

文章编号: 1001-0920(2004)07-0813-04

## 基于 TTCAN 协议的网络控制系统静态调度算法的研究

刘鲁源, 万仁君, 李斌

(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 基于 TTCAN 协议提出了一种静态调度算法, 该调度算法从控制系统稳定性角度出发, 在基本周期中引入了“同步相”和“异步相”的概念, 有效利用了总线带宽并且避免了非周期信息对周期性信息造成的扰动, 最后通过实验验证了算法具有较好的性能

**关键词:** 网络控制系统; TTCAN 协议; 静态调度算法

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A

## On static scheduling algorithm for networked control system based on TTCAN protocol

LIU Lu-yuan, WAN Ren-jun, LI Bin

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China Correspondent: LIU Lu-yuan, E-mail: liuly@tju.edu.cn)

**Abstract:** A static scheduling algorithm is proposed for networked control systems based on TTCAN protocol from the point of the stability of control systems. “Synchronous Phase” and “Asynchronous Phase” are introduced in the basic cyclic of TTCAN. The scheduling algorithm utilizes the fieldbus bandwidth effectively and avoids the jitter on the periodic message from the aperiodic message. The experiment results show that the proposed scheduling algorithm has good performances.

**Key words:** networked control system; TTCAN protocol; static scheduling algorithm

### 1 引言

在现场总线系统中, 信息的传输主要分为时间触发和事件触发两种方式。时间触发方式一般用于传感器数据、控制变量以及执行指令等周期性信息的传输, 信息的传输将在时间轴上的某个预定点击发, 该点应在系统运行前确定; 事件触发方式一般用于报警、管理与监控等非周期性信息的传输, 信息的传输具有一定的随机性。CAN 协议本质上是基于事件触发方式, 目前已有许多文献对 CAN 协议中的信息调度进行了研究<sup>[1-3]</sup>, 但均未考虑保证系统稳定的最大允许延时。文献[4]虽然在设计调度算法时考

虑了最大允许环延时, 但它是将非周期性信息假定为周期性信息进行考虑, 将其最小到达时间间隔作为非周期性信息的周期, 这样降低了网络资源的利用率, 同时也会造成对周期性信息的干扰。

CAN 为多主方式工作, 所采用介质访问方式为非破坏性总线仲裁机制, 即当网络中多个节点同时向总线发送信息时, 优先级低的节点自动退出, 而优先级高的节点可以不受影响的继续传输数据, 从而有效地节省了总线冲突仲裁时间。但由于 CAN 协议信息发送的随机性及其对总线的竞争, 使得信息在总线上的传输时序不可管理, 其时延也不可预测,

收稿日期: 2003-07-04; 修回日期: 2003-09-15

基金项目: 天津市重大攻关项目(023183611)。

作者简介: 刘鲁源(1941—), 男, 山东青岛人, 教授, 博士生导师, 从事控制理论及技术等研究; 万仁君(1964—), 男, 湖北天门人, 博士生, 从事基于现场总线网络控制与调度及其应用等研究。

以致于影响控制系统的稳定性。为此, ISO 11898-4 提出了一种基于时间触发方式的 CAN 协议 (TTCAN)<sup>[4]</sup>。

本文首先介绍 TTCAN 协议, 然后分析所提出的基于 TTCAN 协议的静态调度算法, 最后给出了实验结果。

## 2 TTCAN 协议分析

在 CAN 中实现静态调度需要首先解决系统的同步问题, TTCAN 同步 CAN 总线中所有信息的通信调度并且提供全局的虚拟时钟。当网络节点达到同步时, 任何信息都是在一个特定的时间窗口内进行传输, 实现了信息传输的可管理性和可预测性。在 TTCAN 中, 存在一个时间意义上的主节点, 被调度的节点都以计数器的形式保存着全局时间的副本, 每隔一个网络时间单位 (NTU), 其计数器加 1。

TTCAN 与时分多路复用机制相似, 由固定顺序的时间窗口或时间槽组成, 在一个时间窗口中可传输一个信息。TTCAN 中调度时间表又称为矩阵周期, 矩阵周期由多个基本周期组成, 每个基本周期以主节点发送同步信息开始, 而以下一个同步信息出现前结束。矩阵周期定义了整个系统的通信调度的结构, 通过周期性执行矩阵周期确定系统未来的调度行为, 使之更适合于实时系统的应用。

## 3 基于 TTCAN 静态调度算法

本文算法以文献[5]中的时间窗口调度算法为基础, 但[5]中算法是基于令牌环和轮询系统的调度, 系统的信息类型仅限于周期性信息。本文算法既满足了 TTCAN 中实时性数据的时间约束条件, 又通过利用剩余的时间窗口调度非实时数据, 提高了网络资源利用率。

由于事件触发型信息的到达具有一定的随机性, 本文假定其具有泊松分布。在 TTCAN 中引入双相基本周期的概念, 即基本周期由同步相与异步相组成, 如图 1 所示。其中  $a$  表示同步相与异步相之间的隔离时间, 其作用在于避免事件触发型信息对时间触发型信息的干扰。

下面给出系统参数定义,  $M$  为总线系统中控制

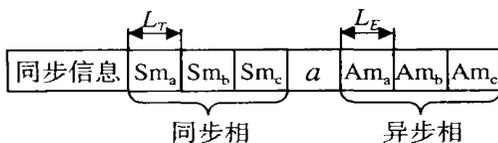


图1 基本周期结构

环的数目;  $N_T$  为时间触发型信息的数目;  $N_E$  为事件触发型信息的数目;  $L_S$  为表示同步信息传输时间;  $L_T$  为时间触发型信息传输时间;  $L_E$  为事件触发型信息传输时间;  $\tau_i (i \in [1, M])$  为控制环  $i$  的最大允许环延时;  $\lambda_i (i \in [1, N_E])$  为节点  $i$  中事件触发信息产生的平均速率;  $T_i (i \in [1, M])$  为控制环  $i$  的采样周期。

### 3.1 同步相规划

在同步相中, 传输的是周期性信息, 因此只需要确定信息的产生时刻和采样周期。首先基于控制系统性能确定同步相中周期性信息的采样周期。

TTCAN 中, 每个控制环有两个传输节点: 传感器节点与控制器节点, 并假定传感器节点与控制器节点具有相同的采样周期。为了满足控制系统的稳定性要求, 控制环  $i$  必须满足下列关系:

$$2T_i + (T_i - L_T) + \tilde{\tau} \leq \tau_i, \quad (1)$$

其中  $\tilde{\tau}$  是与控制算法相关的常数。

定义向量  $T = [T_1, T_2, \dots, T_M]$ ,  $T_i = T_{i+1}$ ;  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M]$ ,  $\tau_i = \tau_{i+1}$ , 其中  $T$  和  $\tau$  的每个元素分别表示相应控制环的采样周期和允许的最大环延时。

在同步相中, 由式(1)可得出  $T_1 = \frac{(\tau_1 + L_T - \tilde{\tau})}{3}$ , 即基本周期的长度, 然后利用文献[6]中时间窗口算法确定

$$T_i = k_i T_1,$$

$$k_i = \frac{\tau_i - (T_1 - L_T) - \tilde{\tau}}{2T_1},$$

$$\forall i \in [2, M], \quad (2)$$

$k_i = x$  表示  $k_i$  为 2 的倍数。通过式(1)和(2)就可确定控制环  $i$  的采样周期。为了确定基本周期中允许传输的信息数目  $\gamma$ , 令  $\alpha$  为基本周期中由  $M$  个控制环产生的信息的平均数目, 即

$$\alpha = 2 \sum_{i=1}^M \frac{1}{k_i}, k_i = \frac{T_i}{T_1},$$

只要在基本周期中传输的信息数目  $\gamma = \alpha$ , 即可满足控制系统性能的需求。

以下分析周期性信息的产生时刻, 若  $BC_i$  为第  $i$  个基本周期的起始时刻, 在该时刻产生的时间触发型信息的数目  $u(BC_i)$  应小于  $\gamma$ , 假定  $t_j$  表示第  $j$  个周期性信息的产生时刻, 则可得

$$t_j = \begin{cases} BC_i, u^j(BC_i) < \gamma \\ BC_{i+1}, u^j(BC_i) > \gamma \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $BC_{i+1} = BC_i + j \cdot [1, N_T], i \in [1, T_M/T_1]$

### 3.2 异步相规划

异步相中传输的是事件触发型信息, 节点  $i$  在时间  $t$  内产生的事件触发型信息的平均数目为  $\lambda_i t$ , 其总的传输时间为  $\lambda_i L_E$ 。同时在时间  $t$  内从其他节点传输的事件触发型信息所需要的总时间为  $L_E \sum_{j=1, j \neq i}^{N_E} \min(\lambda_j t, \lambda_j)$ , 则节点  $i$  中所有事件触发型信息可靠传输的条件为

$$\lambda_i L_E + L_E \sum_{j=1, j \neq i}^{N_E} \min(\lambda_j t, \lambda_j) < t \quad (4)$$

对于整个控制系统, 为保证事件触发型信息的传输需要满足的条件为

$$L_E \sum_{j=1}^{N_E} \lambda_j < 1 \quad (5)$$

假定在时间  $T_1$  内最大允许传输的事件触发型信息数目为  $n_{max}$ , 通过使产生大于  $n_{max}$  个信息的概率足够小, 同时满足  $L_S + \sum T + n_{max} L_E + \alpha T_1$ , 即可同时保证时间触发型信息和事件触发型信息的可靠传输, 从而满足系统的性能要求

### 3.3 静态调度算法

输入值:  $M, N_T, N_E, L_S, L_T, L_E, n_{max}, \lambda_i (i = 1, N_E), \alpha$

输出值: 控制环的采样周期  $T = [T_1, T_2, \dots, T_M]$ , 各个信息的产生时刻  $t = [t_1, t_2, \dots, t_{NT}]$ 。

算法步骤:

Step 1: 计算 TTCAN 总线系统中各个控制环  $i$  的最大允许环延时  $\tau_i$ , 并按增序对  $\tau_i$  进行排序得  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M]$ ;

Step 2: 确定时间触发型信息的最小传输周期, 即基本周期

$$T_1 = \frac{(\tau_1 + L_T - \tilde{\tau})}{3};$$

Step 3: 确定基本周期内传输的信息数目  $\mathcal{Y}$ , 即

for ( $i = 2, i = M, i++$ )  
 $k_i = \frac{\tau_i - (T_1 - L_T) - \tilde{\tau}}{2T_1};$

$$\alpha = \sum_{i=1}^{N_T} \frac{1}{k_i}, \mathcal{Y} = \alpha;$$

Step 4: if ( $L_S + \sum T + n_{max} L_E + a > T_1$ )  
 then 提高网络传输速率, 转 Step 2;  
 else  $T_i = k_i T_1$ ;

Step 5: 确定时间触发型信息的产生时刻, 即  
 for ( $j = 1, i = 1; j = N_T$ ,

$$i = \frac{T_M}{T_1}; j++, i++),$$

$$\text{if } (u^j(\text{BC}_i) \neq \mathcal{Y}),$$

$$\text{then } t_j = \text{BC}_i \text{ else } t_j = \text{BC}_{i+1}.$$

## 4 实验及结果

利用自行开发的基于 SJA 1000 的 CAN 总线通讯实验模块构造了 6 个节点的网络系统(传感器与执行器存在于网络中同一个物理节点, 并将其命名为传感器节点), 它们分别为控制环 1 的控制器节点(1)、传感器节点(2), 控制环 2 的控制器节点(3)、传感器节点(4), 控制环 3 的控制器节点(5)、传感器节点(6)。其中括号内数字为节点编号, 节点 1 同时充当时间主节点。网络上的信息有 3 类, 分别为同步信息( $M_0$ )、周期性信息( $M_1$ )和事件触发型信息( $M_2$ )。周期性信息分为传感器到控制器的传感数据和控制器到执行器的控制指令, 事件触发型信息为传感器到控制器的状态信息, 周期型信息的优先级高于事件触发型信息的优先级。设同步信息的数据长度为 0, 其他信息的数据长度均为 2 个字节, 3 个控制环的最大允许环延时为  $\tau = [14, 25, 25]/\text{ms}$

表 1 给出了网络系统的参数配置, 被控对象需要传输状态信息, 其平均时间间隔为  $15.56 \text{ ms } (\lambda = 0.0643 \text{ ms}^{-1})$ 。利用本文算法可得出控制环采样周期向量  $[T_1, T_2, T_3] = [5, 10, 10]/\text{ms}$  和各个周期性信息的产生时刻  $[t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6] = [0, 0, 0, 0, 5, 5]/\text{ms}$ 。图 2 给出了调度时刻表的结构,  $M_0$  表示节点 1 发送的同步信息。对于异步相中的非周期性信息采用 CAN 自身的仲裁机制进行调度。

表 1 网络通信参数配置

网络参数	数值
数据传输率 / kbps	125
周期性信息传输时间 / ms	0.584
同步信息传输时间 / ms	0.456
非周期信息传输时间 / ms	0.584
非周期信息平均产生速率	0.0643
同步相与异步相间隔 / ms	0.5

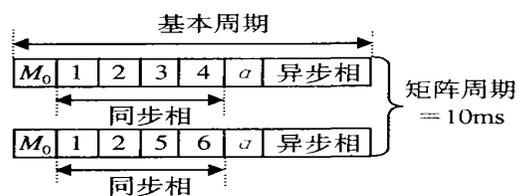


图 2 TTCAN 调度表

利用 Ixxat 公司的 USB-to-CAN 智能 PC/CAN 接口模块分析网络性能, 其指标为平均信息延时 (ADL)、带宽利用率 BU 和信息传送成功率 SR. 其中 BU 和 SR 分别为

$$BU = \frac{\text{信息传输时间}}{\text{信息传输间隔}}$$

$$SR = \frac{\text{传输成功消息个数}}{\text{总消息个数}}$$

表 2 给出了通过 CAN 智能接口模块分析得到的结果, A 表示利用本文调度算法, B 表示利用文献 [4] 中调度算法. 从表 2 中可以看出, 利用 A 算法时, 因非周期性信息只在异步相中进行传输, 减少了其对周期性信息的干扰, 所以周期性信息 SR = 100%. 另外, 可以看出 A 算法中事件触发型信息的平均信息延时略高于 B 算法, 主要是因为 B 算法中将事件触发型信息转变为周期性信息处理, 取其最小间隔达到时间为其周期, 这样, 使 A 算法的事件触发型信息的带宽利用率与 B 算法相比提高了很多.

表 2 性能比较

信息类型	ADL/m s		BU/%		SR	
	A	B	A	B	A	B
周期信息	0.98	1.64	89	89	510/510	485/510
事件信息	3.04	2.91	47	29	405/460	415/460

## 5 结 语

TTCAN 是一种基于 CAN 的时间触发方式与事件触发方式优点相结合的高层协议, 本文静态调度算法与其他基于表的静态调度算法<sup>[7]</sup>的不同在于没有显式确定系统中所有信息的起始传输时刻, 而是只确定了信息的产生时刻, 同时利用比率单调法 (信息的周期越小, 优先级越高) 确定了每个信息的

优先级关系. 但是总线中时间主节点容错与系统的抗干扰问题, 及其对控制系统性能的影响尚需进一步研究.

## 参考文献 (References):

- [1] Radu Dobrin, Gerhard Fohler. Implementing off-line message scheduling on controller area network (CAN) [A]. *Proc of Emerging Technologies and Factory Automation* [C]. Antibes-Juan Les Pins, 2001. 241-245
- [2] Marco Di Natale. Scheduling the CAN bus with earliest deadline techniques [J]. *Proc of Real-Time Systems Symposium* [C]. Italy: M. Pisa University, 2000. 259-268
- [3] Khawar M. Zuberi, Kang G. Shin. Design and implementation of efficient message scheduling for controller area network [J]. *Computers IEEE Trans*, 2000, 49(2): 182-188
- [4] G. Leen, D. Heffernan. TTCAN: A new time-triggered controller area network [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2002, 26(2): 77-94
- [5] Seung Ho Hong. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems [J]. *Control Systems Technology*, 1995, 3(2): 225-230
- [6] Yong Ho Kim, Wook Hyun Kwon, Hong Seong Park. Stability and a scheduling method for network-based control systems [A]. *Proc of Industrial Electronics, Control, and Instrumentation* [C]. Taipei, 1996. 934-939
- [7] Seung Ho Hong, Yu Chul Kim. Implementation of a bandwidth allocation scheme in a token-passing fieldbus network [J]. *Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(2): 246-251