

网络环境下基于网络 QoS 的网络控制器优化设计

彭晨¹ 岳东¹

摘要 在网络控制中, 基于网络服务质量 (Quality of services, QoS) 的网络控制器的优化问题是网络控制研究中一个非常重要的问题, 但到目前为止该问题的研究还不够深入. 本文首先给出了网络环境下控制器与网络调度协作过程模型, 然后在此模型基础上提出了控制器设计及网络特性相关的综合性能指标, 接着以优化此指标为目的, 利用离散 LQR (Linear quadratic regulator) 方法完成网络控制器与网络的交互设计过程. 仿真结果说明了协作设计过程的有效性.

关键词 网络控制, 协作设计, 优化, 时滞
中图分类号 TP13

Network-Based Optimal Controller Design Based on QoS

PENG Chen¹ YUE Dong¹

Abstract In NCSs (Networked control systems), the problem of optimal network controller design based on quality of services plays an important role. However, up to now, little work has been done in this field. A codesign model of network scheduling and controller design is presented in this paper, and a synthesis performance index is proposed to connect the controller design with the network characteristics. In order to optimize this index, the discrete linear quadratic regulator is utilized to finish the codesign of the network controller and network. Simulation results show that the proposed method is effective.

Key words Networked control systems, codesign, optimization, time delay

1 引言

网络控制性能的提高不仅依赖于控制算法的设计, 而且与共享的网络传输资源调度密切相关. 网络控制中的调度问题就是基于调度算法为每一个传输实体 (如传感器、控制器、执行器等) 分配传输次序, 调度算法实际上是决定信息传送次序的一系列规则集. 调度算法一般可分为两类: 一类是基于共享传输介质数据传输的非抢占调度; 第二类是基于共享 CPU 资源控制任务的抢占调度. 在网络控制系统 (Networked control systems, NCS) 中, 网络数据传输是非抢占的, 即在某一个时段, CPU 无法控制数据传输的暂停与否. 网络的加入使之不同于传统的点对点连接系统. 网络控制中网络服务质量 (Quality of services, QoS) 调度与控制器设计的协作问题鲜有文献报道, 但对提高网络控制性能而言, 这类协作却是非常重要的^[1].

近十几年来, 网络控制中的调度问题已经引起广大研究者的广泛研究兴趣, 并取得了一系列的成果^[2~7].

Zhang Wei 提出网络调度的概念, 并将 CPU 调度理论中的 RM(Rate monotonic) 调度方法扩展到网络控制领域^[2]. 同时, 该作者还应用单速率调度 RM 方法, 在单速率调度的有效性和网络控制系统的稳定性约束下提出采样周期的优化调度方法. 但这种方法只能应用于有优先权分配功能的网络如 CAN, DeviceNet 等, 且要求每个子控制系统的传输时延和最大允许时延已知. Luo 针对单 CPU 多节点的连接方式, 提出用 IAE(Integral absolute-value error) 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, 但是文章对协同设计的方法及网络调度与控制算法的交互设计没有提及^[4]. Seto 提出控制器的设计方法和实时系统及调度间的协同设计方法, 并从控制性能角度出发, 讨论当采样周期在期望值和有限共享 CPU 资源约束条件下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^[2]. 瑞典 Lund 工学院 Anton Cervin, Johan Eker 等人从 1999 年开始对此问题进行了一系列的研究, 并设计出 Matlab 环境下进行仿真的工具箱 Truetime^[6]. 2001 年, Walsh 在网络应用层上提出了适用于 NCS 的 MEF-TOD(Maximum-error-first Try-once-discard) 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并采用下一时刻的新信息^[8], 然而, 在一些网络中特别重要的信息, 如指令信息, 若用此传送协议则可能存在指令不能传达的问题. 本文将研究网络环境下基于网络服务质量 QoS 的网络控制器优化问题. 广义上的 QoS 包含网络诱导时延、丢包、错序等. 为简化分析, 本文仅将对系统性能影响较大的网络诱导时延作为主要考虑因素.

本文主要结构如下: 第二部分给出 NCS 描述方法; 第三部分提出网络环境下控制器与网络调度协作过程模型, 并给出与控制器设计及网络特性相关的综合性能指标; 第四部分以优化该性能指标为目的, 利用离散 LQR (Linear quadratic regulator) 方法设计反馈控制器, 完成基于网络 QoS 的优化控制器设计过程; 最后仿真及结论部分说明协作设计过程的有效性和需进一步研究的问题.

2 系统描述

在网络控制系统中, 假设被控对象是线性时不变连续系统, 可描述为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{x}(t) \in R^n$, $\mathbf{u}(t) \in R^m$ 分别是状态矢量和控制输入矢量, \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 是常数矩阵. 假设传感器是时钟驱动, 控制器和执行器是事件驱动且数据单包传送, 式 (1) 中通过零阶保持器实现的真实控制输入是分段连续函数. 此外, 在网络控制过程中考虑网络延迟和丢包影响后, 实际的网络控制系统可表示为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), t \in [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}) \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(t^+) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t), t \in \{i_k h + \tau_k, k = 1, 2, \dots\} \quad (4)$$

其中 h 为采样周期, \mathbf{K} 为网络控制器反馈增益, $i_k (k = 1, 2, \dots)$ 是一些整数, τ_k 是网络诱导延迟, 此值表示传感器从被控制对象采样时刻至控制器发送控制信号到执行器时刻间隔.

注 1. 式 (3) 中, $\{i_1, i_2, i_3, \dots\}$ 是 $\{0, 1, 2, \dots\}$ 的子集, 此外不需 $i_{k+1} > i_k$. 当 $i_{k+1} > i_k$ 时, 表示传输过程中没有

收稿日期 2006-3-29 收修改稿日期 2006-5-11
Received March 29, 2006; in revised form May 11, 2006
国家自然科学基金 (60474079), 江苏省自然科学基金 (BK2006573) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60474079), Natural Science Foundation of Jiangsu Province of P. R. China (BK2006573)
1. 南京师范大学电气与自动化工程学院 南京 210042
1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042
DOI: 10.1360/aas-007-0214

丢包现象; 当 $i_{k+1} < i_k$ 时, 表示包传送没有按采样时序发送, 后采样的信息可能经不同路由后先到达控制器。

注 2. 式 (3) 中并不要求 $\tau_k \leq h$, 也就是说这里的网络控制时延具有随机性、不确定性的特性, 表达网络 QoS 对网络控制效果的影响. 所以此 NCS 模型同时考虑了网络传输时延特征及网络丢包情况, 可作为 NCS 通用模型 [9,10].

为简化分析, 假设网络诱导时延 τ_k 小于采样周期 h , 即 $\tau_k \leq h$. 用采样周期 h 和时延 τ_k 离散化系统 (1) 和 (2) 可得

$$x((k+1)h) = \Phi x(kh) + \Gamma_0 u(kh) + \Gamma_1 u((k-1)h) \quad (5)$$

$$y(kh) = Cx(kh) \quad (6)$$

其中 h 为采样周期, τ_k 是网络诱导延迟, $\Phi = e^{Ah}$, $\Gamma_0 = \int_0^{h-\tau_k} e^{As} B ds$, $\Gamma_1 = \int_0^{\tau_k} e^{As} B ds$.

定义 $Z(kh) = x^T(kh), u^T((k-1)h)^T$ 作为增广矢量, 系统 (5) 和 (6) 可化为

$$Z((k+1)h) = \begin{bmatrix} e^{Ah} & \Gamma_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Z(kh) + \begin{bmatrix} \Gamma_0 \\ I \end{bmatrix} u(kh) \quad (7)$$

网络控制系统模型 (7) 与网络诱导时延相关, 而网络诱导时延是与网络类型相关的参数. 本文作如下假定: 网络协作过程中调节网络 QoS 主要指调节网络结构、类型等可得到不同的网络诱导时延.

注 3. 上述假设网络诱导时延小于采样周期, 在 Dim 等文中有类似假设 [11,12], 但其主要研究了不存在网络情况下使系统稳定的控制器设计, 在引入网络下能保证网络系统稳定的最大允许时延求解方法. 在网络诱导时延大于采样周期的网络控制系统建模及控制器设计问题, 式 (3) 和 (4) 描述方法适用, 详细描述可参考文献 [9,10].

3 NCS 中控制与调度的协作设计过程

当存在一系列通过网络连接的控制系統时, 网络调度成为网络控制中的一类重要问题. 若传输实体间没有协作, 则将有可能发生并发任务, 由于网络传输带宽限制和避免冲突机制, 一些传输节点将不得不延迟或取消传输任务, 这样导致一些实时传输节点被延迟且有可能大于最大允许时延 (Maximum allowable deadline bound, MADB) [11], 导致系统性能不稳定. 好的调度算法应该尽量弱化由于网络传输对控制性能带来的影响.

NCS 设计应是基于被控对象和网络性能指标约束下的全局目标优化. 网络与控制交互设计过程中应同时考虑控制和网络性能约束, 例如在允许最大延迟的稳定性约束及 RM 调度规则下的可调度性约束下, 可求出多对象的优化采样周期 [8]. 假设网络控制性能可通过如下函数来描述

$$J = \sum_{i=0}^N \omega_i J_i(\alpha, \beta) \quad (8)$$

其中 J 表示全局性能指标, J_i 表示第 i 个控制回路的性能指标, ω_i 表示权重系数, α, β 表示与性能指标相关的 (控制器与网络等) 设计参数和设计变量. 网络控制的协作问题可转化为在网络传输性能和控制性能约束下的优化问题, 可表述为

$$\min(J) = \min\left(\sum_{i=0}^N \omega_i J_i(\alpha, \beta)\right) \quad (9)$$

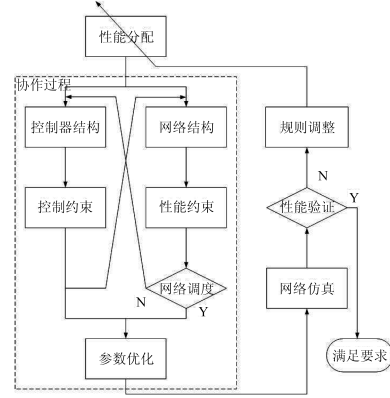


图 1 网络控制与调度交互协作设计过程
Fig. 1 Codesign of network and scheduling

网络与控制联合设计过程示例如图 1 所示。

联合设计过程如下: 根据控制性能要求分别对控制器和网络结构进行设计, 其中控制器的设计应满足稳定性指标、时域指标等约束, 网络结构要求满足网络有效带宽、网络时延等约束. 如在多任务环境下需进行网络调度. 在两者不满足情况下进行联合设计和参数优化过程, 优化结果通过实时网络仿真工具箱 Truetime 进行仿真, 根据仿真结果对要求的性能进行验证, 若满足性能要求退出协作过程; 若不满足性能要求, 重新进行规则调整 and 性能分配, 进行新一轮的协作过程, 直至满足需求性能为止。

4 基于 DLQR 的网络控制器优化协作设计

网络传输调度与控制器的协作问题有两个方面: 一方面是在满足一定的网络特征和服务质量的前提下, 为特定的被控对象设计合适的控制器, 并使该控制器满足一些控制性能指标; 另一方面, 若采用的控制器设计方法不能满足控制性能指标, 网络服务质量 QoS 可以作为一个参数加以设计. 在网络存在时变时延的情况下, 若能测量或预估该时延, 并根据时延特征, 设计出合理的控制器, 这样设计出来的能根据时变特性改变控制参数的控制器比仅仅根据最大时延设计出来的控制器应该具有更好的控制性能 [12]. 本文提出如下的性能指标

$$J(kh) = \text{sum } \mathbf{x}' Q \mathbf{x} + \mathbf{u}' R \mathbf{u} + 2 \mathbf{x}' N \mathbf{u} \quad (10)$$

作为衡量不同控制器的指标. 其中 Q, R 和 N 为给定的系统性能参数, \mathbf{x} 为状态矢量, \mathbf{u} 为控制矢量. 为说明网络控制器与网络协作的设计过程, 从以下两方面考虑: 一是确定网络 QoS 下的网络控制器的优化设计; 二是当确定网络 QoS 下控制器设计不满足给定性能指标时, 改变网络 QoS 的协作过程. 在指定性能指标 (10) 约束下, 确定网络 QoS 下的网络控制器的优化设计问题可转化为如下的优化问题

$$\begin{aligned} & \min(J(kh)) \\ & \text{subject to: (7), (10)} \end{aligned} \quad (11)$$

在网络增广模型 (7) 和性能指标 (10) 约束下的控制器优化设计问题 (11), 可通过如下定理求解.

定理 1. 对于选择的网络类型和给定的系统性能参数, 通过在线测量或预估网络诱导时延, 在满足网络诱导时延小于采样周期约束下, 运用 Matlab 中离散系统线性二次性设计方法

(Discrete linear quadratic regulator, DLQR) 设计反馈增益矩阵 K

$$[K, S, E] = \text{DLQR}(\tilde{A}, \tilde{B}, Q, R, N) \quad (12)$$

其中 E 为计算后的特征值, S 为 Riccati 方程 $(\tilde{A}'S\tilde{A} - S(\tilde{A}'S\tilde{A} + N)(R + \tilde{B}'S\tilde{B})(\tilde{B}'S\tilde{B} + N') + Q = 0)$ 的解, Q , R 和 N 为给定的系统性能参数, \tilde{A} , \tilde{B} 为 (7) 中对应的系统矩阵和控制矩阵. 当特征值 E 位于单位圆内时, 网络系统 (1) 和 (2) 稳定, 且状态反馈增益满足最小化性能指标 (10).

证明. 在满足网络诱导时延小于采样周期约束下, (4) 可转化为

$$Z(k+1) = \tilde{A}(\tau_k)Z(k) + \tilde{B}(\tau_k)u(k) \quad (13)$$

在性能指标 (10) 的约束下, 应用 Matlab 中离散系统线性二次性设计方法 DLQR, (12) 式可以完成基于网络系统离散模型 (7), 网络控制器的优化求解. 显然, 对于离散系统, 当系统特征值 E 位于单位圆内时, 系统稳定, 且设计的状态反馈增益使性能指标 (10) 最优. \square

显然, (4) 式是与网络性能相关的时变系统, 在交互设计过程中, 根据采样周期和系统延迟将连续方程离散化, 然后利用离散 DLQR 方法设计反馈增益. 如定理 1 设计的控制器不满足给定性能指标, 则需完成网络 QoS 与控制器设计的协作过程. 假定给定网络控制系统的性能指标上界为 γ , 若按下式设计的优化控制器性能指标 Π 不满足 $\Pi \leq \gamma$ 约束,

$$\begin{aligned} \Pi &= \min(J(kh)) \\ \text{subject to: } &(7), (10), \Pi \leq \gamma \end{aligned} \quad (14)$$

则据网络控制与调度交互协作设计过程, 在初始选择的网络不满足系统性能要求的情况下, 必须对网络进行重新设计. 这样网络与控制的交互设计过程可概括为如下步骤:

- 1) 确定初始网络状况及所设计的控制器性能指标 γ ;
- 2) 据定理 1 求取优化控制器反馈增益 K 及控制器性能指标 γ ;
- 3) 比较步骤 1) 中 $\min(J(kh))$ 与步骤 2) 中 γ ;
- 4) 若优化问题 (14) 不满足, 改变初始网络状况, 回到步骤 2);
- 5) 如优化问题 (14) 满足 $\Pi \leq \gamma$, 完成协作设计过程, 输出控制器参数与网络 QoS 需求.

5 数字仿真

在综合性能指标 (10) 中假设 $Q = I$, $R = I$, $N = 0$, 要求性能指标上界为 $\gamma = 2$. 设初始网络状况为 $\tau_k \leq 0.5\text{s}$.

考虑如下系统

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 1.1 & 0.8 \\ 0.4 & 1.2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix} u(t) \quad (15)$$

采样周期选择为 $h = 1\text{s}$.

- 1) 在网络时延 $\tau_k = 0.5\text{s}$ 时, 根据开环系统的增广矩阵表示方法 (7), 离散化的系统表达式为

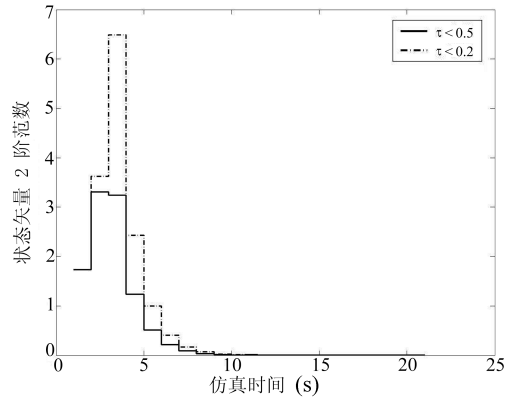


图 2 状态矢量 2 阶欧氏范数随时间变化曲线
Fig. 2 Varying of 2-norm of states with time

$$\begin{aligned} Z((k+1)h) &= \begin{bmatrix} 3.5148 & 2.6646 & 2.5832 \\ 1.3323 & 3.8478 & 4.4988 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} Z(kh) + \\ &\quad \begin{bmatrix} 1.1242 \\ 2.1612 \\ 1.0000 \end{bmatrix} u(kh) \end{aligned} \quad (16)$$

基于定理 1 设计的控制器增益 $K = [1.4332 \ 1.5667 \ 1.9932]$, 相应的闭环极点为 $0.4077, 0.0000, -0.0354$. 显然极点均在单位圆内, 系统稳定, 但性能指标 $\Pi = 3.4 > \gamma$, 不符合设计要求, 根据网络与控制联合设计过程及网络与控制的交互设计过程步骤 4), 需改变初始网络状况.

2) 改变初始网络状况 $\tau_k \leq 0.2\text{s}$, 采取与上述同样的方法可得 $K = [0.9117 \ 0.8645 \ 0.5825]$, 相应的闭环极点为 $-0.0432, 0.0000, 0.4128$. 显然基于定理 1 设计的控制器闭环极点均在单位圆内, 系统稳定. 优化控制器性能指标 $\Pi = 1.8$, 此时 $\Pi < \gamma$, 优化问题 (14) 中性能指标要求 $\Pi \leq \gamma$ 得以满足, 完成协作设计过程, 输出控制器参数与网络 QoS 需求.

假设状态变量初始值为 $[-1; 0; 1]$, 在网络时延分别为 $\tau_k \leq 0.5\text{s}$ 及 $\tau_k \leq 0.2\text{s}$ 时, 作为系统优化控制器设计依据, 状态矢量 2 阶欧氏范数随时间变化曲线如图 2 所示, 不同网络参数下性能指标 (10) 随时间变化曲线如图 3 所示, 虽然系统都能稳定, 但显然在 $\tau_k \leq 0.2\text{s}$ 时, 设计的优化控制器满足性能指标约束.

6 结论

在网络控制问题中, 控制与调度的协作问题主要是针对控制性能要求选择合适的信号传输网络和设计合适的控制器. 在网络选定, 有外界扰动情况下, 网络 QoS 是时变的. 若以不变的控制增益, 处理这种时变网络控制问题, 控制性能将变差. 所以根据网络 QoS 参数如传输时延, 将网络控制器设计与网络调度相结合, 是提高网络控制综合性能的有效措施. 基于本文的工作, 今后将要研究的问题是: 对多对象的网络控制器与网络 QoS 交互设计与调度, 网络量化与鲁棒控制器设计等.

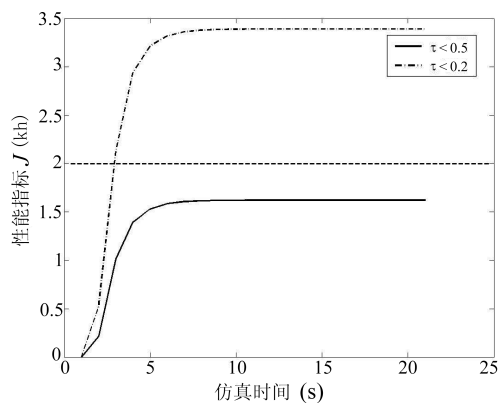


图3 不同 QoS 参数下性能指标变化

Fig. 3 Varying of performance index based on different parameter

References

- 1 Branicky Michael S, Liberatore Vincenzo, Phillips Atephen M. Networked control system co-simulation for co-design. In: Proceedings of the American Control Conference. Colorado, USA: IEEE Press, 2003. 3341~3346
- 2 Seto D, Lehoczky J P, Sha L, Shin K G. On task schedulability in real-time control systems. In: Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium. Los Alamitos, CA: IEEE Press, 1996. 13~21
- 3 Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays. *Automatica*, 1998, **34**(1): 57~64
- 4 Luo Li-Heng, Zhou Chuan, Cai Hua, Chen Qing-Wei, Hu Wei-Li. Scheduling and control co-design in networked control system. In: Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, P.R.China: IEEE Press, 2004, 1381~1385
- 5 Branicky Michael S, Phillips Stephen M, Zhang W. Scheduling and feedback co-design for networked control systems. In: Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, USA: IEEE Press, 2002. 1211~1217
- 6 Martin Andersson, Dan Henriksson, Anton Cervin. True-Time 1.3 Reference Manual[Online], available: <http://www.control.lth.se/~dan/truetime/>, June 2005
- 7 Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems. *IEEE Control System Magazine*, 2001, **21**(1): 84~99
- 8 Walsh G C, Ye Hong. Scheduling of networked control systems. *IEEE Control System Magazine*, 2001, **21**(1): 57~65
- 9 Peng Chen, Yue Dong. State feedback controller design of networked control systems with parameter uncertainty and state-delay. *Asian Journal of Control*, 2006, **8**(4): 385~392
- 10 Yue Dong, Han Qing-Long, Peng Chen. State feedback controller design of networked Control systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems - II*, 2004, **51**(11): 640~644
- 11 Kim D S, Lee Y S, Kwon W H, Park H S. Maximum allowable delay bounds of networked control systems. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**(11): 1301~1313
- 12 Hu Shou-Song, Zhu Qi-Xin. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay. *Automatica*, 2003, **39**(11): 1877~1884

彭晨 2002 年于中国矿业大学获工学博士, 现为南京师范大学电气与自动化工程学院副教授, 研究兴趣为网络控制系统, 鲁棒控制等. 本文通信作者. E-mail: pc@email.njnu.edu.cn

(Peng Chen Received his Ph.D. degree in Chinese University of Mining and Technology in 2002. Now he is an associate professor in the School of Electrical and Automation Engineering at Nanjing Normal University. His research interests include networked control system and robust control. Corresponding author of this paper.)

岳东 1995 年于华南理工大学获工学博士, 现为南京师范大学电气与自动化工程学院特聘教授, 研究兴趣为时滞系统, 网络控制系统, 鲁棒控制等. E-mail: medongy@njnu.edu.cn

(Yue Dong Received his Ph. D. degree in South China University of Technology in 1995. Now he is a professor in the School of Electrical and Automation Engineering at Nanjing Normal University. His research interests include time-delay system, networked control system, and robust control.)