

发动机电磁阀电性能综合测试系统的研制

井海明, 王昱皓, 弭艳, 李明昊, 任仲强, 张茂森

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘要: 在姿轨控动力系统调整航天器的运行姿态及轨道变换的过程中, 电磁阀扮演着极其重要的角色; 为了实现电磁阀电性能的自动化精确测试, 研制了一套电性能综合测试系统; 在硬件方面, 搭建了高性能、快响应的硬件平台; 在软件方面, 应用虚拟仪器技术进行研究, 设计了简洁高效、操作便捷的交互界面, 开发了准确性好、可靠性高的判读算法; 应用该测试系统进行动力系统电磁阀的电性能测试, 极大地提高了测试效率和测试精度; 通过多次动力系统地面试验验证, 达到了预期的设计目标, 并具有性能优异、灵活性好和可靠性高的特点。

关键词: 电磁阀; 测试系统; 虚拟仪器; 自动判读

Development of a Comprehensive Testing System for the Electrical Performance of Engine Solenoid Valves

JING Haiming, WANG Yuhao, MI Yan, LI Minghao, REN Zhongqiang, ZHANG Maosen

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: Electromagnetic valves play an extremely important role in the process of adjusting the spacecraft's operating attitude and orbit change in the attitude and orbit control power system. In order to achieve the automatic and precise testing of the electrical performance of solenoid valves, a comprehensive electrical performance testing system is developed. In terms of system hardware, build a high-performance and fast response hardware platform; In terms of system software, study a virtual instrument technology, design a simple, efficient, and user-friendly interactive interface, achieve an accurate and reliable interpretation algorithm, and apply this testing system for electrical performance testing of power system solenoid valves, greatly improving testing efficiency and accuracy. Through multiple ground tests on the power system, it is verified that the system reaches the expected design goals and has the characteristics of excellent performance, good flexibility, and high reliability.

Keywords: solenoid valve; test system; virtual instrument; automatic interpretation

0 引言

在太空中控制航天器执行变轨、调姿等任务的是姿轨控动力系统。随着我国航天事业的不断发展, 姿轨控动力系统的应用背景也越来越广泛。高可靠性、快响应、高性能是当今姿轨控动力系统主要的技术发展趋势^[1]。作为姿轨控动力系统的关键器件, 电磁阀的性能特性是影响发动机响应能力及变轨、调姿准确性的重要因素之一。严格来说, 电磁阀的性能及可靠性在一定程度上决定着发动机工作的成败^[2-3]。因此, 在姿轨控动力系统的研制中, 准确获取电磁阀在工作机制下的特

性参数具有十分重要的现实意义。

欧美、日本等工业强国的微电子技术及嵌入式设备的发展起步较早, 因此在电磁阀测试技术方面也一直处于领先地位。凭借着通信、控制和信号处理等多学科理论的先进发展, 国外的电磁阀测试系统基本上已经实现了集成化、自动化和便携化^[4-6]。虽然国外产品处于国际先进水平, 但其价格相对来说也是十分昂贵的。相比于国外来说, 我国对电磁阀的研究起步较晚, 这就使得国内电磁阀测试系统的研制水平整体不高。最早期的电磁阀测试工作主要以手动操作为主^[7-8], 这种方法存在灵活性差、测试误差大的缺点。目前来说, 有些系统依

收稿日期: 2024-08-08; 修回日期: 2024-10-09。

作者简介: 井海明(1990-), 男, 硕士, 工程师。

通讯作者: 弭艳(1988-), 女, 硕士, 研究员。

引用格式: 井海明, 王昱皓, 弭艳, 等. 发动机电磁阀电性能综合测试系统的研制[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10): 1-6, 29.

然全部使用硬件电子电路来进行测试,甚至也存在半手工半自动化的测试方式。除此之外,虽然有些系统实现了电磁阀测试的自动化,但也存在着功能单一、可靠性低与测试精度不高的缺点。但随着我国综合国力的不断提高,各学科理论的不断完善与发展,国内的电磁阀测试系统也正处于蓬勃发展的历史浪潮中。

为了提高电磁阀性能测试的测试效率与测试精度,本文基于虚拟仪器技术,研制了一套电磁阀电性能综合测试系统。在软件方面,使用 LabVIEW 进行交互界面的设计与程序框图的编程;在硬件方面,搭建了一套高性能、高可靠性的测试平台。电性能综合测试系统可以实现手动或时序控制电磁阀工作、电磁阀电流特性曲线采集、智能判读电磁阀电性能参数等多项功能,极大地提高了电性能测试的可靠性及工作效率。同时,对于保障姿轨控动力系统的成功研制具有一定的现实意义。

1 系统总体设计

从电磁阀电性能综合测试系统的功能需求出发,本文主要从硬件设计和软件开发两个方面来进行系统的研制。对地面测试设备来说,除了要求高可靠性之外,还应具备强大的计算处理能力,以便于高效、灵活地完成各项测试任务。因此,在设计硬件平台时,应根据测试系统的技术指标和电磁阀信号的特点来合理地搭建系统结构^[9],兼顾系统的测试精度、测试速度和可靠性。在软件方面,首先应为操作者提供简洁、友好的人机交互界面,降低测试系统的上手难度;其次是开发可靠、高效的判读算法,在保证系统稳定运行的同时,提高自动判读的效率和精度。此外,应充分发挥模块化的编程思想,易于程序移植和后续开发。

电磁阀电性能综合测试系统基于虚拟仪器技术进行研制,主要分为待测信号模块、电源模块、信号调理模块、控制模块、数据采集模块以及显示与处理分析模块。待测信号模块就是某型姿轨控动力系统,信号来源主要有两个:一个是电磁阀电流特性曲线,另一个是压力传感器的遥测信号。信号调理模块主要是对待测信号进行转换、隔离等处理以便于符合数据采集器的输入要求。电源模块为整个系统提供多种供电电源,控制模块主要是实现控制电磁阀的开闭。数据采集模块来完成待测信号的采集,然后交由上位机来进行传感器遥测信号、电磁阀电流特性曲线的显示与分析。系统总体设计方案如图 1 所示。

2 硬件设计

动力系统电性能综合测试系统主要实现遥测传感器特性数据、时序或手动控制发动机电磁阀工作、电磁阀电流特性曲线采集、智能判读发动机电磁阀电性能参数与自动生成电性能报表等多项功能。系统硬件主要由脉

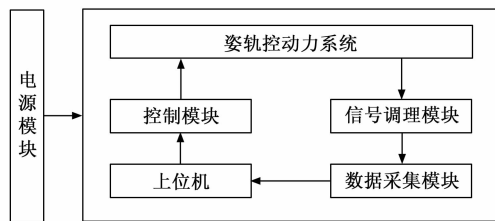


图 1 系统总体设计方案

冲控制器、嵌入式数据采集器、光耦控制器、直流电源、测试电缆、工控机、移动测试台及附件等部分组成,系统硬件方案如图 2 所示。

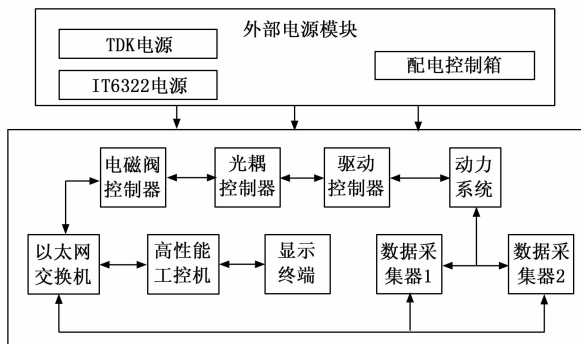


图 2 系统硬件设计方案

外部电源模块包括 TDK 电源、IT6322 电源和配电控制箱,主要是为其它设备提供多种供电电压;脉冲控制器根据上位机输入的控制字指令来输出控制信号;光耦控制器实现控制信号的隔离,降低电路间的相互干扰和系统间的耦合;驱动控制器直接控制动力系统电磁阀的打开与关闭,完成对各个电磁阀高精度、快响应的控制;数据采集器对电磁阀电流特性曲线进行高精度采集;以太网交换机实现各设备与工控机之间的数据交换;在显示终端上完成电磁阀电流特性曲线的可视化研究。

2.1 脉冲控制器

脉冲控制器是本系统中的核心器件,主要完成物理硬件上的数字量传输控制。为了提高系统性能、灵活性与可扩展性,本脉冲控制器基于 Xilinx Zynq 完全可编程片上系统 (SoC) 进行开发,操作系统选择 Linux® Real Time,其不仅具有实时操作系统的优势,还兼具有 Linux 的开放性与稳定性。脉冲控制器的主控处理器完成所有分模块与上位机的通信以及各个分模块之间的时序控制。虽然是上位机完成整个控制逻辑,但对于复杂或实时性高的控制逻辑,也可通过将参数及步骤下发至下位机后由下位机上的实时操作系统完成。脉冲控制器的 SoC 选择 Zynq-7020,其拥有一个 667 MHz 双核 ARM Cortex-A9 处理器和 Artix-7 FPGA,使用 512 M SLC NAND FLASH 作为硬盘存储空间,使用 512 M

DDR3 DRAM 作为运行内存。此 SoC 的 ARM 处理器与 FPGA 之间有 16 个 DMA 通道可以确保 FPGA 获得的数据实时、高效地上传至嵌入式主控中。此外, 核心处理器拥有 160 个可编程高速 DIO, 每个 DIO 的速率最高到 20 MHz, 通过 FPGA 编程实现脉冲控制信号的输出。与上位机的通信则直接采用 ZYNQ 自带的千兆以太网。硬件设计方案如图 3 所示。

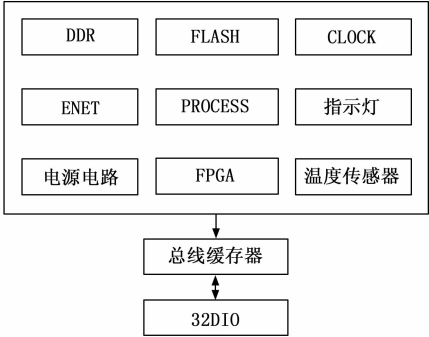


图 3 脉冲控制器结构图

2.2 驱动控制电路

驱动控制器的设计在很大程度上决定了发动机电磁阀吸合与释放的速度。为了保证动力系统具备快速启动、关闭的响应能力, 本系统设计了一种驱动能力强、开关速度快、可靠性高的电磁阀驱动控制电路。该电路使用 MOSFET 作为开关功率器件, 其具有输入阻抗高、功率增益高、开关速度快、无二次击穿现象和安全工作区域宽等优势^[10], 在驱动电路里能够加快发动机电磁阀吸合与释放的速度。

根据电磁阀工作特性可知, 电磁阀开启的响应时间包括衔铁运动时间以及电磁铁电流上升时间, 电磁阀关闭的响应时间包括衔铁复位时间以及电磁铁电流下降时间。由于电磁阀的元件特性, 当电磁阀关断时, 电磁铁两端将产生反向电动势, 以阻碍电流原有大小和方向的变化, 从而影响电磁阀开闭的响应时间^[11-12]。为了提高发动机电磁阀的响应速度和电路可靠性, 必须消除电路中的反向电动势。本文采用功率 MOSFET 和 TVS 瞬态抑制二极管来设计驱动控制电路, 电路原理如图 4 所示。

在图 4 中, D_1 为 TVS 瞬态抑制二极管 SMDJ18AS, 将其反向串接在续流回路上, 此时 TVS 瞬态抑制二极管反向起到了续流二极管的作用。当电磁阀关闭的控制信号产生时, 电磁阀的线圈产生反向电动势, TVS 呈现高阻态使得反向电动势瞬间提高; 当反向电动势击穿 TVS 的 Zener 结时, TVS 二极管导通, 电磁阀线圈内的能量快速释放; 当大部分能量释放完成后, 反向电动势小于 TVS 管的击穿电压, TVS 管恢复到高阻态状态, 电磁阀内剩余电流被快速减弱, 电磁阀迅速关断。因此, 本文设计的驱动控制电路能够在关断电磁阀时快速消除反向

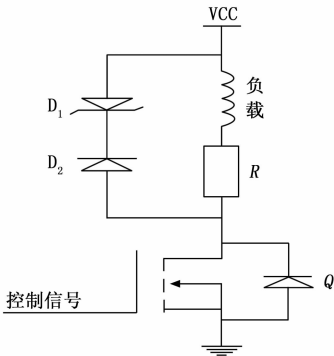


图 4 驱动控制电路原理图

电动势, 提高电磁阀的响应能力。

2.3 数据采集器

高精度、高性能与高可靠性的数据采集器是测试系统实现自动判读电磁阀电性能参数的关键设备。采集的电磁阀电流曲线越接近真实曲线, 判读出的电性能参数就会更准确。本系统选择某公司的 MX1601B 数据采集器, 共有 20 路的采集通道, 自带以太网通信接口, 满足本动力系统测试需求。每个通道均为 24 位的 A/D 转换器, 可实现同步并行采集。单个通道采样频率最高可达 20 kHz, 信号带宽为 6 667 Hz, 配备线性相位的有源低通滤波器。数据采集器的电气结构如图 5 所示。

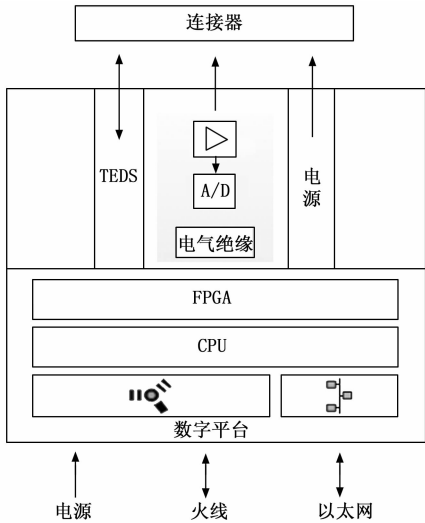


图 5 数据采集器电气结构图

3 软件设计

本测试系统的软件开发采用模块化、层次化的编程思想, 基于 NI 公司的 LabVIEW 开发环境进行设计。LabVIEW 是一款图形化编程的开发平台^[13-14], 其内部集成了与 VXI、RS-232、RS-485 和 GPIB 等接口通信的硬件功能, 并内置了 ActiveX、TCP/IP 等标准的库函数, 可灵活高效地进行软件设计。根据测试仪功能需求分析, 本系统软件主要分为 4 个模块, 包括自动控制模

块、系统设置模块、可视化分析模块、自动判读与存储模块。系统软件总体结构如图 6 所示。

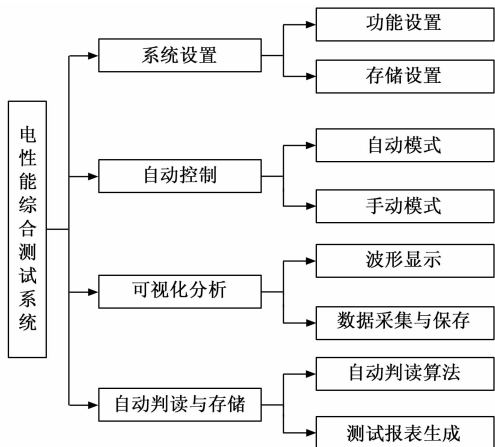


图 6 软件总体方案图

自动控制模块主要是实现电磁阀的自动控制；系统设置模块是关于存储文件、测试功能、测试参数等相关设置；可视化分析模块包括电磁阀电流特性曲线的采集和波形图像的显示与分析；自动判读与存储模块包括电流特性曲线的特征点提取与数据计算，判读结果的储存与自动化报表的生成。

3.1 电磁阀控制软件

电磁阀的控制模式包括手动模式和自动模式两种，手动模式是针对每个通道进行电动控制，自动模式是通过预先加载的自定义时序文件来执行电磁阀的自动控制，并可以对长工况和脉冲工况进行精准的定时控制。在点动控制界面中，共提供了 17 个通道按钮，分别对应控制脉冲控制器的相应控制电路。工作人员通过点击通道按钮即可控制各通道的电平输出状态，从而手动控制电磁阀的开闭。在自动控制模式下，预先编写 excel 时序文件，并将其载入到软件中，在时序窗口可以预览程序，检查无误后点击程序发控按钮即可进行电磁阀的自动测试。电磁阀控制软件自动模式的主界面如图 7 所示。

根据以上两种电磁阀控制模式的功能需求，分别进行程序框图的编程。手动控制子模块的程序框图主要由循环结构与事件结构组成，可以最大限度地降低 CPU 的利用率^[15]。通过循环检测手动控制界面的事件响应来识别手动输入的电磁阀控制信号，从而将控制信号发送至脉冲控制器，由脉冲控制器来实现电磁阀的打开与关闭。

自动控制子模块实现了自定义时序文件的导入与识别、控制信号传递与输出等功能。子模块充分利用局部变量与全局变量的特点，通过循环侦听自动控制界面的操作事件来触发时序文件的解析。首先遍历出时序文件

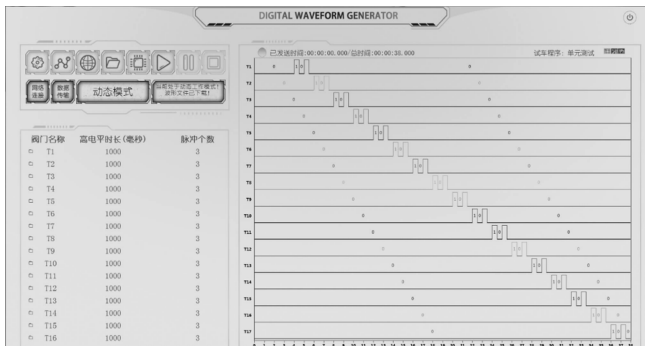


图 7 控制软件主界面

中的通道号、电平状态和持续时间等信息，从而通过计算得到本次测试的指令字集，再将信息存入簇中。与此同时，循环侦听主界面的“开始”事件，依据簇中的时序信息来触发脉冲控制器的输出，完成电磁阀的自动控制测试。自动控制器子模块的程序流程如图 8 所示。

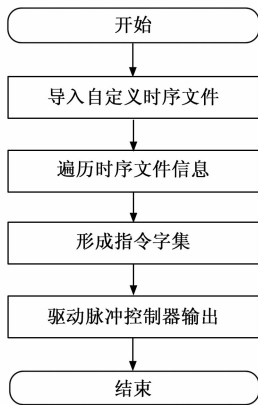


图 8 自动控制程序流程图

3.2 采集与分析软件

3.2.1 系统配置

系统配置主要包括存储设置、挑点设置和显示设置三部分内容。在存储设置中，可以选择不连续存储或连续存储，并设置文件存储的默认路径与文件名；在挑点设置中，具有不挑点、自动挑点、手动挑点 3 种模式，并设置相应的数据挑点时间和数据报表模版；在显示设置中，可以修改波形显示页面默认的波形图数量以及关注参数的个数。

在通道配置中，除了可以选择是否开启某个通道外，还可以进行通道名、采样频率、单位、斜率和截距等详细参数的配置。采样频率提供 100 Hz、200 Hz、500 Hz、1 kHz、2 kHz、5 kHz、10 kHz、20 kHz、40 kHz 等 9 个选项，设定后会更改所有通道的采样频率。斜率和截距为物理采集通道的换算参数， $Y=aX+b$ ， Y 表示物理量， X 表示实际的采集电压， a 、 b 的具体数值可通过传感器标定手册或传感器定期校准参数来获取。

3.2.2 可视化分析

可视化分析模块主要包括电磁阀电流数据采集、波形显示和数据保存等功能。可视化分析的前面板主要由输入控件、波形显示控件以及其它输出显示控件组成，包括工具栏区、波形显示区、数据显示区等部分，如图 9 所示。数据采集和数据保存功能通过工具栏的按钮触发，波形显示的通道数量可以自行调整。

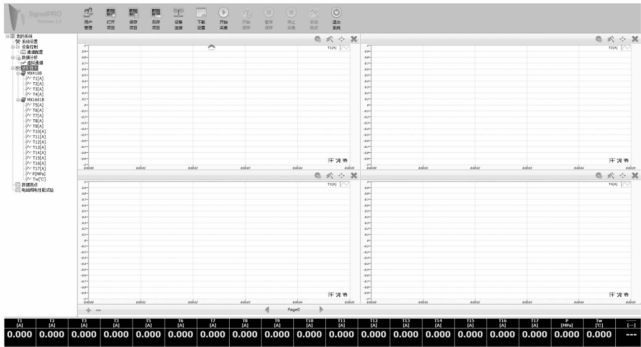


图 9 可视化分析界面

在实现可视化分析功能之前，首先要进行数据采集卡与工控机软件的通信。由于本系统使用的数据采集卡不是 NI 公司的产品，因此需要开发对应的驱动程序来实现数据采集卡与系统软件的通信。

通过对各种技术方案的对比，本软件选择使用动态链接库（DLL）的方式来驱动数据采集卡。DLL 文件并不是存在于应用程序的可执行文件中，仅是在执行程序的时候，库函数代码才会被装载进内存中^[16-17]。当多个程序共同调用一个 DLL 文件时，系统内存中也只存在一个 DLL 文件副本。因此，动态链接库不仅能够降低内存使用率，还可以提高系统软件的运行效率^[18-19]。调用动态链接库函数是通过 Call Library Function（CLF）节点模块实现的。在 CLF 节点的配置中，需要进一步明确 DLL 文件的调用规范、存在路径、输出函数名称以及 API 函数的运行方式、输入参数设定、返回值类型等多个配置项。动态链接库配置完成后，即可通过交互界面控制数据采集卡进行电磁阀电流特性曲线的采集。

使用 API 函数将数据采集卡得到的数据上传至中间数组，加载到波形显示子模块进行电磁阀电流特性曲线的实时显示。波形显示子模块使用到了趋势图、属性节点、While 循环结构等，控件的更新模式选择 Strip Chart，将当前显示时间转换成自零点开始的秒数作为实时曲线的起点，并将 X 轴显示格式设定为相对时间。此外，通过波形测量 VI 可以获取电磁阀电流特性曲线的振幅大小。在测试过程中，通过观察曲线形状以及振幅数据可以初步判断电磁阀的状态。通过循环侦听主界面的操作事件，开启数据保存功能之后，系统将在另一

个线程中进行测试数据的保存。根据功能需求进行分析，本软件采用 TDMS 文件来保存波形的动态数据。TDMS 文件的相关函数均为普通 VI 的形式，但它的属性值是用变量类型来表示的，由此可以将属性值直接作为输入。数据采集、波形显示与保存的程序流程如图 10 所示。

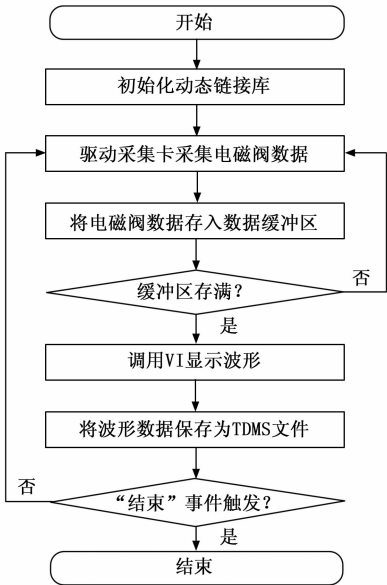


图 10 可视化分析程序流程图

3.2.3 自动判读与储存

自动判读界面主要由波形图和判读参数表组成，波形图部分可以任意设置波形通道，参数判读则跟随着所设置通道。在主界面中，每次只能判读一个通道，默认为显示区的第一个波形图，而在生成的报表中，包括所有通道的判读数据。

本系统自动判读的指标主要包括最大电流、触发电流、吸合时间和释放时间，这些指标可以全面地展现发动机系统电磁阀的状态与性能。实现自动判读算法的关键是提取出电磁阀电流特性曲线中的特征点^[20]，如图 11 所示。A 点是电流波形开始上升时的零稳态点，开始对电磁阀进行加电。由于线圈与阀芯之间的相互作用，电流在上升期间于 B 点会有一次小跳变，电磁阀开始启动。跳变至 C 点标志着电磁阀吸合完成，而后电磁阀趋于阻态，电流逐渐稳定。同样地，E 点为波形下降的初始点，F 点标志着电磁阀释放完毕。由图可知， I_B 为电磁阀的触发电流， t_1 为吸合时间， t_2 为释放时间。通过提取电磁阀电流曲线中的特征点即可计算出各通道特征参数，并依此生成电性能测试报表。

在提取特征点之前，首先需要进行信号的滤波、拟合等过程，从而最大程度上降低图形数字化和噪声干扰的影响。通过波形测量相关 VI 求出曲线最大值，即可得到最大电流。系统在 A 点之前就已经开始采集，但

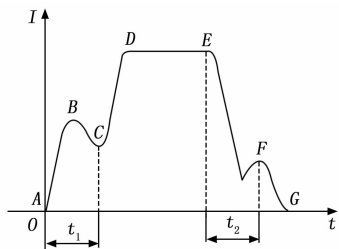


图 11 电磁阀特性曲线

由于噪声的干扰，A 点之前的数据在 0 附近波动，因此并不能根据零点来确定 A 点位置。本系统通过多次测试设定一个大于噪声干扰的阈值，当曲线超过阈值后，表明特征曲线开始进入上升阶段。但在阈值点处曲线已经进入上升状态，因此需要从阈值点处向前搜索 x 个点， x 由多次试验测试确定，由此即可计算出 A 点。根据电磁阀特性曲线的特征，B 点、C 点和 F 点可由角检测法计算得出。通过逐一计算 A-D、E-G 曲线上每个点的曲率，依据各特征点的特征即可得到 B 点、C 点和 F 点的位置，由此得到电磁阀的触动电流、吸合时间和释放时间。由于本系统是专用设备，特性曲线的几何形状和特征点特征鲜明。通过多次试验测试，此特征点提取算法稳定性高、准确性好。

自动判读完成后，即可根据预先设计的 excel 模版来生成电性能测试报表。报表展示项目包括各传感器测量值、各通道最大电流、触动电流、吸合时间和释放时间等指标，还会根据测试要求进行是否合格的判断。

4 试验结果与分析

在完成电磁阀电性能综合测试系统的硬件设计与软件开发后，即可进行整机系统的集成调试。为了验证本文所设计的电磁阀电性能综合测试系统的实际应用性能，在某型号姿轨控动力系统的地面测试中开展了试验验证。

4.1 试验设备及流程

4.1.1 试验设备

试验所用到的设备或仪器包括某姿轨控动力系统、电性能综合测试系统、测试电缆、绝缘表以及万用表等。系统集成试验主要包括通信测试与功能测试。本次试验共测试 17 个电磁阀，分别对应测试系统的 17 个通道。通过对待测系统各路电磁阀进行时序或手动发控、电磁阀电流特性曲线进行采集、自动判读特性数据等项目来全面验证电性能综合测试系统的功能、性能和精度。

4.1.2 试验流程

首先将电磁阀电性能综合测试系统通过测试电缆与待测系统相连，使用兆欧表进行绝缘测试，绝缘合格后即可给测试系统上电。通过控制软件对各通道电磁阀依次进行动作，使用采集与分析软件采集电磁阀电流特性

曲线，并存储数据。在软件中导入测试数据，使用自动判读功能对数据进行分析计算，并生成电性能测试报表。与此同时，将本次试验数据导入国外某数据处理软件，通过人工判读的方式得到另一组测试结果。将电磁阀电性能综合测试系统的试验结果与人工判读的测试结果进行逐个对比分析，即可验证电性能综合测试系统的各项指标。

4.2 结果与分析

试验完成后，将电磁阀电性能综合测试系统发布的电性能测试报表与人工判读的测试结果进行汇总整理，以便于直观地对比两种方法的数据差异。试验数据汇总表见表 1。

表 1 试验数据表

系统判读					人工判读				
通道	最大 电流 /A	触动 电流 /A	吸合 时间 /ms	释放 时间 /ms	通道	最大 电流 /A	触动 电流 /A	吸合 时间 /ms	释放 时间 /ms
1	1.408	0.406	7.4	12.6	1	1.405	0.403	7.4	12.5
2	1.405	0.402	7.6	12.7	2	1.407	0.401	7.5	12.7
3	1.411	0.404	7.4	12.6	3	1.409	0.409	7.4	12.7
4	1.413	0.407	7.6	12.5	4	1.414	0.402	7.6	12.5
5	1.419	0.412	7.4	12.3	5	1.424	0.417	7.3	12.4
6	1.415	0.415	7.4	12.4	6	1.419	0.421	7.4	12.3
7	1.417	0.413	7.4	12.4	7	1.416	0.409	7.4	12.3
8	1.416	0.416	7.3	12.4	8	1.411	0.412	7.4	12.5
9	1.416	0.414	7.3	12.3	9	1.413	0.413	7.3	12.3
10	1.413	0.415	7.4	12.5	10	1.409	0.410	7.4	12.5
11	1.422	0.421	7.1	12.3	11	1.420	0.418	7.2	12.4
12	1.426	0.420	7.2	12.2	12	1.421	0.416	7.2	12.2
13	1.432	0.422	7.3	12.1	13	1.436	0.419	7.4	12.2
14	1.436	0.424	7.1	12.1	14	1.433	0.428	7.1	12.1
15	1.425	0.426	7.4	12.2	15	1.421	0.421	7.5	12.3
16	1.426	0.427	7.0	12.3	16	1.431	0.428	7.1	12.3
17	1.424	0.422	7.3	12.3	17	1.419	0.431	7.9	12.4

本次试验的顺利进行验证了电磁阀电性能综合测试系统的通信功能、控制功能与采集功能。通过对试验数据进行分析可知，电性能综合测试系统的自动判读精度很高，基本上与人工判读的测试数据保持一致。综上所述，本次试验全面验证了电性能测试系统的功能、性能和精度，可以应用于姿轨控动力系统的地面测试。

5 结束语

本文从实际应用需求出发，研制了一套电磁阀电性能综合测试系统，可用于姿轨控动力系统电磁阀的电性能自动化测试。并分别从硬件设计与软件开发两个方面详细讲解了系统的设计方案与研制过程。最后，通过试验验证了电性能综合测试系统的功能、性能和精度。自

(下转第 29 页)