

低温气动阀动态响应特性的非线性分析方法

秦永涛, 沈继彬, 李建军, 曾晓军

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了在液体火箭发动机试验过程中缩短低温气动阀的响应时间, 减少非线性求解阀门动态响应的计算量, 提升试验过程中的安全性与可靠性, 根据低温气动阀的工作原理, 构建阀门的动态响应非线性传递模型, 并在此基础上, 通过引入变步长系数与定义遗忘因子, 在四阶龙格-库塔法基础上, 构建了一种动态递推龙格-库塔法的非线性动力学求解方法, 并提出响应速度的改进方案。最后通过实例的验证与仿真, 为提升低温气动阀响应速度提供了一种方法指导, 为提高液体火箭发动机试验技术提供了支持。

关键词: 非线性分析方法; 低温气动阀; 动态响应; 龙格-库塔法

中图分类号: V432-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 06-0023-06

Nonlinear analysis method for dynamic responding characteristics of cryogenic pneumatic valve

QIN Yong-tao, SHEN Ji-bin, LI Jian-jun, ZENG Xiao-jun

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

Abstract: To shorten the dynamic responding time of cryogenic pneumatic valve, reduce the calculated amount of nonlinear solution for valve dynamic response, and improve the reliability and security of cryogenic pneumatic valve, a dynamic responding non-linear transferring model of cryogenic valve were built in accordance with the operating principle of cryogenic pneumatic valve. Afterwards, based on four-stage Runge-Kutta algorithm, a nonlinear dynamics solution method for the dynamic recursive Runge-Kutta algorithm was constructed by means of the introduction of variable step length coefficient and definition oblivion factor. A scheme to improve the response speed is proposed. This method was demonstrated and validated by a sample. Consequently, this method has offered guidance for reducing dynamic responding time of cryogenic pneumatic valve, and provided a support for improving the ability to rationally and exactly evaluate the performance of liquid rocket engine.

Keywords: nonlinear analysis method; cryogenic pneumatic valve; dynamic responding; Runge-Kutta algorithm

收稿日期: 2013-07-24; 修回日期: 2013-09-11

作者简介: 秦永涛 (1981—), 男, 博士研究生, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

0 引言

低温气动阀作为液氧煤油火箭发动机试验系统中的重要元件之一,其动态特性是时序设置的关键因素,对于液氧煤油火箭发动机合理的起动、转工况工作和异常关机至关重要^[1-3]。但是由于低温气动阀动态响应过程受试验过程以及保温、密封、流量及结构等限制,其开启过程受外部激励信号作用下的开关延时和阻尼的非线性影响,加上密封力、不均匀间隙力、碰磨等非线性激励源的存在,以及发动机试验过程点火燃烧对推进剂管道系统的非线性影响,导致发动机试验过程低温气动阀动态响应过程存在着非线性环节。对于液体火箭发动机试验过程中阀门动态响应过程的非线性问题,传统的线性分析方法是忽略实际系统的各种非线性因素为代价的,或者只考虑了弱非线性问题,可能会过滤掉许多重要信息,其分析结果与系统的真实动态特性可能存在较大差距,例如忽略流阻损失、阀芯位移流量及缝隙流量等,对起动特别是转工况等瞬变过程的分析往往不够精确,将会引起压力、流量波动,进而引起推进剂混合比失调等现象,引起供应系统的振荡,恶化工作环境,严重时使管道爆裂或系统失效,影响到试验系统的可靠性与安全性^[4-5]。

尽管国内外许多研究人员开展了阀门启动特性相关研究工作,并取得了相应成果^[6-11],但是需要进一步开展阀门动态响应非线性问题研究。

1 低温气动阀动态响应模型

低温气动阀动态响应过程的受力简化原理如图1所示。当电磁阀通电时,电磁阀打开,气缸通入操作气体,操作气体作用于活塞,克服弹簧刚性、密封摩擦力及介质作用力等,驱动活塞向上运动,从而通过阀杆带动阀芯向上运动,阀门打开;当电磁阀断电时,电磁阀关闭,在弹簧刚性作用下,克服密封摩擦力和介质作用力,驱动活塞向下运动,从而通过阀杆带动阀芯向下运

动,阀门关闭。

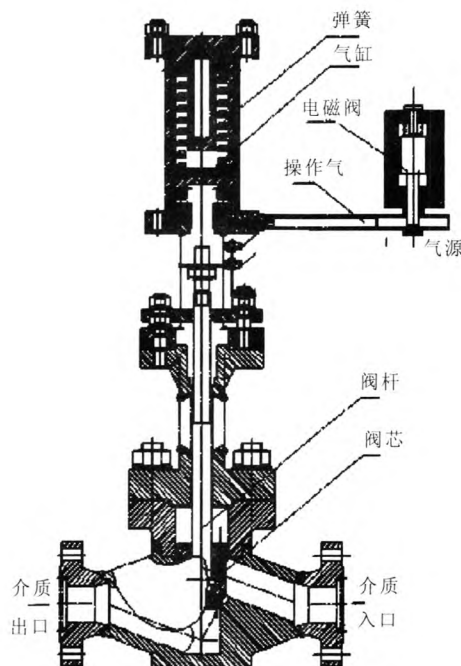


图1 低温气动阀动态响应过程的简化原理图

Fig. 1 Simplified function principle diagram of dynamic response process of cryogenic pneumatic valve

低温气动阀动态响应模型是以低温气动阀阀芯为研究对象,建立起动态响应函数。作用在阀芯上的力可分为流体作用力和弹性元件作用力两类。若忽略阀芯自重和瞬态液动力这些次要因素,主阀芯所受作用力有流体静压力、稳态液动力、环形缝隙阻尼力、弹簧力和惯性力5种^[11],故主阀芯受力方程为:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = F_k - F_i - F_j - F_f - F_l \quad (1)$$

式中: M 为主阀芯质量; x 为主阀芯位移; F_k 为活塞受到的操作气体静压力; F_i 为主阀芯受到的介质静压力; F_j 为稳态液动力; F_f 为缝隙阻尼力; F_l 为主弹簧力。

1.1 操作气体静压力 F_k

当操作气体通入气缸,不论活塞是处于移动还是静止状态,总有操作气体产生的静压力作用活塞表面上,其受力方向以活塞受力向上为正(开启),受力向下为负(关闭)。即有:

$$F_k = p_a A_a - p_b A_b - F_e \quad (2)$$

式中: A_a 为入口气体作用活塞表面积; p_a 为操作气体入口工作压力; A_b 为出口气体作用活塞表面积; p_b 为操作气体出口工作压力; F_e 为电磁阀开口产生的稳态气动力。

在液氧煤油发动机试验过程中, 常用电磁阀控制操作气体。为此, 在研究低温气动阀动态响应时需要研究操作气体的电磁阀动态响应特性。电磁阀阀门初始时在弹簧预紧力和控制气体压力下, 顶杆和衔铁在气隙最大处。当电磁阀通电后, 衔铁上产生磁力并逐渐增大, 大于临界力时, 衔铁开始动作, 阀门打开, 这一过程为电磁阀开启过程, 如图 2 所示。

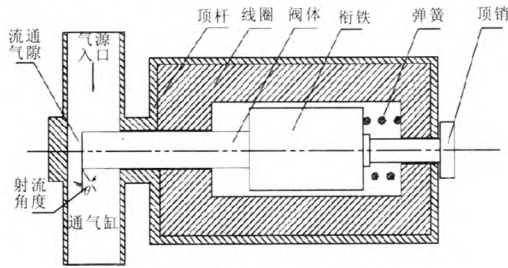


图 2 电磁阀阀芯开启示意图

Fig. 2 Schematic diagram of opened solenoid valve

基本假设: 不考虑气体的沿程损失; 由于阀动作时间很短以及密封腔体积很小, 故认为气体充填和排出密封腔时腔内压力、密度场等为均匀场; 线圈电阻为一定值。通电状态所示, 断电时, 阀门的动作则相反。电磁阀开启时电动过程的非线性动力学模型:

$$\Sigma m \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{\psi^2}{\Lambda \delta^2 N^2 \mu_0 s} - F_0 + p_a + C_y + F_e \quad (3)$$

式中: ψ 为磁链; Λ 为气隙磁导; δ 为真空磁导率; N 为磁通势; s 为导磁体截面积; F_0 电磁阀弹簧预紧力; C 为电磁阀弹簧刚度; Σm 为衔铁、顶杆和密封体质量总和; y 为电磁阀阀芯位移。

1.2 静压力 F_i

低温气动阀工作时, 如果介质流体静压力产生的力作用在阀芯上, 会产生介质静压力。介质静压力受力方向: 以阀芯受力向上为正 (开启), 阀芯受力向下为负 (关闭)。即有:

$$F_i = p_{in} B_a - p_{out} B_b \quad (4)$$

式中: B_a 为主阀前腔介质作用面积; p_{in} 为主阀前腔介质压力; B_b 为主阀后腔介质压力作用面积; p_{out} 为主阀后腔介质压力。

1.3 瞬态液动力 F_j

稳态液动力是在流场为定常情况下, 仅由于流体在流道中速度不同引起的力, 对阀起稳定作用。与稳态气动力类似, 稳态液动力为:

$$F_j = 2C_d \omega \Delta x (p_{in} - p_{out}) \cos \theta - \rho Q_b V_2 \quad (5)$$

式中: Q_b 为体积流量; V_2 为流出速度; C_d 为节流处的流量系数; ω 为阀口面积梯度; Δx 为阀门开启高度变化率; θ 为流体在阀口的射流角度。

1.4 缝隙阻尼力 F_f

当圆柱形主阀芯相对于衬套移动时, 在主阀芯与衬套之间的环形缝隙内的流体对阀芯产生阻尼力, 受力方向与阀芯的开启相反:

$$F_f = \frac{\pi d_z l u}{h} = \frac{\pi d_z l u}{h} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

式中: d_z 为阀芯直径; l 为阀芯与衬套的接触长度; h 为阀芯与衬套之间的间隙; u 为流体的动力粘度。

1.5 弹簧弹力 F_s

弹簧弹力 F_s 为弹簧对阀芯作用的弹力, 其作用方向与阀芯的开启相反:

$$F_s = K_s (x + x_0) \quad (7)$$

式中: K_s 为主阀芯弹簧的刚度; x_0 为主阀芯弹簧的初始压缩量。

低温气动阀的动态响应非线性传递模型为:

$$Y = \frac{K_1 + K_3}{Ms^2 + K_2 s + K_4} \quad (8)$$

其中

$$K_1 = (p_a A_a - p_b A_b - 2C_d \omega' \Delta y' (p_a - p_b) \cos \theta' + \rho' Q_b' V_2') - (p_{in} B_a - p_{out} B_b)$$

$$K_2 = \frac{\pi d_z l u}{h}$$

$$K_3 = \rho Q_b V_2 - K_s x_0$$

$$K_4 = 2C_d \omega (p_{in} - p_{out}) \cos \theta + K_s$$

2 低温气动阀的非线性动态响应

对于动态响应非线性问题,一般很难直接建立其解析形式的、精确完备的非线性数学模型。即使建立了非线性数学模型,也往往有大量的参数需要试验去确定,传统非线性纠结过程计算量大、精度不高,制约动态响应的非线性研究。为此,本文在龙格-库塔法基础上,提出了一种动态递推的龙格-库塔法非线性求解方法。

龙格-库塔法是一种微分方程近似求解的数值方法。由于龙格-库塔法使用差商代替导数值,近似计算代替函数的积分计算,并求得连续时间函数的数值解,具有较高的近似精度,适应于非线性问题求解^[12]。为了提高龙格-库塔法算法的精度,以及减少计算量,在此引入了遗忘因子与加权系数概念。

在此设 λ 为遗忘因子,有:

$$\lambda = [0.5, 1, 2] \begin{cases} E_n > E_{\max}, \lambda = 0.5 \\ E_n > E_{\max}, \lambda = 1 \\ E_n > E_{\min}, \lambda = 2 \end{cases}$$

式中: E_n 为 y_n 输出的局部截断误差,有 $E_n = (2k_1 - 9k_3 + 8k_4 - k_5)h/30$; E_{\min} 与 E_{\max} 分别为最小与最大误差。 $\lambda=1$ 即为定步长的龙格-库塔法。

表 1 低温气动高压截止阀(KDJ641Y-300P)主要参数

Tab. 1 Main parameters of high-pressure cryogenic pneumatic stop valve

工作参数	数值	工作参数	数值	工作参数	数值
工作介质的密度/(kg·m ⁻³)	840	主阀阀芯质量/kg	3.2	弹簧质量/kg	0.5
主阀出口流体压力/MPa	0.1	主阀阀口直径/mm	65	控制腔容积/mm ³	7250
主阀入口流体压力/MPa	30	阀芯阻尼孔直径/mm	0.8	节流处流量系数	0.62
节流处的速度系数	0.99	弹簧刚度/(N·mm)	7.6	主阀阻尼长度/mm	1.5
主阀阀口射流角度/(°)	69	主阀缝隙宽度/mm	0.02	主弹簧预压缩量/mm	1.6
操作气工作压力/MPa	5	工作介质温度/°C	-183	操作气体	He

3.1 阀门非线性动态响应模型求解

低温气动高压截止阀动态响应传递函数为:

$$Y = \frac{39\ 250}{3.2S^2 + 297S + 29\ 500}$$

因此,龙格-库塔法积分可变步长 h 变为:

$$h_{n+1} = w_{n+1} h_n \lambda \quad (10)$$

式中 h_n 为第 n 步的积分步长。

根据可变的积分步长 h_n ,形成了动态递推龙格-库塔法:

$$\begin{cases} K_1 = f(x_k, y_k) & K_2 = f(x_k + \frac{h_n}{2}, y_k + h_n \frac{K_1}{2}) \\ K_3 = f(x_k + \frac{h_n}{2}, y_k + h_n \frac{K_2}{2}) & K_4 = f(x_k + h_n, y_k + h_n K_3) \end{cases} \quad (11)$$

动态推龙格-库塔法通过引入变步长系数,制定可变步长的策略,减少了误差计算量,同时通过定义遗忘因子,考虑了过去误差对现在误差的影响,减少舍入误差,从而进一步减少计算量和提高计算精度。进一步寻找更优方法,以便在无限地减小步长条件下达到较高的精度。

3 仿真

在此以某试验台用于输送液氧的低温气动高压截止阀为研究对象,建立阀门动态非线性响应模型,并利用动态递推龙格-库塔法分析影响阀门开启的主要因素以及提出改进措施。该低温气动高压截止阀(KDJ641Y-300P)主要参数如表 1 所示。

利用动态递推龙格-库塔法求解为:

$$x(t) = 1.159\ 941 \sin t - 0.100\ 04 \sin(3t)$$

低温气动高压截止阀(KDJ641Y-300P)开启动态响应过程如图 3 所示。

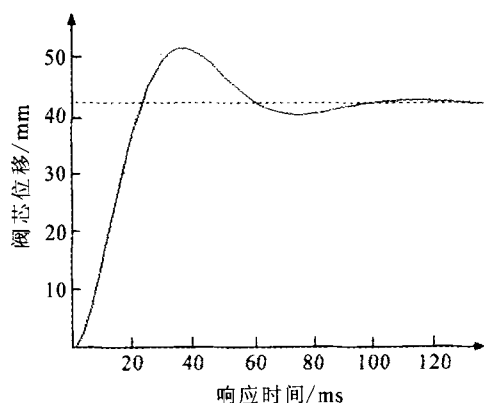


图 3 低温气动高压截止阀开启动态响应过程

Fig. 3 Opening dynamic response of high-pressure cryogenic pneumatic stop valve

根据图 4, 该阀门开启过程需要大约 27 ms; 在此之后, 由于弹簧力 ($K_s x + K_s x_0$) 作用, 产生一个二次振荡, 并随着时间逐渐减弱; 随着阀门开启, 其入射角 ($\cos\theta$, $0 \leq \theta \leq 90^\circ$) 变大, 稳态液动力逐渐减为零, 在操作压力作用下阀芯维持在固定位置, 阀门达到稳定状态。

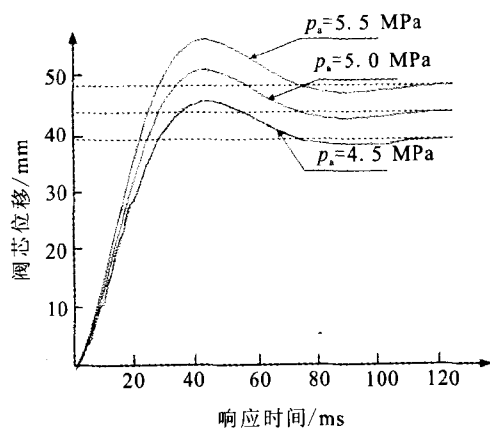


图 4 操作气压力与阀芯位移的影响关系

Fig. 4 Operation gas pressure versus valve plug displacement

3.2 阀门开启的主要影响因素分析

选用与实际工程使用关系密切的主要影响因素, 对阀门开启时间的影响程度进行分析, 并相应提出改进措施。

3.2.1 操作气压力

操作气压力与阀芯位移的影响关系如图 4 所

示。根据图 4 可知: 当操作气压力增大, 驱动力变大, 阀门响应速度变快, 开启时间减小; 当操作气压力减小, 驱动力变小, 阀门响应速度变慢, 开启时间延长。操作气压力与阀芯位移成正比关系。

3.2.2 弹簧刚度

弹簧刚度与阀芯位移的影响关系如图 5 所示。根据图 5 可知当弹簧刚度减小, 预紧力不变的情况下, 主阀的运动位移将变短, 阀芯运动变快, 但是变化范围很小。弹簧刚度与阀芯位移成反比关系。弹簧力增加的幅度也是在很小的范围之内, 对阀芯的运动速度的影响很小。

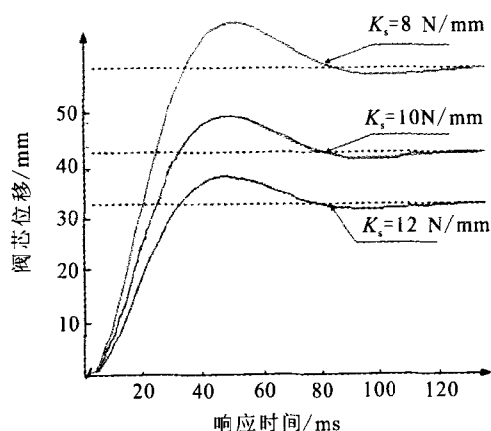


图 5 弹簧刚度与阀芯位移的影响关系

Fig. 5 Spring stiffness versus valve displacement

3.2.3 介质压力

介质压力与阀芯位移的影响关系如图 6 所示。根据图 6 可知, 当介质压力增大时, 其稳态静压力变大, 作用于阀芯的驱动力变小, 从而导致阀芯启动加速度变小, 阀门响应速度变慢, 开启时间变长。介质压力与阀芯位移成反比关系。

3.3 阀门动态响应改进措施

针对以上主要影响因素, 为缩短低温气动阀的开启响应时间, 可以得出以下改进措施:

3.3.1 提升操作气压力

由于操作气压力与阀门开启速度成正比, 因此可以通过增加操作气压力值来提升阀门开启速度。但是由于考虑到操作气供应问题、气密性问题、材料强度及气动阀操作气容积承压能力等, 应根据实际情况合理设计操作气体的许用压力。

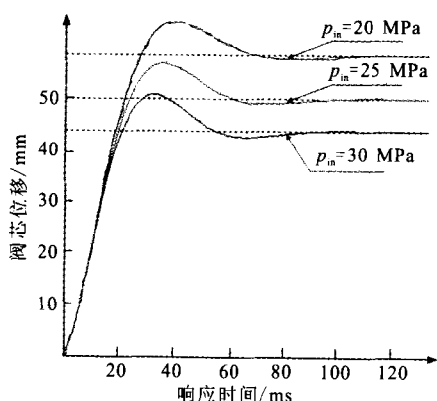


图6 介质压力与阀芯位移的影响关系

Fig. 6 Medium pressure versus valve plug displacement

3.3.2 合理设计介质压力

由于介质压力与阀门开启速度成反比,因此可以通过降低介质压力值来提升阀门开启速度。但是由于考虑到工作介质输送需要、密封性要求以及阀门结构强度等,应根据实际情况合理设计介质许用压力。

3.3.3 合理选择弹簧刚度

由于弹簧刚度与阀门开启速度成反比,因此可以通过降低弹簧刚度值来提升阀门开启速度,但是降低弹簧刚度,影响到阀门预紧力,从而影响阀门密封。为此,在弹簧设计时,需要在弹簧刚度和预紧力之间寻找一个最优的值。在满足预压缩量的前提下,尽可能减小弹簧刚度,从而达到最快的响应时间。

4 结束语

在对低温气动阀的工作原理分析基础上,从力学平衡角度出发,构建了低温气动阀的主阀芯受力方程,建立了阀门的动态响应非线性传递模型;通过引入遗忘因子与加权系数,提出动态递推龙格-库塔求解方法,增加求解阀门动态响应的准确度;从非线性角度分析了低温气动阀的动态响应特性,研究了影响阀门开启时间的主要因

素,提出了提升阀门响应速度的改进方案,并进行了实例的验证与仿真。为缩短低温气动阀响应时间提供了理论方法指导,为增强液体火箭发动机试验过程的可靠性与安全性提供了支持,为提升液体火箭发动机试验技术提供了支撑。

参考文献:

- [1] 王永忠,王宁. 低温阀在液体火箭发动机试验中的应用[J]. 火箭推进, 2004, 30(1): 32-37.
- [2] PACELLA M, SEMERARO Q, ANGLANI A. Adaptive resonance theory-based neural algorithms for manufacturing process quality control [J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(21): 4581-4607.
- [3] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] 刘昆. 分级燃烧循环液氧/液氢发动机系统分布参数模型与通用仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 1999.
- [5] 陶玉静. 液体火箭发动机响应特性研究及稳定性的非线性分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [6] CAVALLO P A, HOSANGADI A, AHUJA V. Transient simulations of valve motion in cryogenic systems [C]// Proceedings of the 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 1-10.
- [7] UZUNHISARCIKLİ Esma. Nonlinear dynamic analysis of mitral valve Doppler signals: surrogate data analysis [J]. Turk J Elec Eng & Comp Sci, 2010, 18(2): 327-337.
- [8] SILVANE Carla, ANTONIO Ritter, VALDIERO Carlos, et al. Nonlinear characteristics systematic study in pneumatic actuators [J]. ABCM Symposium Series in Mechatronics, 2010 (4): 818-826.
- [9] 魏超, 吴维, 林硕, 等. 一种高速脉冲阀动态特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6): 138-143.
- [10] 戴佳, 黄敏超, 余勇, 等. 电磁阀动态响应特性仿真研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 40-48.
- [11] 夏胜枝, 周明, 李希浩, 等. 高速强力电磁阀的动态响应特性[J]. 清华大学学报, 2002, 42(2): 258-277.
- [12] 富明慧, 梁华力. 一种改进的精细-龙格库塔法[J]. 中山大学学报, 2009, 48(5): 1-5.

(编辑: 马 杰)