

航空发动机 H_∞ 控制器设计方法

西北工业大学 张燕东* 曾庆福 吕跃飞

【摘要】 本文提出了一种结构摄动系统鲁棒控制器综合方法。采用该方法可以同时考虑闭环系统的频域设计要求及对结构摄动的鲁棒稳定性。该方法被用于某型双转子涡轮航空发动机稳态控制器的设计,并取得了良好效果。

主题词: 航空发动机 鲁棒控制 设计
分类号: TP273 V233.7

航空发动机是一个复杂的非线性系统,工作范围宽广,在不同平衡工作点线性模型的参数差异很大。将这种差异视为围绕基准模型的参数摄动,则其稳态控制器设计为结构摄动系统鲁棒控制器综合问题。通过将闭环系统的鲁棒稳定条件及频域设计要求,统一表达为系统闭环传递函数 H_∞ 范数的约束,提出了一种鲁棒控制器综合方法,用于航空发动机控制器的设计。

1 结构摄动系统鲁棒控制器综合方法

考虑如下结构摄动系统

$$x(t) = [A + \Delta A(t)]x(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t) \quad (1)$$

其中 $\Delta A(t) = DF(t)E$, $\|F(t)\| \leq \rho$, $x(t)$ 、 $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别为状态、输入和输出向量。如图 1 引入加权系统 $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$, 其中 $G_{11} = E(sI - A)^{-1}D$, $G_{12} = E(sI - A)^{-1}B$, $G_{21} = C(sI - A)^{-1}D$, $G_{22} = C(sI - A)^{-1}B$ 。则 w 到 z_1 、 z_2 、 z_3 的闭环传递函数分别为:

$$T_{z_1 w} = E(sI - A + BK C)^{-1}D$$

$$T_{z_2 w} = W_1(I + G_{22}K)^{-1}G_{21} = W_1 S G_{21}$$

$$T_{z_3 w} = -W_2 G_{22}K(I + G_{22}K)^{-1}G_{21} = -W_2 T G_{21}$$

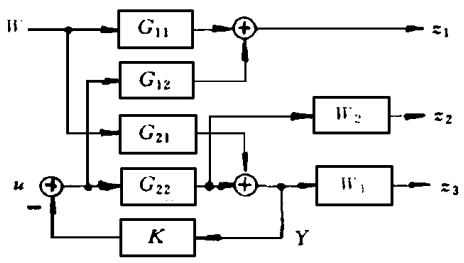


图 1 加权后系统结构框图

其中 $S = (I + G_{22}K)^{-1}$ 和 $T = G_{22}K(I + G_{22}K)^{-1}$ 分别为系统的灵敏度函数和补灵敏度函数。

问题(1.1): 对如图 1 所示系统, 求解控制器 $u = -K(s)y$, 使得闭环系统内部稳定且 w 到 $z = (z_1, z_2, z_3)^T$ 的闭环传递函数 T_{zw} 有 $\|T_{zw}\|_\infty \leq 1$ 。

通过适当选择 W_1 和 W_2 , 对闭环系统的灵敏度函数和补灵敏度函数的频谱进行造型, 设计系统的频域特性。由如下定理^[1]可知, 所得控制器能保证闭环系统对结构摄动的鲁棒性。

定理(1.2): 令 $H_0(s) = E(sI - A + BK(s)C)^{-1}D$, 且 $\gamma_0 = \inf\{\|H_0(s)\|_\infty : K(s) \in S\}$, 其中 $S = \{K(s) : K(s) \text{ 实有理, 且使闭环系统内部稳定}\}$, 则系统(1.1)可由输出反馈 $u = -K(s)y$ 稳

定的充分必要条件为 $\gamma_0 < 1/\rho$ 。

可知, 求解问题(1.1)所得的闭环系统对所有满足 $\|F(t)\| \leq 1$ 的摄动 $F(t)$ 鲁棒稳定。

设 W_1, W_2 的最小实现分别为 $\{A_{W_1}, B_{W_1}, C_{W_1}, D_{W_1}\}$ 和 $\{A_{W_2}, B_{W_2}, C_{W_2}, D_{W_2}\}$, 则扩维后被控系统的状态方程由下式给出

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ D_{W_1}C & A_{W_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & 0 \\ 0 & 0 & D_{W_2}C & A_{W_2} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ B \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} z_1 &= [E \ 0 \ 0 \ 0]x, & z_2 &= [D_{W_1}C \ C_{W_1} \ 0 \ 0]x \\ z_3 &= [0 \ 0 \ D_{W_2}C \ C_{W_2}]x, & y &= [C \ 0 \ 0 \ 0]x \end{aligned} \quad (2b)$$

由式(2)可知, 问题(1.1)可转化为标准 H_∞ 控制问题^[2,3], 获得所需的控制器。

2 航空发动机稳态控制器设计

将上节所述方法应用于某型双转子涡轮喷发动机地面台架稳态控制器的设计。

用偏导数方法由发动机非线性仿真模型产生如下状态方程

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{N}_1 \\ \Delta \dot{N}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta W_f \\ \Delta A_8 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 N_1, N_2, W_f, A_8 分别为低压转子转速、高压转子转速、主燃油流量和尾喷口面积, Δ 表示相对于平衡点的差值。假设两个控制输入通道的执行机构都为时间常数 0.1 秒的一阶惯性环节, 则被控系统可被扩维。在台架状态从低压转速百分比 0.81 到最大状态之间的不同工作点, 求得多个线型模型, 经过分析处理得到如下基准模型及摄动描述式

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -2.825 & 0.923 & 6.792 & 7.869 \\ -0.276 & -2.645 & 5.643 & 1.634 \\ 0 & 0 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -10 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} u(t) \quad (4)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t), \quad \Delta A = DF(t)E, \quad \|F(t)\| \leq 1 \quad (5)$$

其中

$$D = \begin{bmatrix} 0.759 & 0.545 & 3.622 & 4.731 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.986 & 0.299 & 0.548 & 1.241 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

为在尽量低的阶数下取得良好的加权效果, 降低控制器阶数, 分别选择加权系统为:

$$W_1(s) = 4(s+1) \begin{bmatrix} (0.05s+1)10000/(20000s+1) & 0 \\ 0 & (0.05s+1)10000/(20000s+1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$W_2(s) = 0.001(s^2+2s+1) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

采用标准 H_∞ 控制问题求解算法, 可得控制器 $K(s) = D_\varphi + C_\varphi(sI - A_\varphi)^{-1}B_\varphi$ 。

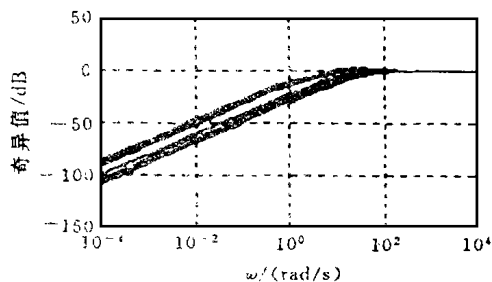


图2 闭环系统灵敏度函数频谱

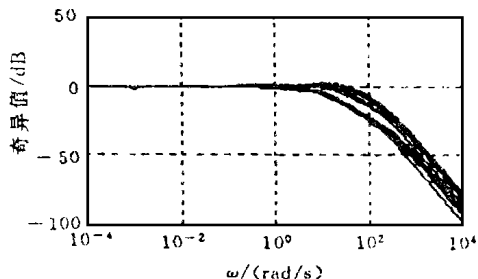


图3 闭环系统补灵敏度函数频谱

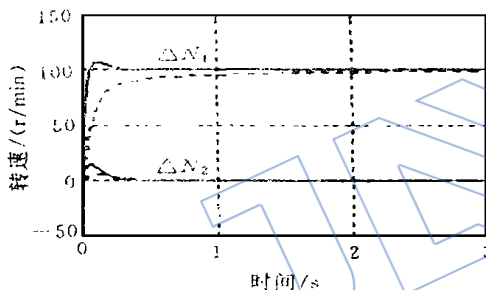


图4 N_1 回路阶跃响应曲线

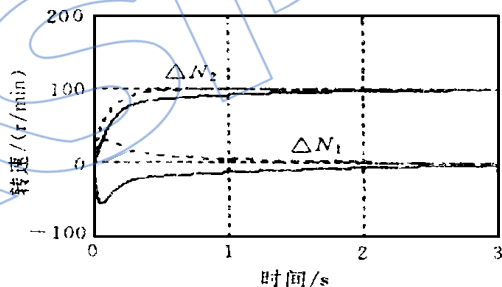


图5 N_2 回路阶跃响应曲线

图2和图3为上述控制器与不同稳态点的线性模型形成的闭环系统的灵敏度函数和补灵敏度函数的频谱图, 图4和图5分别为 N_1 回路和 N_2 回路的阶跃响应时间曲线, 其中实线为最大状态下的时间响应曲线, 虚线为低压百分比转速为0.81时的时间响应曲线。由图可见, 所得系统具有良好的性能鲁棒性和稳定鲁棒性。

参 考 文 献

- 1 Kharagonekar P P, Perterson I R, Zhou K. Robust Stabilization of Uncertain Linear System Stabilizability and H_∞ Control Theory. IEEE Trans. Auto. Contr., AC- 35, 1990, (3): 356- 361
- 2 Francis B A, Doyle. Linear Control Theory with an H_∞ Optimality Criterion. SIAM J. Contr. Optimization, 1987, 25(4): 815- 844
- 3 Doyle J C, Glover K, Kharagonekar P P, Francis B A. State- Space Solution to Standard H_2 and H_∞ Control Problem. IEEE Trans. Auto. Contr. 1989, 34(8): 831- 847

(责任编辑 王庆康)