

带宽受限的CAN总线对数量化调度策略

匡付华, 胥布工, 刘贵云

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 研究了使用量化技术解决控制器局域网(CAN)总线网络控制系统的带宽受限问题. 首先, 建立了多控制回路的网络控制系统模型, 该模型综合考虑了采用对数量化器对采样信号进行量化和Bernoulli随机网络丢包过程. 并针对量化误差和数据丢包, 设计了控制器和观测器使得闭环系统指数均方稳定. 然后根据控制性能最优化要求, 设计了在带宽受限情况下的反馈网络调度器, 提出了量化反馈调度策略. 最后通过对3个独立控制回路组成的CAN总线系统进行仿真实验, 验证了此调度策略的有效性和可行性.

关键词: CAN 现场总线; 对数量化器; 数据丢包; 量化反馈调度

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Scheduling strategy for logarithmic quantization under bandwidth constraints based on controller area network bus

KUANG Fu-hua, XU Bu-gong, LIU Gui-yun

(College of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: A logarithmic quantization strategy for solving bandwidth constraint problems is discussed. A multi-loop model with logarithmic quantized sampling signals and Bernoullian random packet losses on the network is established. To deal with the quantization error and the packet loss, we develop a controller and an observer for stabilizing the multi-loop system in the exponentially mean-square sense. Moreover, a quantization scheduling strategy under bandwidth constraints is presented to optimize the control performance. Finally, the effectiveness and feasibility of the quantization scheduling strategy are tested and validated through simulations of a controller area network(CAN) bus system with three control loops.

Key words: CAN bus; logarithmic quantization; packet loss; quantization feedback scheduling

1 引言(Introduction)

随着分布式计算技术不断成熟、通讯网络的迅猛发展、传感器技术的日趋完善, 使得越来越多的现代控制系统逐渐使用通讯网络来构建系统结构, 如汽车工业、飞行器设计和机器人控制等, 通过实时串行网络形成的闭环反馈控制系统称网络控制系统. 相对其他点对点网络控制系统, CAN(controller area network)总线具有通信能力强、可靠性高、实时性好、成本低、传输距离远等优势^[1], 尤其是其开放性使其成为国内外最有前途的现场总线之一. 因此CAN总线在汽车工业、航空航天中得到普遍应用.

带宽受限是影响网络控制系统运行的一个非常重要的因素, 是网络控制系统中研究的热点之一. Tatikonda等^[2]分析了网络控制系统下保证系统稳定性时所允许最大带宽的充分必要条件. Cavalieri^[3]提出了使用动态优先级来解决CAN总线下带宽受限问题. 解决带宽受限问题的另一个研究方向是对信息进行量化. Lu等^[4]设计了网络控制系统中基于线性

量化的状态观测器. Fu^[5]对网络反馈控制中应用量化器进行了较详细的研究, 同时对量化器中的线性量化器、对数量化器、非线性量化器、动态量化器进行了分析和比较. Fu等^[6]在网络控制中应用对数量化器设计状态观测器. Lu等^[7]在网络控制中使用对数量化器量化奇异系统, 并设计了 H_∞ 滤波器.

传输过程中丢包对控制性能的影响较大, 也是网络控制系统的一个普遍问题. 由于传输丢包在网络传输中具有随机性和不确定性, 目前普遍采用Bernoulli模型和Markov模型来描述丢包事件. Wang等^[8]研究了基于Bernoulli丢包模型下的随机时延系统的鲁棒 H_∞ 控制器设计. 在无线传感器网络下, Liu等^[9]提出了基于Bernoulli丢包模型下的多重丢包滤波器设计. Smith等^[10]将丢包建模为Markov跳变过程, 采用跳变线性估计器取代最优的时变Kalman估计器来处理丢包.

具有带宽受限的多回路采用不同的调度算法来保证实时性. Liu等^[11]对带宽受限下的控制系统引

入均匀量化,并对带宽的上下界进行了研究,但没有考虑丢包的影响. Gravagne等^[12]提出了一种自适应采样方法,通过该调度方法,CAN实时网络上的控制器能够减少非周期源的高网络流量的时间内的带宽要求. Nesic等^[13]通过构建Lyapunov函数来模拟网络控制系统和量化控制系统.

本文首先建立了基于对数量化和考虑网络丢包的多控制回路的系统模型.然后对此系统模型的闭环控制系统的指数均方稳定性进行了理论推导.之后根据最优性能指标设计了网络调度器,提出了通过调节量化密度进行网络资源分配以满足系统性能指标的量化调度策略.最后通过实验仿真对此量化调度方法进行了验证.

主要工作: 1) 目前基于对数量化和网络丢包的理论成果较多,但基本上是基于单回路反馈系统的,而实际网络控制系统(如CAN总线)基本上都是多回路的,本文提出了使用对数量化来解决多回路网络控制系统的资源受限问题. 2) 资源受限的多回路控制系统为了保证性能指标,需要对网络资源进行调度.本文提出了通过调节量化密度进行网络资源分配的量化调度策略. 3) 结合CAN总线网络,使用Truetime1.5对提出的理论成果进行了仿真实验.

2 问题描述(Problem description)

本文在网络控制系统中加入了数量化器,传感器信号在进入网络传输前先进行量化,并考虑网络传输中的丢包现象,设计了 n 个独立的网络控制系统,并在同一个网络中由调度器统一调度.

CAN总线采用CSMA/AMP协议,是一种基于优先级的通信网络.在实际应用中,虽然CAN具有较高的可靠性,但是,由于系统的复杂性,报文传送的实时性会得不到有效地保证,尤其是当网络负载较高或者多个报文同时发送到网络时,那些低优先级报文将延迟发送,可能会造成较大的发送时延.当网络控制系统要求数据传输的实时性较高时,报文的实时性问题尤为突出,当传输延时大于采样周期时,后一个信号可能覆盖前一个信号,因此在本模型中把时延视为丢包来处理,系统模型如图1所示.

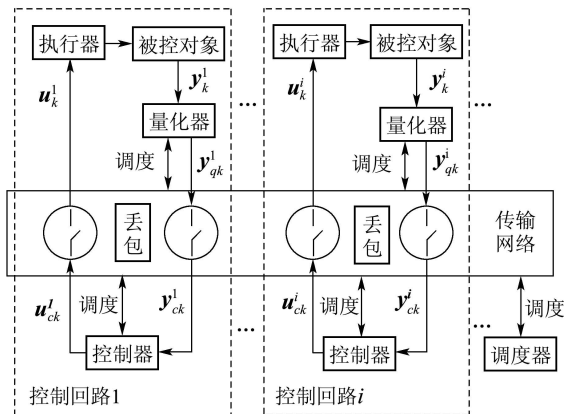


图1 系统模型

Fig. 1 System model

考虑如下离散的网络延迟系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1}^i = A_i \mathbf{x}_k^i + B_i \mathbf{u}_{ck}^i, \\ \mathbf{y}_k^i = C_i \mathbf{x}_k^i, i \in \{1, 2, \dots\}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{1 \times n}$, $C \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $\mathbf{x}_k^i \in \mathbb{R}^n$ 是第 i 个控制回路的状态, $\mathbf{u}_k^i \in \mathbb{R}^n$ 是第 i 个控制回路的控制信号, $\mathbf{y}_k^i \in \mathbb{R}^n$ 是第 i 个控制回路的测量信号.

对数量化器描述如下:

$$\begin{cases} \nu = \{\mu_j = \rho^j \mu_0 : j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\} \cup \{0\}, \\ \mu_0 > 0, \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\rho \in (0, 1)$, 且有

$$Q(y) = \begin{cases} \rho^j \mu_0, & \frac{1}{1+\delta} \rho^j \mu_0 < y < \frac{1}{1-\delta} \rho^j \mu_0, \\ 0, & y = 0, \\ -Q(-y), & y < 0, \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\rho = \frac{1-\delta}{1+\delta}, \quad (4)$$

$$\delta^{-1} = \prod_j |\lambda_j^u|, \quad (5)$$

其中 λ_j^u 为状态矩阵 A 的非稳定特征值.

测量信号 \mathbf{y}_k^i 经对数量化器后的量化输出函数为

$$\mathbf{y}_{qk}^i = Q(\mathbf{y}_k^i). \quad (6)$$

定义量化误差为

$$\mathbf{e}_q^i = Q(\mathbf{y}_k^i) - \mathbf{y}_k^i = \mathbf{y}_{qk}^i - \mathbf{y}_k^i. \quad (7)$$

又

$$\mathbf{e}_q^i = \Delta_i \cdot \mathbf{y}_k^i, \|\Delta_i\| < \delta_i. \quad (8)$$

故

$$\mathbf{y}_{qk}^i = \mathbf{e}_q^i + \mathbf{y}_k^i = (1 + \Delta_i) \mathbf{y}_k^i. \quad (9)$$

假定网络中信号传输时的丢包服从Bernoulli分布,则其中传感器到控制器的丢包描述为

$$\begin{cases} P\{\alpha_k^i = 1\} = E\{\alpha_k^i\} = \bar{\alpha}_i, \\ P\{\alpha_k^i = 0\} = E\{1 - \alpha_k^i\} = 1 - \bar{\alpha}_i, \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\bar{\alpha}_i \in [0, 1]$ 为常数, 则有

$$\mathbf{y}_{ck}^i = \alpha_k^i \mathbf{y}_{qk}^i. \quad (11)$$

控制器到执行器的丢包描述为

$$\begin{cases} P\{\beta_k^i = 1\} = E\{\beta_k^i\} = \bar{\beta}_i, \\ P\{\beta_k^i = 0\} = E\{1 - \beta_k^i\} = 1 - \bar{\beta}_i, \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\bar{\beta}_i \in [0, 1]$ 为常数, 则有

$$\mathbf{u}_{ck}^i = \beta_k^i \mathbf{u}_k^i. \quad (13)$$

则该系统的状态观测器构造为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i = A_i \hat{\mathbf{x}}_k^i + B_i \mathbf{u}_k^i + L_i (\mathbf{y}_{ck}^i - \hat{\mathbf{y}}_{ck}^i) = (A_i - \bar{\alpha}_i (1 + \Delta_i) L_i C_i) \hat{\mathbf{x}}_k^i + B_i \mathbf{u}_k^i + L_i \mathbf{y}_{ck}^i, \quad (14)$$

$$\mathbf{u}_k^i = -K_i \hat{\mathbf{x}}_k^i. \quad (15)$$

定义状态估计误差为

$$\mathbf{e}_k^i := \mathbf{x}_k^i - \hat{\mathbf{x}}_k^i. \quad (16)$$

将式(13)(15)(16)代入式(1), 得

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1}^i &= A_i \mathbf{x}_k^i + B_i \mathbf{u}_{ck}^i = \\ &(A_i - \bar{\beta}_i B_i K_i) \mathbf{x}_k^i + \bar{\beta}_i B_i K_i \mathbf{e}_k^i + \\ &(\bar{\beta}_i - \beta_k^i) B_i K_i \mathbf{x}_k^i + (\beta_k^i - \bar{\beta}_i) B_i K_i \mathbf{e}_k^i. \end{aligned} \quad (17)$$

又

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{k+1}^i &= \mathbf{x}_{k+1}^i - \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i = \\ &(\bar{\alpha}_i - \alpha_k^i)(1 + \Delta_i) L_i C_i \mathbf{x}_k^i + \\ &(A_i - \bar{\alpha}_i(1 + \Delta_i) L_i C_i) \mathbf{e}_k^i. \end{aligned} \quad (18)$$

式(17)(18)组成的闭环系统可以描述为

$$\boldsymbol{\eta}_{k+1}^i = \bar{A}_i \boldsymbol{\eta}_k^i + \epsilon_k^i \tilde{A}_i \boldsymbol{\eta}_k^i, \quad (19)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{A}_i &= \begin{bmatrix} A_i - \beta_k^i B_i K_i & \bar{\beta}_i B_i K_i \\ 0 & A_i - \bar{\alpha}_i(1 + \Delta_i) L_i C_i \end{bmatrix}, \\ \epsilon_k^i &= \begin{bmatrix} (\beta_k^i - \bar{\beta}_i) I & 0 \\ 0 & (\alpha_k^i - \bar{\alpha}_i) I \end{bmatrix}, \\ \tilde{A}_i &= \begin{bmatrix} -B_i K_i & B_i K_i \\ (1 + \Delta_i) L_i C_i & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\eta}_k^i = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^i \\ \mathbf{e}_k^i \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

3 稳定性分析(Stability analysis)

为了方便证明, 本文先做如下假设.

假设 1 如果矩阵 $B_1 \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是列满秩矩阵, 即 $\text{rank}(B_1) = m$, 则一定存在两个正交矩阵 $U \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $V \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 使 B_1 可对角化, 即

$$\tilde{B}_1 = UB_1V = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} B_1V = \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

其中: $U_1 \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $U_2 \in \mathbb{R}^{(n-m) \times n}$, $Q = \text{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m\}$, 此处 $\sigma_l (l = 1, 2, \dots, m)$ 是矩阵 Q 的非零奇异值.

为了方便结论的得出, 本文还需要如下引理.

引理 1 如果矩阵 $B_1 \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是列满秩矩阵, 且矩阵 P_1 具有如下结构:

$$P_1 = U^T \begin{bmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22} \end{bmatrix} U = U_1^T P_{11} U_1 + U_2^T P_{22} U_2, \quad (21)$$

其中: $P_{11} \in \mathbb{R}^{m \times m} > 0$, $P_{22} \in \mathbb{R}^{(n-m) \times (n-m)} > 0$, U_1, U_2 为式(20)定义的矩阵, 则存在一个非奇异的矩阵 $P \in \mathbb{R}^{m \times m}$, 使得 $B_1 P = P_1 B_1$.

下面将证明闭环系统(19)的稳定性. 系统模型考虑的每个控制回路是相互独立的, 以下对单个控制回路的稳定性进行证明.

定理 1 假定控制器增益矩阵 K 和观测器增益矩阵 L 已知. 要使闭环系统(19)指数均方稳定, 只需要存在正定矩阵 P_1 和 P_2 , 使得以下不等式成立:

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} A - \bar{\beta}BK & \bar{\beta}BK \\ 0 & \bar{\alpha}(1 + \Delta)LC \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} A - \bar{\beta}BK & \bar{\beta}BK \\ 0 & \bar{\alpha}(1 + \Delta)LC \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BK & BK \\ (1 + \Delta)LC & 0 \end{bmatrix}^T \\ &\begin{bmatrix} \beta_1^2 P_1 & 0 \\ 0 & \alpha_1^2 P_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} BK & BK \\ (1 + \Delta)LC & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} < 0, \end{aligned} \quad (22)$$

其中: $\alpha_1 = [(1 - \bar{\alpha})\bar{\alpha}]^{\frac{1}{2}}$, $\beta_1 = [(1 - \bar{\beta})\bar{\beta}]^{\frac{1}{2}}$.

证 构造如下的Lyapunov候选函数:

$$V_k = \mathbf{x}_k^T P_1 \mathbf{x}_k + \mathbf{e}_k^T P_2 \mathbf{e}_k, \quad (23)$$

其中 P_1 和 P_2 为式(22)中描述的正定矩阵, 考虑式(17)(18), 同时考虑到 $E\{(\alpha_k - \bar{\alpha})^2\} = (1 - \bar{\alpha})\bar{\alpha}$, $E\{(\beta_k - \bar{\beta})^2\} = (1 - \bar{\beta})\bar{\beta}$, 则有

$$\begin{aligned} E\{V_{k+1} | \mathbf{x}_k, \dots, \mathbf{x}_0, \mathbf{e}_k, \dots, \mathbf{e}_0\} - V_k &= \\ &[(A - \bar{\beta}BK)\mathbf{x}_k + \bar{\beta}BK\mathbf{e}_k]^T P_1 [(A - \bar{\beta}BK)\mathbf{x}_k + \\ &\bar{\beta}BK\mathbf{e}_k] + [(A - \bar{\alpha}(1 + \Delta)LC)\mathbf{e}_k]^T P_2 [(A - \\ &\bar{\alpha}(1 + \Delta)LC)\mathbf{e}_k] + (1 - \bar{\beta})\bar{\beta} [BK\mathbf{x}_k + \\ &BK\mathbf{e}_k]^T P_1 [BK\mathbf{x}_k + BK\mathbf{e}_k] + (1 - \bar{\alpha})\bar{\alpha} [(1 + \\ &\Delta)LC\mathbf{x}_k]^T P_2 [(1 + \Delta)LC\mathbf{x}_k] - \mathbf{x}_k^T P_1 \mathbf{x}_k - \\ &\mathbf{e}_k^T P_2 \mathbf{e}_k = \boldsymbol{\eta}_k^T \Lambda \boldsymbol{\eta}_k, \end{aligned} \quad (24)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Lambda &:= A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_2 A_2 + \begin{bmatrix} BK & BK \\ (1 + \Delta)LC & 0 \end{bmatrix}^T \\ &\begin{bmatrix} \beta_1^2 P_1 & 0 \\ 0 & \alpha_1^2 P_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} BK & BK \\ (1 + \Delta)LC & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}, \\ A_1 &:= [A - \bar{\beta}BK \quad \bar{\beta}BK], \\ A_2 &:= [0 \quad \bar{\alpha}(1 + \Delta)LC]. \end{aligned}$$

由式(22)可知 $\Lambda < 0$, 因此

$$E\{V_{k+1} | \mathbf{x}_k, \dots, \mathbf{x}_0, \mathbf{e}_k, \dots, \mathbf{e}_0\} - V_k = \boldsymbol{\eta}_k^T \Lambda \boldsymbol{\eta}_k \leq -\lambda_{\min}(-\Lambda) \boldsymbol{\eta}_k^T \boldsymbol{\eta}_k < -\gamma \boldsymbol{\eta}_k^T \boldsymbol{\eta}_k, \quad (25)$$

其中

$$\begin{cases} 0 < \gamma < \min\{\lambda_{\min}, \sigma\}, \\ \sigma := \max\{\lambda_{\max}(P_1), \lambda_{\max}(P_2)\}. \end{cases} \quad (26)$$

则有

$$E\{V_{k+1} | \mathbf{x}_k, \dots, \mathbf{x}_0, \mathbf{e}_k, \dots, \mathbf{e}_0\} - V_k \leq -\gamma \boldsymbol{\eta}_k^T \boldsymbol{\eta}_k \leq -\gamma \boldsymbol{\eta}_k^T \begin{bmatrix} P_1/\sigma & 0 \\ 0 & P_2/\sigma \end{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_k = -\frac{\gamma}{\sigma} V_k := -\psi V_k. \quad (27)$$

由文献[8]中的定义1及引理3可知闭环系统(19)为指数均方稳定. 证毕.

定理2 假定闭环系统(19)为指数均方稳定, 则存在实矩阵 $M \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $N \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 和正定矩阵 $P_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 使得下式成立:

$$K = VQ^{-1}P_{11}^{-1}QV^T M, L = P_2^{-1}N, \quad (28)$$

其中矩阵 V, Q, P_{11} 分别由假设1和引理1确定.

证 由引理1可知 $P_1 B_1 = B_1 P$, 将假设1代入, 可得

$$P_1 U^T \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} V^T = U^T \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} V^T P. \quad (29)$$

即

$$U^T \begin{bmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} V^T = U^T \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} V^T P. \quad (30)$$

可得

$$P = (V^T)^{-1} Q^{-1} P_{11} Q V^T. \quad (31)$$

由式(28)和式(31)可得

$$B_1 P = P_1 B_1, M = PK, N = P_2 L. \quad (32)$$

证毕.

4 量化调度(Quantization scheduling)

图1所示的网络控制系统中, 不失一般性, 假定所有传感器均采用时间驱动方式, 所有控制器均采用事件驱动, 即每个控制回路的传感器在各采样周期的开始时刻都会对物理对象进行采样, 通过量化器对采样数据进行量化(即对数据进行编码), 然后将量化后的数据通过总线发送到控制器. 控制器根据相应的解码规则还原接收到的采样数据, 控制器通过相应的控制算法来计算控制信号, 同时计算控制性能指标, 并提供给网络调度器. 执行器根据所接收到的控制信号来执行相应的动作.

4.1 性能指标(Performance index)

资源受限下的网络调度问题就是建立资源分配与控制性能的关系, 控制任务的合理调度可以实现资源的有效分配, 从而可以提高系统资源的利用率, 并得到最优的控制性能. 成本函数能反映对象的响应特性, 且检验控制性能. 一般采用对象响应与给定值的偏差以及减少偏差所消耗的能量来反映控制性能, 每个控制回路 i 的成本函数可表示为

$$J_i = \sum_{k=0}^t |e_i(k)| \Delta t. \quad (33)$$

偏差越小, 控制性能越好, 因此, 控制性能的最优化就是要使成本函数最小. 由图1可知, 反映控制性能的成本函数不但与各报文的传输时间相关, 还与调度器的信息传递时间间隔有关. 因此, 整体控制性能

的最优化的求解问题可以表示为

$$\min J_i = \sum_{i=1}^n J_i(T_i, T_s). \quad (34)$$

上式满足条件

$$\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{\bar{T}_i} = \sum_{t=1}^n \bar{U}_t \leq U_a, \quad (35)$$

其中: C_t 是报文 t 的传输时间, \bar{T}_i 是控制回路 i 的采样周期. \bar{U}_t 是报文 t 的平均利用率, U_a 是期望的总线利用率. 资源受限就是 U_a 的取值在所期望的范围内. U_a 取值太高, 可能造成系统出现短暂的无法调度. U_a 取值太低, 可能浪费有限资源, 一般取 U_a 接近1.

4.2 量化调度策略(Quantization scheduling strategy)

为了实现在资源受限情况下满足控制性能时尽可能的减少网络信息的传输量, 本文引入了实时量化调度的概念. 在多控制回路共享网络资源的情况下, 网络调度器的目的就是要通过调节采样数据的量化密度以及优先级分配来控制总线上的负载, 同时, 优化各控制回路的控制性能或系统的整体控制性能. 根据量化密度选择算法和优先级分配方法, 网络调度器分析系统信息, 制定相应的决策, 为各控制回路提供调度信息. 调度信息采用广播报文的方式发送. 各量化器将根据调度信息调整量化密度.

量化密度直接影响总线利用率, 量化密度越低, 量化误差越大, 系统解码后的信号与原采样信号的偏移越大, 总线利用率越低. 但相对而言, 减少了实际占用的总线带宽, 减少了总线上报文的冲突, 从而减小了报文的等待时延, 将避免较大的网络时延. 相反, 量化密度越高, 量化误差越小, 系统解码后的信号也更接近实际信号, 总线的利用率越高. 但是也将占用更多的带宽, 各节点的报文可能被延迟发送, 加大网络时延, 甚至产生丢包, 从而影响控制性能.

本文采用自适应量化密度调度算法: 当网络状态处于过载时, 通过将量化密度降低使得系统具有可调度性. 当网络状态处于低载时, 尽可能地提高量化密度, 以得到较好的控制性能. 网络调度器将计算各控制回路的量化密度并周期发送报文, 通知各量化节点进行有效地更新. 在具有量化器的反馈控制回路中, 要使一个控制系统的控制性能保持在所期望的范围内, 必须具有适当的量化密度. 所以, 如果控制器的规律不变化, 量化密度需要保持在 $[\delta_{\min}, \delta_{\max}]$ 范围内. 量化密度的调节通过改变对数量化器的参数 δ 来实现, 假设每次变化的间隔设为 ϕ , 于是第 i 个控制回路的量化密度调节规律可表示为

$$\delta_i(k) = \delta_i(k+1) + m\phi. \quad (36)$$

当 ϕ 太大, 将造成系统控制性能变化较大, 不易实现调度策略; ϕ 太小, 将造成调节的时间过长. ϕ 可根

据各回路的实际物理特性进行选择, 它们将直接影响控制性能和系统调度的动态特性. 在调度过程中 m 是可变的, 且各控制回路不尽相同. 如果系统不可调度, 表明网络处于过载状态, 则需要降低量化密度, m 取正数, 使得系统具有可调度性; 然后, 根据控制性能 J 最小原则, 调节各控制回路的量化密度, 如果系统是可调度的, 表明网络处于低载状态, m 可以取负数, 尽可能地提高量化密度, 以使控制回路具有最优的性能, 从而进行有效地分配资源.

5 仿真分析(Simulation analysis)

本仿真方案基于图1所示模型. 考虑由3个独立控制回路组成的网络控制系统, 控制对象均采用直流电机模型

$$G(s) = \frac{1000}{s(s+1)}. \quad (37)$$

使用MATLAB的Truetime1.5仿真平台, 控制器节点的算法采用PID控制算法, 控制网络类型选用CSMA/AMP(CAN)总线, CAN总线通讯波特率设为50kbps. 以下仿真实验均固定采样周期10ms. 本仿真实验的目的就是研究增加网络负载竞争受限资源时给原本运行良好的系统所带来的影响, 以及在加入量化调度后的改善情况, 验证所提出调度策略的有效性.

实验1 未采用调度算法.

本文采用具有良好控制性能的两个控制回路的系统, 然后在其中增加一个优先级最低的回路3, 3个回路的控制输出参考图2. 可以看出, 回路1和回路2的优先级较高, 更容易获得网络资源, 其控制性能也比较好; 但回路3由于报文优先级较低, 数据发送需要等待, 产生了丢包现象, 使得控制性能下降, 已经不能满足控制要求.

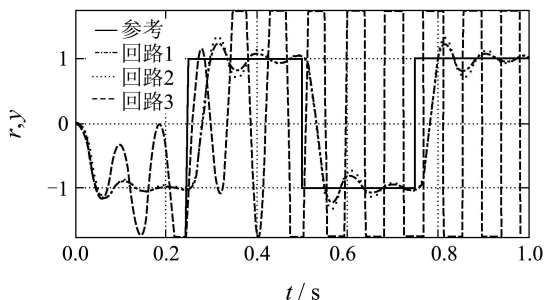


图2 调度前3个控制回路的控制输出响应

Fig. 2 Output of 3 control loops without scheduling

实验2 采用量化调度算法.

采用量化调度算法, 其中各回路量化器的参数分别为: $\delta_1 = 0.8, \delta_2 = 0.7, \delta_3 = 0.5$, 3个回路的控制输出参考图3. 虽说3个控制回路的控制效果不尽相同, 但各控制系统性能得到了优化. 特别是回路3的控制性能得到明显的优化. 也就是说, 通过调度减少

了各报文冲突的概率, 不会产生较大的报文的响应时间, 报文的传输率得到了较大改善.

实验3 调节量化密度.

本实验还是采用量化调度算法, 但修改各控制回路的量化器参数, 其中各回路量化器的参数分别为: $\delta_1 = 0.4, \delta_2 = 0.6, \delta_3 = 0.2$, 3个回路的控制输出参考图4. 从图4可以看出, 3个控制回路的控制效果有所改善, 但效果不是很明显了. 本实验从另一方面也说明通过改变量化密度, 可以对系统的控制性能施加影响, 进而可以实现对网络的调度.

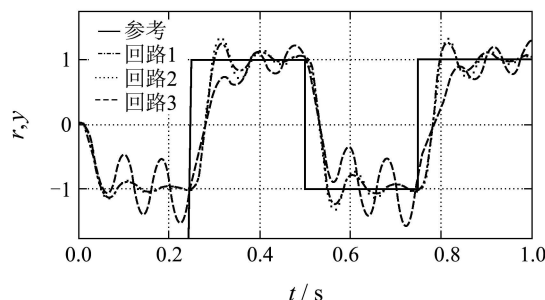


图3 调度后3个控制回路的控制输出响应

Fig. 3 Output of 3 control loops with scheduling

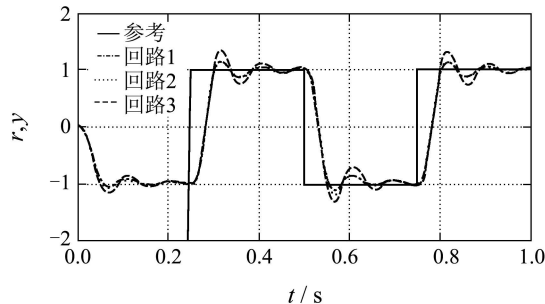


图4 修改量化密度后3个控制回路的控制输出响应

Fig. 4 Output of 3 control loops with adjustable quantization density scheduling

6 结论(Conclusion)

根据所研究的具有采样量化和Bernoulli随机丢包特征的多回路网络控制系统, 提出了通过改变动态量化密度对带宽受限下的多控制回路的网络控制系统进行有效调度的策略. 仿真结果表明, 本文所提出的量化调度策略能在有限的网络带宽资源下, 有效地对资源进行分配和利用, 并实现对多控制回路系统的性能最优化.

参考文献(References):

[1] GIL C F, GONZALEZ C F, FRANCK L. Extending vehicular CAN fieldbuses with delay-tolerant networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(9): 3307 – 3314.
 [2] TATIKONDA S, MITTER S. Control under communication constraints[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(7): 1056 – 1068.

- [3] CAVALIERI S. Meeting real-time constraints in CAN[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 1(2): 124 – 135.
- [4] 鲁仁全, 魏强, 薛安克. 基于线性量化的网络控制系统状态观测器设计(工学版)[J]. *浙江大学学报*, 2010, 44(7): 1400 – 1405.
(LU Renquan, WEI Qiang, XUE Anke. State estimation of network control system based on linear quantization[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2010, 44(7): 1400 – 1405.)
- [5] FU M Y. Quantization for feedback control and estimation[C] // *Proceedings of 27th Chinese Control Conference*. Kunming, China: IEEE, 2008: 751 – 756.
- [6] FU M Y, DE SOUZA C E. State estimation using quantized measurements[J]. *The International Federation of Automatic Control*, 2008, 17(1): 12492 – 12497.
- [7] LU R Q, XU Y, XUE A K. H_∞ filtering for singular systems with communication delays[J]. *Signal Processing*, 2009, 90(12): 1240 – 1248.
- [8] WANG Z D, YANG F W. Robust H_∞ control for networked systems with random packet losses[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics*, 2007, 37(4): 916 – 924.
- [9] LIU Y G, XU B G. Optimal filters with multiple packet losses and its application in wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2010, 10(4): 3330 – 3350.
- [10] SMITH S C, SEILER P. Estimation with lossy measurements: jump estimators for jump systems[J]. *The International Federation of Automatic Control*, 2003, 28(12): 2163 – 2171.
- [11] LIU G Y, XU B G. A real-time scheduling scheme of quantized control systems under bandwidth constraints[C] // *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Jinan, China: IEEE, 2010: 2334 – 2338.
- [12] GRAVAGNE I A, DAVIS J M. Bandwidth reduction for controller area networks using adaptive sampling[C] // *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New Orleans, LA: IEEE, 2004: 5251 – 5255.
- [13] NESIC D, LIBERZON D. A unified framework for design and analysis of networked and quantized control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(4): 732 – 747.

作者简介:

匡付华 (1974—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为网络化控制系统, E-mail: kuangfuhua@163.com;

胥布工 (1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为网络化控制系统等, E-mail: bgxu@scut.edu.cn;

刘贵云 (1983—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为网络化控制系统, E-mail: guiyun.liu@mail.scut.edu.cn.