



冯冬芹 褚健 金建祥 鲁立著

# 实时工业以太网技术

— EPA及其应用解决方案



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 实时工业以太网技术—— EPA 及其应用解决方案

冯冬芹 褚 健 金建祥 鲁 立 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

以太网以其价格低廉、应用广泛、传输速率高、可靠性高、易于组网等众多优点,成为现今工业自动化领域应用最为广泛的数据通信技术。本书分析了以太网应用于工业自动化控制系统必须解决的重要关键技术问题,并针对这些问题,重点介绍我国第一个拥有自主知识产权的新一代工业以太网国际标准——EPA 在确定性与实时性通信机制、多网段系统设计、线缆与安装技术、网络可用性、功能安全、网络安全等方面的解决思路,并对 EPA 应用组态进行了介绍,期望使读者对 EPA 实时以太网应用方案以及技术特点有一个全面的认识和掌握。

本书可供自动化、仪器仪表等专业的研究生参考,还可作为现场总线通信技术相关的工程技术人员、科研工作者和学生参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

实时工业以太网技术:EPA 及其应用解决方案/冯冬芹等著.—北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-035862-2

I. ①实… II. ①冯… III. ①工业企业-以太网 IV. ①TP393. 18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 253237 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:林青梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:327 000

**定价: 65.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前　　言

随着信息技术的迅速发展,现代工业生产正朝着规模化、自动化和信息化的方向发展。20世纪80年代中期产生的现场总线,将智能现场设备和自动化系统以全数字式、双向传输、多分支结构的通信控制网络连接,使工业控制系统向分散化、网络化和智能化发展成为可能,使工业控制系统的体系结构和功能结构产生重大变革。

以太网具有价格低廉、应用广泛、传输速率高、可靠性高、易于组网等诸多优点,而且拥有大量安装维护人员。它不仅垄断了信息领域的通信网络,而且成为工业应用领域的主流通信网络。

EPA是Ethernet for Plant Automation的缩写,它基于以太网技术,针对工业自动化测量与控制系统的应用特点,进行了技术改造,适用于测量、控制等工业场合,并被国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)发布为现场总线国际标准IEC 61158/TYPE14,由此开创了我国实质性制定工业自动化国际标准的先河。

为了使自动化、仪器仪表等专业的学生、工程技术人员以及科研工作者对EPA实时以太网技术有比较全面的了解,作者基于近十年来对EPA工业实时以太网技术的科研开发、标准制定和实践经验,从技术特点和工作机理的角度,对EPA技术进行解析、归纳与整理,而对一些细节性、比较抽象以及共有的技术进行了简化、概括,试图使读者易于理解和掌握,也希望给读者的相关研究和应用提供一些参考和启示。

本书由浙江大学智能系统与控制研究所组织编写,集中了研究所和浙江中控科技集团有限公司的EPA研究团队十几年来的智慧和研究成果,如专利、论文、教材、标准、技术文档等。在本书编写过程中,赵联祥、桂本煊、陈高翔、刘世龙、陈佳、章涵、杨大胜、来晓、赵飞翔、田明杰、朱杰、张淑兰、王强、唐建生、陈鹏、贾凯丽、陈建、马振芳、仇荔、朱予辰、傅东旭、李志强等项目组成员参与了部分章节关键技术成果的开发与资料搜集整理,在此对他们表示衷心的感谢!同时也要感谢在EPA标准化过程中长期良好合作的中国科学院沈阳自动化研究所的王宏、徐皓冬研究员,大连理工大学的仲崇权教授,重庆邮电大学的王平教授,以及清华大学的杨佃福教授等。

本书还引用了部分文献,对其作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,加之当今工业以太网技术发展迅速,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正并提出宝贵意见。

作者

2012年8月于浙江大学求是园

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b>	1
1.1 控制系统发展回顾	1
1.2 工业控制网络	4
1.3 工业以太网与实时以太网	8
1.4 EPA 技术与标准	13
参考文献	16
<b>第 2 章 EPA 确定性与实时性通信技术</b>	18
2.1 以太网的通信“不确定性”	18
2.2 EPA 确定性通信机制	20
2.2.1 EPA 确定性通信链路层模型	21
2.2.2 EPA 确定性通信调度模型	23
2.2.3 EPA 确定性通信调度规程	25
2.2.4 EPA 时钟同步	27
2.3 EPA-FRT 强实时通信技术	28
2.4 EPA-BRT 数据流业务实时通信技术	33
2.5 EPA 协议簇几种实时通信技术的比较	36
2.6 EPA 实时性能分析	38
2.7 基于 EPA 的通信调度规划	50
2.8 小结	53
参考文献	53
<b>第 3 章 EPA 多网段设计技术</b>	56
3.1 控制系统中的分网段技术	56
3.2 EPA 多网段结构	57
3.3 EPA 网桥	60
3.4 EPA 无线网段接入	67
3.4.1 无线局域网微网段及其接入	68
3.4.2 蓝牙微网段及其接入	70
3.5 二层式 EPA 微网段及其子网划分	71

3.6 EPA 多网段系统特点及性能分析 .....	74
3.7 小结 .....	77
参考文献 .....	77
<b>第 4 章 EPA 线缆与安装技术 .....</b>	<b>79</b>
4.1 总体要求 .....	79
4.2 EPA 线缆与安装总体特性 .....	81
4.2.1 网络拓扑的设计 .....	81
4.2.2 通信介质 .....	83
4.3 EPA 网络供电 .....	84
4.4 EPA 本质安全与安全防爆 .....	88
4.5 接地系统、雷击浪涌与防护 .....	95
4.5.1 接地/等电位连接/参考地 .....	95
4.5.2 雷击浪涌与防护 .....	97
4.6 小结 .....	101
参考文献 .....	101
<b>第 5 章 EPA 网络可用性技术 .....</b>	<b>102</b>
5.1 工业以太网的可用性 .....	102
5.2 分布式环网冗余技术 .....	104
5.3 DRP 冗余故障自诊断与自恢复 .....	106
5.4 DRP 与 EPA 协议的协同应用 .....	113
5.5 DRP 性能评估 .....	121
5.6 小结 .....	128
参考文献 .....	128
<b>第 6 章 EPA 功能安全通信技术 .....</b>	<b>130</b>
6.1 功能安全与功能安全通信 .....	130
6.1.1 安全功能响应时间 .....	132
6.1.2 功能安全通信模型 .....	132
6.1.3 工业控制网络通信的风险 .....	134
6.2 EPA 功能安全通信方案 .....	136
6.2.1 EPASafety 安全通信概念 .....	136
6.2.2 EPASafety 协议结构 .....	137
6.2.3 EPASafety 系统架构 .....	137
6.2.4 EPA 功能安全通信流程 .....	138

---

6.3 EPA 功能安全通信应对风险的解决措施 .....	144
6.3.1 主要的 EPASafety 解决方法及与风险的对应关系 .....	144
6.3.2 实例分析 .....	146
6.4 EPA 功能安全通信 SIL 等级评估方法 .....	148
6.4.1 EPASafety 通信模型 SIL 等级计算方法 .....	148
6.4.2 EPASafety 通信模型的 SIL 等级计算结果 .....	149
6.5 小结 .....	149
参考文献 .....	149
<b>第 7 章 EPA 网络安全技术 .....</b>	<b>150</b>
7.1 工业控制系统的安全问题 .....	150
7.1.1 工业控制系统网络的定义和特点 .....	150
7.1.2 工业控制系统网络安全的提出和意义 .....	150
7.1.3 IT 系统与工业控制系统的差异 .....	151
7.2 EPA 安全概述 .....	154
7.2.1 EPA 网络安全特点 .....	154
7.2.2 EPA 网络安全的脆弱性分析 .....	154
7.2.3 EPA 安全威胁与安全目标 .....	155
7.3 EPA 纵深防御网络安全技术 .....	155
7.3.1 EPA 网络安全结构 .....	156
7.3.2 EPA 系统安全域边界控制器 .....	157
7.3.3 EPA 主机安全监控代理 .....	158
7.3.4 EPA 工业安全交换机 .....	158
7.3.5 EPA 监控层防火墙 .....	159
7.3.6 EPA 安全网桥 .....	160
7.3.7 EPA 系统统一智能安全管理平台 .....	161
7.4 小结 .....	164
参考文献 .....	165
<b>第 8 章 EPA 功能块应用进程与设备描述 .....</b>	<b>166</b>
8.1 EPA 功能块 .....	166
8.1.1 EPA 功能块与互可操作 .....	166
8.1.2 EPA 功能块的定义 .....	167
8.1.3 EPA 基本功能块、复合功能块 .....	172
8.2 功能块的链接与通信 .....	179

8.2.1	EPA 功能块应用进程	179
8.2.2	功能块与链接对象	180
8.2.3	功能块与通信栈的通信	182
8.2.4	功能块的组态	183
8.3	设备描述	184
8.3.1	设备描述格式	185
8.3.2	设备描述要素	188
8.3.3	设备描述文件的解析	189
8.4	设备描述功能块应用举例	190
8.4.1	设备模型	190
8.4.2	EPA 功能块模型	193
8.4.3	应用举例	194
8.5	小结	197
	参考文献	198
<b>第 9 章</b>	<b>EPA 测试技术</b>	<b>199</b>
9.1	EPA 测试的内容	199
9.2	一致性测试	199
9.2.1	一致性测试的目的和内容	199
9.2.2	一致性测试的方法	200
9.2.3	一致性测试的原理	200
9.2.4	一致性测试的系统模型	202
9.3	实时性测试	203
9.3.1	递交时间测试	203
9.3.2	时钟同步精度测试	204
9.3.3	网络吞吐量测试	205
9.3.4	非实时通信带宽测试	206
9.3.5	冗余恢复时间测试	206
9.4	互可操作性测试	206
9.4.1	互操作测试系统结构	206
9.4.2	互操作测试内容	207
9.4.3	EPA 互操作测试的实施	209
9.5	小结	209
	参考文献	209

---

<b>第 10 章 EPA 组 态 .....</b>	211
10.1 EPA 系统组态要求 .....	211
10.2 EPA 组态软件概述 .....	212
10.2.1 组态概念 .....	212
10.2.2 软件概述 .....	214
10.3 EPA 图形化组态与物理映射 .....	215
10.3.1 主界面说明 .....	215
10.3.2 设备管理 .....	219
10.3.3 设备详细信息访问 .....	229
10.3.4 控制策略组态 .....	231
10.3.5 时间组态 .....	235
10.3.6 功能安全 .....	236
10.3.7 信息保存 .....	236
10.3.8 应用实例 .....	237
10.4 EPA 通信在线监控与诊断 .....	241
10.5 小结 .....	243
参考文献 .....	243
<b>第 11 章 基于 EPA 的控制系统的实际应用 .....</b>	244
11.1 基于 EPA 系统在华东制药的工程应用 .....	244
11.1.1 工艺简介 .....	244
11.1.2 系统的安装布置 .....	245
11.1.3 系统控制方案实施与应用 .....	247
11.2 基于 EPA 的系统在安全适用场合的应用 .....	248
11.3 小结 .....	250

# 第1章 绪论

## 1.1 控制系统发展回顾

信息技术的飞速发展,引起了工业自动化系统结构的深刻变革。信息交换的范围正迅速覆盖从工厂的管理、控制到现场设备的各个层次,并逐步形成了全分布式网络集成自动化系统和以此为基础的企业信息系统。现场总线系统就是顺应信息技术的发展趋势和适应工业控制系统的分散化、网络化、智能化发展方向而发展起来的新技术,它的出现和发展已成为全球工业自动化技术的热点之一,受到全世界工业界的普遍重视<sup>[1~5]</sup>。

自动控制系统的发展,经历了直接控制、集中控制、集散控制系统的过程。计算机、通信、网络等技术的发展使自动控制技术的发展有了更加广阔的空间。电力系统自动控制水平也对信息交换的速度和质量提出了更高要求。纵观控制系统的发展史,不难发现,每一代新的控制系统的推出都是针对老一代控制系统存在的缺陷而给出的解决方案,最终在用户需求和市场竞争两大外因的推动下占领市场的主导地位,现场总线和现场总线控制系统的产生也不例外。自动控制系统发展经历了以下几个过程<sup>[1~7]</sup>:

### 1) 模拟仪表控制系统

模拟仪表控制系统于20世纪六七十年代占主导地位。早期仪表与调节装置是机械式的,如膨胀式温度计、弹簧管式压力计和用于蒸汽机的飞球式调节器,其显著缺点是模拟信号精度低、易受干扰。

### 2) 集中式数字控制系统

集中式数字控制系统于20世纪七八十年代占主导地位。采用单片机、PLC或微机作为控制器,控制器内部传输的是数字信号,因此克服了模拟仪表控制系统中模拟信号精度低的缺陷,提高了系统的抗干扰能力。集中式数字控制系统的优点是易于根据全局情况进行控制计算和判断,在控制方式、控制机时的选择上可以统一调度和安排;其缺点是对控制器本身要求很高,必须具有足够的处理能力和极高的可靠性,当系统任务增加时,控制器的效率和可靠性将急剧下降。

进入20世纪后,工业生产的规模开始扩大,需要将分散在现场的机械式仪表集中起来,于是就出现了有作为辅助能源的液动调节器,当时是采用油压的方式进行工作的,但由于油容易渗漏和发生火灾,再加上不能远距离调节,所以不久又出现了用压缩空气作为辅助能源的气动仪表与调节器,这样就出现了将检测、显示和

调节集中在一起的气动基地式仪表,后来为了便于集中在仪表室进行监控而又生产出气动单元组合仪表。集中式数字控制系统图例如图 1.1 所示。

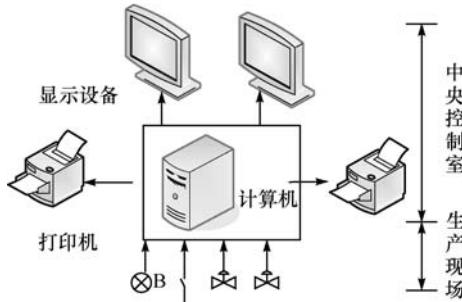


图 1.1 集中式数字控制系统

### 3) 集散控制系统

集散控制系统(distributed control system, DCS)于 20 世纪八九十年代占主导地位。其核心思想是集中管理、分散控制,即管理与控制相分离,上位机用于集中监视管理功能,若干台下位机下放分散到现场实现分布式控制,各上下位机之间用控制网络互连以实现相互之间的信息传递。因此,这种分布式的控制系统体系结构有力地克服了集中式数字控制系统中对控制器处理能力和可靠性要求高的缺陷。在 DCS 中,分布式控制思想的实现正是得益于网络技术的发展和应用,遗憾的是,不同的 DCS 厂家为达到垄断经营的目的而对其控制通信网络采用各自专用的封闭形式,不同厂家的 DCS 系统之间以及 DCS 与上层 Intranet、Internet 信息网络之间难以实现网络互连和信息共享,因此 DCS 从该角度而言实质是一种封闭专用的、不具可互操作性的分布式控制系统,并且 DCS 造价昂贵。在这种情况下,用户对网络控制系统提出了开放化和降低成本的迫切要求。DCS 的信息采用一条信息线路进行传输。如果该条线路瘫痪,那么所有监控的数据将全部丢失。DCS 采用了多级分层网络结构、点对点的接线方式。它集多种功能于一台计算机上,无论是软件系统还是硬件系统都显得十分庞大。多种功能往往需要多实时任务去完成,因而效率不高。DCS 大多为模拟数字混合系统,尚未形成从测控设备到操作控制计算机的完整网络。DCS 的层次结构如图 1.2 所示,DCS 的体系结构如图 1.3 所示。

### 4) 现场总线控制系统

现场总线控制系统(fieldbus control system, FCS)是利用现场总线这一开放的、具有可互操作的网络将现场各控制器及仪表设备互连来构成的,同时控制功能彻底下放到现场,降低了安装成本和维护费用。因此,FCS 实质是一种开放的、具可互操作性的、彻底分散的分布式控制系统,已经成为 21 世纪控制系统的主流产品。FCS 控制系统如图 1.4 所示。

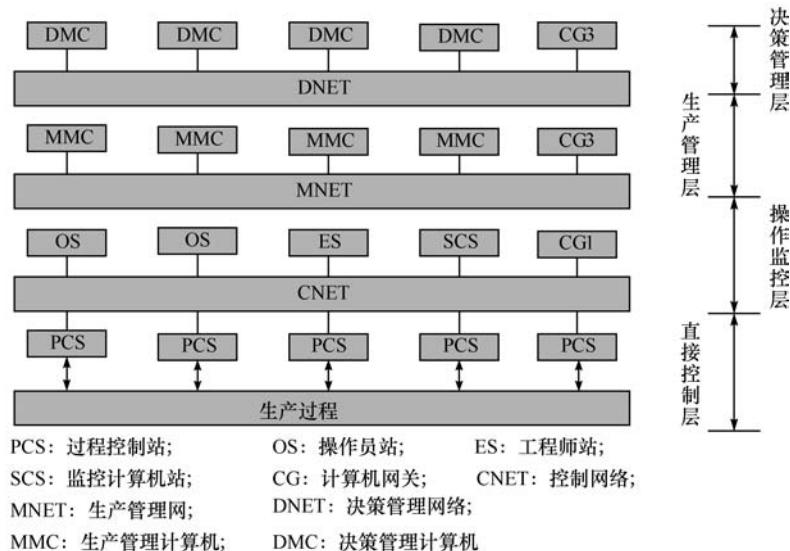


图 1.2 DCS 的层次结构图

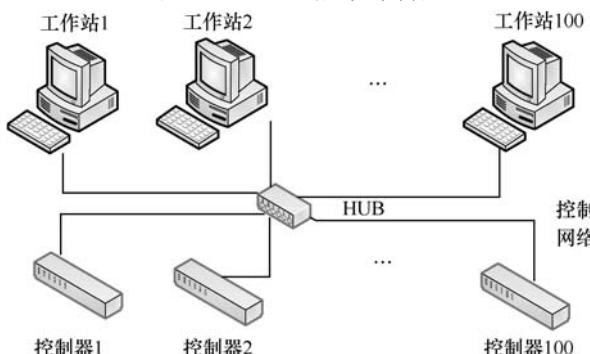


图 1.3 DCS 的体系结构图

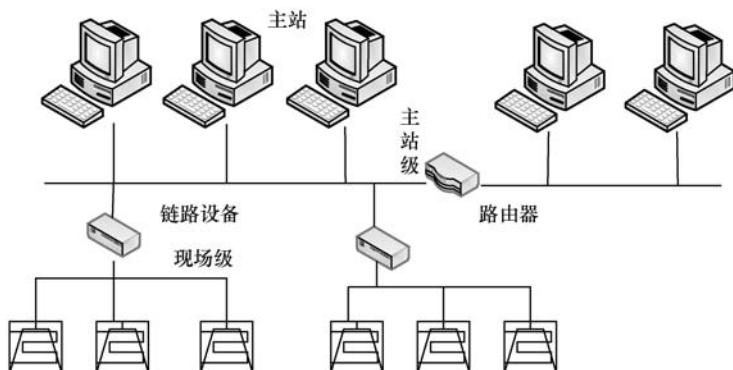


图 1.4 现场总线控制系统

“现场总线技术”实际上是将安装在工业过程现场的智能自动化仪表和装置与设置在控制室内的仪表和控制设备连接起来的一种数字化、串行、双向、多站的通信网络技术。基于这种总线的新一代控制系统被誉为第四代控制系统,即 FCS 一方面突破了 DCS 专用通信网络的局限,采用基于公开化、标准化的解决方案,克服了封闭系统所造成的缺陷;另一方面 FCS 将集中与分散相结合的集散系统变成了新型全分布式结构,把控制功能彻底下放到现场。可以说,开放性、分散性与数字通信是 FCS 最显著的特征。

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,形成各种适应实际需要的自动控制系统。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。正如众多分散的计算机被网络连接在一起,它给自动化领域带来的变化使计算机的功能、作用发生了变化。现场总线则使自控系统与设备具有了通信能力,把它们连接成网络系统,加入到信息网络的行列。传统的 DCS 系统结构和 FCS 体系结构如图 1.5 所示。

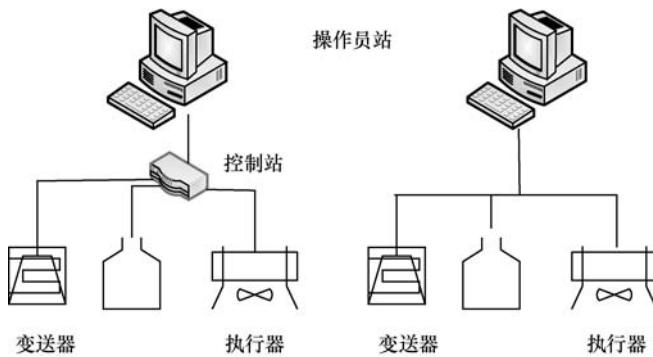


图 1.5 传统的 DCS 系统结构和 FCS 体系结构

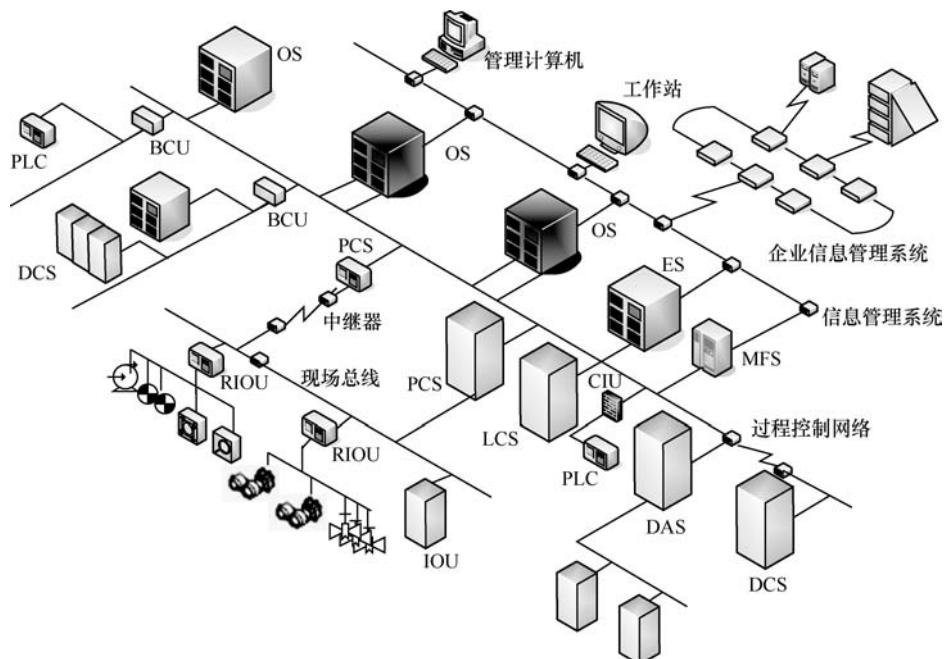
## 1.2 工业控制网络

工业控制网络是指应用于工业控制系统的网络通信技术,它是随着工业控制系统的发展而产生与发展起来的,是计算机网络技术、通信技术与控制技术相结合的产物。

控制室和现场仪表之间的信号传输经历了以  $4\sim20\text{mA}$  为代表的模拟信号,以内部数字信号和 RS232、RS485 为代表的数字通信,以控制网络(包括现场总线、

工业以太网、工业无线)为代表的网络传输三个阶段,每个阶段都伴随着控制系统的一次变革。特别是 20 世纪 80 年代产生的现场总线和互联网技术对自动化控制系统带来深刻的影响,使控制系统的功能除了传统的测量、控制数据外,更是扩展到了设备管理、档案管理、故障诊断、生产管理等管理数据领域,覆盖从工厂的现场设备层到控制、管理的各个层次,从工段、车间、工厂、企业到世界各地的市场,逐步形成了以工业控制网络为基础的企业综合自动化系统。

以现场总线和工业以太网为代表的工业控制网络已构成了企业综合自动化体系的核心技术和核心部件,并贯穿了整个企业综合自动化系统<sup>[8~15]</sup>(见图 1.6)。



OS: 操作站;  
BCU: 总线变换单元;  
PCS: 现场控制站;  
IOU: IO 单元;  
DCS: 集散控制系统

ES: 工程师站;  
CIU: 通信接口单元;  
LCS: 逻辑控制站;  
RIOU: 远程 IO 单元;

MFS: 多功能计算站;  
FCS: 现场总线控制系统;  
DAS: 数据采集站;  
PLC: 可编程逻辑控制器;

图 1.6 企业综合自动化系统网络架构图

从企业综合自动化控制系统的角度看,工业控制网络从底向上依次为现场设备网、过程控制网、管理信息网等几个层次:

### 1) 现场设备网

对于 DCS、PLC(可编程逻辑控制器)等传统控制设备而言,现场设备网就是系统控制器与现场输入输出设备或者卡件之间信息交换的通道,因此现场设备网又

叫现场总线。现场设备是以网络节点的形式挂接在网络上,以实现控制器与现场设备、现场设备之间的数据传输。因此,要求现场设备网必须具有可靠性高、时延确定性好、容错性好、安全性高等特点。

为满足这些特性,现场总线对 ISO/OSI 模型进行了简化,只采用其中的物理层、数据链路层和应用层,有的现场总线在应用层之上还增加第 8 层(用户层),以实现特定用户信息的交换和传递。

### 2) 过程控制(监控)网

过程控制网又叫过程监控网,是用于连接控制室设备(如控制器、监视计算机、记录仪表等)的网络,连接在过程控制网上的设备从现场设备中获取数据,完成各种运算(特别是复杂控制运算)、运行参数的监测、报警和趋势分析、历史纪录、过程报表等功能,另外还包括控制组态的设计和下装。

过程控制网对数据传输的实时性要求不高,但对于网络带宽、可靠性、网络可用性有比较高的要求。20世纪 80 年代,过程控制网一般采用 IEEE 802.4 的令牌网,而到了 90 年代末期,主流的控制系统(包括 DCS、PLC 等)一般都采用工业以太网。

### 3) 管理信息网

管理信息网的主要目的是在分布式网络环境下构建一个安全的网络系统。首先要将来自于过程控制网的信息转入管理层的关系数据库中,既可供企业管理层进行计划、排产、在线贸易等管理功能,又可供远程用户通过互联网了解控制系统的运行状态以及现场设备的工况,对生产过程进行实时的远程监控。

因此,管理信息网包括企业内部的局域网(Intranet)和互联网(Internet),由于涉及实际的生产过程,必须保证网络安全,可以采用的技术包括防火墙、用户身份认证以及密钥管理等。在这方面,工业以太网具有较大优势,兼容 TCP/IP,可以无缝连接 Internet,同时又不影响实时数据的传送,因此,整个控制网络可以采用统一的协议标准。

在整个工业通信网络模型中,现场设备层是整个网络模型的基础和核心,只有确保总线设备之间可靠、准确、完整的数据传输,上层网络才能获取信息以及实现监控功能。为了确保信息传输及时可靠,工业控制网络对通信确定性、实时性、可靠性与可用性提出非常高的要求,同时对于过程控制网还提出了安全性的要求。

用于工业自动化系统的网络通信技术来源于 IT 信息技术的计算机网络技术,但是又不同于一般的计算机网络通信,这是因为 IT 网络通信是以传递信息为最终目的,而工业控制网络传递信息是以引起物质或能量的运动为最终目标。

正因为如此,工业控制网络与用于商业的网络通信技术有很大不同,其性能指标主要是实时性、确定性、可靠性和可用性<sup>[2,5,7~17]</sup>:

#### 1) 实时性

系统的实时性(real time)的含义是指对于某一给定任务而言,系统必须在一

个较小的时间内完成该任务的处理。简单理解来说,实时性就意味着系统工业网络必须要“快”。

对于工业自动化系统来说,目前根据不同的应用场合,将实时性要求划分为三个范围:信息集成和较低要求的过程自动化应用场合,实时响应时间要求是100ms或更长;绝大多数的工厂自动化应用场合实时响应时间的要求为5~10ms;对于高性能的同步运动控制应用,特别是在100个节点下的伺服运动控制应用场合,实时响应时间要求低于1ms,同步传送和抖动小于1μs。

工业控制网络的实时性还规定了许多技术指标,如交付时间、吞吐量、时间同步、时间同步精度以及冗余恢复时间等实时性参数,具体可参见IEC 61784-1—2010、IEC 61784-2—2010等国际标准。

### 2) 确定性

工业控制网络的确定性主要用于描述系统可预测的响应时间和时延,即网络中任意两节点通信,从信息发送到信息接收之间全部延迟的最大时间是确定的。主要表现为任务(如功能块的执行)在时间上是可以预测的,要求最大值是可预知的,并小于一定值。由于以太网采用CSMA/CD介质访问方式,使得从根本上讲传统以太网是不确定的,这也是最初阻碍以太网进入工业控制领域的主要障碍。随着全双工交换式以太网的出现,传统以太网不确定性的缺点已经大大减小,但是在某些高速控制系统特别是运动控制系统中,交换式以太网的确定性仍然不能满足系统要求。

### 3) 可靠性

工业控制网络的可靠性是网络系统在一定时间内、在一定条件下无故障地执行指定功能的能力或可能性。工业控制网络的可靠性和实时性也是紧密相关的,如果信息传输的可靠性降低,接收到的信息错误可能性较大,必然造成信息的多次重传,接收节点可能无法及时地获取正确信息,从而造成实时性无法保证。另外,工业现场的环境十分恶劣,噪声干扰十分严重,大大降低了网络的可靠性,这就需要有合适的抗干扰措施和差错控制技术降低传输错误,保证系统可靠运作。

### 4) 可用性

工业控制网络的可用性是在要求的外部资源得到保证的前提下,在规定的条件下和规定的时刻或时间区间内处于可执行规定功能状态的能力。它是产品可靠性、维修性和维修保障性的综合反映。

与普通商用网络中传输的数据不同,在工业控制网络中,需要传输的信息主要分为三大类:

(1) 突发性实时信息,如报警信息、控制器之间的互锁信息等突发性数据。

(2) 周期性实时信息、周期性采样信息的传送等,在系统中以一定的周期时间出现具有可预测性。如过程数据要求每个周期实时采样,并传递到控制器,控制器

计算出来的输出控制数据,必须在每个周期实时发送到相应的控制器。

(3) 非实时信息,如用户编程数据、组态数据、部分系统状态监视数据等。非实时数据对时间要求不很苛刻,允许有相对较长的延迟,但部分数据的长度较长且不定。

工业网络必须对三种不同的信息作出不同的处理,在保证网络正常工作的同时,有着较高的性能指标和利用率。为了满足以上工业控制系统对网络通信提出的要求,早期的解决方案是采用具有确定性通信协议的令牌网络,直到 20 世纪末 21 世纪初,随着在信息领域的成功应用,以太网才逐渐被引入到工业自动化控制系统中。

### 1.3 工业以太网与实时以太网

现场总线的出现适应了工业控制系统向分散化、网络化和智能化发展的方向,并且促使目前的自动化仪表、DCS 和 PLC 等产品所面临的体系结构和功能结构产生重大变革,导致工业自动化领域的一次更新换代。但是现场总线技术在其发展过程中也存在许多不足:

(1) 现有的现场总线标准过多,仅国际标准 IEC 61158 就包含了八个类型,未能统一到单一标准上来;

(2) 不同总线之间不能兼容,不能真正实现透明信息互访,无法实现信息的无缝集成;

(3) 由于现场总线是专用实时通信网络,成本较高;

(4) 现场总线的速度较低,支持的应用有限,不便于和 Internet 信息集成<sup>[18~20]</sup>。

另一方面,以以太网(Ethernet)为代表的 COTS(commercial off-the-shelf)通信技术发展得非常迅速,得到全球的技术和支持。因为 Ethernet 具有成本低、稳定性好和可靠性高、应用广泛、共享资源丰富等优点,Ethernet 已经成为最受欢迎的通信网络之一,它不仅垄断了办公自动化领域的网络通信,而且在工业控制领域管理层和控制层等中上层的网络通信中也得到了广泛应用,并有直接向下延伸应用于工业现场设备间通信的趋势。

从技术方面来看,与现场总线相比,以太网具有以下优势<sup>[21~25]</sup>:

(1) 应用广泛。以太网是目前应用最为广泛的计算机网络技术,受到广泛的技术支持。几乎所有的编程语言都支持 Ethernet 的应用开发,如 Java、Visual C++、Visual Basic 等。这些编程语言由于广泛使用,并受到软件开发商的高度重视,具有很好的发展前景。因此,如果采用以太网作为现场总线,可以保证有多种开发工具、开发环境供选择。

(2) 成本低廉。由于以太网的应用广泛,受到硬件开发与生产厂商的高度重视与广泛支持,有多种硬件产品供用户选择,硬件价格也相对低廉。目前以太网网卡的价格只有 PROFIBUS、FF 等现场总线的十分之一,而且随着集成电路技术的发展,其价格还会进一步下降。

(3) 通信速率高。目前以太网的通信速率为 10Mbit/s、100Mbit/s,1000Mbit/s 的以太网技术也逐渐成熟并开始广泛应用,10Gbit/s 以太网也正在研究,其速率比目前的现场总线快得多。以太网可以满足对带宽有更高要求的需要。

(4) 控制算法简单。优先权控制是比较复杂的。以太网没有优先权控制意味着访问控制算法可以很简单。它不需要管理网络上当前的优先权访问级(令牌环和令牌总线系统都存在这个问题)。还有一个好处是,没有优先权的网络访问是公平的,任何站点访问网络的可能性都与其他站相同,没有哪个站可以阻碍其他站的工作。

(5) 软硬件资源丰富。由于以太网已应用多年,人们对以太网的设计、应用等方面有很多的经验,对其技术也十分熟悉。大量的软件资源和设计经验可以显著降低系统的开发和培训费用,从而可以显著降低系统的整体成本,并大大加快系统的开发和推广速度。

(6) 不需要中央控制站。令牌环网采用了“动态监控”的思想,需要有一个站负责管理网络的各种家务。传统令牌环网如果没有动态监测是无法运行的。但是以太网就不需要中央控制站,它不需要动态监测。

(7) 可持续发展潜力大。由于以太网的广泛应用,使它的发展一直受到广泛的重视和大量的技术投入。并且,在这信息瞬息万变的时代,企业的生存与发展将很大程度上依赖于一个快速而有效的通信管理网络,信息技术与通信技术的发展将更加迅速,也更加成熟,由此保证了以太网技术不断地持续向前发展。

(8) 易于与 Internet 连接。能实现办公自动化网络与工业控制网络的信息无缝集成,因此,工业控制网络采用以太网,就可以避免其发展游离于计算机网络技术的发展主流之外,从而使工业控制网络与信息网络技术互相促进,共同发展,并保证技术上的可持续发展,在技术升级方面无需单独的研究投入。

通常,人们习惯将用于工业控制系统的以太网统称为工业以太网。但是,如果仔细划分,按照国际电工委员会 SC65C 的定义,工业以太网是用于工业自动化环境、符合 IEEE 802.3 标准、按照 IEEE 802.1D“媒体访问控制(MAC)网桥”规范和 IEEE 802.1Q“局域网虚拟网桥”规范、对其没有进行任何实时扩展(extension)而实现的以太网。通过采用减轻以太网负荷、提高网络速度、采用交换式以太网和全双工通信、采用信息优先级和流量控制以及虚拟局域网等技术,到目前为止可以将工业以太网的实时响应时间做到 5~10ms,相当于现有的现场总线。

因此,工业以太网协议在本质上仍基于以太网技术,在物理层和数据链路层均

采用了 IEEE 802.3 标准,在网络层和传输层则采用被称为以太网“事实上的标准”的 TCP/IP 协议簇(包括 UDP、TCP、IP、ARP、ICMP、IGMP 等协议),它们构成了工业以太网的低四层。在高层协议上,工业以太网协议通常都省略了会话层、表示层,而定义了应用层,有的工业以太网协议还定义了用户层(如 HSE)。图 1.7 给出了一般工业以太网的通信模型。

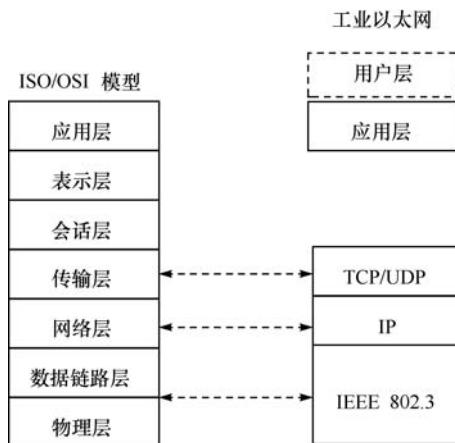


图 1.7 工业以太网与 OSI 互联参考模型分层对照

与商用以太网相比,工业以太网在以下面具有明显的特征:

### 1) 通信实时性

在工业以太网中,提高通信实时性的措施主要包括采用交换式集线器、使用全双工(full-duplex)通信模式、采用虚拟局域网(VLAN)技术、提高质量服务(QoS)、有效的应用任务的调度等。具体如下:

首先,在网络拓扑结构上采用了星型连接代替总线型连接。其中星型连接用网桥或者路由器等设备将网络分割成多个网段,在每个网段上以一个多口集线器为中心,将若干个设备或者节点连接起来,这样挂接在同一网段上的所有设备形成一个冲突域。每个冲突域均采用 CSMA/CD 机制来管理网络冲突。这种分段方法可以使每个冲突域的网络负荷减轻、碰撞概率减小。

其次,使用以太网交换技术和虚拟局域网(VLAN)技术,将网络冲突域进一步细化。用智能交换设备代替共享式集线器,使交换设备各端口之间可以同时形成多个数据通道,可以避免广播风暴,大大降低网络的信息流量。

再次,采用全双工通信技术,可以使设备端口间两对双绞线上可以同时接收和发送报文帧,从而也不再受到 CSMA/CD 的约束。这样任一通信节点在发送信息报文帧时不会再发生碰撞,冲突域也不复存在。

总之,用星型网络结构和以太网交换技术后,可以大大减少(半双工方式)或者

完全避免(全双工方式)碰撞,从而使以太网的通信确定性和实时性大大增强,并为以太网技术应用于工业现场控制清除了障碍。

采用上述措施可以使其不确定性问题得到相当程度的缓解,但不能从根本上解决以太网通信不确定性的问题。

### 2) 环境适应性和安全性

首先,针对工业现场的振动、粉尘、高温和低温、高湿度等恶劣环境,对设备的可靠性提出了更高的要求。在基于以太网控制系统中,网络设备是相关设备的核心,从 I/O 功能块到控制器中的任何一部分都是网络的一部分。网络硬件把内部系统总线和外部世界联系到一体,任一工业以太网设备在这种性能稳定指标上都应高于普通商业以太网。为此,工业以太网产品针对机械环境、气候环境、电磁环境等需求,对线缆、接口、屏蔽等方面做出专门的设计,符合工业环境的要求。

在易燃易爆的场合,工业以太网产品通过包括隔爆和本质安全两种方式来提高设备的生产安全性。

在信息安全方面,利用网关构建系统的有效屏障,对经过它的数据包进行过滤。同时随着加密解密技术与工业以太网的进一步融合,工业以太网的信息安全性也得到了进一步的保障。

### 3) 产品可靠性设计

工业控制网络的高可靠性通常包含三个方面内容:

第一,可使用性好,网络自身不易发生故障。这要求网络设备质量高,平均故障间隔时间长,能尽量防止故障发生。提高网络传输质量一个重要的技术是差错控制技术。

第二,容错能力强,网络系统局部单元出现故障,不影响整个系统的正常工作。如在现场设备或网络局部链路出现故障的情况下,能在很短的时间内重新建立新的网络链路。

在网络的可靠性设计中,主要强调的思想是尽量防止出现故障,但是无论采取多少措施,要保证网络 100% 无故障是不可能的,也是不现实的。容错设计则是从全系统出发,以另一个角度考虑问题,其出发点是承认各单元发生故障的可能,进而设法保证即使某单元发生故障,系统仍能完全正确地工作,也就是说给系统增加了容忍故障的能力。

提高网络容错能力的一个常用措施是在网络中增加适当的冗余单元,以保证当某个单元发生故障时能由冗余单元接替其工作,原单元恢复后再恢复出错前的状态。

第三,可维护性高,故障发生后能及时发现和及时处理,通过维修使网络及时恢复。这是考虑当网络系统万一出现失误时,系统一是要能采取安全性措施,如及时报警、输出锁定、工作模式切换等,二是要能具有极强的自诊断和故障定位能力,

且能迅速排除故障。

#### 4) 网络可用性

在工业以太网系统中,通常采用冗余技术以提高网络的可用性,主要有端口冗余、链路冗余、设备冗余和环网冗余。其中,环网链路可以通过具有故障探测与恢复功能的交换机或中继器,在冗余双环网络中自动进行路由,找到合适的链路,并恢复正常通信,如图 1.8 所示。

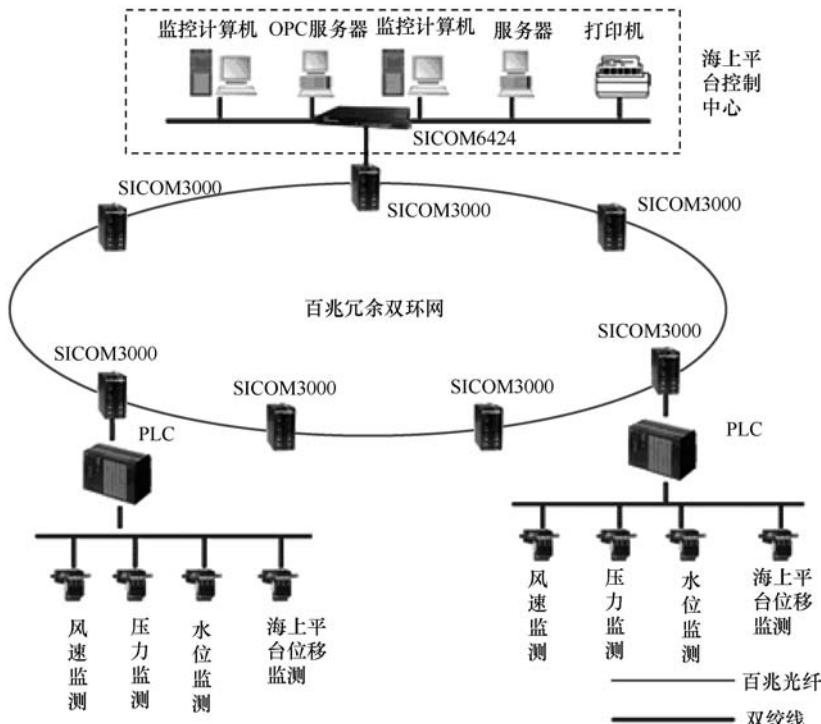


图 1.8 环网冗余

工业以太网一般应用于通信实时性要求不高的场合。对于响应时间小于 5ms 的应用,工业以太网已不能胜任。为了满足高实时性能应用的需要,各大公司和标准组织纷纷提出各种提升工业以太网实时性的技术解决方案。这些方案建立在 IEEE 802.3 标准的基础上,通过对与其和相关标准的实时扩展提高实时性,并且做到与标准以太网的无缝连接,这就是实时以太网(realtime Ethernet, RTE)。

根据 IEC 61784-2—2010 标准定义,所谓实时以太网,就是根据工业数据通信的要求和特点,在 ISO/IEC 8802-3 协议基础上,通过增加一些必要的措施,使之具有实时通信能力:

- (1) 网络通信在时间上的确定性,即在时间上,任务的行为可以预测;

(2) 实时响应适应外部环境的变化,包括任务的变化、网络节点的增/减、网络失效诊断等;

(3) 减少通信处理延迟,使现场设备间的信息交互在极小的通信延迟时间内完成。

2007 年出版的 IEC 61158 现场总线国际标准和 IEC 61784-2 实时以太网应用国际标准收录了以下十种实时以太网技术和协议(见表 1.1)。

**表 1.1 IEC 国际标准收录的工业实时以太网类型**

技术名称	技术来源	应用领域
Ethernet/IP	美国 Rockwell 公司	过程控制
PROFINET	德国 Siemens 公司	过程控制、运动控制
P-NET	丹麦 Proces-Data A/S 公司	过程控制
Vnet/IP	日本 Yokogawa 横河	过程控制
TC-net	东芝公司	过程控制
EtherCAT	德国 Beckhoff 公司	运动控制
Ethernet Powerlink	奥地利 B&R 公司	运动控制
EPA	浙江大学、中控科技公司等	过程控制、运动控制
Modbus/TCP	法国 Schneider-electric 公司	过程控制
SERCOS-III	德国 Hilscher 公司	运动控制

## 1.4 EPA 技术与标准

EPA 是 Ethernet for Plant Automation 的缩写,它根据 IEC 61784-2 的定义,在 ISO/IEC 8802-3 协议基础上,进行了针对通信确定性和实时性的技术改造<sup>[17,26]</sup>,其通信协议模型构架如图 1.9 所示。

除了 ISO/IEC 8802-3/IEEE 802.11/IEEE 802.15、TCP(UDP)/IP 以及信息技术(IT)应用协议等组件外,EPA 通信协议还包括 EPA 实时性通信进程、EPA 快速实时性通信进程、EPA 应用实体和 EPA 通信调度管理实体。针对不同的应用需求,EPA 确定性通信协议簇中包含了以下几个部分:

### 1) 非实时性通信协议(N-real-time,NRT)

非实时通信是指基于 HTTP、FTP 以及其他 IT 应用协议的通信方式,如 HTTP 服务应用进程、电子邮件应用进程、FTP 应用进程等进程运行时进行的通信。非实时性通信协议部分主要针对商用以太网的通信需求,对于确定实时性通信相对来说不是首要考虑的问题,而对于部分需要保证数据完整性的应用服务,可利用 TCP 作为传输层协议满足其传输需求。在实际 EPA 应用中,非实时性通信

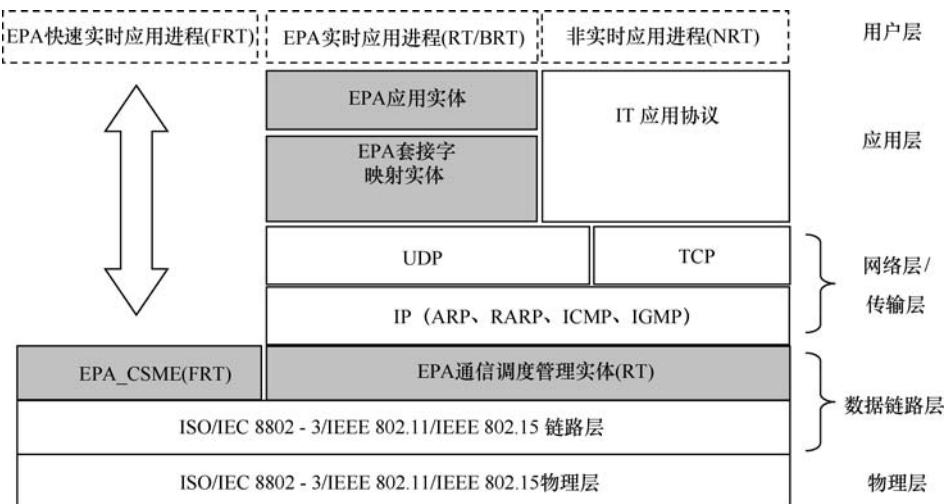


图 1.9 EPA 通信协议模型

部分应与实时性通信部分利用网桥进行隔离。

本书将对这部分技术不作单独介绍。

### 2) 实时性通信协议(real-time, RT)

实时性通信是指满足普通工业领域实时性需求的通信方式,一般针对流程控制领域。利用 EPA\_CSME 通信调度管理实体,对各设备进行周期数据的分时调度,以及非周期数据按优先级进行调度,详见第 2 章 2.2 节“EPA 确定性通信机制”。

一般情况下所指的 EPA 实时性通信协议即指 EPA-RT 实时性通信协议。

### 3) 快速实时性通信协议(fast real-time, FRT)

快速实时性通信是指满足强实时控制领域实时性需求的通信方式,一般针对运动控制领域。运动控制领域中数据发送周期时间短、频率高、数据量小,实时性要求一般相较于流程控制领域要高一个数量级。因此 FRT 快速实时性通信协议部分在 RT 实时性通信协议上进行了修改,包括协议栈的精简和数据复合传输,以此满足如运动控制领域等强实时性控制领域的通信需求。

### 4) 块状数据实时性通信协议(block real-time, BRT)

块状数据实时性通信是指对于部分大数据量类型的成块数据进行传输,以满足其实时性需求的通信方式,一般指流媒体(如音频流、视频流等)数据。这类数据在工厂环境中传输时由于其数据量比较大,占用大量带宽,而同时要满足成块数据的搬运实时性需求,因此在 EPA 协议栈中针对此类数据的通信需求定义了 BRT 块状数据实时性通信协议,及块状数据的传输服务。基于 EPA 网络的音频、视频等流媒体设备可以基于 EPA-BRT 提供的服务进行开发,以此在满足流媒体传输实时性的同时,可以控制网络带宽。

EPA 标准体系包括 EPA 国际标准和 EPA 国家标准两部分。

EPA 国际标准包括一个核心技术国际标准和四个 EPA 应用技术标准。以 EPA 为核心的系列国际标准为新一代控制系统提供了高性能现场总线完整解决方案,可广泛应用于过程自动化、工厂自动化(包括数控系统、机器人系统运动控制等)、汽车电子等,可将工业企业综合自动化系统网络平台统一到开放的以太网技术上来。基于 EPA 的 IEC 国际标准体系如图 1.10 所示。

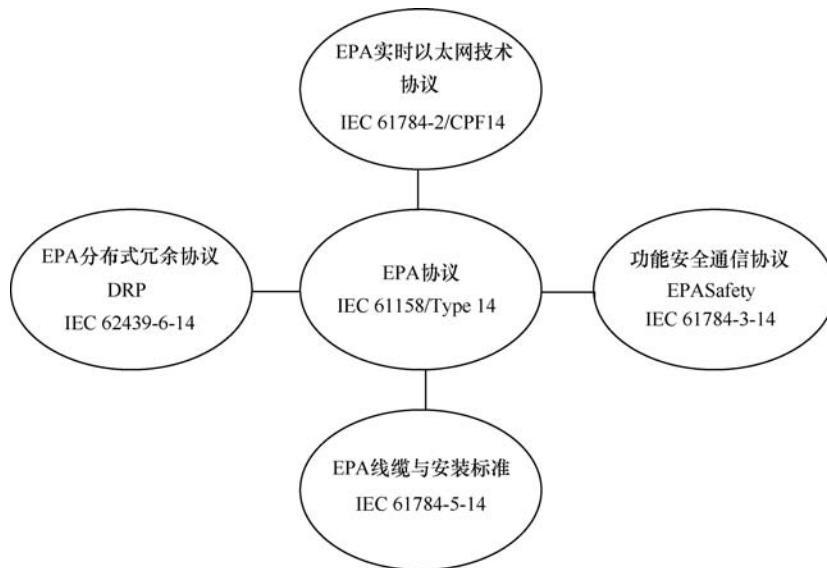


图 1.10 基于 EPA 的 IEC 国际标准体系

(1) EPA 现场总线协议(IEC 61158/Type14)在不改变以太网结构的前提下,定义了专利的确定性通信协议,避免工业以太网通信的报文碰撞,确保了通信的确定性,同时也保证了通信过程中不丢包,它是 EPA 标准体系的核心协议,该标准于 2007 年 12 月 14 日正式发布。

(2) EPA 分布式冗余协议 (distributed redundancy protocol, DRP) (IEC 62439-6-14)针对工业控制以及网络的高可用性要求,DRP 采用专利的设备并行数据传输管理和环网链路并行主动故障探测与恢复技术,实现了故障的快速定位与快速恢复,保证了网络的高可靠性。该标准于 2010 年底正式发布。

(3) EPA 功能安全通信协议 EPASafety (IEC 61784-3-14)针对工业数据通信中存在的数据破坏、重传、丢失、插入、乱序、伪装、超时、寻址错误等风险,EPASafety 功能安全通信协议采用专利的工业数据加解密方法、工业数据传输多重风险综合评估与复合控制技术,将通信系统的安全完整性水平提高到 SIL3 等级,并通过德国莱茵 TÜV 的认证。该标准于 2010 年底正式发布。

(4) EPA 实时以太网应用技术协议 (IEC 61784-2/CPF 14) 定义了三个应用技术行规, 即 EPA-RT、EPA-FRT 和 EPA-nonRT。其中 EPA-RT 用于过程自动化, EPA-FRT 用于工厂自动化, EPA-nonRT 用于一般工业场合。该标准于 2007 年 12 月 14 日正式发布, 并于 2010 年底发布了修订版。

(5) EPA 线缆与安装标准(IEC 61784-5-14)定义了基于 EPA 的工业控制系统在设计、安装和工程施工中的要求。从安装计划, 网络规模设计, 线缆和连接器的选择、存储、运输、保护、路由以及具体安装的实施等各个方面提出了明确的要求和指导。该标准于 2010 年底正式发布。

EPA 国家准则则包括《用于测量与控制系统的 EPA 系统结构与通信规范》、《EPA 一致性测试规范》、《EPA 互可操作测试规范》、《EPA 功能块应用规范》、《EPA 实时性能测试规范》、《EPA 网络安全通用技术条件》等。

## 参 考 文 献

- [1] 缪学勤. 现场总线技术的最新进展. 自动化仪表, 2000, 7:1,2.
- [2] 孙优贤, 褚健, 金建祥, 等.“现场总线接口的集散控制系统”鉴定技术报告. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [3] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [4] 王智, 王天然. 工业实时通信网络(现场总线)的基础理论研究与现状(上). 信息与控制, 2002, 31(2): 146-152.
- [5] 王智. 工业实时通信网络(现场总线)的基础理论研究与现状(下). 信息与控制, 2002, 31(3): 241-249.
- [6] 斯可克. 现场总线应用疑难解答. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] 周侗, 徐皑冬, 于海斌, 等. 现场总线工业控制系统信息集成技术研究. 仪器仪表学报, 2005, 7(zl): 557-559.
- [8] Lee J H, Shin H S. A bandwidth reallocation scheme for Ethernet-based real-time communication. Proceedings, the Second International Workshop on Real-Time Computing and Applications, Tokyo, 1995: 28-33.
- [9] Lee J H, Park S J. An error control scheme for Ethernet-based real-time communication. The Third International Workshop on Real-Time Computing and Applications, Seoul, 1996: 214-219.
- [10] Lee J H. Design of a communication system capable of supporting real-time RPC. The Second IEEE international Conference on Engineering of Complex Computer Systems, Montreal, 1996: 99-102.
- [11] Yavatkar R, Pai P, Finkei R. A reservation-based CSMA protocol for integrated manufacturing networks. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24 (8): 1247-1258.
- [12] Venkatramani C, Chiued T. Design, implementation and evaluation of a software-based re-

- al-time Ethernet protocol. Proceedings of ACM SIGCOMM'95, New York, 1995: 27-37.
- [13] Priddy D W, Malone J R, Smeed D N, et al. A real-time upgrade for Ethernet based factory networking. Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Orlando, 1995: 1631-1637.
- [14] Zhang L, Zhong C Q, Zhang L Y. Development of dynamic acquisition system of industrial field data on WWW. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(6): 907-911.
- [15] 刘明哲,徐皑冬,毕宇航. 确定性实时以太网通信协议研究. 仪器仪表学报,2005,7(zl): 505-507.
- [16] Yang S Y, Zheng D Q, Zhong C Q, et al. Research and implementation of communication technology in industrial Ethernet based on IPv6 technology. The 11th Joint International Computer Conference, Chongqing, 2004: 320-323.
- [17] 徐皑冬,王宏,刑志浩. 工业以太网实时通信技术. 信息与控制,2005,34(2): 60-65.
- [18] 郑萍,潘世永,李英. 基于 Ethernet 的全开放工业控制网络. 工业仪表与自动化装置, 2001,3: 6-9.
- [19] 王忠峰,于海斌,王宏,等. 工业以太网确定性通信实现方案. 仪器仪表学报,2005,7(zl): 491-492.
- [20] 陈积明,王智,等. 工业以太网的研究现状及展望. 化工自动化及仪表,2001,6: 1-4.
- [21] 唐鸿儒,丁伟,等. 用 Ethernet+TCP/IP 构建现场实时通信网络平台. 计算机应用研究, 2001,3 :45-48.
- [22] 徐皑冬,王宏,杨志家. 基于以太网的工业控制网络. 信息与控制,2000,2: 182-186.
- [23] 李嘉,杨佃福. 引入以太网技术是现场总线技术发展的一个必然趋势. 自动化仪表, 2001,22(5): 1-4.
- [24] 王平,谢昊飞. 工业以太网技术. 北京:科学出版社,2007.
- [25] 彭瑜. 工业以太网及以太网向现场层延伸的若干问题的思考. 自动化博览,2003,6: 10-16.
- [26] 冯冬芹,俞海斌,金建祥,等. EPA 实时以太网与标准化. 自动化仪表,2005,26 (9): 1-3.

## 第 2 章 EPA 确定性与实时性通信技术

### 2.1 以太网的通信“不确定性”

众所周知,由于以太网采用的介质访问控制协议是载波监听多路访问/冲突检测协议(carrier sense multiple access/collision detection, CSMA/CD)。这是一种随机性的通信调度方式,网络每个节点要通过竞争来取得信息的发送权,一般可以形象地把 CSMA/CD 理解为“先听后说,边说边听”<sup>[1,2]</sup>。

“先听后说”是指在发送数据之前先监听总线的状态。在以太网上,每个设备可以在任何时候发送数据。发送站在发送数据之前先要检测通信信道中的载波信号,如果检测到载波信号,说明没有其他站在发送数据,或者说信道上没有数据,该站可以发送。否则,说明信道上有数据,等待一个随机的时间后再重复检测,直到能够发送数据为止。当信号在传送时,每个站均检查数据帧中的目的地址字段,并依此判定是接收该帧还是忽略该帧。

由于数据在网中的传输需要时间,总线上可能会出现两个或两个以上的站点监听到总线上没有数据而发送数据帧,因此就会发生冲突,“边说边听”就是指在发送数据过程的同时检测总线上的冲突。冲突检测最基本的思想是一边将信息输送到传输介质上,一边从传输介质上接收信息,然后将发送出去的信息和接收的信息进行按位比较。如果两者一致,说明没有冲突;如果两者不一致,则说明总线上发生了冲突。一旦检出冲突以后,不必把数据帧全部发完,CSMA/CD 立即停止数据帧的发送,并向总线发送一串阻塞信号,让总线上其他各站均能感知冲突已经发生。总线上各站点“听”到阻塞信号以后,等待一段随机长度的时间后重新发送,该随机时间将由标准二进制指数补偿算法确定。重发前的时间在  $0 \sim 2^{i-1}$  的时间片中随机选择(此处  $i$  代表被节点检测到的第  $i$  次碰撞事件),一个时间片为重发循环所需的最长时间。但是,在 10 次碰撞发生后,该间距将被冻结在最大时间片(即 1023)上,而 16 次碰撞后,则认为本次报文发送失败<sup>[1,2]</sup>。

CSMA/CD 的优势在于站点无须依靠中心控制就能进行数据发送。当网络通信量较小的时候,冲突很少发生,这种介质访问控制方式是快速而有效的。当网络负载较重的时候,就容易出现冲突,网络性能也相应降低。如图 2.1 所示,对于基带总线而言,冲突的检测时间不会超过任意两个站之间最大传输延迟时间的二倍。

在 CSMA/CD 算法中,当检测到冲突并发送完阻塞信号以后,为了降低再次冲突的概率,需要等待一个随机时间,然后再用 CSMA 的算法重新发送数据帧。

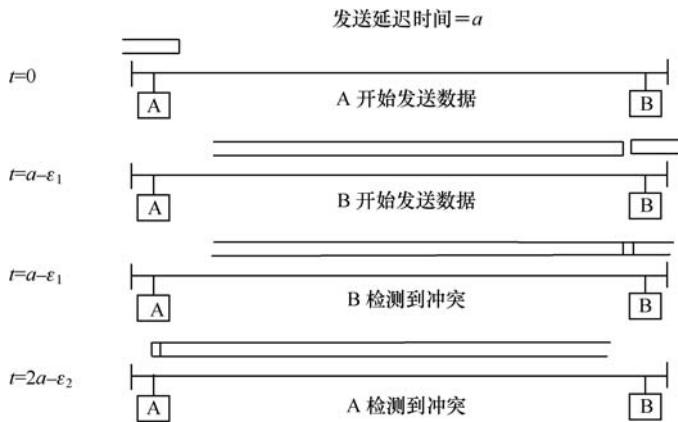


图 2.1 检测冲突的时序

为了决定这个随机时间,最常使用的退避算法称作二进制指数退避算法:

$$T_N = RA2^N$$

式中, $R$ 为随机数; $A$ 是时间片(可选总线循环一周的时间); $N$ 是连续冲突的次数。整个算法过程可以理解为图 2.2。

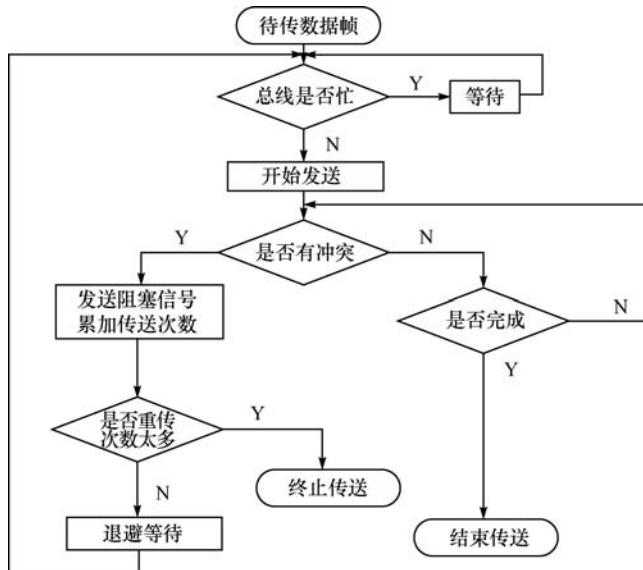


图 2.2 CSMA/CD 的传送流程

- (1) 每个帧在首次发生冲突时的退避时间为  $T_1$ 。
- (2) 当重复发生一次冲突,则退避时间加倍;否则组织重传数据帧。

(3) 若超过最大重传次数,则该数据帧将不再重传,并报告出错。

这个算法中等待时间的长短与冲突的历史有关,一个数据帧遭遇的冲突次数越多,则等待时间越长,说明网上传输的数据量越大。由此可见,基于 CSMA/CD 原理的以太网通信存在着时延“不确定性”的特点,即在以太网通信系统中,不能保证报文在可预测的时间内可靠传输。发送节点的应用程序发送报文的时刻起到该报文被接收节点的应用程序接收到的这段时间缺乏可控性。如报文丢失,通信时延将为无穷大。也将意味着控制系统采集的数据不能及时反馈到控制中心,控制器也不能及时地将正确的控制数据发送到执行机构。控制系统的稳定性将会变差,甚至会不稳定,损坏设备。

确定性实时通信是工业控制系统的根本要求,控制系统的搭建和设计过程需要尽可能地将网络传输的因素从设计约束条件中排除出去,以此来构建一个具有高性能的控制系统。因此,保证工业控制网络的通信确定性和实时性,是网络设计需要考虑的必要问题也是首要问题。

## 2.2 EPA 确定性通信机制

如前所述,为提高工业以太网通信的实时性,一般采用以下措施:

- (1) 提高通信速率;
- (2) 减小系统规模,控制网络负荷;
- (3) 采用以太网的全双工交换技术;
- (4) 采用基于 IEEE 802.3p 的优先级技术。

采用上述措施可以使其不确定性问题得到相当程度的缓解,但不能从根本上解决以太网通信不确定性的问题。

对于第(1)种和第(2)种措施,无论是提高以太网通信速率,还是减小系统规模,降低网络负荷,都是减小以太网报文碰撞的概率。也就是说,控制系统中,任何一个设备发送数据时,仍然有可能发生报文碰撞,并导致实时测量、控制数据不能及时发送出去。

而采用第(3)种措施时,只是在以太网节点和与其相连接的交换机端口之间,发送和接收数据采用了不同通信通道,避免了碰撞。但不能避免多个设备同时向某一设备发送数据时的报文阻塞问题。

至于第(4)种措施,采用基于 IEEE 802.3p 的优先级技术虽然可在一定程度上解决了不同优先级的报文之间传送的时序问题,但由于 IEEE 802.3p 只规定了 7 个优先级水平,对于规模较大的系统来说,现场的测量、控制数据传送是遵循“最新即最好”(latest is best)的原则,现场所有的测量、控制数据发送的优先级都相同,仍然会出现报文碰撞和阻塞的问题。