

PI控制中衰减度与 H_∞ 指标的相容性

李银伢, 盛安冬, 王远钢, 郭 治

(南京理工大学 自动化系, 江苏 南京 210094)

摘要: 研究 n 阶线性定常系统在PI控制下衰减度与 H_∞ 指标的相容性问题. 首先基于D-分割法和边界穿越定理, 分别推导了描述PI控制器参数稳定域边界、PI控制器满足期望的衰减度指标的参数边界和期望的 H_∞ 指标的参数边界的解析表达式. 再应用满意控制思想, 对上述期望指标的相容性进行了分析, 给出了相容指标较好的取值范围. 当上述两类指标相容时, 可以迅速得到整个PI控制器相容性解集(满意解集). 用一个算例说明了所提出的设计方法的有效性.

关键词: 满意控制; PI控制; 相容性; H_∞ 指标; 衰减度; D-分割法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Consistency of decay ratio and H-infinity indices in PI control

LI Yin-ya, SHENG An-dong, WANG Yuan-gang, GUO Zhi

(Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: The consistency of decay ratio index and H-infinity index under PI control for n -order linear time-invariant systems is considered in this paper. Based on the D-partition technique and the boundary cross theorem, the analytic expressions for describing the stabilizing boundaries, the parameter boundaries with the expected decay ratio index and H-infinity index of PI controller are derived, respectively. Using the idea of satisfactory control, the consistency of the above expected indices is analyzed and a good range of the consistent index is proposed. The whole consistency solution set (the satisfactory solution set) of PI controller can be quickly determined when the above two types of indices are consistent. A numerical example also shows the validity of the proposed design method.

Key words: satisfactory control; PI control; consistency; H-infinity index; decay ratio; D-partition method

1 引言(Introduction)

设计控制系统时通常需要考虑以下两个方面的要求: 一方面要考虑选用的控制器结构尽可能简单, 阶次较低或为固定阶次, 易于工程实现(如PI/PID控制器); 另一方面所设计的控制系统必须同时满足给定的性能指标集. 然而, 在过去几十年里, 尽管现代最优控制技术, 如 H_∞ , H_2 控制技术^[1]得到了长足发展, 但因为所求得的控制器阶次高、结构复杂等原因难以应用于实际工程控制中^[2]. 因而设计结构简单、阶次低能同时满足期望指标集的控制具有重要的工程实践意义.

自Ziegler和Nichols提出PID控制器自整定方法以来, 众多学者针对不同的控制过程和模型、不同的控制器设计指标推导出许多PID控制器设计方法^[3]. 然而, 传统的PID控制调试方法往往具有试凑性质, 难以满足多个期望的性能指标要求; 或者是针

对某一指标设计出唯一一组最优或次优的PID控制参数, 但由于种种原因, 如建模误差、参数摄动、环境变化以及工程实现等原因, 最优或次优解往往达不到预期的效果. 控制系统设计往往是一个工程的子项目, 为了保证全部性能指标的实现, 人们期望的控制策略是一个尽可能大的满意解集. 满意控制^[4]在这种需求下应运而生. 满意控制认为, 实际设计的控制系统必须满足多个给定的性能指标, 即期望指标集. 而期望的性能指标一般包括: 以区域极点(衰减度)指标表征的快速性, 以稳态方差表征的稳态精度和以 H_∞ 指标表征的对有界扰动的抑制能力. 满意控制称满足各个单项期望指标所对应的解集的非空交集为期望指标的相容性解集(满意解集).

本文应用满意控制思想, 研究 n 阶线性定常系统具有衰减度和 H_∞ 约束指标的PI控制的相容性问题, 给出一种有效求解满意解集的方法.

2 问题描述(Problem statement)

考虑 n 阶线性定常系统PI控制的单位反馈问题, 如图1所示.

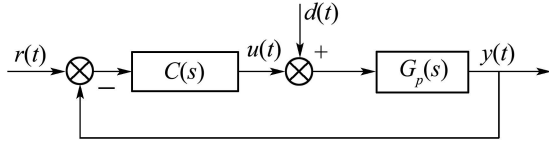


图1 PI反馈控制系统方框图

Fig. 1 Block diagram of the PI feedback control system

图1中: $r(t)$ 为参考输入, $u(t)$ 为控制信号, $d(t)$ 为扰动输入, $y(t)$ 为系统输出. $G_p(s)$ 为 n 阶线性定常系统:

$$G_p(s) = \frac{N(s)}{D(s)}. \quad (1)$$

式(1)中 $N(s)$ 和 $D(s)$ 为互质实多项式

$$\begin{cases} N(s) = a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \cdots + a_1 s + a_0, \\ D(s) = s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \cdots + b_1 s + b_0. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 $a_m \neq 0, m \leq n$. $C(s)$ 为PI控制器

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}. \quad (3)$$

由 $d(t)$ 到 $y(t)$ 的扰动传递函数为

$$G_{yd}(s) = \frac{G_p(s)}{1 + C(s)G_p(s)}. \quad (4)$$

PI控制器设计的期望指标集如下:

a) 衰减度指标

$$\operatorname{Re}[\delta(s)] \leq -\alpha, \alpha > 0. \quad (5)$$

式(5)中 $\delta(s)$ 为闭环系统的特征多项式, $\operatorname{Re}[\cdot]$ 表示多项式的零点实部, α 为衰减度.

b) H_∞ 指标

$$\|G_{yd}(s)\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} |G_{yd}(j\omega)| \leq \gamma, \gamma > 0. \quad (6)$$

式(6)中 γ 为有界扰动抑制水平. 下面给出衰减度指标 α 与 H_∞ 指标 γ 的相容性定义.

定义1 给定衰减度指标 α 与 H_∞ 指标 γ , 若图1系统存在PI控制器增益向量 $q = [k_p, k_i]^T$, 使对应的闭环系统同时满足期望指标式(5)(6), 则称衰减度指标 α 与 H_∞ 指标 γ 相对系统(1)的PI控制是相容的.

3 D-分割法(D-partition method)

考虑反馈控制系统的闭环特征函数

$$\begin{aligned} \delta(s; L, q) = & [s^n + b_{n-1}(q)s^{n-1} + \cdots + b_1(q)s + b_0] + \\ & [a_m(q)s^m + a_{m-1}(q)s^{m-1} + \cdots + \\ & a_1(q)s + a_0]e^{-sL}. \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中 $a_k(q)$ 和 $b_k(q)$ 分别为控制器参数向量 q 的连续函数, $q = [q_1, q_2, \cdots, q_l]^T$. L 为系统时滞常数, $L \in \mathbb{H} \subset \mathbb{R}, q \in \mathbb{Q} \subset \mathbb{R}^l, \mathbb{H} \times \mathbb{Q} \subset \mathbb{R}^{l+1}, \mathbb{R}$ 为实数集.

对给定的 l 阶参数向量 q 和时滞常数 L , 若特征函数 $\delta(s; L, q)$ 无非负实部零点, 则称其是渐近稳定的. 若 $L=0$ 时, 特征函数 $\delta(s; 0, q)$ 为代数多项式, 只有有限个零点. 若 $L>0$, 特征函数 $\delta(s; L, q)$ 有无穷多个零点. 若 $m < n$ 或 $m=n$ 且 $0 < |a_m(q)| < 1$ 时, 特征函数 $\delta(s; L, q)$ 只有有限个具有正实部的零点. 由于 $\delta(s; L, q)$ 的零点为控制器参数向量 q 和时滞常数 L 的连续函数, 空间 $\mathbb{H} \times \mathbb{Q}$ 被超曲面分割成若干个区域, 超曲面上的点对应的 $\delta(s; L, q)$ 至少有一个纯虚根或 $s = \infty$, 这种分解法称为空间 $\mathbb{H} \times \mathbb{Q}$ 的D-分割法. 由边界穿越定理^[5]可知, 只有当 $\delta(s; L, q)$ 的零点穿越虚轴或穿越无穷时, 具有正实部的零点个数之和才有可能发生改变. 因此, 参数空间 $\mathbb{H} \times \mathbb{Q}$ 中每一分割区域中的点所对应的闭环系统的特征函数 $\delta(s; L, q)$, 具有不变的右半复平面极点(RHP, right half pole of the complex plane)个数^[6].

D-分割法的实质实际上是将复平面 s 的虚轴映射为参数空间 $\mathbb{H} \times \mathbb{Q}$ 的超曲面, 根据实数根穿越原点和穿越无穷, 复根穿越虚轴得出D-分割边界.

$$\partial D = \partial D_0 \cup \partial D_\omega \cup \partial D_\infty. \quad (8)$$

式(8)中

$$\begin{cases} \partial D_0 \equiv \{(L, q) \in \mathbb{H} \times \mathbb{Q} : \delta(0; L, q) = 0\}, \\ \partial D_\omega \equiv \{(L, q) \in \mathbb{H} \times \mathbb{Q} : \delta(\pm j\omega; L, q) = 0, \\ \quad \forall \omega \in (0, \infty)\}, \\ \partial D_\infty \equiv \{(L, q) \in \mathbb{H} \times \mathbb{Q} : \text{当 } m = n, L \neq 0 \text{ 时}, \\ \quad |a_m(q)| = 1; \text{当 } m = n, L = 0 \text{ 时}, \\ \quad a_m(q) + 1 = 0\}. \end{cases} \quad (9)$$

4 主要结论(Main results)

首先基于D-分割法和边界穿越定理, 推导了描述PI控制器参数稳定域边界、PI控制器满足期望的衰减度指标的参数边界和期望的 H_∞ 指标的参数边界的解析表达式, 最后给出了相容性解集求取策略.

定理1 给定被控系统 $G_p(s)$, PI控制器的参数平面 k_p - k_i 被可能的直线a), b)和曲线c)分割成若干个区域, 对应闭环系统特征多项式

$$\delta(s) = sD(s) + (k_p s + k_i)N(s). \quad (10)$$

每一区域内的点 $q = [k_p, k_i]^T$ 所对应的 $\delta(s)$ 具有不变的RHP个数.

a) 若 $a_0 \neq 0, k_i = 0$; 若 $a_0 = 0$, 无此直线;

b) 当 $m = n$ 时, $k_p = -1/a_m$; 当 $m < n$ 时; 无此直线;

c)

$$\begin{cases} k_p = -I(\omega)/\omega, & \omega \in (0, \infty), \\ k_i = -R(\omega), \\ \begin{cases} R(\omega) = \operatorname{Re}[\frac{j\omega D(j\omega)}{N(j\omega)}], \\ I(\omega) = \operatorname{Im}[\frac{j\omega D(j\omega)}{N(j\omega)}]. \end{cases} \end{cases}$$

证 令 $s = j\omega$, 将其代入式(10)中得

$$\delta(j\omega) = j\omega D(j\omega) + (j\omega k_p + k_i)N(j\omega). \quad (11)$$

根据D-分割法和边界穿越定理, 可得如下3个边界条件:

1) $\partial D_0 : s = 0$, 实根穿越原点.

由 $\delta(0) = 0$ 可得 $a_0 k_i = 0$. 若 $a_0 = 0$, 无论 k_i 取何值, 均有 $\delta(0) = 0$, 不存在实根穿越原点, 此时边界不存在; 若 $a_0 \neq 0$, 可得 $k_i = 0$.

2) $\partial D_\infty : s = \infty$, 实根穿越无穷.

当 $m < n$ 时, 特征多项式 $\delta(s)$ 的最高次幂系数 $\rho = 1 \neq 0$, 不存在实根穿越无穷, 此时边界不存在; 当 $m = n$ 时, 令特征多项式 $\delta(s)$ 的最高次幂系数 $\rho = 1 + a_m k_p = 0$, 因 $a_m \neq 0$, 可得 $k_p = -1/a_m$.

3) $\partial D_\omega : s = j\omega, \omega \in (-\infty, 0) \cup (0, \infty)$, 实根穿越虚轴.

由 $\delta(j\omega) = 0$ 可得

$$j\omega D(j\omega) + (j\omega k_p + k_i)N(j\omega) = 0. \quad (12)$$

根据式(12), 令

$$R(\omega) + jI(\omega) = j\omega D(j\omega)/N(j\omega). \quad (13)$$

联系式(12)和式(13)可得

$$R(\omega) + jI(\omega) + j\omega k_p + k_i = 0. \quad (14)$$

令式(14)左边实部和虚部均等于零, 解得

$$\begin{cases} k_p = -I(\omega)/\omega, \\ k_i = -R(\omega). \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)知控制器参数 k_p 和 k_i 为 ω 在 $(-\infty, 0) \cup (0, \infty)$ 上的偶函数, 故只需根据式(15)绘制 $\omega \in (0, \infty)$ 上的边界即可.

综合1)2)和3), PI控制器的参数平面 k_p - k_i 被稳定边界a)、b)和c)分割成若干个区域, 每一区域内的点所对应的 $\delta(s)$ 具有不变的RHP个数. 证毕.

定理2 给定被控系统 $G_p(s)$ 和衰减度指标 α , PI控制器的参数平面 k_p - k_i 被可能的直线a)、b)和曲线c)分割成若干个区域, 对应闭环系统特征多项式

$$\tilde{\delta}(s) = (s - \alpha)D(s - \alpha) + (\tilde{k}_p s + \tilde{k}_i)N(s - \alpha). \quad (16)$$

每一区域内的点 $q = [k_p, k_i]^T$ 所对应的点 $\tilde{q} = Aq$ 所

对应的 $\tilde{\delta}(s)$ 具有不变的RHP个数. 其中

$$\tilde{q} = [\tilde{k}_p, \tilde{k}_i]^T, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\alpha & 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

a) 若 $N(-\alpha) \neq 0$, $-\alpha k_p + k_i = \alpha D(-\alpha)/N(-\alpha)$; 若 $N(-\alpha) = 0$, 无此直线;

b) 当 $m = n$ 时, $k_p = -1/a_m$; 当 $m < n$ 时, 无此直线;

c)

$$\begin{cases} k_p = -I(\omega, \alpha)/\omega, \\ k_i = -\alpha I(\omega, \alpha)/\omega - R(\omega, \alpha), & \omega \in (0, \infty), \\ \begin{cases} R(\omega, \alpha) = \operatorname{Re}[\frac{(j\omega - \alpha)D(j\omega - \alpha)}{N(j\omega - \alpha)}], \\ I(\omega, \alpha) = \operatorname{Im}[\frac{(j\omega - \alpha)D(j\omega - \alpha)}{N(j\omega - \alpha)}]. \end{cases} \end{cases}$$

证 仿定理1证明易证此定理. 具体证明略.

证毕.

由定理1和定理2可得如下推论1:

推论1 记对应闭环系统(1)的特征多项式 $\delta(s)$ 的RHP个数为零的区域为 Q_s , 则对 $\forall q \in Q_s$, 满足 $\operatorname{Re}[\delta(s)] < 0$; 记特征多项式 $\tilde{\delta}(s)$ 的RHP个数为零的区域及其边界为 Q_α , 则对 $\forall q \in Q_\alpha$, 满足 $\operatorname{Re}[\delta(s)] \leq -\alpha$, 且满足 $Q_\alpha \subset Q_s$.

引理1^[5] 设 $F(s) = N_F(s)/D_F(s)$ 为一稳定真复有理函数, 且 $\deg[D_F(s)] = \beta$. 定义

$$\phi(s) = D_F(s) + \frac{1}{\gamma} e^{j\theta} N_F(s). \quad (18)$$

则对任一给定的 $\gamma > 0$, $\|F(s)\|_\infty < \gamma$ 当且仅当同时满足下面两个条件:

a) $|n_\beta| < \gamma |d_\beta|$;

b) $\phi(s)$ Hurwitz 稳定, $\forall \theta \in [0, 2\pi)$.

其中 $\deg[\cdot]$ 表示多项式阶数, n_β 和 d_β 分别为 $N_F(s)$ 和 $D_F(s)$ 的 β 次幂系数.

定理3 给定被控系统 $G_p(s)$ 和 H_∞ 指标 γ , PI控制器的参数平面 k_p - k_i 被可能的直线a)、b)和曲线c)分割成若干个区域, 对每一固定的 $\theta^* \in [0, 2\pi)$, 对应特征函数

$$\phi_\gamma(s) = sD(s) + (k_p s + k_i)N(s) + \frac{1}{\gamma} e^{j\theta} sN(s). \quad (19)$$

每一区域内的点 $q = [k_p, k_i]^T$ 所对应的 $\phi_\gamma(s)$ 具有不变的RHP个数.

a) 若 $a_0 \neq 0$, 则 $k_i = 0$; 若 $a_0 = 0$, 无此直线;

b) $\begin{cases} k_p = -(\frac{1}{a_m} + \frac{1}{\gamma}), & \text{当 } m = n \text{ 且 } \theta^* = 0 \text{ 时,} \\ k_i = -(\frac{1}{a_m} - \frac{1}{\gamma}), & \text{当 } m = n \text{ 且 } \theta^* = \pi \text{ 时.} \end{cases}$ 当 $m < n$ 时, 无此直线;

c)

$$\begin{cases} k_p = -I(\omega, \gamma, \theta^*)/\omega, & \omega \neq 0, \omega \in \mathbb{R}. \\ k_i = -R(\omega, \gamma, \theta^*), \\ \begin{cases} R(\omega, \gamma, \theta^*) = \operatorname{Re}\left\{\frac{[j\omega D(j\omega) + \frac{1}{\gamma}e^{j\theta^*}j\omega N(j\omega)]}{N(j\omega)}\right\}, \\ I(\omega, \gamma, \theta^*) = \operatorname{Im}\left\{\frac{[j\omega D(j\omega) + \frac{1}{\gamma}e^{j\theta^*}j\omega N(j\omega)]}{N(j\omega)}\right\}. \end{cases} \end{cases}$$

证 仿定理1证明易证此定理. 具体证明略.

证毕.

考虑引理1中的条件a), 对应扰动传递函数 $G_{yd}(s)$, 当 $m < n$ 时, $n_\beta = 0, d_\beta = 1$, 因 $\gamma > 0$, 易知条件a)恒成立; 当 $m = n$ 时, $n_\beta = a_m, d_\beta = 1 + a_m k_p$, 可得条件a)为 $|a_m| < \gamma|1 + a_m k_p|$. 定义满足条件a)的PI控制器参数集为 Q_β , 即

$$Q_\beta = \begin{cases} \mathbb{R}^2, & m < n, \\ \{q : |a_m| < \gamma|1 + a_m k_p|\}, & m = n. \end{cases} \quad (20)$$

由引理1和定理3可得如下推论2:

推论 2 对每一固定的 $\theta^* \in [0, 2\pi)$, 记特征函数 $\phi_\gamma(s)$ 的RHP个数为零的区域及其边界为 Q_{θ^*} , 令

$$Q_\theta = \bigcap_{\theta^* \in [0, 2\pi)} Q_{\theta^*}. \quad (21)$$

若 $Q_\gamma = Q_s \cap Q_\beta \cap Q_\theta \neq \emptyset$, 则对 $\forall q \in Q_\gamma$, 有 $\|G_{yd}(s)\|_\infty \leq \gamma$.

设计控制系统时, 首先根据指标重要性程度不同将其分成不同优先级, 然后按优先级从高到低的顺序对其进行排序. 在这里笔者认为H_∞指标的优先级高于衰减度指标 α , 下面给出求解H_∞指标 γ 与衰减度指标 α 的相容性解集策略:

Step 1 根据定理1和推论1, 求出 Q_s ; 由定理3和推论2求出 Q_θ ;

Step 2 根据推论2, 求出 Q_γ ;

Step 3 求解以下约束优化问题:

$$\begin{cases} \max & \alpha, \\ \text{s. t.} & q \in Q_\gamma. \end{cases} \quad (22)$$

Step 4 记Step 3求得衰减度极值为 $\alpha_{\max}$, 可得相容区域 $I_\alpha = (0, \alpha_{\max}]$. 若 $\alpha \in I_\alpha$, 则衰减度指标 α 与H_∞指标 γ 相容, 根据定理2和推论1求出 Q_α ; 若 $\alpha \notin I_\alpha$, 则衰减度指标 α 与H_∞指标 γ 不相容, 即 $Q_\alpha \cap Q_\gamma = \emptyset$. 可取 $\alpha' \in I_\alpha$, 使 $Q_{\alpha'} \cap Q_\gamma \neq \emptyset$.

Step 5 求出相容性解集 $Q_c = Q_\alpha \cap Q_\gamma$ 或 $Q'_c = Q_{\alpha'} \cap Q_\gamma$.

5 数值算例(Numerical example)

考虑一非最小相位系统

$$G_p(s) = \frac{1 - 0.5s}{(s + 1)^3}. \quad (23)$$

PI控制器设计的期望指标为:

a) 衰减度指标 $\alpha = 0.2$;

b) 有界扰动H_∞指标 $\gamma = 1$.

根据第4小节求解相容性解集 Q_c 的具体步骤, 首先根据定理1和推论1求得解集 Q_s , 再由定理3和推论2求出 Q_θ ; 根据推论2可得 Q_γ . 在解集 Q_γ 上求得极值点 $q_{\max} = [0.5859, 0.2431]^T$ 对应的衰减度极值 $\alpha_{\max} = 0.2553$, 得相容区域 $I_\alpha = (0, 0.2553]$, 显然 $\alpha = 0.2 \in I_\alpha$, 则衰减度指标 α 与H_∞指标 γ 相容.

求得的解集 $Q_s, Q_\alpha, Q_\theta, Q_\gamma$ 和相容性解集 Q_c 如图2所示. 图3为相容性解集 Q_c 的放大图. 取点 $q^* = [0.60, 0.22]^T$ (见图3标*的点), 闭环系统极点为 $\{-1.9924, -0.3986 \pm 0.6048j, -0.2105\}$, 衰减度指标 $\alpha(q^*) = 0.2105 > 0.2$, 有界扰动H_∞指标 $\gamma(q^*) = 0.9573 < 1$, 满足PI控制器设计的期望指标集要求. 实际上, 对给定被控对象 $G_p(s)$, 用PI控制可达到的最小有界扰动H_∞指标 $\gamma_{\min} = 0.6949$, 最大衰减度指标 $\alpha'_{\max} = 0.4573$. 若期望的有界扰动H_∞指标 $\gamma < \gamma_{\min}$ 或衰减度 $\alpha > \alpha'_{\max}$, 则满足期望指标集的PI控制器显然是不存在的.

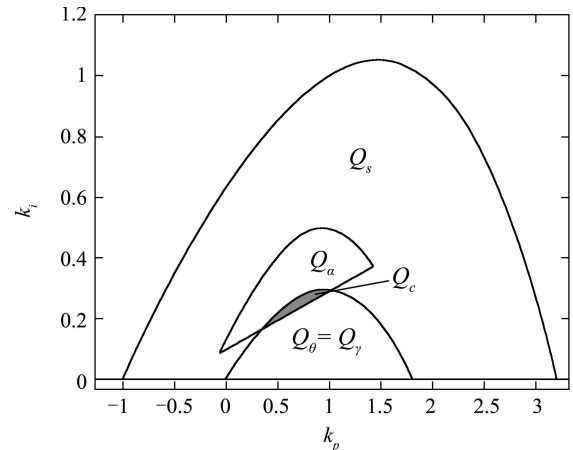


图2 解集 $Q_s, Q_\alpha, Q_\theta, Q_\gamma$ 与 Q_c

Fig. 2 Solution sets $Q_s, Q_\alpha, Q_\theta, Q_\gamma$ and Q_c

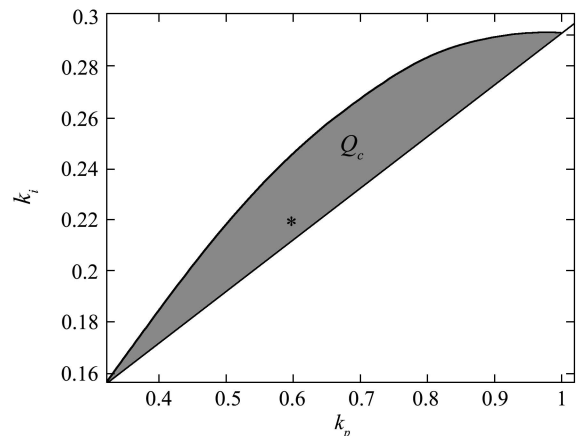


图3 相容性解集 Q_c 的放大图

Fig. 3 Zoom diagram of the consistency set Q_c

6 结论(Conclusions)

应用满意控制思想, 研究 n 阶线性定常系统同时具有 H_∞ 指标与衰减度指标约束的PI控制的相容性问题. 基于边界穿越定理和D-分割法, 给出了一种有效求解相容性解集的方法. 与其他PI控制器设计方法相比, 本文给出的方法具有以下特点:

a) 给出的不是满足某一单一指标的唯一最优或次优解, 而是满足期望指标集的相容性解集, 为进一步进行控制器设计提供更大的自由度;

b) 给出了各期望指标之间可能存在竞争关系的相容性解集求取策略.

参考文献(References):

- [1] DOYLE J, GLOVER K, KHARGONEKAR P, FRANCIS B. State space solution to standard H_2 and H_∞ control problem[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1989, 34(8): 831 – 847.
- [2] KEEL L H, BHATTACHARYYA S P. Robust, fragile or optimal[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(8): 1098 – 1125.
- [3] COMINOS P, MUNRO N. PID controllers: recent tuning methods and design to specification[J]. *IEE Proc: Control Theory and Applications*, 2002, 149(1): 46 – 53.
- [4] GUO ZHI. A survey of satisfying control and estimation[C] // *Proc of the 14th IFAC World Congress*. Beijing: Pergamon Press, 1999: 443

– 447.

- [5] BHATTACHARYYA S P, CHAPPELLAT H, KEEL L H. *Robust Control: the Parametric Approach*[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1995.
- [6] RUAN S, WEI J. On the zeros of transcendental functions with applications to stability of delay differential equations with two delays[J]. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, Series A: Mathematical Analysis*, 2003, 10(6): 863 – 874.

作者简介:

李银侠 (1976—), 男, 南京理工大学自动化系博士研究生, 主要研究方向为多目标满意PID控制、火力控制, E-mail: lyinya178@126.com;

盛安冬 (1964—), 男, 南京理工大学自动化系研究员, 博士生导师, 主要研究方向为满意滤波、数据融合, E-mail: shengandong@126.com;

王远钢 (1964—), 男, 南京理工大学自动化系副教授, 主要研究方向为控制系统期望指标集的相容性、随机系统的满意控制与估计, E-mail: wyg@acl.dhs.org;

郭治 (1937—), 男, 南京理工大学自动化系教授、博士生导师、中国兵工学会理事, 主要研究方向为随机系统的满意控制与估计, E-mail: guozhi@mail.njust.edu.cn.

(上接第497页)

参考文献(References):

- [5] BRANICKY M S, PHILLIPS S M, ZHANG W. Stability of networked control systems: explicit analysis of delay[C] // *Proc of American Control Conference*. Chicago, USA, New York: IEEE Press, 2000: 2352 – 2357.
- [6] BRANICKY M S. Stability of hybrid systems: state of the art[C] // *Proc of American Control Conference*. San Diego, USA, New York: IEEE Press, 1997: 120 – 125.
- [7] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 85 – 99.
- [8] WALSH G C, YE H. Scheduling of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 57 – 65.
- [9] 刘玉忠, 于海斌. 具有大时延的网络控制系统的稳定性分析[J]. *控制与决策*, 2004, 19(10): 1133 – 1136.
(LIU Yuzhong, YU Haibin. Analysis of stability for networked control systems with larger delay[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(10): 1133 – 1136.)
- [10] 樊卫华, 蔡骅, 吴晓蓓, 等. 具有延时和数据包丢失的网络控制系统的稳定性[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(5): 465

– 468.

(FAN Weihua, CAI Hua, WU Xiaobei, et al. Stability of networked control systems with time delay and data packet dropout[J]. *J of Nanjing University of Science and Technology*, 2004, 28(5): 465 – 468.)

- [11] RABELLO A, BHAYA A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and applications[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2003, 150(5): 546 – 550.
- [12] GAHINET A, NEMIROVSHI A, LAUB, et al. *MATLAB LMI Control Toolbox*[M]. Natick, MA: MathWorks, 1995.

作者简介:

张喜民 (1973—), 男, 博士, 研究方向为网络控制技术、嵌入式系统, E-mail: zczya@sohu.com;

李建东 (1962—), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究领域为宽带无线IP技术、移动通信技术, E-mail: jdli@mail.xidian.edu.cn;

陈实 (1972—), 男, 讲师, 主要研究领域为智能计算, E-mail: chenshi@zww.edu.cn.