

网络控制系统中混合调度算法的研究

陈丹丹¹, 夏立¹, 王海峰²

(1. 海军工程大学电气与信息工程学院, 武汉 430033; 2. 海军 91663 部队装备质量控制室, 青岛 266011)

摘要: 网络控制系统的性能与信息调度有关, 而以往的调度算法大多把时间属性作为确立优先级的依据, 无法反映出消息的重要性。该文在最大误差优先算法的基础上, 提出以最大优先变化为主, 越长时间越低优先级为辅的混合调度算法, 丰富了优先级的确立依据。仿真实验结果表明, 该混合调度算法能够有效提高控制系统的整体性能。

关键词: 网络调度; 网络控制系统; 混合调度

Research on Mixed Scheduling Algorithm in Networked Control System

CHEN Dan-dan¹, XIA Li¹, WANG Hai-feng²

(1. College of Electric & Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033;

2. Equipment Section of Quality Controlling, Naval Unit No.91663, Qingdao 266011)

【Abstract】 The performance of Networked Control System(NCS) depends on the message scheduling. However, most scheduling algorithms make the time characteristic as the basis for establishing the priority, which can not show the importance of information. A mixed scheduling algorithm based on Maximum Error First(MEF) algorithm is proposed, in which the Maximum Change First(MCF) algorithm is major and the Larger Delay Lower Priority(LDLP) algorithm is minor. This new algorithm enriches the basis for establishing the priority. Simulation experimental results show this mixed scheduling algorithm can promote the whole performance of the control system effectively.

【Key words】 network scheduling; Networked Control System(NCS); mixed scheduling

1 概述

网络控制系统(Networked Control System, NCS)^[1]是通过串行通信网络形成的闭环反馈控制系统, 其结构如图 1 所示。

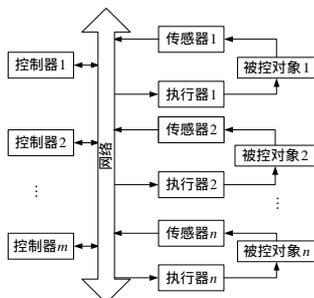


图 1 NCS 结构示意图

NCS 的性能不仅取决于控制算法的设计, 还与信息调度有密切关系。网络调度指在用户层或传输层上, 各类数据传输的先后次序以及传输间隔。网络调度的目的是如何在网络带宽有限的情况下, 合理分配带宽资源, 提高网络利用率, 满足网络中各类数据的不同需求, 从而提升控制系统各闭环回路的控制性能。

2 研究现状

NCS 调度算法最初是基于现有的较成熟的 CPU 实时任务调度算法的。文献[2]提出将静态非抢占 RM 调度算法应用于 NCS 的调度, 但未考虑网络诱导延时对系统的影响且网络带宽利用率较低。之后有许多学者将最早截止期优先(Earliest Deadline First, EDF)动态优先级调度算法应用到 CAN 网络调度中, 但此类动态调度算法仅在网络负载较小时具有较好的

调度行为。Zuberi K M 等人^[3]在 CAN 网中采取 MTS 混合调度机制, 为不同实时性要求的数据设定相应的优先级, 从而获得比 DM 算法更高的可调度性, 而其开销要比 EDF 少。

对于 NCS 的需求, 一些学者从控制性能的角度提出新的优先级选取方法。文献[4-5]把网络诱导误差的加权作为确定优先级的依据, 并丢弃过时数据, 使用最新数据, 同时证明了使用该调度与静态调度有相同的误差上界, 得出保证系统全局指数稳定的最大允许时间间隔。文献[6]通过被控对象的实际响应与期望响应的差值确定优先级, 提出最大误差优先(Large Error First, LEF)动态调度算法, 但它需要一个中心节点来周期性地发送优先级信息, 占用了较大的带宽资源。

从提高时间确定性和可预测性的角度考虑, 文献[7]借助“窗口”概念, 从单一的周期数据入手, 提出基于令牌网的单输入单输出多控制闭环 NCS 的带宽配置和采样周期确定调度算法; 文献[8]在其基础上综合考虑周期性消息与非周期性消息的调度, 并把基本传输周期分为两部分。

3 MCF-LDLP 混合调度算法

对 NCS 而言, 控制系统组件间传输的周期性消息占网络消息的大部分, 此类消息的延时或丢包将直接影响控制系统的性能。由于一般的消息调度是为了使尽可能多的消息满足截止期限, 而一般的控制器设计都能忍受一定的时延和丢包, 因此此类消息的调度应更多考虑消息的关键性而不是时间约束。最大变化量优先(Maximum Change First, MCF)和越

作者简介: 陈丹丹(1981 -), 女, 博士研究生, 主研方向: 网络控制系统, 现场总线技术; 夏立, 教授、博士生导师; 王海峰, 硕士
收稿日期: 2008-04-25 **E-mail:** wanghaifengcdd@yahoo.com.cn

长时延优先级越低(Larger Delay Lower Priority, LDLP)混合调度算法把此类周期性消息作为调度对象,并以提高各闭环控制系统性能为目的,打破以往凭单一指标确立优先级的机制,同时采取MCF为主,LDLP为辅的动态混合调度算法。

控制组件当前要传输的数值较前一次成功传输的数值变化越大,当前消息的传输对控制性能的影响越大,也就越重要,应赋予其最高优先级,这就是MCF。MCF是基于最大误差优先(Maximum Error First, MEF)的思想的,MEF把传感器和控制器节点当前值与上次成功传输值差的加权和 $e(t)=[\hat{y}(t),\hat{u}(t)]^T - [y(t),u(t)]^T$ 作为优先级确立的依据,它要求网络中的节点既能发送数据同时又能接收数据。本文把传感器(或控制器)节点自身2次数据的变化量 $c(t)=\hat{y}(t)-y(t)$ (或 $c(t)=\hat{u}(t)-u(t)$)作为基础优先级确立的依据,降低了对网络的要求,同时采用4 bit对数编码方式。

在采用MCF确立基础优先级的同时,还需考虑随着时延的增大,传感器信息或控制器信息的有效性。比如,控制环的周期为10 ms,而传感器在6 ms(相对时间)时还在竞争总线,这就意味着传感器到执行器的时延至少大于0.6个周期,此时,传感器发送的值与当前被控对象的实际输出值存在较大差异,根据6 ms前的采样值来计算控制量这本身就使控制量的计算存在偏差。同理,即使传感器第一时间将当前采样值传给控制器,若在控制器端经历较长时间,则作用到被控对象的控制量相对于当前被控对象也是存在偏差的。基于上述原因,在采用MCF的同时,还需建立随延迟时间动态降低优先级的微调策略,即所谓的LDLP。

若传感器在距下次采样时刻的剩余时间里不足以使数据作用于被控对象,即数据在从传感器到控制器、控制器计算控制量以及从控制器到执行器所需的最短时间大于剩余时间时,自动放弃当前数据的发送。同样,控制器若在距下一个采样时刻的剩余时间内不能使数据作用于对象就放弃当前数据的发送。

截止期的缩小和优先级的动态降低会导致较大的不可调度率,但在一定程度上降低了网络负载,确保了真正重要的数据得以尽早发送。另外,虽然控制系统能忍受一定的丢包,但连续丢包(自动放弃发送)仍会损害控制性能,因此,在前次未成功发送的情况下,应提高本次发送的优先级,以利于减少连续丢包,其程序流程如图2所示。

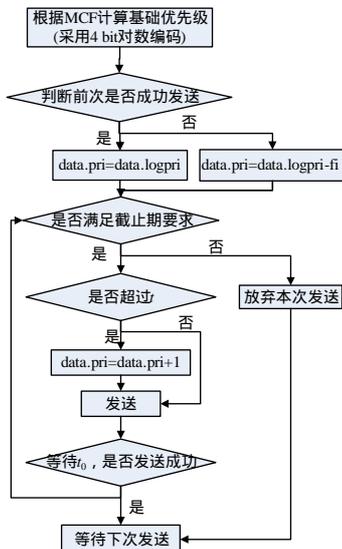


图2 算法流程

在图2中, f_i 代表连续未成功发送的次数; t 代表临界时延时间。当时延超过 t 时,启动LDLP策略,且 t 越大,越接近于MEF; t 越小,LDLP所起的作用越大。 t_0 代表优先级动态调整的最小时间单位。

4 仿真比较

这里仅对EDF, MEF以及本文算法进行比较。采用TrueTime仿真CAN总线网络下3个SISO控制回路,控制对象分别为 $G_1(S)=G_3(S)=\frac{1000}{S^2+S}$ 和 $G_2(S)=\frac{1200}{S^2+2S}$,周期分别为8 ms, 9 ms, 7 ms。控制器在不考虑网络的前提下采用PID算法。为保证实验的准确性,采用干扰节点向3个网络同时发送一样的随机数据,并对3种情况进行仿真:(1)参考值 u 不变(阶跃响应),干扰量为30%;(2) u 不变,干扰量为45%;(3) u 变化,干扰量为40%。为清楚地比较各调度算法,同时对可调度率和控制系统性能间的关系有更直观的认识,采用绝对误差积分(Integrated Absolute Error, IAE)作为衡量控制性能的指标。仿真结果如表1所示。其中, $S1, C1$ 分别代表传感器1和控制器1不可调度的信息数; IAE_1 为回路1的IAE值,依此类推, $IAE = \sum_{i=1}^3 IAE_i$ 。

表1 不可调度信息数及各回路IAE值

| 方法 | S1 | S2 | S3 | C1 | C2 | C3 | IAE ₁ | IAE ₂ | IAE ₃ |
|-----|----|----|----|----|----|----|------------------|------------------|------------------|
| EDF | 12 | 4 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0.069 | 0.078 | 0.035 |
| MEF | 22 | 6 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0.045 | 0.041 | 0.036 |
| 混合 | 15 | 7 | 8 | 6 | 2 | 7 | 0.042 | 0.040 | 0.040 |
| EDF | 34 | 18 | 26 | 1 | 0 | 0 | 8.118 | 31.280 | 0.086 |
| MEF | 30 | 22 | 35 | 2 | 3 | 0 | 0.121 | 0.081 | 0.094 |
| 混合 | 27 | 15 | 29 | 7 | 18 | 16 | 0.055 | 0.053 | 0.052 |
| EDF | 29 | 14 | 23 | 0 | 1 | 0 | 3.328 | 0.527 | 0.040 |
| MEF | 22 | 19 | 29 | 2 | 0 | 1 | 0.138 | 0.049 | 0.039 |
| 混合 | 20 | 15 | 22 | 5 | 16 | 13 | 0.122 | 0.042 | 0.045 |

从表1可以看出,EDF不可调度的报文数最少,即可理解为网络丢包率较小,但控制系统的性能损失最大。这是因为EDF是从保证高可调度率出发,按时间特性分配优先级的,并未考虑各报文对控制性能影响的重要性是不同的。相反地,MEF考虑了报文的重要性,性能较好。而本文算法在MEF基础上考虑时延对报文重要性的影响,进一步丰富了优先级确立的依据,使控制系统性能得到改善。本文给出其中2个控制对象的输出响应图,如图3、图4所示。

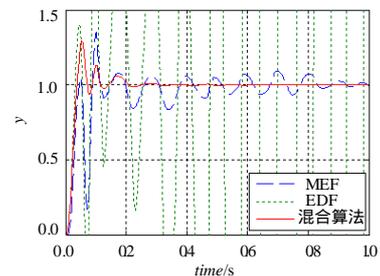


图3 控制对象1的输出响应

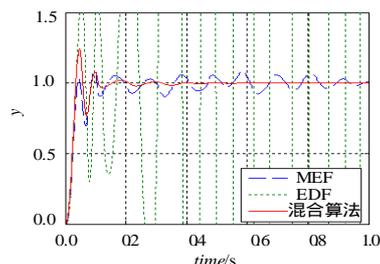


图4 控制对象2的输出响应 (下转第99页)