

文章编号: 1001-0920(2007)06-0680-05

网络控制系统中动态调度策略与控制器的综合设计

王 艳¹, 陈庆伟², 吴晓蓓², 胡维礼²

(1. 江南大学 电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122; 2. 南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘 要: 针对 CAN 网下的网络控制系统(NCS), 提出一种动态闭环调度策略. 通过网络监测器周期地在线获取当前的网络服务质量, 估计当前可利用的网络带宽等参数, 实时地调整控制系统的采样周期以适应网络中信息流的变化. 将采用动态闭环调度策略的变采样周期 NCS 建模为一类具有参数不确定性的离散系统, 研究了系统的鲁棒稳定性和控制器的设计方法. 仿真结果表明所提出的综合设计方法对改善网络的运行能力和保证系统稳定性是有效的.

关键词: 网络控制系统; 动态调度; 不确定系统; 鲁棒控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Co-design of dynamic scheduling strategy and controller in networked control systems

WANG Yan¹, CHEN Qing-wei², WU Xiao-bei², HU Wei-li²

(1. Institute of Electrical Automation, Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China; 2. College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: WANG Yan, E-mail: yanyan841@163.com)

Abstract: Considering the networked control systems with multi-loop sharing the CAN resource, by using the broadcast characteristic of CAN, a dynamic close-loop schedule policy is proposed. A monitor is used to acquire the network qualities of service (QoS) periodically, then the sample period of control systems is adjusted according to the QoS. The NCS which adopts the scheduling policy is a time-vary sample period system which is modeled as a discrete system with parametric uncertainties. Based on the model, robust stability and controller design method of the NCS are studied and the final example validates the effectiveness of the proposed method.

Key words: Networked control systems; Dynamic scheduling; Uncertain system; Robust control

1 引 言

近年来,网络控制系统(NCS)调度策略研究、控制与调度综合设计正逐渐成为人们关注的焦点.文献[1]研究了在满足网络资源可调度性和系统稳定性双重约束条件下,使 NCS 满足性能指标的采样周期优化问题.借助“窗口”的概念,文献[2]提出基于循环服务网络的多 NCS 带宽配置算法,在系统稳定性约束下离线确定系统的采样周期,并应用到 CAN 网中.以上方法所涉及的调度策略均是静态的.文献[3]提出了基于 IAE 准则的控制与调度协同设计方法,探讨了兼顾网络利用率与跟踪性能的传输死区门限优化问题.文献[4]提出一种基于系统状态的采样周期动态变化规律,建立了综合采样周期变化规律的 NCS 非线性模型,然而所建立的模型难以进

行系统的分析与设计.现有的调度策略中采样周期大多是固定的,NCS 控制性能的需求希望采样周期尽可能地小.但采样周期过小则会增加网络的负荷,造成调度性能的下降.因此有必要研究变采样周期的调度策略,以适应网络中信息流的时变性,取得更好的总体性能.

本文针对 CAN 网下的多个控制系统共享网络资源的 NCS,提出一种动态闭环调度策略,根据网络服务质量,动态地调节各系统的采样周期,合理地利用网络资源减小网络传输误差.采用动态闭环调度策略的 NCS,其采样周期的变化是时变不确定的,通过将采样周期的不确定性等效为系统参数的不确定性.采用动态闭环调度策略的 NCS 可建模为一类具有参数不确定性的离散时间系统,运用 LMI

收稿日期: 2006-03-04; 修回日期: 2006-05-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60174019,60474034).

作者简介: 王艳(1978—),女,江苏盐城人,博士生,从事网络控制系统的研究;胡维礼(1941—),男,江苏东台人,教授,博士生导师,从事智能控制、网络控制系统等研究.

方法和 Lyapunov 方法研究了系统的鲁棒稳定性和控制器的设计方法。

2 动态闭环调度策略

2.1 问题描述

设 NCS 由 N 个控制系统组成,采用 CAN 网作为 NCS 中信息传输的介质,NCS 结构如图 1 所示。

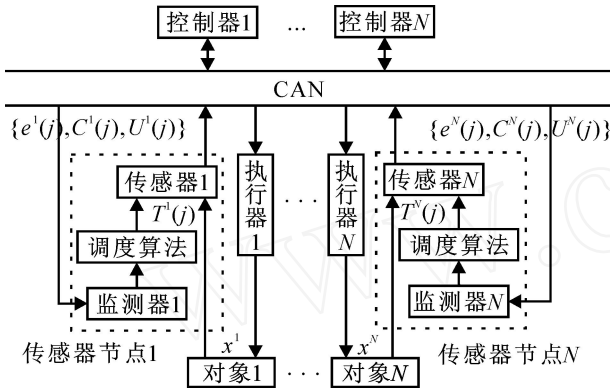


图 1 采用动态闭环调度策略的 NCS 结构

假设 1 传感器数据和控制量均采用单包传输模式,网络中各节点时钟同步。

假设 2 所有监测器的采样间隔相同,为 T_M 。

首先定义如下参数: i 为控制系统标识, j 为监测器周期标识, N 为控制系统的数目; $T^i(j)$ 为第 j 个监测器周期内系统 i 的采样周期; T_{max}^i 为使系统保持稳定的最大采样周期; $C^i(j)$ 为第 j 个监测器周期获取的系统 i 中数据包执行时间; $\hat{C}^i(j)$ 为第 j 个监测器周期内系统 i 中数据包执行时间的预估值; $U^i(j)$ 为第 j 个监测器周期获取的系统 i 所利用的网络带宽; $\mathcal{V}^i(j)$ 为第 j 个监测器周期系统 i 的网络带宽预估值,定义为 $\mathcal{V}^i(j) = \hat{C}^i(j) / T^i(j)$; $U(j)$ 为第 j 个监测器周期内总的网络带宽,满足关系式 $U(j) = \sum_{i=1}^N U^i(j)$;

$\mathcal{V}(j)$ 为第 j 个监测器周期内总的网络带宽的预估值,满足关系式 $\mathcal{V}(j) = \sum_{i=1}^N \mathcal{V}^i(j)$; $e^i(j)$ 为第 j 个监测器周期内系统 i 中的网络传输误差, $e^i(j) = [(e_x^i(j))^\top \quad (e_u^i(j))^\top]^\top$,定义 $e_x^i(j) = x^i(j) - \hat{x}^i(j)$, $e_u^i(j) = u^i(j) - \hat{u}^i(j)$, $\hat{x}^i(j)$, $\hat{u}^i(j)$ 分别是 $x^i(j)$, $u^i(j)$ 在接收端的网络镜像。网络诱导时延、丢包、乱序等引起的数据发送值与接收值之间的误差均归入到网络传输误差中。

利用 CAN 网的广播特性,各传感器节点同步等间隔地获取当前的网络传输误差、所利用的网络带宽以及数据包的执行时间。调度算法根据所获得的信息计算新的传感器采样周期。设传感器端有长度为 $m \times 2$ 的缓存,用于存储包括当前时刻在内的各控制系统前 m 个数据包的执行时间 $\{C^i(j), \dots,$

$C^i(j - m + 1)\}$ 和前 m 个监测器周期获取的总网络带宽 $\{U(j), \dots, U(j - m + 1)\}$ 。

2.2 网络带宽与执行时间的预估

利用已经获取的前 m 个时刻的网络带宽和数据包执行时间值 $\{C^i(j), \dots, C^i(j - m + 1)\}$ 和 $\{U(j), \dots, U(j - m + 1)\}$, $i = 1, 2, \dots, N$,分别构造网络带宽和执行时间的自回归(AR)模型,如式(1)和(2)所示,预估第 $j + 1$ 监测器周期内可利用的网络带宽和数据包执行时间为

$$U(j + 1) = a_1 U(j) + a_2 U(j - 1) + \dots + a_m U(j - m + 1) + (j + 1), \quad (1)$$

$$C^i(j + 1) = b_1^i C^i(j) + b_2^i C^i(j - 1) + \dots + b_m^i C^i(j - m + 1) + \varepsilon^i(j + 1). \quad (2)$$

其中: $a_1, \dots, a_m, b_1^i, \dots, b_m^i$ 是未知量。假设残差 $\varepsilon^i(j)$, $\varepsilon^i(j)$ 是均值为零、方差未知的白噪声。记

$$(\bar{C}^i(j))^\top = [C^i(j) \quad \dots \quad C^i(j - m + 1)],$$

$$(B^i)^\top = [b_1^i \quad \dots \quad b_m^i],$$

$$\bar{U}^\top(j) = [U(j) \quad \dots \quad U(j - m + 1)],$$

$$A^\top = [a_1 \quad \dots \quad a_m],$$

则 AR 模型可表示为

$$U(j + 1) = \bar{U}^\top(j) A + (j + 1),$$

$$(C^i(j + 1))^\top = (\bar{C}^i(j))^\top B^i + \varepsilon^i(j + 1).$$

若 \hat{A} 为 A 的估计, \hat{B}^i 为 B^i 的估计,则

$$A(j) = A(j - 1) + \frac{P(j - 1) \bar{U}^\top(j) [U(j) - \bar{U}^\top(j - 1) A(j - 1)]}{u + \bar{U}^\top(j) P(j - 1) \bar{U}(j)},$$

$$P(j) = \frac{1}{u} \left\{ P(j - 1) - \frac{[P(j - 1) \bar{U}^\top(j)] [P(j - 1) \bar{U}(j)]^\top}{u + \bar{U}^\top(j) P(j - 1) \bar{U}(j)} \right\},$$

$$A(0) = 0, P(0) = I_m, \quad u > 0,$$

其中 u 为遗忘因子,满足 $0 < u < 1$ 。 B^i 的表达式与 A 的表达式类同,利用估计的 AR(m) 模型预估 $j + 1$ 监测周期内的网络带宽和数据包执行时间

$$\mathcal{V}(j + 1) = \bar{U}^\top(j) \hat{A}(j), \quad (3)$$

$$\hat{C}^i(j + 1) = (\bar{C}^i(j))^\top \hat{B}^i(j). \quad (4)$$

2.3 带宽分配

根据网络带宽的预估值和网络传输误差,各控制系统的带宽分配如下:

1) 若当前时刻所有系统的网络传输误差均为 0,平均分配网络资源,即 $\mathcal{V}^i(j + 1) = \frac{1}{N} \mathcal{V}(j + 1)$ 。

2) 若当前时刻所有控制系统的网络传输误差不全为 0,考虑到部分网络传输误差为 0 的控制系统

对网络资源的需求相对较低,在保证稳定的前提下,尽量降低采样频率.若 z_l 表示网络传输误差为 0 的系统标识, $z_l \in \{1, 2, \dots, N\}, l = 1, 2, \dots, q, q$ 表示网络传输误差为 0 的系统数目.此时令系统 z_l 的采样周期为 $T_{\max}^{z_l}$,则 $\mathcal{V}^{z_l}(j+1) = \frac{C^{z_l}(j+1)}{T_{\max}^{z_l}}$.

对于网络传输误差不为 0 的系统,按比例分配剩余的网络资源

$$\mathcal{V}^{z_s}(j+1) = \frac{e^{z_s}(j)}{\sum_{s=1}^{N-q} e^{z_s}(j)} \left(\mathcal{V}(j+1) - \sum_{l=1}^q \mathcal{V}^{z_l}(j+1) \right).$$

其中: z_s 表示 $e^{z_s}(j) \neq 0$ 的系统, $z_s \in \{1, 2, \dots, N\}, s = 1, 2, \dots, N - q$.

从而,各控制系统新的采样周期为

$$T^i(j+1) = \frac{C^i(j+1)}{\mathcal{V}^i(j+1)}. \tag{5}$$

注 1 在实际应用中,考虑系统的精度,当网络传输误差小于某一阈值时,可以将其视为网络传输误差为 0 的情形.

3 动态闭环调度策略下 NCS 的建模

3.1 基本假设

假设 3 采样周期标称值 \bar{T} 已知.对于实际的控制系统,采样周期的标称值可以由实验或者经验获得.

假设 4 为方便研究,忽略网络诱导时延、丢包的影响.

3.2 动态闭环调度策略下采样周期的描述

在上述闭环调度策略下,一个监测器周期内传感器多次采样的采样周期保持不变,直到下一监测器周期到来产生新的采样周期值.各控制系统的采样周期是时变的,受控制性能和网络带宽的约束,NCS 中的采样周期是有界的变化量,采样周期的上界为 T_{\max}^i ,采样周期的下界为 $T_{\min}^i = C_{\min}^i / U_G$.其中: C_{\min}^i 为网络中没有冲突时数据包的执行时间,且 $C_{\min}^i = 2L / B, L$ 为数据包的长度, B 为网络的传输速率, U_G 为全局最大可利用网络带宽.在闭环反馈调度策略下,第 k 次采样时的采样周期为 $T^i(k)$,满足 $T^i(k) \in [T_{\min}^i, T_{\max}^i]$,可以表示为

$$T^i(k) = \bar{T}^i + \Delta T^i(k),$$

其中 $\Delta T^i(k) \in [T_{\min}^i - \bar{T}^i, T_{\max}^i - \bar{T}^i]$ 是时变不确定的.

3.3 动态闭环调度策略下 NCS 的数学模型

若系统 i 的连续状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}^i(t) &= A^i x^i(t) + B^i u^i(t), \\ y^i(t) &= C^i x^i(t). \end{aligned} \tag{6}$$

其中: $x^i \in R^n$ 为对象状态, $u^i \in R^m$ 为对象输入, $A^i \in R^{n \times n}, B^i \in R^{n \times m}, C^i \in R^{r \times n}$ 为常数矩阵.

约定 1 考虑 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 的一般性,为书写简洁清楚,在下述的模型描述和证明过程中将省略所有参数的上标“ i ”.

按采样周期 $T(k)$ 离散化的系统方程为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= G(T(k))x(k) + H(T(k))u(k), \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned} \tag{7}$$

其中

$$\begin{aligned} G(T(k)) &= e^{T(k)A}, \\ H(T(k)) &= \int_0^{T(k)} e^{T(k)-t} B dt. \end{aligned}$$

针对式(7)所示的变采样周期系统,下面将利用矩阵理论和数学变换将其等效为一类具有参数不确定性的离散系统方程.

(1) 矩阵 G 具有 n 个非零互异特征根

设 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 为 G 的 n 个非零互异特征根,此时可对角化,存在可逆矩阵 P 使得

$$P^{-1} G P = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}. \tag{8}$$

其中 P 为 G 的特征向量矩阵.

由矩阵理论,有

$$\begin{aligned} G(T(k)) &= D_1 F_1(T(k)) E_1, \\ H(T(k)) &= B_0 + D_2 F_2(T(k)) E_2. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} D_1 &:= \text{diag}\{e^{T_+}, \dots, e^{T_+}\}, \\ F_1(T(k)) &:= \text{diag}\{e^{T(k)-T_+}, \dots, e^{T(k)-T_+}\}, \\ B_0 &= \text{diag}\{-\frac{1}{1}, \dots, -\frac{1}{n}\}^{-1}, \\ E_1 &= I, E_2 = I, \\ D_2 &:= \text{diag}\{\frac{1}{1} e^{T_+}, \dots, \frac{1}{n} e^{T_+}\}, \\ F_2(T(k)) &:= \text{diag}\{e^{T(k)-T_+}, \dots, e^{T(k)-T_+}\}, \\ \lambda_1, \dots, \lambda_n &\text{的选取使得 } |e^{j(T(k)-T_+)}| < 1, j = 1, 2, \dots, n, \text{ 则} \end{aligned}$$

$$F_j^{-1}(T(k)) F_j(T(k)) < I, j = 1, 2.$$

(2) 矩阵 G 包含 0 特征根和重根

不失一般性,设 G 具有一个 0 特征值和一个 r 重特征值 λ^* ,其余为非 0 的互异特征值,此时 G 可化为 Jordan 标准形.存在可逆矩阵 P 使得

$$P^{-1} G P = \text{diag}\{0, J_1, J_2\}^{-1}. \tag{9}$$

其中: J_1 是由 λ^* 的非零互异特征根 $\lambda_2, \dots, \lambda_{n-r-1}$ 组成的对角块, $J_2 \in R^{r \times r}$ 是与 λ^* 对应的 Jordan 块.

将式(9)代入 $G(T(k))$ 和 $H(T(k))$ 的表达式,仿上,经推导可得

$$\begin{aligned} G(T(k)) &= D_1 F_1(T(k)) E_1, \\ H(T(k)) &= B_0 + D_2 F_2(T(k)) E_2. \end{aligned}$$

其中

$$D_1 = \text{diag}\{1, e^{2(\bar{T}+2)}, \dots, e^{n-r-1(\bar{T}+n-r-1)}, M_1\},$$

$$D_2 = \text{diag}\left\{1, \frac{1}{2}e^{2(\bar{T}+2)}, \dots,\right.$$

$$\left. \frac{1}{n-r-1}e^{n-r-1(\bar{T}+n-r-1)}, M_2\right\},$$

$$B_0 = \text{diag}\left\{\bar{T}, -\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{n-r-1}, j_2\right\}^{-1},$$

$$E_1 = I^{-1}, E_2 = I^{-1},$$

$$F_1(T(k)) = \text{diag}\{1, e^{2(T(k)-2)}, \dots, e^{n-r-1(T(k)-n-r-1)}, M_1^{-1}J_1\},$$

$$F_2(T(k)) = \text{diag}\left\{\frac{T(k)}{1}, e^{2(T(k)-2)}, \dots, \frac{1}{n-r-1}e^{n-r-1(T(k)-n-r-1)}, M_2^{-1}\tilde{J}_2\right\},$$

$$J_1 = e^{j_2 T(k)}, j_2 = e^{j_2 t} dt|_{t=0},$$

$$\tilde{J}_2 = e^{j_2 t} dt|_{t=T(k)},$$

标量 $\alpha_2, \dots, \alpha_{n-r-1}$ 的选取使得 $|e^{j^{(T(k)-j)}| < 1, j = 2, \dots, n-r-1, M_1$ 是使得 $M_1^{-1}J_1 < 1$ 的对角可逆矩阵, 标量 α_1 使得 $| \alpha_1 | > | T(k) |, M_2$ 使得 $M_2^{-1}\tilde{J}_2 < 1$, 从而有

$$F_j^T(T(k)) F_j(T(k)) < I, j = 1, 2.$$

由上述推导, 变采样周期 NCS 可等价为一类具有不确定性的离散系统模型

$$\begin{aligned} x(k+1) &= (D_1 F_1(T(k)) E_1) x(k) + (B_0 + D_2 F_2(T(k)) E_2) u(k), \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned} \tag{10}$$

其中: D_1, D_2, E_1, E_2, B_0 由上述推导获得; 不确定项满足 $F_j^T(T(k)) F_j(T(k)) < I, j = 1, 2$.

4 动态闭环调度策略下的 NCS 控制器设计

针对 NCS(10), 设计无记忆状态反馈控制律

$$u(k) = Kx(k), \tag{11}$$

使得闭环 NCS

$$\begin{aligned} x(k+1) &= (\bar{A} + \bar{D}\tilde{F}(T(k))\tilde{E}) x(k), \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \tag{12}$$

是渐近稳定的. 其中 $K \in R^{n \times n}$ 为状态反馈增益阵,

$$\bar{A} = B_0 K, \bar{D} = [D_1 \quad D_2], \tilde{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 K \end{bmatrix},$$

$$\tilde{F}(T(k)) = \text{diag}\{F_1(T(k)), F_2(T(k))\},$$

$$\tilde{F}^T(T(k)) \tilde{F}(T(k)) < I.$$

引理 1^[5] 设 $W, M, L, F(k)$ 为具有适当维数的实矩阵, 其中 $F(k)$ 满足 $F^T(k) F(k) < I, W$ 为对称阵. 若存在标量 $\gamma > 0$ 使得

$$W + \gamma^{-1} L^T L + M M^T < 0,$$

则

$$W + L^T F^T(k) M^T + M F(k) L < 0.$$

定理 1 对于 NCS(12), 若存在标量 $\gamma > 0$, 对称正定矩阵 $P \in R^{n \times n}$ 和状态反馈增益阵 K , 使得如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} + D_1 D_1^T + D_2 D_2^T & B_0 K & 0 & 0 \\ * & -P & E_1^T & K^T E_2^T \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \tag{13}$$

则 NCS(12) 是渐近稳定的.

证明 选取 Lyapunov 函数 $V(x(k)) = x(k)^T P x(k)$, 其中 P 为对称正定矩阵. 显然

$$V(x(k)) > 0,$$

$$V(x(k)) =$$

$$x(k+1)^T P x(k+1) - x(k)^T P x(k) =$$

$$x(k)^T [(A + \bar{D}\tilde{F}\tilde{E})^T P (A + \bar{D}\tilde{F}\tilde{E}) - P] x(k). \tag{14}$$

应用 Schur 引理和引理 1, 由不等式(13) 可得

$$(A + \bar{D}\tilde{F}\tilde{E})^T P (A + \bar{D}\tilde{F}\tilde{E}) - P < 0, \tag{15}$$

即 $V(x(k)) < 0$. 从而, 当式(13) 成立时, 闭环系统(12) 是渐近稳定的.

由于式(13) 同时含有 P, P^{-1} 是非线性的, 在利用 Matlab 工具箱求解时, 须将其转化为线性矩阵不等式. 对不等式(13) 分别左乘、右乘 $\text{diag}\{I, P^{-1}, I, I\}$, 并令 $X = P^{-1}, Y = KX$, 则

$$\begin{bmatrix} -X + D_1 D_1^T + D_2 D_2^T & B_0 Y & 0 & 0 \\ * & -X & X E_1^T & Y^T E_2^T \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0. \tag{16}$$

推论 1 若存在 $X = X^T > 0, \gamma > 0$ 及矩阵 Y , 使得线性矩阵不等式(16) 成立, 则 NCS(12) 渐近稳定, 且 $u(k) = YX^{-1}x(k)$ 为所求的控制律.

5 算例仿真

若 3 个控制系统共享网络资源, 系统方程分别为

$$\dot{x}^1(t) = \begin{bmatrix} -1 & -0.1 \\ 0 & -0.95 \end{bmatrix} x^1(t) + \begin{bmatrix} -0.15 \\ -0.43 \end{bmatrix} u^1(t), \tag{17}$$

$$\dot{x}^2(t) = \begin{bmatrix} -1 & 0.1 \\ 1 & -0.95 \end{bmatrix} x^2(t) + \begin{bmatrix} 0.28 \\ 0.38 \end{bmatrix} u^2(t), \tag{18}$$

$$\dot{x}^3(t) = \begin{bmatrix} -5 & 1 \\ -3 & -1 \end{bmatrix} x^3(t) + \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix} u^3(t). \tag{19}$$

网络参数如下: 采用 CAN 网, 数据传输速率 $B = 125 \text{ kbit/s}$, 全局最大可利用网络带宽 $U_G =$

80%, 实际网络带宽在 [30%, 80%] 之间服从均匀一致分布, 网络中理想的执行时间 $C_{min}^i = 2 \text{ ms}$.

其他参数如下: 3 个控制系统的最大采样周期和采样周期标称值分别为 $T_{max}^1 = 546 \text{ ms}$, $T_{max}^2 = 392 \text{ ms}$, $T_{max}^3 = 628 \text{ ms}$, $\bar{T}^1 = 20 \text{ ms}$, $\bar{T}^2 = 15 \text{ ms}$, $\bar{T}^3 = 30 \text{ ms}$. 监测器的采样周期为 700 ms, 仿真时间为 20 s, 系统的初始值相同, $x_0^1 = x_0^3 = [-5; 5]$, $x_0^2 = [-5; 10]$.

采用文中提出的动态闭环调度策略, 调度算法根据网络服务质量的变化实时地调整各控制系统的采样周期, 采样周期变化规律如图 2 ~ 图 4 所示, 网络传输误差变化如图 5 所示. 可以看出, 在所提出的调度策略下, 各控制系统的网络传输误差逐步趋于

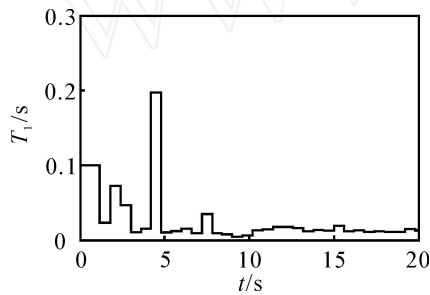


图 2 控制系统 1 采样周期 T_1 变化规律

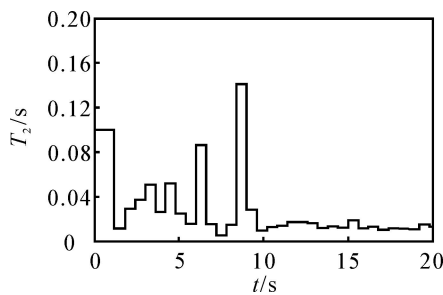


图 3 控制系统 2 采样周期 T_2 变化规律

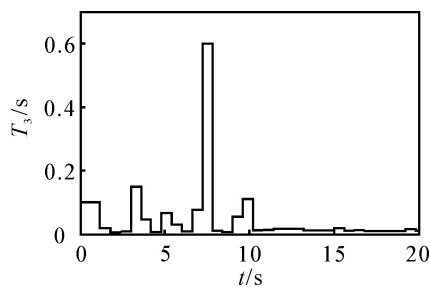


图 4 控制系统 3 采样周期 T_3 变化规律

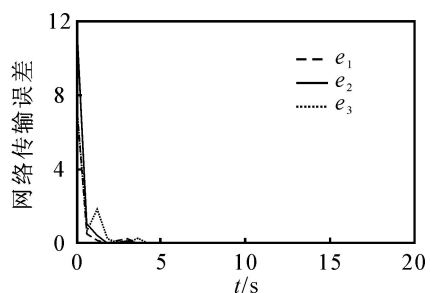


图 5 控制系统 3 的网络传输误差

零, 从而说明该调度策略能够有效地提高网络传输的可靠性.

针对上述 3 个控制系统, 当传感器的采样周期如图 2 ~ 图 4 变化时, 利用文中提出的变采样周期系统的建模方法, 可得离散化系统 (10) 中对应参数为

$$D_1^1 = \begin{bmatrix} 0.005 & -0.0058 \\ 0 & 0.0029 \end{bmatrix},$$

$$D_2^1 = \begin{bmatrix} -0.005 & 0.006 \\ 0 & -0.003 \end{bmatrix},$$

$$B_0^1 = \begin{bmatrix} -0.1047 \\ -0.4526 \end{bmatrix}, E_1^1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 2.2361 \end{bmatrix},$$

$$E_2^1 = \begin{bmatrix} -1.01 \\ -0.9615 \end{bmatrix};$$

$$D_1^2 = \begin{bmatrix} -0.0003 & -0.008 \\ 0.0009 & -0.0275 \end{bmatrix},$$

$$D_2^2 = \begin{bmatrix} 0.0002 & 0.0122 \\ -0.0007 & 0.0418 \end{bmatrix},$$

$$B_0^2 = \begin{bmatrix} -0.2815 \\ -0.6733 \end{bmatrix}, E_2^2 = \begin{bmatrix} -0.2815 \\ -0.6733 \end{bmatrix},$$

$$E_1^2 = \begin{bmatrix} -1.666 & 0.4868 \\ -1.6421 & -0.562 \end{bmatrix};$$

$$D_1^3 = \begin{bmatrix} -0.0012 & -0.0129 \\ -0.0012 & -0.0387 \end{bmatrix},$$

$$D_2^3 = \begin{bmatrix} 0.0003 & 0.0064 \\ 0.0003 & 0.0193 \end{bmatrix},$$

$$B_0^3 = \begin{bmatrix} 0.125 \\ 1.625 \end{bmatrix}, E_2^3 = \begin{bmatrix} 3.5355 \\ -4.7434 \end{bmatrix},$$

$$E_1^3 = \begin{bmatrix} -2.1213 & 0.7071 \\ 1.5811 & -1.5811 \end{bmatrix}.$$

针对离散化后的系统 (10) ($i = 1, 2, 3$), 根据定理 1 分别独立设计状态反馈控制器, 可求得 $K^1 = [8.0121 \quad -2.2117]$, $K^2 = [2.524 \quad -0.87]$, $K^3 = [-3.137 \quad 0.515]$. 3 个控制系统在各自的控制器下的闭环状态响应曲线如图 6 所示. 曲线表明, 所设计的控制器能够使得 3 个控制系统在动态调度策略下均是稳定的.

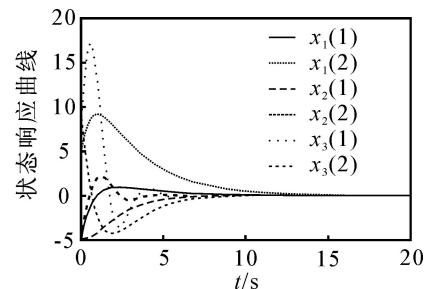


图 6 闭环网络控制系统状态响应曲线

(下转第 688 页)

使用文献[6]算法对 Oliver30 进行实验,其最优解对应的最佳路径长度的变化过程如图 2 中虚线所示.可以看出 DSACA 提高了求解的速度和精度. DSACA 与基本蚁群算法的比较结果如表 2 所示,可以看出,相对基本蚁群算法而言,本文算法的优势更加明显.

表 1 DSACA 在不同参数下的结果比较

α	β	ρ	δ	最优解	20 次平均值
1.0	1.50	0.9	0.5	425.910 2	433.513 9
1.0	1.50	0.7	0.3	433.780 3	431.521 8
0.9	0.98	0.7	0.3	426.425 4	431.259 2
0.9	0.98	0.9	0.5	424.869 3	427.655 8

表 2 DSACA 与基本蚁群算法的比较

算法	最优解	迭代次数	20 次平均值
ACS	427.667 4	316	435.365 7
AQS	435.838 2	367	438.231 7
DSACA	424.869 3	22	427.655 8

4 结 语

仿生优化算法有明显的阶段特点,一般在进化的前期增强其寻找更优解的能力,而在进化的后期使其逐步收敛到最优解.在蚁群算法中,各个参数有明确的意义,所以本文在不同的优化阶段对参数进行分阶段设计,同时也对选择策略进行分阶段设计,形成了动态分阶段的蚁群算法,且对该算法的全局收敛性进行证明.针对典型的 Oliver30 进行实验,

实验中通过数据对比说明了本文算法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Dorigo M, Maniezzo V, Colormi A. Ant system: Optimization by a colony cooperating agents [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41.
- [2] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [3] Walter J, Gutjahr. A graph-based ant system and its convergence[J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(8): 873-888.
- [4] Stutzle T, Dorigo M. A short convergence proof for a class of ant colony optimization algorithm [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computations, 2002, 6(4): 358-365.
- [5] 石立宝,郝晋. 随机摄动蚁群算法的收敛性及其数值特性分析[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2421-2424.
(Shi L B, Hao J. The numerical characteristics analysis and convergence proof for ant colony optimization algorithm with random perturbation behavior [J]. J of System Simulation, 2004, 16(11): 2421-2424.)
- [6] Stutzle T, Hoos H. Max-min ant system [J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(8): 889-914.

(上接第 684 页)

6 结 语

针对 CAN 网下的 NCS,利用 CAN 网的广播特性,设计了一种基于网络用户层的动态闭环调度策略,采用此调度策略的 NCS 为一个变采样周期系统.文中提出了变采样周期系统的建模与鲁棒控制器的设计方法,最后通过仿真对所提出的调度策略和控制方法进行了验证.仿真结果表明,动态闭环调度策略具有良好的性能,所提出的变采样周期系统的建模与控制方法是有效的,从而实现了 NCS 中控制与调度的综合设计,为 NCS 的实际工程应用提供了理论技术支持.

参考文献(References)

- [1] Branicky M S, Philips S M, Zhang W. Scheduling and feedback co-design for networked control systems[C]. IEEE Conf on Decision and Control. Las Vegas: IEEE Press, 2002: 10-13.

- [2] Yong Ho Kim, Hong Seong Park, Wook Hyun Kwon. A scheduling method for network-based control systems [C]. American Control Conf. Washington DC: IEEE Press, 1998: 718-722.
- [3] Otanez P, Moyne J, Tilbury D. Using deadbands to reduce communication in networked control systems [C]. American Control Conf. Alaska: IEEE Press, 2002: 3015-3020.
- [4] Manel Velasco, Josep M Fuertes, Caixue Lin. A control approach to bandwidth management in networked control systems[C]. The 30th Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society. Busan, 2004: 782-786.
- [5] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2002: 96-119.
(Yu L. Robust control — Linear matrix inequality methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 96-119.)