

# 现场总线 MAC 层的分析

徐应跃, 吴爱国

(天津大学 电气自动化及能源工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 现场总线的 MAC 层在很大程度上决定了网络的实时性与可靠性, 可以说是现场总线系统的关键。介绍了 MAC 层的两大体系: 令牌环/令牌总线和 CSMA/CD, 并深入分析了它们各自的代表: PROFIBUS 和 LONWORKS 的 MAC 层的实现方式, 并探讨了它们的优缺点。

**关键词:** 现场总线; MAC 层; 令牌环/令牌总线; CSMA/CD

**中图分类号:** TP273+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-393X(2001)02-0004-04

## 1 现场总线概述

现场总线是应用在生产现场、在微机化测量控制设备之间实现双向串行多节点数字通信的系统。现场总线技术将专用微处理器置入传统的测量控制仪表, 使它们各自都具有了数字计算和数字通信能力, 采用可进行简单连接的双绞线等作为总线, 把多个测量控制仪表连接成网络系统, 并按公开、规范的通信协议, 在位于现场的多个微机化测量控制设备之间以及现场仪表与远程监控计算机之间, 实现数据传输与信息交换。简而言之, 它把单个分散的测量控制设备变成网络节点, 以现场总线为纽带, 把它们连接成可以相互沟通信息、共同完成自控任务的网络系统与控制系统。现场总线是当今自动化领域技术发展的热点之一, 被誉为自动化领域的计算机局域网。几种有影响的现场总线有: 基金会现场总线(FF), LONWORKS, PROFIBUS, CAN 和 HART。

## 2 工业环境对网络的特殊要求

现场总线系统完成的是工业过程的控制, 因此其通信系统与一般办公室局部网络有所不同, 现场总线网络具有以下特征:

(1) 快速实时响应能力, 对一些工业信号能做出及时响应。

(2) 具有极高的可靠性, 系统应长时间无故障运行。

(3) 容错能力强, 应有极强的故障诊断能力, 有效的出错控制, 及时发现信道中传输的错误数据包。

(4) 分层结构, 易于实现标准化、通用化。

## 3 MAC 层概述

现场总线网络属于广播式网络, 仅有一条通信信道, 由网络上的所有机器共享。这就产生当信道的使用产生竞争时, 如何分配信道的使用权问题。这些用来决定广播信道中信道分配的协议属于数据链路层(OSI 模型的第 2 层)的子层, 称作介质访问控制 MAC 层。MAC 层是现场总线系统的关键, 在很大程度上决定了网络的实时性与可靠性。因此, 必须对它进行深入的分析。

为避免同一时间有几个设备同时争用传输介质, 需要有某种介质访问控制方式, 以便协调各设备访问介质的顺序, 在设备之间交换数据。通信中对介质的访问可以是受控的, 即各工作站可用一定的算法调整各站访问介质顺序和时间。如时分复用、令牌环、令牌总线, 也可以是随机的, 即各工作站可在任何时刻, 任意地访问介质, 如 CSMA/CD(多路载波侦听/碰撞检测)。

### (1) 时分复用(TDM)

时分复用对每个节点分配特定的一段时间, 每个节点在这段时间内占有总线。可以看出网络的延时是可以计算的。例如有 32 个节点, 每个时间片节点可发送 1 字节, 则每个节点可在 32 个时间片内发送 1 字节。TDM 的主要缺点是如果有些节点无内容需发送, 带宽就浪费掉了, 起始帧的失步会导致所有通讯的中断, 这是灾难性的错误;

并且,一个节点频繁地输入输出会产生超过一个时间片所能处理的信息,在这种重载情况下,系统对输入输出的响应会大幅变化。由于这些缺点,现场总线很少使用时分复用。

### (2) 令牌环/令牌总线。

它们都使用一特殊的消息——令牌。只有拥有此令牌的站点,才有权向环路上发送报文。站点在发送完毕后,将令牌交给网上下一个站点。在令牌总线方式中,带有目的地址的令牌帧广播到总线上所有的站点,当目的站识别出符合它的地址,即把该令牌接收。由于任何时刻只会有一个站点发送报文,因而不会发生访问冲突。信息传输的延迟时间由环的大小决定,因此延时是可以估算的。如果所有站都有报文要发送,则最坏情况下,等待取得令牌和发送报文的时间应该等于全部站点令牌传送时间和报文发送时间的总和。另一方面,如果只有一个站有报文要发送,则最坏情况下等待时间只是全部站点令牌传送时间的总和。因此,令牌方式比较适合在实时系统中使用,而且它对轻、重负载不敏感。令牌方式在现场总线中得到较多应用,基金会现场总线和 PROFIBUS 都使用令牌方式。

### (3) 基于 CSMA 的方式。

这种控制方式工作站的发送是随机的,必须在网络上争用传输介质,故称为争用技术。若同一时刻有多个工作站向传输线路发送消息,则这些信息会在传输线上相互混淆而遭破坏,称为“冲突”。为避免由于竞争引起的冲突,每个工作站在发送信息之前,都要监听传输线上是否有消息在发送,这就是“载波侦听”。如果介质是忙的,有三种退避算法:不坚持 CSMA、1-坚持 CSMA 和 p-坚持 CSMA。其中 p-坚持 CSMA 较好协调了冲突概率和介质浪费的问题。CSMA 方式在现场总线中使用的也较多。CAN 总线基于 CSMA 方式,并采用非破坏性总线仲裁技术,当多个节点同时向总线发信息时,优先级较低的节点会自动退出发送,而最高优先级的节点可不受影响地继续传输数据,从而大大节省了总线冲突仲裁时间。而 LONWORKS 的 LONTALK 协议则采用带预测的 p-坚持 CSMA/CD。

## 4 PROFIBUS MAC 层的分析

PROFIBUS MAC 层是应用令牌方式的典范,它旨在满足介质存取控制的基本要求,在复杂的

自动化系统(主站)间通信,必须保证在确切限定的时间间隔中,任何一个站点要有足够的时间来完成通信任务,在复杂的程序控制器和简单的 I/O 设备(从站)间通信,应尽可能快速又简单地完成数据的实时传输。因此,PROFIBUS 总线协议包括主站之间的令牌传递方式和主站与从站之间的主从方式。一个重要的 PROFIBUS 概念是消息循环。它包括主站的动作帧(请求或发送帧)和相应的接收方的确认或响应帧。数据可加在动作帧或响应帧中传送。所有站,除了令牌持有者,应监视所有请求。确认或响应帧必须在确定的时间内到达,否则令牌持有者重发请求。在网络初始化时,最大重发数必须在所有主站中有定义。

PROFIBUS MAC 层的一个主要功能是控制令牌循环时间。主站一接收到令牌,就开始计时,直到下一次令牌到达该站为止。这段时间定义为实际令牌循环时间( $T_{RR}$ )。在 PROFIBUS 网络中还定义有理想令牌循环时间( $T_{TR}$ )。令牌持有时间  $T_{TH}$  为  $T_{RR}$  与  $T_{TR}$  之差。

PROFIBUS 定义两种消息:高优先级消息和低优先级消息。它们各自使用独立的输出序列。如果令牌到达时是滞后的,即实际令牌循环时间  $T_{RR}$  大于理想令牌循环时间  $T_{TR}$ ,  $T_{TH} < 0$ ,主站最多只能执行一个高优先级消息循环。如果不滞后,  $T_{TH} > 0$ ,主站开始执行高优先级消息循环。 $T_{TH}$  值总是在执行消息循环的开始检测,所以一旦一个消息循环开始执行,它总要完成(包括重发),即使  $T_{TH}$  已经在这期间变负。我们把这种情况叫  $T_{TH}$  超载。如没有高优先级消息,则执行低优先级消息循环。

除了区分高低优先级消息循环,PROFIBUS MAC 层还将低优先级消息循环划分为三个子类:轮询表(poll list)、非循环低优先级和间隙表(gap list)。间隙(gap)是介于两连续主站地址之间的地址范围。每个主站必须周期性地检查间隙地址,以支持逻辑环的动态变化。

当所有高优先级消息发送之后,就发送轮询表消息循环。如果轮询表循环在  $T_{TH}$  内完成,则发送非循环低优先级消息,而新的轮询表循环在下次令牌到达后执行。如果轮询表循环占用了几个令牌时间,就不会插入非循环低优先级消息。非循环低优先级消息只在完成轮询表消息循环后才发送。间隙地址最多一个令牌时间检查一次。

图 1 表示 PROFIBUS MAC 层消息处理过程，其中  $pl\_len$  表示轮询表的长度。可见，PROFIBUS MAC 层较好地保障了高优

先权消息的处理，可对紧急事件及时处理，可满足工业环境的实时性要求。

### 5 LONTALK MAC 层的分析

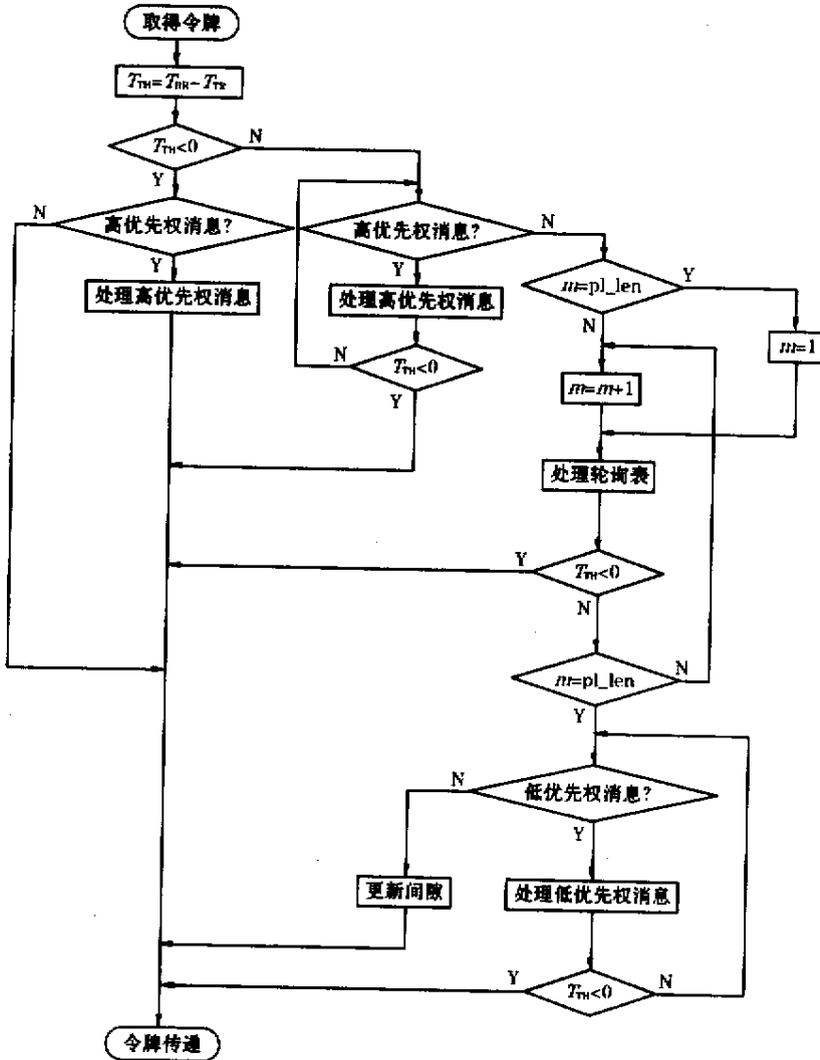


图 1 MAC 层消息处理过程

由于 CSMA 协议有冲突发生，理论上一个节点可能在重载时无限长时间内无法发送，因此普遍认为 CSMA 不适合工业实时应用。但 LONTALK 协议采用可预测的  $p$ -坚持 CSMA，较好地解决了 CSMA 在重载时的性能。

给定的概率  $p$  在一个随机分配的时隙发送报文，而以概率  $q = 1 - p$  把发送推迟到下一时隙。所谓时隙，即为被分成离散的时间区间。时隙数目  $R = 1/p$ 。 $p$  值越小，时隙数越多，延时越大。问题的关键是如何有效地选择  $p$  值。如有  $N$  个

站等待发送数据，则当前的发送完成时，有  $N \cdot p$  个站企图发送。若选  $p$  过大，使  $N \cdot p > 1$ ，则冲突不可避免。若选  $p$  过小，则通道的媒介访问延时太大，通道利用率会大大降低。由于  $p$  值是固定的，很难兼顾这两方面。LONTALK 的  $p$ -坚持 CSMA 能根据网络的负载情况自适应地调整  $p$  值，即网络在轻载的情况下  $p$  值较大，减小媒介的访问延时；在重载的情况下， $p$  值较小，降低冲突的可能性，避免网络拥塞现象。

$p$  值的动态调整取决于随机时隙数的动态调

整, 随机时隙数的调整取决于节点对网络负载的预测。某时刻的网络负载就是该时刻网上将发送消息包的数目  $D$ 。随机时隙数  $R = 16 \cdot D$ 。节点根据预测的  $R$  值以概率  $p = 1/(D \cdot 16)$  发送消息包。当某个节点发送消息时, 它在发送的消息包中插入将要发送该消息的应答节点的数目, 即发送消息包将产生的应答数目, 所有收到该消息包的节点的  $D$  值加上该应答数得到新的  $D$  值, 从而使  $p$  值更新。每个节点在消息包发送结束, 它的  $D$  值自动减 1, 当减到 1 时  $D$  值就不再减少。可见, 能否预测  $D$  值取决于消息服务的选择, 必须使用应答服务, 才能获得产生的应答数。而当使用非应答服务时, 实际就是使用  $D = 1, p = 1/16 = 0.0625$  的  $p$ -坚持 CSMA。由于 LONTALK 的大部分报文默认的是应答服务, 预测  $D$  值的能力还是比较高的。如图 2, 是节点数为 36 的使用非应答服务和使用应答服务的对比。可以看出非应答服务当实际通信量在每秒 500 ~ 1 000 时, 冲突率由 10% 上升至 55%, 而应答服务则维持在 10% 不变。应该看出, 可预测  $p$ -坚持 CSMA 只能降低冲突至最小, 并不能消灭冲突, 而且实际应用中也有许多消息不需要或不适合采用应答服务。因此还有必要有冲突检测(CD)功能。

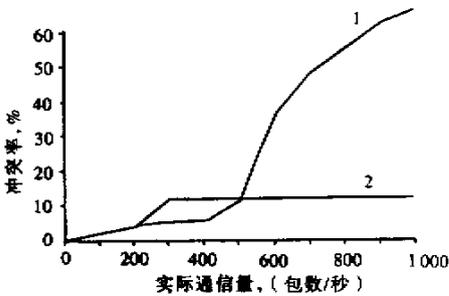


图 2 使用非应答服务与使用应答服务对比图  
注: 1——使用非应答服务 2——使用应答服务

在 LONTALK MAC 层中, 为提高紧急事件的响应时间, 还提供一个可选择的优先级机制, 可为

每一个需要优先级的节点分配一个特定的优先级时隙, 在发送过程中, 优先级数据报文将在那个时隙发送, 优先级时隙在 0 ~ 127 之间取值, 低优先级的节点需等待较多时隙, 而高优先级的节点等待较少。这些时隙加在  $p$ -坚持时隙之前, 非优先级的节点必须等待优先级时隙都完成之后, 再等待  $p$ -概率时隙后才发送, 因此有优先级的节点总比非优先级节点有更快的响应时间。

## 6 比较

以上讨论了现场总线 MAC 层的两大方式体系: 令牌方式和 CSMA/CD 方式, 并详细探讨了两种体系的代表: PROFIBUS 和 LONWORKS 的 MAC 层技术。孰优孰劣, 还难以定论。两者都得到了广泛应用, 都经受住了工业现场的考验。PROFIBUS 广泛应用于加工制造、过程控制和楼宇自动化; LONWORKS 更有全世界 2 000 多个公司使用其产品, 大有成为通用现场总线之势。由于令牌方式当令牌丢失、多令牌时必须要有故障检测恢复功能, 还有将不活动节点从环中去除及将新的活动站点加入环的功能, 这些附加功能大大增加了令牌方式的复杂性, 而且如果单环出现故障, 将使整个环路通信瘫痪, 其可靠性较低。而 CSMA 方式随着研究的深入, 其缺点逐渐克服, 实时性、可靠性都较好, 可方便灵活地完成各种任务, 应用前景更好。

## 参考文献

- [1] Eduardo, Francisco Vasques. Real-Time Fieldbus Communications Using Profibus Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(6).
- [2] Andrew Tanenbaum. Computer Networks[R]. Prentice Hall International, Inc.
- [3] 杨育红. LON 网络控制技术及应用[M]. 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [4] 杨宪惠, 徐用懋. 现场总线技术及其应用[M]. 清华大学出版社, 1998.
- [5] 黄文君, 等. 实时控制系统网络设计[J]. 机电工程, 2000, 3.
- [6] Echelon 公司. LONWORKS Engineering Bulletin[M]. 1995.

## The Analysis of the MAC Layer of Fieldbus

XU Ying-yue, WU Ai-guo

(Institute of Electric Automation and Energy Resources Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The MAC layer largely determines the real-time behavior and reliability of a fieldbus, so it is said to be the key to the fieldbus. The paper discusses two main systems of MAC layer: token ring/token bus and CSMA/CD. Moreover, we analyze the methods of realizing MAC layer, which are used by PROFIBUS and LONWORKS, representatives of the two systems. And their advantages and disadvantages are also discussed.

**Key words:** fieldbus; MAC layer; token ring/token bus; CSMA/CD