阀芯超出行程范围的压力。

F_e 随时间持续增大, F_p 持续减小, 当 F_p 减小为 0 时, 电磁阀进入吸合运动过程。在吸合运动过程中, 阀芯运动方向与电磁力方向相同, 摩擦力与电磁力方向相反, 系统的运动平衡方程可写为:

$$F_e - b \frac{dx}{dt} - k(x + x_0) - F_f = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (5)$$

式中, b 表示系统阻尼系数, k 表示弹簧刚度系数, F_f 表示摩擦力, m 表示系统质量系数。

在释放触动过程中, 阀芯位置为 0, 摩擦力与电磁力方向相同, 阀体限位结构对阀芯的压力与电磁力相同, 系统力平衡方程可写为:

$$F_e - kx_0 + F_f = F_p \quad (6)$$

在释放运动过程中, 阀芯运动方向与电磁力方向相反, 摩擦力与电磁力方向相同, 运动平衡方程可写为:

$$F_e - b \frac{dx}{dt} - k(x + x_0) + F_f = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (7)$$

根据系统的平衡方程, 即可确定电磁阀在正常工作过程中某一时刻的电流与阀芯位移等重要参数。而阀的磁路结构参数 C_0 、 D_0 以及弹簧刚度系数 k 等参数会影响运动过程中的电流, 当电磁阀因出现故障导致结构参数或刚度参数发生改变时, 运动过程中的电流也会发生一定变化, 因此可以通过采集并分析驱动电流的方法对电磁阀工作状态进行判断。

1.3 箭上电磁阀电流采样方法

电流采样通常有高精度采样电阻、霍尔传感器、电流互感器等方法^[14]。其中高精度采样电阻成本低, 重量轻, 需要连接到电磁阀电路中, 会增加被测电路功耗; 霍尔传感器及电流互感器成本相对较高, 体积重量较大。

由于运载火箭对设备重量的敏感性^[15], 选择采样电阻对箭上电磁阀电流进行采样, 同时将除采样电阻外的其余硬件设备放置于地面, 以进一步确保箭上重量的最小化。将采样电阻串联入电磁阀电路中, 并增加箭地电缆连接地面设备与采样电阻的两端, 从而实现对电磁阀电流信号的采样。

在对箭上电磁阀进行加电测试时, 电流流经采样电阻产生电势差, 箭地电缆将采样电阻两端的电压输出至地面, 在地面硬件设备中使用高速 AD 芯片对采样电阻两端的电压进行连续采集。AD 芯片将采集到的电压数据转换为数字信号发送至控制核心, 控制核心中的软件对数据进行分析, 将重要数据与分析结果存入存储器件, 并通过数据发送器件转换为网络信号发送至上位机。

2 系统硬件设计

2.1 硬件整体架构

电磁阀数据采集系统硬件用于采集多路箭上电磁阀测试过程中经过的电流信号, 其包括采集接口模块、数据存储器件模块、数据发送器件模块、控制核心模块。将除采样电阻外的硬件置于箭体之外的地面单机内, 同时为适应多种不同型号运载火箭, 针对采集接口模块进行可扩展设计, 硬件整体架构如图 3 所示。

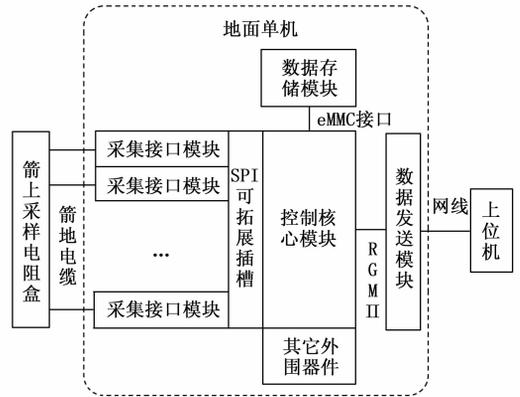


图 3 硬件整体架构示意图

2.2 采集接口模块

采集接口模块实现将箭上采样电阻盒中电阻两端的电压模拟量信号转换为数字信号的功能。由于电磁阀的动作时间大多在几十至几百毫秒内, 采集电磁阀开关动作数据需要至少约 10 kHz 的采样频率。选用多通道高采样率数模转换芯片, 可直接输入 3.6 V 以内的电压模拟量, 采样率最高可达 19.2 kHz, 可同时采集 8 路差分信号通道, 每通道具有 24 位采样分辨率, 内置可编程滤波器。其高采样率、多路通道等性能特点可完全支持箭上电磁阀的数据采集需求^[16]。

多通道高采样率数模转换芯片使用 SPI 进行通信, 具备片选功能, 在拓展插槽时只需在控制核心模块中增加片选引脚, SPI 时钟与输入输出通道可复用。

2.3 控制核心模块

控制核心模块完成对采集接口模块 SPI 信号的接收及数据解析功能, 同时控制数据存储模块等外围器件实现相应功能。由于 AD 芯片采样频率较高, 使用计算效率较高的 FPGA 作为数据接收器件。同时为便于实现存储及数据发送功能, 选用同时具有现场可编程逻辑门阵列 (FPGA, field programmable gate array), 与处理器核心的嵌入式系统级芯片 (SoC, system on chip) 作为主控芯片^[17]。

所选用的 SOC 内置处理器系统 (PS, progress system) 端双核心处理器及可编程逻辑 (PL, programable logic) 端 FPGA。其 PL 端具有 350 k 逻辑单元, 188 个

输入输出管脚, 满足可扩展多个采集接口模块 SPI 通信的需求。其 PS 端支持 16/32 bit 双倍速率内存 (DDR, double data rate SDRAM), 支持精简吉比特介质独立接口 (RGMII, reduced gigabit media independent interface), 具备嵌入式多媒体卡 (eMMC, embedded multi media card) 兼容控制器, 可满足控制存储模块及数据发送模块等需求。

由于系统采样频率高, 数据量大, 在模块间通信及数据处理时需要缓存大量数据。Z-7045 内置的 256 k 内存无法满足使用需求, 因此添加外部内存器件实现数据缓存功能。选用大容量 DDR 芯片作为外置内存器件, 其使用 DDR 接口, 可与 SoC 芯片 PS 端接口适配, 具备 4 GB 存储空间, 可满足系统数据缓存需求。

2.4 数据存储模块

数据存储模块完成对电磁阀动作电流曲线及重要特征参数的存储。不同于外部内存完成的数据缓存功能, 为使得系统采集的重要数据可复查, 数据存储模块需要实现断电后数据依然保存的需求。由于箭上电磁阀数量多, 测试时间长, 因此要求数据存储模块具备较大存储空间。

选用大容量存储芯片作为存储模块核心。该芯片为 eMMC 芯片, 可与控制核心模块的 PS 端口直接适配。该芯片具有 32 GB 存储容量, 读写速率达 175 MB/s, 满足系统对数据存储的需求。

2.5 数据发送模块

为便于运载火箭测试, 及时发现电磁阀可能存在的故障, 需要将电磁阀测试数据实时反馈给测试人员。为此需要提供与上位机的接口, 使得测试人员可从上位机中监测电磁阀数据。由于运载火箭测试时前端设备与后端计算机距离较远^[18], 因此使用以太网作为通信方式对电磁阀数据进行反馈。

选用千兆以太网物理层芯片作为以太网端口物理层芯片。该芯片接口为 RGMII, 可直接与主控芯片 PS 端适配。该芯片是高度集成的以太网收发器, 具备以太网物理层所有必要功能, 实现了交叉检测和自动校正、极性校正和纠错等功能, 以提供 10 Mbps、100 Mbps 或 1 000 Mbps 的强大传输和接收能力^[19], 可满足系统与上位机通信的需要。选用汉仁公司的 HR911130A 以太网连接器作为网络端口, 以实现单机对外通过网线的以太网连接。

2.6 其他外围器件

地面单机的运行还需要其他外围器件, 根据芯片手册为每一块芯片提供电源电路, 并使用交流直流转换模块将房间内的 220 V 电源供电转换为设备可用的直流电。同时为芯片提供外围的时钟电路、复位电路, 为主控芯片提供烧写用的联合测试工作组 (JTAG, joint

test action group) 电路。使用机箱将地面单机内的器件进行固定, 在机箱内安装风扇保证器件散热。

3 系统软件设计

3.1 软件总体设计

电磁阀数据采集系统软件运行在硬件主控芯片 Z-7045 中, 实现对电磁阀数据的分析处理及对外设的控制。将电磁阀动作数据进行存储、转发与分析是软件的关键功能。软件的主要流程如图 4 所示。

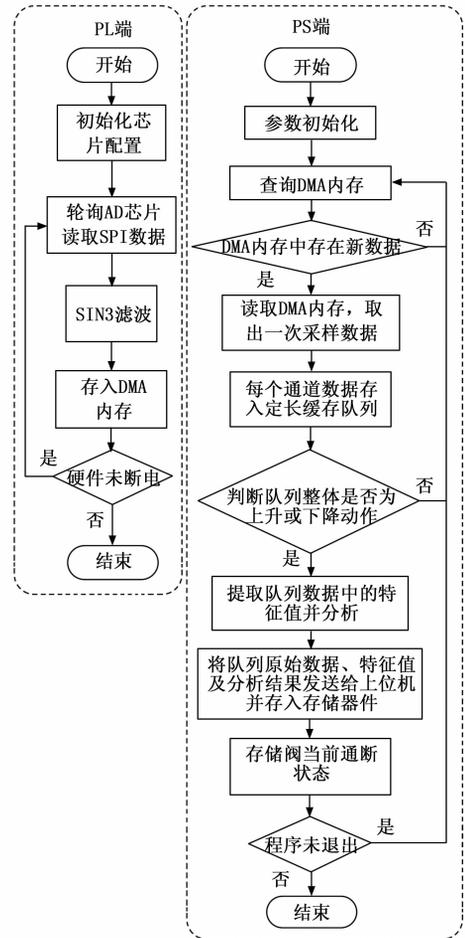


图 4 软件整体流程框图

PL 端软件完成将 AD 芯片采集的 SPI 数据滤波后传输到 PS 端的功能。PL 端到 PS 端通信使用直接内存访问 (DMA, direct memory access) 方式。DMA 允许外设硬件直接操作内存, 数据从 PL 端 FPGA 直接存入内存, PS 端再从内存中将数据读取。DMA 具有速度快、功耗低、大幅节省处理器资源等特点^[20], 满足电磁阀采集系统对主控芯片内部数据高速传输的需要。PL 端软件收到 AD 芯片通过 SPI 发送的数据后, 根据时钟添加时间戳, 并使用 IP 核 SIN3 滤波模块进行滤波, 将滤波后的数据添加帧头帧尾, 通过 DMA 方式将数据存入内存中。

当 DMA 内存中存在数据时, PS 端程序将数据按采集点逐个取出, 并将每个通道的数据存入定长的缓存队列。该缓存队列的长度设置为大于电磁阀一次加电动作或断电动作的数据量, 由于电磁阀动作时间大多在几十至几百毫秒内, 在采样频率设置为 10 kHz 时可设置定长队列长度为 10 k, 即存储最新 1 s 时间内的电磁阀数据, 存储数据时间不应过长, 否则可能导致一段定长队列中存在多次加电动作或多次断电动作导致误判。

通过定长队列内的数据判断当前是否处于加电或断电动作, 若处于动作过程则提取当前动作的触动点等特征值并对电磁阀状态进行分析, 将结果与原始数据存入存储器件并通过以太网发送至上位机。定长队列内数据处理完毕后, 为防止同一次动作被多次判别造成资源浪费与动作次数误判, 保存阀的通断状态, 在电磁阀处于断电状态时只判断电磁阀加电动作, 在电磁阀处于通电状态时只判断电磁阀断电动作。

3.2 电磁阀动作判别方案

定长队列中的数据是否为加电或断电动作需要通过分析队列中的数据进行判别。不同电磁阀加电后呈现的特性可能不同, 部分电磁阀在通电保持阶段电流并不稳定。但电磁阀断电状态下均不会产生电流, 此时系统 AD 芯片采集到的电压仅为采样误差。

如图 5 所示提取定长队列中的数据, Q_0 为队首数据, $[Q_0, Q_i]$ 为队首至第 $i+1$ 个电压数据中的所有数据集合, Q_m 为队列中心位置数据, Q_F 为队尾数据, $[Q_{F-i}, Q_F]$ 为第 $F-i+1$ 个电压数据至队尾的所有数据集合。



图 5 定长队列采样方式图

设系统采样误差小于 E_0 , 系统加电过程中的采样电压峰值大于 V_0 , 则电磁阀由断电状态加电时定长队列满足:

$$\begin{cases} \max[Q_0, Q_i] - \min[Q_0, Q_i] \leq E_0 \\ Q_m - Q_0 \geq V_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, E_0 为最大采样电压误差, V_0 为最小采样电压峰值。

电磁阀由通电保持状态断电时, 定长队列满足:

$$\begin{cases} \max[Q_{F-i}, Q_F] - \min[Q_{F-i}, Q_F] \leq E_0 \\ Q_m - Q_F \geq V_0 \end{cases} \quad (9)$$

根据式 (8) 与式 (9) 即可对当前定长队列中的电磁阀数据是否处于相应动作进行判别。整个通断判断算法流程如图 6 所示, 当电磁阀处于断电状态时, 通过式

(8) 对电磁阀加电动作进行判断, 若定长队列数据满足式 (8) 则针对定长队列数据进行处理并将通断标志变量改为通电状态; 当电磁阀处于通电状态时, 通过式 (9) 对电磁阀断电动作进行判断, 若定长队列数据满足式 (9) 则针对定长队列数据进行处理并将通断标志变量改为断电状态; 判断结束后, 返回通断标志变量。

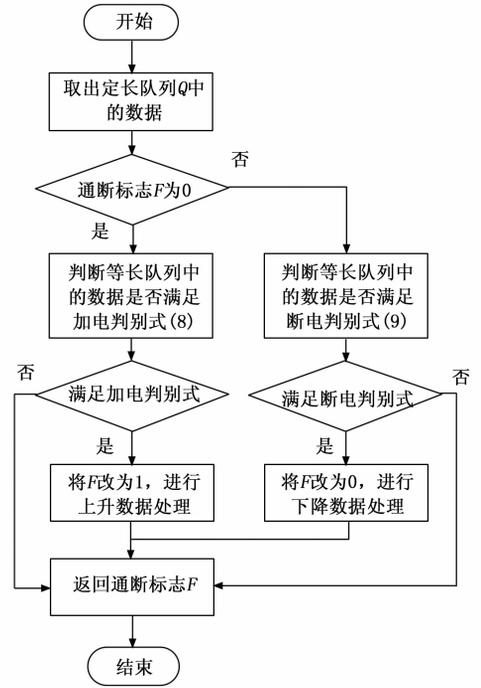


图 6 通断判断算法流程图

3.3 电磁阀动作特征提取

采集电磁阀电流的最终目的是判断电磁阀工作状态, 因此提取的特征应能最大程度表征电磁阀的电流特性, 并根据该特征给出电磁状态判断。

通过式 (1) 至式 (7) 建立电磁阀加电时的微分方程模型, 并将其转化为可供计算机仿真的差分方程模型:

$$\begin{cases} \dot{i} = \frac{(C_0 - x_t)(U - Ri_t)}{D_0} - \frac{D_0 i_t \dot{x}_t}{C_0 - x_t} \\ \dot{x} = \frac{D_0 i_t^2}{2(C_0 - x_t)^2} - b\dot{x}_t - k(x_t + x_0) - F_f \\ \dot{x}_{t+1} = \dot{x}_t + \Delta t \dot{x} \\ x_{t+1} = x_t + \Delta t \dot{x}_t \\ i_{t+1} = i_t + \Delta t \dot{i} \end{cases} \quad (10)$$

式中, Δt 为时间步长, \dot{i} 为电流增量, \dot{x} 为阀芯位移增量, \dot{x} 为阀芯速度增量, \dot{x}_{t+1} 、 x_{t+1} 、 i_{t+1} 表示下一周期内的阀芯位移增量、阀芯位移、电流。

同理, 可根据式 (1) 至式 (7) 建立电磁阀断电时的差分方程模型。

使用 matlab 软件对模型进行仿真分析。在电磁阀

加电阶段, 初始 i_i 、 x_i 、 \bar{x}_i 均为零; 设置阀芯行程极限值 x_c , 当阀芯位移 x 大于等于 x_c 时, 视为阀芯位移到达最大值, \bar{x} 、 \bar{x}_i 强制等于零。在电磁阀断电阶段, \bar{x}_i 初始值为零, i_i 与 x_i 保持在加电状态平衡后的数值, 此时激励电压 U 变为零; 在阀芯位移 x 小于等于零时, 视为阀芯回到初始位置, \bar{x} 、 \bar{x}_i 强制等于零。将参数与限制条件带入软件, 得到一组电磁阀通断电流及阀芯位置数据如图 7 所示。

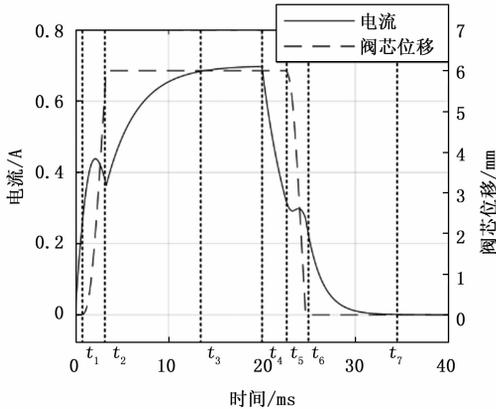


图 7 电磁阀通断仿真图

由图 7 可知, 电磁阀加电时处于吸合触动过程, 此时电流不断增大, 阀芯尚未开始运动。 t_1 时刻, 电流增大到一定程度, 阀芯开始运动, 电流增速下降, 直至电流开始反方向下降, 电磁阀此时处于吸合运动过程。 t_2 时刻, 阀芯到达限位位置后, 即电磁阀进入通电保持状态时, 电磁阀电流开始重新上升, t_3 时刻缓慢上升至电压与回路电阻的比值。 t_4 时刻电磁阀断电, 此时电磁阀电流开始下降。降至 t_5 时刻, 电磁阀阀芯开始运动, 运动至 t_6 时刻到达限位, 电磁阀的运动过程将导致电流曲线发生波动, 最终电磁阀电流持续下降至 t_7 时刻。

观察图 7 可发现, 电磁阀电流曲线具有显著特征的值有 t_0 至 t_2 时刻之间的波峰电流 I_1 及其时刻 t_{11} , t_2 时刻及其波谷电流 I_2 , t_3 时刻的电流稳定值 I_3 , t_4 至 t_6 时刻的波谷电流 I_4 及其时刻与 t_4 时刻的差值 t_{14} , t_4 至 t_6 时刻的波峰电流 I_5 及其时刻与 t_4 时刻的差值 t_{15} , t_7 时刻与 t_5 时刻的差值 t_{16} 。采集真实数据时, 通过计算局部最大最小值的方式可获取各个波峰、波谷及稳态点的电流值与相对时间, 算法流程如图 8 所示, 将 I_1 、 t_{11} 、 I_2 、 t_2 等特征值进行提取并进行存储与发送, 同时利用特征点进行故障分析。

4 故障分析算法设计

4.1 故障分析原理

采集电磁阀电流的主要目的是为判断电磁阀是否发生故障, 以便在运载火箭测试阶段及时对故障电磁阀进行更换或维修, 从而保证火箭发射成功。为此, 电磁阀

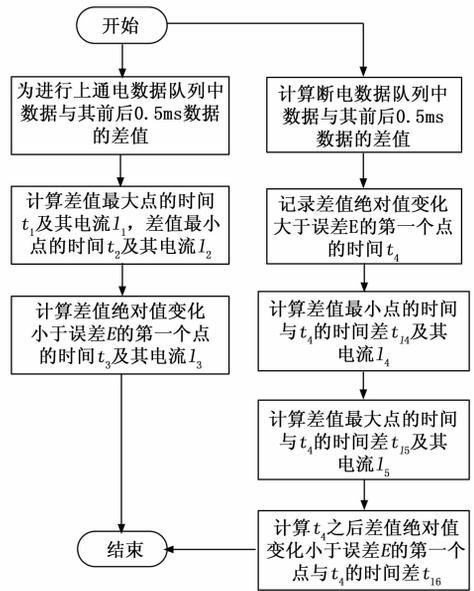


图 8 特征提取算法流程图

数据采集系统应有一定的电磁阀故障自动分析能力。

式 (1) 至式 (7) 中的环境参数回路总电阻 R 、磁路结构参数 C_0 、 D_0 、系统阻尼系数 b 、弹簧刚度系数 k 、摩擦力 F_f 、系统质量系数 m 共同决定了图 6 电流曲线的特征值。而这些环境变量与电磁阀本身的性能相关, 正常状态下应保持稳定而不会发送较大改变。当回路总电阻 R 发生较大改变时, 可能是回路接触不良导致电阻变化; 当磁路结构参数 C_0 、 D_0 发生较大改变时, 可能是磁路结构受到损坏; 当系统阻尼系数 b 、质量系数 m 、摩擦力 F_f 发生较大改变时, 可能是阀芯及活塞状态受到损坏; 当弹簧刚度系数 k 、预紧长度 x_0 发生较大改变时, 可能是弹簧发生老化等故障。分析出电磁阀环境参数是否发生较大改变, 即可对电磁阀故障状态进行判断。因此, 对电磁阀进行故障分析可量化为对其环境参数是否发生较大偏移进行判别。

4.2 环境参数计算

在 3.3 节中, 已经建立基于环境参数的电磁阀差分方程模型。通过差分方程模型, 可以在已知环境参数的条件下对电磁阀开关过程电流进行求解, 而在电磁阀数据采集过程中, 需要通过已知的电磁阀开关过程电流求解未知的环境参数。环境参数的求解通过拟合的方式实现, 其算法简要流程如图 9 所示。

图 9 为计算环境参数的简要流程, 为提高算法在嵌入式控制核心模块中的边缘计算效率, 不针对整个电流曲线进行拟合, 而只针对特征值进行拟合。图 7 算法中更换环境参数时如果完全随机选取往往难以得到误差较小的结果。差分方程模型的特征值拟合是一种非线性规划问题^[21]。将拟合问题转换为非线性规划模型, 其决策变量为环境参数组成的集合, 其约束条件为环境参数在

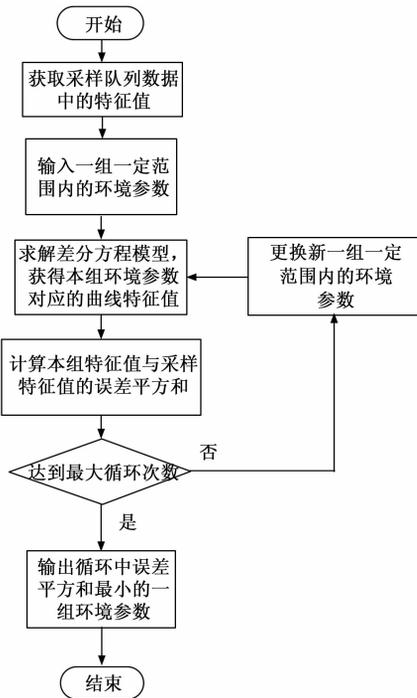


图 9 环境参数求解算法框图

实际电磁阀中的极限范围, 其目标函数为使得差分方程模型特征值与实际电流数据特征值误差平方和最小。

根据非线性规划模型的决策变量、约束条件、目标函数, 可将非线性规划模型表示为:

$$\begin{aligned} & \min f(c) \\ & s. t. \begin{cases} 0 < c < c_{\max} \\ C_0 > x_0 \end{cases} \\ & f(c) = \sum \left(\frac{I(c) - I}{I_{\max}} \right)^2 + \sum \left(\frac{t_1(c) - t_i}{t_7 - t_4 + t_3 - t_0} \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中, c 为待求环境参数, c_{\max} 为环境参数理论最大值, $I(c)$ 为模型电流特征值, $t_1(c)$ 为模型时间特征值, I 为实际电流特征值, $t_1(c)$ 为实际时间特征值, I_{\max} 为阀实际电流最大值, t_7 为阀实际关断电流稳定时间点, t_4 为阀实际释放运动时间点, t_3 为阀实际开启电流稳定时间点, t_0 为阀实际加电时间点。

式 (9) 中的 $f(c)$ 即为特征值误差平方和, 由于特征值包含电流与时间两种不同量纲的参数, 因此根据实际电流数据的最大最小值对其进行归一化处理后计算平方和。

4.3 非线性规划模型求解

有多种算法可用于求解多决策变量的非线性规划问题, 如多重遍历搜索、遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法、粒子群算法等。使用密集的多重遍历搜索是精度最高的方法, 但由于本系统软件运行于嵌入式芯片 Z-7045 中, 且数据处理量较大, 为提高软件效率和计算

速度, 选用差分进化算法对非线性规划模型进行求解。

差分进化算法是一种启发式算法, 其启发于自然界的生物演化过程, 具有结构简单、容易实现、收敛快速、鲁棒性强等优点^[22]。差分进化算法与遗传算法相似, 也存在变异、交叉和选择 3 种操作。在循环迭代过程中, 随机函数产生归一化后的电磁阀的环境参数集合作为决策向量, 两个个体向量求差产生差分向量, 被赋权的差分向量与另一随机的个体向量求和, 得到变异向量。随机生成新个体向量, 与变异向量进行混合交叉, 得到测试个体向量。将得到的测试个体与原个体反归一化, 输入由式 (8) 构成的差分方程模型, 得到各个个体对应的电流数据特征值与实际特征值的误差平方和, 根据误差平方和比较择优产生新一代的种群, 最终将末代种群中特征值误差平方和最低的个体反归一化后作为算法解输出。整个算法流程如图 10 所示。

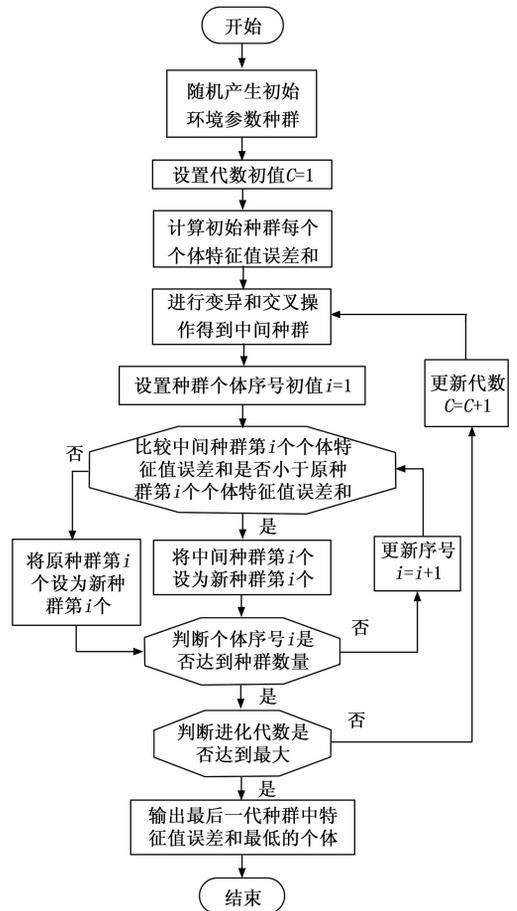


图 10 差分进化算法流程图

经过差分进化算法即可获得一组拟合结果较优的环境参数, 通过环境参数即可对电磁阀状态进行判断。

5 实验结果与分析

5.1 实验步骤和方法

搭建硬件平台并将软件与算法烧录至控制核心模块

后,即可开始对系统进行实验验证。首先验证系统数据采集、存储及电磁阀动作判别功能,其次验证系统故障分析功能。

将地面单机通过箭地电缆与采样电阻盒相连,将采样电阻盒接入多路电磁阀电路中,通过网线连接地面单机与上位机计算机。通过对箭上电磁阀加电断电产生真实的电磁阀动作数据。根据地面单机返回到上位机中的曲线记录,判断系统是否正确对电磁阀动作数据进行了采集与识别。

将采样电阻盒其中一个通道接入实验阀中,对实验阀进行弹簧更换、线圈绕组更换、阀芯堵塞等人为产生故障的操作,使用地面单机对故障阀进行数据采集与故障检测,判断系统是否对故障发生后的环境参数进行了正确的识别。

5.2 数据采集与通断判断实验

为保证采集到运载火箭绝大多数电磁阀的明显电流波峰波谷数据特征,根据经验系统实际采样率设置为 10 KHz,使用 2 个采集接口模块共 16 个采集通路,定长队列长度设置为 10 k,即保存最近 1 s 内的数据,式(8)与式(9)中的最大采样电压误差 E_0 设置为 0.1 V,最小采样电压峰值 V_0 设置为 0.5 V。采样电阻盒电阻设置为 2Ω ,激励电压设置为 28 V,激励时序模拟火箭飞行状态进行加电。

进行一轮实验模拟后,数据存储模块中存储的数据与上位机获取的数据一致,其中,采集接口模块 1 的通道 1 加电断电曲线如图 11 所示。

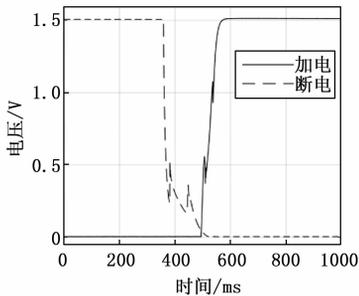


图 11 模块 1 通道 1 动作采集曲线图

根据电阻盒采样电阻阻值可计算出电磁阀通电保持阶段电流约为 0.75 A,符合实际情况。据图 11 可知,箭上电磁阀数据采集系统硬件对电磁阀电流进行了正确的采集。系统软件正确地判断了电磁阀加电断电时间,并将动作执行 500 ms 邻域范围内的数据保存并发送至上位机,实现了对电磁阀加电断电动作电流曲线的存储与发送。

其余通道结果均符合实际情况,以采集接口模块 2 的通道 3 为例,其第二次加电断电曲线如图 12 所示,系统硬件的多通道以及模块可拓展功能正常。

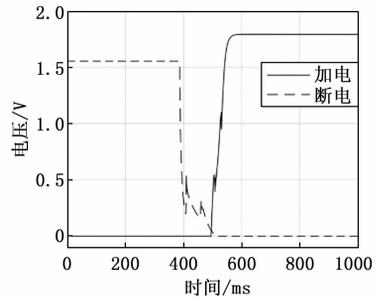


图 12 模块 2 通道 3 动作采集曲线图

5.3 故障诊断实验

使用采集接口模块 1 的 1 通道对实验阀进行数据采集。在实验阀正常状态下采集其动作电流,并由控制核心模块中的软件根据式(11)进行数据拟合。差分进化算法迭代 20 代后,迭代误差平方和趋于稳定,最终结果误差平方和为 0.231,迭代代数充分。

正常状态下根据特征值拟合出的电流如图 13 所示。

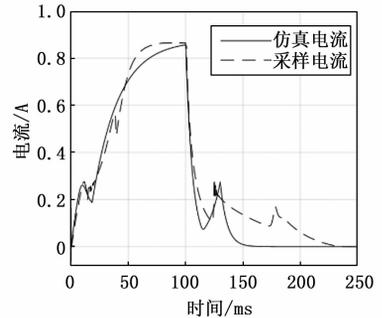


图 13 特征值拟合仿真电流图

图 13 中的仿真曲线中的关键特征点基本吻合。分别进行将电磁阀弹簧换为小刚度弹簧、更换少匝数线圈绕组、阀芯行程添加多余物进行堵塞情况下的实验,电磁阀数据采集系统反馈到上位机的环境参数如表 1 所示。

表 1 不同情况环境参数比较

| 环境参数 | 正常状态 | 弹簧刚度减半 | 线圈绕组减半 | 行程堵塞减半 |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|
| 磁路参数 C_0 /mm | 23.6 | 22.8 | 24.6 | 23.0 |
| 磁路参数 D_0 / (mH · mm) | 1 255 | 1 295 | 701 | 1 237 |
| 最大行程 x_c / (mm) | 8.0 | 7.8 | 8.2 | 5.2 |
| 回路总电阻 R / (Ω) | 32 | 32 | 32 | 32 |
| 阻尼系数 b / (Ns/m) | 35 | 28 | 33 | 31 |
| 质量系数 m / (kg) | 0.012 | 0.011 | 0.012 | 0.013 |
| 刚度系数 k / (N/m) | 213 | 133 | 227 | 235 |
| 摩擦力 F_f / (N) | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| 弹簧预紧距离 x_0 / (mm) | 3.23 | 4.11 | 3.10 | 3.19 |

由表 1 可知,弹簧刚度减半的情况下,仿真得出的磁路参数 C_0 相比正常状态有 3.4% 的偏差,磁路参数 D_0 有 3.1% 的偏差,最大行程 x_0 有 2.5% 的偏差,阻尼系数有 20% 的偏差,质量系数有 8.3% 的偏差,刚度

系数有 37.6% 的偏差, 弹簧预紧距离有 27.2% 的偏差。偏差较大且与其他实验组有较大差距的参数为刚度系数 k 、阻尼系数 b 、弹簧预紧距离 x_0 , 均与电磁阀弹簧相关, 其中刚度系数 k 与弹簧刚度系数下降直接相关。因此系统软件给出的参数可正确地帮助测试人员推断故障位置为电磁阀弹簧。

同理, 在线圈绕组减半的情况下偏差较大的环境参数为磁路参数 D_0 , 偏差为 44%, 可据此推断磁路结构发送故障; 在行程堵塞减半的情况下偏差较大的环境参数为最大行程 x_c , 偏差为 35%, 可据此推断阀芯运动发送堵塞故障。

6 结束语

本文针对运载火箭电磁阀数据采集系统进行研究, 设计了一种多通道、可拓展、高速率的电磁阀电流采集硬件设备。具备数据采集、数据存储、数据转发等硬件功能。

在硬件设计的基础上, 本文设计了搭载于硬件嵌入式控制核心模块中的软件, 实现了电磁阀通断动作数据的判断、存储与发送, 并设计了一种故障分析算法。本文根据电磁阀磁路方程与力平衡方程等机理, 建立用于电磁阀模拟的差分方程模型, 通过使用差分进化算法优化求解以环境参数为决策变量的非线性规划模型, 实现了对实际电磁阀环境参数的求解, 为故障判断与分析提供了依据。文中基于系统的软硬件及算法对电磁阀开展了数据采集与分析实验, 验证了系统的可行性。

随着运载火箭发射频率提高, 测试需求逐步上升, 为进一步提高测试速度, 数据采集系统应持续优化, 进一步智能化、轻量化, 同时对电磁阀诊断结果也应更精确化, 以实现运载火箭的快速测试与发射。

参考文献:

[1] 陈士强, 黄辉, 张青松, 等. 中国运载火箭液体动力系统发展方向研究 [J]. 宇航总体技术, 2020, 4 (2): 1-12.

[2] 丁秀峰, 余延生, 陈中强, 等. 长征六号丙运载火箭特点及技术创新 [J]. 上海航天 (中英文), 2024, 41 (5): 24-34.

[3] 杨明磊, 刘涛, 王吉星. 运载火箭辅助动力系统研制现状及发展方向 [J]. 导弹与航天运载技术, 2022, (2): 44-50.

[4] 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.

[5] 陈岩, 亓斌, 许力杰. 电磁阀原理及其限值电流的快速计算方法 [J]. 液压气动与密封, 2021, 41 (8): 94-96.

[6] 葛君超, 王利鹏. 基于小波包分解的船用柴油机燃油电

阀故障诊断方法 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45 (18): 105-108.

[7] YOO S, JUNG H J, LEE K J, et al. A convolutional autoencoder based fault diagnosis method for a hydraulic solenoid valve considering unknown faults [J]. Sensors, 2023, 23 (16): 7249-7277.

[8] 魏永国, 李波, 谢芳, 等. BIT 技术在运载火箭测试系统中的研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (4): 9-15.

[9] AXINTE T, CAZACU M, CURCA G E, et al. 3/2-Way pneumatic solenoid valves: An overview [J]. Hidraulica, 2024, (4): 60-68.

[10] 詹湘琳, 刘洪越, 荆涛. 基于小波能量熵和邻域粗糙集的电磁阀故障诊断研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (10): 13-20.

[11] 李丕茂, 张幽彤, 倪成群, 等. 共轨喷油电磁阀动态特性仿真与实验 [J]. 农业机械学报, 2013, 44 (5): 7-12.

[12] 刘洪越. 航空变量柱塞泵中开关电磁阀的故障诊断研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2023.

[13] 娄路亮, 王海洲. 电磁阀设计中电磁力的工程计算方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2007, (1): 40-45.

[14] 刘晓宇. 用于电流测量的罗氏线圈理论与应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.

[15] 包为民. 可重复使用运载火箭技术发展综述 [J]. 航空学报, 2023, 44 (23): 8-33.

[16] 董平, 顾加雨, 高佳, 等. 基于 SoC 微控制器和 NFC 身份识别共享用的智能插座设计 [J]. 计量与测试技术, 2025, 51 (1): 107-110.

[17] 戴李刚, 张明亮, 赵玲玲, 等. 基于 LwIP 协议的电磁阀采集技术研究 [J]. 上海航天 (中英文), 2020, 37 (s2): 193-196.

[18] 谢望, 兰旭东, 高飞, 等. 测发控系统前置测控软件热备冗余研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (6): 87-93.

[19] 和鹏祥, 王黎明, 李璇, 等. 基于 ZYNQ-7000 的超声波信号采集系统设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2024, (4): 3-6.

[20] DOBRESCU C C, GONZÁLEZ I, PRADO C D, et al. Direct memory Access-Based data storage for Long-Term acquisition using wearables in an Energy-Efficient manner [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2024, 24 (15): 4982-4982.

[21] JYOTIRMAYA B, KRUSHNA D B, PRIYASARSINI R. Solution of some multi-objective nonlinear programming problems [J]. Bulletin of Pure & Applied Sciences-Mathematics and Statistics, 2021, 40e (1): 70-74.

[22] 赵帅杰. 战斗机飞行人员便携式颈部肌肉锻炼系统研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2023.