

CAN 总线中改进的 EDF 调度算法可调度性分析

王 浩, 张凤登

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200082)

摘要: 针对于 CAN 总线的调度问题, 因现有的平均分区 EDF 调度算法在对于优先级反转问题上收效甚微, 从而导致消息缺乏一定的可调度性, 故提出一种改进的基于幂函数分区的 EDF 算法; 同时借助量化误差的概念, 对该调度算法进行可调度性分析, 充分论证了在该调度算法下, 消息可调度的判定条件; 采用 CANoe 平台进行实验仿真, 对比平均分区 EDF 调度算法和双幂函数分区 EDF 调度算法, 经试验验证了双幂函数分区 EDF 调度算法的可行性和优越性, 改善了消息的最坏响应时间, 提高了 CAN 网络通讯的实时性。

关键词: CAN 总线; EDF 调度; 量化误差; 幂函数分区

Schedulability Analysis of Improved EDF Scheduling Algorithm in CAN-bus

Wang Hao, Zhang Fengdeng

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200082, China)

Abstract: For the scheduling problem of CAN bus, an improved method based on power function division of deadline is presented, due to the current prevent average division of deadline method has little effect on the priority inversion problem, and then the messages lack some schedulability. On this basis, the concept of quantization cost is used to analyze the schedulability of the algorithm, and the decision condition of message schedulability under this algorithm is fully demonstrated. CANoe platform was used for experimental simulation, compared to the average division of deadline and double-power function division of deadline, and the feasibility and superiority of the algorithm based on double-power function division of deadline are verified by experiments. At the same time, the worst response time of message is improved, and the real-time of CAN network communication is improved.

Keywords: CAN-bus; EDF scheduling; quantization cost; power function division

0 引言

CAN 总线采用面向消息的优先级控制方式, 用标识符定义静态消息优先级, 以及其短帧格式和 CSMA/CA 访问控制, 使得 CAN 具有极高的可靠性和独特的设计, 特别适合工业过程控制设备的互连^[1], 因此 CAN 总线不仅仅局限适用于车体的控制系统中, 在舰艇、航天、检测等控制领域, CAN 总线的身影也逐渐增多。从而, 国内外的学者均投入了大量精力, 针对于 CAN 总线的调度做研究。最初, 由 Tindell 等人将针对于单处理器的调度分析演化为求消息的最坏响应时间来对 CAN 总线调度进行分析^[2]; K. M. Zuberi 和 K. G. Shin 首次提出将 EDF 算法应用于 CAN 总线^[3], 但当时他们提出的方法对 CAN 做出一些不切实际的假设并且由于时间范围较短, 调度能力的体现有一定的局限性, 因而 Livani 对 Zuberi 等人的方法进行改进^[4]; 国内对于这方面的研究起步较晚, 主要集中于理论

研究, 例如, 谌介人、彭军等人提出了基于指数分区的 EDF 算法, 一定程度上较平均分区的 EDF 算法保证了实时性^[5]; 袁晔、檀明等人针对抢占式和非抢占式的 EDF 调度算法, 提出了任务集新的可调度性测试条件^[6]。但是, 在某些特殊情况下, 现有的 EDF 算法经常会导致 CAN 总线无法正常通讯调度, 因此针对此现象, 本文通过优化算法改善总线仲裁机制完成对消息集的调度, 提出了一种新的基于双幂函数分区的 EDF 调度算法。

1 平均分区 EDF 算法

1.1 平均分区的 EDF 算法

EDF (Earliest deadline first) 算法是按照绝对截止时间的远近来分配优先级, 即消息的绝对截止时间越近, 任务的优先级越高。在这种调度机制下, 消息的优先级并不是固定的, 而是在每次仲裁前依据截止时间的变化, 计算相应的动态优先级, 最大程度的保证消息不错过其截止时间。EDF 算法的核心就是将消息的截止时间通过编码方式转换为标识符的一部分, 通过比较标识符大小判定消息的优先级。但是从实际情况可以看出, 随着时间的增大, 消息的绝对截止时间也会无限增大, 当增大到一定程度时, 由于标识符位数的限制, 从而无法对其编码转为标识符的一部分。针对于此, 文献 [4] 中提出相对截止期的概念, 因为消息的时间参考点是每一次仲裁开始时间, 所以相对

收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-01-20。

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(15ZR1429300)。

作者简介: 王 浩(1996-), 男, 江苏扬州人, 硕士, 主要从事现场总线、分布式实时以太网方向的研究。

张凤登(1963-), 男, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事现场总线技术、实时控制、汽车电子学等方向的研究。

截止时间等于绝对截止时间减去仲裁开始时间, 定义:

$$D = d - t_s \quad (1)$$

式中, D 为相对截止时间。随着 t_s 的增加, D 会逐渐减小。根据 EDF 算法, 相对截止时间 D 会逐渐减小, 从而在前一次仲裁失败的消息其 D 的减小意味着下次仲裁时优先级的提升。当然, 即使通过这种优化, 相对截止时间表示的时间范围仍会很大, 因此 Livani 提出了平均分区的 EDF 调度算法。对于一组消息 $\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$, 其中, 相对截止时间为 $\{D_1, D_2, \dots, D_{\max}\}$, 并且按照从小到大顺序排列。平均分区就是将时间轴等分成 k 段, 最后一段区间需要包含最大的相对截止时间 D_{\max} , 一般可以直接将时间轴的最大值设为最大相对截止时间, 其中每段的时间长度称为基本时间单元 U 。如图 1 所示, 在每一轮仲裁开始时, 根据公式 (1) 计算出相对截止时间, 再根据图 1 所划分的区域判断相对截止时间在哪个时间段中, 再根据当前时间段的区间号来表示消息的优先级。

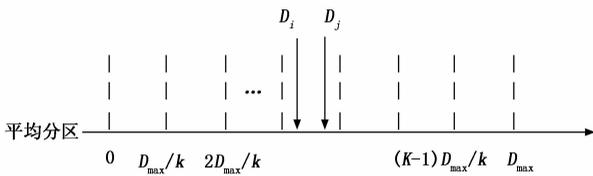


图 1 平均分区示意图

1.2 量化误差的分析和影响

由 C. L. Liu^[7]等人提出的 EDF 调度算法判定定理: 假定存在一个由 n 个周期性消息构成的任务集 $\{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, 如果消息 i 满足如下判定式 (2), 则该消息可调度。

$$\sum_{j=1}^i \frac{C_j}{D_j} + \frac{B_i}{D_i} \leq 1 \quad (2)$$

若任务集中所有消息均满足上式, 则该任务集可调度。其中: C_i 为消息 i 的传输时间, D_i 为消息 i 的截止时间, B_i 为消息 i 的最大阻塞时间。

我们通过计算可以得到相对截止时间, 尽管这些值可能在数值上的确有些差异, 但是在将相对截止时间进行分区时, 分割所得到的每个区间是有长度的, 无法保障不同的截止时间落到不同的区间中, 从而导致不同相对截止时间的消息得到相同的优先级。这是“分区”方案所带来的误差, 且无法避免, 将这种误差称之为“量化误差”。由图 (1) 可得, 最糟糕的情况下, 即两个相对截止时间分别无限接近于某个区间的上下限, 此时量化误差最大可近似等于基本时间单元 U 。因此, 在量化误差的影响下, 判定式可更新为下式:

$$\sum_{j=1}^i \frac{C_j}{D_j - U} + \frac{B_i}{D_i - U} \leq 1 \quad (3)$$

设 $x_i = \frac{U}{D_i}$, 结合实际, 显然只有在 $U < D_i$ 时才有意义, 即, $x_i < 1$ 。因此判

定式 (3) 可改写为:

$$\sum_{j=1}^i \frac{C_j}{D_j(1-x_j)} + \frac{B_i}{D_i(1-x_i)} \leq 1 \quad (4)$$

取 $\max \{x_i\} = x$, 则:

$$\sum_{j=1}^i \frac{C_j}{D_j} + \frac{B_i}{D_i} \leq 1 - x \quad (5)$$

对比式 (2)、(5) 可以看出, 量化误差对 CAN 总线的消息传输带来影响, 且使得任务可被调度的条件更为严苛。

若存在消息 m_i 和 m_j 的标识符分别为 I_i 和 I_j 且 $I_i > I_j$, 即 m_j 的优先级高于 m_i 。参考图 1, 当两个消息的相对截止时间十分接近时, 且 $D_i < D_j$, 此时 m_i 的优先级应高于 m_j , 由于两个消息的相对截止时间十分接近, 导致 D_i 和 D_j 很有可能被分到同一个区间内, 因此此时 m_i 和 m_j 被分配到同一个优先级, 而 CAN 总线中消息的标识符是唯一的, 此时消息的优先级由原先的标识符决定, 即 m_j 的优先级高于 m_i , 此时出现了优先级反转现象。针对于这一问题, 在平均分区的基础上提出双幂函数分区的方法。

2 双幂函数分区 EDF 算法

2.1 双幂函数分区的 EDF 算法

由于平均分区的缺陷, 使得优先级反转现象频出, 也正是基于此, 本论文提出新的幂函数分区方法。

具体过程如下: 采用以 a 为幂指数的方式对相对截止时间 D_{\max} 进行分区, a 的值取决于实际的系统情况。为简化计算, 以及考虑到 CAN 总线通讯时各节点处理器的工作情况, 第二次使用幂函数分区时, 幂指数取 1。幂函数分区使得不同截止期的消息更容易分到不同的母区间内, 更好地保证了消息的实时性。分区方法如图 2 所示。

假设消息在 0 时刻释放, 所有消息的最大相对截止时间为 D_{\max} , 将其划分为 $k+1$ 个母区间 $\{I_1, I_2, I_3, \dots, I_k, I_{k+1}\}$, 再将每个母区间 I_i 按照幂函数分区的方法分成 q 个子区间, 每个子区间称为基本时间单元 U 。由图 2 可得: 第一个母区间 I_1 的范围为 $[0, \frac{D_{\max}}{k^a}]$, 第 i 个母区间的范围是 $[\frac{D_{\max}}{(k+2-i)^a}, \frac{D_{\max}}{(k+1-i)^a}]$, 最后一个母区间的范围是 $[\frac{D_{\max}}{2^a}, D_{\max}]$ 。由此我们可得出第 i 个母区间的大小为 $\frac{D_{\max}}{(k+1-i)^a} - \frac{D_{\max}}{(k+2-i)^a}$ 。采用双幂函数分区的方法, 则第 i 个母区间第一个子区间的范围为 $[\frac{D_{\max}}{(k+2-i)^a},$

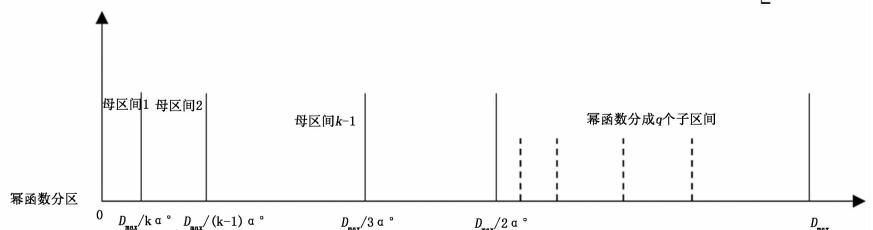


图 2 双幂函数分区示意图

$\frac{D_{\max}}{q} \left[\frac{1}{(k+1-i)^a} + \frac{(q-1)}{(k+2-i)^a} \right]$], 则第 i 个母区间第 j 个子区间的范围为: $\frac{D_{\max}}{(q+2-j)} \left[\frac{1}{(k+1-i)^a} + \frac{(q+1-j)}{(k+2-i)^a} \right]$, $\frac{D_{\max}}{(q+1-j)} \left[\frac{1}{(k+1-i)^a} + \frac{(q-j)}{(k+2-i)^a} \right]$, 第 i 个母区间第 q 个子区间的范围为: $\left[\frac{D_{\max}}{2} \left[\frac{1}{(k+1-i)^a} + \frac{1}{(k+2-i)^a} \right], \frac{D_{\max}}{(k+1-i)^a} \right]$, 因此可求得每个基本时间单元的大小为:

$$U_{i,j} =$$

$$D_{\max} \left(\frac{1}{q+1-j} - \frac{1}{q+2-j} \right) \left[\frac{1}{(k+1-i)^a} - \frac{1}{(k+2-i)^a} \right] \quad (6)$$

2.2 可调度性分析

结合图 2, 考虑 $i \geq 2$ 的一般情况, 记 D_i 的最小值为 D_{\min} , 则 $D_{\min} = \frac{D_{\max}}{(k+2-i)^a}$, 即母区间的下界。所以分析如下:

$$\frac{U_{i,j}}{D_{\min}} = \left(\frac{1}{q+1-j} - \frac{1}{q+2-j} \right) \left[\frac{(k+2-i)^a}{(k+1-i)^a} - 1 \right],$$

$$\therefore \frac{U_{i,j}}{D_i} \leq \frac{U_{i,j}}{D_{\min}},$$

$$\therefore 1 - \frac{U_{i,j}}{D_i} \geq$$

$$1 - \left(\frac{1}{q+1-j} - \frac{1}{q+2-j} \right) \left[\left(1 + \frac{1}{k+1-i} \right)^a - 1 \right]$$

令右式记为函数 $f(x)$, 利用数学方式求极限^[8]:

$$\therefore f(x)_{\min} = f(k) = 1 - \left(\frac{1}{q+1-j} - \frac{1}{q+2-j} \right) (2^a - 1)$$

所以如果已有:

$$\sum_{j=1}^i \frac{C_j}{D_j - U_{i,j}} + \frac{B_i}{D_i - U_{i,j}} =$$

$$\sum_{j=1}^i \frac{C_j}{D_j \left(1 - \frac{U_{i,j}}{D_j} \right)} + \frac{B_i}{D_i \left(1 - \frac{U_{i,j}}{D_i} \right)} \leq$$

$$\sum_{j=1}^i \frac{C_j}{D_j} * \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{q+1-j} - \frac{1}{q+2-j} \right) (2^a - 1)} +$$

$$\frac{B_i}{D_i} * \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{q+1-j} - \frac{1}{q+2-j} \right) (2^a - 1)} \leq 1$$

则必有:

$$\sum_{j=1}^i \frac{C_j}{D_j} + \frac{B_i}{D_i} \leq 1 - \left(\frac{1}{q+1-j} - \frac{1}{q+2-j} \right) (2^a - 1) \quad (7)$$

记 $\max \left\{ \left(\frac{1}{q+1-j} - \frac{1}{q+2-j} \right) (2^a - 1) \right\} = X$ 则判定式可改写为:

$$\sum_{j=1}^i \frac{C_j}{D_j} + \frac{B_i}{D_i} \leq 1 - X \quad (8)$$

显然, 满足判定式 (8) 时, 任务集是可被调度的,

各参数的取值取决于实际环境中消息截止期的分布范围, 选取合适的参数值可以获得合适的分区范围, 从而使得调度性能得到优化。通过对比图 1 和图 2 可以发现, 采用双幂函数分区时, 可以将接近起始时间的区域分区更小, 提高精度, 从而使得不同截止期的消息可以分配到不同的母区间, 有效减少了截止期相近的消息被分配到同一个母区间内的概率。与平均分区相比, 调度的条件也变得更加苛刻, 这是保证消息实时性所必须要达到的前提条件。

3 实验验证与分析

在上一章节, 借助量化误差的概念理论上给出了消息集可调度的判定准则, 接下来我们通过系统模拟方式来验证是否满足可调度性。采用系统模拟方式简单易行, 虽然结果不能完全反应系统的真实情况, 但能够作为一种辅助手段去验证我们提出的双幂函数分区调度算法。

参考本文所提出的改进的 EDF 调度算法, 采用 CANoe 平台进行仿真实验。CANoe 的主要组成部分: 模拟界面编辑、CANdb++ 编辑器、CAPL 浏览器、面板设计等。目前市面上流行的几种总线, 如 CAN、LIN、FlexRay、以太网等, 均可在 CANoe 上实现仿真测试。通过 CANoe 可以将所有节点虚拟化, 对于各个节点相应的通信数据可以使用 CANdb++ 编辑器建立所需要的数据库, 并通过 CAPL 语言编写各 CAN 节点程序实现节点间的通讯、错误处理等。

此外, 汽车工程师协会 (SAE) 提供了一个“基准”应用^[9], 其描述了在原型电动汽车上的 7 个不同子系统之间发送的一组信号。尽管这个汽车控制系统是使用点对点链路设计的, 但是这组信号为说明 CAN 总线在复杂分布式实时控制系统中的应用提供了一个很好的例子, 因此, 针对于本次实验, 我们将通过 CANoe 搭建出此网络通信模型。其中 7 个子系统分别是: 电池 (Battery), 车辆控制器 (V/C), 逆变器/电机控制器 (I/M C), 仪表盘显示 (Ins), 驱动器输入 (Driver), 制动器 (Brakes), 变速器控制 (Trans), 如图 3 所示。

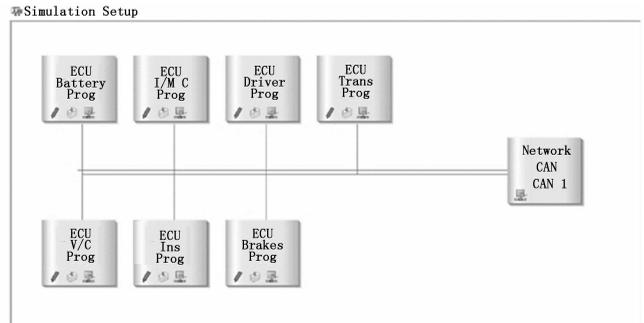


图 3 节点示意图

连接这些子系统的网络需要处理总共 53 个信号, 按照信号的接收方、发送方、信号周期以及信号长度等要求将信号打包成 10 个消息, 如表 1 所示。根据表中信

息, 通过操作 CANdb++ , 将所有信号打包封装, 并且对该网络的相关参数进行配置, 如波特率、采样点等。根据表 1 消息矩阵中消息的周期分布情况, 同时在满足判定式 (8) 的前提下, 可将分区中各参数选取为: $a=2, k=16, q=8$ 。

表 1 消息矩阵

消息序号	发送方	接收方	周期/ms	长度/bit
1	Battery	Ins	5	55
2	I/M C	V/C	10	2
3	V/C	Brakes	20	10
4	Driver	I/M C	10	16
5	I/M C	Trans	20	52
6	Battery	Driver	5	16
7	Driver	V/C	20	25
8	Brakes	Ins	100	16
9	Trans	Ins	50	6
10	Trans	V/C	50	16

CAN 网络中的节点在收发消息时, 依据本文所提出的双幂函数分区 EDF 调度算法, 利用 CAPL 编程对消息以及通讯进程进行动态处理, 以实现合理的调度。具体实现过程如下: 在本文的调度机制下, CAN 节点在发送消息前, 计算该消息的相对截止时间, 然后依据所得相对截止时间算出对应的母区间和子区间号, 将对应的区间号转换为消息的优先级并进行进制转换得到消息的标识符, 再根据当前的标识符进行仲裁。部分程序设计如下所示:

```

if(msg4.DIR! = TX)
{
t_new=timeNow()/100000.0+0.16;
write("t_new= %f", t_new);
D=d-t_new-init;
count++;
if(D>0.001&&D<62.5)
{
g=1;
h=_floor(7-(1000.0/(16 * D)));
}
else if(D>62.5)
{
g=_floor(5-exp(1000/D));
h=_floor((exp(6-g) * 6 * D-7000)/(exp(6-g) * D-1000));
}
p=h+(g-1) * 5;
write("p4= %d", p);
p=0x14-p;
p=p<<18;

```

对于双幂函数分区调度算法的网络性能分析, 我们主要将关注点放在最坏响应时间上, 最坏响应时间是消

息的最大时延, 即消息在队列中的最长排队时间和传输时间的总和, 因此实时性的强弱在数据上最直观的体现就是最坏响应时间的大小。其中, 挑选出 5 组周期差别较大的消息通过对比平均分区方法来验证双幂函数分区的优越性。每组实验 3 次后计算“消息最坏响应时间”的平均值, 实验结果如图 4 所示。

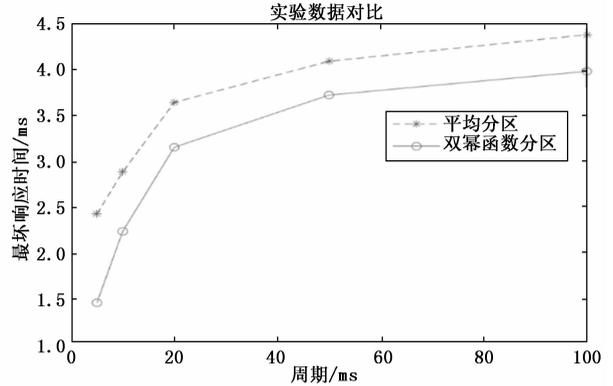


图 4 消息最坏响应时间

结合实验结果, 对比传统的基于平均分区 EDF 调度算法, 我们可以发现本文提出的基于双幂函数分区方法所具有的优点:

1) 针对于消息集的截止期, 采用传统的平均分区 EDF 调度算法 (分区大小为 2 ms), 在对标识符进行编码时至少需要 7 位才能够满足编码要求, 而采用本文的方法, 只需要 6 位就可以满足需求。

2) 通过计算可以得知, 在本文的试验参数下, 最小的子区间大小约为 0.05 ms, 相较于平均分区的 2 ms, 明显提高了分区精度, 换言之, 在经历一段时间后, 消息的截止期在不断地减小, 那么仍然会导致多个消息的截止期落在同一个分区内, 从而获得同样的优先级, 而本文的双幂函数分区方法可以将截止期划分至微秒级, 从而保证了较高的辨识度。

3) 采用双幂函数分区的 EDF 调度算法, 可以降低消息集的最坏响应时间, 从图 5 中可以观察到 20 ms 以内的消息, 即高优先级消息, 最坏响应时间的减少尤为明显, 这也验证了第二点, 双幂函数分区现在对较小的截止期上依然保证了很强的辨识度。

显然, 通过双幂函数分区的方法进行调度, 分区误差进一步减小, 对于截止期最终落在哪个分区更为精确, 降低了因优先级反转而无法调度的情况, 使得消息的最坏响应时间得到了有效的缩减, 从而提高了网络传输的实时性。

4 结束语

本文对比平均分区 EDF 调度算法, 对于量化误差引起的消息不可被调度问题, 引入一种双幂函数分区的方法。理论分析量化误差对该方法的影响, 并论证了该方法