

TTCAN 网络调度平台的设计优化

冯晓东,张争明,张 刚

(北京化工大学 信息科学与技术学院,北京 100029)

摘 要: 分析了 TTCAN 网络平台对于周期性消息及非周期性消息的调度策略,分别对其进行改进,并通过遗传算法对系统矩阵周期调度表进行优化,之后利用 Simulink 中的 Stateflow 工具针对一般工业控制系统建立了 TTCAN 网络调度仿真平台,并对仿真平台进行优化,优化后的仿真平台较好地提高了网络系统带宽利用率,增大了总线通信量,降低了各传感器节点周期性消息的响应时间和非周期性消息的延时时间,从而改善了网络平台的通信实时性能。

关键词: 调度策略;遗传算法;优化;仿真;传感器节点

中图分类号: TP393.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)03-0067-04

The Design and Optimization of TTCAN Network Scheduling Platform

FENG Xiao-dong, ZHANG Zheng-ming, ZHANG Gang

(Institute of Information Science & Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper analyzes the scheduling strategy in the TTCAN network platform for periodic message and nonperiodic message and improves the scheduling strategy respectively, at the same time optimizes the system matrix through genetic algorithm, and then uses the tool Stateflow in the Simulink to establish a TTCAN network scheduling simulation platform for general industrial control system, and optimizes the platform, the optimized simulation platform better improved the network's bandwidth utilization, and increased the bus communications traffic, reduced the response time of the sensor nodes' periodic message and the delay time of the sensor nodes' nonperiodic message. Consequently, this optimization improved the network platform's real-time communication performance.

Key words: scheduling algorithm; GA; optimization; simulation; sensor nodes

1 引言

TTCAN 是由时间触发 CAN 报文传输的一种协议,可以实现 CAN 的 x-by-wire 应用. TTCAN 协议本质上是一种基于调度表的调度协议,利用这种协议组建的网络至少存在一个调度器,进行安排网络内的所有传感器节点的发送时间. 调度器的调度表定义了各传感器节点发送消息的时间,同时包括任务被触发所需要的基本信息. 当调度表被下载到各传感器节点控制器中之后,各传感器节点只需知道何时发送消息,以及何时总线上的消息对自己是有用的. 通过对矩阵周期的循环调度,来实现对 TTCAN 协议网络的调度^[1].

文中主要通过对调度策略优化,用遗传算法对系统矩阵进行优化两方面进行改进,最后将算法应用于一般工业控制现场实例,并给出了优化后的结果.

2 TTCAN 网络调度平台设计优化

2.1 初始矩阵周期的形成

(1) 时窗大小的确定

在 TTCAN 中,所有帧都是标准帧,而没有扩展帧. 因此,每个矩阵周期的时窗必须与 CAN 的标准帧相对应. 帧中的最大长度并不是帧中所有位的简单加和. 因为 CAN 协议为了保证时钟同步和实现位填充,强行加入了一些附加位. 帧的大小可以通过

以下公式计算^[2]:

$$\text{最大帧长(bits)} = \frac{34 + 8S_m}{5} + 47 + 8S_m \quad (1)$$

式中, S_m 是 CAN 中消息 m 的数据域的字节数. 在本系统中 m 取为 8. 从式(1) 可以得到, 最大帧的大小为 130 位.

(2) 初始矩阵基本参数的确定

参考消息: 参考消息为所有其它消息提供基准, 参考消息数据域包含至少 1 字节(Level 1), 参考消息的最后三位对发送传感器节点的优先级进行编码.

(3) 确定矩阵周期的行数和列数

首先, 定义消息事件: $J = \{J_1^1, J_1^2, \dots, J_1^{k_1}; J_2^1, J_2^2, \dots, J_2^{k_2}; \dots, J_n^1, J_n^2, \dots, J_n^{k_n}\}$, 其中, $k_n (1 \leq n \leq \text{Row})$ 为第 n 个消息事件的个数, N 为集合中消息的个数, 将消息事件按传输持续时间降序排列, $T_{\max} = T_1 > T_2 > T_3 > \dots > T_N$

矩阵最大行数 $R_{\max} = T_{\text{SM}}/T_{\max}$, 其中 $T_{\max}$ 为消息最大传输时间, 通过 $2^n = R < R_{\max}$ 选取自然数 n , 作为矩阵的行数, 最小列数 $\text{Column} = J/R$.

基本周期为所有周期的最大公约数 T_{EC} , 系统矩阵周期为所有周期的最小公倍数 T_{SM} , 则基本周期的个数为 $n_{\text{EC}} = T_{\text{SM}}/T_{\text{EC}}$, 基本周期内可以传输的最大信号的个数为 $I_{\max} = (T_{\text{EC}} - T')/T_w$. T' 为同步时间窗口的大小, T_w 为传输信息帧时间窗口大小.

则一个系统矩阵的时间 $T_{\text{SM}} = \sum_{j=0}^{\text{Row}} \sum_{i=0}^{\text{Column}} T_{\text{EC}_k}$, 式中, T_{EC_k} 为一个基本循环周期的每一个元素. 一个基本周期的时间为 $T_{\text{EC}} = \sum_{i=0}^{\text{Column}} T_{\text{EC}_k}$.

如果 $T_{\text{EC}} < T_{\text{SM}}/R$, 则可以在两列之间加入自由窗, 这样就可以对矩阵进行时间上的优化调度, 充分利用传输时间进行消息的调度, $T_{\text{space}} = T_{\text{SM}}/R - T_{\text{EC}}$.

2.2 对调度策略进行优化

基于时间触发系统的 TTCAN 网络调度平台可以看成是一种任务调度器, 同时, 调度器也可以看成是一种操作系统, 它为工业控制系统的开发提供了一种调度策略, 提高了控制系统的模块化程度, 缩短了开发时间. 在 TTCAN 中, 如果一个被“唤醒”的高优先级任务可以打断其他正在运行的低优先级任务, 则这种调度方式是抢占式的, 反之, 则是合作式的. 而我们所研究的工业现场所运行的绝大多数是

周期性任务, 如周期性数据采集和发送任务, 周期性监测查询任务等等, 并且任务的就绪时间、开始时间、执行时间和截止时间等信息均可以预先知道. 所以, 对于周期性消息, 系统采用基于时间触发形式的合作式调度策略进行调度策略的设计, 使任务在特定时刻以周期性或单次方式被调度. 对于非周期性消息, 将其转化为周期性消息后, 系统采用基于时间触发形式的抢占式调度策略进行调度设计. 这种抢占式调度策略可以通过优先级提升算法实现^[3].

2.2.1 周期消息的调度策略

在基本周期结构中, 周期性信号都是在同步相中传输的^[4], 所以, 只要确定了周期性信号的起始传输时刻和采样周期, 就可以基本确定了信号的传输动作. 我们所研究的时间触发的控制系统大部分信号的周期都是已知的, 因此, 只要确定了信号的起始传输时刻就可以确定同步相的结构. 设 TTCAN 系统中, 周期性信号的个数为 N , 周期性信号的采样周期为 T' (T' 为 N 个信号采样周期组成的向量), $T' = [T_1, T_2, \dots, T_N]$, 其中, 各个元素是按升序排列的, 即 $T_i \leq T_{i+1}, i \in [1, N]$, T_i 为第 i 个信号的采样周期. 另设 T_1 为基本周期 EC , 系统矩阵周期为 SM , SM 为 $T_i, i \in [1, N]$ 的最小公倍数, 向量

$$L' = [l_1, l_2, \dots, l_n], l_i = T_i/T_1, l_i \leq l_{i+1} \quad (2)$$

比值也按升序排列. 设 s 为 EC 内传输信号的平均个数, 则

$$s = \sum_{i=1}^n 1/l_i \quad (3)$$

2.2.2 非周期性消息调度策略

非周期性信号没有规定起始传输时刻, 更没有采样周期了, 当基本周期传输进入到异步相时, 各传感器节点的非周期性消息是通过竞争总线进行传输的, 利用 CAN 协议中的非破坏性仲裁机制, 从而优先级高的信号争取到总线的发送权进行传输. 但是这种方法容易导致信号死锁现象的发生, 因此我们在此基础上选择了一种优先级提升的算法. 基本思想是从信号请求发送开始, 到信号开始传输这段时间中, 该信号仲裁丢失帧的总的个数作为延时优先级的增加量记录下来. 这时, 非周期性信号的优先级由延时优先级与截止期限优先级共同决定. 延时优先级处于标识符高位, 截止期限优先级处于标志符低位. 因此, 当延时优先级相同时, 就可以通过截止期限优先级来决定信号优先级的高低. 截止期限优先级可以静态定义.

2.3 建立初始矩阵并优化

以上方法可以确定初始系统矩阵,然后通过遗传算法对初始系统矩阵静态调度表进行优化.遗传算法是一种模拟生物在自然环境中遗传原理和生物进化原理的全局搜索最优解的算法.

遗传算法是对生成的初始样本种群中的每一个样本个体产生相对应的适应度值,通过对样本编码和求适应度值使得算法不需要考虑问题的具体情况.遗传算法的操作步骤为^[5-6]:首先,对初始种群进行编码,按照目标函数计算每个种群的适应度值.其中,样本中最优个体的适应度最高,所以,最优个体不进行交叉、变异的操作,而是直接将它们进行复制.其次,选择判断适应度较大的个体进行复制使其繁殖,从而淘汰适应度小的个体.最后,将复制过的增大了的新的种群样本进行交叉和变异.

具体实现过程如下:

```
Begin
i = 1; j = 10; c = 0.01ms; a = 50; b = 5 ~ 10; G'ij =
0; Pc = 0.7; Pd = 0.15;
初始化 j 个系统矩阵样本 S[ij];
计算适应度值 Gij; // 第 i 代的 j 个系统矩阵样本
while(  $\sum G'_{i-1j} - \sum G'_{ij} > c$  )
{
// 计算 Sij 中每个样本个体的适应度值 Gij;
// 将 Gij, Gi-1j 从小到大进行排列 G'ij, 选出 a% : S'ij;
copy(S'ij); // 按照 b 的倍率进行复制
exchange(S'ij); // 按概率 Pc 交叉
change(S'ij); // 按概率 Pd 变异
}
Best = Min(G'ij);
// 输出最优个体
END
```

按照适应度函数对初始系统矩阵周期进行优化,适应度函数如下^[7]:

$$\begin{cases} T_{\min} = R \sum_{\text{column}=1}^{J/R} T_{\text{column}}, & 1 \leq i \leq n \\ \text{s. t. } |t_i^j - t_{i-1}^{j-1}| \leq T_i & j = 1, \dots, J/R \end{cases} \quad (4)$$

当系统矩阵调度的实际传输时间最小,即 $T_{\min}$ 时为最优值,也即我们需要的适应度函数最优解.其中, t_i^j 为第 i 个消息的第 j 次消息实例的传输时刻; R 、 Column 、 T_{column} 分别为系统矩阵周期 SM 的行数、列数以及各时间窗口的时间宽度^[8].

3 系统建模

根据一般工业控制现场的仪器仪表及传感器类

型,可以生成如下消息状态集合,见表 1、表 2.

表 1 周期性消息传感器节点的发送周期与传输持续时间

发送周期性消息的传感器节点	发送周期/ μs	传输持续时间/ μs
1 压力传感器	6 000	63
2 温度传感器	2 000	70
3 速度传感器	4 000	56
4 电机机油传感器	2 000	35
5 节气门位置传感器	4 000	52
6 油泵执行器	6 000	55
7 电子喷油器	6 000	69
8 电磁空气阀	4 000	58
9 液压执行器	4 000	72
10 制动执行器	2 000	60
11 转向位置传感器	6 000	53
12 流量传感器	4 000	66

表 2 非周期性消息传感器节点的消息表

发送非周期性消息的传感器节点	优先级	传输持续时间/ μs	截止时间/ μs
1 液压执行器	a	60	8
2 制动计量器	a	45	2
3 探测传感器	b	67	6
4 电机机油传感器	b	65	4
5 散热器温度传感器	b	69	8
6 发动机转数计数器	b	52	2
7 灯光系统传感器	c	70	6
8 指示器显示系统	c	55	8

根据表 1 和表 2,可以设定周期性消息传感器节点 12 个,非周期性消息传感器节点 8 个,总线波特率首先采用 1Mbit/s(经验值,如果效果不理想,可以调整), $\text{NTU} = 1/\text{CAN}$ 的波特率 = $1/(1\text{Mb/s}) = 1\mu\text{s}$. 因此,时窗的大小设置为 130NTUs ,也就是最大信息帧时间窗口为 $130 \times 1 = 130\mu\text{s}$. 一般取信息帧窗口为 $73 \times 1 = 73\mu\text{s}$,同步时间窗口大小为 $63\mu\text{s}$. 最大传输持续时间为 $72\mu\text{s}$,按采样周期增大的方向对周期消息进行排序 $T = \{T_1, T_2, T_3 \dots T_N\} = \{2, 2, 2, 4, 4, 4, 4, 4, 6, 6, 6, 6\}$,则基本周期 $T_{\text{EC}} = 2\text{ms}$, $T_{\text{SM}} = 12\text{ms}$, $n_{\text{ec}} = 6$, $I_{\text{max}} = (2 - 0.063)/0.073 = 26$ 个,矩阵最大行数 $R_{\text{max}} = 12/0.072 \approx 167 > R_{\text{ow}} = 6$,并且周期性消息节点与非周期性消息节点总个数为 $S = 20$ 个小于 26,因此,调度可行.

周期消息与非周期消息传输 8 个字节数据的传输时间均为 $209\mu\text{s}$. 周期性消息与非周期性消息之间的空隙的大小根据实际的网络传输情况而定,空隙的大小一般小于同步消息的传输时间,文中在仿

真过程中取空隙的大小是同步消息的 $2/3$ 倍. 那么, 在一个基本周期内可以传输 20 个周期消息和 2 个非周期消息, 则基本周期中传输周期性信号需要的时间为 1.46ms , 空隙大小为 0.042ms , 剩余的 0.498ms 分配为异步相用来调度非周期性消息信号, 可传输 $0.498/0.209 \approx 2$ 个消息. 对基本周期消息进行编号: 其中 S_0 为同步消息即参考帧, $S_1 - S_3$ 为周期 2ms 的周期消息, $S_4 - S_8$ 为周期是 4ms 的周期消息, $S_9 - S_{12}$ 为周期是 6ms 的周期消息. 可得初始系统矩阵周期公式如式(5)所示, 以及优化后的系统矩阵周期, 如式(6)所示.

$$S_T = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 4 & 10 & 3 & 5 & 8 & 9 & 12 & 1 & 6 & 7 & 11 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & 3 & 5 & 8 & 9 & 12 & -2 & -2 & -2 & -2 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & 1 & 6 & 7 & 11 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & 3 & 5 & 8 & 9 & 12 & -2 & -2 & -2 & -2 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$S'_T = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 4 & 10 & 3 & 8 & 1 & 11 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & 5 & 9 & 6 & 12 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & 3 & 8 & 7 & 11 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & 5 & 9 & 1 & 12 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & 3 & 8 & 6 & 11 & -1 \\ 0 & 2 & 4 & 10 & 5 & 9 & 7 & 12 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

4 结束语

文中主要改进了 TTCAN 网络调度平台上的调度策略, 并通过遗传算法对系统矩阵进行优化, 在一定程度上改进了系统的性能. 最后利用 Simulink 中 Stateflow 工具, 建立了一个一般工业控制现场 TTCAN 网络系统的仿真模型. 仿真结果表明改进后的 TTCAN 网络调度平台的带宽利用率和总线通

信量大大提高了, 同时减少了各周期消息传感器节点的响应时间并且降低了非周期消息传感器节点的延时时间.

参考文献:

- [1] Ryan C, Heffernan D. Clock synchronization on multiple TTCAN network channels[J]. Microprocessors and Microsystems, 2004, 26(2): 54-78.
- [2] Shaheen S, Heffernan D. A gateway for time-triggered control networks[J]. Microprocessors and Microsystems, 2007, 23(1): 126-317.
- [3] 王国新, 宁汝新, 王爱民. 基于仿真的生产调度优化技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 17(5): 78-99.
- [4] 王欢, 王丽芳. TTCAN 通讯网络实时性分析[J]. 高技术通信, 2006, 16(8): 830-833.
- [5] 万定生, 余长海, 徐立中, 等. 基于位变异防止遗传算法过早收敛的算法[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(8): 119-122.
- [6] 周双娥, 雷辉. 基于改进的遗传-模拟退火的有序任务调度算法[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(10): 62-64.
- [7] 刘鲁源, 李芳, 吕伟杰. TTCAN 协议的分析与展望[J]. 天津理工大学学报, 2005, 21(3): 20-45.
- [8] 朱智林, 时辰. 周期性任务调度的装箱算法[J]. 计算机应用, 2006, 17(2): 33-67.

作者简介:

冯晓东 男, (1970-), 博士, 讲师. 研究方向为智能检测技术、传感器网络和现场总线技术.

张争明 女, (1984-), 硕士研究生.

(上接第 66 页)

- [3] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2004, 3(1): 61-91.
- [4] 毛莺池, 周晓峰, 王志坚, 等. 能量感知的无线传感器网络覆盖控制协议[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(10): 27-29.
- [5] 刘丽萍. 无线传感器网络节能覆盖[D]. 浙江: 浙江大学控制科学与工程系, 2006: 149-151.

- [6] 汪学清, 杨永田. 一种基于虚拟菱形网格的传感器节点布置算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(7): 1554-1556.
- [7] 翟正怡, 张轮. 无线传感器网络正六边形网格划分方法[J]. 电脑知识与技术, 2007, 19(4): 89-91.

作者简介:

关志艳 女, (1983-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络节点覆盖.

冯秀芳 女, (1966-), 副教授, 硕士生导师. 研究方向为无线传感器网络.