

基于平板电脑的 数控系统和软件设计

郇极 刘喆 胡星 靳阳 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

基于平板电脑的 数控系统和软件设计

郇极 刘喆 胡星 靳阳 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书介绍开发基于平板电脑的数控机床控制系统所涉及的关键技术和方法,包括平板电脑与外部控制设备的接口、Android 操作系统实时控制技术、Java 语言数控系统软件编程技术、数控系统软件结构、控制算法、数据结构、程序示例、基于以太网的控制设备现场总线等。这些技术和方法也可用于开发基于平板电脑的其他工业自动化控制设备、智能家电、医疗仪器、科学试验仪器、教学实验设备、物联网终端等。

本书可作为工业自动化和计算机控制专业的研究生教学参考书,也可作为工业自动化系统开发人员的专业工具书。

图书在版编目(CIP)数据

基于平板电脑的数控系统和软件设计 / 郇极等著. --

北京:北京航空航天大学出版社,2013.11

ISBN 978-7-5124-1281-1

I. ①基… II. ①郇… III. ①数字控制系统②软件设计 IV. ①TP273②TP311

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第266401号

版权所有,侵权必究。



基于平板电脑的数控系统和软件设计

郇极 刘喆 胡星 靳阳 著

责任编辑 金友泉

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtexbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:11 字数:282千字

2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷 印数:3 000册

ISBN 978-7-5124-1281-1 定价:24.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

平板电脑(Tablet Personal Computer)发展迅速,已经成为目前广泛使用的个人计算机产品和移动多媒体设备。平板电脑是一个功能强大和丰富的计算机硬件平台,因此采用平板电脑作为工业自动化设备的控制计算机,具有结构紧凑、功能强大、价格低廉的优势,在工业自动化领域具有广阔的应用前景。

本书的作者团队(北京航空航天大学数控和伺服技术实验室)长期从事数控机床和工业机器人控制系统研究工作,包括软硬件平台、系统体系结构、控制算法、编程技术、设备控制现场总线等。使用平板电脑作为工业控制计算机平台技术是团队所密切关注的研究方向,并取得关键技术的突破。这些关键技术包括平板电脑与外部控制设备的接口技术、Android 操作系统实时控制技术、Java 语言数控系统软件编程技术、基于以太网芯片的控制设备现场总线等。在这些研究成果基础上,开发出了基于平板电脑的数控机床控制系统。

为了促进平板电脑在工业控制领域的推广和应用,作者通过本书将这些关键技术介绍给读者,与读者共同探讨相关技术,促进其广泛应用。相关的研究和开发经验也可以用于其他自动控制、数据采集和处理设备,例如:智能家电、医疗仪器、科学试验仪器、服务机器人、教学实验设备和物联网终端等。

本书的主要内容如下:

第 1 章为概述,简要介绍平板电脑在工业自动化领域的应用前景、数控系统工作原理、平板电脑结构、操作系统和编程语言。

第 2 章介绍了数控系统及其控制软件的整体结构。

第 3 章介绍了基于平板电脑的数控系统硬件平台结构,以及外部设备现场总线 FED 和通信控制。

第 4 章概要介绍了 Java 编程语言,以及编写数控系统控制软件的 Java 语法要点。

第 5 章概要介绍了 Android 操作系统,以及作为数控系统实时操作系统的可行性。

第 6 章介绍了数控系统软件的控制原理、实现方法、程序和数据结构的设计流程和程序示例。

第 7 章介绍了本书编程示例使用的数据结构和参数定义。

附录 A 为 ISO 6983 数控编程指令国际标准。

附录 B 为本书编程示例使用的自定义 G 指令代码。

本书是一本介绍平板电脑数控系统开发方法的书,同时也适用于学习数控系统软件原理、编程方法,以及工业自动化系统开发技术。它包括功能模块的划分、接口、数据流、Android 操作系统、Java 编程语言、以太网通信和现场总线技术等。读者通过本书学习,掌握了数控系统软件编程方法之后,对使用其他编程语言(例如 C 语言)编写数控系统软件或者开发其他类似的工业自动化设备控制系统也会有很大帮助。

郇 极

2013 年 5 月于北航

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 数控系统和控制软件	1
1.2 硬件平台和控制设备接口	1
1.3 操作系统	2
1.4 Java 语言	2
1.5 本书撰写特点	3
第 2 章 数控系统和软件结构	4
2.1 数控机床和控制系统	4
2.2 数控系统软件结构	4
2.2.1 控制数据流	6
2.2.2 操作和运行控制	6
第 3 章 基于平板电脑的数控系统硬件平台	7
3.1 硬件平台结构	7
3.2 外部设备现场总线 FED 和通信控制	8
3.2.1 FED 总线结构	8
3.2.2 FED 数据帧格式	9
3.2.3 控制系统通信机制	9
第 4 章 Java 编程语言	11
4.1 Java 程序设计	11
4.1.1 Java 的特点	11
4.1.2 开发环境	12
4.2 Java 语言基础	12
4.2.1 Java 程序的符号集	12
4.2.2 Java 程序的基本组成	13
4.2.3 常量与变量	13
4.2.4 数据类型	14
4.2.5 运算符和表达式	14
4.2.6 控制语句	15
4.3 数控系统程序设计的 Java 语法要点	16
4.3.1 类和对象	16
4.3.2 枚举类型	18
4.3.3 数 组	19

4.3.4	String 类	19
4.3.5	异常处理	20
4.3.6	包的应用	20
4.3.7	数学运算	21
第 5 章	Android 操作系统	23
5.1	Android 开发概述	23
5.1.1	Android 系统框架	23
5.1.2	Android 应用程序开发环境的建立	24
5.1.3	Android 工程的结构和运行	25
5.2	数控系统程序设计的 Android 开发要点	27
5.2.1	Activity 和视图布局	27
5.2.2	Socket 编程	31
5.2.3	定时器	33
5.3	周期稳定性测试	34
第 6 章	数控系统软件设计	36
6.1	系统总体结构	36
6.2	系统数据结构	39
6.2.1	常 数	40
6.2.2	参 数	40
6.2.3	数据电缆	40
6.3	数控加工程序预处理	41
6.3.1	数控加工程序和指令	41
6.3.2	数控加工程序读入模块	43
6.3.3	译码器	46
6.3.4	坐标系设置	51
6.3.5	刀具补偿	56
6.4	运动控制	59
6.4.1	插补器	59
6.4.2	手动进给	81
6.4.3	插补/手动切换	83
6.4.4	坐标变换模块	85
6.4.5	机床误差补偿	88
6.4.6	机床传动匹配	90
6.5	PLC 控制	93
6.6	外部设备通信控制	95
6.6.1	协议报文的代码描述	95
6.6.2	外部设备通信模块程序示例	103

6.7 操作与运行管理	111
6.7.1 操作和显示(HMI)	111
6.7.2 系统运行管理	126
6.8 系统创建和运行	132
6.8.1 PadNC_Activity 类的相关程序实例	133
6.8.2 数控系统内核程序示例	135
第 7 章 系统数据定义	142
7.1 常 数	142
7.2 变量类型定义	145
7.3 参 数	149
7.3.1 控制参数	149
7.3.2 加工参数	151
7.4 数据电缆	153
附录 A ISO 6983 数控编程指令标准	162
A.1 字符集	162
A.2 G 指令集	163
A.3 M 指令集	165
附录 B 自定义代码	167
参考文献	168

第 1 章 概 述

平板电脑(Tablet Personal Computer)发展迅速,已经成为目前广泛使用的个人计算机产品。它通常被作为移动的多媒体设备使用,由触摸屏提供显示和人机操作界面,具有浏览互联网、观看影像、欣赏音乐、阅读、文字处理和游戏等多种功能。平板电脑是一个功能强大和丰富的计算机硬件平台,CPU 主频通常可以达到 1.5 GHz,内存容量为 16~32 GB,使用 USB 接口连接外部设备。因此,采用平板电脑作为工业设备的控制计算机,具有结构紧凑、功能强大、价格低廉的优势,在工业自动化领域具有广阔的应用前景。

本书的作者团队(北京航空航天大学数控和伺服技术实验室)长期从事数控机床和工业机器人控制系统研究工作,包括软硬件平台、系统体系结构、控制算法、编程技术、设备控制现场总线等。平板电脑作为工业控制计算机平台的关键技术是团队所密切关注的研究方向,并取得关键技术的突破。这些关键技术包括平板电脑与外部设备接口、基于 Java 语言的数控系统软件技术、Android 操作系统的实时控制功能应用等,开发出基于平板电脑的数控机床和工业机器人控制系统。

为了促进平板电脑在工业控制领域的推广和应用,作者通过本书将这些关键技术介绍给读者,与读者共同探讨相关技术,促进这项技术的广泛应用。相关的研究和开发经验也可以用于其他自动控制、数据采集和处理设备,例如:智能家电、医疗仪器、科学试验仪器、服务机器人和教学实验设备等。

1.1 数控系统和控制软件

数控机床由计算机控制产生工作台和主轴运动,执行加工程序规定的运动顺序、速度和轨迹,完成零件的加工。数控机床由 3 个主要部分组成:机床机械本体、伺服驱动(伺服装置和电机)、数控系统(装置)。数控系统也称 CNC 控制系统(Computer Numerical Controller),是数控机床的核心控制装置,是一个专用的控制计算机或者是在 PC 计算机结构基础上构建的控制计算机。数控系统通过控制伺服装置和电机,产生机床工作台和主轴的运动。数控系统的主要部件与计算机相同,由 CPU、内部存储器、外部存储器、显示器、键盘、外部设备接口组成。

为了实现对数控机床的控制,必须为它设计开发专门的控制程序,这称为数控系统控制软件。控制软件的主要任务包括:实时操作系统或中断调度系统、编写和管理数控加工程序、机床工作台运动轨迹的控制计算、主轴控制、辅助设备控制(冷却泵、夹具等)、人机操作界面等。数控系统软件使用通用的计算机编程语言编写,目前主要采用 C 语言编写。数控系统的性能取决于计算机硬件和数控系统软件功能。

1.2 硬件平台和控制设备接口

主流平板电脑的标准输入输出设备包括:

- 触摸屏 用于显示和人机操作界面接口;
- USB 接口 用于连接具有 USB 接口的外部设备;
- WiFi 用于无线局域网连接;
- TF 卡 用于存储器卡连接。

平板电脑为数控机床和工业机器人数控系统提供了基本的硬件平台,其控制系统与显示装置融为一体,提供了一个紧凑的控制系统结构。目前,主流平板电脑的 CPU 主频可以达到 1.5 GHz,其运算速度能够满足数控机床和工业机器人的控制运算速度要求。

平板电脑的 USB 接口是为连接标准 USB 设备而设计的,它也是平板电脑与外部设备互联的唯一物理接口。作者使用该接口连接数控系统的外部控制设备,例如:伺服电机、传感器、数字 IO 接口等。这是将平板电脑用于数控系统的关键技术之一。

WiFi 设备用于无线局域网连接,也为数控系统提供了互联网连接,实现数控系统的远程管理和操作等。

TF 卡用于存储数控加工程序和其他数据文件,以及与外部数据设备的数据交换。

1.3 操作系统

平板电脑的运行依赖于操作系统。Android(安卓)是 Google 公司开发的开放源代码的操作系统,主要用于智能手机和平板电脑,是目前平板电脑最广泛使用的操作系统。本书介绍的平板电脑数控系统软件在 Android 操作系统下运行。

平板电脑数控系统软件是运行在 Android 操作系统下的一个应用程序,完成数控系统的所有实时控制计算和人机界面操作任务,控制数控机床或工业机器人的运行。Android 同时还可以运行其他需要的标准应用程序,例如:文件管理、文字编辑、WiFi 联网、多媒体程序等,它们为数控系统提供了丰富的辅助功能。Android 是一个内置支持 Java 语言的操作系统,Android 应用程序由 Java 编程语言编写和生成。

数控系统和其他自动控制系统的控制计算机以固定的定时周期控制系统的运行。它要求计算机操作系统和控制程序能够提供一个稳定的实时任务处理周期,在嵌入式控制系统中,也被称为中断处理周期。针对不同的控制系统要求,这个控制周期通常在 1~100 ms 之间选择。作者在目前主流平板电脑完成的研究试验表明,当控制周期为 25 ms 以上时,Android 操作系统可以提供满足大多数控制系统要求的实时处理能力。本书将在第 5 章介绍编程方法和试验结果。

1.4 Java 语言

Java 是一种面向对象的计算机程序设计语言,广泛应用于互联网、PC 计算机(包括平板电脑)、移动通信设备、多媒体设备等。在移动通信和互联网软件中,Java 具有显著的技术和市场优势,成为这些技术领域的主要软件开发工具。

目前 Java 运行平台几乎已经嵌入到所有的主流计算机操作系统,其中也包括 Android 操作系统。用 Java 语言编写的程序可以在 Android 操作系统下运行,本书所介绍的数控系统软件编程方法和编程示例是用 Java 语言实现的。

Java 语言是一个功能非常强大的计算机程序设计语言,它可以覆盖从 Web 浏览器中的一个小型应用程序到分布式大型软件的设计需求,其中也包括嵌入式移动设备。数控机床控制软件属于嵌入式计算机软件技术领域,对软件开发工具要求不同于大型软件。完全的 Java 语言对于开发数控系统软件来说太庞大和复杂,本书作者研究如何最有效的使用 Java 语言开发数控系统,掌握了使用最基础的 Java 语句编写数控系统控制软件的方法。

作者将数控系统控制程序划分为多个功能块和数据电缆。功能块是一个程序单元,用于完成控制功能的计算处理要求,例如:译码、坐标系设置、刀具补偿、插补、误差补偿、操作、显示、外部设备通信等功能处理。数据电缆是一组变量,例如:字符串、双精度数组、整形型数等,表示数控加工程序段、插补线段的起点、终点、进给速度、插补位置指令等。用数据电缆连接功能模块,形成完整的控制数据流,控制机床运动。

Java 的类机制非常适合描述和定义数控系统的功能块和数据电缆,将数控系统的控制过程转换为 Java 语言程序。这也是实现平板电脑数控系统的核心技术。本书将在第 4 章、第 6 章和第 7 章介绍数控系统软件的 Java 语言编程方法和程序示例。

1.5 本书撰写特点

本书注重介绍数控系统的控制原理和使用 Java 语言的数控系统软件编程技术,包括系统结构、程序组织、模块划分、模块连接关系、控制命令传递、模块工作状态传递、数据组织等。为了便于读者理解以及由于篇幅限制,省略一些具体的计算、逻辑处理、错误报警、命令和状态互锁等程序细节。它不影响读者对数控系统功能划分、数据流形成和使用 Java 语言编写数控系统软件方法的了解。

本书内容也非常适合数控系统控制软件的设计原理和编程方法的学习。使用 Java 语言和面向对象编程技术,使我们更容易理解数控系统软件结构,特别是功能模块的划分、接口、数据流以及复杂的实时数据处理关系。读者通过本书学习,掌握了数控系统软件的原理和结构以后,也可以使用其他编程语言编写数控系统软件,例如 C 语言。

本书介绍的 Java 编程技术、外部设备 USB 接口驱动技术、实时控制编程技术也可以用于其他基于平板电脑的自动控制和数据采集设备,例如:智能家电、医疗仪器、科学试验仪器、服务机器人和教学实验设备等。

第 2 章 数控系统和软件结构

2.1 数控机床和控制系统

图 2.1 是一台 3 坐标立式加工中心的结构及其数控系统示意图。机床本体包括 X、Y 方向工作台和伺服电机、Z 方向进给滑台和伺服电机、主轴和主轴电机、刀库、换刀机械手、数控系统和伺服装置。控制系统通过现场总线控制伺服和主轴驱动装置,伺服和主轴驱动装置控制 X、Y、Z 方向伺服电机和主轴电机。

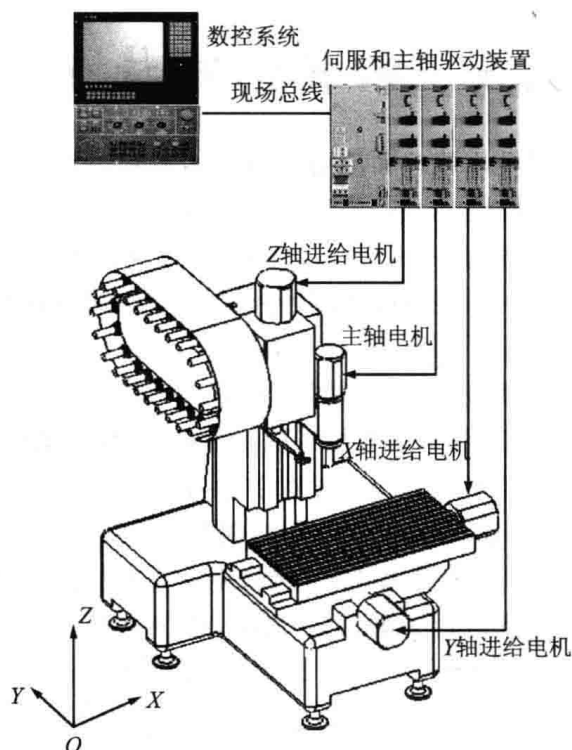


图 2.1 数控机床和控制系统结构

2.2 数控系统软件结构

图 2.2 表示数控系统的基本功能和软件结构。如图 2.2 所示,数控系统软件由 2 大软件处理任务组成,其中一个任务为主控制数据流,由译码器开始,将数控加工程序转换成机床的控制动作。另一任务为系统操作和运行控制,提供人机操作界面、系统数据管理和运行管理功能,使用操作命令接口①、系统信息接口②、参数接口③、显示信息接口④。

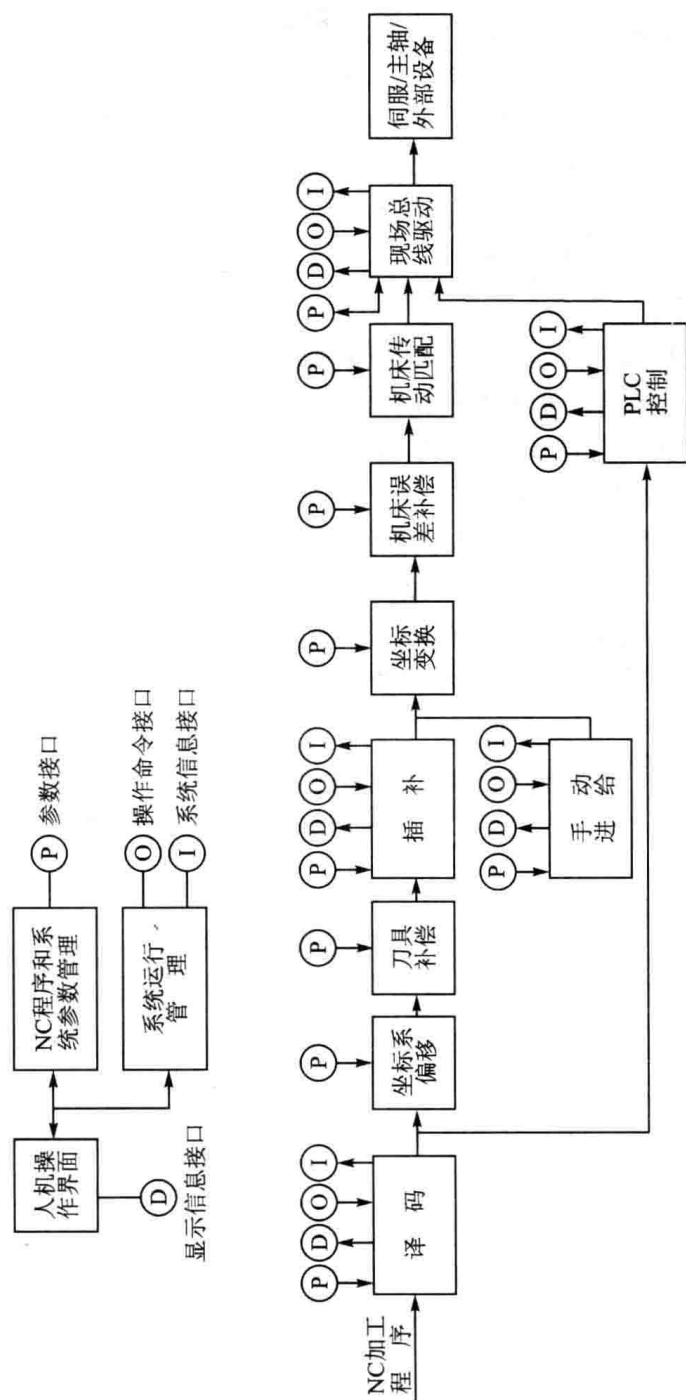


图2.2 数控系统的基本功能和软件结构

2.2.1 控制数据流

如图 2.2 所示,数控加工程序经过译码模块被分成 2 种类型的数据流,分别对其进行处理。其中一种数据流控制机床运动轨迹,用于产生机床坐标轴的运动。另外一种数据流控制机床辅助功能,例如:冷却液开关、主轴启停、换刀等动作。

运动控制数据流经过工件坐标系偏移、刀具补偿、插补、坐标变换、机床误差补偿、机床传动匹配模块,产生坐标轴运动控制数据。手动进给模块用于机床进给轴的手动操作,产生手动进给控制数据。外部设备通信模块实现数控系统硬件与伺服驱动、主轴驱动、机床辅助设备的数据通信和控制。

2.2.2 操作和运行控制

操作和运行控制包括人机操作界面、NC 程序和系统参数管理、系统运行管理模块。

操作人员通过人机操作界面控制数控机床的运行,包括:系统状态显示、自动加工运行、机床调整、数控加工程序的编写和管理、机床参数的设置和管理等。通过显示信息接口①获得其他功能模块的信息,用于系统状态显示。

NC 程序和系统参数管理模块支持人机界面功能的实现,通过参数接口②为其他功能模块提供系统参数。

系统运行管理模块控制数控系统软件的整体运行,通过操作命令接口③向其他功能模块发出运行控制命令,通过系统信息接口④从其他功能模块获得系统运行状态,同步系统的运行。

第 3 章 基于平板电脑的数控系统硬件平台

3.1 硬件平台结构

图 3.1 是作者开发的平板电脑数控系统结构图,系统由以下 4 个部分组成:

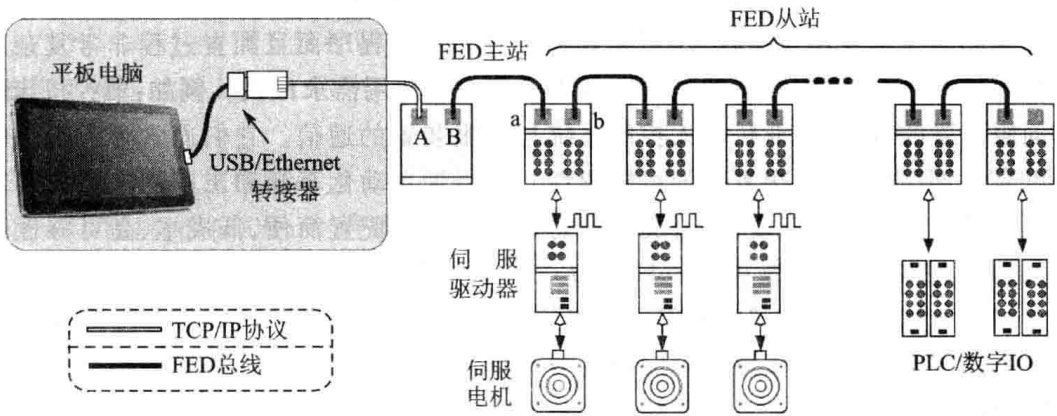


图 3.1 平板电脑数控系统结构

1. 平板电脑

安装 Android 操作系统,作为数控系统的控制主机、显示器和人机操作界面,运行数控系统的控制程序;通过 USB 接口连接外部控制设备,向外部设备发送用标准以太网数据帧格式打包的外部设备控制命令,包括控制电机运动的位置指令和控制机床辅助功能的数字开关指令;接收外部设备发回的电机运行状态和数字开关输入状态。

2. USB/Ethernet 转换器

它是标准的平板电脑附件,将 USB 总线转接到 Ethernet 网口上。

3. FED 主站

FED 现场总线(Fieldbus on Ethernet Device)是作者开发的一种基于以太网物理层器件的工业现场总线,FED 主站的端口 A 与 USB/Ethernet 转换器连接,接收来自控制主机(平板电脑)的以太网数据帧,以及向它发回以太网数据帧;端口 B 通过标准以太网电缆连接 FED 从站,通信数据帧为 FED 格式。

4. FED 从站

FED 从站的端口 a 连接 FED 主站,端口 b 连接后续 FED 从站;主站发出的 FED 数据帧遍历所有从站,然后返回主站和控制主机(平板电脑);从站从数据帧中读取控制指令,并将从站的工作状态或外部信号写入到数据帧中,返回主控制器。

图 3.1 给出了 2 种控制功能的从站,一种是伺服电机控制从站,输出脉冲串,控制伺服电

机运动,产生机床工作台的坐标运动;另外一种数字量输入输出从站,用来控制辅助功能,例如刀具松夹、冷却液开关等。根据机床控制要求,还可以开发具有其他控制功能的从站,例如 AD/DA 变换等。

3.2 外部设备现场总线 FED 和通信控制

平板电脑通过现场总线控制伺服电机和数字量输入输出接口,实现对机床的控制。现场总线在连接数字伺服、传感器以及 PLC-IO 等设备的控制系统中已经获得广泛应用。近年来基于以太网的工业控制现场总线技术成为发展的主流,国际电工委员会 IEC 于 2007 年颁布了十种基于以太网的现场总线标准,例如 EtherCAT、PROFINET、SERCOS III 等^[1]。这些总线具有丰富的控制功能,能够覆盖从小规模自动化设备到大规模自动化车间和工厂的应用需求。但是它们的技术使用难度较大,需要开发大量的驱动程序而且配置过程非常复杂。在工业自动化领域中,用于设备控制的现场总线占有很大的应用需求比例。例如:数控机床中数控系统与伺服装置的通信,工业机器人控制系统与伺服装置的通信。它们通常要求很高的通信速度和可靠性,但是不要求很复杂的可配置性。适用于自动化车间和工厂的现场总线对于这些自动化设备控制来说过于复杂,这类应用需要开发一种配置简便、低成本、高可靠性的现场总线。

以太网在计算机网络领域中获得了广泛应用,强大的市场需求使其核心物理层器件得以大规模生产,在性能和成本方面显示出极大的优越性。因此作者研究开发出一种基于以太网器件的工业现场总线 FED(Fieldbus based on Ethernet Devices)。FED 主要面向工业自动化设备,使用便捷无需复杂驱动程序,自动完成网络的建立和通信的准备工作,能在底层网络透明的情况下实现高速实时通信。因此 FED 也特别适用于基于平板电脑的数控系统。

3.2.1 FED 总线结构

FED 总线由主站、从站和以太网线组成。主站由以太网口接头 RJ45(含变压器)、PHY 芯片和作者开发的主站控制芯片(FPGA)组成,如图 3.2 所示。带变压器的 RJ45 以太网口接头和 PHY 芯片是通用的以太网物理层器件。PHY 芯片完成以太网帧数据的编码、解码和收发,是以太网物理层的核心。PHY 与 FPGA 之间通过 MII(Media Independent Interface)接口连接,它是以太网物理层与链路层的标准接口。FED 主站芯片功能和任务如下:

- 接收来自端口①的标准格式以太网数据帧。
- 将其转换成 FED 格式数据帧,FED 数据帧采用标准以太网帧头,但是重新规定了内部报文格式和内容。

- 通过端口②将 FED 数据帧发往后续的从站。

FED 从站芯片功能和任务如下:

接收来自端口①的 FED 数据帧;

- 在数据帧的规定位置读出属于本从站的控制指令;
- 将本从站的状态数据写入数据帧的规定位置;
- 将 FED 数据帧通过端口②发往后续从站。

图 3.2 给出了 2 种从站示例,伺服电机控制从站和数字量输入输出控制从站。

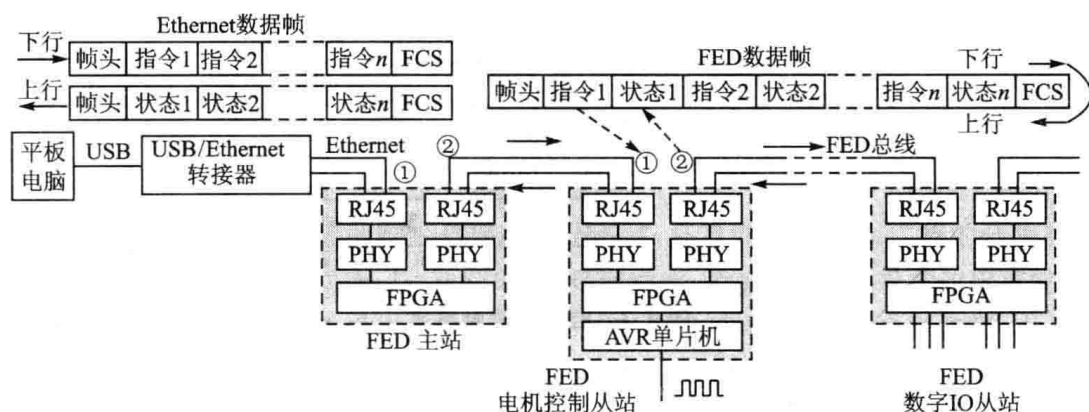


图 3.2 FED 总线系统结构

从站 FPGA 芯片可以直接控制数字量输入输出和控制外部设备。伺服电机控制从站用 AVR 单片机操作从站 FPGA 芯片，读取控制主机发来的位置指令，插补产生位置指令脉冲，控制伺服电机运动。

FED 总线本身数据传输率为 100 Mbit/s，站点连接使用 100BASE-TX 标准电缆，每个站点之间最大距离允许 100 m。主站可以最多挂接 128 个从站。由于变压器传输延迟、PHY 和从站 FPGA 的处理延迟，每个从站大约有 400 ns 总延迟，对数控系统控制功能不会产生影响。

由于主控制器（平板电脑）通过 USB 和 USB/Ethernet 转换器连接 FED 主站，实际的数据传输速度取决于 USB 总线，目前主流 USB 传输速度为 10 Mbit/s，能够满足常规数控系统系统控制需求。

3.2.2 FED 数据帧格式

在 FED 协议中，主站把向从站发送的所有信息打包到一个数据帧内，这种数据帧称为集总帧。由于通用以太网需要考虑载波侦听的碰撞检测机制的效率问题，规定网络上传输的帧长度不能超过 1 536 字节。FED 使用全双工传输，由于没有冲突检测和回退机制，FED 集总帧的长度可以超过普通以太网规定的标准帧长度。

FED 数据帧的格式如图 3.3 所示。FED 协议规定的“FED 帧头”包含了“Preamble”、“SFD”和“标识码”三个字段。“Preamble”和“SFD”是指 IEEE802.3 标准所规定的前导码和帧起始界定符。“标识码”包含“U/D”、“保留”和“帧类型”三个字段：“U/D”位用来标记该数据帧传输方向（上行或下行）；“保留”是系统保留的扩展功能控制位；“帧类型”用来标示数据帧的类型。

“数据区”是数据帧的具体内容，即每个从站的指令数据和状态数据。可以根据需要配置指令数据和状态数据的长度，主站为每个从站规定了指令数据和状态数据的位置和长度。

“FCS”是 CRC32 的帧校验序列。

3.2.3 控制系统通信机制

数控系统软件启动后，通过平板电脑 USB 接口向 FED 主站发送 ARP 请求报文以寻找指定的网络地址。FED 主站向平板电脑返回 ARP 响应报文，表示平板电脑与 FED 主站的网络连接建立成功，数控系统能够与外部设备通信。ARP 是地址解析协议的缩写，ARP 的具体内

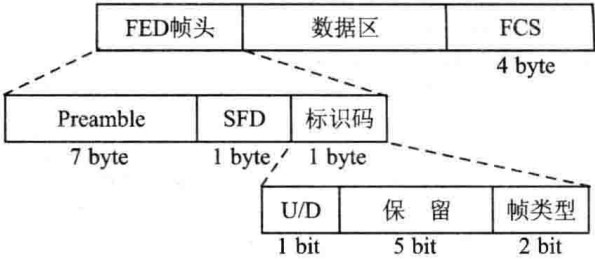


图 3.3 FED 数据帧格式

容参见文献[9]。

如图 3.2 所示,控制系统通信由以下 15 个阶段完成:

- (1) 平板电脑(主控制器)发出控制命令;
- (2) 命令数据经过 USB/Ethernet 转接器成为标准以太网数据帧格式,包括帧头、数据段和校验码 FCS;
- (3) 标准以太网数据帧由 FED 主站端口①和 PHY 芯片进入主站控制器 FPGA 芯片;
- (4) FED 主站控制器将标准以太网数据帧转换成 FED 数据帧;
- (5) FED 主站控制器将 FED 数据帧由端口②发送给后续的 FED 从站(下行);
- (6) FED 数据帧由 FED 从站端口①和 PHY 芯片进入从站控制器 FPGA 芯片;
- (7) FED 从站控制器从 FED 数据帧的本从站指令数据位置获得控制指令,并执行;
- (8) FED 从站控制器将状态数据写入 FED 数据帧的本从站的状态数据位置;
- (9) FED 从站控制器将 FED 数据帧由端口②发送给后续的 FED 从站;
- (10) 后续的从站重复(7)、(8)、(9)动作;
- (11) FED 数据帧由最后一个 FED 从站返回(上行);
- (12) FED 到达 FED 主站端口②;
- (13) FED 主站控制器 FPGA 将 FED 数据帧转换成标准以太网数据帧;
- (14) FED 主站控制器 FPGA 通过端口①将标准以太网数据帧发送给 USB/Ethernet 转接器;
- (15) 状态数据帧通过 USB 接口返回平板电脑(主控制器)。