

文章编号: 1001-0920(2004)04-0397-05

网络化控制系统中的抖动优化调度算法

白涛^{1,2}, 吴智铭¹, 杨根科¹

(1. 上海交通大学自动化系, 上海 200030; 2. 太原重型机械学院自动化系, 山西太原 030024)

摘要: 在令牌型总线网环境下, 提出折衷网络带宽资源占用和传输周期抖动的两步优化调度算法。在满足实时性要求的前提下, 通过确定网络化控制系统中各控制闭环节点的采样周期及其在最小倍周期时段内的数据传输序列, 在兼顾周期抖动对控制闭环动态性能影响的同时合理地调配了带宽资源, 使系统具有较高的网络资源利用率。

关键词: 网络化控制系统; 时延; 抖动; 死限

中图分类号: TP302.1 **文献标识码:** A

Optimal scheduling algorithm to reduce jitter in networked control systems

BAI Tao^{1,2}, WU Zhiming¹, YANG Genke¹

(1. Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Department of Automation, Taiyuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan 030024, China. Correspondent: BAI Tao, E-mail: zhaobait@sjtu.edu.cn)

Abstract: Two-step optimal scheduling algorithm for networked control systems (NCSs) on token-type fieldbus networks is proposed, which is a tradeoff between bandwidth occupancy and jitter minimization. Through determining the sampling period of each control loop and the corresponding transmission sequences on the real-time requirement in networked control systems, bandwidth resources are allocated properly and utilized efficiently within the allowable range of jitter effects on dynamic performance. The simulation results show the usage of jitter optimal method.

Key words: NCSs; delay; jitter; deadline

1 引言

与传统的点对点控制模式相比, 网络化的控制模式具有信息资源共享、连接大大减少、易于扩展、易于维护、高效、可靠和灵活等优点; 但同时也存在诸多问题, 网络有限的带宽资源和承载能力被多个控制闭环共享, 数据的传输只能通过复用的方式实现。因此存在网络传输时延和周期抖动等问题, 导致控制系统动态性能的下降甚至不稳定, 给控制系统的分析、设计带来了巨大的困难。如何合理调配有限

的带宽资源, 尽可能地降低网络对于控制系统的影响, 从而满足控制系统实时性的要求是网络化控制领域亟须解决的关键问题。

Walsh 等^[1]把网络对于被控系统的影响视为扰动, 借助 Lyapunov 稳定性定理分析地证明了在循环服务、TOD/MEF 等多种不同调度策略下 NCSs 的系统稳定性能, 仿真实验^[2]表明该研究结果是相当保守的。基于 RM 优先调度策略, Coutinho^[3]运用遗传算法研究了 CAN 型网下 NCSs 采样周期初相

收稿日期: 2003-03-17; 修回日期: 2003-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60074011; 60174009)。

作者简介: 白涛(1975—), 女(回族), 河北正定人, 讲师, 博士生, 从事网络化控制系统、系统仿真的研究; 吴智铭(1936—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事 CMS、混合动态系统、Petri 网的研究。

与周期抖动的优化调度算法 借助“窗口”概念, Hong^[4,5]提出了基于令牌网的多控制闭环NCSs的带宽配置和采样周期确定调度算法, 通过将各个控制闭环的采样周期调整为基准周期(最小周期)的 2^k ($k=0, 1, \dots$)倍实现了理想条件下的无周期抖动调度 这种方法虽然简单并有效地避免了周期抖动, 却是以过度占用带宽资源为代价的, 使得原本可以被网络服务的控制闭环(网络节点), 因其他网络节点过度占用资源而无法被网络服务; 另一方面在NCSs的控制闭环数量一定的条件下, 若使所有控制闭环都能够被网络服务, 必然需要更多的带宽资源, 从而提高了系统的运行费用 针对文献[4, 5]存在的问题, 本文提出在令牌网中折衷带宽资源占用和传输周期抖动的两步优化调度算法: 1) 在满足系统动态性能要求和网络资源可调度条件下确定NCSs中各个控制闭环的采样周期; 2) 进行基于周期抖动的数据传输序列优化调度, 确定各控制闭环的初相及其数据在最小倍周期内的发送时刻

2 NCSs 系统分析

NCSs的拓扑结构为总线型^[1], 假设其中有 M 个控制闭环, 每个控制闭环有传感器和控制器两个数据传输节点, 因此共有 $N=2M$ 个数据传输节点; 各控制闭环的传感器节点和控制器节点具有相同采样周期; 所有节点传输的数据具有相同的固定字长 L bits, 若网络介质的数据传输速率为 B bps, 则每个节点数据在网络介质中的传输将占时 $L=L/B$ s

2.1 令牌网的时延特征

令牌网采用循环方式对网络中的每一个节点提供服务, 因此数据需在发送节点的发送队列中排队等待, 直至该节点获得数据传输权(token)后发送队列中的数据才能被传输, 从而形成数据传输的网络时延 设 τ_1 为控制闭环 i 中的数据从传感器到控制器传输时所经历的时延, τ_2 为控制闭环 i 中的数据从控制器到执行器传输时所经历的时延(见图1). 由于token相继到达某一节点的时间间隔不一致, 尽管网络参数是确定的, 数据传输所经历的网络时延却是时变的

当控制闭环 i 中节点 m 在准备释放token前恰有一个数据到达该节点的发送队列, 则节点 m 立即传输该数据, 因此, 该数据将经历最小的时延, 即

$$\min \tau_m = L, m = 1, 2 \quad (1)$$

当控制闭环 i 中节点 m 刚刚释放token(转让传输权), 就有数据到达该节点的发送队列, 并且要经过token的多次循环后该节点才被允许服务, 则数

据将经历最大的时延, 即

$$\max \tau_m = n_i T_i + rL + N\sigma, m = 1, 2 \quad (2)$$

其中: T_i 是token完成一次循环所需的最大时间(基本周期), 取为NCSs中的最小采样周期; n_i 是token的循环次数; r 是网络在一次循环中可传输的最大数据个数; σ 是token的开销, 包括token处理时间、最大传输时延等

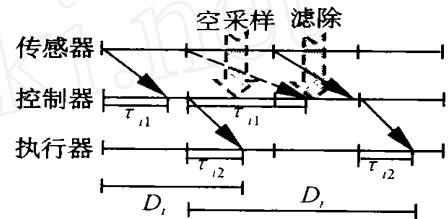


图1 控制闭环 i 的闭环时延

2.2 网络对控制闭环性能的影响

Ray和Halevi^[6]指出反馈控制系统的性能直接依赖于闭环时延(指数据从传感器节点被采样时刻起至执行器执行由该数据产生的操作指令时刻间所经历的时段, 见图1). 假设各节点间的采样偏差及其数据处理时间相对于采样周期也极其微小, 均可忽略不计. 传感器和控制器采用时间驱动策略同步工作, 执行器采用事件驱动策略工作, 因此闭环时延可表述为

$$D_i = [\tau_1/T_i]T_i + \tau_2 \quad (3)$$

网络时延是可变的, 因此当网络时延大于采样周期间隔时, 在控制器节点的某一采样周期内将会有多个采样数据到达, 此时仅是最新的数据被控制器使用, 其他数据将被丢弃, 造成数据滤除, 而在另外某个采样周期内有可能出现无采样数据到达的情况, 形成空采样(见图1). 数据滤除和空采样不仅会使系统性能下降, 而且会造成控制信号的失真, 产生高频噪声, 从而导致执行器无谓的损耗^[7]. 因此每个传感器节点的采样数据都必须在下一个数据采样前到达相应的控制器节点, 即各节点的死限为相应控制闭环的一个采样周期. 时变时延也使各节点难以实现等间隔的数据传输, 形成周期抖动, 从而影响系统的动态性能. 周期抖动可表述为

$$j_{i,k} = t_{Si,k} - (k^* T_i + \varphi) \quad (4)$$

其中: $j_{i,k}$ 表示节点 i 的第 k 个数据的抖动值; $t_{Si,k}$ 是该数据的实际传输时刻; φ 为初相位^[3].

设 $\phi(i=1, 2, \dots, M)$ 是控制闭环 i 的最大允许闭环时延(可借助控制理论中的系统稳定性判据确定), 则控制闭环应满足以下两个条件^[4]:

1) $\tau_m < T_i, m = 1, 2$, 从而消除数据滤除和空采样现象;

2) $D_i < \Phi$, 即闭环时延应小于其控制闭环的最大允许闭环时延, 从而确保系统的性能

τ_2 的时变性决定闭环时延 D_i 也是时变的 Ray 和 Halevi^[6] 指出, 简单地用 τ_2 的上确界 T_i 代替 τ_2 不能作为 NCSs 系统设计时的解, 若将时延 τ_2 替换为定长时延 $T_i + (\max \tau_2 - \min \tau_2)$, 则时变时延系统的稳定性要求仍可满足^[4], 且当条件 1) 满足时, 时延 τ_1 和 τ_2 可以合并^[7]. 于是, 闭环时延 D_i 可转化为定长时延

$$D_i = 2T_i + (\max \tau_2 - \min \tau_2). \quad (5)$$

3 NCSs 抖动优化调度算法

传统的令牌网带宽配置方法是在一个基本周期内为所有节点分配带宽, 使不同频率的周期数据具有相同的最大有界传输时延(见式(2), $n_i = 0$). 缺陷在于其为不同频率的周期数据分配相同的带宽资源, 使低频周期数据占据了多于需求的带宽资源, 造成带宽的浪费和较低的带宽利用率. 周期数据的多循环带宽配置($n_i > 0$) 是在满足 1) 和 2) 条件下, 按需分配带宽, 此时不同频率周期数据的最大传输时延不再是一个基本周期时间, 而是在各自所允许的时延范围内. 可以说这种策略是通过适当地加大低频周期数据的传输时延(也加大了周期抖动) 来获取较高的网络资源利用率

3.1 控制闭环采样周期的确定

在满足系统动态性能要求 1) 和 2) 的条件下, 确定 NCSs 中各控制闭环的采样周期并使其具有与基本周期的整倍数关系, 通过将带宽描述为一个基本周期内的最大窗口数 r ^[4], 建立 NCSs 的系统规模(节点数目)、数据传输强度(控制闭环采样周期) 与网络带宽资源占用之间的数学关系, 从而确定 NCSs 的可调度性条件

设 $T_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 是 NCSs 中 M 个控制闭环的采样周期, 且满足 $T_i \leq T_{i+1}, \forall i$

由于 token 循环的基本周期设为 NCSs 中的最小采样周期, 采样周期为 T_1 的数据必须在一个基本周期内完成(即 $n_1 = 0$), 以满足条件 1) 和 2). 令 $\Phi = \min(\Phi_i, i = 1, 2, \dots, M), D_1 = \Phi$, 可确定

$$T_1 = (\Phi + L) / 3 \quad (6)$$

由条件 1) 和 2) 知其他采样周期 T_i 应满足

$$T_i < \frac{\Phi - (n_i + 1)T_1 + L}{2} \quad (7)$$

假定 $T_i = k_i T_1 (k_i \geq 1), \forall i > 1$, 则

$$k_i = \left\lfloor \frac{\Phi - (n_i + 1)T_1 + L}{2T_1} \right\rfloor, \quad (8)$$

其中 $0 \leq n_i < k_i, n_i$ 的选取直接影响了控制闭环的最大时延界, 同时也反映了数据周期抖动的幅度, 这是系统设计时的关键参数, 直接反映了系统对周期抖动的限制, 也反映出系统对于带宽占有量的需求

在式(2) 满足条件 1) 时, 可确定

$$r = \left\lfloor \frac{(T_1 - N\sigma) / L}{((\Phi + L) / 3 - N\sigma) / L} \right\rfloor, \quad (9)$$

r 是在给定网络及系统参数条件下, 网络在一个基本周期内能够提供服务的最大数据传输数量. NCSs 中的 N 个节点将共享这 r 个窗口. 若 $r \geq N$, 则网络轻载, 可为每一个节点提供最大时延为 T_1 的数据传输服务; 当 $r < N$, 则须采取一定的调度策略. 若在任意一个 T_1 周期内有不超过 r 个数据被传输, 则在 T_i 周期内将有不超过 $k_i r$ 个数据被传输, 因此节点 i 不会溢出. 在最小倍周期 $T = \text{LCM}[T_i, i = 1, 2, \dots, M]$ 时段内, NCSs 中总共有

$$\sum_{i=1}^N T / T_i = 2(T / T_1)^M (1 / k_i) = \alpha(T / T_1) \text{ 个定常数量的数据}$$

需要传输, 而有限的带宽在该时段内只能产生总数为 $(T / T_1) r$ 个窗口数. 若在 T 时段内需要传输的数据个数大于窗口数, 即 $\alpha > r$, 则网络超载而无法保证系统实时性要求, 也即系统是无法调度的. 只有当 $\alpha \leq r$ 时, NCSs 系统是可调度的.

网络带宽资源利用率为

$$U = \sum_{i=1}^N (L / T_i) = 2(L / T_1)^M (1 / k_i) = \alpha(L / T_1). \quad (10)$$

当 $\alpha \leq r$ 时, NCSs 系统的带宽资源利用率趋于最大值. 由于在每一个 T 时段内, NCSs 系统都将重复上述规律, 本文只对 T 时段内 NCSs 系统的优化调度进行研究

3.2 抖动优化调度算法

基于前述的系统可调度条件分析, 可将抖动优化调度问题归结为 T 时段内 NCSs 系统中各节点数据传输的排序问题, 其数学模型描述如下:

寻找 T 时段内各节点的初相 φ 及其数据传输的最优排序, 满足

$$\begin{aligned} \min \text{OSJ} &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{(T/T_i)} Y_{j_i, k} = 2 \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{(T/T_i)} Y_{j_i, k}; \quad (11) \\ \text{s.t. } &k T_i + \varphi \leq t_{S_i, k} \leq (k + 1) T_i, \end{aligned}$$

$$\max \tau_m - \min \tau_m < (n_i + 1)T_i$$

OSJ 是NCSs 总的系统抖动值; $\gamma_i > 0$ 为惩罚因子, 与各个控制闭环的动态要求有关. 约束条件表示数据的传输时间应在数据采样之后并在其死限时刻到来之前发生; 各节点数据的周期抖动幅度在系统要求的范围内

抖动优化调度算法如图2所示, 抖动参数 n_i 和网络参数 B, L 的选取直接影响系统采样周期和窗口数量, 从而影响带宽的利用率. 因此该算法是一个循环过程, 直至达到系统动态性能与网络资源利用率的双重满意度

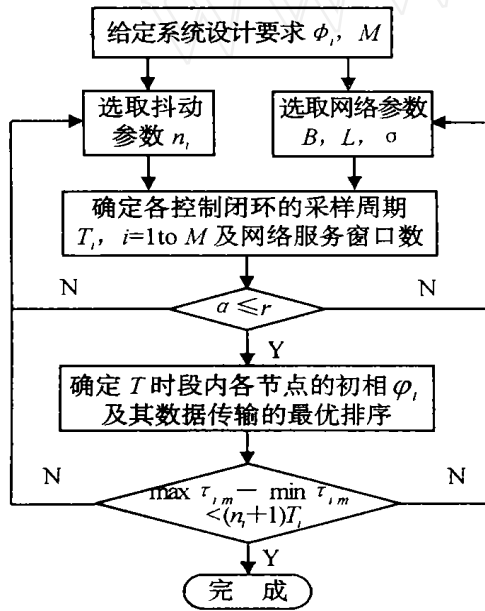


图2 抖动优化调度算法

为了在令牌网上实现这种多循环带宽配置策略, 需在各节点增加一定的控制作用, 即在各节点处设置开关标志位, 标志位的取值由存储在各节点中的数据发送序列列表决定. 当标志位为开状态时, 发送队列中的数据可被传输; 当标志位为关状态时, 发送队列中的数据被阻塞, 节点释放 token, 转让传输权给下一节点

4 抖动优化调度算法仿真试验

利用MATLAB 实现上述优化调度算法, 并进行NCSs 系统设计的仿真试验. 假设一个具有5个控制闭环, 10个传输节点的NCSs, 其控制闭环的最大允许闭环时延为 $[\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5] = [25, 75, 100, 135, 160]$ ms, 数据传输时间 $L = 2$ ms, token 开销 $\sigma = 0.1$ ms. 由抖动优化调度算法可以确定: $T_1 = 9$ ms, $r = 4$. 设允许的周期抖动幅度为 $[n_2, n_3, n_4, n_5] = [1, 1, 2, 4]$, 则其他控制闭环的采样周期为 $[T_2,$

$T_3, T_4, T_5] = [27, 36, 45, 54]$ ms, 相应的 $[k_2, k_3, k_4, k_5] = [3, 4, 5, 6]$. 因为 $\alpha = 3.9 < r = 4$, 故NCSs 系统可调度. 该NCSs 系统在一个最小倍周期 $T = 540$ ms 内抖动最优的数据优化传输序列如图3所示. 每一列表示一个基本周期, 最多有 $r = 4$ 个数据被允许传输; 每一行对应一个节点在最小倍周期 $T = 540$ ms 内数据传输的允许发生时刻, 垂直虚线代表零初相时的数据产生时刻. 根据该序列图可以确定各控制闭环的初相位为 $[\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5] = [0, 0, 0, 0, 9]$ ms. 根据该算法的计算结果, 对该系统的运行性能在令牌网上进行了试验验证, 其时延特性如图4所示. 各节点的最大抖动为 $[7.00, 7.00, 7.00, 6.99, 15.98, 15.99, 24.99, 25.00, 42.99, 43.00]$ ms, 分别小于各自控制闭环允许的最大抖动值 $[9, 18, 18, 27, 45]$ ms. 该系统的带宽利用率可达到 86.6%, token 开销为 13.6%, 说明在该抖动优化调度算法下, 系统不但满足实时性和抖动要求, 而且具有较高的带宽利用率

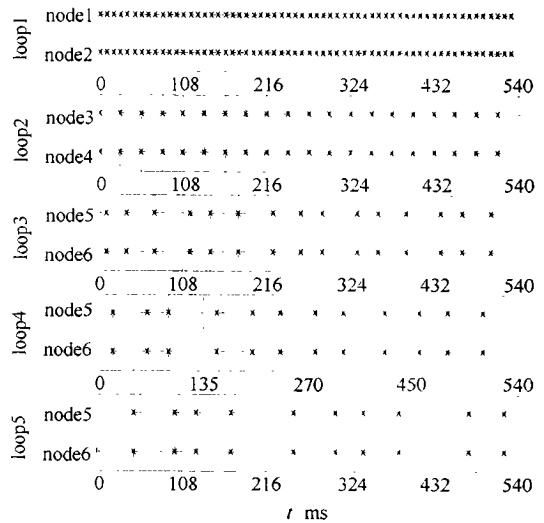


图3 各节点在 T 时段内的数据传输序列表

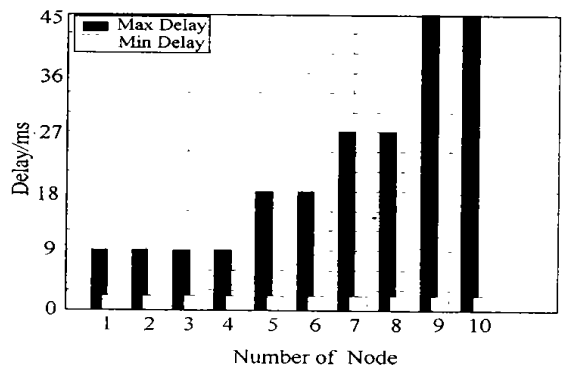


图4 各节点的时延特征

若采用文献[4, 5]的调度算法, 将各控制闭环

的采样周期整合为基准周期的 2^k 倍, 则 $\alpha = 4.5 > r = 4$, 说明在相同的带宽条件下, 该调度算法无法实现对所有控制闭环的调度。若要对实现对该NCSs的可行调度, 只能通过提高对带宽资源的需求, 或改变系统结构减少传输节点数量, 这必然造成设计和运行成本的增加, 不够经济。

5 结 语

借助“窗口”概念描述网络带宽资源, 根据令牌网的运行特性、网络带宽资源状况(即窗口数量)和NCSs的系统性能要求, 本文研究了NCSs的可调度条件, 提出折衷网络带宽资源占用和传输周期抖动的两步优化调度算法, 在可调度条件下确定NCSs中各控制闭环的采样周期; 将系统周期抖动最小的带宽优化调度归结为在一个最小倍周期时段内各控制闭环节点数据传输的排序问题。仿真试验证明, 作者提出的抖动优化调度算法既合理、充分地利用了网络资源, 使系统具有较高的网络资源利用率, 又在满足系统时延要求的同时实现了采样数据的周期抖动优化调度, 从而保证了系统的动态性能要求。

参考文献(References):

- [1] Walsh G C, Beldiman O, Bushnell L G. A asymptotic behavior of nonlinear networked control systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(7): 1093-1097.
- [2] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control system [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84-99.
- [3] Coutinho F, Fonseca J, Barreiros J, et al. Using genetic algorithms to reduce jitter in control variables transmitted over CAN [EB/OL]. <http://www.ieeta.pt/~jaf/papers/A no2000/icc-coutin.pdf>, 2003-09-25.
- [4] Hong S H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 1995, 3(2): 225-231.
- [5] Hong S H. Bandwidth allocation scheme for cyclic-service fieldbus networks [J]. *IEEE Trans on Mechatronics*, 2001, 6(2): 197-204.
- [6] Ray A, Halevi Y. Integrated communication and control System: Part I-Analysis and Part II-Design consideration [J]. *ASME J of Dynamic System Measurement & Control*, 1988, 110: 367-381.

(上接第 396 页)

6 结 语

本文基于钢铁企业在MTO管理模式下的合同计划的编制方法和优化目标, 建立了钢铁企业合同计划优化模型, 基于进化计算的最新技术, 设计了求解模型的PSO算法。与企业实际应用的合同计划相比, 本文方法编制的合同计划在设备能力均衡利用和库存费用指标上有明显改进。实验中发现, 在不同的颗粒群规模下, PSO算法在1000代以内都会收敛。针对这种情况, 可以进一步改进算法的控制策略和控制参数, 减慢算法的收敛速度, 提高算法的优化效果。

参考文献(References):

- [1] Redwine C N, Wisner D A. A mixed integer programming model for scheduling orders in a steel mill[J]. *J of Optimization Theory and Applications*, 1974, 14(3): 305-318.
- [2] 滕学. 钢管厂热轧机组产品结构模型、合同分配模型及其优化分析[J]. *系统工程理论与实践*, 1985, 5(2): 40-48.

(Teng X. Model and optimizing analysis for hot rolling product structure and order assigning in pipe plant[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 1985, 5(2): 40-48.)

- [3] 张涛, 王梦光, 唐立新. 钢厂合同计划的模型与算法[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(5): 711-715.
(Zhang T, Wang M G, Tang L X. The model and algorithm for the order planning of the steel plant[J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(5): 711-715.)
- [4] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. *Proc IEEE Int Conf on Neural Networks* [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1995. 4: 1942-1948.
- [5] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [A]. *Proc of the Sixth Int Symposium on Micro Machine and Human Science* [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1995. 39-43.
- [6] Eberhart R C, Shi Y. Particle swarm optimization: Developments, applications and resources [A]. *Proc Congress on Evolutionary Computation* [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 2001. 81-86.