

模糊逻辑补偿的网络PI控制系统及稳定性分析

王万良, 陈惠英, 陈伟杰, 郑建炜

(浙江工业大学 软件学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 针对现代工业过程中常用的网络PI控制系统, 分析了网络所诱导的时滞对PI控制系统性能的影响, 设计了一个模糊逻辑补偿器来实现对网络所诱导的时滞的补偿. 利用Hermite-Biehler引理在准多项式稳定性问题上的推广, 研究了具有模糊逻辑补偿的网络PI控制系统的稳定性问题, 给出了使闭环系统稳定的模糊逻辑调节参数的取值范围. 仿真结果验证了理论分析结果的有效性.

关键词: 网络控制系统; 时滞; PI控制; 模糊逻辑补偿

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Networked PI control systems with fuzzy logic compensation and its stability analysis

WANG Wan-liang, CHEN Hui-ying, CHEN Wei-jie, ZHENG Jian-wei

(College of Software, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310032, China)

Abstract: For the networked PI control systems in many modern industrial processes, the effect of network-induced time delay on the performance of PI control systems is analyzed. A fuzzy logic modulator is designed to compensate the network-induced time delay. The problem of stabilizing networked PI control systems with fuzzy logic compensation is studied by applying the extension of the Hermite-Biehler theorem to the quasi-polynomial stability problem. The region of fuzzy logic modulator parameter value for the stability of the networked closed-loop system is provided. Simulation result shows the validity of the proposed work.

Key words: networked control systems; time delay; PI control; fuzzy logic compensation

1 引言(Introduction)

具有随机时滞的网络控制系统, 目前主要有确定性方法、随机控制和智能控制等方法. 确定性方法是将随机时滞转化为固定时滞, 然后设计控制器. 该方法的优点是可利用现有的确定性系统的设计方法设计控制器, 缺点是由于缓冲区将时滞都转化成最大时滞, 降低了系统应有的性能^[1]. 随机控制方法是对网络时滞进行建模和估计, 将网络时滞作为系统中的随机变量, 从最优控制和动态规划等角度设计控制器^[2]. 这类方法要求知道随机时滞的统计特性, 而且运算比较复杂. 智能控制方法是针对具有不确定时滞、丢包等特性的网络控制系统的有效方法^[3,4]. 此外, 近年来也提出了不少先进控制算法应用于NCS控制器的设计中, 如: 预测控制^[5]、鲁棒控制方法^[6]等.

本文针对工业过程中常用的网络PI控制系统, 分析了引入网络后可能导致的控制系统的不稳定, 设

计了一个模糊逻辑补偿器来实现对网络所引起的时滞的补偿, 并着重对其稳定性进行了分析.

2 模糊逻辑补偿的网络PI控制(Networked PI control with fuzzy logic compensation)

典型的网络控制系统如图1所示.

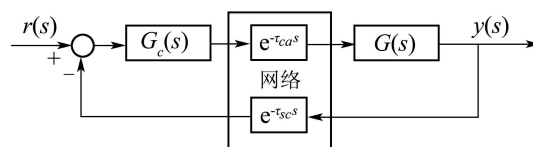


图 1 网络控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of NCS

其中: τ_{sc} 和 τ_{ca} 是网络通讯所造成的时滞, τ_{sc} 为传感器—控制器的时滞, τ_{ca} 为控制器—执行器的时滞. 由于本文主要讨论网络PI控制系统, 因此, 图1中的 $G_c(s)$ 是PI控制器的传递函数.

由图1知, 网络控制系统与一般控制系统相比, 在

闭环系统中引入了两个纯滞后环节, 而且随着网络中传输的信息量大小的变化, τ_{sc}, τ_{ca} 一般是不确定的. 因此, 在控制系统中引入了网络后, 仅通过PI控制, 很难取得较好的控制性能, 需引入相应的补偿技术.

针对网络所引起的不确定时滞, 采用了模糊逻辑补偿方法, 该方法通过一个模糊逻辑调节参数 β 来调整PI控制器的输出信号, 其优点在于不需要对PI控制器进行重新设计, 而只需通过调整外部参数 β 来实现对网络所诱导的时滞的补偿. 具有模糊逻辑补偿器的网络PI控制系统的结构框图如图2所示^[3]. 其中, $\otimes$ 符号表示相乘运算, 即 $u_c(s) = \beta u_{PI}(s)$.

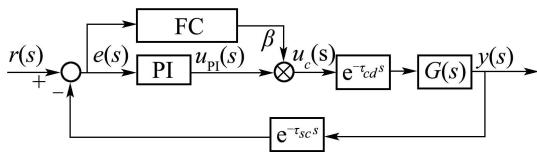


图2 具有模糊逻辑补偿器的网络PI控制系统

Fig. 2 Block diagram of the networked PI control system with a fuzzy logic compensator

在图2所示的系统中, PI控制器的设计是在不考虑网络时滞的情况下, 直接根据 $G(s)$ 设计的, 从而使得PI控制器的设计得以简化. FC是一维模糊控制器^[8]. 其中输入是误差 e , 输出是参数 β , 量化因子 K_e 取为 $1/r$, r 为参考输入; 比例因子 K_β 可根据下面得出的稳定性分析结果适当选取. 控制规则选用Takagi-Sugeno模糊规则, 输入、输出的隶属度函数如图3所示.

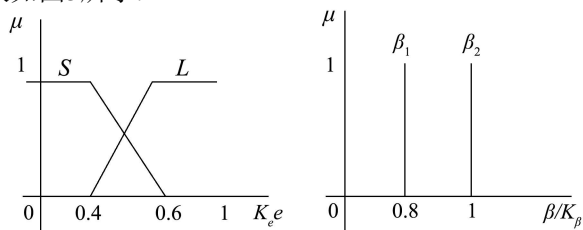


图3 输入 e , 输出 β 隶属度函数

Fig. 3 Membership functions of input e , output β

模糊控制规则如下:

if $e(t)$ is S , then $\beta = \beta_1$,

if $e(t)$ is L , then $\beta = \beta_2$.

输出 β 可通过反模糊化后再乘上 K_β 加以求得

$$\beta = K_\beta \frac{\beta_1 \mu_S(e) + \beta_2 \mu_L(e)}{\mu_S(e) + \mu_L(e)}. \quad (1)$$

由图2知, 引入模糊控制后新的控制器的输出为

$$u_c(s) = \beta u_{PI}(s) = \beta \frac{k_p s + k_i}{s}. \quad (2)$$

3 网络PI控制系统的稳定性分析(Stability analysis of networked PI control systems)

3.1 网络PI控制系统的稳定性问题(Stability problem of networked PI control systems)

为便于稳定性分析, 将图2简化处理得到图4, 其中 $L \geq (\tau_{sc} + \tau_{ca})$.

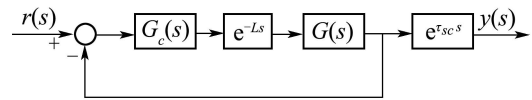


图4 简化的结构框图

Fig. 4 Simplified block diagram

图4所示的控制系统, 被控对象和具有模糊调节参数的PI控制器的结构分别为

2阶对象:

$$G(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}.$$

控制器:

$$G'_c(s) = \beta G_c(s) = \beta \frac{k_p s + k_i}{s}.$$

可以得出图4所示闭环系统的特征方程为

$$\Delta(s) = s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + k\beta(k_p s + k_i)e^{-Ls} = d(s) + e^{-Ls}n_1(s) \quad (3)$$

首先, 检验不含网络时滞即 $L = 0$ 时闭环系统的稳定性. 使用Routh-Hurwitz稳定性判据, 可以得到闭环系统稳定的充分必要条件^[9]:

$$k_p > \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} k_i - \frac{1}{k}, \quad k_i > 0.$$

对于含网络时滞即 $L > 0$ 的情况, 由于式(3)中包含 e^{-Ls} 项, 所以不能直接应用Routh-Hurwitz稳定性判据. 要从该多项式确定使系统稳定的 β 取值范围是一件非常困难的事. 本文基于Hermite-Biehler定理的推广引理, 解决这一困难^[3].

3.2 Hermite-Biehler定理的推广(Extension of Hermite-Biehler theorem)

工业过程中不可避免地存在时滞现象, 一般用

$$\delta(s) = d(s) + e^{-sT_1} n_1(s) + \cdots + e^{-sT_m} n_m(s)$$

(4)

描述其动态模型的特征方程式, 称其为准多项式. 其中 $d(s)$ 和 $n_i(s)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 是实多项式. 若在式(4)中作如下的假设:

a) $\deg[d(s)] = n$, $\deg[n_1(s)] \leq n$;

b) $0 < T_1 < T_2 < \cdots < T_m$.

则可用如下的准多项式:

$$\delta^*(s) = e^{sT_m} \delta(s) = e^{sT_m} d(s) + e^{s(T_m - T_1)} n_1(s) +$$

$$e^{s(T_m - T_2)} n_2(s) + \cdots + n_m(s) \quad (5)$$

代替 $\delta(s)$. 因为 e^{sT_m} 没有任何有限零解, 所以 $\delta(s)$ 的Hurwitz稳定性等价于 $\delta^*(s)$ 的Hurwitz稳定性.

引理 1^[7](Hermite-Biehler定理的推广) 考虑式(5)给定的 $\delta^*(s)$, 将其写成 $\delta^*(j\omega) = \delta_r(\omega) + j\delta_i(\omega)$, 其中 $\delta_r(\omega)$ 和 $\delta_i(\omega)$ 分别表示 $\delta^*(j\omega)$ 的实部和虚部. 在满足上述假设(a)和(b)的前提下, $\delta^*(s)$ 稳定的充分必要条件是

1) $\exists \omega_0 \in (-\infty, \infty)$, 使得

$$E(\omega_0) = \delta'_i(\omega_0)\delta_r(\omega_0) + \delta_i(\omega_0)\delta'_r(\omega_0),$$

其中 $\delta'_i(\omega_0)$ 和 $\delta'_r(\omega_0)$ 分别表示 $\delta_i(\omega_0)$ 和 $\delta_r(\omega_0)$ 关于 ω 的1阶导数.

2) $\delta_r(\omega)$ 和 $\delta_i(\omega)$ 只有实根且互相交错.

引理 2^[7] 设 M 和 N 分别为 $\delta^*(s)$ 中 s 和 e^s 的最高指数. 若存在一常数 η , 使得当 $\omega = \eta$ 时, $\delta_r(\omega)$ 和 $\delta_i(\omega)$ 的最高次项的系数不为0, 则 $\delta_r(\omega) = 0$ 或 $\delta_i(\omega) = 0$ 仅有实根的充分必要条件是: 从一个足够大的 l 开始, 对于 $\omega \in [-2l\pi + \eta, 2l\pi + \eta]$, $\delta_r(\omega)$ 和 $\delta_i(\omega)$ 有 $4lN + M$ 个实根.

3.3 网络PI控制系统稳定的 β 参数范围(Region of parameter β value for stabilizing networked PI control systems)

本文利用Hermite-Biehler定理的推广, 分析对于给定的时滞 L 和参数 β 值, 研究网络PI控制系统的稳定性, 并给出了使闭环系统稳定的 β 参数范围. 很显然, 式(3)满足引理1中的两个假设. 由式(3)构造一个准多项式:

$$\Delta^*(s) = e^{Ls} \Delta(s) = s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)e^{Ls} + k\beta(k_p s + k_i). \quad (6)$$

为了便于分析, 设 $z = \omega L$, 则 $\Delta^*(j\omega)$ 的实部和虚部分别为

$$\Delta_r(z) = \frac{z}{L} \left(\frac{z^2}{L^2} T_1 T_2 - 1 \right) \sin z - \frac{z^2}{L^2} (T_1 + T_2) \cos z + k\beta k_i, \quad (7)$$

$$\Delta_i(z) = \frac{z}{L} \left(1 - \frac{z^2}{L^2} T_1 T_2 \right) \cos z - \frac{z^2}{L^2} (T_1 + T_2) \sin z + \frac{z}{L} k\beta k_p. \quad (8)$$

式(7)是关于 z 的偶函数, 式(8)是关于 z 的奇函数.

由引理1得知, 若使准多项式(6)稳定, 需要检验引理1中的两个充分必要条件是否成立. 下面分别对其两个条件进行检验.

检验引理1中的条件1):

设 $\omega_0 = z_0 = 0$, 则条件1)变为 $\frac{1}{L}(1 + k\beta k_p)k\beta k_i > 0$. 由于 $L > 0$, $k > 0$, $k_p > 0$, $k_i > 0$, $\beta > 0$, 很显然, 条件1)是满足的.

检验引理1中的条件2):

根据式(8)可解得虚部的根 $z = 0$ 或

$$\left(1 - \frac{z^2}{L^2} T_1 T_2\right) \cos z - \frac{z}{L} (T_1 + T_2) \sin z + k\beta k_p = 0. \quad (9)$$

由于式(9)并非常规的多项式, 可以通过图解法求解. 例如, 以一直流电机模型为例, 取 $G(s)$ 中的 $k = 3.9804$, $T_1 = 4.4783 \times 10^{-4}$, $T_2 = 0.0353$, 当 $L = 0.01$ s, $\beta = 0.25$ 时, 画出 $\phi_1(z) = \left(1 - \frac{z^2}{L^2} T_1 T_2\right) \cos z + k\beta k_p$ 与 $\phi_2(z) = \frac{z \sin z}{L} (T_1 + T_2)$ 的曲线如图5所示.

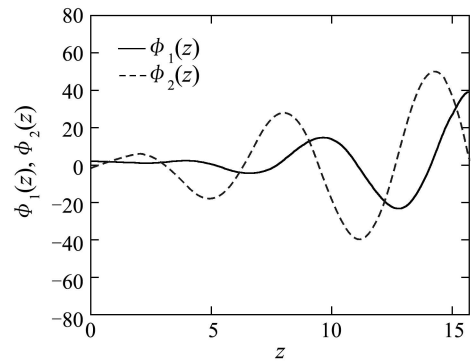


图5 $\phi_1(z)$ 与 $\phi_2(z)$ 的曲线图

Fig. 5 Plot of $\phi_1(z)$ and $\phi_2(z)$

设 z_j 为 $\delta_i(z)$ 的根, 在区间 $[0, 5\pi]$ 中两条曲线存在6个交点, 即为式(9)的6个根, 因此, $\delta_i(z)$ 在区间 $[0, 5\pi]$ 的全部根为: $z_0 = 0$, $z_1 = 0.8125$, $z_2 = 2.9637$, $z_3 = 6.1281$, $z_4 = 9.0825$, $z_5 = 12.1230$, $z_6 = 15.1087$.

下面利用引理2来检验 $\delta_i(z)$ 是否只有实根.

将 $s_1 = Ls$ 代入 $\Delta^*(s)$, 在该新的准多项式 $\Delta^*(s_1)$ 中, $M = 3$, $N = 1$. 选择 $\eta = \pi/25$, 使得 $\sin \eta \neq 0$, $\cos \eta \neq 0$. 由图5可知, $\delta_i(z)$ 在区间 $[-2\pi + \eta, 2\pi + \eta]$ 有 $4lN + M = 7$, 而在区间 $[2l\pi + \eta, 2(l+1)\pi + \eta]$, $[-2l\pi + \eta, -2(l+1)\pi + \eta]$ 各有两个实根. 因此, 从 $l = 1$ 开始, 在区间 $[-2l\pi + \eta, 2l\pi + \eta]$, $\delta_i(z)$ 有 $4lN + M$ 个实根. 由引理2得知 $\delta_i(z)$ 只有实根.

经计算 $\delta_r(z_0) > 0$, $\delta_r(z_1) < 0$, $\delta_r(z_2) > 0$, $\delta_r(z_3) < 0$, $\delta_r(z_4) > 0$, $\delta_r(z_5) < 0$, $\cdots$, 满足 $\delta_r(z)$ 和 $\delta_i(z)$ 的根相互交错的条件. 利用这一特性同时也可以得出, 当 $\delta_i(z)$ 仅有实根时, $\delta_r(z)$ 也同样只有实根.

上面证明了对于上述给定的 β , L 值, $\Delta^*(s)$ 满足引理1的所有条件, 因此也就证明了具有模糊逻辑补偿的网络PI控制在上述给定的 β , L 值下保持闭环系统的稳定性.

下面将给出网络PI控制系统稳定模糊逻辑调节参数 β 的范围^[3].

定理 1 带有模糊逻辑调节参数的网络PI控制系统, 若 $k_p > 0$, $k_i > 0$, $\beta > 0$, 则当模糊逻辑调节

参数 β 的范围为

$$0 < \beta < \frac{1}{kk_p}[(T_1 + T_2)\frac{\alpha}{L}\sin\alpha - (1 - \frac{\alpha^2}{L^2}T_1T_2)\cos\alpha] \quad (10)$$

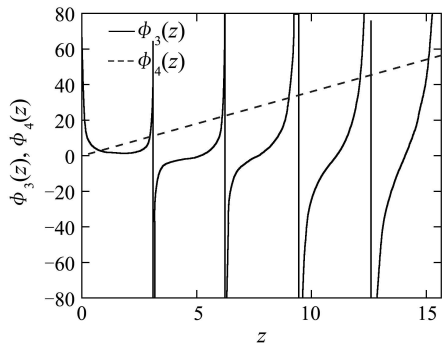
时闭环网络控制系统稳定. 其中 $\alpha \in (0, \pi)$ 为下式的解:

$$\tan\alpha = \left(\frac{L}{\alpha}\right) \frac{k_p\alpha^2(T_1 + T_2) + k_i(L^2 - \alpha^2T_1T_2)}{k_iL^2(T_1 + T_2) + k_p(\alpha^2T_1T_2 - L^2)}. \quad (11)$$

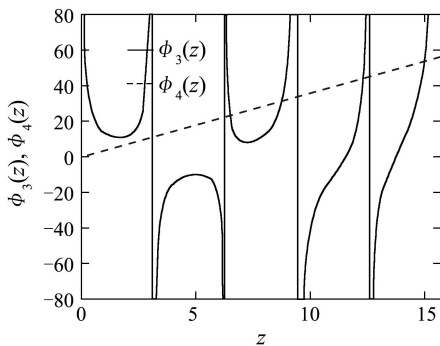
证 步骤1 检验 $\delta_i(z)$ 只有实根. 由式(9)得

$$\frac{(1 - \frac{z^2}{L^2}T_1T_2)\cos z + k\beta k_p}{\sin z} = \frac{z}{L}(T_1 + T_2). \quad (12)$$

记 $\phi_3(z) = \frac{(1 - \frac{z^2}{L^2}T_1T_2)\cos z + k\beta k_p}{\sin z}$, $\phi_4(z) = \frac{z}{L}(T_1 + T_2)$, 绘制 $\phi_3(z)$ 和 $\phi_4(z)$ 的曲线如图6所示.



(a) $0 < \beta < \beta_u$



(b) $\beta \geq \beta_u$

图6 $\phi_3(z)$ 与 $\phi_4(z)$ 的曲线图

Fig. 6 Plot of $\phi_3(z)$ and $\phi_4(z)$

当 $\beta \geq \beta_u$, 由引理2很容易得出 $\delta_i(z)$ 的根并不全是实根, 因此也就排除了闭环系统稳定性的可能. 当 $\beta = \beta_u$, 则 $\phi_3(z)$ 和 $\phi_4(z)$ 在 $(0, \pi)$ 只相交一次并且相切. 设 $z = \alpha_1 \in (0, \pi)$, 则有

$$\frac{(1 - \frac{\alpha_1^2}{L^2}T_1T_2)\cos\alpha_1 + k\beta k_p}{\sin\alpha_1} = \frac{\alpha_1}{L}(T_1 + T_2), \quad (13)$$

$$\frac{d}{dz} \left[\frac{(1 - \frac{z^2}{L^2}T_1T_2)\cos z + k\beta k_p}{\sin z} \right]_{z=\alpha_1} = \frac{(T_1 + T_2)}{L}, \quad (14)$$

化简后可得

$$\tan\alpha_1 = \frac{(\frac{T_1 + T_2}{L}) + 2(\frac{T_1T_2}{L^2})}{(\frac{T_1 + T_2}{L}) + (1 - \frac{\alpha_1^2}{L^2}T_1T_2)}\alpha_1. \quad (15)$$

因此, 一旦网络PI控制系统中的最大时滞 L 给定, 则相应的参数 β_u 就可以获得

$$\beta_u = \frac{1}{kk_p}[(T_1 + T_2)\frac{\alpha_1}{L}\sin\alpha_1 - (1 - \frac{\alpha_1^2}{L^2}T_1T_2)\cos\alpha_1]. \quad (16)$$

当 $0 < \beta < \beta_u$, 由引理(2)可得 $\delta_i(z)$ 只有实根.

步骤2 检验 $\delta_r(z)$ 和 $\delta_i(z)$ 根的相互交错性.

首先将 $\delta_r(z) = 0$, $\delta_i(z) = 0$ 作一下变换:

$$\beta = \frac{1}{kk_i} \left[\frac{z}{L} \left(\frac{z^2}{L^2}T_1T_2 - 1 \right) \sin z - \frac{z^2}{L^2}(T_1 + T_2)\cos z \right], \quad (17)$$

$$\beta = \frac{1}{kk_p} \left[\frac{z}{L}(T_1 + T_2)\sin z - (1 - \frac{z^2}{L^2}T_1T_2)\cos z \right]. \quad (18)$$

在区间 $(0, 2\pi)$ 绘制

$$\begin{aligned} \phi_5(z) &= \frac{1}{kk_i} \left[\frac{z}{L} \left(\frac{z^2}{L^2}T_1T_2 - 1 \right) \sin z - \frac{z^2}{L^2}(T_1 + T_2)\cos z \right], \\ \phi_6(z) &= \frac{1}{kk_p} \left[\frac{z}{L}(T_1 + T_2)\sin z - (1 - \frac{z^2}{L^2}T_1T_2)\cos z \right] \end{aligned}$$

的曲线如图7所示. 从图7可知, 两曲线在区间 $(0, 2\pi)$ 有一交点, 设 $z = \alpha_2$, 则有 $\phi_5(\alpha_2) = \phi_6(\alpha_2)$, 化简得

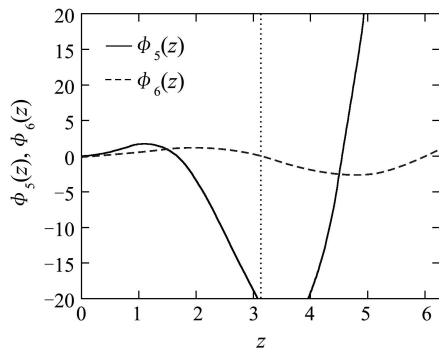
$$\tan\alpha_2 = \left(\frac{L}{\alpha_2}\right) \frac{k_p\alpha_2^2(T_1 + T_2) + k_i(L^2 - \alpha_2^2T_1T_2)}{k_iL^2(T_1 + T_2) + k_p(\alpha_2^2T_1T_2 - L^2)}. \quad (19)$$

由此可得

$$\begin{aligned} \beta_{uj} &= \frac{1}{kk_p}[(T_1 + T_2)\frac{\alpha_2}{L}\sin\alpha_2 - \\ &\quad (1 - \frac{\alpha_2^2}{L^2}T_1T_2)\cos\alpha_2]. \end{aligned} \quad (20)$$

由 $\delta_r(z)$ 和 $\delta_i(z)$ 根相互交错性的等价性可知, 要求 $\delta_r(z_1) < 0$, 但当 $\beta \geq \beta_{uj}$ 时, $\delta_r(z_1) \geq 0$ 不满足根的相互交错性条件, 因此得出要满足 $\delta_r(z)$ 和 $\delta_i(z)$ 根相互交错性的 β 范围为 $0 < \beta < \beta_{uj}$.

综合步骤1,2得出保证网络PI控制系统稳定的 β 范围为 $0 < \beta < \min(\beta_u, \beta_{uj})$.

图7 $\phi_5(z)$ 与 $\phi_6(z)$ 的曲线图Fig. 7 Plot of $\phi_5(z)$ and $\phi_6(z)$

步骤3 下面针对不同的 L 值, 根据式(15)(16)(19)(20)绘制关于 β_u, β_{uj} 的曲线如图8所示, 给出了网络PI控制系统稳定的 β 区域. 从图8得知, 对于给定的 $L, \beta_u > \beta_{uj}$.

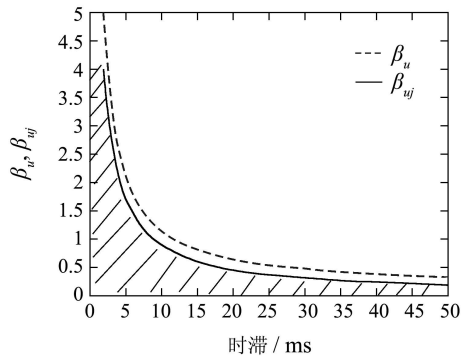


图8 稳定域

Fig. 8 stability region

综上3步骤, 得出保证网络PI控制系统稳定的 β 范围为 $0 < \beta < \beta_{uj}$, 定理1证毕.

4 仿真(Simulation)

本文利用定理1对网络PI控制系统的稳定性进行了仿真. 以直流电机模型为例, 取 $G(s)$ 中的参数同前, 输入 $r = 50$, 设最大时滞 $L = 10$ ms. 由定理1解得使系统稳定的的上界为0.8909. 仿真结果如图9. 当 $\beta = 0.8909$ 时, 系统输出处于临界稳定, 仿真结果和理论分析结果完全一致.

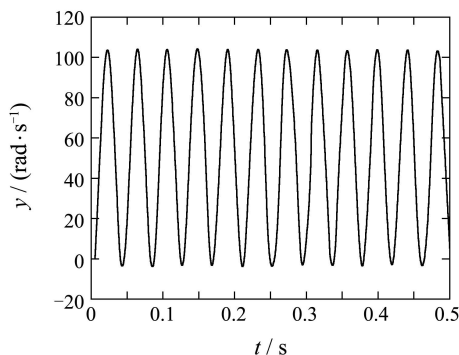


图9 网络PI控制系统的阶跃响应

Fig. 9 Step response of networked PI control systems

5 结论(Conclusion)

网络控制系统中网络所诱导的时滞是不可避免且不确定的. 本文利用经典的Hermite-Biehler引理在准多项式稳定性问题上的推广, 研究了具有模糊逻辑补偿的网络PI控制系统的稳定性问题, 从理论上推导出模糊逻辑调节参数 β 的取值范围, 对网络控制系统的分析与设计具有重要的价值.

参考文献(References):

- [1] 于之训, 蒋平, 等. 具有传输延迟的网络控制系统中状态观测器的设计[J]. 信息与控制, 2000, 29(2): 125 – 130.
(YU Zhixun, JIANG Ping, etc. Design of status observer for network control system with transfer delay[J]. *Information and Control*, 2000, 29(2): 125 – 130.)
- [2] 朱其新, 胡寿松, 等. 无限时间长时延网络控制系统的随机最优控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 321 – 326.
(ZHU Qixin, HU Shousong, etc. Infinite time stochastic optimal control of networked control systems with long delay[J]. *Control Theory & Application*, 2004, 21(3): 321 – 326.)
- [3] ALMUTAIRI N B, CHOW M Y. Adaptive fuzzy modulation (AFM) for IP networked PI control systems-Part I: Partial adaptation[C]//*Proceedings of the 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Sevilla, Spain: IEEE Press, 2002: 3152 – 3157.
- [4] 李毅, 胡保生, 等. 基于GASA 算法的网络控制系统的控制器设计[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(7): 1571 – 1588.
(LI Yi, HU Baosheng, etc. Controller design of networked control system based on GASA[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(7): 1571 – 1588.)
- [5] 黄剑, 关治洪, 等. 不确定网络控制系统具有 H_∞ 性能界的鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2005, 20(9): 1002 – 1005.
(HUANG Jian, GUAN Zhizhong, etc. Robust Control with H_∞ performance bound for networked control systems with data packet dropouts[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(9): 1002 – 1005.)
- [6] TANG P L, SILVA W C. Compensation for transmission delays in an ethernet-based control network using variable-horizon predictive control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(2): 707 – 718.
- [7] SILVA G J, DATTA A, etc. PI stabilization of first order systems with time delay[J]. *Automatica*, 2001, 37(12): 2025 – 2031.
- [8] 袁南儿, 王万良, 苏宏业. 计算机新型控制策略及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
(YUAN Nan'er, WANG Wanliang, SU Hongye. *Modern Computer Control Strategies and Applications*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.)
- [9] 王万良. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(WANG Wanliang. *Automatic Control Theory*[M]. Beijing: Science Press, 2001.)

作者简介:

王万良 (1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 浙江工业大学软件学院院长, 自动化研究所所长, 控制理论与控制工程学科带头人, 目前研究方向为计算机控制与智能自动化、计算机网络控制等, E-mail: ww1@zjut.edu.cn;

陈惠英 (1979—), 女, 浙江工业大学控制理论与控制工程专业博士研究生, 主要研究领域为计算机网络控制;

陈伟杰 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机网络控制;

郑建炜 (1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为计算机网络控制.