

一种多变量频域动态伪对角化法及 航空发动机解耦控制器设计

彭 凯^{1,2}, 樊 丁^{1,2}, 郭雅楠¹, 卜振鹏³, 焦春波⁴, 薛 原⁵

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

3. 中国人民解放军 92728 部队, 上海 200436;

4. 火箭军驻锦州地区专用保障装备军事代表室, 辽宁 锦州 121000;

5. 西安市地下铁道有限责任公司 运营分公司, 西安 710018)

摘 要: 针对多变量频域 Nyquist 类设计法中的 Hawkins 伪对角化法, 给出了一种改进的动态伪对角化方法来提高系统的对角优势度以改善系统的解耦性与鲁棒性并进行了相关分析. 最后将这种动态伪对角化方法用于某型航空发动机稳态控制器的设计, 仿真结果表明: 相较于标准 Hawkins 法, 改进的动态伪对角化所给出的补偿系统具有较好的动静态解耦性与鲁棒性.

关 键 词: 多变量; 频域; 伪对角化; 鲁棒性; 航空发动机

中图分类号: V231

文献标志码: A

A multivariable frequency-domain dynamic pseudodiagonalization method and design of aero-engine decoupling controller

PENG Kai^{1,2}, FAN Ding^{1,2}, GUO Ya-nan¹,

BU Zhen-peng³, JIAO Chun-bo⁴, XUE Yuan⁵

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;

3. Unit 92728 of People's Liberation Army of China, Shanghai 200436, China;

4. Military Resident Representative Bureau of Rocket Force in Jinzhou,

Jinzhou Liaoning 121000, China;

5. Operating Branch of Xi'an Metro Company Limited, Xi'an 710018, China)

Abstract: For Hawkins's pseudodiagonalization method in multivariable Nyquist-class frequency domain design, an improved dynamic pseudodiagonalization method was presented to enhance the diagonal dominance of the system in order to improve the decoupling and robustness of the system together with relevant analysis. Finally, the dynamic pseudodiagonalization method was used to design an aero-engine steady controller. The simulation results show that the compensated system given by improved dynamic pseudodiagonalization method has good dynamic and static decoupling and robustness compared with standard Hawkins's method.

收稿日期: 2014-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(51506176)

作者简介: 彭凯(1984—), 男, 陕西富平人, 博士, 讲师, 主要从事航空推进系统控制研究.

Key words: multivariable; frequency domain; pseudodiagonalization; robustness; aero-engine

随着军事科学、航空航天科学和现代工业的迅猛发展,控制科学也在飞速地更新.经过大量学者的研究,频域设计理论也从经典单变量频域设计发展为现代多变量频域设计^[1-3].相较于单变量控制系统,多变量控制对象的基本特征是存在耦合现象^[4-6].英国 Rosenbrock 等在研究多变量系统频域法与时域法之间的联系后,提出了对角优势的解耦方法.只要把多变量受控对象的传递函数矩阵改造成对角优势矩阵,即可实现近似的解耦,便可以将多变量闭环系统当成多个单变量系统来进行设计^[1,7-8].

为了改善系统矩阵对角优势度,文献[9]将单频率点上的伪对角化方法扩展到某一频段,给出了一种求解常数补偿阵的方法,文献[10]给出了一种单频率点上的鲁棒的伪对角化方法,文献[11]给出的解耦方法要求系列传递矩阵对角元无右半平面零点.本文提出一种在某一频段上的动态补偿阵的计算方法,其对系统矩阵无特别要求且无试凑过程,然后对提高系统对角优势度能改善系统鲁棒性的原因给出了分析,最后将此动态伪对角化方法用于某型航空发动机控制器的设计.

1 动态伪对角化

1.1 Hawkins 法的改进

Nyquist 类方法的一种最典型的控制框图^[12]如图 1 所示,其中 $R(s)$ 为系统输入, $Y(s)$ 为系统输出, $G(s)$ 为被控对象, $K_{\text{pre}}(s)$ 为前置补偿器, $K_{\text{post}}(s)$ 为后置补偿器, $K_c(s)$ 为动态补偿器, $F(s)$ 为反馈增益矩阵,引入 $K_{\text{pre}}(s)$ 或 $K_{\text{post}}(s)$ 使 $Q(s) = K_{\text{post}}(s)G(s)K_{\text{pre}}(s)$ 为对角占优矩阵,再设计反馈增益矩阵 $F(s)$,改善各回路动态性能,也可进一步设计动态补偿器 $K_c(s)$ 进行各回路动态补偿.

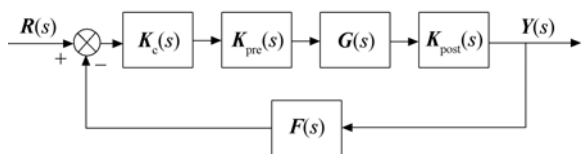


图 1 Nyquist 类设计方法的一种典型设计框图

Fig. 1 Typical block diagram of Nyquist-class design method

为了利用 Nyquist 阵列法对系统进行设计,关键在于使传递函数矩阵 $Q(s)$ 或 $\hat{Q}(s)$ ($\hat{Q}$ 表示 Q 的逆,下类似)具有对角优势.通常 $G(s)$ 或 $\hat{Q}(s)$ 可能不具有对角优势,为此可考虑引入补偿器 $K_{\text{pre}}(s)$ 或 $K_{\text{post}}(s)$ 以获得具有对角优势的 $Q(s)$ 或 $\hat{Q}(s)$ 如图 1 所示.补偿器 $K_{\text{pre}}(s)$ 或 $K_{\text{post}}(s)$ 的获取方法主要有两种:一种是基于行列变换的试凑法,一种是 Hawkins 提出的伪对角化法^[1].本小节对 Hawkins 法进行扩展,给出一种改进的动态伪对角化方法,记为改进 Hawkins 法.

对于系统 $G = [g_{ij}(s)]_{m \times m}$, Hawkins 伪对角化法是设计常数补偿器 $K = (k_1, \dots, k_m)$,在一定的频率段内改善系统的对角优势度 $\theta'_i = \sum_{i=1, i \neq j}^m |q_{ij}|^2 / |q_{ii}|^2$. Hawkins 法是在 $k_j^T k_j = 1$ 下,最小化 $\sum_{i=1, i \neq j}^m |q_{ij}(s)|$ 在给定频率段内的离散频率点处 $\omega_k, k=1, \dots, M$ 的加权和

$$\min_{k_j} \sum_k c_k \sum_{i=1, i \neq j}^m |q_{ij}(j\omega_k)|$$

其中, c_k 为正常数.

针对 Hawkins 法中的一些问题(这里先考虑前置补偿器 $K_{\text{pre}}(s)$),作以下相应的改进:

1) Hawkins 法原本是针对 $\hat{G}(s)$ 设计 $\hat{K}$,如果 $\hat{K}$ 在右半平面有零点,则所得的 K 将不稳定.这里直接针对 $G(s)$ 设计 $K(s)$,以规避求逆过程中可能遇到的不稳定现象.鉴于 PID 控制在系统动静态补偿方面的优良品质,并加强 K 对解耦矩阵的逼近能力,这里将 K 扩展成类 PID 的形式

$$K(s) = K_{-a}s^{-a} + \dots + K_{-1}s^{-1} + K_0 + K_1s + \dots + K_{\beta}s^{\beta} \quad (1)$$

其中 $\alpha, \beta \in Z^+$, 其可看作基于 Stone-Weierstrass 原理以 Laurent 级数形式对 $G(s)$ 解耦阵的逼近.

2) 当式(1)中 $\alpha, \beta \geq 1$ 时,条件 $k_j^T k_j = 1$ 会失去限制 k_j 大小的作用.为了避免约束 $k_j^T k_j = 1$ 及 Hawkins 法中会出现的情况:当 $\sum_{i=1, i \neq j}^m |q_{ij}|^2$ 被最小化的同时, $|q_{ij}|^2$ 可能也会比较小,最小化问题选为

$$\min_{k_j} \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^m |q_{ij}|^2}{|q_{ij}|^2}$$

进一步将其扩展成一定频率段 $[\omega_1, \omega_2]$ 内的加权积分形式(其中 $\omega(\omega)$ 为频域加权函数,当然也可选用加权累加形式)

$$\min_{k_j} J = \min_{k_j} \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega(\omega) \sum_{i=1, i \neq j}^m |q_{ij}|^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega(\omega) |q_{jj}|^2 d\omega} \quad (2)$$

1.2 动态补偿矩阵的计算

动态补偿矩阵 $\mathbf{K}(s)$ 的具体计算过程如下:

$\mathbf{K}(s)$ 的第 j 列记为

$$k_j = k_{-aj} s^{-a} + \dots + k_{-1j} s^{-1} + k_{0j} + k_{1j} s + \dots + k_{\beta j} s^{\beta}$$

则 $\mathbf{Q}(s) = \mathbf{G}(s) \mathbf{K}$ 第 j 列

$$q_j = \mathbf{G} k_{-aj} s^{-a} + \dots + \mathbf{G} k_{-1j} s^{-1} + \mathbf{G} k_{0j} + \mathbf{G} k_{1j} s + \dots + \mathbf{G} k_{\beta j} s^{\beta}$$

可写成向量形式 $q_j = \bar{\mathbf{G}} \bar{k}_j$,其中 $\bar{\mathbf{G}} = [\mathbf{G} s^{-a} \dots \mathbf{G} s^{-1} \quad \mathbf{G} \quad \mathbf{G} s \quad \dots \quad \mathbf{G} s^{\beta}]$ 和 $\bar{k}_j = [k_{-a}^T \dots k_{-1}^T \quad k_{0j}^T \quad k_{1j}^T \quad \dots \quad k_{\beta j}^T]^T$.

令 $\bar{\mathbf{W}}_j = \text{diag}[\omega(\omega), \dots, \omega(\omega), 0_{jj}, \omega(\omega), \dots, \omega(\omega)]$,则有

$$\omega(\omega) \sum_{i=1, i \neq j}^m |q_{ij}|^2 = \omega(\omega) \sum_{i=1, i \neq j}^m (q_{ij}^* q_{ij}) = q_j^* \bar{\mathbf{W}}_j q_j = \bar{k}_j^T \bar{\mathbf{G}}^* \bar{\mathbf{W}}_j \bar{\mathbf{G}} \bar{k}_j \quad (3)$$

其中 $*$ 表示共轭转置,类似地令 $\underline{\mathbf{W}}_j = \text{diag}[0, \dots, 0, \omega(\omega)_{jj}, 0, \dots, 0]$,则

$$\omega(\omega) |q_{jj}|^2 = \omega(\omega) (q_{jj}^* q_{jj}) = q_j^* \underline{\mathbf{W}}_j q_j = \bar{k}_j^T \underline{\mathbf{G}}^* \underline{\mathbf{W}}_j \underline{\mathbf{G}} \bar{k}_j \quad (4)$$

从而

$$J = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega(\omega) \sum_{i=1, i \neq j}^m |q_{ij}|^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega(\omega) |q_{jj}|^2 d\omega} = \frac{\bar{k}_j^T \int_{\omega_1}^{\omega_2} \bar{\mathbf{G}}^* \bar{\mathbf{W}}_j \bar{\mathbf{G}} d\omega \bar{k}_j}{\bar{k}_j^T \int_{\omega_1}^{\omega_2} \underline{\mathbf{G}}^* \underline{\mathbf{W}}_j \underline{\mathbf{G}} d\omega \bar{k}_j} = \frac{\bar{k}_j^T \mathbf{N}_j \bar{k}_j}{\bar{k}_j^T \mathbf{D}_j \bar{k}_j} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{N}_j = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \bar{\mathbf{G}}^* \bar{\mathbf{W}}_j \bar{\mathbf{G}} d\omega$, $\mathbf{D}_j = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \underline{\mathbf{G}}^* \underline{\mathbf{W}}_j \underline{\mathbf{G}} d\omega$, 积分选用自适应 Simpson 法数值积分方法^[13].

由式(5)可知 $\bar{k}_j^T \mathbf{N}_j \bar{k}_j$ 是实的, $\mathbf{N}_j$ 是共轭对称的以及 $\text{Re}\{\mathbf{N}_j\}$ 是实对称正定的,又 $\bar{k}_j$ 也是实的,从而 $\bar{k}_j^T \mathbf{N}_j \bar{k}_j = \bar{k}_j^T \text{Re}\{\mathbf{N}_j\} \bar{k}_j$,类似地有 $\bar{k}_j^T \mathbf{D}_j \bar{k}_j = \bar{k}_j^T \text{Re}\{\mathbf{D}_j\} \bar{k}_j$,所以式(5)等效为

$$J = \frac{\bar{k}_j^T \text{Re}\{\mathbf{N}_j\} \bar{k}_j}{\bar{k}_j^T \text{Re}\{\mathbf{D}_j\} \bar{k}_j} \quad (6)$$

即 $\text{Re}\{\mathbf{N}_j\}$ 相对于 $\text{Re}\{\mathbf{D}_j\}$ 的广义 Rayleigh 商^[5],等价于广义特征值问题

$$\text{Re}\{\mathbf{N}_j\} \bar{k}_j = J \text{Re}\{\mathbf{D}_j\} \bar{k}_j \quad (7)$$

又 $\text{Re}\{\mathbf{D}_j\}$ 是实对称正定阵,则其可奇异值分解为: $\text{Re}\{\mathbf{D}_j\} = \mathbf{U}^T \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{U} = \mathbf{U}^T \boldsymbol{\Sigma}_2^{\frac{1}{2}} \boldsymbol{\Sigma}_2^{\frac{1}{2}} \mathbf{U}$ ^[5],其中 $\mathbf{U}$ 为酉矩阵, $\boldsymbol{\Sigma}$ 为奇异值对角阵.令 $\bar{k}_j = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{x}_j$,则式(7)可转化为普通的特征值问题

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}^T \text{Re}\{\mathbf{N}_j\} \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{x}_j = J \mathbf{x}_j \quad (8)$$

设 $J_{\min}$ 为式(8)的最小特征值,对应的特征向量为 $\mathbf{x}_{j,\min}$,则式(1)中的解 $\min k_j J = J_{\min}$,对应地有 $\bar{k}_j = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{x}_{j,\min}$.

当然这里的方法也可用于 $\mathbf{K}_{\text{post}}(s)$ 的设计.

2 鲁棒性分析

第1节的伪对角化方法通过提高系统的对角优势度可改善系统鲁棒性,下面作一简单分析.

系统 $\mathbf{Q}$ 的特征值对摄动的敏感度依赖于其特征向量矩阵 $\mathbf{R}$ 的条件数 $\kappa(\mathbf{R})$ 的大小^[14], $\kappa(\mathbf{R})$ 越小则 $\mathbf{Q}$ 的特征值对摄动的敏感度越小.又因为

$$\kappa(\mathbf{R}) = \|\mathbf{R}^{-1}\|_2 \|\mathbf{R}\|_2 \geq \|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}\|_2 = 1 \quad (9)$$

一个矩阵酉相似于对角阵的充要条件是其为正规矩阵^[14].若当矩阵 $\mathbf{Q}$ 为正规矩阵时,可取 $\mathbf{R}$ 为酉矩阵,此时有 $\kappa(\mathbf{R})=1$,从而表明当 $\mathbf{Q}$ 为正规矩阵时,系统特征值/特征函数对于摄动的敏感度达到最小,说明系统具有很好的鲁棒性.而控制系统的稳定性取决于其传递函数矩阵的特征函数与复平面上点 $(-1, 0)$ 之间的包围关系^[1,4],因此使控制系统的传递函数矩阵成为正规矩阵,应能获得最佳的鲁棒性,而对角矩阵也是一类特殊的正规矩阵.一般地说减小耦合使系统具有尽可能好的对角优势,则系统就愈接近于正规,因而有好的鲁棒性.

3 仿真算例

下面以某航空涡扇发动机^[15-18]一工况点的线性模型为例,对前面介绍的方法进行说明.发动机工况点为:高度 $H=0$ km,马赫数 $Ma=0$ 和低压转子转速 $n_1=80\%$,对应的系统状态方程

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (10)$$

其中,状态 $\mathbf{x}(t) = [n_1 \quad n_h]^T$,输出 $\mathbf{y}(t) = [n_1 \quad n_h]^T$,输入 $\mathbf{u}(t) = [A_s \quad W_{fm}]^T$ (n_h 为高压转子转速, A_s 为尾喷口喉部面积, W_{fm} 为主燃油流量)且

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.76 & -1.34 \\ 2.70 & -7.21 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.57 & 0.98 \\ 0.82 & 2.26 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对应地,系统传递函数矩阵为 $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$,其正 Nyquist 阵列如图 2 所示,显然 Gershgorin 带^[1,4]包含原点且比较宽,故系统有较强的交连.列优势度的 Bode 图即 $\omega - 20\lg \theta_i(\omega)$ 曲线如图 3 所示,第 1 列的优势度大于 1(在 Bode 图上对应于大于 0),表明系统非对角占优.

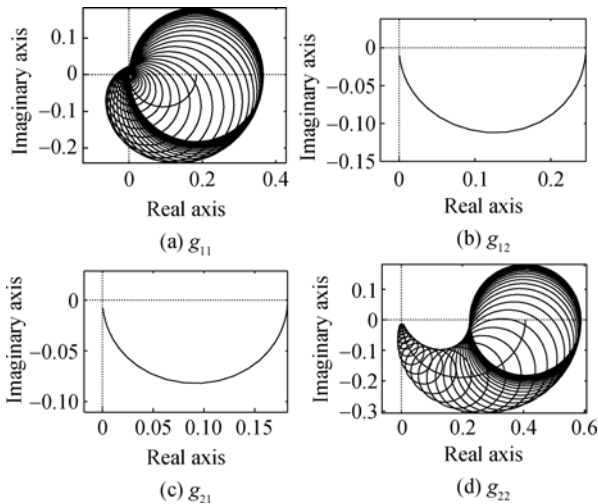


图 2 $G(s)$ 的正 Nyquist 阵列图

Fig. 2 Direct Nyquist array diagram of $G(s)$

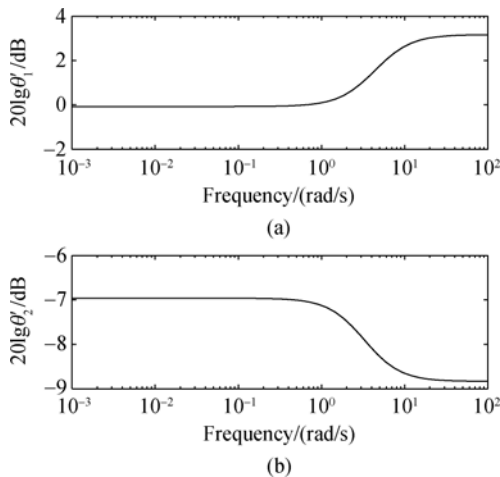


图 3 $G(s)$ 的列优势度 Bode 图

Fig. 3 Bode diagram of $G(s)$'s column dominance

考虑前置补偿器 $K_{pre}(s)$,若取“P”型,按照第 1.2 节的方法(取 $\omega(\omega)$ 均匀分布)求得

$$K_{prel}(s) = \begin{bmatrix} 5.9549 & -2.8970 \\ -2.3041 & 2.0014 \end{bmatrix}$$

补偿系统 $Q_1(s) = G(s)K_{prel}(s)$ 的其正 Nyquist 阵列如图 4 所示,显然 Gershgorin 带不包含原点且相对变窄了,故补偿系统的交连减弱了,其列优势度 Bode 图如图 5 所示(其中也给出了标准 Hawkins 法所得的 $Q_1(s)$ 的列优势度 Bode 图),列优

势度均小于 1,表明系统已对角占优,且改进 Hawkins 法相比标准 Hawkins 法所得到的补偿系统 $Q_1(s)$ 的对角优势度有部分改善.

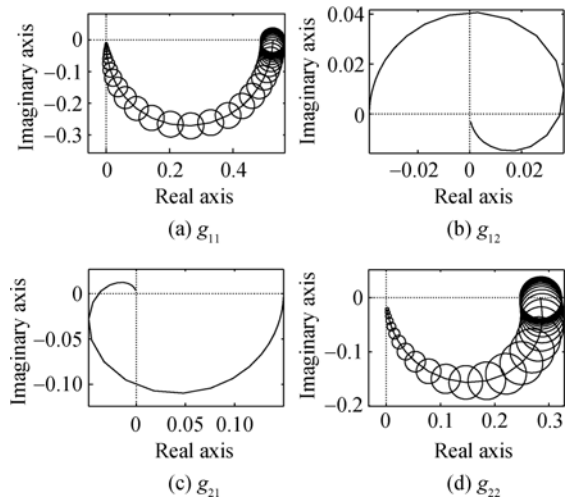


图 4 补偿系统 $Q_1(s)$ 的正 Nyquist 阵列图

Fig. 4 Direct Nyquist array diagram of $Q_1(s)$

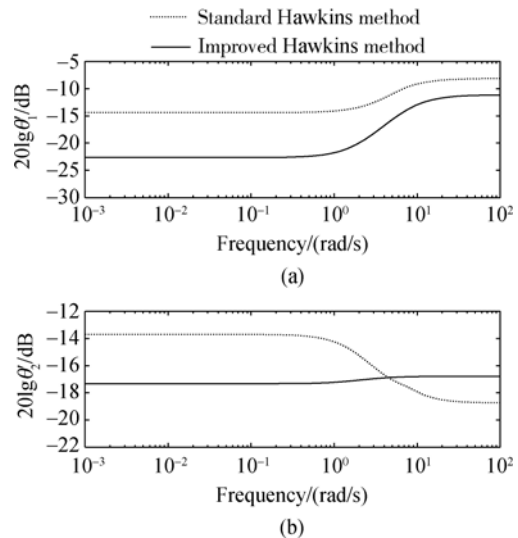


图 5 $Q_1(s)$ 列优势度的 Bode 图

Fig. 5 Bode diagram of $Q_1(s)$'s column dominance

补偿系统 $Q_1(s)$ 开环系统多项式 $\rho_0(s)$ 的零极点分布如图 6,可看出 $\rho_0(s)$ 在右半 s 平面内的零点个数 $n_0 = 0$. 结合图 4,由正 Nyquist 判据^[1]知 $Q_1(s)$ 的单位反馈闭环系统是渐近稳定的.

对补偿系统 $Q_1(s)$,设计动态补偿器 $K_{cl}(s)$ 即每一个通道简单地设计一个 PI 控制器来改善闭环动态特性. η_l 和 η_h 的单位阶跃响应如图 7,可看出闭环系统具有较好动态响应和解耦效果.

当发动机工况点为高度 $H = 18 \text{ km}$,马赫数 $Ma = 1.8$ 和低压转速 $n_l = 96\%$ 时,式(10)中的系

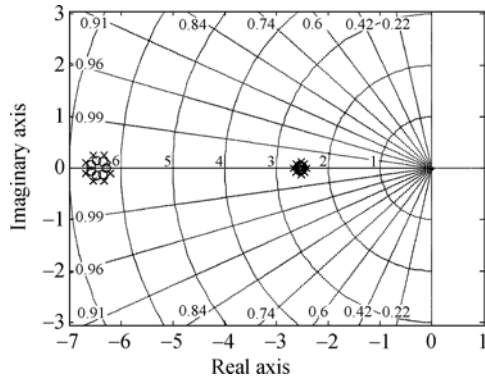


图6 $Q_1(s)$ 开环系统多项式 $\rho_0(s)$ 的零极点分布
Fig. 6 Pole-zero map of openloop polynomial $\rho_0(s)$ of $Q_1(s)$

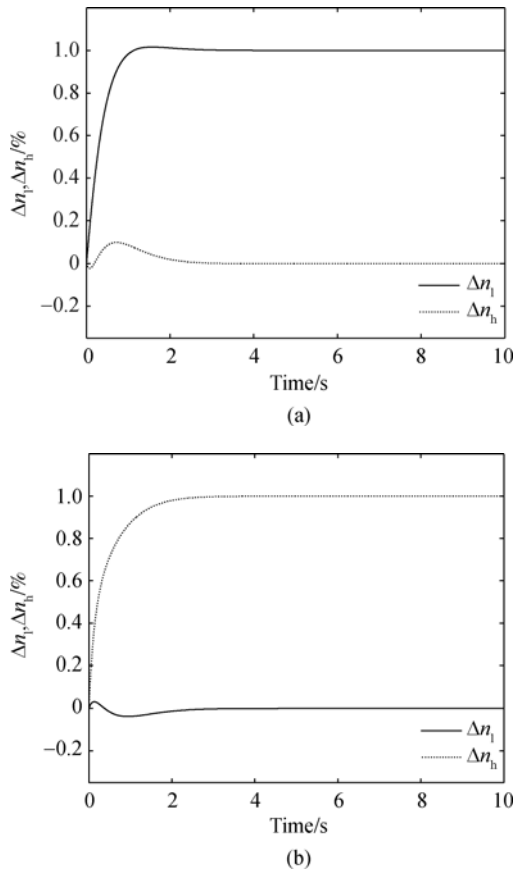


图7 标称工况下闭环系统 n_l 和 n_h 的单位阶跃响应
Fig. 7 Step response of closedloop n_l and n_h at nominal point

数矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0.63 & -0.30 \\ 1.01 & -2.63 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.16 & 0.25 \\ 0.21 & 0.54 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

仍用前面设计好的前置补偿器 $\mathbf{K}_{pre1}(s)$ 和动态补偿器 $\mathbf{K}_{c1}(s)$ 进行闭环仿真, n_l 和 n_h 的单位阶跃响

应如图8所示,可以看出闭环系统仍具有较好的动态响应和解耦效果,说明所设计的控制器具有一定的鲁棒性.

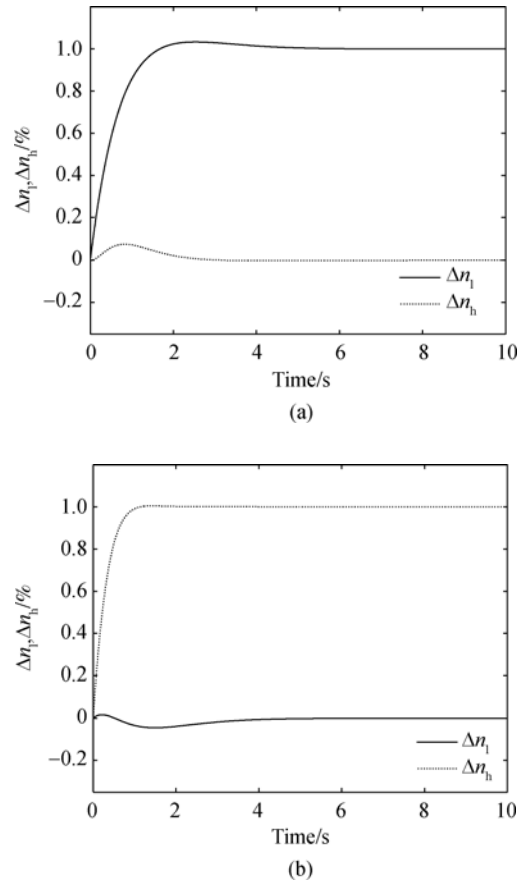


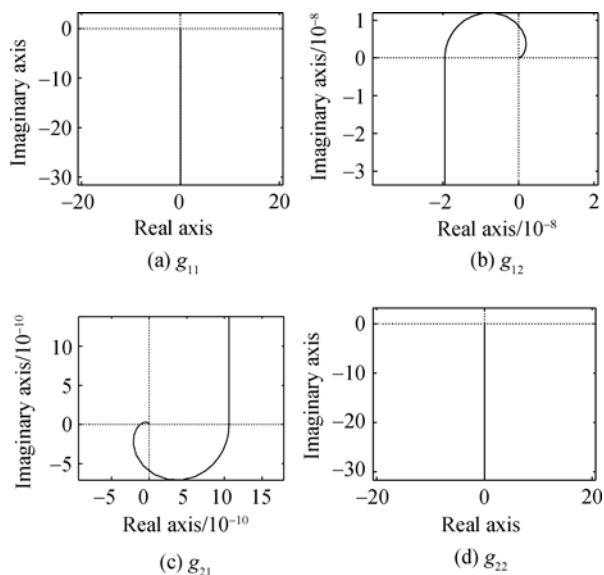
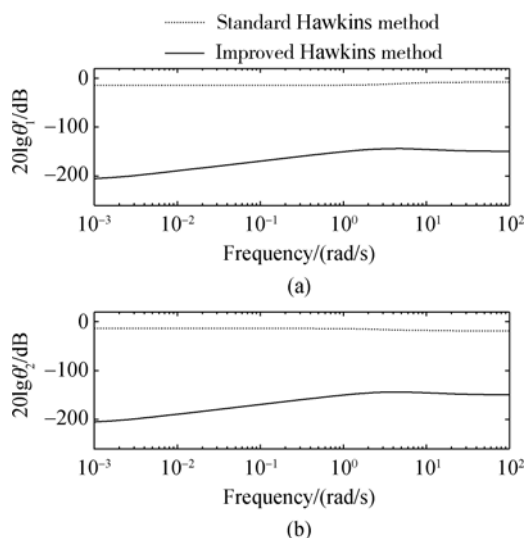
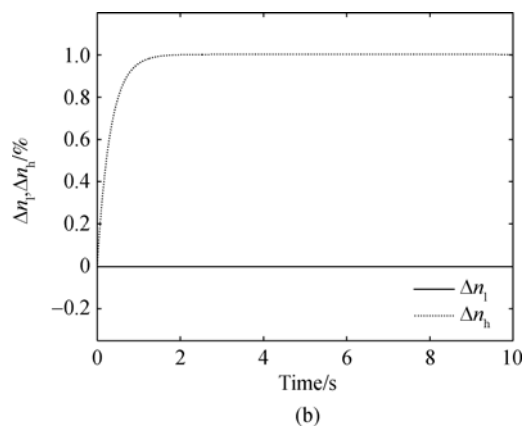
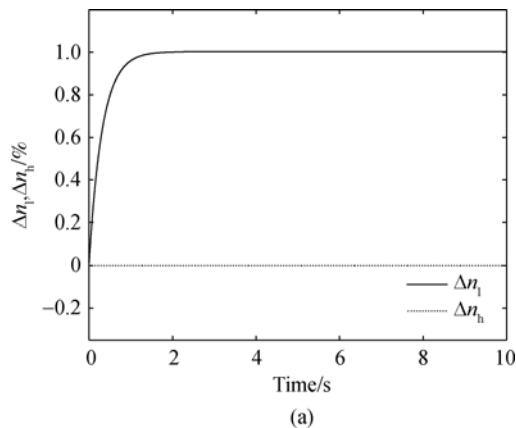
图8 其他工况下闭环系统 n_l 和 n_h 的单位阶跃响应
Fig. 8 Step response of closedloop n_l and n_h at other point

若 $\mathbf{K}_{pre}(s)$ 取“PI”型,可类似地求得

$$\mathbf{K}_{pre2}(s) = \begin{bmatrix} 0.14764 + \frac{0.43281}{s} & -0.06385 - \frac{0.26282}{s} \\ -0.05338 - \frac{0.19421}{s} & 0.03707 + \frac{0.19582}{s} \end{bmatrix}$$

补偿系统 $\mathbf{Q}_2(s) = \mathbf{G}(s)\mathbf{K}_{pre2}(s)$ 的正 Nyquist 阵列如图9所示,显然 Gershgorin 带不包含原点且非常窄. $\mathbf{Q}_2(s)$ 列优势度的 Bode 图如图10所示,列优势度均远小于1,表明补偿系统非常接近于对角阵.在图10中也给出了对应标准 Hawkins 法所得的 $\mathbf{Q}_2(s)$ 列优势度 Bode 图,可看出改进 Hawkins 法所给出的对角优势度更明显.

类似地,对补偿系统 $\mathbf{Q}_2(s)$ 设计 PI 补偿器 $\mathbf{K}_{c2}(s)$. 在 $\mathbf{K}_{pre2}(s)$ 和 $\mathbf{K}_{c2}(s)$ 控制下 n_l 和 n_h 的单位阶跃响应如图11所示,可以看出闭环系统具有较好的动态响应和解耦效果.

图9 补偿系统 $Q_2(s)$ 的正 Nyquist 阵列图Fig. 9 Direct Nyquist array diagram of $Q_2(s)$ 图10 补偿系统 $Q_2(s)$ 的列优势度 Bode 图Fig. 10 Bode diagram of $Q_2(s)$'s column dominance图11 闭环系统 n_1 和 n_h 的单位阶跃响应Fig. 11 Step response of closedloop n_1 and n_h

4 结 论

针对 Nyquist 类设计方法,结合 Hawkins 法思想,给出了一种动态伪对角化解耦方法,并对 Nyquist 类设计方法进行控制器综合的鲁棒性和解耦性进行了分析,最后将这种动态伪对角化方法用于某型航空发动机控制器的设计,仿真结果表明闭环系统具有较好的解耦特征和动静态响应。

参考文献:

- [1] 阙志宏,罗健,周凤岐,等. 线性系统理论[M]. 西安:西北工业大学出版社,1994.
- [2] 彭凯,樊丁,卜振鹏,等. 航空发动机燃油分布器故障分析与参数优化[J]. 推进技术,2011,32(2):276-281.
PENG Kai, FAN Ding, BU Zhenpeng, et al. Failure analysis and parameter optimization for fuel distributor of certain aeroengine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(2): 276-281. (in Chinese)
- [3] 樊思齐,李华聪,樊丁. 航空发动机控制:下册[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008.
- [4] 高黛陵,吴麒. 多变量频率域控制理论[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [5] OUYANG Qui. The inverse Nyquist array method in multivariable control systems and its application to the design of an aircraft glide slope control system[R]. Delft: Delft University of Technology, Report LR-440, 1986.
- [6] 朱玉斌,樊思齐,任新宇,等. 基于 DRNN 网络的航空发动机多变量解耦控制[J]. 推进技术,2006,27(2):150-153.
ZHU Yubin, FAN Siqi, REN Xinyu, et al. A multivariable decoupling control based on DRNN for aeroengine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 150-153. (in Chinese)
- [7] 吕跃飞,黎中伟,熊学泉,等. 航空发动机多变量 PI 型鲁棒控制器[J]. 航空学报,1997,18(4):412-416.
LÜ Yuefei, LI Zhongwei, XIONG Xuequan, et al. PI type

- multivariable robust controller design of aero-engine[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997, 18(4): 412-416. (in Chinese)
- [8] 高亚辉, 臧军, 姚华, 等. 航空发动机 PI 解耦控制器设计方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(4): 449-454.
GAO Yahui, ZANG Jun, YAO Hua, et al. Decoupling PI controller design for aeroengine[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(4): 449-454. (in Chinese)
- [9] 毛维杰, 孙优贤. 伪对角化方法的扩展及其实现[J]. *控制理论与应用*, 1997, 14(6): 883-886.
MAO Weijie, SUN Youxian. Extension and related realization of the pseudo-diagonalization method [J]. *Control Theory and Applications*, 1997, 14(6): 883-886. (in Chinese)
- [10] 毛维杰, 孙优贤. 结构不确定线性系统鲁棒对角优势的实现[J]. *信息与控制*, 1997, 26(5): 321-326.
MAO Weijie, SUN Youxian. Achieving robust diagonal dominance of linear systems with structured uncertainty [J]. *Information and Control*, 1997, 26(5): 321-326. (in Chinese)
- [11] 李华聪, 吴志琨, 朱玉斌. 涡扇发动机分路式多变量 PI 解耦控制[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(5): 957-960.
LI Huacong, WU Zhikun, ZHU Yubin. A decentralized multivariable PI controller for turbofan engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(5): 957-960. (in Chinese)
- [12] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计: MATLAB 语言与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [13] 封建湖, 车刚明, 聂玉峰. 数值分析原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [14] 程云鹏, 张凯院, 徐仲. 矩阵论 [M]. 3 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [15] 彭凯, 樊丁, 李杰, 等. 航空发动机导叶模糊控制器设计与参数优化[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(4): 942-946.
PENG Kai, FAN Ding, LI Jie, et al. Fuzzy controller design and parameter optimization for aero-engine compressor guide vane system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(4): 942-946. (in Chinese)
- [16] PENG Kai, FAN Ding, YANG Fan, et al. Active generalized predictive control of turbine tip clearance for aero-engines [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(5): 1147-1155.
- [17] PENG Kai, FAN Ding, ZHANG Lei, et al. A novel generalized predictive control and its application on active clearance control of aeroengine [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 616-618: 1922-1925.
- [18] PENG Kai, FAN Ding, FU Jiangfeng, et al. Improved genetic algorithm and its application in parameter optimization for certain aero-engine compressor guide vane regulator[C]// *Proceedings of 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control*. Ningbo, China: Curran Associates, Inc., 2011: 2097-2100.

(编辑: 秦理曼)