实时工业以太网 EtherCAT 时序特性分析系统

郇 极 刘 喆 靳 阳 胡 星

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 分析了实时工业以太网的特点,提出一种时序特性分析系统,该系统硬件部分包括数据侦听器和监听计算机;软件部分是安装在监听计算机上的时序分析仪. 数据侦听器是以现场可编程门阵列(FPGA, Field-Programmable Gate Array)为核心的硬件单元,主要功能是捕捉被监听链路上的数据帧,提取并封装原始帧的信息生成一个 Probe 帧,随后转发原始帧和 Probe 帧到监听计算机. Probe 帧是提出的一种专门用于实时工业以太网时序和功能分析的以太网数据帧. 时序分析仪解析 Probe 帧中封装的信息,按照用户设置进行计算统计后,以图形化的方式显示分析结果. 最后,构建基于实时工业以太网 EtherCAT 的实验系统进行功能验证. 实验结果表明,时序特性分析系统能够完成对实时工业以太网数据的在线捕捉和离线分析,并能清晰、直观的显示被监听链路和器件时序特性的解析结果.

关 键 词: 实时工业以太网; 时序分析; 数据侦听; Probe 帧; EtherCAT

中图分类号: TN 915.06

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)09-1238-05

Timing analysis system for real-time industrial Ethernet EtherCAT

Huan Ji Liu Zhe Jin Yang Hu Xing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The characteristics of real-time industrial Ethernet (RTIE) were studied. A timing analysis system was proposed consisting of probe, monitoring PC and Timing-Analyzer software. Each of the passing frames was captured by the probe which includes one field-programmable gate array (FPGA) core. The information of the original frame was extracted and encapsulated in the probe frame, which was transmitted to the monitoring PC together with the original frame. The probe frame is one specific Ethernet frame format for the timing or functional analysis of RTIE. The information contained in the probe frames was parsed and synthesized by the timing-analyzer. The graphical results were displayed according to the user-defined parameters. A verification system based on EtherCAT was presented. The implementation shows that the on-line acquiring and off-line analyzing for RTIE were carried out by the proposed timing analysis system. The graphical result is clear and useful for determining the timing characteristics of the communication links and devices.

Key words: real-time industrial Ethernet; timing analysis; data probing; probe frame; EtherCAT

实时工业以太网技术是以太网技术在自动控制领域的延伸和发展,是工业控制自动化领域的一个重要发展方向[1]. 它具有采用标准以太网器件,基于串行转发技术,大部分使用集总帧结构等特点,典型协议包括 EtherCAT, Profinet 和 SERCOS III 等[2]. 针对此类协议的研究主要集中于系统功能实现以及时序特性分析等方面[3].

实时工业以太网的时序特性包括通信链路和器件的延迟、周期和抖动等,针对各类协议时序特性的研究比较丰富,主要的研究方法和内容是特性参数的模型建立和图形化结果的定性分析[4]. 但是,数据捕获方法以及分析统计算法很少被涉

收稿日期: 2012-10-09; **网络出版时间**: 2012-11-29 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121129.1104.002.html

作者简介: 郇 极(1953-),男,辽宁沈阳人,教授,huan@buaa.edu.cn.

及,一般解析过程需要调用多种软件,其中包括 Wireshark 等报文分析工具和 Matlab 等建模、画图工具,因此软硬件的集成度也不高.

德国 Hilscher 公司提出一种实时以太网网络延迟和时间抖动分析系统 netANALYZER[5],该系统功能丰富,但是数据捕获硬件需要使用 ExpressCard 或 PCI 接口与监听计算机连接,组配能力受到局限,而且数据帧信息没有被完全保存,离线分析能力较弱.

本文提出一种软硬件集成的时序特性分析系统,该系统可以在线捕捉及离线分析被监听链路上的数据帧,并最终以图形化方式显示相应链路和器件的时序特性分析结果.

1　系统整体架构

系统整体架构如图 1 所示. 其中硬件部分包括数据侦听器和监听计算机;软件部分是安装在监听计算机上的时序分析仪.

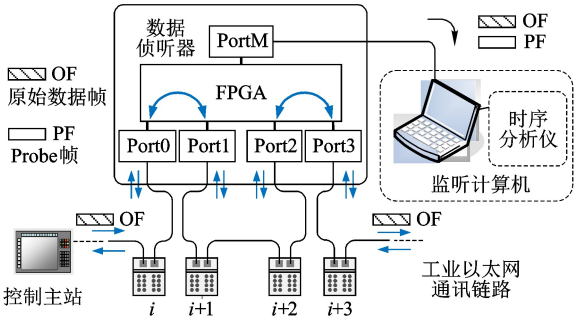


图 1　系统架构

数据侦听器是安装在工业以太网网络中的硬件单元,它的功能是捕捉被监听链路上的原始数据帧(图中所示 OF),提取数据帧信息包括时间戳、长度、是否出错等,封装这些信息生成一个 Probe 帧(图中所示 PF),最后发送原始数据帧和 Probe 帧至监听计算机. Probe 帧是本文提出的一种专门用于实时工业以太网时序、功能分析的以太网数据帧.

监听计算机是一台配置有千兆以太网口的普通计算机. 监听计算机上安装的时序分析仪软件会自动捕捉数据侦听器发送过来的原始数据帧和 Probe 帧,解析 Probe 帧中封装的信息,根据用户的设置对数据进行筛选、运算和统计,最后显示图形化的分析结果.

2　以太网数据侦听器

2.1　总体结构

数据侦听器[6]是本文提出的实时工业以太网时序特性分析系统的重要硬件组成单元. 如图 1 所示,数据侦听器主要由现场可编程门阵列(FPGA,Field-Programmable Gate Array)和 5 个标准以太网接口组成. FPGA 是侦听器的核心,实现数据帧转发、Probe 帧生成等逻辑控制功能,采用 Altera 公司 EP3C25 系列芯片;Port 0 ~ 3 是 4 个百兆以太网接口,分别与需要被分析的网络器件端口用网线相连,采用 LXT973 系列 10/100M 双端口以太网 PHY 芯片;PortM 是千兆以太网接口,与监听计算机相连,采用 88E1111 千兆以太网 PHY 芯片.

2.2　FPGA 内核设计

FPGA 是数据侦听器的核心,其内部模块设计如图 2 所示.

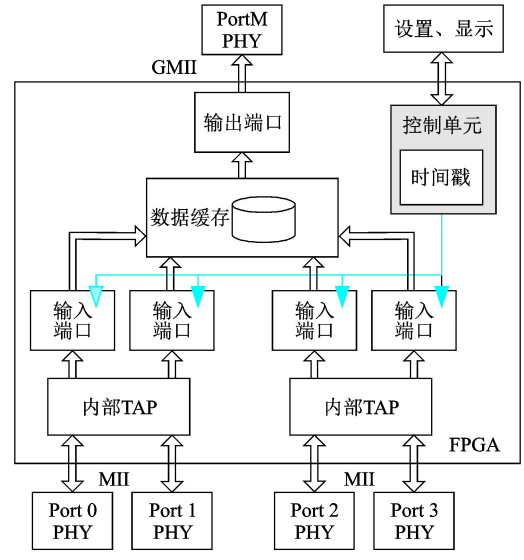


图 2　FPGA 内部模块设计

内部 TAP 模块实现原始数据帧的分路转发功能. 输入端口模块的功能如图 3 所示,它主要完成数据帧(图中所示 OF)的信息提取和 Probe 帧(图中所示 PF)的生成功能. 校验子模块完成原始数据帧接收、信息提取和错误校验等功能;Probe 帧生成子模块封装原始数据帧的各种信息包括端口号、时间戳、长度、是否出错等,并生成一个对应的 Probe 帧;两种数据帧都暂时存放在 buffer 子模

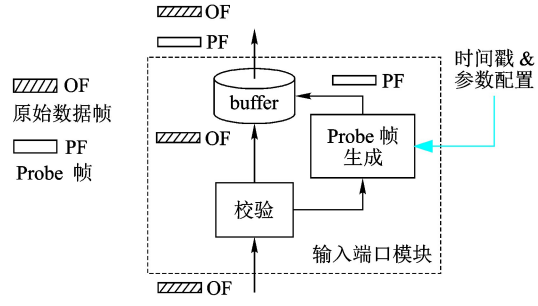


图 3　输入端口模块功能示意图

块中,等待下一步处理.

数据缓存模块依次读取各个输入单口模块 buffer 中的数据,并写入内部缓存中. 输出端口模块负责将内部缓存中的数据通过端口 PortM 发送给监听计算机. 控制单元模块控制其他各个模块,其内部时间戳子模块负责提供一个稳定的分辨率为 10 ns 的时间戳基准.

2.3 Probe 帧结构、功能

Probe 帧是本文提出的一种数据帧,是数据侦听器和时序分析仪进行数据交换的载体,其结构如图 4 所示. Probe 帧采用 802.3 标准 MAC 帧格式,目的地址和源地址字段值均为 6 Byte 的 0xFF(广播地址),EtherType 字段值为 0x0923. MAC 数据包括 Probe 首部和填充两个字段. 填充字段内的数据为 30 Byte 的 0,该字段的功能是使整个帧长度达到以太网最短帧长度 64 Byte.

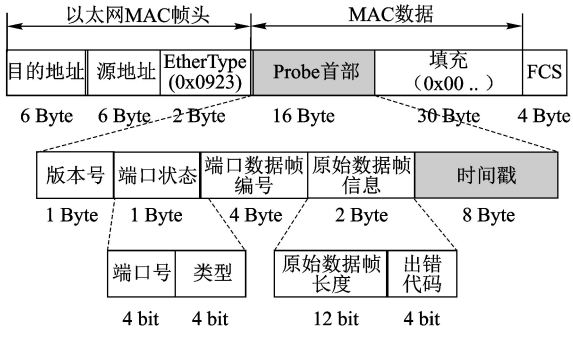


图 4 Probe 帧结构

Probe 首部字段的长度为 16 Byte,其子字段含义如表 1 所示. 该字段封装了侦听器端口以及原始数据帧的各种信息,其中最重要的是时间戳. 数据侦听器在捕捉到原始数据帧的帧起始标记(SFD, Start of Frame Delimiter)时,会在相应的 Probe 帧中嵌入一个以 10 ns 为单位的时间戳,该时间戳即为本系统中时序分析仪的主要操作对象.

表 1 Probe 首部子字段含义

字段名称	含义
版本号	Probe 帧协议的版本号
端口号	数据侦听器的端口号
类型	端口的物理介质、双工、速度等信息
端口数据帧编号	对应的原始帧在端口中的顺序编号
原始数据帧长度	对应的原始帧的长度
出错代码	对应的原始帧出错类型,0 为没有错误
时间戳	以 10 ns 为单位的时间戳信息

Probe 帧和原始数据帧一同被发送到主站并被捕获、保存,因此在没有改变原始数据帧的前提下,尽可能多的保留了原始帧的信息,使得精准的离线分析成为可能.

3 时序分析仪

3.1 软件功能

时序分析仪是安装在监听计算机上的工具软件,分析数据侦听器发送过来的 Probe 帧,根据用户的设置进行数值计算和统计,最终显示图形化的解析结果,从而对工作器件性能或通信链路质量进行评价.

时序分析仪的功能模块如图 5 所示. 数据捕捉模块捕获监听计算机千兆以太网接口接收到的数据帧并保存成 Pcap 格式文件;文件读取模块加载 Pcap 文件后调用延迟分析和周期分析等模块生成预处理数据;通过调用过滤设置模块用户可以定义分析数据帧的范围;接着统计分析模块对预处理数据进行统计运算;最后图形化显示模块显示分析结果.

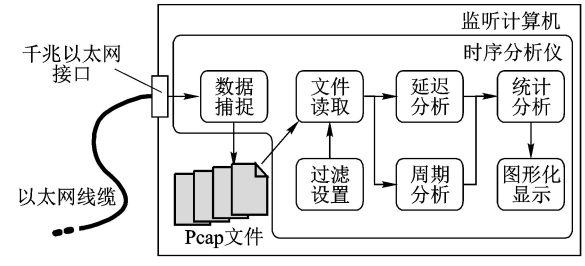


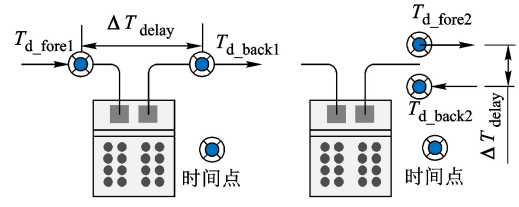
图 5 时序分析仪功能图

3.2 分析方法原理和算法

时序分析仪的主要对象是延迟时间和周期时间,进行统计计算后获得这两种时序特性参数的统计值和抖动特性.

3.2.1 延迟时间分析方法

延迟的测量需要使用数据侦听器的两个端口,算法涉及的两类数据帧定义如下:时序在前的称为“前帧”(fore),时序在后的称为“后帧”(back),二者的时间差 ΔT_{delay} 即为所测的延迟时间. 图 6 所示为此分析方法的两种应用.



a 内部延迟测量 b 右端延迟测量

图 6 延迟分析方法示意图

图 6a 所示前帧、后帧分别从器件左端口输入、右端口输出,时间差 ΔT_{delay} 即为该方向上的以太网数据流在器件内的延迟时间;图 6b 所示前帧、后帧分从器件的右端口输出、输入,时间差

ΔT_{delay}即为以太网数据流在该器件右侧的总延迟时间.

延迟时间算法使用的参数名称及意义如表 2 所示. 本文提出的算法忽略线缆长度的因素. 其中ΔT_{rx},ΔT_{tx}可以通过查 PHY 芯片手册得到,ΔT_{loop}经实验测得为 200 ns.

表 2　算法参数含义

参数名称	含义
T_{s_fore},T_{s_back}	前帧、后帧的时间戳
T_{d_fore},T_{d_back}	前帧、后帧经过器件的真实时间
ΔT_{rx},ΔT_{tx}	PHY 芯片 RX 接收、TX 发送数据的延迟
ΔT_{loop}	FPGA 内部 TAP 的转发延迟

延迟时间的算法如图 7 所示,可以推导延迟时间 ΔT_{delay}的公式如下:

$$\Delta T_{delay} = T_{d_back} - T_{d_fore} \tag{1}$$

$$\Delta T_{loop} + \Delta T_{tx} = T_{d_fore} - T_{s_fore} \tag{2}$$

$$\Delta T_{rx} = T_{s_back} - T_{d_back} \tag{3}$$

根据式(1)~式(3)可得所求延迟时间的表达式为

$$\Delta T_{delay} = T_{s_back} - T_{s_fore} - \Delta T_{loop} - \Delta T_{rx} - \Delta T_{tx} \tag{4}$$

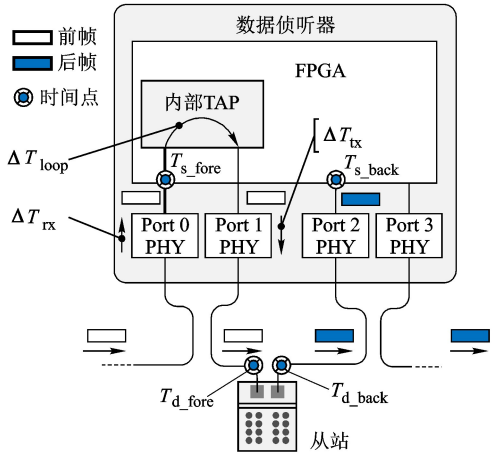


图 7　延迟时间分析算法示意图

3.2.2　周期分析方法

此分析方法以数据侦听器的某一个端口作为测量端口,研究单向链路中周期性数据帧的周期性抖动. 如图 8 所示,$T_d(i)$是数据帧经过器件右端口输出的时间,$T_s(i)$是数据帧在数据侦听器中的时间戳.

$$T_{period}(i) = T_d(i) - T_d(i-1) = T_s(i) - T_s(i-1)$$
$$i = 2,3,\cdots,n \tag{5}$$

3.2.3　统计分析及抖动特性分析

时序分析仪不仅可以计算单次延迟、周期时间,而且还可以对一段数据流进行统计分析,得到延迟、周期时间的统计学特征参数,它反应了该时序参数的抖动特性. 抖动特性分析的特征值包括

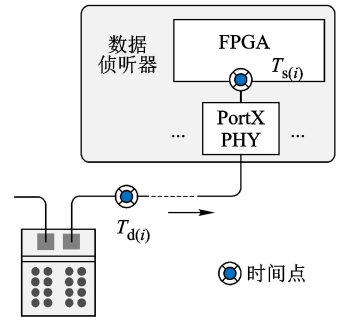


图 8　周期分析方法示意图

平均值、标准偏差 σ、最值以及峰峰值等.

时序分析仪还会以图形化的方式显示最终分析结果. 图形化结果包括两种:一个是时间趋势图,表示抖动与时间的关系,分别以时间和被测值为 x 轴和 y 轴;另一个是分布直方图,表示抖动的分布规律,分别以被测值和发生次数为 x 轴和 y 轴.

3.3　软件界面

时序分析仪使用 C#语言在 NET 2.0 平台上开发而成. 显示界面如图 9 所示. 时序分析仪可以同时进行多个分析任务,并得到清晰的解析结果.

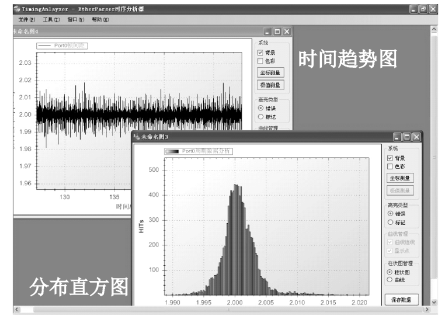


图 9　时序分析仪的界面

4　实验验证系统

为了验证本文提出的时序分析系统的性能,构建了一个采用以实时工业以太网 EtherCAT 的实验系统. EtherCAT 是由德国 BECKHOFF 自动化公司于 2003 年提出的实时工业以太网技术,使用标准以太网器件和串行转发技术实现,已经成为工业以太网的主流技术之一,获得广泛应用[7].

实验系统组成如图 10 所示,包括一个控制主站,两个带有 EtherCAT 接口的伺服及电机,数据侦听器和监听计算机.

系统开始工作后,控制主站一直发送周期性数据帧控制两个伺服电机运动,通信周期 2 ms. 实验系统工作时,数据侦听器始终捕捉 EtherCAT 链路上的数据帧,并发送给监听计算机. 实验系统工

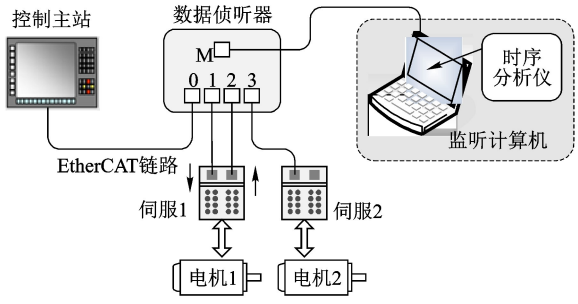


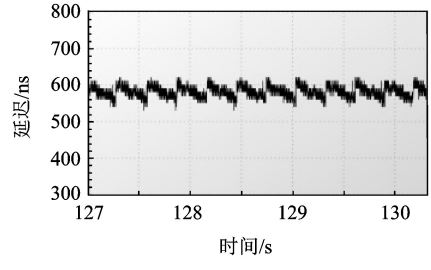
图 10 实验系统结构

作结束后,时序分析仪开始分析被监听链路的时序特性.

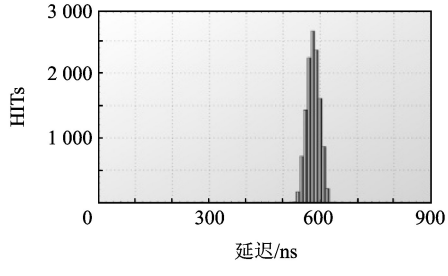
4.1 延迟分析

本次实验的延迟分析对象是下行数据流在伺服 1 内部的延迟. 数据侦听器的 Port 0 是前帧端口,Port 2 是后帧端口.

延迟分析的结果如图 11 所示. 图 11a 是时间趋势图,从图中可以看出该伺服的处理延迟在 550 ~ 650 ns 之间成一定周期性规律抖动;图 11b 是分布直方图,可以看出延迟时间主要集中在 570 ~ 620 ns 这个区间. ΔT_{rx}, ΔT_{tx}, ΔT_{loop} 的值分别为 180 ns,50 ns 和 200 ns,测试数据实例如表 3 所示,抖动特性的特征值如表 4 所示.



a 时间趋势图



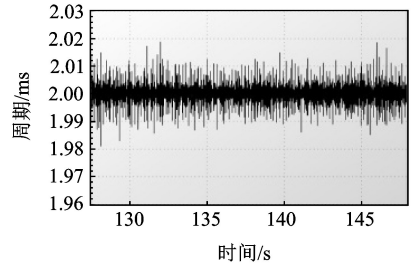
b 分布直方图

图 11 延迟分析结果图

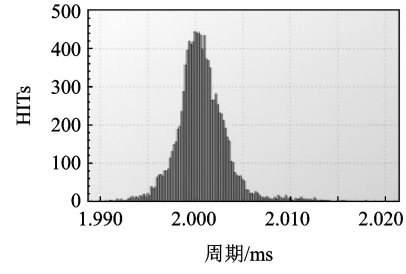
4.2 周期分析

周期分析对象是主站发送的下行周期性数据帧,因此选择数据侦听器的 Port 0 为测试端口.

周期分析的结果如图 12 所示. 图 12a 是时间趋势图:控制主站发送数据帧的周期在 1.98 ~ 2.02 ms的范围内无规律的抖动;从图12b分布直方图可以看出周期抖动近似正态分布. 测试数据实例如表 3 所示,抖动特性的特征值如表 4 所示.



a 时间趋势图



b 分布直方图

图 12 周期分析结果图

表 3 测试数据实例 ns

测量序号	T_{delay}	T_{period}/ms	T_{s_back}(Port 2)	T_{s_fore}(Port 0)
0	570		126 793 564 250	126 793 566 260
1	590	2.001	126 795 565 250	126 795 567 260
2	580	1.998 92	126 797 567 190	126 797 566 180
3	600	1.999 96	126 799 567 170	126 799 566 140
4	580	2.001 24	126 801 568 390	126 801 567 380
5	570	1.998 24	126 803 566 620	126 803 565 620

表 4 抖动特征值列表

模式	平均值	最大值	最小值	标准偏差 σ
延迟分析/ns	581	620	530	17.60
周期分析/ms	2.008	2.021	1.985	0.002 759

5 结 论

本文提出一种时序特性分析系统,数据侦听器和侦听计算机采用千兆以太网连接,硬件单元组配简单可靠;Probe 帧是系统硬件和软件进行集成交互的数据载体,它封装了原始帧的所有信息,使系统轻松实现时序特性分析功能;时序分析仪的软件功能集成度高,不依赖其他工具软件即可独立完成解析工作. 最后本文构建基于 EtherCAT 的实验系统,实验结果表明,本文提出的时序特性分析系统能够完成对实时工业以太网数据的在线捕捉和离线分析,并清晰、直观的显示时序特性解析结果,图形化的展示通信链路和器件的时序特性.

(下转第 1248 页)

[D]. 西安: 西安电子科技大学数学与统计学院,2008
Wang Jiangang, Liu Sanyang. Math model and optimize for gas transmission and distribution network in cities [D]. Xi'an: School of Mathematics and Statistics, Xi Dian University, 2008 (in Chinese)

[11] Milani A E, Haghifam M R. A new probabilistic approach for distribution network reconfiguration: applicability to real networks[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 57: 169-179

[12] Liu C C, Lee S J, Venkata S S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution system [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1988, 3: 619-629

[13] Sandercock W G. Union gas applies expert system to optimize pipe line [J]. Pipeline Industry, 1994: 37-40

[14] Chebouba A, Yalaoui F, Smati A, et al. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization [J]. Computer & Operations Research, 2009, 36: 1916-1923

[15] 蔡茂林,香川利春. 气动系统能量消耗评价体系及能量损失分析[J]. 机械工程学报,2007,43(9):69-74
Cai Maolin, Toshiharu Kagawa. Energy consumption analysis and evaluation system for pneumatic system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 69-74 (in Chinese)

[16] 石兆玉. 流体网络的分析与综合[M]. 北京:清华大学热能研究所,1993:16-22
Shi Zhaoyu. Analysis and synthesis of fluid network[M]. Beijing: Thermal Energy Research Institute of Tsinghua University, 1993: 16-22 (in Chinese)

[17] 向延海. 城镇燃气管网的水力计算[J]. 重庆建筑,2000(4):37-41
Xiang Yanhai. Hydraulic calculation of urban gas pipeline network[J]. Iron & Steel Technology, 2000(4): 37-41 (in Chinese)

[18] SMC(中国)有限公司. 现代实用气动技术[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社,2008
SMC (China) Co Ltd. Modern practical pneumatic technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2008 (in Chinese)

[19] Fried E, Idelchik I E. Flow resistance: a design guide for engineers [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989: 219, 230

[20] 邓敦夏,贺礼清. 流体流动手册[M]. 北京:中国石化出版社,2004
Deng Dunxia, He Liqing. Fluid flow handbook [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004 (in Chinese)

(编 辑:赵海容)

(上接第 1242 页)

参考文献 (References)

[1] Smith Jack. Basics of industrial ethernet[J]. Plant Engineering, 2004, 58(8): 65-71

[2] 刘喆,郇极,刘艳强. 基于 XML 的 EtherCAT 工业以太网协议解析技术[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(9):1086-1090
Liu Zhe, Huan Ji, Liu Yanqiang. Parser of industrial Ethernet EtherCAT based on XML[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(9): 1086-1090 (in Chinese)

[3] Wang Z, Song Y Q, Chen J M, et a1. Real-time characteristics of Ethernet and its improvement [C]//Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 1311-1318

[4] 胡国传,沈杰,刘彬,等. 基于 PROFINET IO 的延迟和抖动研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(9):2153-2160
Hu Guochuan, Shen Jie, Liu Bin, et al. Study on delay and jitter based on PROFINET IO[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 2153-2160 (in Chinese)

[5] hilscher. netANALYZER NANL-C500-RE and NANL-B500-RE and software installation, operation and hardware description [EB/OL]. 2010-03[2012-05-18]. http://www.hilscher.com/files_manuals/netANALYZER_usermanual_en.pdf.

[6] Liu Zhe, Huan Ji, Hu Xing. Multi-channel probe for industrial Ethernet measurement[C]//The Proceedings of 2012 International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 2012: 1476-1479

[7] 郇极,刘艳强. 工业以太网现场总线 EtherCAT 驱动程序设计及应用 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010:3-4
Huan Ji, Liu Yanqiang. The driver development and application of industrial Ethernet fieldbus EtherCAT[M]. Beingjing: BUAA Press, 2010: 3-4 (in Chinese)

(编 辑:文丽芳)