

基于窗口 H_∞ 范数的 PID 控制器 优化设计

马国梁¹ 陈庆伟² 胡维礼²

摘要 针对有限频段提出了窗口 H_∞ 范数的新概念, 然后给出了有限频段的界实定理及其对偶形式. 按照模型匹配原则, 将 PID 控制器的设计问题转化为窗口 H_∞ 范数优化问题, 通过求解 LMI 得到 PID 控制器参数. 仿真结果验证了设计方法的有效性.

关键词 窗口 H_∞ 范数, 界实定理, 模型匹配, PID 控制器
中图分类号 TP13

Optimal Design of PID Controller Based on Window H_∞ Norm

MA Guo-Liang¹ CHEN Qing-Wei² HU Wei-Li²

Abstract A new conception of window H_∞ norm for restricted frequency range is presented, and then the bounded real theorem and the dual version for restricted frequency range are given. The problem of PID controller design is converted into a window H_∞ norm optimization problem according to model-matching principle, and the parameters of PID controller are obtained by solving LMI. Simulation result shows the effectiveness of the design method.

Key words Window H_∞ norm, bounded real theorem, model-matching, PID controller

1 引言

采用 PID 控制器仍然被认为是许多实际控制问题的一种最简单最有效的控制方案, 工业中超过 90% 的控制回路仍是基于 PID 控制器^[1,2]. PID 控制器在理论研究上也得到了长足发展, PID 控制器与其他控制理论方法相结合产生了一些新型的 PID 控制器^[3], 例如基于知识推理的专家 PID 控制^[4]、基于神经网络的 PID 控制^[5]、模糊 PID 控制^[6]、预测 PID 控制^[7] 等. 并且一些现代优化计算方法也被应用于 PID 控制器设计, 例如通过采用遗传算法^[8] 及粒子群算法^[9] 求取满足设计要求的 PID 控制器参数.

模型匹配方法常用于控制系统的综合设计^[10], 其基本思想是首先选取一个满足性能指标要求的参考模型, 然后设计控制器使得控制系统模型逼近参考模型, 从而使得控制系统满足性能指标要求, 传统的 H_∞ 范数常作为模型匹配设计问题的性能指标. H_∞ 范数是一个全频段的性能指标, 然而工程中的设计往往只针对有限频段, 例如何服系统设计时主要考虑中低频段的跟踪性能及稳态精度. 此外在模型降阶理论中, 常会针对有限频段把高阶模型降阶为低阶模型, 已有的做法是采用传统的 H_∞ 范数作为性能指标, 通过频率加权的办法针对有限频段求解降阶问题, 例如频率加权平衡模型降阶方法^[11], 这一方法的不足在于并非严格意义上考虑有限频

段. 因此针对有限频段的控制系统分析设计问题需要考虑采用新的性能指标.

本文将传统 H_∞ 范数的概念推广至有限频段, 提出了窗口 H_∞ 范数的新概念, 并给出了有限频段的界实定理及其对偶形式. 按照模型匹配原则, 将 PID 控制器设计问题描述为近似模型匹配问题, 以窗口 H_∞ 范数作为近似模型匹配问题的优化指标, 然后通过求解 LMI 得到 PID 控制器参数, 仿真结果表明了所研究方法的有效性.

2 问题描述和预备知识

一个典型的控制系统结构如图 1 所示. 图中, r 为参考输入, e 为误差, u 为控制输入, y 为输出, 控制器传递函数为 $G_c(s)$, 被控对象传递函数为 $G_p(s)$, 设参考模型的开环传递函数为 $G_m(s)$, 按照模型匹配原则进行控制器设计, 若使得 $G_c(s)G_p(s) = G_m(s)$, 则实现了精确模型匹配. 然而精确模型匹配难以实现, 因此考虑近似模型匹配. 基于近似模型匹配原则的控制器设计问题可描述为 H_∞ 范数优化问题: 求取 $G_c(s)$ 使得

$$\|G_c(s)G_p(s) - G_m(s)\|_\infty < \gamma \quad (1)$$

其中 $\gamma > 0$ 为给定的较小正数. 本文要解决的主要问题是: 针对有限频段, 引入窗口 H_∞ 范数的概念, 按照近似模型匹配原则, 通过求解窗口 H_∞ 范数优化问题设计 PID 控制器.

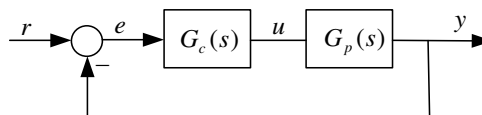


图 1 控制系统结构

Fig. 1 Structure of control system

为了证明本文主要结果, 需要引入如下引理.

引理 1^[12]. 给定矩阵 $A \in \mathbf{C}^{n \times n}$, $B \in \mathbf{C}^{n \times m}$, Hermitian 矩阵 $\Pi \in \mathbf{C}^{(n+m) \times (n+m)}$, 常数 $\varpi_l > 0$, 若 A 无特征值 λ 满足 $\lambda = j\omega$, 且 $|\omega| \leq \varpi_l$, 则下列条件等价:

1) $\forall \omega \in \Omega$,

$$\begin{bmatrix} (j\omega I - A)^{-1}B \\ I \end{bmatrix}^H \Pi \begin{bmatrix} (j\omega I - A)^{-1}B \\ I \end{bmatrix} < 0 \quad (2)$$

2) 存在 Hermitian 矩阵 P, Q , 满足 $Q > 0$, 且

$$\begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \varpi_l^2 Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix} + \Pi < 0 \quad (3)$$

其中, $\Omega = \{\omega \in \mathbf{R} : \det(j\omega I - A) \neq 0, |\omega| \leq \varpi_l\}$, 在 A, B, Π 为实矩阵时, P, Q 也相应为实矩阵.

3 主要结果

3.1 窗口 H_∞ 范数

借鉴信号分析中的局部化窗口思想(窗口 Fourier 变换、小波变换), 将传统的 H_∞ 范数的概念推广到“窗口”频段, 提出窗口 H_∞ 范数这一新概念.

收稿日期 2006-6-19 收修改稿日期 2006-11-1
Received June 19, 2006; in revised form November 1, 2006
1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 210016 2. 南京理工大学自动化学院 南京 210094
1. School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016 2. Automation School, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094
DOI: 10.1360/aas-007-1000

定义 1. 定义性能指标如下

$$\|G(s)\|_\infty^W = \sup_{\omega \in W} \sigma_{\max}(G(j\omega)) \quad (4)$$

则称 $\|G(s)\|_\infty^W$ 为 $G(s)$ 的窗口 H_∞ 范数, 其中 W 为窗口频段集合, σ_{\max} 为矩阵最大奇异值, $W = \mathbf{R}$ 时, 窗口 H_∞ 范数与传统 H_∞ 范数相等, 故传统 H_∞ 范数属于窗口 H_∞ 范数的特例, 由定义 1 可知窗口 H_∞ 范数具有如下基本性质:

$$\|G(s)\|_\infty^W \leq \|G(s)\|_\infty \quad (5)$$

对于 SISO 系统, 传统 H_∞ 范数的物理意义是 Bode 图中幅值曲线在全频段的最大值, 而窗口 H_∞ 范数的物理意义是 Bode 图中幅值曲线在局部频段 $\omega \in W$ 内的最大值.

针对窗口 H_∞ 范数有如下结果:

定理 1. 给定窗口频段集合 $W = \{\omega \in \mathbf{R} : |\omega| \leq \omega_l\}$, 设 $\det(j\omega I - A) \neq 0 (\forall \omega \in W)$, 则窗口 H_∞ 范数 $\|G(s)\|_\infty^W = \|C(sI - A)^{-1}B + D\|_\infty^W < \gamma$ 的充要条件为: 存在实对称阵 $P, Q > 0$, 满足

$$\begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \omega_l^2 Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^T C & C^T D \\ D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

其中, A, B, C, D 为维数适当的实矩阵.

证明. 根据窗口 H_∞ 范数定义及矩阵最大奇异值定义可知, $\|G(s)\|_\infty^W < \gamma$ 等价于

$$G^H(j\omega)G(j\omega) < \gamma^2 I, \quad \forall \omega \in W \quad (7)$$

将 $G(j\omega) = C(j\omega I - A)^{-1}B + D$ 代入式 (6) 有

$$\begin{aligned} & (C(j\omega I - A)^{-1}B + D)^H \times \\ & (C(j\omega I - A)^{-1}B + D) - \gamma^2 I < 0 \quad \forall \omega \in W \quad (8) \end{aligned}$$

考虑到任意实矩阵 M 满足 $M^H = M^T$, 式 (8) 展开为

$$\begin{aligned} & ((j\omega I - A)^{-1}B)^H C^T C ((j\omega I - A)^{-1}B) + \\ & ((j\omega I - A)^{-1}B)^H C^T D + D^T C \cdot \quad \forall \omega \in W \quad (9) \\ & ((j\omega I - A)^{-1}B) + D^T D - \gamma^2 I < 0 \end{aligned}$$

式 (9) 写成矩阵相乘形式为

$$\begin{bmatrix} (j\omega I - A)^{-1}B \\ I \end{bmatrix}^H \cdot \begin{bmatrix} C^T C & C^T D \\ D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (j\omega I - A)^{-1}B \\ I \end{bmatrix} < 0 \quad \forall \omega \in W \quad (10)$$

令 $\Pi = \begin{bmatrix} C^T C & C^T D \\ D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{bmatrix}$, 根据引理 1, (10) 成立等价于: 存在实对称阵 $P, Q > 0$, 满足

$$\begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \omega_l^2 Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^T C & C^T D \\ D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

故定理 1 成立. □

采用类似的证明步骤可得定理 1 的对偶形式.

推论 1. 给定窗口频段集合 $W = \{\omega \in \mathbf{R} : |\omega| \leq \omega_l\}$, 设 $\det(j\omega I - A) \neq 0 (\forall \omega \in W)$, 则窗口 H_∞ 范数 $\|G(s)\|_\infty^W = \|C(sI - A)^{-1}B + D\|_\infty^W < \gamma$ 的充要条件为: 存在实对称阵 $P, Q > 0$, 满足

$$\begin{bmatrix} A & I \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \omega_l^2 Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & I \\ C & 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} BB^T & BD^T \\ DB^T & DD^T - \gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

证明. 根据窗口 H_∞ 范数定义及矩阵最大奇异值定义可知, $\|G(s)\|_\infty^W < \gamma$ 等价于

$$G(j\omega)G^H(j\omega) < \gamma^2 I, \quad \forall \omega \in W \quad (13)$$

将 $G(j\omega) = C(j\omega I - A)^{-1}B + D$ 代入式 (12) 有

$$\begin{aligned} & (C(j\omega I - A)^{-1}B + D) \times \\ & (C(j\omega I - A)^{-1}B + D)^H - \gamma^2 I < 0 \quad \forall \omega \in W \quad (14) \end{aligned}$$

而 (14) 等价于

$$\begin{aligned} & (B^T(-j\omega I - A^T)^{-1}C^T + D^T)^H (B^T \cdot \\ & (-j\omega I - A^T)^{-1}C^T + D^T) - \gamma^2 I < 0 \quad \forall \omega \in W \quad (15) \end{aligned}$$

令 $\bar{\omega} = -\omega$, 则 $W = \{\omega \in \mathbf{R} : |\omega| \leq \omega_l\} = \{\bar{\omega} \in \mathbf{R} : |\bar{\omega}| \leq \omega_l\}$, 故 (15) 等价于

$$\begin{aligned} & (B^T(j\bar{\omega} I - A^T)^{-1}C^T + D^T)^H (B^T \cdot \\ & (j\bar{\omega} I - A^T)^{-1}C^T + D^T) - \gamma^2 I < 0 \quad \forall \bar{\omega} \in W \quad (16) \end{aligned}$$

式 (16) 展开为

$$\begin{aligned} & ((j\bar{\omega} I - A^T)^{-1}C^T)^H BB^T ((j\bar{\omega} I - A^T)^{-1} \cdot \\ & C^T) + ((j\bar{\omega} I - A^T)^{-1}C^T)^H BD^T + DB^T \cdot \quad \forall \bar{\omega} \in W \\ & ((j\bar{\omega} I - A^T)^{-1}C^T) + DD^T - \gamma^2 I < 0 \quad (17) \end{aligned}$$

式 (17) 写成矩阵相乘形式为

$$\begin{bmatrix} (j\bar{\omega} I - A^T)^{-1}C^T \\ I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} BB^T & BD^T \\ DB^T & DD^T - \gamma^2 I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (j\bar{\omega} I - A^T)^{-1}C^T \\ I \end{bmatrix} \quad \forall \bar{\omega} \in W \quad (18)$$

令 $\Pi = \begin{bmatrix} BB^T & BD^T \\ DB^T & DD^T - \gamma^2 I \end{bmatrix}$, 根据引理 1, 式 (18) 成立等价于: 存在实对称阵 $P, Q > 0$, 满足

$$\begin{bmatrix} A^T & C^T \\ I & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \omega_l^2 Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^T & C^T \\ I & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BB^T & BD^T \\ DB^T & DD^T - \gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

故推论 1 成立. □

定理 1 及推论 1 的形式类似于传统的界实引理, 但针对的是有限频段, 故统称为有限频段的界实定理.

3.2 PID 控制器设计

对于图 1 所示的控制系统, 设被控对象传递函数 $G_p(s)$ 对应的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_p = A_p x_p + B_p u \\ y = C_p x_p \end{cases} \quad (20)$$

控制器传递函数 $G_c(s)$ 对应的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_c = A_c x_c + B_c e \\ u = C_c x_c + D_c e \end{cases} \quad (21)$$

仍以 e 表示输入, 设参考模型 $G_m(s)$ 对应的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_m = A_m x_m + B_m e \\ y_m = C_m x_m \end{cases} \quad (22)$$

令 $x = [x_p \quad x_c \quad x_m]^T$, $z = y - y_m$, 考虑增广系统

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Be \\ y = Cx \end{cases} \quad (23)$$

其中, $A = \begin{bmatrix} A_p & B_p C_c & 0 \\ 0 & A_c & 0 \\ 0 & 0 & A_m \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} B_p D_c \\ B_c \\ B_m \end{bmatrix}$, $C =$

$\begin{bmatrix} C_p & 0 & -C_m \end{bmatrix}$, 计算可知由 e 至 z 的传递函数 $G(s)$ 满足

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B = G_c(s)G_p(s) - G_m(s) \quad (24)$$

针对有限频段 $W = \{\omega \in \mathbf{R} : |\omega| \leq \varpi_l\}$, 按照模型匹配原则设计控制器 $G_c(s)$, 将问题转化为: 求取 $G_c(s)$ 使得

$$\|G_c(s)G_p(s) - G_m(s)\|_\infty^W < \gamma \quad (25)$$

即针对有限频段的控制器设计问题转化为一个窗口 H_∞ 范数优化问题. 在定理 1 的基础上有如下结果:

定理 2. 对于增广系统 (23), 给定窗口频段集合 $W = \{\omega \in \mathbf{R} : |\omega| \leq \varpi_l\}$, 设 $\det(j\omega I - A) \neq 0 (\forall \omega \in W)$, 则 $\|C(sI - A)^{-1}B\|_\infty^W < \gamma$ 的充要条件为: 存在实对称阵 $P, Q > 0$, 满足

$$\begin{bmatrix} AP + PA^T - AQA^T + \varpi_l^2 Q & -AQC^T + PC^T & B \\ -CQA^T + CP & -CQC^T - \gamma^2 I & 0 \\ B^T & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (26)$$

证明. 根据推论 1, $\|C(sI - A)^{-1}B\|_\infty^W < \gamma$ 的充要条件是存在实对称阵 $P, Q > 0$, 满足

$$\begin{bmatrix} A & I \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \varpi_l^2 Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & I \\ C & 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} BB^T & 0 \\ 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (27)$$

式 (27) 等价于

$$\begin{bmatrix} A & I \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \varpi_l^2 Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & I \\ C & 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} I \begin{bmatrix} B^T & 0 \end{bmatrix} < 0 \quad (28)$$

而

$$\begin{bmatrix} A & I \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \varpi_l^2 Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & I \\ C & 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AP + PA^T - AQA^T + \varpi_l^2 Q & -AQC^T + PC^T \\ -CQA^T + CP & -CQC^T - \gamma^2 I \end{bmatrix} \quad (29)$$

则根据 Schur 引理, 由式 (28), (29) 可知定理 2 成立. \square

定理 2 适用于多输入多输出系统, 对于图 1 所示的控制系统, 为简化研究问题只考虑单输入单输出的情形, 针对有限频段进行 PID 控制器设计, PID 控制器传递函数为 $G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_d s + 1}$, 令 T_d 为固定的较小时间常数, 待定的 PID 参数 k_p, k_i, k_d 以线性形式出现在 LMI (26) 中, 则 PID 参数整定的基本步骤为: 首先选取一个满足性能指标的参考模型, 然后给定窗口频段集合 $W = \{\omega \in \mathbf{R} : |\omega| \leq \varpi_l\}$ 及较小的模型匹配误差上限 γ , 求解 LMI (26), 若问题可解则得到 PID 参数 k_p, k_i, k_d .

4 仿真研究

例. 设被控对象状态模型参数为

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -25 & -50.25 & 25 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 8.33 & 16.67 & -8.33 & -17.5 \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C_p = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0].$$

要求设计 PID 控制器, 使得系统满足阶跃响应指标为: 上升时间 $t_r \leq 1$ 秒、调节时间 $t_s \leq 1.5$ 秒、超调量 $\sigma\% \leq 10\%$.

容易验证被控对象 $G_p(s) = C_p(sI - A_p)^{-1}B_p$ 已含有一个积分环节, 可表示为 $G_p(s) = \frac{1}{s}G_{p1}(s)$, 故采用 PD 控制器, 其传递函数为: $G_c(s) = k_p + \frac{k_d s}{T_d s + 1}$. 选用二阶参考模型

$G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)}$, 满足性能指标的一组参数为 $\xi = 1/\sqrt{2}, \omega_n = 5$. 而 $G_c(s)G_{p1}(s)$ 与 $G_{m1}(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + 2\xi\omega_n)}$ 频率特性接近等效于 $G_c(s)G_p(s)$ 与 $G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)}$ 的频率特性接近. 取增广系统为 $G(s) = G_c(s)G_{p1}(s) - G_{m1}(s)$, 对应的状态模型如 (23) 所示, 给定 $W = \{\omega \in \mathbf{R} : |\omega| \leq 1\}$, $\gamma = \sqrt{0.05}, T_d = 0.05$, 可知满足定理 2 的应用条件, 根据已知的各参数求解 LMI, 可求得 PD 控制器参数为 $k_p = 4.0198, k_d = 5.1027$.

求得控制器参数后, 容易验证 $G_c(s)G_p(s)$ 在单位负反馈的作用下闭环稳定, 阶跃响应仿真结果如图 2 所示, 实线对应 $G_c(s)G_p(s)$ 在单位负反馈作用下的阶跃响应曲线, 虚线对应参考模型 $G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)}$ 在单位负反馈作用下的阶跃响应曲线, 可以看出设计的 PD 控制器满足阶跃响应指标要求.

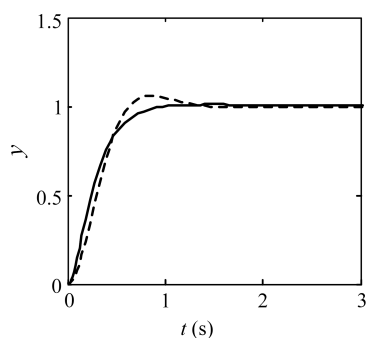


图 2 阶跃响应曲线

Fig. 2 Step response curve

画出 $G_c(s)G_p(s)$ 的 Bode 图如图 3 实线所示, $G_m(s)$ 的 Bode 图如图 3 虚线所示, 在有限低频段达到了近似模型匹配的目的。

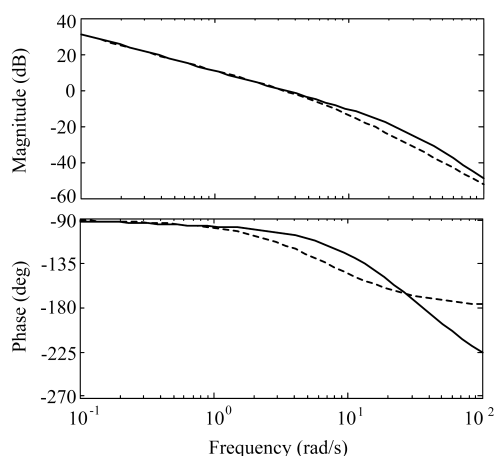


图 3 控制系统 Bode 图

Fig. 3 Bode diagram of the control system

5 结束语

本文提出了窗口 H_∞ 范数的新概念, 与传统 H_∞ 范数相比, 更适用于针对有限频段的控制系统分析与设计. 研究过程存在的不足是尚未考虑被控对象模型参数的不确定性, 另外, 除了 PID 控制器, 基于窗口 H_∞ 范数的其他类型控制器的优化设计问题也有待进一步研究.

References

- 1 Li Y, Ang K H, Chong G. PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, **26**(1): 32~41
- 2 Ang K H, Chong G, Li Y. PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, **13**(4): 559~576
- 3 Aström K J, Hägglund T. *Advanced PID Control*. Pittsburgh: ISA, 2005. 1~10
- 4 Chee F, Fernando T L, Savkin A V, Heeden V. Expert PID control system for blood glucose control in critically-ill patients. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2003, **7**(4): 419~425
- 5 Chen J, Huang T C. Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control. *Journal of Process Control*, 2004, **14**(2): 211~230
- 6 Carvajal J, Chen G, Ogmen H. Fuzzy PID controller: design, performance evaluation, and stability analysis. *Information Sciences*, 2000, **123**(3-4): 249~270
- 7 Johnson M A, Moradi M F. *PID Control: New Identification and Design Methods*. London: Springer-Verlag, 2005. 473~515
- 8 Lin C L, Jan H Y, Shieh N C. GA-based multiobjective PID control for a linear brushless DC motor. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2003, **8**(1): 5~65
- 9 Gaing Z L. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, **19**(2): 384~391
- 10 Szita G, Sanathanan C K. A model matching approach for designing decentralized MIMO controllers. *Journal of the Franklin Institute*, 2000, **337**(6): 641~660
- 11 Zhou K, Doyle J C, Glover K. *Robust and Optimal Control*. London: Prentice Hall, 1996. 179~197
- 12 Iwasaki T, Hara S, Yamauchi H. Dynamical system design from a control perspective: finite frequency positive-realness approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, **48**(8): 1337~1354

马国梁 南京航空航天大学自动化学院博士后. 分别于 2002 年、2007 年获南京理工大学硕士学位和博士学位. 主要研究方向为飞行控制系统与切换系统. 本文通信作者. E-mail: ml_job@163.com

(MA Guo-Liang Postdoctor at School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. He received his master degree and Ph.D. degree from Nanjing University of Science and Technology (NUST) in 2002 and 2007, respectively. His research interest covers flight control systems and switched systems. Corresponding author of this paper.)

陈庆伟 南京理工大学自动化学院教授. 分别于 1988 年、2004 年获南京理工大学硕士学位和博士学位. 主要研究方向为机器人控制系统、伺服系统. E-mail: cqw1002@sina.com

(CHEN Qing-Wei Professor at Automation School, NUST. He received his master degree and Ph.D. degree from NUST in 1988 and 2004, respectively. His research interest covers robot control system and servo systems.)

胡维礼 南京理工大学自动化学院教授. 1965 年毕业于清华大学, 1981 年获南京理工大学硕士学位. 主要研究方向为智能控制、网络控制系统. E-mail: hwl1002@hotmail.com

(HU Wei-Li Professor at Automation School, NUST. He graduated from Tsinghua University in 1965 and received his master degree from NUST in 1981. His research interest covers intelligent control and networked control system.)