

伺服阀试验系统自动控制

任 艳

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 详细介绍了伺服阀试验测控系统实现试验参量自动控制的措施和方法, 阐述了利用 Labview6.0 作为软件开发平台, 运用数字 PID 控制技术, 同时添加在线整定 PID 系数、前馈控制、自适应控制等针对性的控制方案, 解决了试验参量在伺服阀稳态和动态试验中的自动控制问题。

关键词: 伺服阀; PID 控制; 在线整定; 前馈控制; 自适应控制

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2009) 02-0054-04

Automatic control of a servo-valve test system

Ren Yan

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Approaches for servo-valve test parameters automatic control were introduced in detail in this paper. The software development platform was Labview6.0. The control system applied digital PID control technology, on-line regulating PID factors, prior-feeding control and self-adapting control measures. The system ran successfully in valve tests.

Key words: servo-valve; PID control; on-line regulating; prior-feeding; self-adapting control

0 引言

伺服阀是发动机系统中的重要控制部件之一, 伺服阀特性参数是发动机设计过程中的重要参数。传统的伺服阀试验数据主要依靠仪表显示, 人工读数, 试验参量的控制也是人工手动控制, 自动化程度低, 操作复杂, 可靠性差, 故障

率高, 特别是无法满足动态参数测控的要求。

为了解决上述问题, 经过认真分析和方案论证, 针对伺服阀试验的实际需求, 运用当前测控领域流行的虚拟仪器技术、自动控制技术建立了采集、控制一体的新型试验台, 满足了伺服阀的磨合试验、稳态试验、动态试验 1、2, 共四个试验项目的特性参数试验需求。

收稿日期: 2008-08-20; 修回日期: 2008-10-10。

作者简介: 任艳 (1974—), 女, 技师, 研究领域为火箭发动机测控技术。

1 技术难点

伺服阀试验要求通过改变伺服阀的控制电流不断调整伺服阀的开度，在入口压力保持在控制范围内的前提下，从稳态和动态两个方面测试试验数据，试验的难点是如何保证随着伺服阀开度的变化，试验系统入口压力能够在稳态、动态的情况下保持在控制范围内，特别是在动态试验 2 中，当伺服阀突然打开和关闭时，依然要保证试验系统的进口压力保持在控制范围内，不能发生压力阶跃突变，因此对参数的控制提出了很高的要求。经过反复分析，对入口压力的控制采用了当前工业控制中应用最广泛的 PID 控制方式，同时结合系统实际状况采取了在线整定 PID 参数、前馈控制、自适应控制等针对性的控制方案，满足了控制精度、响应速度的要求。

2 伺服阀测控系统的设计

2.1 主要技术指标

稳态试验控制过程时间小于 5s，最大超调量 ±1%；动态控制过程时间小于 25ms，最大超调量 ±5%。

2.2 测控系统的工作原理

测控系统工作原理见图 1，由工控机、A/D 板卡、D/A 板卡、传感器、配电器、隔离模块、PLC 可编程控制器和电动执行机构组成，可完成信号的变送、采集、显示、记录、报警和控制。

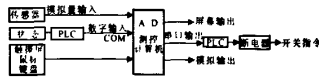


图 1 测控系统工作原理
Fig.1 Principle of the measuring system

试验时各类传感器在配电器供给电源的条件下，测量各种物理量的实时值，经过隔离、滤波后，送入 A/D 采集卡进入计算机进行实时采集、显示、记录，同时计算机经过 D/A 板卡、隔离模块，输出电信号到电动执行元件，完成多路物理

量的自动控制，此外测控系统同时通过 PLC 完成对试验系统的监控功能。

2.3 控制软件的设计

本测控系统采用 Labview6.0 作为软件开发工具。根据伺服阀试验的要求编制了对应试验流程的程序，测控软件完成了伺服阀试验的数据采集、自动控制、数据查询、报告输出等全部功能，确保了伺服阀试验顺利完成。

2.4 自动控制措施

控制系统回路中，除了传感器有较大的不同外，从控制角度看，都具备比例-积分-微分调节规律，均属 I 型调节系统。因此试验参数的控制主要采用了 PID 控制方式，同时结合系统实际状况采取了一些针对性的控制方案，确保了被控参数的控制精度。以控制 YM3 节流阀为例，试验系统基本控制原理见图 2 所示。

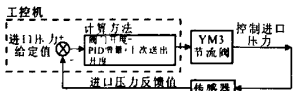


图 2 节流阀控制原理框图
Fig.2 Principle of the valve control system

2.4.1 PID 算法及控制原理

考虑计算机控制的离散性和系统状态的不确定性，采用了数字 PID 增量公式为数学模型，以采样时刻的偏差（偏差=进口压力给定值-进口压力反馈值）计算控制量与上一时刻控制量累加输出到控制执行元件（YM3 节流阀），从而调节试验参数趋近给定值满足控制精度要求。PID 增量按公式计算

$$\begin{aligned} \text{PID 增量} = & K_p \{ e(k) - e(k-1) \} + \frac{T}{T_i} e(k) \\ & + \frac{T_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中， K_p 为比例系数； K_i 为积分系数； K_d 为微分系数； $e(k)$ 为当前偏差； $e(k-1)$ 为上次偏差； $e(k-2)$ 为上两次偏差； T 为采样周期。

2.4.2 PID 参数整定

PID 参数的整定是指对 K_p 、 K_i 、 K_d 三个系数的整定，比例系数 K_p 影响系统的速度和精度；

积分作用系数 K_I 影响系统的稳态精度; K_D 微分作用系数影响系统的动态特性, 这三个系数整定是实现 PID 控制的关键环节, 也是一项十分困难的工作, 由于试验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, 观察系统的响应曲线做手动调整, 反复试凑参数, 最终达到满意的结果。

2.4.3 针对性的控制方案

2.4.3.1 动态试验 1

动态试验 1 要求给伺服阀连续加载 $0\text{mA} \rightarrow 150\text{mA} \rightarrow 0\text{mA}$ 的控制电流, 步长 0.5mA , 试验周期为 15s , 每个工况时间间隔为 25ms , 要求在入口压力保持在控制范围内的前提下, 测试伺服阀的动态响应特性, 因此入口压力的过程控制时间必须小于 25ms , 才能保证正确的试验测试状态。

面对过程控制时间短、系统扰动变化大的情况, 单纯使用数字 PID 反馈控制不能达到满意的效果。经过大量试验分析 K_p 、 K_I 、 K_D 三个系数对控制过程中不确定条件、参数、延迟和干扰等因素的影响, 依据反馈值与设定值的偏差 e 和偏差变化率 ec 为判断条件, 在线整定 K_p 、 K_I 、 K_D 三个系数, 原则如下:

当 e 较小时 ($<$ 设定值的 10%), 为了使系统具有较好的稳定性, K_p 、 K_I 取大些, 同时避免系统在设定值附近振荡, K_D 值的选择根据 ec 值较大时, K_D 值取较小值, 通常 K_D 为中等大小。

当 e 处于中等大小时 (设定值的 10% 至 30% 之间), 为使系统响应具有较小的超调, K_p 应取小些, K_I 、 K_D 取值要适中。

当 e 较大时 ($>$ 设定值的 30%), 为使系统具有较好的跟踪性能, 应取较大的 K_p 和较小的 K_D ; 同时为避免系统响应出现较大超调, 应限制积分作用系数。

通过对数字 PID 增量按公式中的 K_p 、 K_I 、 K_D 三个系数在线整定, 提高了控制系统的灵活性、适应性, 缩短了过程控制时间, 提高了控制精度。但是由于伺服阀在控制电流为 110mA 左右, 正是阀门从饱和段向线性段转换的非线性区域, 试验状态在此处出现跳变, 而试验的快速性要求

又不允许在此工况下做更多调整, 经过对 PID 控制过程的理论分析, 发现根据实际控制需要可以用设定值、反馈量或其他与控制系统相关的参数作为条件变量, 配合 PID 控制的应用, 以适应系统突发扰动的变化, 根据入口压力的实际响应曲线, 决定伺服阀在控制电流为 110mA 左右时, 加大或减小了往返程入口压力的设定值, 从而人为加大或减小了反馈值与设定值的偏差 e , 解决了非线性突发扰动问题。

2.4.3.2 动态试验 2

由图 2 控制原理框图可知执行元件的控制量是依据给定值与反馈值的偏差计算得出的, 控制作用发生时间是在偏差出现以后, 而动态试验 2 中伺服阀加载电流方式如图 3 所示, 控制电流为反复的有限阶跃信号, 如果按传统 PID 闭环调节, 系统会出现很大的冲击, 甚至会损坏试验系统。

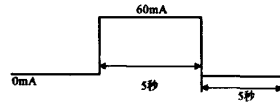


图 3 控制电流加载

Fig.3 Loading of control current

针对动态试验 2 这种情况, 使用了前馈控制加 PID 自适应方案, 前馈控制是一种开环控制方式, 控制作用的发生时间是在干扰作用的瞬时而不是等到偏差出现以后, 比反馈控制及时、有效。PID 自适应方案是指通过向传统 PID 控制地学习, 在线调整自己, 目标是使设定值与反馈值的偏差趋尽于零。

在方案实施中, 伺服阀控制电流保持不变的 5s 内进口压力采取闭环控制, YM3 节流阀的控制开度值由 PID 控制算法计算得出。伺服阀控制电流阶跃作用的同时进口压力采取开环控制, YM3 节流阀的控制开度值等于预设值 (PID 闭环控制第五秒的值)。控制流程见图 4, 由于每次伺服阀控制电流稳定段的 PID 闭环控制是在上个周期的控制基础上完成的, 进口压力经过反复自学习、自适应的调整, 达到了良好的控制精度, 经过对前馈控制和自适应控制方案的应用, 系统没有出现压力冲击, 确保了试验系统的控制精度和鲁棒性。

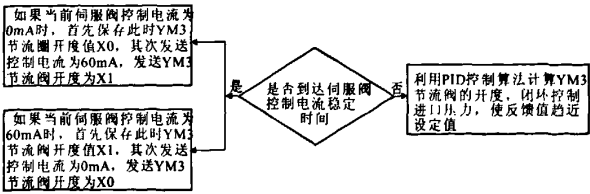


图 4 动态试验 2 控制流程图
Fig.4 Control flow chart of dynamic test 2

3 试验验证

为验证伺服阀测控系统工作状态，选用试验合格产品作为参照，对测控系统通过稳态试验、动态试验 1、动态试验 2 进行验证。

3.1 稳态试验

试验目的：给被测产品加载设定的控制信号，测试产品静态特性。

测试结论：试验数据与以往数据对比处于公差带内，满足稳态控制精度为 $\pm 1\%$ ，控制过程时间小于 5s 的要求。

3.2 动态试验

动态试验分为试验 1 和试验 2。

试验 1 的目的是给被测产品加载连续动态变化的信号，测试产品动态响应特性。

结论：测试的数据图形曲线如图 5 所示，测试数据与以往数据对比处于公差范围内，符合要求。满足动态控制精度为 5%，控制过程时间小于 25ms 的要求。

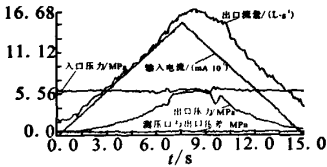


图 5 动态试验 1 测试曲线
Fig.5 Curves of dynamic test 1

试验 2 的目的是给被测产品加载多个阶跃信号，测试产品阶跃响应特性。

结论：测试数据与以往数据对比处于公差范

围内，符合要求。伺服阀控制电流反复阶跃送出同时，试验系统没有出现冲击，满足控制精度为 $\pm 5\%$ 的要求（此试验按动态控制精度要求）。试验数据曲线见图 6 所示（试验曲线是控制电流的十分之一，入口油压的二分之一所得）。

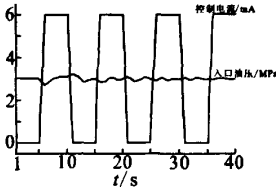


图 6 动态试验 2 测试曲线
Fig.6 Curves of dynamic test 2

4 结论

基于实际工程的应用，总结了伺服阀测控系统的设计理论与实现，伺服阀试验中运用以数字 PID 增量公式为数学模型的 PID 闭环控制，采取了多种针对性的控制方案，完成了伺服阀稳态和动态试验的自动控制，提高了伺服阀试验的自动化程度，降低了试验故障率，为获取伺服阀特性参数建立了一个高效、可靠的试验平台。

参考文献：

[1] 刘君华, 贾惠芹, 丁晖, 等. 虚拟仪器图形化编程语言 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
[2] 杨乐平, 李海涛, 赵勇, 等. LabVIEW 高级程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
[3] 赵万明. 流量转速参数信号调理技术 [J]. 火箭推进, 2008, 34(2): 49-54.

(编辑：陈红霞)