燃气发生器二自由度 H。自适应压强控制研究*

芦海洋1, 兰飞强1, 曹军伟1, 王 曦2

(1. 中国空空导弹研究院,河南洛阳 471009;2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院,北京 100191)

摘 要:为了解决由滑动板调节角度和空腔自由容积引起的燃气发生器压强时变特性的控制问题, 设计了二自由度H_a自适应控制器。首先,建立燃气发生器数学模型,并提出根据标准二阶线性模型建 立燃气发生器归一化线性变参数(LPV)系统的方法。其次,假设燃气发生器系统固有频率不变,通过 最小二乘辨识方法获得在不同工作点的虚拟阻尼系数分布。再其次,针对归一化LPV系统,设计了两个 胞点的二自由度H_a控制器,在两个控制器胞点之间,根据虚拟阻尼系数实时求解控制参数。最后,给 出了二自由度H_a自适应控制器输入信号量纲变换方法。仿真结果表明,燃气发生器LPV系统辨识精度 高,二自由度H_a自适应控制器具有不超调、快速控制特性和良好的抗噪声干扰能力。

关键词:二自由度H_a控制;自适应控制;LPV系统;增益调度;燃气发生器;最小二乘辨识 中图分类号:V433 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2021) 12-2838-09 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200154

2-Degree-of-Freedom H_{∞} Adaptive Pressure Control of Gas Generator

LU Hai-yang¹, LAN Fei-qiang¹, CAO Jun-wei¹, WANG Xi²

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to work out the control problem with time-variant characteristic of gas generator pressure, which was caused by sliding plate regulation angle and cavity free volume, a 2-degree-of-freedom H_{∞} adaptive controller was designed. Firstly, the mathematical model of gas generator was established, and on the basis of standard second order linear model, method of establishing normalization linear parameter varying (LPV) system of gas generator was proposed. Secondly, assuming that the natural frequency of gas generator system is constant, the virtual damping coefficient at different working points was obtained by the least square identification method. Thirdly, aiming at normalization LPV system, two 2-degree-of-freedom H_{∞} controllers were designed, between which the control parameters were solved in real time by virtual damping coefficient. Finally, the dimension conversion method of input signal of 2-degree-of-freedom H_{∞} adaptive controller was proposed. The simulation results show that gas generator LPV system has high identification accuracy, and 2-degree-of-freedom H_{∞} adaptive controller has characteristics of fast control with no overshoot and good anti-noise capability.

Key words: 2-degree-of-freedom H_{∞} control; Adaptive control; LPV system; Gain schedule; Gas generator; Least square identification

^{*} 收稿日期: 2020-03-21; 修订日期: 2020-06-16。

通讯作者:芦海洋,硕士,工程师,研究领域为发动机控制技术。

引用格式: 芦海洋, 兰飞强, 曹军伟, 等. 燃气发生器二自由度 H_x自适应压强控制研究[J]. 推进技术, 2021, 42(12):2838-2846. (LU Hai-yang, LAN Fei-qiang, CAO Jun-wei, et al. 2-Degree-of-Freedom H_x Adaptive Pressure Control of Gas Generator[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(12):2838-2846.)

1 引 言

固体火箭冲压发动机为吸气式推进装置,进气 道捕获的空气与燃气发生器出口的燃气在补燃室内 混合燃烧后由尾喷管喷出,可大幅提高发动机比 冲^[1]。通过燃气流量调节方式,实现推力可调,可为 超声速导弹提供更远的飞行距离和更长的飞行时 间。燃气发生器输出的燃气流量与内部压强之间具 有直接相关性,通常通过调节内部压强实现对燃气 流量的控制,可见,燃气发生器压强控制是固体火箭 冲压发动机的一项关键技术,压强控制的好坏会影 响到生成的燃气流量,最终反映在发动机的推力输 出品质上。

燃气发生器内压强的动态过程具有时变性,与 喉部面积和空腔自由容积有关,如何克服燃气发生 器时变特性对压强控制造成的不良影响成为控制器 设计的难点。高校和科研院所开展了相关研究,燃 气发生器压强控制可分为开环控制和闭环反馈控 制,开环控制严重依赖指令与控制对象本身的解析 关系,控制系统欠缺鲁棒性,当控制对象稍微发生改 变,其控制行为也将改变,而闭环反馈控制可弥补以 上不足。牛文玉^[2]介绍了3种反馈控制方法:PID反 馈控制、2阶PID控制和2阶模糊PID控制。PID反馈 控制采用遗传算法对 PID 控制参数进行优化,以取得 较好的控制品质;2阶PID控制和2阶模糊PID控制采 用PI和PD双通道的设计思路,区别在于,2阶PID控 制参数仍采用传统结构,而2阶模糊控制在2阶PID 控制的基础上加入了模糊规则,以拓展2阶PID控制 在非线性和复杂系统中的应用。之后相关研究则大 多围绕模糊 PI/PID 进行,包括:聂聆聪等^[3]、何坤等^[4] 在压强闭环反馈中引入了模糊积分控制,柴金宝 等^[5-6]提出了基于Fuzzy-PI双模结构和基于人工蜂群 算法优化的模糊控制方法研究,在一定程度上解决 了PID 控制在实际工程的应用问题,利用模糊规则达 到自适应控制的目的。刘源翔等[7]则提出了另外一 种解决线性自抗干扰控制器,补偿了系统参数波动 对输出的影响。这些控制方法大多针对单个工作点 设计,在整个工作范围较难获得一致性较好的控制 性能。

为解决具有时变特性对象的控制问题,另外一 种设计思路是采用变增益的方法,针对不同设计点 设计控制器参数,并通过增益调度的形式实现自适 应控制。变增益控制从工程角度出发,最先应用在 传统 PID 控制方法中,通过增益调度,实时获得当前

可行的控制参数,在工程应用中取得了较好的效果。 然而,该方法依赖工程经验和工作点的选取,也与对 象的复杂度有关,通常其控制效果在工作点表现较 好,而在工作点之外很难取得统一的控制效果,缺乏 理论支撑。为解决增益调度在工程中的应用问题, 20世纪90年代首先由Shamma提出了线性变参数 (LPV)系统的变增益控制理论^[8+9],并给出了采用传 统变增益控制需要满足的基本条件,在此基础上,大 量相关理论被提出,取得了广泛应用。LPV系统控制 理论很快便被引入到鲁棒最优控制理论中,李文 强^[10], Apkarian 等^[11-12]通过线性分式变换(LFT)将变 增益控制器的设计转变为标准鲁棒控制器的设计问 题,提出了鲁棒变增益控制的新观点,这些设计方法 很快被应用在航天器控制[13-14]、飞行器控制[15-16]和航 空发动机控制[17]中。然而,在燃气发生器控制器设 计研究领域,鲜少有鲁棒控制的相关研究,自适应鲁 棒控制研究则更少。

本文基于 LPV 系统控制和二自由度鲁棒控制理 论,提出利用标准二阶线性模型建立燃气发生器归 一化 LPV 系统的方法,通过最小二乘辨识方法获得 燃气发生器不同工作点处的虚拟阻尼系数,针对归 一化 LPV 系统设计并获得两个胞点的二自由度 H_{*}控 制器,根据虚拟阻尼系数实时解算对应工作状态下 的控制器参数,实现燃气发生器压强的自适应控制。

2 燃气发生器数学模型

2.1 非线性模型

燃气发生器腔内压强的建立过程满足如式(1) 所示的微分方程

$$\frac{\mathrm{d}p_{g}}{\mathrm{d}t} = \frac{R_{g}T_{g}}{V_{g}} \left(\left(\rho - \frac{p_{g}}{R_{g}T_{g}} \right) \alpha p_{g}^{n} A_{b} - \frac{p_{g}A_{\iota}}{C^{*}} \right)$$
(1)

式中 p_s 为燃气发生器压强, ρ 为富燃药密度, R_s 为燃气气体常数, V_s 为空腔自由容积, T_s 为燃气总温, α 为富燃药燃速系数, A_b 为药柱燃烧型面,n为推进剂 压强指数, A_i 为燃气发生器喉部面积, C^* 为富燃药特 征速度。

燃气发生器自由容积 V_g通过式(2) 所示的微分 方程得到

$$\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t} = \alpha p_{\mathrm{g}}{}^{n} A_{\mathrm{b}} \tag{2}$$

分析式(1)可知,燃气发生器喉部面积A,不仅影响压强 p_g稳态数值,也在一定程度上影响其动态过程,燃气发生器自由容积 V_g主要影响压强 p_g动态过程,对压强稳态数值影响较小。

2.1.1 喉部面积A₁对压力的影响

燃气发生器喉部面积A₁与滑动板调节角度r_a有 关,r_a调节范围为-18°~+18°。为分析滑动板调节角 度对压强的影响程度,将空腔自由容积V_g设定为 0.0265m³固定容积,通过设定不同工作点查看滑动板 调节的影响,从最小-18°到最大+18°,每隔1°取一 个工作点,并在每个工作点处输入-0.1°的小阶跃信 号,燃气发生器压强响应曲线如图1所示。可以看 出,滑动板调节角度对压强稳态和动态都有影响,表 现为:滑动板调节角度工作点处于10°以上时,压强 几乎对滑动板小扰动阶跃输入不作响应;工作点从 10°向-11°迁移时,压强响应曲线的稳态值逐渐变 大,响应时间逐渐加长;滑动板工作点从-11°向-18° 迁移时,压强响应曲线的稳态值逐渐变小,响应时间



Fig. 1 Pressure response curve with small step input $(r_a \in [-18 \quad 18]^\circ, V_e = 0.0265 \text{ m}^3)$

2.1.2 空腔自由容积对压力的影响

燃气发生器空腔自由容积的变化范围较大,V_g初始值为0.0015m³,当药柱燃烧完毕时,为0.075m³。为 了分析空腔自由容积对压力影响程度,设定了不同 的容积工作点,从最小0.0015m³到最大0.0715m³,每 隔 0.005m³取一个工作点,在每个容积工作点处,设定 滑动板调节角度 r_a在 - 3°附近输入 - 0.1°的小阶跃信 号。燃气发生器压强响应曲线如图 2 所示,可以看 出,空腔自由容积几乎只影响压强动态响应过程,空 腔容积越小,压强动态过程越快,空腔容积越大,压 强动态过程越慢。



Fig. 2 Pressure response curve with small step input $(V_r \in [0.0015 \quad 0.0715] \text{ m}^3, r_a = -3^\circ)$

2.2 线性模型

假设归一化 LPV 系统采用标准二阶线性模型结构,通过最小二乘辨识方法得到系统虚拟阻尼系数 分布,并以虚拟阻尼系数作为调度变量,计算获得不同工作点处的线性模型。

2.2.1 最小二乘辨识方法

标准二阶传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{w_{n}^{2}}{s^{2} + 2\xi w_{n}s + w_{n}^{2}}$$
(3)

式中w_n为系统固有频率, *ξ*为阻尼系数。

将式(3)所述的连续传递函数变换为离散形式, 表示为

$$G(z) = \frac{\overline{p}_{g}(z)}{\overline{r}_{a}(z)} = \frac{w_{n}^{2}T_{s}^{2}z^{-2}}{(w_{n}^{2}T_{s}^{2} - 2\xi w_{n}T_{s} + 1)z^{-2} + 2(\xi w_{n}T_{s} - 1)z^{-1} + 1}$$
(4)

式中 T_s 为采样间隔,z为离散因子, \bar{p}_s 为归一化压强, \bar{r}_a 为归一化滑动板调节角度,根据 \bar{p}_s 和 \bar{r}_a 的历史数据便可估计得到式(3)中的阻尼系数,其归一化计算过程如下

$$\bar{p}_{g} = \frac{p_{g}}{p_{glsteady}}, \bar{r}_{a} = \frac{r_{a}}{r_{alsteady}}$$
(5)

式中 p_{g} 和 r_{a} 分别是实测的压强和滑动板调节角度, $p_{glsteady}$ 和 $r_{alsteady}$ 分别是稳态条件下的压强和滑动板

调节角度。

对式(4)进行简单的数学变换,可得 $2T_{s}w_{n}\left(\overline{p}_{g|k-1}-\overline{p}_{g|k-2}\right)\xi =$ $T_{s}^{2} w_{n}^{2} \bar{r}_{alk-2} - \left(\bar{p}_{glk} - 2\bar{p}_{glk-1} + \left(1 + T_{s}^{2} w_{n}^{2}\right)\bar{p}_{glk-2}\right) (6)$ 式中 $\bar{p}_{sk-2} = \bar{p}_{s}(z) z^{-2}$ 表示 k-2 时刻的输出数值, $\bar{p}_{_{etk-1}} = \bar{p}_{_e}(z) z^{-1}$ 表示 k-1 时刻的输出数值, $\bar{p}_{_{etk}} =$ $\overline{p}(z) z^{\circ}$ 表示 k 时刻的输出数值, $\overline{r}_{ak-2} = \overline{r}_{a}(z) z^{-2}$ 表示 k-2时刻的输入数值。

假设

$$\overline{\boldsymbol{Y}}_{k} = \left[\overline{p}_{g|1}, \cdots, \overline{p}_{g|k}\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\overline{\boldsymbol{Y}}_{k-1} = \left[0, \overline{p}_{g|1}, \cdots, \overline{p}_{g|k-1}\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\overline{\boldsymbol{Y}}_{k-2} = \left[0, 0, \overline{p}_{g|1}, \cdots, \overline{p}_{g|k-2}\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\overline{\boldsymbol{U}}_{k-2} = \left[0, 0, \overline{r}_{a|1}, \cdots, \overline{r}_{a|k-2}\right]^{\mathrm{T}}$$

式(6)可变换为矩阵乘积形式

 $\mathcal{E} = U^{\dagger}V$

(8)

其中

$$U = 2T_{s}w_{n} (Y_{k-1} - Y_{k-2})$$
$$V = T_{s}^{2}w_{n}^{2}\overline{U}_{k-2} - (\overline{Y}_{k} - 2\overline{Y}_{k-1} + (1 + T_{s}^{2}w_{n}^{2})\overline{Y}_{k-2})$$
$$U^{\dagger} = (U^{T}U)^{-1}U^{T}$$

2.2.2 虚拟阻尼系数估计

通过辨识获得滑动板调节0°和空腔自由容积 0.0015m^3 工作点下的阻尼系数 ξ 和系统固有频率 w_{m}

 $\xi = 0.837, w_n = 64.686 \text{ rad/s}$

本文假设系统固有频率不变,待辨识的参数只 有阻尼系数,使得传递函数参数只与虚拟阻尼有关, 有利于LPV系统建模和控制器的设计。基于以上假 设,辨识得到其它工作点下的虚拟阻尼系数,工作点 描述如下

r_a = -1°:-1°:-18°,滑动板调节角度从-1°到-18°, 每隔-1°取一个工作点;

V_a = 0.0015: 0.005: 0.0715m³, 空腔自由容积从 0.0015m³到 0.0715m³,每隔 0.005m³取一个工作点。

不同工作点下的虚拟阻尼系数分布如图3所示, 随着滑动板调节负向角度和空腔自由容积增大,虚 拟阻尼系数增大,表明系统的动态响应过程越来越 缓慢,与2.1节的分析结果一致。



Fig. 3 Virtual damping coefficient

2.2.3 归一化 LPV 系统

标准2阶传递函数式(3)的其中1种状态空间实 现形式为

$$\dot{\bar{x}} = \begin{bmatrix} a & \frac{-(a^2 + 2\xi w_n a + w_n^2)}{w_n^2} \\ w_n^2 & -a - 2\xi w_n \end{bmatrix} \vec{x} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \vec{r}_a \quad (9)$$

$$\vec{p}_g = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{x}$$

式中a可设定为任意数值(传递函数形式中a会 被消去),本文假设a=1,x是状态变量,不对应实际物 理变量。

将式(9)中的阻尼系数*E*提取出来,作为单独调 度变量,便获得下式

$$\dot{\bar{x}} = \left(\begin{bmatrix} a & \frac{-(a^2 + w_n^2)}{w_n^2} \\ w_n^2 & -a \end{bmatrix} + \xi \begin{bmatrix} 0 & \frac{-2a}{w_n} \\ 0 & -2w_n \end{bmatrix} \right) \bar{x} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{r}_a$$

$$\bar{p}_g = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{x}$$
(10)

式中ξ∈[0.869 97.97]。

根据线性组合关系,可以确定燃气发生器 LPV 系统模型的描述形式

$$S(\xi) = S_0 + \xi S_1 \tag{11}$$

式中
$$S(\xi) = \begin{bmatrix} A(\xi) & B(\xi) \\ C(\xi) & 0 \end{bmatrix}, S_0 = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & 0 \end{bmatrix}, S_1 =$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{1} & \boldsymbol{B}_{1} \\ \boldsymbol{C}_{1} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}, 具体参数为$$
$$\boldsymbol{A}_{0} = \begin{bmatrix} a & \frac{-(a^{2} + w_{n}^{2})}{w_{n}^{2}} \\ w_{n}^{2} & -a \end{bmatrix}, \boldsymbol{A}_{1} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-2a}{w_{n}} \\ 0 & -2w_{n} \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{B}_{0} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{B}_{1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{C}_{0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{C}_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$$

在所有工作点下,式(11)描述的燃气发生器LPV 系统模型精度保持在99%以上,线性模型建模误差 很小,高精度的线性模型有利设计出更符合真实系统的控制器,如图4所示。



Fig. 4 LPV system model precision

3 二自由度H_a自适应控制器

3.1 二自由度控制结构

二自由度控制结构如图 5 所示, \bar{p}_{e} 为归一化压强 指令, \bar{p}_{g} 为归一化压强反馈, \bar{r}_{a} 为归一化滑动板调节 位置,e为控制误差, z_{1} 为对 \bar{r}_{a} 加权后的观测输出, z_{2} 为 对e加权后的观测输出,G为燃气发生器归一化 LPV 系统模型(未考虑电机模型,相较压强的变化过程, 电机动态过程可近似忽略),K为控制器模型, W_{1} 为控 制输出u的加权传递函数,用于评估控制器的抗噪声 干扰能力, W_{2} 为控制误差e的加权传递函数,用于评 估压强反馈的响应品质。



Fig. 5 2-degree-of-freedom control structure for LPV system

增广控制对象的控制结构如图 6 所示,根据模型 K,G,W₁,W₂的线性组合关系,将G,W₁,W₂增广成控制 对象 P,通过选择合适的传递函数 W₁和 W₂,设计得到 控制器 K,使得观测输出 z₁和 z₂最小。

G, W1, W2的状态空间方程记为

$$\dot{x}_{w1} = A_{w1}x_{w1} + B_{w1}\bar{r}_{a}$$

$$W_{1}: z_{1} = C_{w1}x_{w1} + D_{w1}\bar{r}_{a}$$
(13)

$$W_{2}:\frac{\dot{x}_{w2}}{z_{2}} = A_{w2}x_{w2} + B_{w2}e$$
(14)
$$z_{2} = C_{w2}x_{w2} + D_{w2}e$$



Fig. 6 Control structure with augmented system

增广控制对象P的线性模型可以表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}_{g} \\ \dot{\bar{x}}_{w1} \\ \dot{\bar{x}}_{w2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{g}(\xi) & 0 & 0 \\ 0 & A_{w1} & 0 \\ -B_{w2}C_{g}(\xi) & 0 & A_{w2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{x}_{g} \\ x_{w1} \\ x_{w2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & B_{g}(\xi) \\ 0 & B_{w1} \\ B_{w2} & -B_{w2}D_{g}(\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{p}_{c} \\ \overline{p}_{c} \\ \overline{p}_{c} \\ \overline{p}_{c} \\ \overline{p}_{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C_{w1} & 0 \\ -D_{w2}C_{g}(\xi) & 0 & C_{w2} \\ 0 & 0 & 0 \\ C_{g}(\xi) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{x}_{g} \\ x_{w1} \\ x_{w2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & D_{w1} \\ D_{w2} & -D_{w2}D_{g}(\xi) \\ I & 0 \\ 0 & D_{g}(\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{p}_{c} \\ \overline{r}_{a} \end{bmatrix}$$
(15)

3.2 归一化 LPV 系统的控制器设计

通过频域分析和多次仿真,选定的控制输出加 权函数和控制误差加权函数 W₁(s)和 W₂(s)分别如下 所示

$$W_1(s) = \frac{4.8s + 0.4}{0.0024s + 1} \tag{17}$$

$$W_2(s) = \frac{0.64s + 1.6}{s + 0.001} \tag{18}$$

求解得到两个胞点的二自由度 H_* 控制器,分别 对应最小阻尼 ξ_{min} 的控制器 $K_{\xi_{min}}$ 和最大阻尼 ξ_{max} 的控制器 $K_{\xi_{min}}$,这两个胞点控制器分别记为

$$\dot{x}_{k1} = \boldsymbol{A}_{k1} \boldsymbol{x}_{k1} + \boldsymbol{B}_{k1} \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{p}}_{c} \\ -\bar{\boldsymbol{p}}_{g} \end{bmatrix}$$

最小阻尼控制器 $K_{\xi_{min}}$:
$$\bar{\boldsymbol{r}}_{a} = \boldsymbol{C}_{k1} \boldsymbol{x}_{k1} + \boldsymbol{D}_{k1} \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{p}}_{c} \\ -\bar{\boldsymbol{p}}_{g} \end{bmatrix}$$
(19)

$$\begin{split} \dot{x}_{k2} &= A_{k2} x_{k2} + B_{k2} \begin{bmatrix} \overline{p}_{c} \\ \overline{p}_{g} \end{bmatrix} \\ (20) \\ &= \overline{r}_{a} = C_{k2} x_{k2} + D_{k2} \begin{bmatrix} \overline{p}_{c} \\ \overline{p}_{g} \end{bmatrix} \\ (21) \\ &= \begin{bmatrix} -3145.474 & 1319.193 & -448.504 & 11.991 \\ -1611.447 & -0.281 & 0.325 & -2.285 \\ 2106.499 & -0.424 & -1.19 & -22.238 \\ -180306.77 & 43.61 & -4.148 & -623.608 \end{bmatrix}, \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 3033.803 \\ 1.522 & 1608.688 \\ 0.651 & -2105.478 \\ -145.293 & 180307.006 \end{bmatrix}, \\ &C_{k1} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.067 & 0.182 & -0.011 \end{bmatrix}, D_{k1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ &A_{k2} &= \begin{bmatrix} -12034.224 & 1320.972 & -448.816 & 11.394 \\ -1595.775 & -0.284 & 0.326 & -2.284 \\ 2089.273 & -0.421 & -1.191 & -22.239 \\ -179089.579 & 43.366 & -4.106 & -623.526 \end{bmatrix}, \\ &B_{k2} &= \begin{bmatrix} 0 & -373.879 \\ 1.522 & 1599.357 \\ 0.651 & -2090.24 \\ -145.293 & 179085.441 \end{bmatrix}, \end{split}$$

$$K = \frac{\xi_{\max} - \xi}{\xi_{\max} - \xi_{\min}} K_{\xi_{\min}} + \frac{\xi - \xi_{\min}}{\xi_{\max} - \xi_{\min}} K_{\xi_{\max}}$$
(21)

3.3 燃气发生器系统控制结构

二自由度 H_{*}自适应控制器是针对归一化 LPV 系 统设计的,控制器具有归一化属性,在控制实际带量 纲变量时,需要对控制器输入进行量纲变换,使得控 制器输出与滑动板调节角度量纲对齐。燃气发生器 系统控制结构如图 7 所示,包含 2 层映射关系:第1 层 映射是滑动板调节角度和空腔自由容积到虚拟阻尼 系数和控制器输入的映射,第2 层映射是虚拟阻尼系 数到控制器参数矩阵的映射。第2 层映射关系见式 (21),第1 层映射计算过程如下:

控制器输入

$$r_{a}^{*}\begin{bmatrix}\overline{p}_{c}\\\overline{p}_{g}\end{bmatrix} = r_{a}^{*}\begin{bmatrix}1\\\underline{p}_{g\Delta}\\\overline{p}_{c\Delta}\end{bmatrix} = r_{a}^{*}\begin{bmatrix}1\\\underline{p}_{g} - p_{g0}\\\overline{p}_{c} - p_{g0}\end{bmatrix}$$
(22)

控制器输出

$$r_{a}(s) = r_{a}^{*}K\left(\xi\right) \begin{bmatrix} \overline{p}_{c} \\ \overline{p}_{g} \end{bmatrix}$$
(23)

逻辑切换模块

$$V_{g}^{*} = \begin{cases} V_{g}^{*}, |p_{c\Delta} - p_{g\Delta}| \leq 0.3 \text{MPa} \\ V_{g}, |p_{c\Delta} - p_{g\Delta}| > 0.3 \text{MPa} \end{cases}$$
(24)

估计虚拟阻尼系数

$$\xi = f_3\left(r_a^*, V_g^*\right)$$

式中 p_{e} 为压强指令, p_{g} 为压强反馈, p_{g0} 为滑动板 调节角度等于0时的稳态压强, $p_{g0} = f_{1}(r_{a} = 0, V_{g}), r_{a}^{*}$



Fig. 7 Control sctructure for nolinear system of gas generator

为稳态条件下的滑动板调节角度, $r_a^* = f_2(p_{c\Delta}, V_g), V_g^*$ 为逻辑切换模块输出,控制误差在0.3MPa以外时,控制参数实时计算,在0.3MPa以内时,控制参数保持不变,减少控制参数频繁切换。

4 仿真实验与结果分析

4.1 线性模型控制

 $K_{\xi_{min}}, K_{\xi_{max}}$ 分别是最小阻尼控制器、最大阻尼控制器, $G_{\xi_{min}}, G_{\xi_{max}}$ 分别是最小阻尼系统、最大阻尼系统。 单独 $K_{\xi_{min}}, K_{\xi_{max}}$ 对単独 $G_{\xi_{min}}$ 和 $G_{\xi_{max}}$ 的控制效果如图8所示, 可见, $K_{\xi_{min}}$ 对 $G_{\xi_{min}}$ 的控制效果较好, 而对 $G_{\xi_{max}}$ 的控制效果较差, 有大幅超调; $K_{\xi_{max}}$ 对 $G_{\xi_{min}}$ 和 $G_{\xi_{max}}$ 的控制均不存在超调, 但是却增加了对 $G_{\xi_{min}}$ 的调节时间, 具体控制性能如表1所示。



Fig. 8 Control effect of $K_{\xi_{\min}}$ and $K_{\xi_{\max}}$ controller with fixed parameter

可见,当采用 $K_{\xi_{mn}}$ 或 $K_{\xi_{mn}}$ 进行单独控制时,其各 自效果是有限的,需要根据燃气发生器工作状态实 时解算控制器参数,满足自适应控制的需要。仿真 得到二自由度 H_{s} 自适应控制器对 $G_{\xi_{mn}}, G_{\xi_{mn}}$ 的控制效 果,如图9所示,实现了系统低阻尼时的快速控制,同 时实现了大阻尼时的无超调控制。

Table 1 Control performance comparison between K_{ε} and

$K_{\xi_{max}}$		
	$K_{arepsilon_{\min}}$	$K_{\xi_{ ext{max}}}$
$\pmb{G}_{\xi_{\min}}$	Settling time t_s =3.25s	Settling time $t_s = 15.5$ s
	Overshoot $\sigma\% = 0\%$	Overshoot $\sigma\% = 0\%$
$G_{\xi_{\max}}$	Settling time t_s =21.74s	Settling time $t_s = 13.15$ s
	Overshoot $\sigma\%$ = 41%	Overshoot $\sigma\% = 0\%$



Fig. 9 Control effect of 2-degree-of-freedom H_{∞} adaptive K controller

4.2 非线性模型控制

在仿真实验中,给入不同的压强阶跃指令信号: 0.5~3MPa,3~5MPa,5~8MPa,8~0.5MPa,0.5~5MPa,8~ 5MPa等不同阶跃形式,以充分验证不同阶跃量下的 燃气发生器压强响应品质,燃气发生器二自由度 H_z 自适应控制器与原 PID 控制器的控制效果如图 10所 示。超调方面:容积较小时,两种控制方法均不存在 超调,而容积较大时,PID 控制器的超调量随着容积 增大而变大,而二自由度 H_z自适应控制器不存在超 调。响应时间方面:容积较小时,二自由度 H_z自适应 控制器能够更快地实现压强控制,当容积较大时,两



Fig. 10 Control effect comparison between 2-degree-offreedom H_{∞} adaptive controller and PID controller

段,PID 控制下的压强反馈急剧下降,有小幅超调,而 二自由度 H_{*}自适应控制下的压强反馈可缓慢下降, 无超调。总体上,二自由度 H_{*}自适应控制器要优于 原 PID 控制器,可实现无超调条件下的压强快速 控制。

阻尼系数的变化如图 11 所示,整体上,随着空腔 自由容积的增加,虚拟阻尼系数逐渐变大(与空腔自 由容积增大有关);局部上,虚拟阻尼系数随着滑动 板的转动角度进行灵活的参数调整,低压下更小,高 压下更大(与滑动板调节角度有关)。



Fig. 11 Variation trend of virtual damping coefficient ξ

如图 12 所示是在不同阶跃输入下,燃气发生器 二自由度 H_{*}自适应控制器与原 PID 控制器的抗噪声 干扰能力的对比。可以看到,PID 控制器的抗噪声干 扰能力明显不足,控制输出中含有较强的干扰噪声, 低压段(对应滑动板调节角度 0°以上)尤其明显,且 PID 控制器输出具有较大的尖刺信号,电机很难快速 跟随这样的大尖刺信号,不利于电机伺服控制。而 二自由度 H_{*}控制在低压段内的控制输出抗干扰噪声 的能力较强,控制输出不存在大尖刺信号。



Fig. 12 Anti-noise capacity comparison between 2-degreeof-freedom H_{∞} adaptive controller and PID controller

5 结 论

针对燃气发生器时变特性的控制研究,本文得

出以下结论:

(1)采用最小二乘辨识方法获得的归一化LPV 系统模型精度大于99%,使得针对线性模型设计的控 制器应用在非线性模型中时,可取得一致性较好的 控制效果。

(2)保持系统固有频率不变,只改变虚拟阻尼系数的建模方法减少了系统的调度变量,降低了LPV 系统建模和控制器设计的难度。

(3) 虚拟阻尼系数通过实时估计,调度当前状态下控制参数,实现对燃气发生器的优化控制,与 原 PID 控制器相比,二自由度 H_{*}自适应控制器加强 了系统的抗噪声干扰能力,并实现了快速无超调 控制。

借鉴前期工作,后续研究将关注可变固有频率 w_n和可变阻尼系数 *ξ* 双调度变量的 LPV 建模和控制 器设计方法,期望获得更好更一致的控制效果。

参考文献

- [1] 邵明玉.复合调节固体火箭冲压发动机控制及飞行/ 推进综合控制方法研究[D].西安:西北工业大学, 2016.
- [2] 牛文玉. 燃气流量可调的固体火箭冲压发动机控制方 法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [3] 聂聆聪,刘志明,刘源祥.流量可调燃气发生器压力 闭环模糊控制算法[J].推进技术,2013,34(4):551-556. (NIE Ling-cong, LIU Zhi-ming, LIU Yuan-xiang. Pressure Close Loop Fuzzy Control Method of a Flow Adjustable Gas Generator [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(4):551-556.)
- [4]何坤,陈雄,郑健,等.模糊PI控制算法在燃 气发生器上的应用[J].推进技术,2017,38(8): 1878-1884. (HE Kun, CHEN Xiong, ZHENG Jian, et al. Fuzzy PI Control Algorithm for Gas Generator [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017,38(8):1878-1884.)
- [5] 柴金宝,陈 雄,余业辉,等.基于Fuzzy-PI双模控 制器的燃气发生器压强控制算法研究[J].推进技术, 2018,39(5):1151-1156. (CHAI Jin-bao, CHEN Xiong, YU Ye-hui, et al. Research on Pressure Control Control Algorithm of Gas Generator Based on Fuzzy-PI Dual Mode Controller[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018,39(5):1151-1156.)
- [6] 柴金宝,陈 雄,周景亮,等.基于人工蜂群算法优化的燃气发生器压强自适应模糊免疫 PID 控制[J].推进技术,2019,40(2):441-448.(CHAI Jin-bao,CHEN Xiong, ZHOU Jing-liang, et al. Adaptive Fuzzy Immune PID Control for Gas Generator Pressure Based

on Artificial Bee Colony Algorithm Optimization [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40 (2): 441-448.)

- [7] 刘源翔, 聂聆聪,张 皎,等. 基于线性自抗扰控制器的燃气流量可调发生器压强控制算法研究[J]. 推进技术, 2015, 36(12): 1768-1773. (LIU Yuan-xiang, NIE Ling-cong, ZHANG Jiao, et al. Research on Pressure Control Algorithm of a Flow Adjustable Gas Generator Based on Linear Active Disturbance Rejection Control [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36 (12): 1768-1773.)
- [8] Jeff S Shamma, Michael Athans. Guaranteed Properties for Nonlinear Gain Scheduled Control Systems [C]. Austin: Proceeding of the 27th Conference on Decision and Control, 1988.
- [9] Lance H Carter, Jeff S Shamma. Gain-Scheduled Bankto-Turn Autopilot Design Using Linear Parameter Varying Transformations [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1996, 19(5): 1056-1063.
- [10] 李文强.LPV系统鲁棒变增益控制研究及其应用[D]. 长沙:国防科学技术大学,2009.

- [11] Hewing L, Leonhardt S, Apkarian P. H_x Optimal Controller Design with Closed-Loop Positive Real Constraints
 [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2017, 139(9): 57-65.
- [12] Hiroyuki Kajiwara, Pierre Apkarian, Pascal Gahinet. LPV Techniques for Control of an Inverted Pendulum[J]. IEEE Control Systems, 1999, 19(1): 44-54.
- [13] Pierre Apkarian, Jean-Marc Biannic, Pascal Ganinet. Self-Scheduled H_x Control of Missile via Linear Matrix Inequalities [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1995, 18(3): 532-538.
- [14] 张敬婷,吴庆宪,姜长生.巡航导弹鲁棒轨迹线性化 控制器设计[J]. 航空兵器, 2010, (1): 22-26.
- [15] Jean Marc Biannic, Pierre Apkarian, William L Garrard. Parameter Varying Control of a High-Performance Aircraft[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1997, 20(2): 225-231.
- [16] 韩 旭,候明善,姚成法.基于区间系统的鲁棒 H_{*}飞 行控制系统设计[J]. 航空兵器,2007,(3):20-24.
- [17] 李述清,张胜修,周志清,等. 航空发动机 LPV 建模 方法改进[J]. 热能动力工程, 2011, 26(2): 168-170.

(编辑:张 贺)