

FF 控制系统时滞特性分析及相应参数设置规则

孙 瑛 庞彦斌

(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘 要: 从控制和通信角度综合分析了基金会现场总线控制系统的时滞特性,并总结了在该时滞特性影响下的参数设置规则。以一个3节点的闭环单回路控制系统为例,通过研究其回路时滞的分布、大小及产生原因,找到了影响总线时滞的关键变量。并据此论证了总线时滞与采样周期和总线调度表参数的内在联系,给出了合理设置以上参数时需要注意的问题。最后在仿真平台上,通过比较不同参数配置对系统性能的影响,验证了以上分析。

关键词: FF; 控制系统; 纯滞后; 采样周期; 调度表

中图分类号: TP202

引言

随着日益分散的测控任务和越来越多的智能设备的使用,常常需要在传统的过程控制系统中引入现场总线技术。在总线控制系统中,现场设备间是通过总线通信的,控制回路也是通过总线来闭合的,因此总线特有的通信机制就为系统时滞特性带来了新的特点。

总线滞后对控制系统性能的影响已经引起了越来越多的关注,针对其特性的研究具有十分重要的理论和实践意义。只有在深入了解了系统的时滞特性之后,才能更好的实现系统参数的配置和控制方案的设计。近年来有很多专家学者对控制系统时滞特性、影响及克服方法进行了研究。有的侧重于从通信的角度分析各种总线链路协议的实时性^[1-2];有的致力于从控制的角度研究克服网络传输延迟的控制算法;也有的按照产生原因对总线控制回路的通信延迟作了分类^[3];还有的从网络控制系统的角度,分析了通讯滞后与采样周期、网络负载之间的关系^[4]。

FF(Foundation Fieldbus)是一种较为流行的总线技术,适用于实时性要求较高的过程控制领域。本文从通信和控制的角度详细分析了FF闭环控制系统的时滞特性,并就该时滞特性与某些参数的关系提出了一些新的观点;最后在仿真模型上,比较了

不同的参数配置方案下的系统性能。

1 对 FF 控制回路时滞特性的分析

由于总线回路的时滞中很大一部分是通信延迟,因此首先要了解FF的通信调度机制^[1-2]。它采用集中令牌方式,一个总线段上只能有一个链路活动调度器LAS(Link Activity Schedule)。LAS有一个预定的调度表ST(Schedule Table),包含了要周期性通信的所有设备发布信息的时间。这里主要讨论FF总线段上只有一个控制回路的情况,即LAS只对一个控制任务进行调度。多任务的情况可依此类推,并根据任务优先级的不同选择不同的采样周期和安排相应的调度时间。

下面以一个简单的单回路控制系统为例,按回路运行时序,分析了纯滞后在各环节的分布情况,如图1所示。

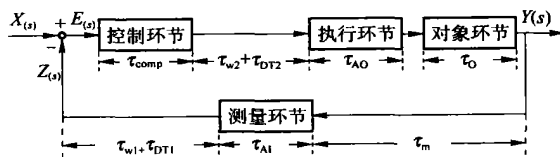


图1 单回路控制系统纯滞后的构成

Fig. 1 Composition of dead time in an FF-based single loop control system

在测量环节,被控变量的变化传递到检测点需要测量滞后 τ_m ,之后变送器读入采样信号,模拟输入时间 τ_{AI} ;等待时间 τ_{w1} 后,变送器收到CD帧并立即将采样数据通过总线发送给控制器,通信延迟DTI(不需排队,由发送、传输、解码三部分组成)。

收稿日期: 2005-10-18

第一作者: 女,1980年生,硕士生

Email: sunyingfc@126.com

在控制环节,控制器收到采样数据后,经过计算时间 t_{comp} 得到控制信号;等待 CD 的时间为 w_2 ,然后控制信号被发送至执行器,通信延迟 DT_2 。在执行环节,控制信号模拟输出时间 AO 。在对象环节,控制通道纯滞后 θ 。综上所述,FF 单回路纯滞后的计算公式如下:

$$t_{FB} = t_m + AI + w_1 + DT_1 + t_{comp} + w_2 + DT_2 + AO + \theta \quad (1)$$

其中 θ 和 t_m 是在工业过程中产生的,是由控制对象特性和现场的物理环境所决定的。而其余部分是在用总线进行通信和控制时产生的,是由总线设备和总线通信协议的局限性所带来的,是本文研究的重点,可称之为总线时滞 t_{FB} 。

AI 、 AO 、 t_{comp} 、 DT_1 和 DT_2 在系统物理条件给定的情况下近似为常量,而 w_1 和 w_2 与 CD 发布时间和实时信号(包括采样信号和控制信号)的产生时间有关。为了估算 FF 总线时滞,以实验室 Delta V 单回路水槽液位控制系统^[1]为例,得到实验数据:

$$AI = AO = 0.02 \text{ s}, t_{comp} = 0.045 \text{ s} (\text{PID 算法}), DT_1 = DT_2 = 0.013 \text{ s}, \text{由此可得:}$$

$$t_{FB} = 0.111 + w_1 + w_2 \quad (2)$$

可见在系统物理配置给定的前提下, w_1 和 w_2 是影响总线时滞大小的关键,与采样周期和调度表参数有关。当 $w_1 = w_2 = 0$ 时,总线滞后最小。

由于 FF 系统的周期通信抖动时间不会超过 $0.0003 \text{ s}^{[1]}$,因此它的影响完全可以忽略不计。也就是说,在一个给定的控制系统中,可以认为 FF 总线时滞是非时变的。

2 时滞与系统参数的关系

总线时滞对系统参数的影响,表现在它对采样周期和调度表参数的限制上;同时由上文的分析可以看出,通过调节以上参数也可以反过来影响总线时滞的大小。下面具体介绍了三者之间的关系,并给出了在保证系统性能的前提下,合理设置以上参数时所要考虑的问题。

2.1 总线时滞对采样周期的影响

采样周期 T_s 是一个重要参数,它的选择将直接影响到系统的控制和通信性能。从理论上讲, T_s 的选择和回路时滞 t_{FB} 并没有直接关系^[5]。但在 FF 控制系统中,由于总线通信是被统一调度的,总线的时滞特性对采样周期的选取确实有一定影响。

1) 要想保证对采样信号的及时处理,应满足:

$$T_s \geq t_{comp} \quad (3)$$

否则会造成不必要的滞后。

2) 采样周期的选取还与变时滞的大小有关。对于变时滞为 θ 的受控系统,还需要满足:

$$T_s \geq \theta \quad (4)$$

否则可能会导致传入控制器的采样序列发生变化,无法控制受控对象。

此外,从控制角度考虑,采样周期选得越小,获得的控制信息越多,控制效果会越好。根据香农定理,为了能不失真的复现原连续信号,应满足

$$T_s \leq \frac{1}{f_{\max}} \quad (5)$$

若 T_s 取得太大,将使控制器将长时间对受控对象无作用,这是实际过程控制中所不允许的。

从总线通信角度考虑,采样周期却不能选得太小。否则不仅增加计算量,还将导致网络上传输的负载过重,从而使网络的通讯性能恶化。对于时间常数较大的控制对象,为了节省开支, T_s 可取得较大。

2.2 调度表参数的设置

FF 中实时信号的通信是根据调度表进行的,所以调度表的设计对系统性能的影响至关重要。调度表中的参数主要有宏周期 T_m ,一个宏周期内的 CD 个数及发布时间。下面将介绍设置这些参数时所要考虑的相关因素。

1) 与采样起始时刻 t_0 和采样周期 T_s 的选取有关。这两项决定了采样信号的生成时间,进而影响了负责调用采样信号的 CD 的发布时间。

2) 与最小时间间隔有关。它约等于传输一个 CD 帧和一个 DT 帧所需时间之和,即完成一次调度的时间。Rosemount 公司的 Delta V 系统给出了这个参数的推荐值应不小于 25 ms。

3) 与允许发送 PT 的最小剩余时间 t_{LTOP} 有关。LAS 中的 CD 序列不可过于紧密,至少应满足最大间隔与最小间隔之差大于 t_{LTOP} ,否则将没有剩余时间发送令牌 PT。

4) 与等待时间 w_1 和 w_2 有关。由于总线上存在定时抖动,可能会出现 CD 调度先于信号生成的情况,因此还需要在发布时间上预留出一定的抖动范围,即等待时间应大于 0。

5) 与网络负载有关。应根据实际网络负载调整 ST 参数,若平均等待时间太大或丢失数据过多,可

适当增大 CD 间隔,必要时增大采样周期。若通信情况依然不能改善,则说明网络已超负荷。

6) 要保证采样周期等于或整倍数于宏周期。

与以上分析相对应,图 2 给出了回路时滞分布与调度表 CD 发布时间的关系。

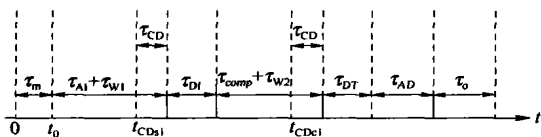


图 2 FF 单回路时滞分布与调度表的对应关系

Fig. 2 Distribution of dead time and its corresponding schedule table in an FF-based single loop

图中, t_{CDs1} 和 t_{CDc1} 分别指一个宏周期中第一个采样数据和第一个控制信号对应的 CD 帧的发布时间, t_0 为采样起始时间, $_{CD}$ 和 $_{DT}$ 分别为成功发送一次 CD 和 DT 的通信延迟时间。可以推出 t_{CDs1} 和 t_{CDc1} 的计算公式:

$$t_{CDs1} = t_0 + \tau_{AI} + \tau_{W1} - \tau_{CD} \quad (6)$$

$$t_{CDc1} = T_0 + \tau_{AI} + \tau_{W1} + \tau_{DT} + \tau_{comp} + \tau_{W2} - \tau_{CD} \quad (7)$$

依次计算下去,可以得到下一个采样周期内的两个 CD 帧的发布时间 t_{CDs2} 和 t_{CDc2} 分别为:

$$t_{CDs2} = t_{CDs1} + T_s \quad (8)$$

$$t_{CDc2} = t_{CDc1} + T_s \quad (9)$$

由于调度表的定时作用有效避免了抖动的累积,可根据 CD 发布时间计算总线时滞:

$$\tau_{FB} = t_{CDc1} + \tau_{CD} + \tau_{AO} - t_0 \quad (10)$$

该式避免了(2)式中的不确定因素,更加简单可靠。

3 仿真实验

为了验证以上分析,在仿真平台上比较了不同参数配置及总线时滞对系统控制性能和通信性能的影响。

3.1 仿真环境及仿真内容

该仿真平台是以 Matlab 为工具建立起来的。包括 1 个 FF 总线段、3 个现场设备和 1 个控制对象,组成一个单回路 PID 控制系统。平台上所有仿真时间都参照上文中提到的 Delta V 单回路水槽液位控制系统^[1](见 1.2,且 $_{CD} = 0.003$ s),仿真步长 0.001 s,考察时间 25 s。总线上非周期数据的负载为 25 frn/s,分 1 和 2 两个优先级。

控制对象选用最为常见的一阶传递函数(根据

FF 总线时滞的数量级,为了使比较效果明显,令时间常数较小),并采用以拉氏算子 s 为变量的表达式:

$$Go(s) = \frac{1}{0.5s + 1} \quad (11)$$

首先,在预留出一定抖动范围(0.03 s)的前提下,根据公式(6)和(7),得到一个宏周期中的 CD 发布时序:0.05 s,0.15 s。根据公式(10)可知这时总线时滞 τ_{FB} 为 0.175 s。然后,分别在 $T_s = T_m = 0.5$ s 和 $T_s = T_m = 1$ s 两种情况下进行仿真。调整第二种方案中的 CD 间隔, τ_{FB} 增大为 0.523 s,得到第三种仿真方案。如表 1 所示。

表 1 FF 总线控制系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters in FCS

参数配置 方案序号	T_s/s	T_m/s	CD 时间 序列/s	τ_{FB}/s
1	0.5	0.5	[0.05, 0.15]	0.175
2	1	1	[0.05, 0.15]	0.175
3	1	1	[0.05, 0.55]	0.523

3.2 仿真结果的控制性能比较

在仿真平台上依次代入表 1 中的参数,调节并运行,使控制性能分别达到各自最佳状态。3 条阶跃响应曲线如图 3 所示。

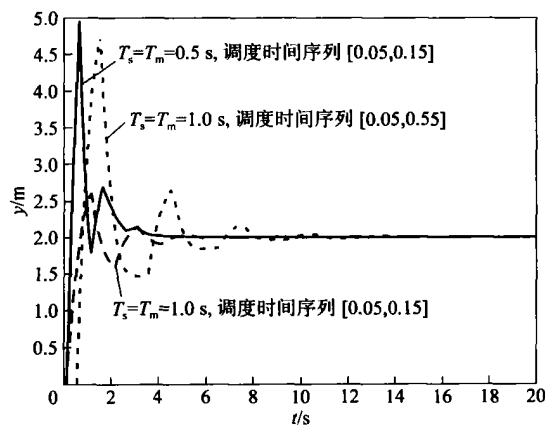


图 3 不同参数配置下的控制响应曲线比较

Fig. 3 Comparison of different response curves with different simulation parameters

通过函数计算得到 3 种情况下的动态性能指标——峰值时间 t_p 、回复时间 t_s (在稳态值的 $\pm 2\%$ 范围内)和超调量,见表 2。

可以看出, t_p 和 t_s 随着 T_s 和 τ_{FB} 的增大而变差,即灵敏性依次降低,响应速度依次变慢;而灵敏度太高或者太低都会导致超调量过大。

表 2 三种情况下系统控制性能的比较

Table 2 Comparison of control performance with different simulation parameters

序号	t_p/s	t_s/s	
1	0.66	6.165	146.5 %
2	1.17	10.392	31.25 %
3	1.57	18.493	136.0 %

3.3 仿真结果的通信性能比较

由于 FF 中周期性数据的传输对负载变化不敏感,所以这里只讨论非周期数据的通信性能。设总线上优先级为 1 的非周期数据的平均等待时间为 W_1 ,数据丢失率 P_1 ;优先级为 2 的平均等待时间为 W_2 ,丢失率 P_2 。通过函数计算可以得到三种情况下的通信性能,见表 3。

表 3 三种情况下系统通信性能的比较

Table 3 Comparison of communication performance with different simulation parameters

序号	W_1/s	W_2/s	P_1	P_2
1	0.1662	0.7014	0	13.95 %
2	0.0911	0.4475	0	6.63 %
3	0.0722	0.1768	0	0

可以看出,3 的通信性能最好。这是因为 1 的采样周期最小,负载最大;2 和 3 的采样周期相同,但 2 的 CD 间隔不如 3 均匀,这就造成了较小间隔内非周期数据的拥塞。

4 结束语

为了更好的实现控制算法的研究和系统参数的设置,本文从控制和通信角度分析了 FF 总线闭环控制系统的时间特性及该特性与某些系统参数的关系。得出结论:总线时滞特性不但可以直接影响控制性能,还会通过影响采样周期和调度表参数间接影响系统性能。控制性能随采样周期和总线滞后的减小而变好,通信性能则与之相反。

所以在设计总线控制系统时,应各方面权衡考虑,结合具体工艺要求、实现成本等因素,选择出最优的采样周期和调度表配置,令总线控制系统的控制性能和通信性能都达到满意的效果。

参 考 文 献

- [1] 于红岩,庞彦斌.基金会现场总线通信性能的研究[J].北京化工大学学报,2004,31(3):94-95.
- [2] 潘峰,张凤登. FF 总线实时通信机制的研究及应用[J].自动化仪表,2001,22(10):36-38.
- [3] Pang Y B, Nishitani H. Timing analysis and a modified PID control algorithm of the fieldbus control system[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2004, 37(9): 1105-1116.
- [4] Walsh G C, Ye H, Bushnell L G. Stability analysis of networked control systems [J]. IEEE Trans Control Syst Tech, 2002, 10(3): 438-446.
- [5] 冯国良,李太福,钟秉翔.纯滞后控制系统采样周期的选择[J].重庆大学学报,2003,26(6):125-128.

Analysis of the time-delay characteristic of the Foundation Fieldbus control system and setting of the corresponding parameters

SUN Ying PANG Yan-bin

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The time-delay characteristic of a Foundation Fieldbus (FF)-based single loop control system was analyzed from the points of view of both control and communication. The relationship between the time-delay characteristic and the parameters of sample period and schedule table was derived. On the basis of this relationship, the optimum settings of the parameters are given. Simulation results also described here demonstrate the effect of different choice of parameters, and are consistent with the relationship derived.

Key words: Foundation Fieldbus; control system; dead time; sample period; schedule table