

文章编号: 1001-0920(2004)09-1054-03

ControlNet 现场总线 MAC 层控制方法分析

方晓柯, 王建辉, 钱晓龙, 顾树生

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: ControlNet 现场总线是一种高速的、确定性的网络, 它在控制级设备中得到了广泛的应用。在对比了几种常用 MAC 控制方法的基础上, 对 ControlNet 的核心技术——CTDMA 进行了深入的分析与探讨, 总结了 ControlNet 的优缺点, 提出了在组态时应遵守的规则。

关键词: 并存时间多路存取; 介质访问控制; ControlNet; 现场总线

中图分类号: TP336 **文献标识码:** A

Analysis of media access control for ControlNet fieldbus

FANG Xiao-ke, WANG Jian-hui, QIAN Xiao-long, GU Shu-sheng

(Institute of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Correspondent: FANG Xiao-ke, E-mail: fang-xiaoke@163.com

Abstract: The ControlNet is a high-speed and deterministic network. It is applied to equipment of control level widely. Based on the contrast of several common MAC control method, the key technology of the ControlNet, CTDMA, is analyzed in detail. The advantage and disadvantage of ControlNet are summarized. And several regulations to the configuration of ControlNet are presented.

Key words: CTDMA; MAC; ControlNet; fieldbus

1 引言

ControlNet 作为国际电工委员会宣布的现行的 8 种现场总线技术标准之一, 是由美国罗克韦尔自动化公司于 1997 年推出的。它是一种面向控制层的高速现场总线网络, 波特率最高可达 5 Mbits/s^[1]。在工业控制中, 对网络要求的重要指标之一就是实时性, 这也是目前广泛应用于全球的以太网不能直接应用在控制领域的主要原因。而在总线等共享传输介质的通信系统中, 数据链路层 (ISO/OSI 参考模型中的第 2 层) 的子层——介质访问控制 (MAC) 层对网络的实时性、可靠性起到了关键性作用, 因此有必要对它进行深入分析, 这也是现场总线研究的热点之一。

2 ControlNet 的 MAC 方法——CTDMA

现场总线网络属于广播式网络, 仅有一条通信通道, 由网络上的所有节点共享。这就产生了所有节点如何使用一个共享通道的问题。MAC 层就是用来解决共享信道的使用权的分配问题。在计算机通讯网络中 MAC 方法大体上分为 3 大类: 固定分配类, 随机竞争类和按需分配类^[2,3]。ControlNet 针对现场总线的适用场合提出了一种新型的 MAC 方法: 并存时间多路存取 (CTDMA) 方式。在这种方式下, 节点可按需占用带宽, 提高了系统带宽总的利用率, 灵活性增强。为了对 CTDMA 技术进行深入的分析, 下面简要说明 ControlNet 的通讯模式及 MAC 帧的结构。

收稿日期: 2003-03-20; 修回日期: 2003-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60274024)。

作者简介: 方晓柯 (1973—), 女, 北京人, 讲师, 博士生, 从事现场总线技术及其在智能控制中应用的研究; 顾树生 (1939—), 男, 黑龙江绥化人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统的频域控制理论、先进控制技术在工业中的应用等研究。

2.1 通讯模式与 MAC 帧的结构

与工业自动化网络中常用的源/目的通讯模式不同, ControNet 采用了一种新的通讯模式: 生产者/消费者模型 生产者即数据的发送者, 消费者即数据的接收者 每一条数据按内容来标识, 采用广播方式发送到网络上 数据的接收与否由接收节点通过对标识符的筛选来确定 与源/目的模型相比, 当同一条信息传递给 N 个节点时, 只需要发送一次即可, 因此提高了网络的通讯效率

ControNet 的 MAC 帧格式如图 1 所示 它中间的数据部分由 0 个或多个链连接帧 Lpacket 组成, 其长度不能超过 510 个字节 如果 MAC 帧包含 0 个 Lpacket, 则称为 NULL 帧 每个 Lpacket 都包括一些“应用信息”, 如帧长、标识符以及数据等 因每个节点发送数据的长度不同, 所以不能根据固定的时间间隔来触发下一个节点的发送, 因此 ControNet 采用了一种特殊的令牌传递机制——隐性令牌传递来控制节点的发送次序^[4].

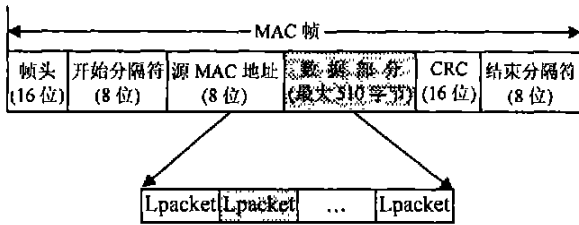


图 1 MAC 帧格式

2.2 CTDMA 技术

ControNet 中的节点对网络的访问是由时间来确定的 每个节点只能在每一个网络更新时间 (NUT) 中指定的时间片内传输数据 对节点的这种传输机会的控制由 CTDMA 算法来完成 NUT 是一个可以由用户事先组态的网络更新时间, 它决定了网络的循环周期 ControNet 技术规范规定, 可组态的 NUT 时间为 0.5~100 ms, 默认值为 5 ms 每个 NUT 由以下 3 个部分组成^[1,4]:

1) 预定时间部分

NUT 的第 1 部分用于传送对时间有苛刻要求的控制信息, 如 I/O 中的数字量、模拟量、对等的内部互锁数据等 CTDMA 算法保证对控制信息有发送要求的每个节点在这一部分中都有一次发送机会, 可以用来传送实时信息 用 S_{MAX} 表示在 ControNet 网络中, 需要利用预定时间段进行信息传送的最高的网络节点号, 它需要用户事先组态好 预定时间段的细节部分如图 2 所示

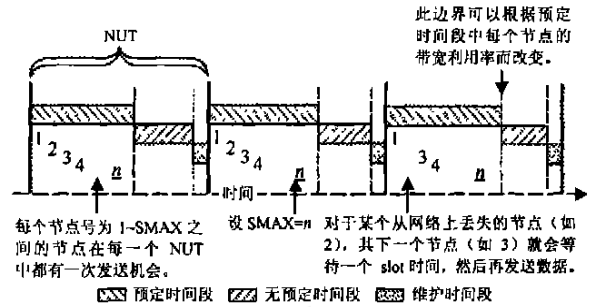


图 2 预定时间段

图 2 中 slot 时间是指信号在链路上走一个来回所需的最小时间, 它与链路的物理特性有关, 如电缆的长度, 中继器的个数等 若网络上某个节点在此次发送机会中没有数据要传输, 那么它必须发一个 NULL 帧 而每一个有数据要发送的节点, 在每次传送机会到来时只能发送一个且仅一个 MAC 帧, 其总长度可变 ControNet 技术规范中规定, 节点地址越低, 优先级越高 因此, 1 号节点最先发送数据, 然后依次往下一直到 S_{MAX} 号节点 节点地址大于 S_{MAX} 的节点不在预定时间段内发送数据

2) 无预定时间部分

NUT 的第 2 部分用于传送对时间无苛刻要求的显性报文, 如建立连接、点对点信息数据、程序的上载和下载等 CTDMA 算法根据网络上的控制信息流的负载量, 在不影响预定时间部分的前提下, 利用“节点号地址递增”机制保证了至少有一个节点在一次 NUT 中传送显性信息 用 U_{MAX} 表示在 ControNet 网络中, 利用无预定时间段进行信息传送的最高的网络节点号, 它也需要用户事先组态好 注意: U_{MAX} 应大于或等于 S_{MAX} . 无预定时间段的细节部分如图 3 所示

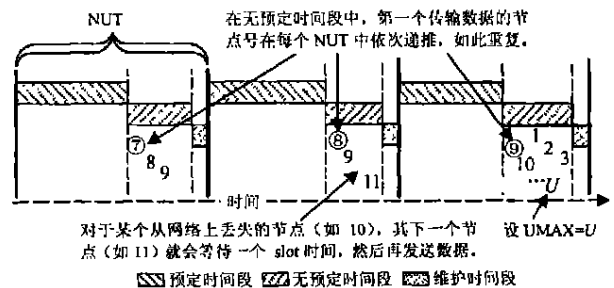


图 3 无预定时间段

NUT 中的无预定部分在所有 Scheduled 节点发送完信息后开始, 在维护时间段开始之前结束 所有地址从 1~ U_{MAX} 的节点都可依次循环使用这段时间, 直到 $U_{unscheduled}$ 时间用完 每个节点在一

个NUT的无预定时间部分可能有多次发送机会,但不能保证在每次都有机会发送

另外,需要注意的是,UMAX应大于或等于SMAX。这样,地址 $N - SMAX$ 的节点可以传送Scheduled信息和Unscheduled信息; $SMAX < N$ 的节点只可以传送Unscheduled信息;而 $N > UMAX$ 的节点不能在网上发送任何信息

3) 维护时间段

维护时间段是NUT中的最后一部分,主要用来进行网络维护,保证各节点同步。在这段时间内,所有节点停止传送数据,仅有网络地址最小的节点(称为“缓和节点”),可以发送称为“协调帧”的维护信息。协调帧在每一个NUT中都要发送,若节点在连续的两个NUT中都没有收到协调帧,则具有最低MAC地址的节点将在第3个NUT的维护时间段开始发起协调帧。当一个协调节点发现另一个节点有比它低的MAC地址,它会立即停止自己作为协调节点的角色。从上述分析中可以看到,实际上是由网络上某个具有最低MAC地址的节点在管理整个网络,这个承担起管理任务的节点,其术语叫Keeper。Keeper应具有存储和应用预定带宽信息和网络组态参数(如NUT, SMAX, UMAX等)的能力,因此,也只有象PLC这样的设备才可作为Keeper。

3 ControlNet系统的优化问题

从上面对MAC层的分析中可以看到,要想使用好ControlNet,面临的一个重要问题就是系统的优化。

用户可以用相应的软件工具对ControlNet进行组态。其中最主要的是要对NUT, SMAX, UMAX, RPI等参数进行设置。用户应根据网络的实际配置情况对它们进行初步计算,然后组态软件根据系统的实际情况进行校验,对不合理的参数作出相应的调整,用户满意后才可下载到整个网络上。

NUT的大小决定了系统的循环周期,太大,系统的实时性变差;太小,影响了预定时间和无预定时间,使得系统的控制信息和显性报文的发送得不到保证。因此它的选取至关重要,下面从理论上分析决定NUT大小的因素。

由CTDMA控制规则可知

$$NUT = t_{\text{scheduled}} + f_{\text{unscheduled}} + f_{\text{maintenance}} \quad (1)$$

式中: $t_{\text{scheduled}}$, $f_{\text{unscheduled}}$, $f_{\text{maintenance}}$ 分别对应系统的预定时间、无预定时间和维护时间。

考虑到最坏的情况,即在每一个NUT内,若所有Scheduled节点都有数据发送,且每个MAC帧中Lpacket部分的长度都达到了其规定的最大值510个字节;同时,无预定时间段中由于CTDMA机制保证了至少要有有一个节点发送数据,由此可得

$$\begin{aligned} t_{\text{scheduled}} &= T \times SMAX, \\ f_{\text{unscheduled}} &= T, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 T 为节点发送一个最大MAC帧(Lpacket部分为510个字节)所需的时间。

从式(2)中可以看到,当网络的结构、长度和所带的节点数等物理特性确定后, $f_{\text{maintenance}}$ 和 T 值也就确定了,因此NUT的大小主要受SMAX值的影响。

由ControlNet的MAC方法可知,系统按节点号由小到大依次分预定时间段和无预定时间段发送数据,若地址号不连续,则空地址将占有一部分带宽,从而减少了总体可用带宽。所以仔细选择地址可以提高网络的性能。

通过分析及实践证明,可对与MAC层相关的组态信息总结出如下规则:

1) 将需要发送强实时性数据的节点的地址号从1开始依次递增,并且地址号应连续,中间不要有空的地址,它们组成Scheduled节点,这样SMAX才能取最小的值。在实际应用中,Scheduled节点一般为PLC等设备。

2) 将不需要发送强实时性数据的节点的地址号往后排,但不要离SMAX太远,并使其空地址尽可能少,减少对带宽的浪费,它们组成Unscheduled节点。在实际应用中,Unscheduled节点一般为RSView, PanaView等设备。

4 结 语

ControlNet网络采用生产者/消费者模型,通过CTDMA控制机制,结合隐性令牌的传递方法,保证了系统的实时性和确定性。其最适用于对时间有苛刻要求的工业现场,是一种高速的、确定性的网络。在组态时应遵从相应的规则使系统的网络性能得到优化。它的不足之处是:若Scheduled节点数过多,预定时间段必须延长,NUT也随之变大,则系统的时延增加,响应性变差;若节点发送的数据大于510个字节,则一个MAC帧放不下,只能等下一个发送机会的来临,因此不适合于大数据量传输的场合。此外,从物理层(ISO/OSI模型的第1层)角度来讲,它不具备向现场设备供电及本质安全的性能,因此,ControlNet网络经常应用于控制级设备之间。

(下转第1063页)

及输入流量大于或等于路段通行能力时, 输出流量的变化规律可由式(19)表示, 路段行程时间的变化规律由式(20)表示. 这与现实中的交通流情形是相吻合的.

利用展开式对不可解的超越方程的解进行研究, 是分析具有指数函数形式的路段行程时间的解的方法之一. 对于实际路段中的输入流量远远复杂于本文所讨论的情形, 如何利用展开式的方法得出解析解值得进一步研究.

参考文献(References):

- [1] 黄海军. 城市交通网络平衡分析理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [2] Carey M, McCarney M. Behaviour of a whole-link travel-time model used in dynamic traffic assignment [J]. *Trans on Research - B*, 2002, 36(1): 83-95.
- [3] Daganzo C F. Properties of link travel times under dynamic load[J]. *Trans on Research - B*, 1995, 29(2): 95-98.
- [4] Friesz T L, Bernstein D, Smith T E, et al. A

variational inequality formulation of the dynamic network user equilibrium problem [J]. *Operations Research*, 1993, 41(2): 179-191.

- [5] Papageogiou M, Blösseville J M, Hadj-Salem H. Macroscopic modeling of traffic flow on the Boulevard Peripherique in Paris[J]. *Trans on Research - B*, 1989, 23(1): 29-47.
- [6] Ran B, Boyce D E, LeBlanc L J. A new class of instantaneous dynamic user-optimal traffic assignment models[J]. *Operations Research*, 1993, 41(1): 192-202.
- [7] Ran B, Boyce D E. A link-based variational inequality formulation of ideal dynamic optimal route choice problem [J]. *Trans on Research - C*, 1996, 4(3): 1-12.
- [8] Richards P I. Shock waves on the highway [J]. *Operations Research*, 1956, 4(3): 42-51.
- [9] Wu J H, Chen Y, Florian M. The continuous dynamic network-loading problem: A mathematical formulation and solution method [A]. *Presented at the 3rd Euro Working Group Meeting on Urban Traffic and Transportation*[C]. Barcelona, 1995. 27-29.

(上接第 1056 页)

参考文献(References):

- [1] 吴乃优, 吴小洪, 王晓初, 等. 新一代实时控制网络平台 (ControlNet) 及其应用[J]. *自动化仪表*, 2000, 21(5): 19-21.
(Wu Naiyou, Wu Xiaohong, Wang Xiaochu, et al. The new generation of real-time control network platform (ControlNet) and its application [J]. *Proc*

Automation Instrumentation, 2000, 21(5): 19-21.)

- [2] 黄皆雨. 计算机通信网[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- [3] Andrew S, Tanenbaum. 计算机网络[M]. 第3版. 熊桂喜, 王小虎, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 周明. 现场总线控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

(上接第 1059 页)

参考文献(References):

- [1] Newell G F. The rolling horizon scheme of traffic signal control [J]. *Transportation Research Part A*, 1998, 32(1): 39-44.
- [2] Wann-Ming Wey. Model formulation and solution algorithm of traffic signal control in an urban network [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(4): 355-377.
- [3] Hong K Lo. A novel traffic signal control formulation [J]. *Transportation Research Part A*, 1999, 33(6): 433-448.
- [4] 杨煜普, 欧海涛. 基于再励学习与遗传算法的交通信号自组织控制[J]. *自动化学报*, 2002, 28(4): 564-568.
(Yang Y P, Ou H T. Self-organized control of traffic signals based on reinforcement learning and genetic algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(4):

564-568.)

- [5] Hong K Lo. Dynamic network traffic control [J]. *Transportation Research Part A*, 2001, 35(8): 721-744.
- [6] 陈国良. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [7] Dorigo M, Gambardella L M. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, 1996, 26(1): 29-41.
- [8] Dorigo M, Bonabeau E, Theraulaz G. Ant algorithm and stigmergy [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2000, 16(8): 851-871.
- [9] 王炜. 交通工程学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [10] 尹宏宾, 徐建闽. 道路交通控制技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2000.