

一种电磁阀智能测试系统

郝贵欣, 周 吉, 张 华

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 分析了电磁阀特性测试现状和不足, 提出了电磁阀特性智能测试的技术方案、测试原理、关键技术及解决方案。利用所研制的电磁阀智能测试系统对某典型电磁阀特性进行了测试验证, 表明该系统具有自动控制、智能判读和测试精度高等特点, 并满足技术指标要求。

关键词: 电磁阀; 特性测试; 测试系统

中图分类号: V434⁺.3-33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 05-0092-06

Intelligent testing system for solenoid valve

HAO Gui-xin, ZHOU Ji, ZHANG Hua

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on the analysis of solenoid valve testing status and weaknesses, the technical plan, testing principle, key technologies and solutions of intelligent testing for solenoid valve characteristics are proposed in this paper. The characteristics of a typical solenoid valve were tested with the self-developed intelligent testing system for solenoid valve. The testing result demonstrates that the system has features of automatic control, intelligent interpretation and high testing precision, and can satisfy the requirement of technical specifications.

Keywords: solenoid valve; characteristic testing; testing system

0 引言

电磁阀是液体火箭发动机重要组件之一, 用于控制发动机的工作和关机。电磁阀的特性对发动机工作状态有着重要影响。因此, 要求对电磁阀吸合电压、释放电流和响应时间特性进行准确测量。本文分析了现有电磁阀特性测试方法存在

的不足, 提出了电磁阀特性智能测试的技术方案、测试原理、关键技术及解决方案。

1 电磁阀特性及测试技术现状

1.1 电磁阀结构及工作原理简介

某典型电磁阀, 其结构见图 1 所示, 主要由阀体、阀芯、弹簧和线圈等组成。工作原理是:

收稿日期: 2013-02-25; 修回日期: 2013-06-07

作者简介: 郝贵欣 (1977—), 男, 工程师, 研究领域为非标设备开发与设计

阀门未工作时, 阀芯受弹簧力和介质压力的共同作用与阀座紧密贴合, 阻挡介质的流动。启动过程中, 当线圈通电后, 线圈产生电磁力, 电磁力随着线圈内电流增加而迅速增大, 当电磁力足以克服弹簧力和介质的压力时, 阀芯被吸合, 阀门打开, 开始供给介质。关闭过程中, 当线圈断电后, 电磁力消失, 弹簧力和介质压力共同作用使阀芯复位与阀座贴合, 阻断介质流动。

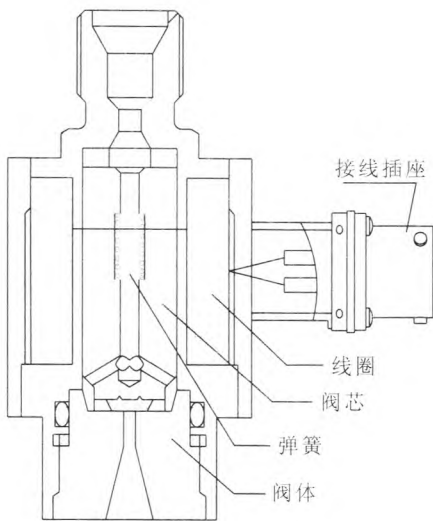


图 1 电磁阀结构简图

Fig. 1 Structure of solenoid valve

1.2 电磁阀特性

电磁阀励磁线圈通电后, 线圈的负载电流按指数规律从零开始增加, 阀芯所受到的电磁吸力也相应增大。当电磁吸力增大升至足以克服负载力时, 阀芯开始运动, 并切割磁力线产生很强的反电势, 使电流急剧下降, 直至阀芯完全吸合。之后, 电流按指数规律继续增至稳态。在电磁阀的工作过程中, 阀芯的释放过程与其吸合过程相似。通过这种机电耦合的关系, 可以把电磁阀内部的机械运动与电流变化情况相关联, 监测励磁线圈上加载的电流在时域上变化的情况, 可获得电磁阀动作时的电流曲线, 如图 2 所示。

表征电磁阀特性的技术指标包括吸合电压、释放电流及响应时间等。其中, 响应时间由吸合时间和释放时间组成, 吸合时间 T_{sh} 和释放时间 T_{sf} 主要用于衡量电磁阀打开和关闭快速性。

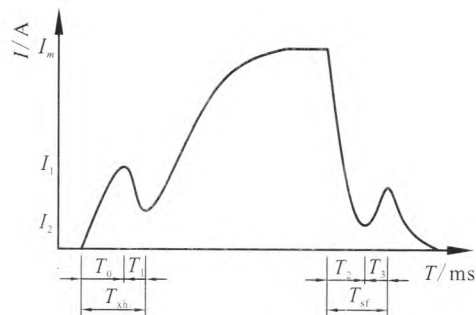


图 2 电磁阀线圈典型电流曲线

Fig. 2 Typical current curve of solenoid valve coil

1.3 现有电磁阀特性测试方法及不足

现有电磁阀特性测试采用电磁阀吸合释放测试仪或电磁阀综合测试仪进行测试。响应时间测试过程是借助专用控制器产生周期性脉冲波形, 再借助光线示波器或其他专用记录仪记录电磁阀的电流变化曲线, 实时打印或存储曲线, 通过目视观察曲线, 判读曲线数据。吸合电压、释放电流测试过程是手动调整滑线变阻器, 缓慢给电磁阀两侧提升电压, 当听见电磁阀阀芯动作的声音时, 目视观察电压仪表或电流仪表, 判读仪表数据。现有测试方法存在以下不足:

- 1) 实现自动化测试比较困难;
- 2) 测试过程中人为误差不可避免;
- 3) 无法对测试得到的数据曲线进行多功能的分析和统一管理。

2 电磁阀特性智能测试原理及关键技术

2.1 测试原理

电磁阀特性智能测试系统原理如图 3 所示。将电磁阀连接到系统上, 然后自动缓慢给电磁阀提升电压, 控制台内的计算机实时采集、分析电流传感器和电压传感器传来的电流和电压数据, 并且与预定的电压增长速率进行比对, 实时输出计算得到的 PID 参数给电压输出控制器, 以使电压增长速率与预定值吻合, 同时, 实时绘制电流曲线, 存储电流曲线数据, 并对电流曲线数据自动分析, 获得各指标数据。

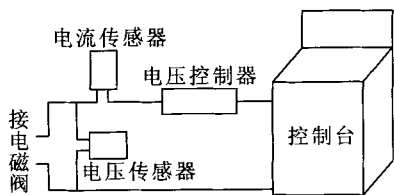


图 3 测试系统原理图

Fig. 3 Principle diagram of testing system

2.2 关键技术及解决方案

2.2.1 缓慢升、降压的控制

电磁阀吸合电压、释放电流测试时，要求对电磁阀进行缓慢升压、降压控制，升压与降压速

率直接影响电磁阀的吸合电压和释放电流数据，保证这 2 个速率是保证测量数据准确性的关键。

目前，能够供给连续可调模拟信号的设备有变阻类、编码类和程控类 3 类，其优缺点对比见表 1。考虑到电磁阀的吸合电压、释放电流试验要求电压缓慢升降，响应时间试验要求电压突升突降，并考虑到系统的整体自动化控制程度，最终选择了程控类的控制设备，即程控电源。电源的输出信号完全计算机程序控制。在电压升、降控制程序中，运用当前工业控制应用最广泛的 PID 控制方式，实时计算 P，I，D 这 3 个参数，实现对电源电压的实时闭环调整控制。

表 1 3 类设备优缺点对比表

Tab. 1 Contrast of advantages and disadvantages of three types of equipment

类别	基本原理	优点	缺点
变阻类	主要依靠改变阻值分压来改变输出信号	结构简单、价格低廉	精度差,手动控制
编码类	主要依靠旋转编码器动态改变输出信号	精度很高	一般为手动操作,信号跳变大
程控类	主要依靠电子元件动态生成输出信号	精度比较高	控制程序开发复杂

2.2.2 数据分析处理的智能算法

在电磁阀特性测试过程中，输入计算机上的采集数据量非常庞大，对海量的数据进行自动查找、判断、分析，并给出试验结果也是关键技术之一。电磁阀的电流信号是模拟信号，必须经离散化处理才能输入给计算机。因此，计算机采集的电流数据必然存在微小波动，在电流曲线上表现为很小的毛刺，这些毛刺的存在就是影响分析难度和结果精度的直接因素。

自动分析算法采用将电流曲线划分为多个段，每一段的长度可变，迭代计算每段的波峰和波谷的差值，将此差值绘制成差值曲线。分析差值曲线的波峰或波谷，即可获得电磁阀打开或关闭的电流值。

3 电磁阀智能测试系统的组成及实现方法

3.1 系统组成及工作原理

智能测试系统由计算机部分和测控电路部分组成。计算机部分是系统的测控中心，所有的智能操作均由计算机内的测控软件发出。测控电路部分是测控系统的基础保障，包括程控电源、逻辑控制阵列、数采模块、传感器和辅助电路等，主要负责电源供给、逻辑控制和数据采集等任务。计算机内的测控软件采用 LabVIEW 8.6 作为开发平台，主要组成为：界面模块（负责窗口调用）、试验控制模块（负责试验过程控制方式）、型号管理模块（负责不同产品试验参数和控制方

式)和数据回放模块(负责试验曲线再现)。

智能测试系统工作原理如图 4 所示。系统工作时,传感器将电磁阀的电压和电流数据传送到数采模块,数采模块把数据经采集板卡送入计算机,交付给控制软件处理,控制软件将数据输出到屏幕,再根据判断处理后的数据,控制软件自动发出控制指令,控制切换开关的开启或关闭,控制程控电源的 PID 参数,调整电磁阀的升压或降压变化速率,使电磁阀的电压升高或降低速度按照预定的设置进行。电磁阀的电流数据以曲线形式显示出来,通过软件的自动分析、判断,得出电磁阀的特性数据。

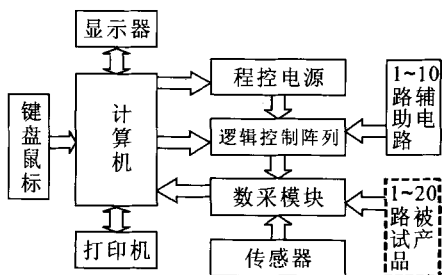


图 4 系统工作原理示意图

Fig. 4 Working principle of system

3.2 电压缓慢升、降的闭环控制

本系统采用控制精度高的程序控制电源实电压缓慢升降控制,精度可达到 0.01 V,测控软件对程控电源的控制过程采用了数字 PID 增量式控制方式。数字 PID 增量式控制以采样时刻的偏差计算控制量与上一时刻控制量的累加,并输出到程控电源的执行元件,从而调节工作电压趋近给定值,满足控制精度要求,如图 5。PID 增量 Δu 按以下公式计算:

$$\Delta u = Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2)$$

式中: $A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right)$, $B = K_p \left(1 + 2\frac{T_d}{T} \right)$, $C = K_p \frac{T_d}{T}$, 它们都是与采样周期 T 、增益 K_p 、积分时间常数 T_i 及微分时间常数 T_d 有关的系数; $e(k)$ 为当前偏差; $e(k-1)$ 为上次偏差; $e(k-2)$ 为上两次偏差。

PID 参数的整定是指对 K_p , K_i , K_d 的整定,这是实现 PID 控制的关键环节,也是一项十分困

难的工作。由于测试系统和控制元件没有数学模型,因此通过理论计算难以确定 PID 参数。只有通过经验取值预设,然后再根据实际的闭环运行结果,采集分析大量测试数据,观察系统的升压、降压曲线,不断手工修正 PID 参数,最终达到满意的闭环控制结果。

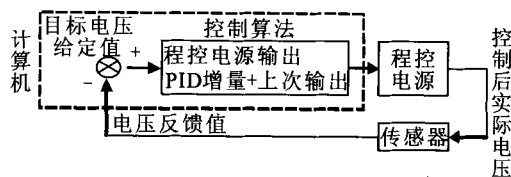


图 5 程控电源控制原理框图

Fig. 5 Controlling principle of programmable power supply

3.3 自动数据分析的算法

自动数据分析详细算法比较复杂,以下仅以响应时间测试的电流曲线为例,简要说明分析原理。电流曲线简图如图 6 所示。

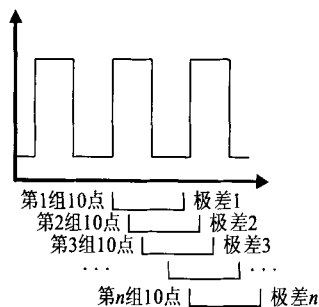


图 6 电流曲线简图及分区方法

Fig. 6 Current curve and its partition method

从曲线上看,具有很明显的周期性,由 3 个相同周期的波形组成,每个波形都有上升和下降过程,因此整条曲线可以划分为 6 条曲线,其中上升曲线 3 条,下降曲线 3 条。上升曲线和下降曲线的分析方法基本相同,均需要确定一个起点和一个极点。对于上升曲线,起点是上升开始前的最后一个值为零的点,极点是上升过程中电流突降的最低点。起点的查找方法采用从左向右逐点比较法。极点的查找方法是以每 10 个点为一区间,步长为 1,采用从左向右区间迭代查找法,先计算出每区间的极差值(极大值与极小值之差),再计算出所有区间的最大极差值,这就是升压曲线的极值。下降曲线的起点和极点查找方

法类似。取得起点和极点后,两者时间轴差值除以采样率,就是电磁阀的吸合时间,释放时间计算方法原理相同。

4 试验验证

依据以上技术方案,研制电磁阀智能测试系统,并对某典型电磁阀吸合电压、释放电流和响应时间进行测试验证。电磁阀的特性指标如下:

吸合电压: $U_t \leq 18.6 [1 + 0.00395(t - 20)]$, U_t 为环境温度 t 时的吸合电压, V; t 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$;

释放电流: 不小于 62 mA;

响应时间: 吸合时间均值应不大于 30 ms;

释放时间均值应不大于 37 ms;

测试精度: 系统各项指标测试精度不低于 0.75%。

4.1 吸合电压、释放电流测试

图 7 是某典型电磁阀吸合电压、释放电流测试曲线。图 7(a) 是测试全过程的电压曲线和电流曲线, 图 7(b) 是在图 7(a) 的基础上, 经系统自动分析、处理后得出的曲线图。将系统自动分析结果与采用超高精度示波器 (安捷伦示波器, 带宽 63 GHz, 采样率 160 GS/s, 测得的结果进行对比: 吸合电压相差最大 0.15 V, 释放电流相差最大 3 mA。对比可知, 吸合电压测试精度高于 0.510%, 释放电流测试精度高于 0.509%, 满足技术指标要求。

4.2 响应时间测试

图 8 是某典型电磁阀响应时间测试曲线。

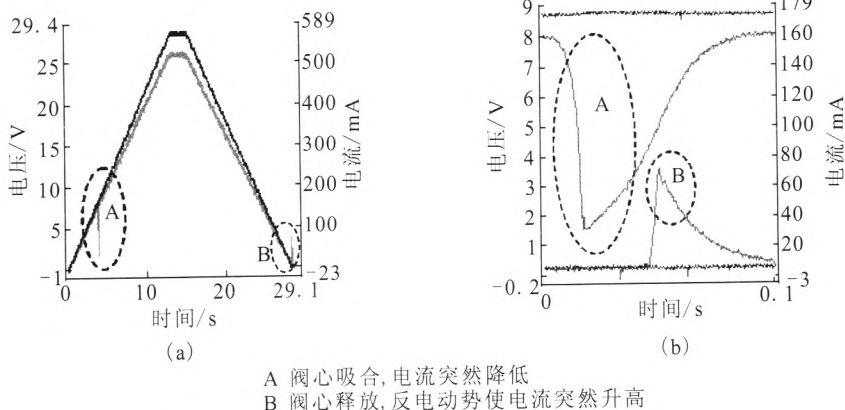


图 7 电磁阀吸合电压、释放电流试验典型电压和电流曲线

Fig. 7 Typical voltage and current curves of pull-in voltage and release current test for solenoid valve

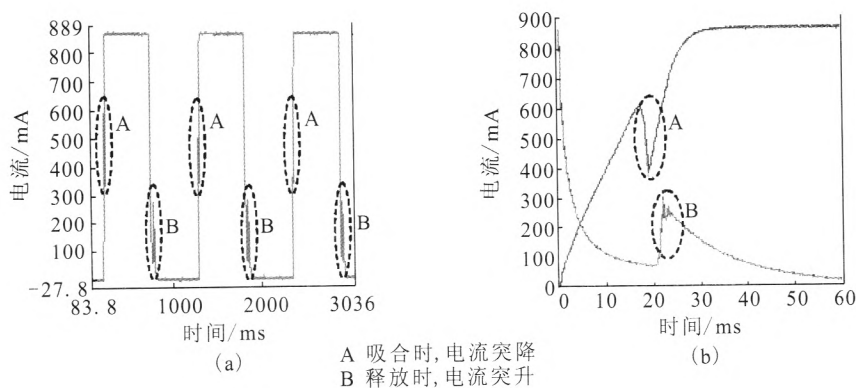


图 8 电磁阀响应时间试验典型电流曲线

Fig. 8 Typical current curves in test of solenoid valve response time

试验过程中给电磁阀通、断电 3 次。图 8(a) 为测试全过程的电流曲线, 图 8(b) 为系统对全过程电流曲线分析、转换后的叠加电流曲线, 由图 8 可见, 3 条吸合电流线、3 条释放电流线几乎重合, 表明智能测试系统性能稳定, 具有良好的测试重复性。系统自动测试的吸合时间为 19.5 ms, 释放时间为 22.3 ms, 与采用超高精度示波器测量结果进行对比, 相差最大仅为 0.13 ms。可知, 响应时间测试精度高于 0.67%, 满足测试技术要求。

5 结论

1) 电磁阀特性智能测试采用先进的 PID 增量式闭环控制技术、智能分析技术, 实现了电磁阀特性测试时试电压缓慢升、降的闭环控制和数据自动分析, 保证了测试精度, 提高了自动化智能测试水平。

2) 研制电磁阀智能测试系统具有自动控制、智能判读和测试精度高等特点, 经试验验证, 测

试数据准确, 测量精度满足技术指标要求。

参考文献:

- [1] 郑培根, 陶国良. 气动电磁阀综合性能测试系统的研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(13): 36-39.
- [2] 张榛. 电磁阀动态响应特性的有限元仿真与优化设计[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(5): 53-56.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 李庆扬, 关治, 白峰衫. 数值计算原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 王顺晃, 舒迪前. 智能控制系统及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 刘君华. 现代检测技术与测试系统设计 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- [7] 田智, 刘卫东, 王正元. 一种战场电磁信号识别技术[J]. 现代电子技术, 2012, 35(19): 32-34.
- [8] 李志勋. 某型号姿控动力系统气体减压阀性能测试系统设计[J]. 火箭推进, 2011, 37(6): 61-66.
- [9] 蒋瑜. 姿控发动机试验阀门电流信号采集系统设计[J]. 火箭推进, 2006, 32(6): 56-59.

(编辑: 张永秀)

(上接第 50 页)

- [2] WILLIAM J D, ESCHER A. US history of airbreathing rocket combined-cycle (RBCC) propulsion for power-ing future aerospace transports, with a look ahead to the year 2020, ISABE 99-7028 [R]. USA: American Institute of Aeronautics & Astronautics, 1999.
- [3] KETCHUM A, EMANUEL M, CRAMER John. Summary of rocketdyne engine A5 rocket based combined cycle testing [R]. USA: NASA, 1999.
- [4] RATEKIN G, GOLDMAN A, ORTWERTN P, et al. Rocket-based combined cycle engine concept develop-ment [R]. USA: NASA, 2002.
- [5] 王国辉, 蔡体敏, 何国强, 等. 火箭基组合循环发动机引射模态流动分析[J]. 推进技术, 2002, 23(4): 298-302.
- [6] 刘佩进, 何国强, 李宇飞. RBCC 引射火箭模态二次燃烧实验[J]. 推进技术, 2004, 25(1): 75-77.
- [7] 黄生洪, 何洪庆, 何国强, 等. 构型及二次燃烧对 RBCC 引射模态推力性能的影响 [J]. 空气动力学学报, 2005, 23(2): 139-143.
- [8] 于守志, 刘兴洲, 强十思, 等. 飞航导弹动力装置试验技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [9] 吴继平. 高增压比多喷管超声速引射器设计理论、方法和实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2007.

(编辑: 陈红霞)