

PROFINET 的实时性及其协议分析

张国栋, 王有春

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 针对目前现场总线技术无法满足工业控制领域对信息传输的速率以及信息传输实时性的较高需求, PROFINET 实时协议迅速发展起来, 该协议在通信方面较现场总线技术有更好的实时性以及更高的传输速率; 首先对标准 TCP/IP 协议进行了研究, 分析了 PROFINET 对标准 TCP/IP 协议的优化方式; 然后详细介绍了 PROFINET RT 和 PROFINET IRT 的帧结构以及基于具体数据的实时性分析, 为西门子 STEP7 对 PROFINET 的组态配置提供了一定的借鉴作用; 最后采用西门子的 PROFINET IO 设备、IO 控制器等, 通过 STEP7 的组态配置, 验证了 PROFINET IO 之间的通信。

关键词: PROFINET; 实时; RT; IRT; STEP 7

Analysis of Real-time Performance and Protocol Based on PROFINET

Zhang Guodong, Wang Youchun

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to meet the high demand of the transmission rate and real-time performance in industrial control field, a real-time protocol of PROFINET for industrial Ethernet is proposed. The protocol has better real-time performance and higher transmission rate than the field bus technology. Firstly, the standard TCP/IP protocol was studied, and the optimization of the standard TCP/IP protocol for PROFINET was analyzed. Then, the frame structure of PROFINET RT and PROFINET IRT were analyzed in detail. The real-time analysis based on concrete data was introduced and this will be a certain reference for STEP7 configuration of Siemens. Finally, with the help of Siemens PROFINET IO devices and IO controller, through the configuration of Siemens STEP7, the communication between PROFINET IO devices were finally realized.

Keywords: PROFINET; Real-time; RT; IRT; STEP 7

0 引言

20 世纪八九十年代, 现场总线技术飞速发展, 但是随着它在工控界大肆推广之际, 也发现了它的不足及缺点。首先是它的协议标准种类繁多, 难以统一; 其次是它的信息传输速率以及实时性达不到发展的要求^[1]。

PROFINET 是由 PI 推出的开放式以太网标准, 它是基于 IEEE802.3 的用于快速数据交换的 100% 的以太网技术^[2]。PROFINET 是一种应用于自动化领域的以太网标准, 支持不同制造商现场设备之间数据的高速安全通信。因此, PROFINET 为机器与系统的各种创新设计带来了新的契机。如今, 全球已有 28 个 PROFINET 技术中心, 共同努力为用户解答各种 PROFINET 相关问题。

PROFINET 一个重要特性是它具有可伸缩性, 即基于以太网的通信是可以缩放的, 具体来说有 3 个不同实时性能:

(1) 普通的 TCP/IP 通信, 适用于对实时性能没有要求的通信, 例如参数配置及组态;

(2) 实时通信 (RT), 适用于对时间过程数据要求较苛刻的通信, 例如工厂自动化领域。

(3) 等时同步实时通信 (IRT), 适用于对时间过程数据要求特别严格的通信, 例如运动控制领域。

这 3 种不同实时性能等级通信覆盖了自动化领域的全部应用范围^[3]。

1 PROFINET 的实时性分析

实时性, 表示系统对外部事件在确定的时间内做出反应, 确定性表示系统有可以预测的响应。实时系统不仅仅是表现在“快”上, 而更重要的是必须对外来事件在限定时间内做出反应。

表 1 是 PROFINET 与 ISO/OSI 七层模型对应关系, 从表中可以看出 PROFINET 协议模型中省略了几层, 并且在第 2 层添加了实时扩展以及优先级^[4]。

表 1 PROFINET 与 ISO/OSI 模型的对应关系

层	服务	ISO/OSI 参考模型	
7b 应用层	面向用户	PROFINET IO 服务 PROFINET IO 协议	PROFINET CBA
7a 应用层		面向无连接的 RPC	DCOM 面向连接的 RPC
6 表示层	信息语法表示	未使用	未使用
5 会话层	通信(对话)	未使用	未使用
4 传输层	数据传输	UDP(RFC768)	TCP(RFC793)
3 网络层	网络之间通信	IP(RFC791)	
2 数据链路层	无差错传输	全双工(IEEE802.3), 优先级标签(IEEE802.1Q), 实时扩展	
1 物理层	传输比特流	100Base-Tx, 100Base-Fx (IEEE802.a3)	

收稿日期:2016-10-13; 修回日期:2016-11-11。

作者简介:张国栋(1989-),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事测试与控制方向的研究。

普通的 TCP/IP 协议是难以实现实时通信的，因为当信息过载时会增加帧的长度，导致增加线路上的传输时间。此外，处理器处理对应的通信协议栈会占用相对更长的时间，导致增加信息发送的周期。

PROFINET 协议采用优化过的 TCP/IP 协议来达到实时通信的目的，如图 1。标准 TCP/IP 协议的第三层及第四层的作用是对以太网帧进行打包和解包，这就会大大增加数据在协议栈内的停留时间。而 PROFINET 实时协议跳过了这两层，从而大大减少了数据在通信协议栈内的停留时间^[5]。

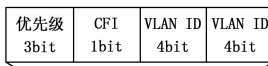


图 1 PROFINET 对标准 TCP/IP 协议的优化

2 PROFINET RT 分析

2.1 PROFINET RT 帧结构分析

PROFINET RT 帧结构如图 2 所示^[6]。



前导码	SFD	目的地址	源地址	以太网类型	VLAN TPID	以太网类型	帧类型标识符	RT 数据	APDU 状态	FCS
7Byte	1Byte	6Byte	6Byte	2Byte	2Byte	2Byte	2Byte	40-1440 Byte	4Byte	4Byte

图 2 PROFINET RT 帧结构

PROFINET 实时协议为了使 RT 数据优先传输，设置了 VLAN 标签，该标签中含有优先级标识符，用于发送数据的优先级设置。从图中可以看出优先级是长度为 3bit 的数据，可以设置 0-7 的优先级，RT 帧主要使用优先级 6 或 7。

RT 帧结构中前面的以太网类型值为 0x8100，表明其后紧跟的是 VLAN 标签。后面的以太网类型值为 0x8892，表明该帧是一个 RT 帧。帧类型标识符描述的是不同设备之间特定的通信信道，通过帧类型标识符与以太网类型的结合，对 RT 帧的识别更加容易。CFI 的值代表的是以太网或者是令牌环网的类型。

2.2 RT 通信中数据转发方式

这里的转发方式主要是针对交换机的，有两种方式：存储与转发 (Store and Forward, S&F) 和直通交换方式 (Cut Through, CT)。在 RT 通信中的转发方式是存储与转发^[7]。

对于 S&F 方式，如图 3 所示，交换机正在转发 PROFINET 报文，报文 1 是非实时的，报文 2 和 3 是实时的，报文 3 的优先级较高。但由于端口 2 正在对报文 1 进行转发，即使它是非实时的也不能中断，所以会首先被发送出去，而报文 2 和 3 按照优先级排列等待发送。所以最终端口 1 发送出去顺序是

报文 1，报文 3，报文 2。

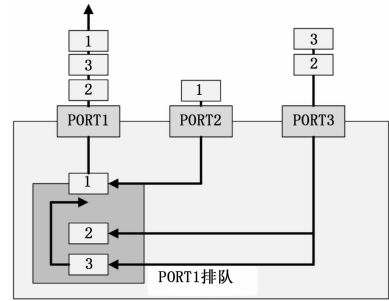


图 3 交换机转发 PROFINET 报文

2.3 PROFINET RT 协议实时性分析

一个完整的帧必须包含前导码以及空闲时间，根据图 4，一个 RT 帧最小为 88 字节，如表 2 所示。在全双工模式下的传输速率为 100 Mb/s，传输每个字节所需的时间为 0.08 μs。因此传输最小的 RT 帧的时间为 7.04 μs。假设数据在传输介质上的速度为光速的 2/3 (即 200000 km/s)，规定两个站之间的最大距离为 100 m，则数据传输的线运行时间为 0.5 μs。于是，在距离 100 m 的两个 PROFINET 站之间发送一个最小 RT 帧的时间为 7.54 μs。

表 2 RT 帧最小长度

帧类别	前导码/SFD	首部/尾部	RT 数据	空闲时间	总计
RT	8B	28B	40B	12B	88B

由于 RT 帧是经过 S&F 方式通过交换机的，举例用西门子的 SCALANCE X200 交换机，查阅手册，最小 RT 帧的 S&F 延迟时间为 10 μs。

现在考虑一种对 RT 数据的转发最为不利的情况：即假设 RT 数据通过交换机时，恰好交换机正在进行最大的非实时以太网报文的转发，此时 RT 数据必须等待该非实时报文发送完毕之后再行传输。最大的非实时以太网报文有 1518 个字节，因此传输该报文的时间为 1518 * 0.08 μs = 121.44 μs，它在交换机内 S&F 延迟时间为 123 μs。于是，在这种情况下，一个最小的 RT 帧通过一台交换机传输至下一设备的时间为 244.44 μs + 10 μs + 7.54 μs = 261.98 μs。

接下来研究最远 IO 设备的刷新时间，为了计算结果的严苛性，公式中假设的数据都是在比较苛刻的情况下给定的。通用 IO 设备刷新公式为：

$$T = N_s * T_{NRT} + N_s * W_{RT} * (R_{PB} + C_{PB}) + D/V$$

其中：T 为传输到最远站所用的时间；N_s 为要刷新的 IO 设备的数目，也就是数据要通过的交换机的总数目；T_{NRT} 为最大非实时以太网报文传输与交换机存储转发的总时间，为 244.44 μs；W_{RT} 为所要传输的 RT 帧字节数，这里取最小字节数，即 88 个字节；R_{PB} 为传输每个字节所用的时间，为 0.08 μs；C_{PB} 为一个字节在交换机内存储与转发所占用的时间，取 0.113 μs；D 为数据传输到某一站的距离；V 为传输介质上数据的发送速度，约为 200 m/μs。

假设有 64 台交换机串联在一起，每台交换机连接一台 IO 设备，每台交换机之间的距离为 100 m，则 D = 64 * 100 m = 6400 m。将上述数据代入公式即可得到最远 IO 设备的刷新

时间:

$$T = 64 * 244.44 \mu s + 64 * 88 * (0.08 + 0.113) \mu s + 6400/200 \mu s = 16.763 \text{ ms}.$$

STEP7 中默认 IO 刷新时间是 1 ms, 但是根据上述计算结果, 假如一个 IO 控制器控制 64 个 IO 设备, 如果使用默认的刷新时间, 那么最远 IO 设备必然会出现数据丢失现象, 导致数据传输故障。假如将刷新时间设置为 17 ms, 则影响设备的实时性。但是根据现场设备的组态配置经验, 上述情况只有很小的几率会发生, 因此只需将最远 IO 设备的刷新时间设置为 8 ms 左右, 就可以既保证设备的实时性能, 又能有效防止数据的传输故障。

上述刷新时间的计算方法适用于任何 PROFINET RT 拓扑结构, 应用上述方法计算实际的 IO 设备的刷新时间, 可以有效避免 IO 设备的数据传输故障。

3 PROFINET IRT 分析

3.1 PROFINET IRT 帧结构分析

PROFINET IRT 帧结构如表 3 所示。

表 3 PROFINET IRT 帧结构

前导码	SFD	目的地址	源地址	以太网类型	帧类型标识符	IRT 数据	FCS
7Byte	1Byte	6Byte	6Byte	2Byte	2Byte	36-1490 Byte	4Byte

由于 IRT 是按时间调度传输的通信, 在 IRT 的现场设备里具有固定的时间调度表来定义准确的发送时间点。因此可以通过时间位置 (Temporal position)、以太网类型 (0x8892) 和帧类型标识符 (Frame ID) 的组合来识别 IRT 帧, 而且在 IRT 帧中不需要 VLAN 标签对发送数据进行优先级分配。

3.2 IRT 通信中数据转发方式

在 IRT 通信中数据在交换机中的转发方式是直通交换方式。

在直通交换方式中, 数据包并不是被临时存放在交换机中, 而是检查该数据包的包头, 获取该数据包的目的地址, 启动内部的动态查找表转换成相应的输出端口, 在输入与输出交叉处接通, 把该数据包直接发送到输出端口, 实现交换功能^[8]。由于该方式只是检查数据包的包头 (通常大约为 14 个字节), 不需要对数据包进行缓存, 因此该种方式既不受数据包大小的限制, 又具有延迟小的优点。

3.3 PROFINET IRT 协议实时性分析

与分析 RT 协议实时性的方法类似, IRT 帧在传输中的延迟主要分为 3 个部分: T_m 代表 IRT 帧经过通信介质传输时产生的延迟; T_c 代表交换机转发 IRT 帧产生的延迟; T_v 代表 IRT 帧经过一个快速以太网端口产生的延迟, 假设传输的 IRT 数据字节数为 D , 传输速度为 V , 则 $T_v = D/V$, 其中 V 为 100 Mb/s。这样, 一个 IRT 帧在整个通信过程中总的传输时间为 $T_{pm} = T_m + T_c + T_v$ 。

PROFINET IRT 有两种性能, 一种是 IRT High flexibility (高度灵活性), 一种是 IRT Top performance (顶级性能)。后者实时性能较前者好, 两者产生这样区别的原因是是否在组态时对通信路径进行了规划。当控制器控制多个设备时, 前者控制器先发送给哪个设备是随机的, 而后者控制器是先发送给最

远的设备, 最后发送给最近的设备。

例如一台以太网控制器控制两台设备, 那么 IRT 帧的发送有两种方式: 一种是先发送给较近的设备, 再发送给较远的设备; 另一种则是相反。不难理解, 第一种发送方式的传输时间为 $T_{pm} = T_{pm1} + T_{pm2} = T_{m1} + T_{c1} + T_{v1} + T_{m2} + T_{c2} + T_{v2}$, 而第二种的传输时间必然比第一种小, 因为在先来的 IRT 帧在设备 2 中传送的时候, 后来的 IRT 帧可以在设备 1 中传送, 这样就有效利用了带宽资源。IRT High flexibility 是第一种发送方式, 而 IRT Top performance 是第二种。

为了方便理解以及公式的推导, 作出如下假设:

- (1) 一台控制器要刷新 N 台设备;
- (2) 控制器与设备要交换的 IRT 帧大小相等;
- (3) 忽略同步帧。

于是, IRT High flexibility 的刷新时间计算公式为:

$$T_{flex} = N * (T_m + T_c + T_v)$$

IRT TOP performance 的刷新时间计算公式为:

$$T_{top} = T_m + T_c + N * T_v$$

例如一个系统中:

- (1) 一台 IO 控制器需要刷新 64 台 IO 设备, 传输的 IRT 帧都为最小 64 字节, 于是 $T_v = 5.12 \mu s$ 。
- (2) IRT 交换机转发一个 IRT 帧的延迟时间大约为 $3 \mu s$, 即 $T_c = 3 \mu s$ 。
- (3) IO 控制器和 IO 设备之间的距离为 100 m, $T_m = 0.5 \mu s$ 。

在 IRT High flexibility 性能下, IO 控制器刷新 64 个 IO 设备的总时间为:

$$T_{flex} = 64 * (0.5 + 3 + 5.12) = 551.68 \mu s$$

在 IRT TOP performance 性能下, IO 控制器刷新 64 个 IO 设备的总时间为:

$$T_{top} = 0.5 + 3 + 64 * 5.12 = 331.18 \mu s$$

接下来假设一般情况, 即要刷新的 IO 设备的个数是 N , 则:

$$K = \frac{T_{flex}}{T_{top}} = \frac{N * (T_m + T_c + T_v)}{T_m + T_c + N * T_v} = \frac{8.62N}{5.12N + 3.5}$$

由上式可知, 随着 N 值的增大, K 值也越来越大。也就是说, 在上述情况下, IRT TOP performance 与 IRT High flexibility 的实时性能差距随着 IO 设备数量的增加而逐渐拉大, 当 N 值较大时, K 值约为 1.68, 此时 IRT TOP performance 的实时性比 IRT High flexibility 高 68% 左右。

现在考虑 IO 设备的数量保持不变而 IRT 帧的字节数变化的情况, 假设 IRT 帧的字节数为 D_{IRT} , 那么 $T_v = D_{IRT} * 8/100 M = 0.08 D_{IRT}$, 代入上式得:

$$K = \frac{64 * (0.5 + 3 + 0.08 D_{IRT})}{0.5 + 3 + 64 * 0.08 D_{IRT}} = \frac{5.12 D_{IRT} + 224}{5.12 D_{IRT} + 3.5} = 1 + \frac{221.5}{5.12 D_{IRT} + 3.5}$$

由图 4 可知, D_{IRT} 的大小为 64~1518 个字节, 那么上式中 K 的值为 1.669 到 1.028。随着 D_{IRT} 的增大, K 值在不断减小, 也就是说 IRT TOP performance 与 IRT High flexibility 之间的实时性能差距是随着所传输的 IRT 帧字节数的增大而不断减小的。

上述计算结果是有现实意义的, 因为在使用 PROFINET

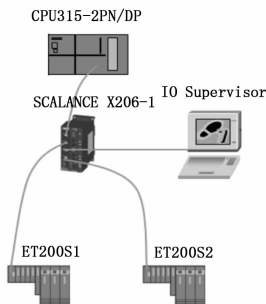


图 4 实验设备结构

IRT 功能时，需要利用西门子组态软件 STEP7 为 IRT 进行带宽的分配。若带宽分配的过多，则不仅造成带宽的浪费，还会使得 RT 以及 NRT 数据的传输延迟更大。若带宽分配的过少，则较远 IO 设备的刷新不成功，必然会出现系统故障。所以，为 IRT 分配好合适的带宽是很重要的，既能够有效利用带宽资源，又能够使系统稳定无误的运行。

4 实验验证 PROFINET 通信

实验使用的是西门子的设备，通过设备间的组态来实现 PROFINET 的通信。

PROFINET 的 IO 现场设备在 PROFINET 上有着相同的等级，在使用 STEP7 进行组态的过程中，这些现场设备（IO device, IO 设备）制定由一个中央控制器（IO controller, IO 控制器）控制。现场 IO 设备的文件描述定义在 GSD（XML）文件。

实验步骤主要包括：

(1) 导入 GSD 文件，并在 STEP7 中进行硬件组态，图 5 为硬件组态的最终结果。

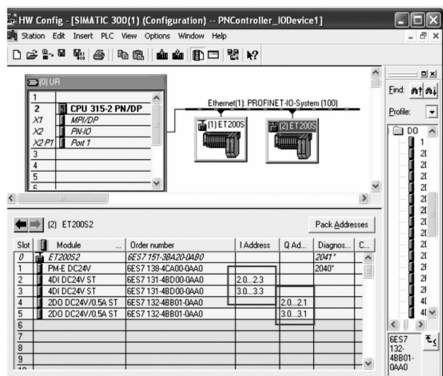


图 5 STEP 7 中硬件组态

(2) 编写相关程序，下载到 IO 控制器中，图 6 为使用 STL 语言编写的用户程序。根据在硬件组态中的 ET200S 两个站的 DI, DO 模板地址，在 Network1 中，对 ET200S1 进行数据读写，在 Network2 中，对 ET200S2 进行数据读写。

(3) IO 控制器和 IO 设备自动的交换数据，如果 ET200S1 的 DI 模板，有信号输入，那么相应的位会显示为 1，如图 7 所示。

5 结束语

PROFINET 在国内的研究还处于比较落后的阶段，大多

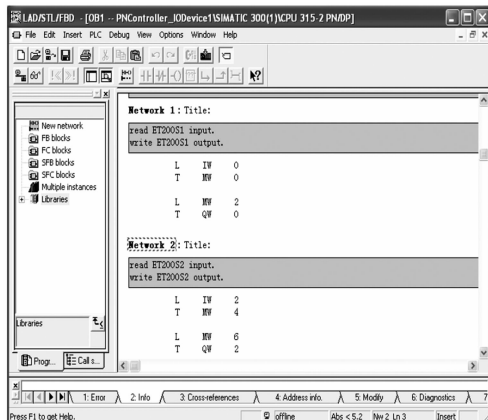


图 6 用户程序编写

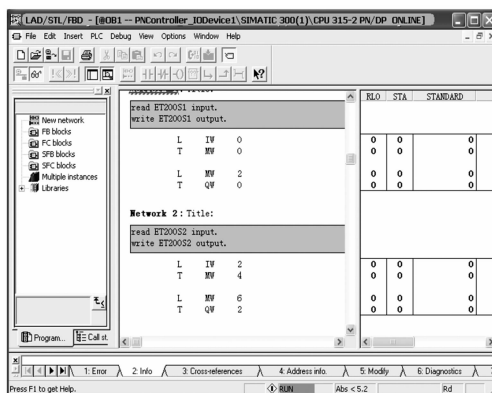


图 7 控制器和设备自动交换数据

数的研究都偏应用方面，对 PROFINET 的协议标准、实时性等较深层次的研究还是比较少的。研究 PROFINET 的实时性，可以广泛的应用在运动控制领域、过程控制领域、分布式自动化等工业控制领域，甚至在航天分布式设备控制领域也有不可估量的应用价值。

参考文献：

- [1] 李程. 基于 PROFINET 协议的现场总线设备研究 [D]. 青岛：青岛科技大学，2010.
- [2] 汤亚锋. 西门子 PROFINET 工业通信指南 [M]. 北京：人民邮电出版社，2007.
- [3] 白硕. PROFINET 技术的研究与开发 [D]. 北京：北京化工大学，2010.
- [4] Peter Neumann, Axel Poschmann. Ethernet-based Real-Time Communications with PROFINET IO [A]. WSEAS Transactions on Communications [C]. 2005; 122-130.
- [5] 孙凡金, 刘彦程, 潘新祥. PROFINET 工业以太网实时通信协议分析 [J]. 低压电器, 2008, 21: 30-33.
- [6] 李鑫. 工业以太网 PROFINET 技术的研究与实现 [D]. 北京：北京化工大学，2006.
- [7] 梁伟光. PROFINET 的实时通信技术分析 [J]. 中国仪器仪表, 2011; 104-105.
- [8] 刘喜梅, 李程. PROFINET IO 通信实时性分析 [J]. 微型机与应用, 2010, 2: 38-39.