

流水线型并行控制器

苑明哲^{1,2}, 于海斌¹, 周悦¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 通常高采样速率有助于提高控制系统性能, 但采样速率受限于控制器的执行周期. 并行计算是缩短控制器执行周期的有效方法之一, 网络化控制系统为控制器的并行执行提供了必要的条件. 利用流水线思想, 通过在现场总线控制系统中集成控制与调度, 实现了控制器以流水线的方式并行执行, 使得控制系统的采样周期小于控制器的执行时间, 从而获得控制系统性能的提高. 仿真结果及理论分析证明了这一方法的有效性.

关键词: 现场总线; 功能块; 流水线; 并行计算

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Pipelined parallel controller

YUAN Ming-zhe^{1,2}, YU Hai-bin¹, ZHOU Yue¹

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Generally, the higher the sampling rate is, the better the control performance is. But the sampling rate is limited to the period of controller execution. To reduce the period of controller execution, parallelization is proposed. The networked control system enables parallelization of controller execution. Based on idea of pipeline, by integrating the control and scheduling in the fieldbus control system, the controller can run in a pipelined fashion. It makes the sampling period shorter than the execution time of the controller, and then the performance can be improved. The simulation results and theoretical analysis show this method works well.

Key words: fieldbus; function block; pipeline; parallel computing

1 引言 (Introduction)

控制理论的发展为控制工程师们提供了丰富的、可供选择的控制算法. 但在实际应用中, 除了算法的性能外, 控制工程师还必须考虑算法的可实现性. 先进控制技术已被证明可提供高品质的控制效果, 但由于其中包含着大量费时的计算, 导致控制器中存在较大的计算时延, 限制了它的应用, 也使得控制工程师望而止步. 需要注意的是, 计算时延问题不仅是由于控制算法的复杂, 而且在短采样时间或者有大量逻辑决策和条件搜索的系统中也普遍存在^[1]. 解决这一问题有若干方法, 如提高单个控制器结点的计算能力, 研究更快的算法等. 但这些方法往往导致系统运行成本增加. 因此, 如何利用已有的仪器设备来实施理想的控制算法就成为一个非常有意义的现实问题.

实现控制算法的并行化是一个可行方案. 控制

系统的网络化和控制设备的智能化趋势, 为在控制系统中实现并行计算提供了必要的软硬件平台, 使它更具吸引力. 通过并行计算, 可以减少控制算法的执行时间, 从而使得那些性能优异但计算量大而费时的算法能够在闭环控制中得以应用, 进而提高控制品质. 文献[2]探讨了在当今流行的网络控制系统体系结构上, 实施并行计算以解决控制应用中的计算问题的可能性以及待解决的问题.

本文针对基金会现场总线 (FF, Foundation Fieldbus) 的特点, 基于流水线并行思想, 利用 FF 的功能块调度使得同一回路中的功能块并发运行, 提高了整个控制器的采样频率, 进而提高了控制器的控制性能. 作者用 Matlab 仿真了功能块控制应用, 仿真结果表明流水线型控制器与常规控制器相比, 能够提供更好的控制性能, 并且对其性能提高的内在原因进行了理论分析.

2 流水线技术(Pipeline technique)

流水线并行是四种并行方式中的一种^[3].在流水线技术中,问题被分解成一系列必须一个接一个执行的任务.在流水线操作中,每个任务由分离的进程或处理器执行,如图 1 所示.有时把一个流水线进程称作一个流水线级,每一级只解决问题的一部分并把相关的信息传给需要它的下一级.这种并行化方法可以看作是功能分解的一种形式.

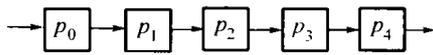


图 1 流水线化进程
Fig. 1 Pipelined processes

如果一个问题能够被分解成一系列的顺序任务,而且它在下列三种计算类型中就可以用流水线方式来获得更快的计算速度^[4]:

- 1) 将执行整个问题的多个实例;
- 2) 必须处理一系列的数据项,而每个数据项需要多次操作;
- 3) 进程在完成自己的所有内部操作之前能够把下一个进程所需的信息向前传送.

流水线过程的执行时间分析参见图 2.由 p (图中 $p = 5$) 个进程构成的流水线完成 m (图中 $m = 7$) 个问题实例的执行需要 $m + p - 1$ 个流水线周期,平均周期数为 $(m + p - 1)/m$.当 m 很大时,它趋近于 1.流水线过了开始的 $p - 1$ (流水线延迟)个周期后,以后的每一个流水线周期将完成问题的一个实例.

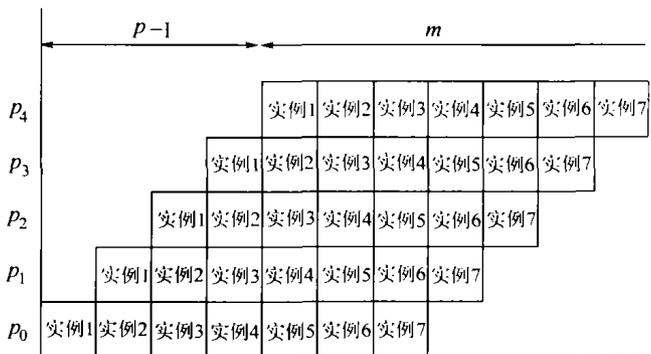


图 2 流水线的执行时空图
Fig. 2 Pipeline execution

对流水线操作的一个关键要求是流水线的相邻进程之间要有发送消息的能力.

3 并行化控制应用(Parallelizing the control application)

在传统的采样控制系统中,控制器为集中实现方式.控制器为了在每个采样周期都能够输出一控制信号,其采样时间必须大于控制算法的执行时

间.当控制对象要求采样时间较小而无法完成控制算法时,就有必要采取并行策略,使得控制器能够在采样时间内给出输出.

FF 是全分布式控制系统,控制应用由若干互连接的功能块组成.这些功能块可以分布于不同的现场设备中,使用不同的 CPU.这样,组成控制应用的功能块实际上就可以同时运行,即所谓并行.功能块进程之间通过 FMS(现场消息服务)交换数据,满足流水线关于进程间通信的要求.下面就以现场总线控制系统中一个简单的例子——PID 控制回路来说明流水线控制器的实现方式.

现场总线控制系统中的功能块是受调度执行的,通常是在每个周期(Loop cycle)内各功能块均执行一次.例如一个由 AI, PID, AO 组成的功能块应用,一般在一个周期内, AI, PID, AO 各执行一次(见图 3 PID 控制回路).首先是 AI 功能块从受控对象采样过程数据并把它发送给 PID 功能块,接着由 PID 功能块计算控制量并将控制量发送到 AO 功能块,最后由 AO 功能块驱动执行器改变受控对象的状态.因此整个控制器的执行时间至少是三个功能块的执行时间之和.

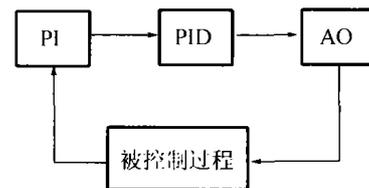


图 3 PID 控制回路
Fig. 3 PID control loop

不难发现图 3 与图 1 非常相似,不同之处仅在于控制应用必须与被控对象形成闭环,而对于计算部分(控制器)的进程(AI, PID, AO)恰恰对应了图 1 中的各流水线进程.在这里,流水线周期就是每个功能块的执行时间(为了简化问题的讨论,暂且假定功能块的执行时间是相等的,都等于 T),流水线步数 $P = 3$.而且,由于控制应用的闭环特性,其执行步数可视为无穷,即 $m = \text{inf}$.于是有图 4 的时空图,从而每隔一个流水线周期(T)就可以输出一个控制信号,而不是整个控制应用的执行周期($3T$).采样时间等于流水线周期 T ,而回路周期(Loop cycle)为 $3T$ (实质为输入输出时延).此时,采样周期小于控制器计算时延.流水线控制器实际上缩小了控制系统的采样周期.

4 仿真结果(Simulation results)

下面按照图 3 组成控制系统,采用相同的控制

参数和被控对象,比较在采用了流水线控制器情况下和使用常规控制器情况下的控制性能.

仿真设置:假设 AI, PID, AO 三个功能块分别位于不同的设备中,通过调度使得三个功能块并行执行,其执行时空图见图 4.

受控对象: $\frac{1000e^{-0.5s}}{s^2 + s}$.

控制器计算公式: $P + I/s + Ds/(1/Ns + 1)$.

控制器参数: $P = 0.25, I = 0.12, D = 0.030, N = 100$.

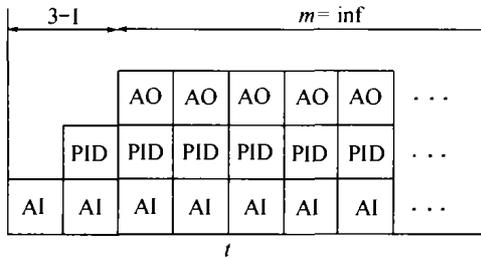


图 4 功能块的流水线执行
Fig. 4 Pipeline execution of function block

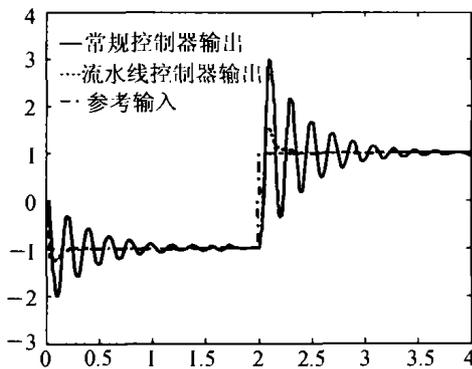


图 5 $T = 6$ ms (常规采样控制的采样时间将为 18 ms)
Fig. 5 $T = 6$ ms (Sampling time of conventional controller will be 18 ms)

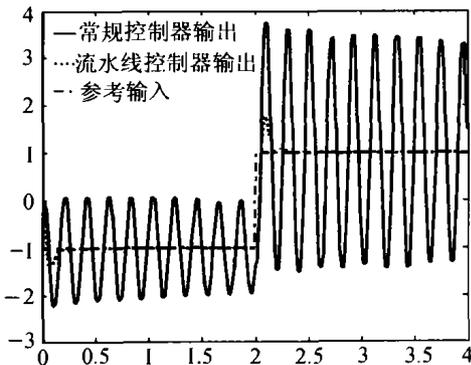


图 6 $\tau = 5$ ms, $T = 6$ ms
Fig. 6 $\tau = 5$ ms, $T = 6$ ms

在采样周期 $T = 6$ ms 情况下分别进行了 $\tau = 0$ ms 和 $\tau = 5$ ms 的仿真试验,实验结果如图 5,6 所

示.可以看到,在图 5 中,流水线控制器的效果远好于常规控制器.在图 6 中,常规控制器已经接近振荡状态,无法实现有效控制,而流水线控制器仍可提供有效控制.仿真结果证明了流水线型并行控制器可以提高控制的性能.下面分析其理论原因.

5 理论分析(Theoretical analysis)

5.1 时域分析(Time domain analysis)

不失一般性,设线性时不变连续系统模型为 $\dot{x} = Ax + Bu$,标准的线性反馈控制律 $u = -Kx$.在传统的数字反馈控制理论中,相应的状态反馈控制律为 $U(k) = -KX(k)$,这是在假设控制律的计算时间为零的情况下得到的.而实际中控制计算时延不可能为零,这时, $U(k) = -KX(k)$ 就不可能实现,而只能采用 k 时刻以前的状态来产生控制信号.

设流水线型控制器流水线级数为 l ,单级流水线周期为 T .此时, k 时刻的控制量 $U(k)$ 使用 $X(k-l)$ 计算得到.传统控制器相当于流水线级数为 1,即 $l = 1$.系统的采样周期 T_s 不能小于 T ,这里取 T .当控制器的计算时延为 τ_{cal} ,而被控对象要求的采样时间又小于 τ_{cal} 时,可以采用流水线策略,使得采样周期 $T_s = \tau_{cal}/l$,从而满足系统对采样时间的要求.

l 级流水线系统闭环方程为

$$\begin{cases} X_p(k+1) = \Phi_p X(k) + \Gamma_p U(k), \\ U(k) = -KX(k-l), \end{cases}$$

其中 $\Phi_p = e^{AT}, \Gamma_p = \int_0^T e^{At} dt B$.

采用增广的状态向量表达,令

$$Z(k) = [X_p^T(k), X_p^T(k-1), \dots, X_p^T(k-l)]^T,$$

有

$$Z(k+1) = \tilde{\Phi} Z(k).$$

其中 $\tilde{\Phi} = \begin{bmatrix} \Phi_p & 0 & 0 & -\Gamma_p K \\ I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}$ (1)

定理 1 具有 l 级流水线控制器的离散时间线性系统(1)是渐近稳定的充要条件为 $\tilde{\Phi}$ 是舒尔的(Schur),即其特征根全部位于单位圆内.

定理 1 的证明可以直接由文献[5]的定理 3.1 得到.

例 1 对于单积分标量系统 $\dot{x} = u, l = 1$ (相当于计算时延等于采样周期的传统控制器)时,

$$\begin{bmatrix} X(k+1) \\ X(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -KT_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(k) \\ X(k-1) \end{bmatrix},$$

根据朱利(Jury)判据得系统稳定条件为 $T_1 < 1/K$.

$l = 2$ 时,在

$$\begin{bmatrix} X(k+1) \\ X(k) \\ X(k-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T_2K \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(k) \\ X(k-1) \\ X(k-2) \end{bmatrix},$$

$$T_2 < (\frac{\sqrt{5}}{2} - \frac{1}{2})/K \approx 0.618/K$$

条件下系统稳定。

在传统控制器作用下 ($l = 1$), 如果控制器的计算时延大于 $1/K$, 则其采样时间也将大于 $1/K$, 系统将不稳定。这时, 若采用两级流水线控制器, 只要在计算时延小于 $1.236/K$ 情况下, 对应采样时间小于 $0.618/K$, 系统就能够稳定工作。

表 1 一阶对象流水线控制器最大级数
Table 1 Max stage number of pipelined controller for First Order Objcet

采样时间 (流水线周期) T_s/s	容许的最大 流水线级数 l_{max}	等效输入 输出时延 (计算时延)/s
0.24	0	—
0.12	2	0.24
0.08	3	0.24
0.06	5	0.30
0.04	8	0.32

对于一般系统很难像例 1 那样求出采样周期的上限, 但是可以用数值计算的方法得到。表 1 给出了系统

$$\begin{cases} \dot{x} = ax + u, & t \in [kT + \tau, (k+1)T + \tau), k > 0, \\ u = -Kx(t - \tau), & t \in \{kT + \tau\} \end{cases}$$

在 $a = 1, k = 4$ 时, 不同采样周期情况下, 多级流水线控制器可以选择的最大流水线级数 l_{max} 。 $l_{max} = 0$ 意味着系统不能容许等于采样周期的控制器计算时延。表中结果显示, 小的采样周期可以使得系统容许的最大输入输出时延有所增大。

需要注意的是, 在实际应用中流水线级数的增加不可能是无限制的。首先增加流水线级数(减小采样周期)带来的容许输入输出时延的增加是有限的,

最大不可能超过对应的连续系统所能容许的时延(相当于采样时间为零, 流水线级数为无穷, 这本身也是不可实现的)。其次, 流水线级数的增加就意味着通信总量的增加, 流水线每增加一级同时将增加一组进程间通信。这会使得控制器的输入输出时延有所增加, 从而抵消流水线带来的好处。所以当通信时间与流水线周期比较接近时, 增加流水线的级数已经不能达到理想的效果。假设流水线级数为 l 时系统临界稳定, 控制器的容许输入输出时延 $\tau_d = \tau_{cal} + (l - 1)\tau_{com}$, 其中 τ_{com} 为流水线各级之间的通信时间。若采样时间减小一半可使控制器的容许输入输出时延增加 20%, 即 $\tau'_d = (1 + 20\%) \tau_d$, 将流水线级数增加一倍, 希望使采样时间缩小一半, 实际上只是单级流水线计算时间缩小一半, 控制器的总计算时间 τ_{cal} 保持不变, 如要保持系统稳定, 必须满足 $\tau_{cal} + (2l - 1)\tau_{com} < (1 + 20\%)(\tau_{cal} + (l - 1)\tau_{com})$, 从而有 $\tau_{com} < \frac{1}{4l - 1} \tau_{cal}$ 。如果想得到性能的改善, 则 τ_{com} 必须更小。

5.2 频域分析(Frequency domain analysis)

直观上讲, 减小采样时间本身可以使离散系统更好地逼近连续系统。系统时延和离散系统的采样时延都意味着增加系统频率响应的相位滞后, 其大小为 $\Delta\phi = \frac{\omega T}{2} + \omega\tau^{[6]}$, 从而减少系统的相位裕度, 使系统性能变坏。这里, ω 是系统的自然频率, T 是采样周期, τ 是系统时延。

表 2 给出了第 4 节中的仿真系统在理想情况下和在四种仿真条件下的相位裕度。由表 2 可见, 当控制器计算时延相同时, 由于流水线控制器可以采用比较小的采样周期, 因此仍然可以保证足够的相位裕度, 从而保证系统的稳定性和控制性能。尤其是当控制器的计算时间接近或超过临界稳定采样周期时, 通过采用流水线控制器缩短采样周期, 可以使原本不稳定的系统成为稳定可控的系统。

表 2 不同时延和采样时间情况下的相位裕度

Table 2 Phase margins under conditions with different delay and sampling time

类型	控制器计算时延 + 对象时延/s	T/s	相位裕度/ $^\circ$	对相位裕度的影响 $\Delta\phi / (^\circ)$
连续理想控制器	0	0	76.7	0
流水线型控制器	0.018	0.006	39.5	37.2
常规控制器	0.018	0.018	28.8	47.9
流水线型控制器	0.018 + 0.005	0.006	30.7	36.0
常规控制器	0.018 + 0.005	0.018	20.8	56.9

6 结论(Conclusion)

由于多级流水线的作用,控制器的输出间隔时间(等效于采样时间)缩小了,使得控制输出更平滑,控制效果稳定快速.仿真试验和理论分析表明,与单处理器实现的常规数字控制器相比,流水线数字控制器实现方式可以提供更好的性能.尤其是当控制器的计算时间接近或超过临界稳定采样周期时,流水线控制器对控制器性能的提高尤为明显.

事实上,本文提出的方法不必拘泥于基金会现场总线系统.凡是具有流水线特点的网络化控制应用都可以尝试这一方法.

参考文献(References):

- [1] SHIN K G, CUI Xianzhong. Computing time delay and its effects on real-time control systems [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 1995, 3(2): 218 - 224.
- [2] 苑明哲, 于海斌, 周悦. 并行计算在网络化控制中的机遇与挑战 [J]. *信息与控制*, 2003, 32(2): 197 - 101.
(YUAN Mingzhe, YU Haibin, ZHOU Yue. Distributed and Parallel

- Computing in Networked Control Systems: Challenges and Opportunities [J]. *Information and Control*, 2003, 32(2): 197 - 101.)
- [3] PANCAKE C M. Is parallelism for you? [J]. *Computational Science and Engineering*, 1996, 3(2): 18 - 37.
- [4] WILKINSON B, ALLEN M. *Parallel Programming: Techniques and Applications Using Networked Workstations and Parallel Computers* [M]. NJ: Prentice-Hall, 1999.
- [5] ASTROM K J, WITTENMARK B. *Computer-controlled System: Theory and Design* [M]. Third Edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [6] FRANKLIN G F, POWELL J D, WORKMAN M. *Digital Control of Dynamic Systems* [M]. Third Edition. Reading, MA: Addison Wesley Longman, Inc., 1998.

作者简介:

苑明哲 (1971 —), 男, 中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生, 研究方向为现场总线控制系统、先进控制、分布式控制算法, E-mail: mzyuan@sia.ac.cn;

于海斌 (1964 —), 男, 中国科学院沈阳自动化研究所研究员, 博士生导师, 研究领域为网络协同制造、智能生产调度理论与应用、分布自治生产协调优化理论、分布工业控制系统;

周悦 (1970 —), 女, 现在中国科学院沈阳自动化研究所做博士后研究, 研究方向为分布式控制系统、智能控制.