基于网络 QoS 的控制系统协同设计方法研究

邵奇可 [1] 俞 立 [1] 欧林林 [1] 张 端 [1]

摘 要 针对网络环境下控制系统的协同设计问题展开研究. 首先应用工业网络特性建立了依赖于网络参数和控制参数的网络服务质量模型, 并且在此基础上分析了网络性能与控制性能的强耦合关系. 进而, 提出给定控制系统性能指标和网络资源受限条件下的控制参数和网络参数的联合优化设计方法. 最后通过实验证明本文方法的有效性.

关键词 网络控制系统, 协同设计, 网络服务质量, 优化

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.01356

Co-design Methodology for Network-based Control Systems Based on QoS

SHAO Qi-Ke[1] YU Li[1] OU Lin-Lin[1] ZHANG Duan[1]

Abstract The co-design method of networked control systems (NCS) is studied in this paper. First, a networked quality of service (QoS) model dependent on both controlling and communication parameters is established by using the industrial network characteristics. Furthermore, based on this, the strong coupling relation between the network performance and the control performance is analyzed. Then, under the given control performance and network resource-constrained conditions, an optimal co-design method for determining the control and communication parameters is proposed in detail. Finally, the experimental results show the validity of the proposed method.

Key words Networked control system (NCS), co-design, quality of service (QoS), optimization

目前, 网络控制系统 (Networked control systems, NCS) 的研究工作所包含的内容范围非常广, 从其探讨问题的角度不同, 可分三个方面: 从控制理论出发, 从网络技术出发或将这两方面综合起来进行协同设计. 控制与调度的协同设计是优化系统整体资源的一个有效途径, 其主要思想就是利用调度理论的成果把共享资源的有效调度和控制器设计结合起来进行网络与控制的协同设计. 这种设计方法对于提高网络控制性能而言是非常重要的[1].

随着 NCS 研究的深入, 兼顾控制与调度的集成设计策略越来越受到人们的关注. 如 Luo 等[2] 提出用绝对误差积分 (Integral of absolute error, IAE) 指标来制定 CPU 任务优先级的动态分配规则, 并以 TrueTime 作为仿真工具说明协同设计的必要性. Seto 等[3] 提出控制器的设计方法和实时系统及调度之间的协同设计方法, 并从控制性能角度出发, 讨论当采样周期的期望值和有限共享 CPU 资源约束条件下

收稿日期 2009-01-12 录用日期 2010-03-17
Manuscript received January 12, 2009; accepted March 17, 2010
国家自然科学基金 (60704021, 60604015), 浙江省教育厅科研项目 (Y200803505) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60704021, 60604015) and Scientific Research Fund of Zhejiang Provincial Education Department (Y200803505)
1. 浙江工业大学信息学院 杭州 310032
1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032

如何获得最优值的问题, 但这相当于不存在网络情况下的协同设计, 没有考虑网络调度问题. Walsh 等[4] 在网络应用层上提出适用于 NCS 的 MEF-TOD 协议, 具有误差绝对值最大的节点赢得传送权限, 没有赢得传送权限的节点, 则应该丢弃该节点信息, 若用此传送协议则有可能存在指令不能传达的问题. 彭晨等[5] 给出了网络控制器与网络的协作交互设计方法, 考虑了网络延时对系统性能的影响. 不难发现到目前为止对该问题的研究还不够深入, 主要存在以下几个问题: 1) 仅给出控制器的协同设计方法, 对于整个控制系统的协同设计鲜有文献报道; 2) 服务质量 (Quality of service, QoS) 对控制系统性能的影响缺乏定量描述; 3) 缺少控制系统参数对网络 QoS 影响的定量分析; 4) 未给出给定控制系统性能条件下的网络参数的设计方法.

为此, 本文针对网络环境下的控制系统的协同设计问题展开研究. 首先通过实验分析了网络性能与控制性能的强耦合关系, 并在此基础上结合实时数据传输的网络 QoS 模型, 给出给定系统性能指标和网络资源约束条件下的控制参数和网络参数的联合优化设计方法. 最后, 通过实验验证本文方法的有效性.

1　问题描述

网络环境下, 联合控制参数和网络参数的控制系统可描述为如下通用形式:

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}(t) &= \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{p}_{x(t)}, \eta(\text{QoS}))\\ \boldsymbol{x}(t) &= \boldsymbol{\varphi}(t), \quad t \in [-d, 0]\\ \eta(\text{QoS})) &= \Gamma(\boldsymbol{p}_{x(t)}, p_{n(t)})\end{aligned} \tag{1}$$

其中, $\boldsymbol{x}(t) \in \mathbf{R}^n$, $\boldsymbol{u}(t) \in \mathbf{R}^m$ 分别为状态矢量和控制输入矢量. $\boldsymbol{p}_{x(t)} \in \mathbf{R}^r$ 为远程控制对象参数. $\eta(\text{QoS})$ 为网络服务质量相关参数. $\boldsymbol{f} \in \mathbf{R}^n$ 为网络系统转换函数. d 为网络系统延时, $\varphi(t)$ 为系统初始状态函数.

进一步, 如果系统的传感器为时间驱动, 控制器和执行器为事件驱动, 数据单包传输且系统状态完全可测, 状态反馈控制器输出 $\boldsymbol{u}(t)$ 通过零阶保持器实现, 经离散化, 式 (1) 可描述为[5]

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(k), K\boldsymbol{x}(k-\tau_{i_k}), \boldsymbol{p}_{x(k)}, \eta(\text{QoS})) \tag{2}$$

其中, i_k, $k = 1, 2, \cdots$ 为整数且 $\{i_1, i_2, \cdots\} \subset \{1, 2, \cdots\}$, τ_k 为网络延时. 给定正定矩阵 R_1 和 R_2, 考虑下列性能函数:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k) R_1 \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k) R_2 \boldsymbol{u}(k)] \tag{3}$$

本文的主要工作: 1) 在所建立的联合网络参数和控制器参数的系统广义模型 (2) 的基础上, 给出给定性能指标 (3) 下的控制系统 (控制参数和网络参数) 的联合优化设计方法; 2) 给出给定系统性能指标 (3) 和特定网络 QoS 性能 $\eta(\text{QoS})$ 下的网络控制器的设计方法; 3) 通过数值仿真和实验验证本文设计方法的有效性.

2　网络参数与控制系统参数联合模型

已有研究表明传输过程中数据包的网络诱导时延主要表现在传输过程中数据包在路由器 (交换机) 的缓冲队列上的等待时延[6]. 如果网络可调度并且系统是点对点传输并且数据包在路由过程中未发生数据丢包现象, 则工控网络上点对点实时数据单包传输下, 网络的服务质量与控制系统的参数满足下式:

$$\sum_{i=1}^{n+1} P_i + \int_0^{\sum_{i=1}^{n+1} T_i} \zeta(t)\mathrm{d}t = \int_0^{\sum_{i=1}^{n+1} T_i + \tau_i} C(t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

其中, T_i 为系统的采样周期, P_i 为数据包大小, $C(t)$ 为网络带宽, τ_i 为网络延时, $\zeta(t)$ 为非实时数据的带宽.

更进一步, 令 $\vartheta(t) = \int_0^{\sum_{i=1}^{n+1} T_i} \zeta(t)\mathrm{d}t$ 在 $[0, kT]$, $k = 1, 2, \cdots, n$ 上连续, 如果存在非实时数据的传输带宽 $\vartheta(t)$ 满足:

$$\left\| \frac{\vartheta(t)}{k+1} \right\| < T\tilde{C} - P \tag{5}$$

则网络时延小于一个采样周期, 并且 τ_k 满足

$$\tau_k = \frac{[(k+1)P + \vartheta(t_k)]}{\tilde{C}} - (k+1)T \tag{6}$$

其中, T 为采样周期, P 为数据包大小, $\tilde{C}$ 为网络的输出带宽.

不考虑网络的影响, 则被控对象可描述为

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}(t) &= A\boldsymbol{x}(t) + B\boldsymbol{u}(t)\\ \boldsymbol{y}(t) &= C\boldsymbol{x}(t)\end{aligned} \tag{7}$$

其中, $\boldsymbol{x}(t) \in \mathbf{R}^n$, $\boldsymbol{u}(t) \in \mathbf{R}^r$ 和 $\boldsymbol{y}(t) \in \mathbf{R}^m$ 分别表示被控对象的状态, 控制输入和输出; A, B, C 是具有相应维数的常矩阵.

假设. 1) 传感器为时钟驱动, 控制器、执行器为事件驱动; 2) 控制器节点与传感器节点的时钟完全同步; 3) 非实时数据传输带宽满足式 (6). 那么系统 (7) 的网络服务质量与控制系统的联合模型可进一步表示为

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \Phi\boldsymbol{x}(k) + (\Gamma_0 + DF_kE_0)\boldsymbol{u}(k) + (\Gamma_1 + DF_kE_1)\boldsymbol{u}(k-1) \tag{8}$$

其中, $\Phi = \mathrm{e}^{AT}$, $\Gamma_0 = \int_0^{\frac{2T\tilde{C}-P}{\tilde{C}}} \mathrm{e}^{As}\mathrm{d}s$, $D = \mathrm{e}^{A\frac{2T\tilde{C}-P}{\tilde{C}}}$, $F_k = \int_0^{-\frac{k(P-T\tilde{C})+\vartheta(t_k)}{\tilde{C}}} \mathrm{e}^{As}\mathrm{d}s$, $E_0 = B$, $E_1 = -B$, $\Gamma_1 = \mathrm{e}^{A\frac{2T\tilde{C}-P}{\tilde{C}}} \int_0^{\frac{2T\tilde{C}-P}{\tilde{C}}} \mathrm{e}^{As}\mathrm{d}sB$.

进一步, 对系统 (7) 引入如下控制律: $\boldsymbol{u}(k) = K\boldsymbol{x}(k)$, 并且定义增广状态向量 $\boldsymbol{z}(\boldsymbol{k}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k) & \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-1) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$, 则理想网络服务质量下闭环 NCS 的模型式 (2) 可进一步表示为

$$\boldsymbol{z}(\boldsymbol{k}+1) = (\tilde{A} + \tilde{B}\tilde{K} + \tilde{D}\tilde{F}\tilde{E}\tilde{K})\boldsymbol{z}(\boldsymbol{k}) \tag{9}$$

其中, $\tilde{A} = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ I & 0 \end{bmatrix}$, $\tilde{B} = \begin{bmatrix} \Gamma_0 & \Gamma_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\tilde{E} = \begin{bmatrix} E_0 & E_1 \end{bmatrix}$ $\tilde{D} = \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix}$, $\tilde{F} = F_k$, $\tilde{K} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix}$, 相应的性能函数为式 (3).

3　网络性能与控制系统性能的强耦合性分析

NCS 的设计本质上是一个基于被控对象和网络性能指标约束的全局多目标优化问题. 在资源受限的 NCS 中, 控制性能和网络服务质量是一对矛盾体, 这种多目标优化问题将使 NCS 的控制性能和网络服务质量之间不可避免地存在折

衷的关系. 一方面从网络的角度看, 影响系统性能的是网络的服务质量, 其最终体现在传输网络的延时对控制系统性能的影响. 另一方面, 从控制的角度看, 系统的性能 (如稳定性) 却与网络无关, 因为系统性能的分析是基于被控对象模型 (9) 的, 即已经把网络的影响因素反映在被控对象的模型上. 虽然模型中的网络延时与实际系统的延时有一定的误差, 会导致对象的模型失配, 但是如果考虑到系统的鲁棒性, 则系统性能还是满足设计要求的. 然而从工控网络的实时数据网络服务质量模型 (4) 可以发现, 网络的服务质量与控制系统的相关参数 (采样周期、数据包大小) 又有着密切的联系.

在校园网上利用远程控制系统[7] 分别对不同控制参数下的网络 QoS 性能进行实验. 实验结果如表 1 所示. 不难发现, 网络的服务质量会表现出动态性和不确定性. 这种不确定性, 如果在设计过程中充分考虑到系统的鲁棒性, 那么系统性能还是满足设计要求的, 但是这样就会引入更大的保守性. 因此, 有必要在控制系统的设计过程中, 联合网络参数进行协同优化设计.

表 1 不同控制参数下的网络实验结果

Table 1 The experimental results under different control parameter values

T (s)	$P(k)$	$\tilde{C}$ (kps)	$\tau_k^{\max}$ (ms)	$\tau_k^{\min}$ (ms)	$\bar{\tau}$ (ms)
0.1	5	6	11.5	1.2	2.5
0.3	5	6	6.3	0.8	1.9
0.5	5	6	7.2	0.9	1.9
0.5	5	10	4.8	0.4	0.9
0.5	5	30	3.4	0.1	0.7

4 网络与控制协同优化设计

对于一个资源约束的网络控制系统而言, 在改善系统控制性能的前提下尽可能节省网络资源是分析和设计的一个关键问题. 考虑到网络服务质量与控制性能是一对矛盾体. 如果能够以最小的网络资源代价来满足控制系统的性能要求, 并且当网络服务质量在一定范围内摄动的时候, 不仅可以使系统渐近稳定, 而且还能确保系统性能不大于某个上界, 这样不仅使控制系统的性能得到了满足, 而且网络的有限资源也得到了最大的利用. 因此, 资源约束的网络控制系统的设计实质上是一个网络性能与控制性能多个约束集的多目标联合优化问题. 为此, 本节给出联合网络参数的控制器协同优化设计过程.

为了说明网络控制器与网络参数协同设计过程, 从以下两方面考虑: 一是确定网络 QoS 下的网络控制器的设计; 二是控制器设计不满足给定性能指标时, 改变网络 QoS 的协同设计. 在性能指标 (3) 的约束下, 如何设计控制器的反馈增益和相应控制系统参数是这部分将要阐述的主要问题.

4.1 基于 QoS 的网络保性能控制器的设计

网络控制器设计的一般过程是首先假设网络 QoS 是确定的, 进而把网络对系统性能的影响约束在被控对象的模型上进行控制器的设计. 考虑到模型 (8) 中与网络相关的参数是 τ_k, 如考虑系统的不确定性和系统的性能, 通过适当地放大由网络服务质量引起的网络传输时延 (最大时延或者平均时延), 那么控制器的设计问题就可以转化为一个不确定离散时滞系统的保性能控制器设计问题[8]. 显然这样的设计会带有较大的保守性. 可以通过在线测量网络 QoS 对控制器输出增益进行动态调整来改善这种保守性[7], 类似的方法还有文献 [9−10].

考虑到模型 (8), 如果选取状态反馈控制器 $\boldsymbol{u}(k) = \alpha K\boldsymbol{x}(k)$, 其中 α 为控制器的输出增益. 则闭环系统可进一步表示为:

$$\boldsymbol{x}(k+1) = [\Phi + \Gamma_0(\tau_k)\alpha K]\boldsymbol{x}(k) + \Gamma_1(\tau_k)\alpha K\boldsymbol{x}(k-1) \quad (10)$$

根据给定的系统性能函数 (3), 网络环境下系统二次保性能控制律存在条件满足定理 1.

定理 1. 系统 (8) 存在二次保性能控制律当且仅当存在对称正定矩阵 P, Q, 使得以下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} -X+S & 0 & \Theta_1 & X & V^{\mathrm{T}} \\ * & -S & V^{\mathrm{T}}\Gamma_1^{\mathrm{T}}(\tau_k) & 0 & 0 \\ * & * & -X & 0 & 0 \\ * & * & * & -R_1^{-1} & 0 \\ * & * & * & * & -R_2^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

成立. 其中, $\Theta_1 = X\Phi^{\mathrm{T}} + V^{\mathrm{T}}\Gamma_0^{\mathrm{T}}(\tau_k)$, $X = P^{-1}$, $S = XQX$, $V = \alpha KX$. 进而, 当矩阵不等式 (11) 有解, V 和 $X > 0$ 时, $\boldsymbol{u}(k) = VX^{-1}\boldsymbol{x}(k)$ 是系统 (8) 的一个非理性网络服务质量下的二次保性能控制律, 相应的系统性能指标上界是 $J^* \le \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0)P\boldsymbol{x}(0) + \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(-1)Q\boldsymbol{x}(-1)$.

证明. 选取如下 Lyapunov 函数: $V(k) = \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)P\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-1)Q\boldsymbol{x}(k-1)$

定义 $\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{k}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(k) \\ \boldsymbol{x}(k-1) \end{bmatrix}$, 则对 $V(k)$ 沿系统 (10) 的运动轨迹求一阶前向差分得

$$\begin{aligned} \Delta V(k) = {} & \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)P\boldsymbol{x}(k+1) + \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)Q\boldsymbol{x}(k) - \\ & \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)P\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-1)Q\boldsymbol{x}(k-1) + \\ & \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)(R_1 + \alpha^2 K^{\mathrm{T}}R_2K)\boldsymbol{x}(k) - \\ & [\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)R_1\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k)R_2\boldsymbol{u}(k)] = \\ & \boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{k}) \begin{bmatrix} (\Phi + \Gamma_0(\tau_k)\alpha K)^{\mathrm{T}} \\ (\Gamma_1(\tau(k))\alpha K)^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} P \times \\ & \begin{bmatrix} \Phi + \Gamma_0(\tau_k)\alpha K & \Gamma_1(\tau(k))\alpha K \end{bmatrix} \boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{k}) + \\ & \boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{k}) \begin{bmatrix} \Xi & 0 \\ 0 & -Q \end{bmatrix} \boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{k}) - \\ & [\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)R_1\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k)R_2\boldsymbol{u}(k)] \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\Xi = -P + Q + R_1 + \alpha^2 K^{\mathrm{T}}R_2K$, 则由式 (12) 可得

$$\boldsymbol{\Delta V}(k) \le -[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)R_1\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k)R_2\boldsymbol{u}(k)] \quad (13)$$

对式 (13) 两边从 $k = 0$ 到 $k = +\infty$ 求和, 可得

$$J \le V(0) = \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0)P\boldsymbol{x}(0) + \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(-1)Q\boldsymbol{x}(-1) \quad (14)$$

由 Schur 补引理, 式 (12) 小于零等价于

$$\begin{bmatrix} \Xi & 0 & (\Phi + \Gamma_0(\tau(k))\alpha K)^{\mathrm{T}} \\ 0 & -Q & \Gamma_1(\tau(k))\alpha K)^{\mathrm{T}} \\ * & * & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

令 $X = P^{-1}$, $S = XQX$, $V = \alpha KX$, 则对式 (15) 两边分别左乘和右乘 $\mathrm{diag}\{X, X, I\}$, 并利用 Schur 补可得式 (11). 因此, 定理 1 成立. □

注 1. 以上二次保性能控制器的设计是基于模型 (10) 的, 网络因素已经体现在模型的 τ_k 上, 但是由于 τ_k 是不确定的, 因此这样的保性能控制器是一组控制器, 即随着网络服务质量的变化, 控制器的增益 α 要进行动态调整.

4.2 控制系统参数和网络参数的联合优化设计

从第 4.1 节不难看出, 这些方法在处理过程中都是把网络对系统性能的影响约束在被控对象的模型上, 忽略了控制系统参数对网络的影响. 然而网络的 QoS 与系统的采样周期, 数据包大小和网络带宽与网络的 QoS 有密切的联系. 为了方便讨论, 假设实时数据传输的网络服务质量与控制器参数满足以下近似关系:

$$J(T_i, P_i, C) = \alpha_i P_i + \frac{\beta_i}{T_i} + \frac{\chi_i}{C} \tag{16}$$

则在资源受限的具有 n 个控制回路的 NCS 中, 联合网络参数和控制参数的多目标优化问题可描述为

$$\min_{\frac{1}{P},T} J_1 = \sum_{i=1}^{n} \left(\alpha_i P_i + \frac{\beta_i}{T_i} + \frac{\chi_i}{C} \right) \tag{17}$$

$$\min_{\frac{1}{P},T} J_2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{T_i} \tag{18}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{P_i}{T_i} + \theta(t_i) \right] \le C \tag{19}$$

$$T_i^{\min} \le T_i \le T_i^{\max} \tag{20}$$

其中, $1/P = [1/P_1, \cdots, 1/P_n]^{\mathrm{T}}$, $T = [T_1, \cdots, T_n]^{\mathrm{T}}$. 式 (17) 描述联合控制参数的网络 QoS 的优化问题, 其中参数 α_1, β_1, χ_1 可通过实验进行参数估计. 式 (18) 描述了实时数据带宽消耗的优化问题, 其目标是在系统最优的情况下对带宽的需求量最少, 这样多余的有限资源可提供给非实时数据传输. 式 (19) 是对每个控制回路带宽分配所允许的变化范围, 即在确定采样周期上下界的前提下保证系统性能. 相应的控制回路的上下界参数可由资源约束条件以及最大允许延时界 (Maximum allowable delay bound, MADB) 的方法求出.

注 2. 以上多目标优化问题的求解, 可以通过将一些目标函数转化成约束条件而将其他的多目标函数组成单目标函数的形式 (如加权和方法、Pareto 方法等). 显然, 常规的数学规划方法很难对该优化问题进行求解, 可以选用一些带有启发式的优化算法.

4.3 网络与控制协同交互设计步骤

本文提出的资源约束下联合网络参数和控制参数的协同交互设计步骤如图 1 所示, 其协同优化设计主要分静态优化和动态优化二部分进行. 在动态设计过程中, 由于需要对网络可调度条件进行进一步的约束, 另外还需对资源约束条件下基于动态逻辑系统的集成调度和控制进行统一建模, 出于篇幅原因, 本文仅讨论静态优化设计, 至于动态优化及网络调度问题将另行讨论. 具体步骤如下:

步骤 1. 利用定理 1 设计相应的控制器, 使得所设计的控制器满足给定的性能指标.

步骤 2. 利用式 (4) 检验控制系统参数 (采样周期、数据包大小、输入及输出带宽) 是否满足网络性能约束, 若满足进行步骤 3, 否则转步骤 4.

步骤 3. 进行协同优化设计和网络参数优化.

步骤 4. 进一步检验是否满足网络可调度的约束条件式 (5), 如果满足, 则可以进行网络调度, 进入步骤 5, 否则转步骤 1, 重新选择网络结构或调整系统的性能指标.

步骤 5. 系统动态优化设计过程.

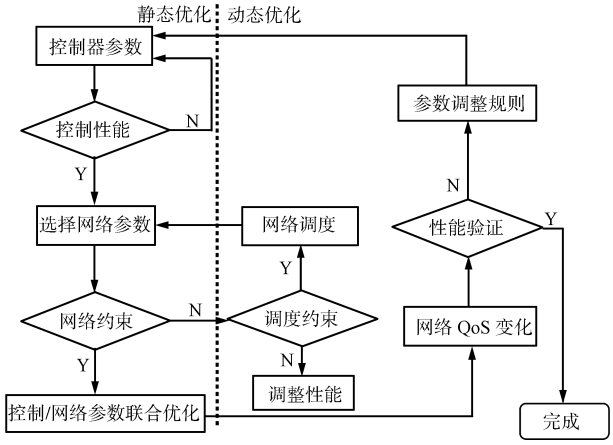

图 1　网络与控制协同交互设计步骤

Fig. 1　Communication and control co-design

5 数值仿真与实验

通过校园网利用自行开发的基于校园网的远程控制软件 (著作权登记号: 2004SR05080) 对实验室三阶水槽控制系统进行基于网络 QoS 的网络控制器的协同设计. 被控对象为二阶液位系统, 其传递函数如下:

$$G(s) = \frac{0.5s + 5}{0.5s^2 + 15s + 11} \tag{21}$$

首先在 Matlab 环境下进行系统仿真, 式 (20) 可转化为

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} -30 & -22 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{u}(t) \tag{22}$$

假设系统性能参数 $R_1 = R_2 = \begin{bmatrix} 1 & -0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 利用定理 1 设计网络环境下 NCS 保性能控制律, 并根据第 4.3 节的网络与控制协同交互设计步骤设计相应的网络参数和控制器参数, 整个仿真结果如表 2 所示.

表 2　不同网络参数和控制参数下的仿真结果

Table 2　The simulation results under different network and control parameter values

T (s)	$P(k)$	$\tilde{C}$ (kps)	$\vartheta(t)$ (kbps)	J^*	K
0.8	8	10	[0.1,8]	2.714	[0.0005,0.014]
0.5	4.8	10	[0.1,8]	3.4877	[0.0006,0.0169]

从仿真结果可以得到, 不同的网络参数控制系统的性能是不同的, 相应的, 相同的网络环境下如果选择不同的控制参数, 系统的性能也不同, 因此必须对系统进行联合网络与控制的协同优化设计. 根据仿真结果选择实验环境: $T = 0.5\,\mathrm{s}$, $P = 4.8\,\mathrm{k}$, $\tilde{C} = 10\,\mathrm{kbps}$, 利用文献 [7] 的网络环境下广义预测控制 (Generalied predictive control, GPC) 算法进行实验, 系统的网络时延见图 2, 运行结果如图 3 所示.

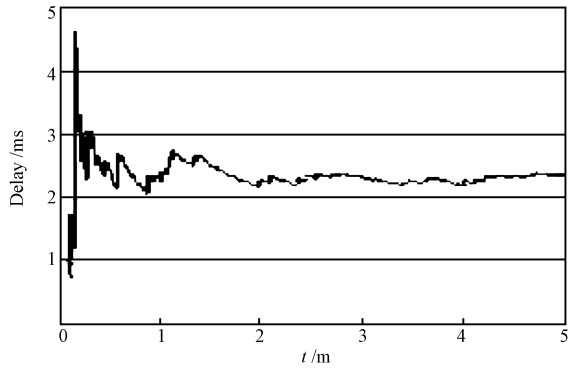

图 2 网络平均诱导时延

Fig. 2 Average of ethernet delay

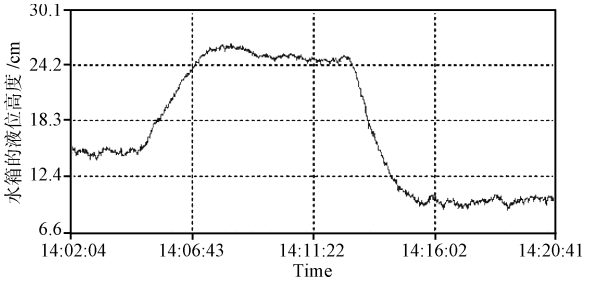

图 3 实验结果

Fig. 3 The experimental result

从实验结果看, 利用本文的基于网络 QoS 的协同设计方法所设计的控制器, 当网络 QoS 在一定范围内摄动的时候, 系统能够稳定. 但是控制品质会随着网络 QoS 的动态变化而变化, 因此有必要根据实测的网络 QoS 参数对控制器的输出增益进行动态调度[7−10].

6 小结

本文针对实验过程中发现的网络性能与控制性能的强耦合关系, 结合工控网络实时数据传输的网络 QoS 模型, 并在此基础上给出给定控制系统性能指标下的控制系统 (控制参数和网络参数) 的联合优化设计方法. 最后, 通过实验验证本文方法的有效性.

References

1 Branicky M S, Liberatore V, Phillips S M. Networked control system co-simulation for co-designed. In: Proceedings of the American Control Conference. Colorado, USA: IEEE, 2003. 3341−3346

2 Luo L H, Zhou C, Cai H, Chen Q W, Hu W L. Scheduling and control co-design in networked control system. In: Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, China: IEEE, 2004. 1381−1385

3 Seto D, Lehoczky J P, Sha L, Shin K G. On task schedule ability in real-time control systems. In: Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium. Washington D. C., USA: IEEE, 1996. 13−21

4 Walsh G C, Ye H, Bushnell L G. Stability analysis of networked control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, **10**(3): 438−446

5 Peng Chen, Yue Dong. Network-based optimal controller design based on QoS. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(2): 214−217
(彭晨, 岳东. 网络环境下基于网络 QoS 的网络控制器优化设计. 自动化学报, 2007, **33**(2): 214−217)

6 Kim H S, Shin S Y, Kwon W H. Feedback control for QoS of mixed traffic in communication networks. *Control Engineering Practice*, 2004, **12**(5): 527−536

7 Shao Qi-Ke, Yu Li, Zhang Gui-Jun. A remote control system based on QoS performance compensation. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(3): 309−314
(邵奇可, 俞立, 张贵军. 基于 QoS 性能补偿的远程控制系统. 自动化学报, 2007, **33**(3): 309−314)

8 Zhang W A, Yu L. Modelling and control of networked control systems with both network-induced delay and packet-dropout. *Automatica*, 2008, **44**(12): 3206−3210

9 Tipsuwan Y, Chow M Y. Gain scheduler middleware: a methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation part I: networked control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, **51**(6): 1218−1227

10 Tipsuwan Y, Chow M Y. On the gain scheduling for networked PI controller over IP network. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2004, **9**(3): 491−498

邵奇可 浙江工业大学信息学院讲师. 主要研究方向为网络控制和计算机网络. 本文通信作者. E-mail: sqk@zjut.edu.cn
(**SHAO Qi-Ke** Lecturer at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers networked control systems and computer network. Corresponding author of this paper.)

俞 立 浙江工业大学信息学院教授. 主要研究方向为鲁棒控制, 时滞系统和网络控制系统. E-mail: lyu@zjut.edu.cn
(**YU Li** Professor at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers robust control, time-delay systems, and networked control systems.)

欧林林 浙江工业大学信息学院副教授. 主要研究方向为鲁棒控制理论与应用, 过程控制技术和网络控制系统.
E-mail: linlinou@zjut.edu.cn
(**OU Lin-Lin** Associate professor at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers robust control theory and applications, process control, and networked control systems.)

张 端 浙江工业大学信息学院副教授. 主要研究方向为非线性控制和网络控制系统. E-mail: dzhang@zjut.edu.cn
(**ZHANG Duan** Associate professor at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers non-linear control and networked control systems.)