

基于专家控制系统的发动机 入口压力闭环控制方案

朱丹波, 南渭林, 薛会建

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 液体火箭发动机在地面试验过程中, 试车台推进剂供应系统必须保证发动机的入口压力在任务要求的范围内, 而目前采用压力继电器控制进气电磁阀来调节入口压力, 这种方式调节精度低, 响应滞后。根据试车台增压系统的特点和增压系统开环控制数年所积累的经验, 提出基于专家控制思想和以孔板矩阵作为执行机构的压力闭环控制方案。该控制方法无需精确的数学模型, 又能按照设定的精度智能调节增压孔板矩阵, 使发动机入口压力自动跟随设定值而变化。

关键词: 液体火箭发动机; 入口压力; 专家控制; 孔板矩阵

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2009) 03-0042-05

Study on closed loop control of rocket engine inlet pressure based on expert control system

Zhu Danbo, Nan Weilin, Xue Huijian

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

Abstract: Inlet pressure of the liquid rocket engine should be controlled in a range by the propellant supplying system in the ground test. At present, the pressure is controlled by an electromagnetic valve which is driven by a pressure relay. But the regulation precision is low and the response hysteresis is significant. A new project is put forward in this paper which is based on the expert control system and the experience of the open-loop control system during these years, the executive is a series of valves. The virtue of the new project is that it does not need precision mathematic model and the pressure will follow the set value well after controlling of the valve matrix in the design precision.

Key words: liquid rocket engine; inlet pressure; expert control; valve matrix

收稿日期: 2008-11-11; 修回日期: 2008-11-23。

作者简介: 朱丹波 (1981—), 女, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验控制技术。

0 引言

发动机试验时, 试车台推进剂供应系统必须保证发动机入口压力在任务要求的范围内。入口压力偏低则容易引起泵气蚀, 偏高将使发动机处于高工况状态, 对发动机的正常工作将产生不利影响。目前试车台发动机试验主容器增压采取减压阀加节流孔板的方式, 压力控制采用压力继电器。试验中, 主容器压力主要根据管路的动力特性计算确定, 并依此计算节流孔板的尺寸和减压阀出口压力。这种增压方式调节精度低, 响应滞后, 试车中只能按预定程序进行增压, 难以保证试车过程中非正常情况下的入口压力要求。

基于上述原因, 研制一套根据入口压力要求自动调节增压气流量的闭环调节系统是十分必要的。

1 系统控制方案

由孔板矩阵作为执行机构的闭环系统, 可以快速响应指令。其最长响应时间为孔板矩阵中最大口径阀门响应时间, 而调节阀的最长响应时间则为开度从 0 至 100% 的响应时间。而且调节阀存在一定死区, 但孔板矩阵可以最小孔板保证调节精度, 以孔板的组合保证调节的连续性。

所以本方案采用孔板矩阵作为执行机构。

1.1 方案的提出

闭环控制系统方案原理如图 1 所示。 p_{act} 为发动机入口压力; p_{in} 为箱压; p_s 为增压气气源(减压器出口)压力; V_0 为增压主阀门; $V_1 \sim V_5$ 组成增压孔板矩阵。

系统工作时, 增压主阀门是常开的, 保证发动机入口压力能达到设定值的 70%~90%, 孔板矩阵只是补充剩下的 10%~30% 的压力, 这样不仅提高了闭环控制的可靠性, 而且降低了闭环控制的难度。在主阀门常开状态下, 根据入口压力设定值和测量值所形成的偏差 e 按照既定的算法决定采用哪种孔板组合来达到调节的目的。

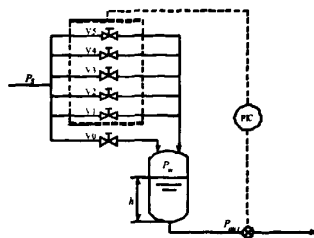


图 1 闭环控制系统原理图

Fig.1 Sketch of the closed loop control system

增压系统本身无疑是一个大惯性系统, 如果用常规算法则需要较为精确的数学模型, 而且采用孔板矩阵方式使得对系统变化不宜进行连续闭环控制, 这些都构成了控制方案的难点。但是在长期的试验中我们积累了丰富的手动控制经验和调整计算方法, 因此, 专家控制无疑是一个最容易实现的方案, 因为它正是不必使用系统模型而利用专家的经验所形成的控制算法。闭环控制系统原理见图 2。

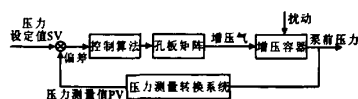


图 2 压力闭环控制系统方块图

Fig.2 Diagram of the closed loop control system

1.2 专家控制系统原理

人工智能领域中发展起来的专家系统是一种基于知识的、智能的计算机程序系统。专家系统有两个要素:

(1) 知识库—存储有某个专门领域中经过事先总结的按某种格式表示的专家水平的知识条目。

(2) 推理机制—按照类似专家水平的问题求解方法, 调用知识库中的条目进行推理、判断和决策。

专家控制就是根据不同的情况, 按照规则选择合适的控制策略和算法。规则以 if...then...的产生式规则表示, 控制系统的运行可以利用一些先验知识, 有关受控过程的知识可以不断地增加、积累, 据此改进控制性能。

1.3 闭环调节的专家控制系统

设组成孔板矩阵的阀门增压能力为 $F(V5):F(V4):F(V3):F(V2):F(V1)=16:8:4:2:1$ ，矩阵的调节范围为 $0\sim x\text{MPa}$ ， x 即为模式 31 所对应的增压能力。设发动机入口压力调节精度为 E ，则 $V1$ 的增压能力为 E ，这是为了保证调节精度，所以 $x=31E$ 。

专家规则大致分为启动时刻、平稳段和爬坡段三个部分，具体如下：

1.3.1 启动时刻闭环控制无效

在开车瞬间，压力会有短暂波动，约有 t 时间，这种波动不利于调节，所以程序在此刻可不参加调节，待 t 时间过后，程序参加调节。程序运行后，屏蔽开车后的 t 秒，使这段采集无效，矩阵模式在 t 秒内保持为初始模式。

If $KC=1$ then $\text{mode}=\text{OnitMode}$ in t

启动时刻选择的初始模式可根据主孔板的选择而定，比如主孔板选择 90% 的增压能力，则根据计算孔板矩阵的初始模式可设为理论上 10% 的增压能力。

1.3.2 平稳段控制方案

前稳段和过载段都属于平稳段。在闭环启动后，根据偏差值选择一个初始模式，然后再利用循检制度监测偏差变化率，根据偏差的大小和偏差变化率的正负调整模式。

1.3.2.1 引入偏差变化率 $\dot{e}(k)$ 的原因

引入偏差变化率主要是为了提高控制系统的鲁棒性。所谓鲁棒性是指系统在一定范围的参数不确定性和一定限度的未建模动态存在时，闭环系统仍能保持稳定并保证一定的动态性能品质的性质。

第 k 个采样点的偏差为

$$e(k)=SV(k)-PV(k)$$

偏差变化率为

$$\dot{e}(k)=e(k)-e(k-1)$$

则 $e(k)$ 和 $\dot{e}(k)$ 所代表的意义如表 1 所示。设一正数 ε ，如果 $|\dot{e}(k)|<\varepsilon$ 则表示偏差无变化。

表 1 $e(k)$ 和 $\dot{e}(k)$ 代表的意义

Tab.1 Signification of $e(k)$ and $\dot{e}(k)$

	$e(k)>0$	$e(k)<0$
$\dot{e}(k)>\varepsilon$	偏差在增大	偏差在减小
$\dot{e}(k)<-\varepsilon$	偏差在减小	偏差在增大
$ \dot{e}(k) \leq\varepsilon$	偏差无变化	偏差无变化

1.3.2.2 模式选择和循检制度

(1) 由于孔板矩阵的设计是根据单容器前稳段设计的，所以总是满足单容器试车增压需求。但是当处于单容器过载段或爬坡段时，或当试车需要多个容器时，孔板矩阵的精度就太高，导致 5 秒内达不到提高 0.01MPa 的要求，所以对孔板进行模式变化是十分必要的。

在总模式表的基础上，根据试车工况的变化计算出具有针对性的新模式表，新的模式表仍然属于总模式表的一部分，且单容器和多个容器在平稳段、爬坡段和过载段的模式表各不相同。但新的模式仍为连续变化的要求模式，而且最小模式仍然满足 5 秒提高 0.01MPa 的要求。

(2) 循检制度的引入主要是为了能较快发现控制过程中的各种问题，避免压力变化过快。循检主要是判断当前的偏差变化率是否在容许范围内，如果超出允许范围则跳出循检进行调节，不必严格遵循控制周期的限制。循检的周期应小于控制周期。

1.3.2.3 控制规则简述

首先根据容器状况选择模式表，然后根据如下进行调节。控制规则可简要描述如下：

模式 0 为孔板全关模式，最大模式由于各工况下模式表不同而不同，模式增量最大为该模式表中的最大模式，最小为 0。模式最大为 5 个孔板全开模式，最小为矩阵孔板全关模式。

(1) 模式最大为 31，最小为 0。如果在调整过程中模式大于最大模式则为令当前模式等于最大模式 (MaxMode)；如果小于 0 则为 0，并且这两种情况都报警。

(2) 每个模式表都有最大模式增量和最小模

式增量, 最大模式增量 ($\Delta \text{MaxMode}$) 为该模式表中的模式总数, 最小为 0。如果在调整过程中模式增量大于最大模式增量则等于最大模式增量, 如果小于 0 则为 0。其中, 偏差为正则增量为正, 否则增量为负。

(3) 如果偏差在 E 范围内则表示稳定, 保持当前模式。

(4) 如果偏差不能满足要求则根据偏差和对应模式表进行调整。

(5) 模式选择后进行循检: 如果测量值未到稳态且偏差持续增大, 则跳出循检, 报警并重复上一控制。

(6) 模式选择后进行循检: 如果偏差未到稳态但偏差减小且偏差变化率大于 ΔE , 则跳出循检, 并适当减小 mode。

(7) 模式选择后如果测量值未到稳态且偏差保持不变, 则重复上一控制。

(8) 模式选择后如果在连续 2 个控制周期内测量值未到稳态且偏差持续减小, 则保持当前模式。

1.3.3 爬坡段控制方案

爬坡段采用斜率拟合法来控制。首先, 爬坡段的初始模式也由调整计算得出, 并且根据试验要求的不同模式表也不尽相同。

在爬坡段第一个控制周期判断当前爬坡斜率, 然后根据爬坡段的模式表选择适当的孔板组合来使之拟合设定斜率。在爬坡过程中, 每个控制周期计算一次当前斜率, 并按照当前压力和目标压力修正一次设定斜率。控制规则与平稳段大致相同, 主要可描述如下:

(1) 如斜率偏差大于对应模式表中最大斜率则等于最大斜率, 如小于最小斜率则为最小斜率。

(2) 如果斜率偏差在允许偏差范围内, 则表示斜率符合要求, 模式不变。

(3) 如果斜率不在允许偏差范围内, 则对照模式表进行适当调整。

2 采样、滤波、控制周期

2.1 采样

由于压力测量的频率非常高, 所以在进入闭

环控制之前还必须进行二次采样和数字滤波。一般采样周期越小, 信号复现精确度越高。当采样周期 $\rightarrow 0$ 时, 那就变成了连续系统。但是采样周期太小会使系统调节过于频繁, 甚至使有些执行机构来不及响应, 同时也会加重计算机负担, 影响使用效率。若采样周期太长, 又会使扰动得不到及时克服而带来误差, 使动态性能恶化, 甚至导致系统不稳定。

因此, 在实际应用时, 应主要根据受控对象的物理特性与扰动强弱, 来选择采样周期。增压系统惯性大, 反应慢, 不宜频繁调节, 因此采样周期不能过小。

2.2 滤波

在信号传送中往往夹杂有随机干扰, 所以需要进行滤波。常用的移动平均滤波就是一种很好的数字滤波方法。所谓移动平均滤波即将一段时间的输入数据进行加权平均, 如果加权系数相同则意义为将本次输入数据连同以前的 m 次数据进行平均运算, 如下式

$$\bar{y}(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m y(k-i)$$

2.3 控制周期

为了避免阀门频繁动作, 控制周期的选择非常关键。由于系统具有大惯性, 所以拟采用 5 秒作为控制周期长度。

3 手动控制按钮

为了保证闭环控制的安全可靠, 故应有手动控制按钮(B)和每一个孔板矩阵中的阀门(V)相对应。手动按钮应和计算机控制输出继电器(J)并联, 以达到模拟和手动控制阀门的目的。强制开关(Q)的作用是强制关闭某一路继电器输出。阀门控制原理见图 3。

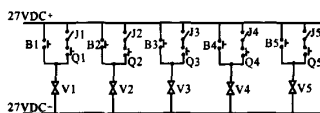


图 3 阀门控制原理图

Fig.3 Sketch of the control valves

4 系统达到的效果

(1) 根据专家经验和偏差及偏差变化率实现压力闭环控制。

(2) 数据测量和记录能为专家规则库的完善和优化提供实际参考。

(3) 手动按钮和强制按钮能保证增压的可靠性,并能弥补调试初期规则的不完善。

5 结论

在模型未知或变化较大的发动机地面试验增压系统中,基于专家思想的控制是完全可行的。

专家控制不但能使压力闭环控制的调试更为简单和可靠,而且控制系统的鲁棒性能使系统的适应性更广。

参考文献:

- [1] 蒋慰孙,俞金寿.过程控制工程[M].北京:中国石化出版社,1998.
- [2] 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.
- [3] 邵惠鹤.工业过程高级控制[M].上海:上海交通大学出版社,1997.
- [4] 李昇河,丁问司,孙海平.液压与气动技术[M].北京:国防工业出版社,2006.

(编辑:王建喜)

(上接第 33 页)

(2) 增加缓冲阀,并合理选择节流孔面积,对于消除增压过程中压力振荡是有效的。

(3) 缓冲阀的打开时间至少为 15s,17s 之后压力才能趋于稳定,因此系统工作时序中增压时间不能低于 17s。

仿真技术在推进剂供应系统增压过程的分析中,取得了良好的效果。仿真技术的应用可以缩短产品研发周期,简化、减少物理试验,代替部分物理试验。随着数字化技术的发展,仿真技术将会在包括设计改进和系统试验等工程领域有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 廖少英.液体火箭推进增压输送系统[M].国防工业出版社,2007.
- [2] 付永领,祁晓野.AMESim 系统建模和仿真——从入门到精通[M].北京:航空航天大学出版社,1989.
- [3] 费祥麟.高等流体力学[M].西安交通大学出版社,1989.
- [4] 曾维亮.航天姿控发动机减压阀的研究[J].火箭推进,2001,27(5): 6-11.
- [5] 秦家升,游善兰.AMESim 软件的特征及应用[J].工程机械,2004,35(12): 6-8.
- [6] 王定军.贮箱充填过程仿真和分析[J].火箭推进,2008,34(1): 23-25.

(编辑:马 杰)