

基于保护映射理论的航空发动机 LPV/PI 控制

周黎,叶志锋,肖玲斐

(南京航空航天大学 江苏省航空动力系统重点实验室,南京 210016)

摘要:针对具有强非线性特性的航空发动机控制问题,将基于保护映射(Guardian Maps,GM)理论的控制方法应用于航空发动机控制系统设计中。基于某型涡扇发动机非线性模型建立了线性变参数(LPVP)模型;根据保护映射理论设计不同调度参数下的PI(Proportion Integration)控制器,在设计过程中,只需通过给定的初始控制器就可以自动得到满足性能要求的控制器参数集合,避免了在多个平衡点进行控制器设计;以非线性模型为被控对象,采用积分分离PI控制,在飞行包线内的不同工作点进行仿真验证。结果表明:基于保护映射理论的控制方法在解决航空发动机控制系统的非线性问题时具有显著效果。

关键词: LPV模型;PI控制;保护映射理论;航空发动机

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.06.005

LPV/PI Control of Aeroengine Based on Guardian Maps Theory

ZHOU Li, YE Zhi-feng, XIAO Ling-fei

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: The control method based on the Guardian Maps(GM)theory was applied to the design of aeroengine control system for the aeroengine control problem with strong nonlinear characteristics. A linear parameter varying (LPV)model was established based on the nonlinear model of a turbofan engine. The PI (Proportion Integration) controller with different scheduling parameters was designed based on GM theory. In the design process, a set of controller parameters could be automatically obtained to meet the performance requirements by a given initial controller, so that the design of the controller at multiple balanced points was avoided. Taking the nonlinear model as the controlled object, the simulation was carried out at different working points in the flight envelope using the integral separated PI control. The results show that the control method based on GM theory is effective in solving the nonlinear problem of aeroengine control system.

Key words: linear parameter varying model; proportion integration control; guardian maps theory; aeroengine

0 引言

航空发动机是1个强非线性复杂系统,在范围宽广的飞行包线内工作时,其工作状态随外界变化而不断变化^[1]。传统非线性系统的控制方法为变增益控制方法,其基本思想是对非线性模型中的一些稳定设计点进行线性化以获得对应各点的线性模型,然后针对各线性模型分别设计控制器,运用拟合或切换的方法将各控制器联系起来^[2]。在传统变增益控制器的设计过程中,每个设计点设计的控制器都能满足控制系统的性能要求,但是难以保证系统的全局控制性能^[3]。同

时传统变增益控制方法对所选取的设计点数量依赖程度较大,由于所选取的设计点数目越多,控制效果越好,采用这种控制器的设计过程工作量较大。目前,航空发动机控制方法的研究成果较多,但在工程实践中,应用最多的仍是原理简单、可靠性高和易于实现的PID(Proportion Integration Differentiation)控制^[4]。常用的PID控制器的整定方法有经验法和响应曲线法等,但这些方法仅能使系统在设计点具有较好的动态响应,无法保证整个系统的控制性能。

Saydy等^[5]提出的保护映射理论可分析参数化矩阵族和多项式的广义稳定性;文献[6]将保护映射理论

收稿日期:2017-12-22 基金项目:江苏省优势学科资助项目资助

作者简介:周黎(1994),女,在读硕士研究生,研究方向为航空发动机控制;E-mail:zhouli9311@163.com。

引用格式:周黎,叶志锋,肖玲斐.基于保护映射理论的航空发动机 LPV/PI 控制[J].航空发动机,2018,44(6):24-30.ZHOU Li, YE Zhifeng, XIAO Lingfei. LPV/PI control of aeroengine based on guardian maps theory [J]. Aeroengine, 2018, 44(6): 24-30.

首次用在飞机控制系统设计中,通过目标稳定区域的确定来表示飞行操纵品质指标;文献[7]将保护映射理论、LQR 技术和遗传算法三者相结合,设计出 1 种新的控制方法;文献[8]将保护映射理论应用在高超声速飞行器的控制方法设计中,使得高超声速飞行器在大范围包线内工作时能够保持稳定。

本文将基于保护映射理论的控制方法应用于航空发动机控制中,其无需在多个设计点分别进行控制器设计,可通过初始控制器直接获得整个调度参数变化范围内的控制器,能够解决传统变增益控制方法所存在的难以保证全局控制性能问题。

1 航空发动机 LPV 模型

航空发动机非线性模型

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u, \rho) \\ y &= g(x, u, \rho)\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $f(g)$ 和 $g(g)$ 是连续可微的, 其 LPV 模型为

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A(\rho)x + B(\rho)u \\ y &= C(\rho)x + D(\rho)u\end{aligned}\quad (2)$$

式中: 状态向量 $x \in \mathbf{R}^n$; 输出向量 $y \in \mathbf{R}^m$; 控制向量 $u \in \mathbf{R}^p$; 调度参数向量 $\rho \in \mathbf{R}^l$, 其值随时间变化不断改变; $A(\rho)$ 、 $B(\rho)$ 、 $C(\rho)$ 和 $D(\rho)$ 为系数矩阵, 其所有元素与 ρ 存在函数关系^[9]。

研究对象为某型双转子涡轮发动机。所采用的发动机参数均为相似归一化后的相对参数, 通过对发动机参数进行相似归一化处理, 可以避免因各物理量之间很大的数量级差别而导致建模精度降低。航空发动机为多变量系统, 其控制系统存在多个通道。输入量仅选择主燃烧室的供油量增量 ΔW_f , 输出量为高压转子转速增量 Δn_h , 状态变量为低压转子转速增量 Δn_l 和高压转子转速增量 Δn_h , 建立线性化模型, 并进行控制器设计。航空发动机的主系统加减速仿真主要包括慢车到中间状态加减速、85%转速到中间状态加减速、中间状态到慢车以及到中间状态遭遇加速等过渡过程^[10]。在控制器设计时所考虑的发动机状态过程为 85%转速到中间状态。

采用的 LPV 建模方法为雅克比 (Jacobian) 线性化建模法^[11], 首先, 选择高度 $H=0$ km、马赫数 $Ma=0$ 的工作点为设计点, 高压转子转速 n_h 为调度参数, 其变化范围为 $[0.85, 1.05]$, 在该区间采用线性化方法^[12]得到不同高压转子转速点的状态变量模型; 然后, 为

提高模型的精确度, 将调度参数 n_h 归一化到 $[0, 1]$ 的范围内, 即 $\tilde{n}_h \in [0, 1]$; 最后, 对状态变量模型的所有系数矩阵进行多项式拟合, 拟合后的模型为

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \begin{bmatrix} a_{11}(\tilde{n}_h) & a_{12}(\tilde{n}_h) \\ a_{21}(\tilde{n}_h) & a_{22}(\tilde{n}_h) \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} b_{11}(\tilde{n}_h) \\ b_{21}(\tilde{n}_h) \end{bmatrix} u \\ y &= [0 \quad 1]x\end{aligned}\quad (3)$$

式中: $x = [\Delta n_l \quad \Delta n_h]^T$; $u = \Delta W_f$; $y = \Delta n_h$ 。

通过大量仿真对比, 并综合模型对拟合精度和效率的要求, 进行 3 阶多项式拟合。 $a_{ij}(\tilde{n}_h)$ 和 $b_{ij}(\tilde{n}_h)$ ($i, j=1, 2$) 拟合后为

$$\begin{aligned}a_{11}(\tilde{n}_h) &= -20.4381\tilde{n}_h^3 + 20.4009\tilde{n}_h^2 - 2.7471\tilde{n}_h - 4.4496; \\ a_{12}(\tilde{n}_h) &= -10.1112\tilde{n}_h^3 + 9.8355\tilde{n}_h^2 - 0.2135\tilde{n}_h + 1.5617; \\ a_{21}(\tilde{n}_h) &= 7.7764\tilde{n}_h^3 - 3.3334\tilde{n}_h^2 - 3.8421\tilde{n}_h + 1.2949; \\ a_{22}(\tilde{n}_h) &= -5.1565\tilde{n}_h^3 - 0.4602\tilde{n}_h^2 + 4.6649\tilde{n}_h - 3.9364; \\ b_{11}(\tilde{n}_h) &= -2.5131\tilde{n}_h^3 + 7.5168\tilde{n}_h^2 - 5.2815\tilde{n}_h - 1.4581; \\ b_{21}(\tilde{n}_h) &= -0.1086\tilde{n}_h^3 - 0.1284\tilde{n}_h^2 + 0.0599\tilde{n}_h + 0.4683\end{aligned}\quad (4)$$

拟合曲线分别如图 1、2 所示。从图中可见, 拟合存在一定误差, 但由于 PI 控制的强鲁棒性, 后续仿真表明其对控制效果的影响较小。

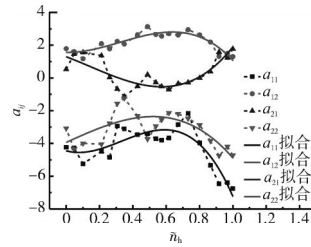


图 1 a_{ij} 的拟合曲线

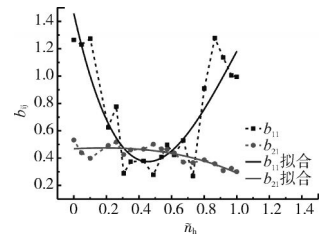


图 2 b_{ij} 的拟合曲线

为了对所建 LPV 模型进行仿真验证, 选择任意 2 个转速点 $n_h=0.9019$ 和 $n_h=0.9840$, LPV 模型和非线性模型在相同阶跃输入下, 计算得到高压转子转速响应曲线分别如图 3、4 所示。

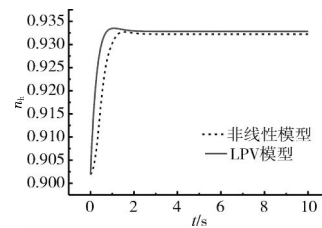


图 3 $n_h=0.9019$ 时模型的高压转子响应曲线

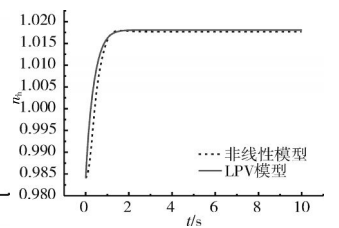


图 4 $n_h=0.9840$ 时模型的高压转子响应曲线

从图3、4中可见,将LPV模型与非线性模型的转速阶跃响应进行比较,跟踪效果较好,虽存在一定的稳态误差,但是稳态误差较小,可利用控制器消除其对控制系统的影响。

2 保护映射理论

矩阵广义稳定性集合 $S(\Omega)$ 定义为

$$S(\Omega) = \{M \in R^{n \times n} : \Lambda(M) \subset \Omega\} \quad (5)$$

式中: Ω 为复平面内的开集; $\Lambda(M)$ 为矩阵 M 的所有特征值的集合^[13]; $S(\Omega)$ 表示所包含的矩阵在 Ω 区域内保持稳定。

定义1: 矩阵 $R^{n \times n}$ 到复数域 C 的映射表示为 v 。 ∂S 表示集合 S 的边界,如果矩阵 $M \in \partial S(\Omega)$ 的充分必要条件为 $v(M)=0$,则映射 v 是 $S(\Omega)$ 的保护映射,其实质为 $n \times n$ 实矩阵上的标量映射^[13]。

保护映射的典型区域如图5所示。

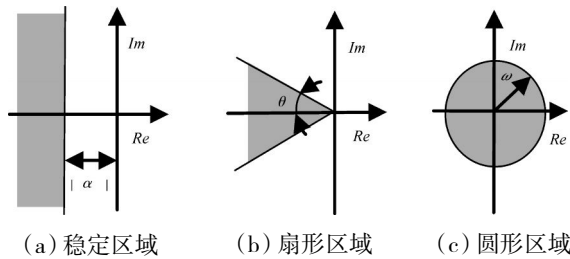


图5 保护映射的典型区域

如图5(a)所示区域(即 $Re(z) < -\alpha$)的保护映射为

$$v_\alpha(M) = \det(M \odot I - \alpha I \det I) \odot (M - \alpha I) \quad (6)$$

式中: $\odot$ 为运算 Bialternate 积。

如图5(b)所示与虚轴负半轴夹角为 θ 的2条射线所组成的区域的保护映射为

$$v_\xi(M) = \det(M^2 \odot I + (1-2\xi^2)M \odot M) \det(M) \quad (7)$$

式中: $\xi = \cos \theta$ 。

如图5(c)所示半径为 ω 的圆形区域的保护映射为

$$v_\omega(M) = \det(M \odot M - \omega^2 I \odot I) \det(M - \omega I) \det(M + \omega I) \quad (8)$$

其它区域的保护映射表达式可以根据典型区域通过相关的性质获得,例如:设 $S(\Omega_1), S(\Omega_2), \dots, S(\Omega_h)$ 相应的保护映射为 $v_1, v_2, \dots, v_h$, 则 $S(\Omega_1 \cap \Omega_2 \cdots \cap \Omega_h)$ 的保护映射为 $v = v_1 v_2 \cdots v_h$ 。

引理: $M(x) = M_0 + xM_1 + \cdots + x^k M_k$, 表示矩阵多项式, 式中: x 为未知的参数; M_i 为已知的常数矩阵。 $M(x_0)$ 相对 Ω 区域稳定, v_Ω 为 $S(\Omega)$ 的保护映射, 则根据式

(9)、(10) 可获得达到控制要求的 x 最大范围为 $x \in (x^-, x^+)^{[14]}$

$$x^- \approx \sup\{x < x_0 : v_\Omega[M(x)] = 0\}$$

(若不存在, 值为 $-\infty$) (9)

$$x^+ \approx \inf\{x > x_0 : v_\Omega[M(x)] = 0\}$$

(若不存在, 值为 $+\infty$) (10)

3 参数整定算法

3.1 活动区域定义

不同类型的区域如图6所示。

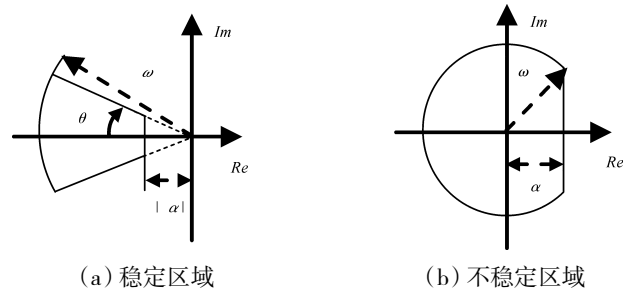


图6 不同类型的区域

如图6(a)所示的稳定集合区域 Ω 的定义为

$$\Omega \odot \Omega(\alpha, \xi, \omega) = \{\lambda \in C : Re(\lambda) \leq \alpha, \xi(\lambda) \geq \xi, |\lambda| \leq \omega\} \quad (11)$$

式中: $\xi(\lambda)$ 为 λ 的阻尼比。

如图6(b)所示的不稳定集合区域 Ψ 的定义为

$$\Psi \odot \Psi(\alpha, \omega) = \{\lambda \in C : Re(\lambda) \leq \alpha, |\lambda| \leq \omega\} \quad (12)$$

定义2: 矩阵 M 为 Hurwitz 稳定矩阵, 其所有特征值为 $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$, 区域 $\Omega_\Lambda \odot \Omega(\alpha_\Lambda, \xi_\Lambda, \omega_\Lambda)$, 其中 $\alpha_\Lambda = \max\{Re(\lambda_i)\}$; $\xi_\Lambda = \min\{\xi(\lambda_i)\}$; $\omega_\Lambda = \max\{|\lambda_i|\}$ 。区域 $\Omega_i = \Omega(\alpha_i, \xi_i, \omega_i)$ 为目标区域, 则定义区域 $\Omega_u = \Omega(\alpha_u, \xi_u, \omega_u)$, 其中, $\alpha_u = \max\{\alpha_i, \alpha_\Lambda\}$; $\xi_u = \min\{\xi_i, \xi_\Lambda\}$; $\omega_u = \max\{\omega_i, \omega_\Lambda\}$ ^[15]。

定义3: 矩阵 M 为 Hurwitz 稳定矩阵, 其所有特征值为 $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$, 区域 $\Psi \odot \Psi(\alpha_\Lambda, \omega_\Lambda)$, 其中 $\alpha_\Lambda = \max\{Re(\lambda_i)\}$; $\omega_\Lambda = \max\{|\lambda_i|\}$ 。区域 $\Omega_i = \Omega(\alpha_i, \xi_i, \omega_i)$ 为目标区域, 则定义区域 $\Psi_u = \Psi(\alpha_u, \omega_u)$, 其中, $\alpha_u = \alpha_\Lambda$; $\omega_u = \max\{\omega_i, \omega_\Lambda\}$ ^[15]。

3.2 目标区域增益预置算法

系统的动态性能主要取决于系统极点的位置, 它不仅决定系统的稳定性, 还决定系统的动态性能。因此, 若能通过控制器设计将闭环系统的极点配置到目标位置, 则相当于使系统具有期望的性能。基于保护映射理论的目标区域增益预置算法^[16]流程如图7所示。运用该算法可根据任意选择的初始控制器增益, 计算得到控制器增益向量 K , 使控制系统的闭环极点位

于目标区域 $\Omega_t = \Omega(\alpha_t, \xi_t, \omega_t)$ 内, 从而获得期望的性能。

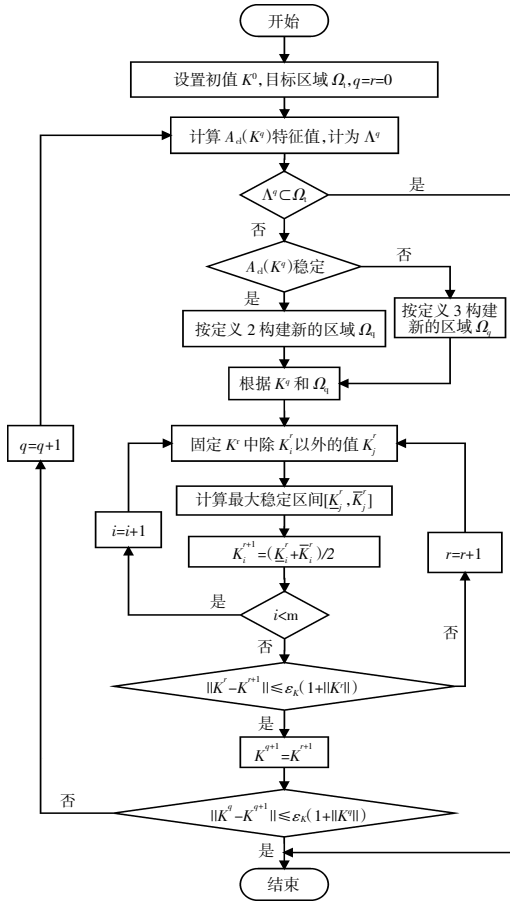


图7 增益预置算法流程

算法的具体步骤为:

(1) 设 $K=[K_j](j=1, \dots, m)$ 表示控制系统的增益向量, $K^0=[K_j^0]$ 表示初始增益向量, $\Omega_t=\Omega(\alpha_t, \xi_t, \omega_t)$ 表示目标区域, $q=r=0$, 此时 $K^q=K^r=K^0$;

(2) 计算闭环系统状态矩阵 $A_d(K^q)$ 的特征值 $\Lambda^q=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots\}$, 若 $\Lambda^q \subset \Omega_t$ 则跳出循环;

(3) 根据 $A_d(K^q)$ 的稳定性来构建新的区域: 若稳定, 则采用第 3.1 节中的定义 2 构建 $\Omega_q=\Omega(\alpha_q, \xi_q, \omega_q)$; 若 $A_d(K^q)$ 不稳定, 则采用第 3.1 节中的定义 3 构建 $\Omega_q=\Psi_u=\Psi(\alpha_q, \omega_q)$;

(4) 根据构建的新区域 Ω_q 和 K^q , 进行如下循环迭代过程:

a. 使 K_i^r 为 K^r 中唯一可变的参数值, 此时, 保护映射 $v_{\Omega_q}(K^r)$ 仅与 K_i^r 有关;

b. 根据第 2 章中的引理, 可得到包含 K_i^r 的最大稳定区间 $[K_i^r, \bar{K}_i^r]$;

c. 令 $K_i^{r+1}=(\underline{K}_i^r + \bar{K}_i^r)/2, i=1, 2, \dots, m$;

当 $\|K^r - K^{r+1}\| \leq \epsilon_K(1 + \|K^r\|)$ (ϵ_K 为一较小的正数) 时, 则跳出循环, 令 $K^{q+1}=K^{r+1}$; 否则, $r=r+1$, 继续求解;

(5) 当 $\|K^q - K^{q+1}\| \leq \epsilon_K(1 + \|K^q\|)$ 时, 循环结束, 否则, $q=q+1$, 返回到(2)继续运行。

3.3 单参数模型控制过程

设计满足控制性能要求并与调度参数 $\rho \in [\rho_{\min}, \rho_{\max}]$ 相关的全局控制器是 LPV 模型控制器设计的关键。基于保护映射理论的单参数 LPV 模型的全局控制器设计流程^[17]如图 8 所示。

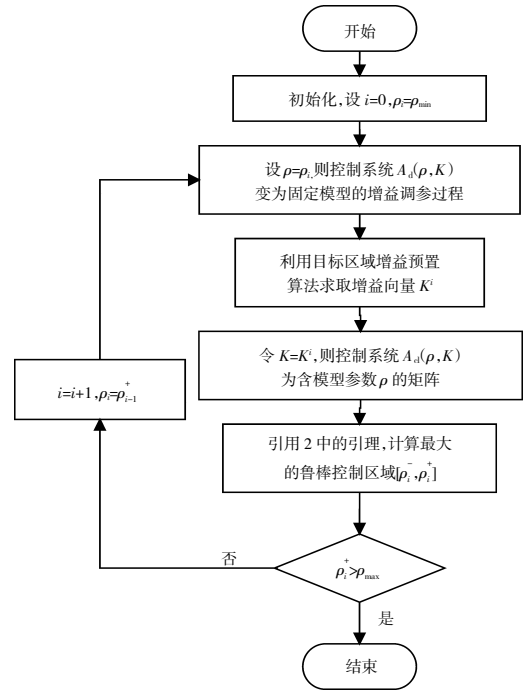


图8 单参数模型控制流程

算法的具体步骤为:

(1) 设 $A_d(\rho, K)$ 为闭环系统状态矩阵, $K=[K_j](j=1, \dots, m)$ 为控制系统增益向量。设 $\rho=\rho_0=\rho_{\min}$, 则控制对象变为固定参数的模型;

(2) 利用第 3.2 节中的算法求得满足控制要求的增益向量 K^i ;

(3) 令 $K=K^i$, 此时 $A_d(\rho, K)$ 中的变量仅为调度参数 ρ , 根据引理, 可计算得此时 K^i 对应的满足控制要求的最大调度参数的范围为 $[\rho_i^-, \rho_i^+]$;

(4) 判断 $\rho_i^+ > \rho_{\max}$, 若满足, 则循环结束; 否则, $i=i+1, \rho_i=\rho_{i-1}^+$ 继续循环。

通过该算法可得到分别对应 $\{\rho_{\min}^+, \rho_0^+, \dots, [\rho_i^-, \rho_i^+], \dots, [\rho_n^-, \rho_{\max}^+]\}$ 的控制器增益向量 $\{K^0, \dots, K^i, \dots, K^n\}$ 。最终, 整个调度参数变化范围内的参数值均有与之对应的控制器。

4 控制器设计与仿真

4.1 控制器设计过程

本文选择 PI 控制器结构, 因为其能使系统性能满足零稳态误差的要求并具有良好的动态响应。闭环系统的结构如图 9 所示。

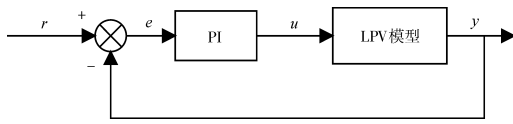


图 9 控制器结构

PI 控制器的传递函数为

$$K(s) = K_p + K_i/s \quad (13)$$

本文运用上述基于保护映射理论的算法进行控制器 $K(s)$ 设计, 使 LPV 系统在整个调度参数的变化范围内达到控制要求。

在航空发动机控制系统设计过程中, 最重要的是所设计的控制系统应满足性能指标要求。本文的控制器设计指标考虑衰减系数 α 、阻尼比 ξ 和自然频率 ω , 该设计指标可对闭环系统的稳态和动态性能进行表征。为保证系统具有良好的性能, 本文根据航空发动机控制的目标要求, 确定 3 个设计指标的取值分别为 $\alpha \leq -1.7, \omega \leq 8, \xi \geq 0.85$, 通过式(11)构建目标区域。根据保护映射性质, 目标区域保护映射为

$$v_{\Omega}(A_d) = v_{\alpha}(A_d) v_{\xi}(A_d) v_{\omega}(A_d) \quad (14)$$

对已建立的 $H=0 \text{ km}, Ma=0$ 点 LPV 模型进行控制器设计, 首先, 令 $\tilde{n}_h=0$, 任意选取 PI 控制器的初始值为 $K_p=K_i=1$, 通过第 3.2 节的算法可以得到控制器参数 $K_p=6.9735, K_i=15.5318$, 该控制器参数可将闭环系统的极点限制在目标区域内, 从而获得期望的性能。其次, 通过第 2 章中的引理可以得到该控制器参数能够使系统关于 Ω 稳定的 $\tilde{n}_h$ 最大区间为 $[-0.0154, 0.1308]$, 在该调度参数变化区间内, 闭环系统的极点均位于目标区域中。再次, 取上限值 $\tilde{n}_h=0.1308$, 根据第 3.3 节中方法获得新的 PI 控制器参数值, 以及与之对应的稳定区间, 按照这样的流程进行循环计算, 直

到 $\tilde{n}_h \in [0, 1]$ 中所有的 $\tilde{n}_h$ 均有与之对应的控制器。控制器设计的迭代运算结果见表 1。从表中可见, 每次计算出的稳定区间存在一定的重合, 为了保证系统在整个调度参数变化范围内均相对于稳定区域稳定和控制器控制效率, 本文选择在重合区间的中点进行控制器的切换, 切换过程如图 10 所示。

表 1 控制器设计结果

计算次数 i	K_p	K_i	稳定区间 $[\tilde{n}_h^-, \tilde{n}_h^+]$
1	6.9735	15.5318	$[-0.0154, 0.1308]$
2	9.6757	20.44917	$[0.0059, 0.3582]$
3	14.1304	45.8831	$[0.2579, 0.6420]$
4	12.5534	34.3755	$[0.4341, 0.9670]$
5	7.9713	26.5901	$[0.7730, 1.0458]$

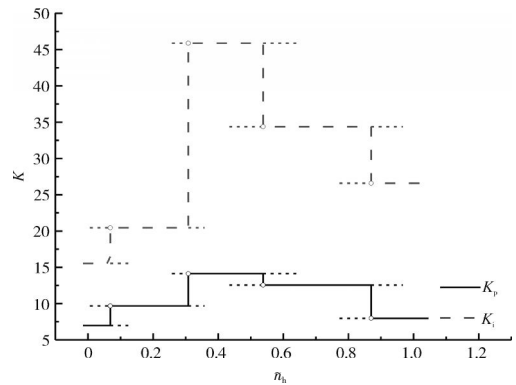


图 10 控制器参数 K 随 $\tilde{n}_h$ 的变化规律

根据所设计的控制器计算不同转速下的闭环系统极点, 其分布如图 11 所示。从图中可见, 闭环系统极点均位于目标区域内, 达到了预期设计目标。

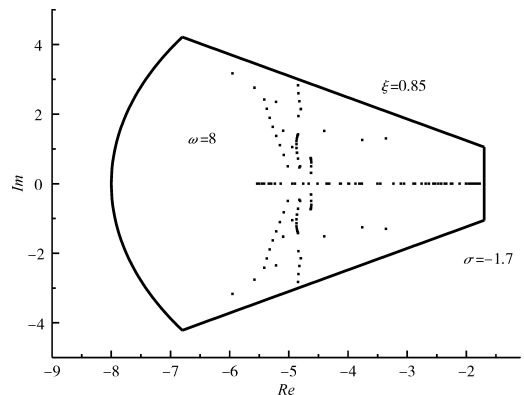


图 11 闭环系统极点分布

4.2 仿真结果分析

为了避免航空发动机转速大范围变化时, 系统产生较大的超调量, 本文采用积分分离控制^[18], 即: 在

$e > 0.6(r_i - r_0)$ (e 为闭环系统偏差值; r_i 为闭环系统目标值; r_0 为闭环系统初始值) 时忽略积分控制, 仅采用比例控制。选取传统变增益 PI 控制器作为比较对象, 其设计方法为: 在相对高压转子转速变化区间内等间距的 10 个点处, 通过遗传算法整定 PI 参数值^[19], 最后拟合出 PI 参数的多项式。在 $H=0$ km、 $Ma=0$ 点的阶跃仿真结果如图 12、13 所示。在 $H=3.5$ km、 $Ma=0.5$ 点采用相同的方法设计控制器并进行阶跃仿真, 其仿真结果如图 14、15 所示。

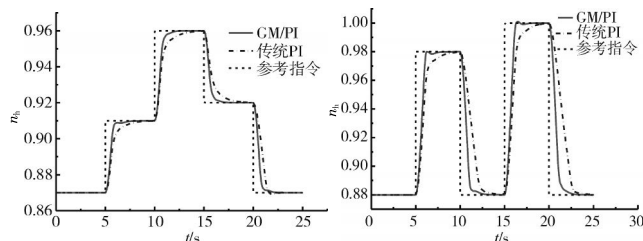


图 12 在 $H=0$ km、 $Ma=0$ 时
高压转速仿真结果

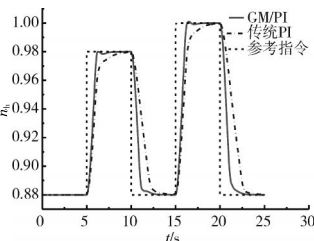


图 13 在 $H=0$ km、 $Ma=0$ 时
高压转速大范围变化仿真结果

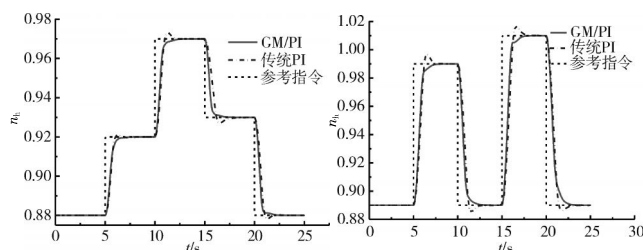


图 14 在 $H=3.5$ km、 $Ma=0.5$
时高压转速仿真结果

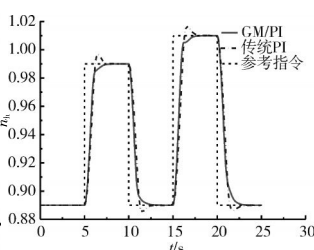


图 15 在 $H=3.5$ km、 $Ma=0.5$
时高压转速大范围变化仿真结果

从图 12~15 中可见, 在基于保护映射理论设计的 PI 控制器控制下, 系统响应曲线的调节时间小于 2 s, 超调量小于 0.8%, 稳态误差为 0。在传统变增益控制方法设计的 PI 控制器控制下, 系统响应曲线的调节时间和超调量均较差, 其调节时间小于 3 s, 超调量高达 7%。由仿真分析可知, 基于保护映射理论设计的 PI 控制器的控制效果比传统设计方法设计的 PI 控制器的控制效果具有更好的动态响应, 在超调量和调节时间等性能上均有明显改善。

5 结论

(1) 本文将基于保护映射理论的控制方法用于航空发动机控制系统设计中, 在航空发动机非线性模型上的仿真结果表明, 系统动态响应的调节时间小于 2 s, 超调量小于 0.8%, 稳态误差为 0, 具有良好的控制效果;

(2) 本文将保护映射理论及其相关算法进行了详细说明, 并将其运用在航空发动机控制系统设计中, 采用 PI 控制器, 具有工程易用性;

在后续研究中, 可针对航空发动机更多变量, 采用基于保护映射理论的方法进行控制器设计, 进一步验证该方法在航空发动机控制中的有效性。同时, 在控制器参数切换过程中, 可采用加权法等进行重合区域控制器的切换, 并进行控制系统性能分析。

参考文献:

- [1] 李华英. 航空发动机多变量鲁棒控制方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2010.
- [2] 姜锐. 航空发动机线性变参数控制方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [3] LI Huaying. Multivariable robust controller design for aeroengines[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2010. (in Chinese)
- [4] JIANG Rui. Linear-parameter-varying control design for aero-engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [5] Lu B, Wu F, Kim S W. Switching LPV control for high performance tactical aircraft [R]. AIAA-2010-7903.
- [6] 吴斌, 黄金泉, 姜锐. 基于多项式平方和规划的航空发动机鲁棒 LPV/PI 控制[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3): 700-707.
- [7] WU Bin, HUANG Jinquan, JIANG Rui. Robust LPV/PI control for aero-engine based on polynomial sum of squares programming[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3): 700-707. (in Chinese)
- [8] Saydy L, Andre L T, Eyad H A. Guardian maps and the generalized stability of parametrized families of matrices and polynomials[J]. Mathematics of Control Signals and Systems, 1990, 3(4): 345-371.
- [9] Saussie D, Saydy L, Akhrif O, et al. Gain scheduling with guardian maps for longitudinal flight control[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2011, 34(4): 1-15.
- [10] Ghazi G, Botez R M. New robust control analysis methodology for Lynx helicopter and Cessna Citation X aircraft using guardian maps, genetic algorithms and LQR theories combinations [C] // American Helicopter Society 70th Annual Forum & Technology Display. Quebec, Canada: Research Gate, 2014: 1-9.
- [11] 刘梦影, 刘燕斌, 肖地波, 等. 高超声速飞行器应用保护映射的大包线控制律[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(11): 1540-1550.
- [12] LIU Mengying, LIU Yanbin, XIAO Dibo, et al. Control law for wide envelope of hypersonic vehicles applying guardian maps[J]. Control Theory and Applications, 2015, 32(11): 1540-1550. (in Chinese)
- [13] Giarre L, Bauso D, Falugi P, et al. LPV model identification for gain scheduling control: an application to rotating stall and surge control[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(4): 351-361.
- [14] 姚华. 航空发动机全权限数字电子控制系统[M]. 北京: 航空工业出

- 版社,2014:302-306.
- YAO Hua. Full authority digital electronic control system for aero-engine[M]. Beijing:Aviation Industry Press, 2014:302-306. (in Chinese)
- [11] 樊思齐,李华聪,樊丁,等. 航空发动机控制[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008:1-337.
- FAN Siqi,LI Huacong,FAN Ding,et al. Aeroengine control [M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press,2008:1-337. (in Chinese)
- [12] 冯正平,孙健国. 航空发动机小偏差状态变量模型的建立方法[J]. 推进技术,2001,22(1):54-57.
- FENG Zhengping,SUN Jianguo. Modeling of small perturbation state variable model for aeroengines [J]. Journal of Propulsion Technology, 2001,22(1):54-57. (in Chinese)
- [13] 李臣亮. 基于保护映射理论的飞行器鲁棒自适应控制[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- LI Chenliang. Robust adaptive control of aircraft based on guardian maps [D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [14] Patrick J,Mohamad S,Azeddine K. Application of robust design of a PI controller using guardian maps[C]// Proceedings of the 2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Piscataway, NJ, USA:IEEE,2009:1163-1166.
- [15] 李臣亮,刘燕斌,彭福军,等.保护映射理论在火星无人机鲁棒自适应控制的应用[J].宇航学报, 2014,35(11):1261-1269.
- LI Chenliang,LIU Yanbin, PENG Fujun,et al. Application of guardian mapping theory in robust adaptive control of mars unmanned vehicle [J]. Journal of Astronautic,2014,35 (11):1261-1269. (in Chinese)
- [16] LIU Yanbin,LI Chenliang,LIU Mengying, et al. Application of guardian maps theory in flight control system design for aircraft model[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. Nanjing, China:IEEE,2014:125-129.
- [17] Duhanchet V,Saussie D,Berard C,et al. Robust control of a launch vehicle in atmospheric ascent based on guardian maps[C]//Proceedings of the 2012 American Control Conference. Piscataway,NJ,USA: IEEE, 2012:938-943.
- [18] 黄祥源. 基于积分分离 PID 算法的张力控制器设计 [J]. 工业控制计算机,2011,24(5):36-38.
- HUANG Xiangyuan. Tension controller with integral-separation PID algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2011, 24(5):36-38. (in Chinese)
- [19] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社, 2011:325-353.
- LIU Jinkun. Advanced PID control and MATLAB simulation[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2011:325-353. (in Chinese)

(编辑:刘 亮)