

# 用于可重构机床控制系统的电力线通信技术

杨东升 郇极

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

Stefan Schmitz Karl-Heinz Wurst

(斯图加特大学机床控制技术研究所, 斯图加特 70174, 德国)

**摘 要:** 介绍了可重构机床对通信系统的要求, 提出了一种基于宽带电力线通信 (PLC, Power Line Communication) 技术的新型通信系统. 通过对机床电力线的信道特性和噪声频谱的分析与测量, 选定了通信系统的载波频率和带宽等参数. 为了对抗电力线信道的多径效应, 提高频谱利用率, 实现可靠高效的数据传输, 采用正交频分复用技术 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplex) 作为调制解调方式. 开发了 PLC 调制解调器, 定义了物理层帧结构. 最后以机床主轴伺服系统为例对该通信系统进行了实验验证. 实验结果表明, 该系统实现了有效数据传输率 10 Mbit/s, 误比特率 (BER, Bit Error Rate) 小于  $10^{-8}$  的高效数据传输.

**关键词:** 可重构机床; 电力线通信; 正交频分复用

**中图分类号:** TN 913.8

**文献标识码:** A

## Power line communication for control system of reconfigurable machine tools

Yang Dongsheng Huan Ji

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

Stefan Schmitz Karl-Heinz Wurst

(Institute for Control Engineering of Machine Tools and Manufacturing Units, Stuttgart University, Stuttgart 70174, Germany)

**Abstract:** The communication system requirements for reconfigurable machine tools were analyzed. A new communication system based on PLC (Power Line Communication) was proposed. The carrier frequency and bandwidth of the communication system were settled according to the channel characteristics and noise spectrum of the power line in machine tools. To deal with multipath fading, improve the spectral efficiency, and obtain a high speed data transmission, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) was employed as means of modulation and demodulation. A PLC modem was developed. The PHY (physical layer) frame structure was defined. A field test system based on main spindle servo system was set up. The experimental results show that it achieves a data rate of 10 Mbit/s with BER (Bit Error Rate) less than  $10^{-8}$ .

**Key words:** reconfigurable machine tools; power line communication; orthogonal frequency division multiplex

现代社会产品生命周期不断缩短, 要求企业制造系统具备更好的柔性和可维护性, 以便对不断变化的市场需求做出快速反应<sup>[1]</sup>. 因此, 现代制造系统应当具有模块化, 可重构的特点. 可重构机床作为可重构制造系统的核心, 其关键使能技术是机床的模块化设计<sup>[2]</sup>. 该设计要求模块在功能上相对独立, 对外具有标准化的接口, 且接口的数目尽可能少, 从而简化模块间布线, 易于快速拆装, 降低机

床重构的时间和资金成本<sup>[3]</sup>.

机床电气接口 (包括电力接口和控制接口) 的标准化和接口间布线的最简化是可重构机床模块接口设计的主要目标. 当前广泛采用的现场总线系统在一定程度上降低了传统控制器与传感器/执行器之间并行布线的复杂度. 然而, 现场总线系统仍然需要相当数量的专用数据线, 此外业界存在多种总线协议, 使得物理层接口的标准化很难实现. 工

收稿日期: 2010-06-08

基金项目: 德国研究协会 (DFG), TFB59/TP3

作者简介: 杨东升 (1980-), 男, 河北秦皇岛人, 博士生, yds@me.buaa.edu.cn

业以太网为物理层的标准化提供了一种解决方案, 如 SoE (SERCOS over EtherCAT), CoE (CANopen over EtherCAT)等, 但是目前还处于研究阶段<sup>[4]</sup>.

本文研究宽带电力线通信(PLC, Power Line Communication)技术, 探索一种全新的解决方案. 该方案使用机床动力电缆作为控制系统数据传输的媒介, 使控制单元和机床各功能模块间只有一个物理电气接口, 进一步实现了接口的标准化和简化. 本文以机床主轴单元为例, 开发了一种基于 PLC 技术的新型通信系统, 证明了方案的可行性.

## 1 电力线通信技术和系统结构

电力线通信技术是指利用电力线本身(及其形成的输/配电网)作为介质实现数据传输的一种通信技术. 由于信号传输的介质电力线已经存在, 无需其他专用通信电缆, 这显著简化了通信系统结构, 降低了布线成本.

传统的电力线通信应用主要集中在电力线自动抄表、电网负载控制和供电管理等窄带通信领域. 近年来, 电力线通信技术在工业自动化, 智能家居, 宽带接入网等领域的应用得到了广泛关注. 由德国西门子等公司联合研发的执行器-传感器接口总线系统 (ASI, Actuator Sensor Interface) 已经于 2000 年成为国际标准, 在自动化和低压电器领域获得广泛应用. ASI 总线采用 24 V 非屏蔽电缆进行通信连接, 主要用于具有开关量特征的传感器和执行器系统, 其典型的总线传输速率为 167 Kbit/s<sup>[5]</sup>. 2000 年以来, 电力线通信作为 Internet 宽带接入的方式之一获得较快发展. 欧美各发达国家的公司和研究机构纷纷开展了高速电力线通信技术的研究, 开发出各种专用的 PLC 调制解调芯片<sup>[6]</sup>.

与传统机床中采用的电力线载波通信不同, 本文的电力线通信系统采用宽带电力线通信技术, 系统结构如图 1 所示. 本系统不仅满足如可编程逻辑控制器及 IO 等开关量通信, 而且满足伺服系统的高速数据传输.

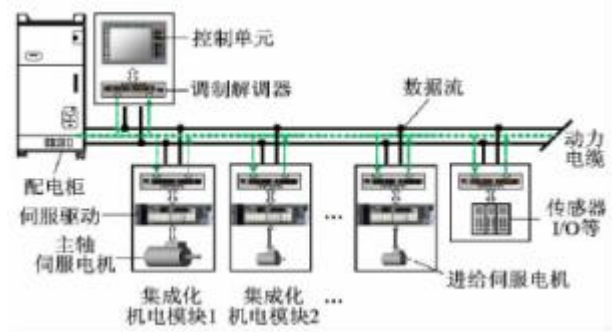


图1 机床电力线通信系统结构

电力线通信系统具有专用性. 每个具体应用的信道特性, 噪声频谱, 数据调制方式等都各不相同. 现有的电力线通信系统不能满足现代机床控制系统对数据传输率 ( $>1\text{Mbit/s}$ )、误比特率 ( $<10^{-8}$ ) 等的要求. 本文所讨论的宽带电力线通信系统是一个全新的探索, 目前尚无研究先例.

## 2 信道特性及噪声频谱

使用机床电力线作为通信信道时, 必须首先对其信道特性和噪声频谱进行分析, 以此作为选择通信参数和信号调制方式的依据. 本文以图 1 中控制单元与主轴单元之间的动力电缆作为研究对象, 分析测试信道传递函数和噪声频谱, 信道的等效简化结构如图 2 所示.

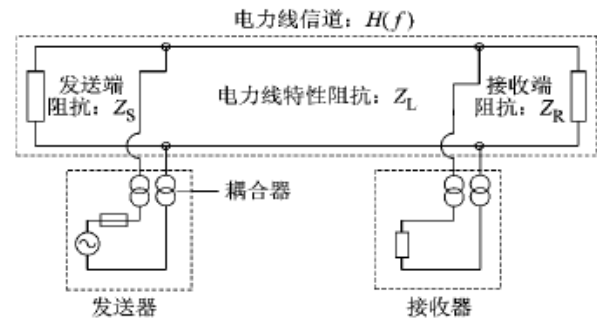


图2 电力线信道等效简化结构

本系统采用屏蔽对称电缆作为动力电缆. 电缆特性阻抗为  $77\ \Omega$ . 电磁波在电缆中的传播速度  $v$  约为  $2 \times 10^8\ \text{m/s}$ , 其波长  $\lambda$  为:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

式中  $f$  为电磁波频率. 本文主要考察的频率范围为  $1\sim 500\ \text{MHz}$ , 对应的信号波长为  $200\sim 0.4\ \text{m}$ . 考虑到控制单元与主轴电机间的电缆长度为  $18\ \text{m}$ , 与波长可比, 需要采用传输线理论来分析信道的传输特性<sup>[7]</sup>.

根据传输线理论,传播常数决定了电磁波的传播速度和衰减程度.传播常数 $\gamma$ 可由下式给出:

$$\gamma = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} = \alpha + j\beta \quad (2)$$

式中 $\alpha$ 为衰减常数, $\beta$ 为相位常数; $r, g, l$ 和 $c$ 为传输线的原参数; $\omega$ 为信号角频率<sup>[7]</sup>.在电力线特性阻抗与终端阻抗匹配的条件下,信道传递函数为:

$$H(f) = e^{-\gamma(f)l} \quad (3)$$

式中 $l$ 为电缆长度<sup>[8]</sup>.当阻抗不匹配时,信号会产生反射衰减.反射系数 $\Gamma$ 为:

$$\Gamma = \frac{Z_T - Z_L}{Z_T + Z_L} \quad (4)$$

式中 $Z_T$ 为终端阻抗, $Z_L$ 为电力线特性阻抗.信号的反射会形成多径效应.在本文所讨论的频率范围内终端阻抗 $Z_S, Z_R$ 不能与 $Z_L$ 完全匹配,因此信道为多径信道.本文采用文献<sup>[9]</sup>中的频域分析方法,建立多径信道模型为:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i(f) \cdot e^{-\gamma(f)l_i} \cdot e^{-j2\pi \frac{l_i}{v_p} f} \quad (5)$$

其中, $i$ 为路径数目,对最短路径 $i=1$ ;  $g_i(f)$ 为各路径的权重系数; $l_i$ 为路径长度; $v_p$ 为相位速度; $\gamma$ 为传播常数.

本文依据式(5)对图2所示的信道进行建模仿真,同时使用矢量网络分析仪测量0.1~500 MHz频率范围内的信道传输特性,得到如图3所示的信道幅频特性曲线.在整个测量频率范围内信道具有线性相频特性.

电力线信道中的噪声源包括有色噪声、窄带噪声和脉冲噪声等.在电机运转状态下,使用频谱分析仪测量0.1~500 MHz频率范围的噪声功率谱密度,测量结果如图4所示.

综合考虑信号衰减,多径衰落以及噪声干扰等因素,可见在载波频率100 MHz,带宽为10 MHz的范围内,信号衰减大约为10 dB,幅频特性曲线振荡最小,噪声功率足够小,适合信号传输.

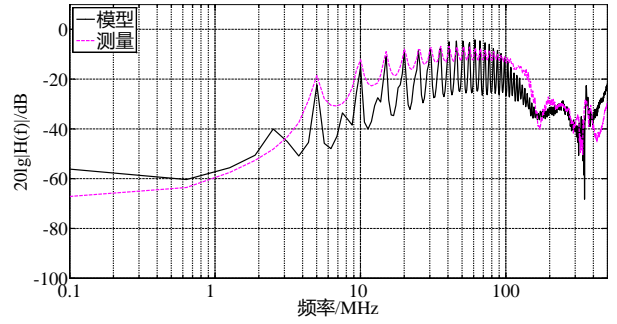


图3 信道幅频特性

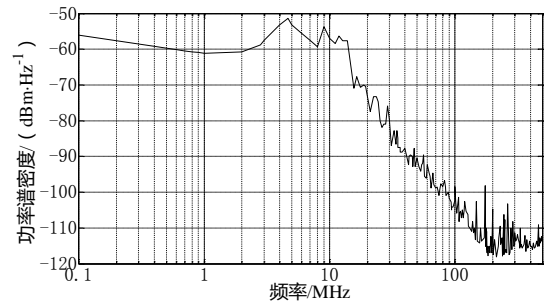


图4 噪声功率谱密度

### 3 信号调制方案

根据上述电力线信道的特点选定一种以正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplex)技术为核心的信号调制方案.

OFDM技术是一种特殊的多载波传输方案,其基本原理是将传送的信息分散到多个并行的子载波上,各子载波的信号速率大幅下降,使得符号周期比回波延迟长,从而能够有效地对抗高速调制系统中严重的多径效应<sup>[10]</sup>.OFDM信号由多个经过调制的子载波信号合成,其中每个子载波都可以受到相移键控(PSK, Phase Shift Keying)或者正交幅度调制(QAM, Quadrature Amplitude Modulation)符号的调制.如果 $N$ 表示子信道的个数, $T$ 表示OFDM符号的宽度, $d_i (i=0,1,\dots,N-1)$ 是分配给每个子信道的数据,矩形函数 $rect(t) = 1, t_s \leq t \leq t_s + T$ ,则从 $t = t_s$ 开始的一个OFDM符号可用复等效基带信号表示为:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \cdot rect\left(t - t_s - \frac{T}{2}\right) \cdot e^{j2\pi \frac{i}{T}(t-t_s)} \quad (6)$$

其中实部和虚部分别对应于OFDM符号的同相和正交分量.

图5为四相相移键控(QPSK, Quadrature Phase Shift Keying)调制的星座图,图6为对应的一个

OFDM 符号内包括 4 个子载波的示例. 所有子载波都具有相同的幅值和初始相位 (本文中为 0). 图中子载波(a)~(d)传输的双比特码元依次为 00, 01, 11, 10, (e)为最终的 OFDM 符号时域波形. 图中符号周期经归一化处理. 从图 6 可见, 每个子载波在一个 OFDM 符号周期内都包含整数个周期, 各个相邻子载波之间相差 1 个周期, 即子载波间具有正交性:

$$\frac{1}{T} \int_0^T e^{j\omega_m t} \cdot e^{-j\omega_n t} dt = \begin{cases} 1 & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases} \quad (7)$$

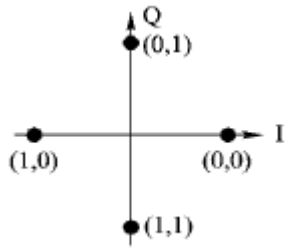


图 5 QPSK 星座图

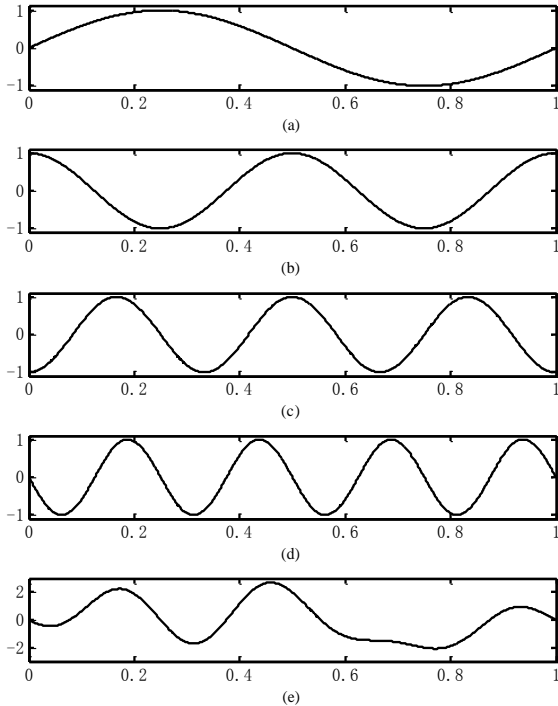


图 6 OFDM 符号包括 4 个子载波的示例

令式(6)中的  $t_s = 0$ , 并且忽略矩形函数, 对  $s(t)$  以  $T/N$  的速率进行抽样, 即令  $t = kT/N$  ( $k = 0, 1, \dots, N-1$ ), 可以得到:

$$s_k = s(kT/N) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \cdot e^{j \frac{2\pi ik}{N}} \quad (8)$$

可见  $s_k$  等效为对  $d_i$  进行离散傅里叶逆变换. 接收端为了恢复出原始的数据  $d_i$ , 可以对  $s_k$  进行离散傅里

叶变换, 得到:

$$d_i = \sum_{k=0}^{N-1} s_k \cdot e^{-j \frac{2\pi ik}{N}} \quad (0 \leq i \leq N-1) \quad (9)$$

实际应用中可以采用快速傅里叶变换/反变换实现 OFDM 的快速调制和解调<sup>[11]</sup>.

OFDM 的突出优点是频谱利用率高、可以有效的对抗频率选择性衰落和窄带噪声干扰, 因而非常适用于电力线信道高速数据传输.

图 7 给出了整个系统的设计方案.

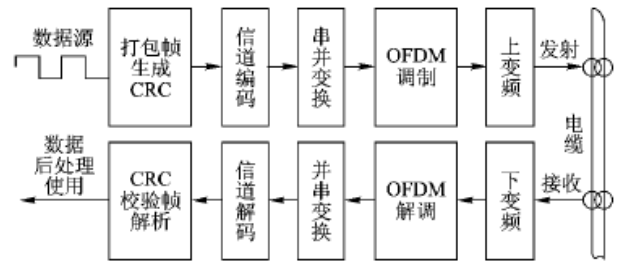


图 7 电力线通信系统信号流程

## 4 调制解调器设计

### 4.1 硬件设计

PLC 系统的核心设备为 PLC 调制解调器 (Modem). 如图 8 所示, 调制解调器由两部分组成: 基带模块和射频模块. 在发送端, 基带模块接收控制数据或状态反馈数据, 使用 FPGA (Field Programmable Gate Array) 作为核心器件进行基带数字信号处理, 实现 OFDM 调制, 产生的数字基带信号经过数/模转换、低通滤波后发送到射频模块. 射频模块使用 AD 公司的正交调制器 ADL5385 将两路正交模拟基带信号调制到频率为 100 MHz 的载波上. 调制好的射频信号放大到需要的功率, 经射频端口发送给电容耦合器, 注入到电力线上. 接收端以相反过程实现信号的提取和数据的解调.

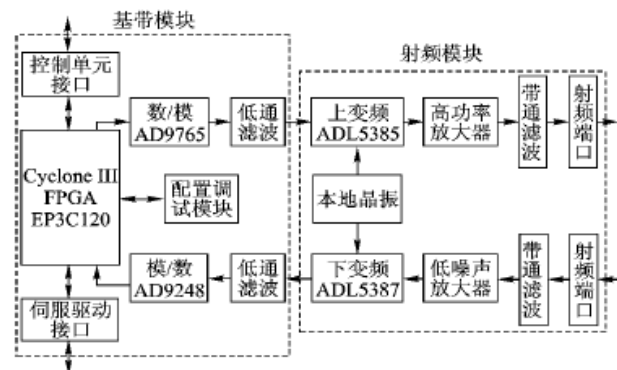


图8 调制解调器硬件结构

## 4.2 软件设计

调制解调器软件设计主要是 FPGA 的软件开发, 实现了以下功能: 与控制单元及伺服装置进行数据交换, 数据帧生成、解析, 信道编解码, OFDM 调制解调和同步算法, 循环冗余校验(CRC, Cyclical Redundancy Check)以及误比特率(BER, Bit Error Rate)计算等. 软件用 AHDL (Altera Hardware Description Language Altera) 和 VHDL (Very-High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) 编程实现. 软件的具体结构如图9所示.



图9 调制解调器软件结构

为了测试在不同数据传输率和不同通信周期下的通信性能, 本系统实现了 BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK 和 16QAM 三种子载波调制方式; 针对机床通信的特点, 采用突发性周期传输方式, 定义了  $31.25 \mu\text{s}$  和  $500 \mu\text{s}$  两种通信周期. 图10为 OFDM 帧结构: 训练序列用于 OFDM 的时序和载波频率同步等; 接下来为 OFDM 数据符号部分 (包含循环前缀); 剩余部分空闲. 具体为:  $31.25 \mu\text{s}$  通信周期, 每帧包含 5 个数据符号, 帧长为  $26.4 \mu\text{s}$ ,

空闲时间  $4.85 \mu\text{s}$ ;  $500 \mu\text{s}$  通信周期, 每帧包含 122 个数据符号, 帧长为  $494.4 \mu\text{s}$ , 空闲时间为  $5.6 \mu\text{s}$ .

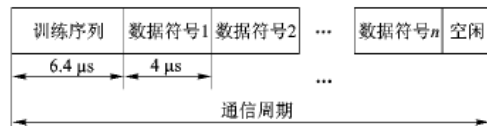


图10 OFDM 帧结构

## 5 实验验证

本文以机床主轴伺服系统为原型进行验证, 如图11所示. 控制单元(带有 dSPACE 扩展的 PC 机)将给定的电机转速通过并行端口传送给发送端的 Modem. Modem 将调制后的信号通过耦合器注入到电力线. 接收端的 Modem 从电力线中提取信号, 完成解调. 为了方便系统调试和性能测试, 解调之后的数据首先发送给带有 dSPACE 扩展的 PC 机, 经过进一步处理后发送给伺服装置驱动电机运转. PC 机上可以显示接收到的数据, 当前调制方式和误比特数等信息.

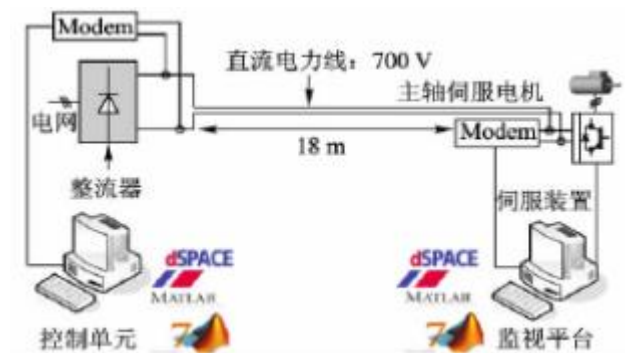


图11 主轴电力线通信实验系统

电机额定功率为  $30 \text{ kW}$ , 最大驱动电流  $45 \text{ A}$ . 为模拟机床正常工作过程, 在下列实验条件下对通信系统进行了测试:

- 1) 电机及伺服系统等上电, 断电.
- 2) 电机在启动、停止状态间切换.
- 3) 电机在正转、反转状态间切换.
- 4) 电机按照给定的各种速度曲线运转.
- 5) 附近其他机床处于正常运行状态.

在同等测试条件下分别对不同的子载波调制方式和通信周期进行了测试, 每次测试时间为一小时. 测试结果见表1.

表1 测试条件及测试结果

周期/ $\mu\text{s}$	调制	有效数据率	丢失	误比	误比特率

	方式	(MBit/s)	帧数	特数	
31.25	BPSK	2.048	0	0	$<1.356 \times 10^{-10}$
	QPSK	4.608	0	0	$<6.028 \times 10^{-11}$
	16QAM	9.728	0	0	$<2.857 \times 10^{-11}$
500	BPSK	3.232	0	0	$<8.595 \times 10^{-11}$
	QPSK	6.496	0	0	$<4.276 \times 10^{-11}$
	16QAM	13.024	0	132	$2.815 \times 10^{-9}$

整个测试过程中没有出现丢帧现象；只有采用16QAM, 500  $\mu$ s 通信周期时出现传输错误，误比特率为  $2.815 \times 10^{-9}$ ；在其他调制方式和通信周期下，测试时间内的误比特数均为 0。

## 6 结束语

本文提出了一种用于可重构机床的新型电力线通信系统。该系统将机床各个功能模块的电气接口减少到只需通过电力线来完成连接。通过对机床电力线信道特性及噪声频谱的分析，选定了载波频率为 100 MHz，带宽为 10 MHz，据此开发了通信系统的软硬件。完成了机床主轴伺服系统的控制和通信实验，实现了最小通信周期 31.25  $\mu$ s，有效数据传输率 10 Mbit/s，误比特率小于  $10^{-8}$  的可靠数据传输，能够满足机床通信系统的性能要求。

### 参考文献 (References)

- [1] Kirchner S, Winkler R, Westkämper E. Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen [J]. Werkstattstechnik, 2003, 93(4): 254–260 (in German)
- [2] Hoda A E. Changeable and reconfigurable manufacturing systems [M]. London: Springer, 2009
- [3] Schmitz S, Wurst K H, Lechler A. Integrierte mechatronische Module für rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme [C]//Internationales Forum Mechatronik. Winterthur (Switzerland), 2007: 67–87 (in German)
- [4] 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  
Huan Ji, Liu Yanqiang. Driver design and application of industrial ethernet field bus EtherCAT [M]. Beijing: BUAA Press, 2010
- [5] 陈一雷. ASI 总线研究和系统设计 [D]. 北京: 清华大学自动化系, 2002  
Chen Yilei. The research and system design of ASI (Actuator-Sensor Interface) [D]. Beijing: Department of

Automation, Tsinghua University, 2002

- [6] 齐淑清. 电力线通信 (PLC) 技术与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005  
Qi Shuqing. Technology and application of Power Line Communication (PLC) [M]. Beijing: China Electrical Power Press, 2005:
- [7] 邱关源. 电路 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006  
Qiu Guanyuan. Circuits [M]. Beijing: High Education Press, 2006
- [8] Silva E D. High Frequency and Microwave Engineering [M]. Oxford: Elsevier, 2004
- [9] Zimmermann M, Dostert K. A Multipath Model for the Powerline Channel [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(4): 553-559
- [10] 王哲, 张晓林, 陈雷. 多径信道下图像的信源信道联合编码调制传输 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(11): 1371-1374  
Wang Zhe, Zhang Xiaolin, Chen Lei. Image transmission over multipath fading channel using joint source channel coding modulation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(11): 1371-1374 (in Chinese)
- [11] 佟学俭, 罗涛. OFDM移动通信技术原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003  
Tong Xuejian, Luo Tao. Principle and Application of OFDM mobile communication technology [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2003 (in Chinese)