

实用电力电子技术丛书

电力电子单片机 控制技术

● 谢运祥 欧阳森 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书是针对电力电子设备的微机控制技术特点编写的,是“实用电力电子技术”丛书之一。全书以电力电子技术实际应用为主线,精选一些较典型的应用实例分析,讨论单片机及可编程逻辑器件的选型、电力电子技术的控制策略及单片机实现方法、抗干扰技术等问题。主要包括:单片机系列产品的性能简介、PWM 控制技术的单片机实现方法、单片机控制系统的调节原理及算法、单片机控制系统的抗干扰设计、单片机控制在晶闸管电路、逆变电源、无刷直流电动机调速、感应加热封口机中的应用实例等。本书结构合理,层次分明,内容深入浅出,密切联系实际应用,书末附有部分控制源程序,利于学习。

本书适用于电气工程及自动化专业、自动化专业以及其他相关专业的本科生,也可供从事电气工程及相关专业的工程技术人员与维修人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子单片机控制技术/谢运祥,欧阳森编著. —北京:机械工业出版社, 2007. 1

(实用电力电子技术丛书)

ISBN 978-7-111-20696-5

I. 电... II. ①谢... ②欧... III. 单片微型计算机 IV. TP368. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 000925 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2007 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20 印张 · 2 插页 · 495 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-20696-5

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

电力电子技术 (Power Electronics) 是一门综合电力技术、电子技术、控制理论和计算机技术等学科的新型交叉学科, 它的应用已经深入到工农业生产和社会生活的各个领域。在电力电子的控制技术中, 单片机占有极其重要的地位, 许多电力电子装置和系统都是用单片机来控制的。随着自动控制理论的发展和微机运算和数据处理能力的提高, 各种先进的控制方法 (如自适应控制、模糊控制、滑模变结构控制等等) 逐步应用于电力电子变换的控制过程中, 从而改变了以往模拟电路实现的 PWM 控制方法, 广泛采用以空间矢量 PWM 控制为代表的全数字控制策略, 这种新型的控制技术都是以单片机为核心的实时 PWM 控制系统, 它可以显著地改善变换电路的动静态性能。

自 20 世纪 70 年代推出单片机以来, 单片机的制造技术和应用技术都有了飞速的发展, 以 Intel、Atmel、Philips 等为代表的众多厂商纷纷开发自己的单片机。各种型式的单片机层出不穷, 从性能档次、内部资源、价格水平、封装形式等各个方面都能满足不同层次的需要, 给单片机控制系统的优化设计和性能价格比的提高创造了极其有利的条件。近年来迅速发展的 DSP 也是一款具有很高运算和数据处理能力的高性能单片机, 随着其价格的不断降低, 其应用也越来越广泛。除此之外, 可编程逻辑器件 (PLD) 在近年来也得到了飞速发展和广泛应用, 运用大规模可编程逻辑器件灵活的编程方式、高速的运算和逻辑处理能力、移植性极强的程序设计语言等众多优势, 由可编程逻辑器件独立组成控制系统或者与单片机结合构成控制系统, 可以大大简化控制系统结构、缩短控制周期、增强保密性, 降低开发成本、缩短开发周期等, 从而提高系统的控制性能。

本书从实用的角度出发, 介绍单片机在电力电子控制技术中的应用问题及其实现方法, 希望能对从事电力电子技术工作的广大工程技术人员、设备维修人员以及大中专院校的师生有所启发和帮助。本书内容包括: 单片机控制技术在电力电子技术和应用中的作用和地位; 几种常用的单片机系列产品的特点、资源情况、指令系统结构, 可编程逻辑器件的发展及各种产品的性能特点; PWM 控制技术的常用算法, 利用单片机和可编程逻辑器件实现 PWM 的方法; 单片机控制系统中常用的数字调节方法, 并给出了计算程序; 几个电力电子技术的应用实例, 详细介绍其原理、控制系统的硬件和软件设计方法, 并给出程序清单; 单片机控制系统的抗干扰问题。本书中许多实例是企业委托开发项目, 出于某种客观原因, 书中除少量实例详细给出控制系统软硬件和全部的程序外, 其他实例仅给出了核心程序, 或者对控制系统的功能做了简化处理, 不过这种处理不会改变整个程序的结构, 不损坏程序的系统性和完整性, 也不会影响读者对实例的理解。

在本书的编写过程中, 邓勇、郭辉、张祖正、张天保、刘小越等硕士研究生进行了大量的程序调试工作, 并做了大量的图表编辑工作, 在此向他们表示衷心的感谢。

华北电力大学的彭咏龙教授全面审阅了本书的内容, 并提出了宝贵的修改意见, 在此表示衷心的感谢。在本书的编写过程中, 还得到华南理工大学教务处、华南理工大学电力学院的关心和支持, 在此表示感谢。

由于作者水平有限, 不足之处敬请读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子开关器件	2
1.2 变流电路拓扑	2
1.3 控制策略	3
1.3.1 开关器件的导通与关断控制方式	3
1.3.2 控制系统调节策略	4
1.4 单片机控制技术	5
第 2 章 单片机系列产品的性能简介	8
2.1 概述	8
2.2 8 位单片机	10
2.2.1 MCS-51 系列单片机	11
2.2.2 AVR 系列单片机	17
2.2.3 PIC 系列单片机	23
2.3 16 位单片机	27
2.3.1 MCS-96 系列单片机	28
2.3.2 DSP 系列处理器	32
2.3.2.1 DSP 的技术特点	32
2.3.2.2 DSP 器件的分类	33
2.3.2.3 DSP 器件型号简介	33
2.3.2.4 DSP 的优缺点	37
2.3.3 MSP430 系列 FLASH 型单片机	38
2.4 ARM 单片机	41
2.4.1 结构特点	41
2.4.1.1 主要的技术特点	41
2.4.1.2 处理器模式	42
2.4.1.3 寄存器特点	42
2.4.1.4 ARM 内核的优势	43
2.4.2 ARM 指令分类及其寻址方式	43
2.4.2.1 ARM 指令的一般编码格式	43
2.4.2.2 ARM 指令寻址方式	43
2.4.3 ARM 的存储系统	45
2.4.3.1 概述	45
2.4.3.2 空间分配和存储器格式	45

2.4.3.3 存储器技术	45
2.4.4 系列产品	47
2.4.4.1 主要处理器系列	47
2.4.4.2 ARM 体系的变种 (Variant)	47
2.4.4.3 生产公司	48
2.4.5 开发工具	48
2.4.6 ARM 的芯片选择	49
2.5 可编程器件	51
2.5.1 可编程通用外围接口芯片 PSD	51
2.5.2 通用阵列逻辑 GAL	52
2.5.3 可编程逻辑芯片 CPLD 和 FPGA	53
2.6 单片机选型经验	56
2.6.1 首要选择要点	56
2.6.2 次要选择要点	57
2.6.3 推荐机型	58
2.6.4 小结	59
第 3 章 PWM 控制技术的单片机实现方法	60
3.1 概述	60
3.2 PWM 技术的原理与算法	60
3.2.1 采样 SPWM 法	61
3.2.2 规则采样法	62
3.2.3 均值 PWM 法	64
3.2.4 等面积 PWM 法	65
3.3 单片机实现 PWM 技术的设计	66
3.3.1 PWM 发生器的设计要求	66
3.3.2 PWM 波形的实现方法	68
3.4 实例分析	69
3.5 PWM 技术的 PLD 实现方法	84
第 4 章 单片机控制系统的调节原理和算法	88
4.1 概述	88
4.2 数字 PID 控制算法	88
4.2.1 PID 控制规律的离散化	89
4.2.2 数字 PID 算法的改进	97

4.3 直接数字控制的算法设计	108	5.5 软件抗干扰设计	155
4.3.1 直接数字控制的基本思想	108	5.5.1 程序级抗干扰设计	155
4.3.2 数字控制器的参数优化法设计	109	5.5.2 系统级抗干扰设计	159
4.3.3 数字控制器的结构优化设计	110	5.5.3 小结	160
4.4 数字滤波技术	110	第6章 晶闸管电路的单片机控制应用	
4.4.1 程序判断滤波	111	实例	161
4.4.2 中值滤波	112	6.1 晶闸管电子软起动器	161
4.4.3 算术平均值法	112	6.1.1 电子软起动器的工作原理	161
4.4.4 滑动平均值法	114	6.1.2 软起动器的单片机控制系统设计	164
4.4.5 复合滤波	117	6.1.3 控制软件设计	171
4.4.6 滤波器算法	120	6.2 晶闸管触发脉冲的单片机实现技	
4.4.7 滤波算法的选用	123	术	173
4.5 高级数字滤波技术	124	6.2.1 晶闸管的同步检测	174
4.5.1 数字滤波器基础	124	6.2.2 触发脉冲控制的实现方法	177
4.5.2 IIR 数字滤波器	126	6.2.3 触发脉冲控制的软件设计	179
4.5.3 Hilbert 滤波器	128	6.3 晶闸管触发脉冲的驱动	186
4.5.4 卡尔曼滤波器	131	第7章 逆变电源的单片机控制应用	
第5章 单片机控制系统的抗干扰设计	133	实例	189
5.1 概述	133	7.1 逆变电源的基本原理和结构	189
5.2 常用元器件的选择方法	135	7.2 逆变电源的 PWM 控制策略	192
5.2.1 电阻器的选用	135	7.3 逆变电源及其控制系统电路分	
5.2.2 电容器的选用	136	析	194
5.2.3 数字集成电路的选用	136	7.4 控制系统软件设计	202
5.3 电路布局设计和硬件抗干扰措		第8章 无刷直流电动机调速的控制应	
施	138	用实例	208
5.3.1 数据采集通道	138	8.1 无刷直流电动机的控制策略	208
5.3.2 隔离技术	143	8.2 无刷直流电动机的单片机控制系	
5.3.3 I/O 端口的设计 (输入/输出通		统	212
道设计)	144	8.3 控制系统软件设计	215
5.3.4 振荡电路的设计	145	第9章 感应加热封口机微机应用实例	221
5.3.5 复位电路的设计	145	9.1 感应加热装置的电路分析	221
5.3.6 电源干扰及其抑制	146	9.2 微机控制系统	226
5.3.7 其他	148	9.3 电路调试方法	229
5.4 印制电路板抗干扰	149	9.4 控制软件设计	229
5.4.1 印制电路板布线措施	149	附录	232
5.4.2 电源和地线抗干扰布线	150	附录 A 电动机软起动器程序	232
5.4.3 印制电路板辐射噪声抑制	152	附录 B 感应加热系统的程序	294
5.4.4 接地技术	152	参考文献	313
5.4.5 去耦电路	153		
5.4.6 屏蔽技术	153		
5.4.7 反射波干扰的抑制方法	154		
5.4.8 小结	155		

第 1 章 绪 论

电力电子技术 (Power Electronics) 是 20 世纪后期发展起来的一门新型交叉学科, 它作为电工学科的分支之一, 涉及了电力技术、微电子技术、计算机技术、自动控制技术等多个学科领域, 是研究和应用大功率半导体开关器件 (亦称电力电子器件) 及其通断控制来实现电能变换的一门学科。

随着科学技术的发展和电力电子开关器件制造水平的不断提高, 电力电子技术也得到了飞速发展, 其应用范围也在不断扩大, 目前已广泛应用于工农业生产和社会生活的各个方面, 典型的应用有:

- 1) 在电化学领域中, 电解电源、电镀电源等。
- 2) 在交通运输中, 电气机车的直流牵引、城市无轨电车牵引、车船逆变器、静止航空逆变电源等。
- 3) 在冶金行业中, 轧钢用的直传动、交交变频等。
- 4) 在机械加工中, 中频感应加热电源、感应焊接电源、电弧焊电源等。
- 5) 在电力行业中, 发电机的励磁系统、直流输电技术、电力系统的无功补偿、有源滤波、可控串补、直流操作电源等。
- 6) 在卫生及环保业中, 高压脉冲电源、高压静电除尘设备等。
- 7) 在家电行业中, 电池充电器、开关电源、应急电源、电子镇流器等。

此外, 还有工业生产中常用的交流变频调速系统、固体继电器、不间断电源、稳定电源等, 在这些应用中, 电力电子技术已经成为不可缺少的关键技术, 即使在风力发电和太阳能发电等新能源技术领域, 电力电子技术也是必不可少的。

尽管电力电子技术的应用领域相当广泛, 应用装置种类繁多, 然而, 仔细研究各类装置的特点, 可以从以下三个方面来分析:

- 1) 电力电子开关器件及其驱动保护。
- 2) 变流电路拓扑结构。
- 3) 开关器件的通断控制策略。

任何一个电力电子装置和系统都离不开这三个方面, 一般在进行应用装置的分析 and 设计时, 首先根据工况特点及其对变换电路提出的要求来设计变换电路拓扑; 然后再对设计的电路拓扑及其工作原理进行理论分析, 系统地介绍如何针对不同的目标 and 功能要求来选择恰当的开关器件、变流电路拓扑, 并确定相适应的控制策略。电力电子技术的各种典型应用就是通过上述三个方面的组合来实现不同功能要求的, 比如电化学用的电解和电镀电源, 它使用的电力电子器件是晶闸管, 由晶闸管器件组成了全桥可控整流电路, 形成电源的主电路, 然后由控制电路根据电源给定和实际参数的变化, 调节触发脉冲延迟角, 控制晶闸管的导通时刻, 将交流市电变换为电压 (或电流) 可调的或自动稳定的直流电; 通用变频器或逆变器是利用全控型的电力电子器件组成的变换电路, 由控制电路通过 PWM 调制技术, 实现对变换电路中开关器件的通断控制, 将直流电 (可以是整流获得的) 变换为所需要频率和电压



的交流电。总之，电能的变换涉及到所使用的电力电子器件、变换电路的拓扑结构、电力电子器件的通断控制方式等，可以说是电力技术、电子技术、控制技术乃至计算机技术等多学科的综合应用。

1.1 电力电子开关器件

电力电子器件是工作在开关状态的大功率半导体器件，它是电力电子技术的基础。如果没有电力电子器件的发展，就不会有今天的电力电子技术的应用。这种半导体电力电子器件在电路中所起的作用类似于一个普通开关，仅实现电路的接通（导通）和开断（关断）的作用。不过由于它是半导体器件，它与普通的开关又有许多差别，比如：开关切换过程所需的时间是极短的（一般在微秒或纳秒级）、开关次数可以无限制、开关过程存在开关损耗、器件导通时也存在通态功率损耗、过电流和短路承受能力低等，这些差别体现在应用电路中就是需要设计特殊的驱动、保护、缓冲电路等。

早在 1958 年美国通用电气公司研制成功第一个工业用晶闸管器件，引起了电子工业的一场变革，使半导体器件的应用从小功率的通信、信息处理领域扩展到实现电能变换的大功率领域，从此开始了以电力半导体器件组成的变流器时代，标志着电力电子技术的诞生。尔后，随着半导体制造技术水平的提高，一代又一代的电力电子器件相继问世，推动着电力电子技术的发展。各种自关断电力电子器件（亦称全控型器件）相继出现，如电力晶体管（GTR）、门极可关断晶闸管（GTO）、电力场效应晶体管（MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、静电感应晶体管（SIT）、集成门极换流晶闸管（IGCT）、电子注入增强栅晶体管（IEGT）等。模块化发展趋势也十分明显，将多个元器件甚至连驱动电路都集成在一起，不仅缩小了体积，且提高了可靠性。此外，用于电力电子开关器件制造的新型材料（如 SiC 等）也正在被挖掘并取得了较大进展，根据近年来的研究表明，新型 SiC 开关器件具有更诱人的发展前景。随着材料科学、半导体制造技术等相关领域的科技发展，电力电子器件的电气参数和可靠性不断提高，智能化模块的制造水平不断提高，使得电力电子应用电路变得十分简单和可靠，开关器件的驱动保护也将变得越来越简单。

1.2 变流电路拓扑

电力电子电路拓扑是为实现某种电能变换而设计的电路网络结构，电路中除了包含有必要的电力电子器件外，应该还有其他的一些元器件，如：磁性元件（电感或变压器）、电容、二极管等。由它们构成的电路，在电力电子器件规定的通断方式作用下，能够实现预定的电能变换。按照变流技术的功能来分，常用的变换型式为：整流（AC/DC）、逆变（DC/AC）、斩波（DC/DC）、周波变换器（AC/AC）、交流调压器等。各种不同的变流功能，其对应的电路拓扑不尽相同，有些甚至差别较大，但其最终的目的都是在这个变流电路内部完成电能的转换，并希望电路内部所消耗的功率尽可能小，使变换效率得以提高。

电力电子变流电路与所使用的电力电子器件是密切相关的，从理论上说，任何一种电力电子器件都能满足上述 5 大类变流任务，但从实际应用的角度考虑，晶闸管只具备控制接通而不具备自关断的能力，因此它较多地应用在整流、有源逆变、交流调压和周波变换器等变



流电路中。如果要将它应用于直流电路中,就需要增加含有电抗器和电容器或辅助晶闸管的换相电路,这样主电路就变得十分复杂。此外,普通晶闸管的开关频率较低,对开关频率要求较高的无源逆变器和斩波器是不能胜任的,因此在无源逆变器和斩波器变流电路中,常采用自关断器件,当然自关断器件也有各自的电压和电流等级、工作频率等使用范围,使用时应注意选择合适的器件。

1.3 控制策略

无论何种电力电子应用装置都必须根据应用对象或目标的要求选择恰当的电力电子开关器件来组成合理的变流电路拓扑,然后根据驱动和保护等要求设计出最合理的硬件电路。然而,构造这样的硬件电路,并不代表装置就能正常工作了,它就好比建造了一个厂房,如果没有一个管理者对生产过程进行管理,是不能生产出合格的产品。变流电路的控制系统就是起到了一个管理者与实施者的作用,通过控制系统的调节计算和控制,使电力电子开关器件按一定的通断时序和通断时间工作,才能获得所要求的输出或控制目标。由此可见,控制系统是整个装置的最高管理者与实施者,是装置的核心和灵魂。一般地,电力电子变流电路的控制系统都设计成闭环反馈控制,它根据输出参考给定值与实际值的误差,作出相应的调节计算后,控制电力电子开关器件的导通或关断时间,使输出误差尽快得到消除。因此一般控制系统包含有:输出误差检测环节、调节计算环节、开关器件通断控制形成环节等。

1.3.1 开关器件的导通与关断控制方式

从自动控制系统的角度来看,变流电路中开关器件的导通与关断可以认为是整个控制系统最终的动作执行机构,控制系统最后输出的信号就是控制开关器件的导通和关断,从而完成对输出的控制和调节。随着变流电路所使用开关器件的不同,其相应的通断控制方式也不相同,归纳现有开关器件的工作原理,一般的控制方式有4种:移相控制、通断比控制、脉冲宽度调制(PWM)控制和脉冲频率调制(PFM)控制方式。一般对于晶闸管半控型开关器件,常采用移相触发控制方式或过零触发的通断比控制方式;而对于全控型的开关器件,比较多的通断控制方式为PWM控制,在某些特殊应用场所,也有的采用PFM控制方式。

移相触发控制方式主要应用在以晶闸管为开关器件的变流电路中,如可控整流电路、有源逆变电路、交流调压电路等,它是通过控制晶闸管的导通时刻,从而控制晶闸管的导通角,实现对输出的调节和控制。其典型应用场所有:高压直流输电系统(HVDC)、用于动态无功补偿的晶闸管可控电抗器(TCR)、大功率直流传动系统、大功率电动机起动用电子软起动器、大功率电解或电镀电源、大功率交流电动机的交交变频调速系统等。实现这种方式的控制电路由同步信号、移相环节、脉冲分配等部分组成。这种移相控制方式一般利用交流电源的自然换相方式完成晶闸管的关断,从而有效解决了晶闸管的关断问题,避免采用复杂的强迫换相方式来关断晶闸管。因而这种方式的主电路往往是以工频频率工作的,滤波设计要以此为依据。由于晶闸管的制造技术成熟,器件具有很高的耐压和通流能力,因而在大功率等级的应用领域具有明显的优势。当然,由于采用了移相触发控制方式,一般电源的工作电流波形不是一个完整的正弦波,将会产生较大的谐波电流,且谐波含量将随着移相触发角的变化而变化,这是这种工作方式的主要缺点。



通断比控制方式仍然应用于晶闸管为开关器件的变流电路中，它为了克服移相触发方式工作电流波形非正弦的缺点，而改用了过零触发方式。由于晶闸管在过零时触发，电源的工作电流波形可以获得完整的正弦波供电，因而谐波含量很小。在这种情况下，为了实现输出的调节，就只能依靠通断比来调节了，即在一定的时间内，让晶闸管完全导通若干个周波后，再停电若干周波，通过改变导通周波数与停电周波数的比值，来调节输出功率的平均值。该控制方式的典型应用有：调功器、温控器、用于动态无功补偿的晶闸管投切电容器（TSC）等。该方式虽然不像移相触发控制方式那样产生较大的谐波，但调节周期需要若干个周波，有调节过程长、动态响应速度慢、电源的工作电流波形容易断续、输出波动大等缺点。

PWM 控制方式是通过调节具有固定频率的脉冲宽度，实现对输出的调节和控制，常用于全控型开关器件的通断控制中。一般情况下均采用高频 PWM 工作方式，由于脉冲频率高、周期短，因此它具有许多优点：动态响应速度快，变流电路的电感、变压器、滤波器等体积小，重量轻等，是目前电力电子控制中应用最为广泛的一种方式。实现 PWM 调制的方式也是多种多样的，且至今仍在发展。产生 PWM 控制方式的方法有：模拟电路、全数字电路、专用 PWM 集成电路芯片、微机软件算法、空间矢量法等，不同的 PWM 控制方法将对变流电路的性能产生一定的影响，因此寻求优化的 PWM 控制策略也就成为电力电子技术领域研究和应用的关键问题。

PFM 控制方式与 PWM 控制类似，也是一种脉冲调制的方法，但 PFM 不是用固定频率来调节脉冲宽度，而是用固定脉冲宽度来调节脉冲频率。从作用原理来看，它与 PWM 调制是一样的，就是通过调节脉冲的占空比来调节和控制输出，然而由于 PFM 在调制过程中频率是不断变化的，当调节范围较大时，脉冲频率的变化范围也增大，它将不利于变流电路中磁性元件的选择和设计（如电感、变压器等），也不利于输出滤波网络的设计，因此 PFM 仅在某些特定的场合使用。

1.3.2 控制系统调节策略

调节策略是指依据输出误差量大小决定输出控制量多少的一种计算方法，它对整个装置的性能与稳定性将产生重要影响。在电力电子装置的控制系统中，必须根据电力电子变流电路的特点来选择合适的调节策略，组成稳定的闭环反馈控制系统，才能使整个装置工作正常。经典自动控制理论与现代自动控制技术对这种闭环反馈控制系统的调节策略选择、参数设计、稳定性分析等问题均作出了详细的论述，是非常重要的理论基础。

在自动控制系统中，为实现对输出的稳定和控制，必须采用闭环反馈控制系统，它根据输出参考给定值与实际值的误差，经过一定的运算处理后，对输出作出相应的调节和控制，使输出误差尽快得到消除。在闭环控制系统中通常包含有输出误差检测环节、调节计算环节、输出指令控制环节等部分，其中误差检测环节主要检测输出给定值和实际的偏差，而输出指令控制环节主要是对电力电子变流电路的开关器件进行通断控制，从而达到调节输出的目的。调节计算环节则是自动控制系统中十分重要的环节，对某一个闭环控制系统来说，采用什么样的控制调节策略（即调节计算方法），对整个系统的动态特性、稳定性等产生显著的影响。众所周知，在经典的自动控制系统中，几种常用的调节策略有：比例调节（P）、积分调节（I）、微分调节（D）、比例积分调节（PI）、比例微分调节（PD）、比例微积分调



节 (PID) 等。在电力电子控制系统中, 较为常用的调节策略有 PI 调节器, 有时候也用 PID 调节器改善动态性能。

比例调节是最简单的一种控制策略, 其控制规律为

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1-1)$$

式中, K_p 为比例系数; $e(t)$ 为输出给定值和实际值的偏差量; $u(t)$ 为控制器输出。

由式 (1-1) 可知, 控制器输出 $u(t)$ 与输出偏差量 $e(t)$ 成正比, 只要偏差量 $e(t)$ 出现, 控制器便立即反映, 使被控参数朝着减小偏差的方向变化, 趋于给定值。它的控制作用的强弱取决于比例系数 K_p 的大小。比例系数越大, 控制作用越强, 但系统也越容易引起振荡。比例调节的特点是结构简单, 响应快。但仅有比例作用的调节器构成的控制系统会存在静差, 即系统进入稳定后, 给定值与被控参数值存在一定的误差。加大比例系数 K_p , 可以使静差减小, 控制作用增强, 但过大的 K_p 容易引起被控量振荡而导致系统不稳定。

比例积分调节是在比例调节的基础上增加积分调节环节, 形成比例积分调节器, 其控制规律为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (1-2)$$

式中, T_i 为积分时间常数。

PI 调节器的输出由两部分组成: 一部分与偏差成正比, 即比例作用部分; 另一部分为偏差的累积, 即积分作用部分。只要有偏差存在, 即 $e(t)$ 不为零, 则积分部分不断累积, 影响 $u(t)$, 以求减小偏差, 直到偏差为零, 积分作用才不再变化, 系统进入稳定。所以加入积分作用可以有效地消除系统的静差。

积分时间常数 T_i 的大小决定了积分速度的快慢和积分作用的强弱。增大 T_i , 积分作用减弱, 积分速度变慢, 消除静差的时间拉长, 但可以减小系统的超调, 提高系统的稳定性; 减小 T_i , 积分作用增强, 积分速度加快, 系统的上升时间缩短。但过小的 T_i 会使系统出现较大的超调, 动态性能变差。因此 T_i 必须根据被控对象的特性来选取, 对于大惯性系统, T_i 可选得大一些, 对于小惯性系统, T_i 则相应的要选小一点。

比例积分微分调节是为了提高 PI 调节的动态响应速度而设置的, 在 PI 调节的基础上增加微分调节, 在偏差的出现和变化的瞬间, 对偏差的变化率作出反应, 使偏差消除在萌芽状态, 这就是加入微分调节的作用。比例积分微分调节器的控制规律为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1-3)$$

式中, T_d 为微分时间常数。

显然, 加入微分调节后, 即使偏差很小, 只要出现变化的趋势, 调节器便马上产生控制作用, 以调节系统的输出, 阻止偏差的变化, 故微分调节具有“超前”控制作用。偏差变化越快, 微分作用项越大, 控制量就越大, 因此微分调节的加入有助于减小超调、克服振荡, 有助于系统稳定。

1.4 单片机控制技术

在各种工业控制和应用系统中, 技术发展轨迹几乎无一例外地遵循着由模拟电路的控制



技术转向全数字微机控制技术, 变流电路的控制技术也不例外。由于微机控制技术具有控制功能灵活、精度高、易于实现运行状态和参数的监视、故障诊断能力强等显著优点, 故已成为变流电路控制技术的发展趋势和方向。比如: 在电化学应用领域的大功率电解或电镀电源, 当电流等级很大时, 一般采用晶闸管可控整流电路来获得直流电源, 通过调节晶闸管触发角来调节输出给定值或者实现自动稳压 (或稳流)。如果用全数字微机控制系统代替传统的模拟控制系统对三相大功率晶闸管可控整流电路进行控制, 在产生晶闸管触发脉冲控制信号时, 通过软件锁相环技术, 不仅可以提高触发脉冲的精度, 而且可以保证触发脉冲具有良好的对称性, 从而避免了因控制误差引起的三相不平衡运行; 在采用窄带滤波和锁相技术的条件下, 即使同步信号叠加了毛刺干扰或者瞬间失去同步信号, 仍能保持触发脉冲的正常输出; 能够直接数字修改参数或给定值, 比用电位器调节更加精确; 可以利用微机系统显示运行参数, 监视运行状态; 利用微机软件设计自诊断功能, 方便维修等。可见采用微机控制系统后, 系统的性能指标得以提高。

单片机控制系统是通过负反馈控制, 实时调节触发脉冲信号、PWM 波的占空比等手段实现对输出的调节与控制。由于 PWM 调制技术已经获得了广泛应用, 因此许多单片机内部都集成了 PWM 发生器, 便于简化控制系统硬件或者软件计算量。在变流电路的单片机控制系统中, 根据期望的控制对象 (如输出电压、电流或频率等) 的指令值与实际采样值的误差, 按照一定的调节规律 (如 PI 控制、PID 控制、模糊控制、自适应控制等) 计算所需要的控制参量 (如触发脉冲角、PWM 占空比等), 由此得出电力电子器件的通断控制时刻, 实现对开关器件的控制, 完成变流电路的控制功能。也就是说, 变流电路的单片机控制系统总是以所需要的变流结果作为控制输入量, 而最终将以器件的通断时刻作为输出控制量。当然, 对于不同的变流电路, 单片机控制系统的构造和控制信号可以是不同的。

一般地, 微机控制系统由硬件电路和控制软件两部分组成, 其中硬件电路的基本结构如图 1-1 所示, 它主要由模拟信号输入、数字信号输入、模拟控制信号输出、数字控制信号输出、人机接口、运行状态及参数记录与报警等部分组成。对于模拟信号输入通道, 一般由信号传感器将被测量转换为电物理量后, 经信号处理电路进行信号放大和滤波等技术处理, 再进行信号采集及 A/D 转换, 变成数字信号送入微机。模拟量输出通道则由微机输出, 经 D/A 转换后变成连续的模拟信号, 实现对被控对象的连续调节或控制。数字信号的输入一般是对被控对象的逻辑状态、上位机给定的开关指令等数字量经过电平转换后, 直接输入到微机。数字控制信号输出向被控对象输出开关控制命令、各种运行参数的越限报警信息等。人机接口主要向操作人员提供可进行操作和观察运行状态的键盘和显示界面, 实现人机对话功能。

软件是根据控制功能及其策略而编写的运行程序, 它完成控制系统所要求的实时计算、运行状态监控、人机接口、数据传送或通信等各种任务。由于软件易于修改和升级, 因此微机控制系统具有控制功能灵活、易于实现运行状态和参数的监视、故障诊断能力强等显著优点。

目前, 微机控制技术已经作为电力电子装置的重要控制手段, 得到了广泛的应用, 如: 晶闸管整流装置、各种逆变电源、UPS、通用变频器、电力系统的各种电力电子装置等, 无一例外地采用微机控制技术。随着微电子技术、计算机技术和自动控制理论的发展, 计算机控制技术的应用将有更为广阔的天地。

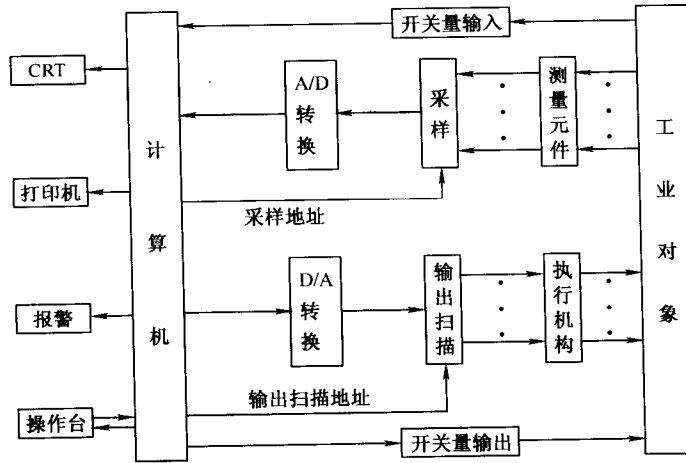


图 1-1 微机控制系统硬件结构

第2章 单片机系列产品的性能简介

2.1 概述

单片机 (Singlechip) 全称为单片微型计算机 (Single Chip Microcomputer), 又称微处理器 (MicroProcessor Unit, MPU), 微控制器 (Microprogrammed Control Unit, MCU), 或者嵌入式控制器 (Embedded Controller)。它是在一块半导体芯片上, 集成了 CPU、寄存器、存储器 (如 ROM、RAM、Flash 等)、定时器/计数器、中断系统、系统总线和各种扩展接口 (如地址线、数据线和 I/O 端口) 等功能部件, 所构成的一台功能比较完整的数字电子计算机。随着应用需求和电子技术的发展, 单片机或进行各种资源简化和删除, 以降低成本; 或将更多的其他功能融合到内部, 进行结构改进, 进一步提高集成程度和性能, 形成了丰富的系列产品。本章主要介绍各类单片机的特点、发展情况、分类和发展趋势, 并根据电力电子控制的需要, 结合笔者多年设计经验, 概要地介绍了一些比较实用和经典的单片机系列。此外, 由于可编程类器件在电力电子控制中也逐步得到重视和应用, 故本章也对该类器件进行简要介绍。

目前据不完全统计, 全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过 1000 多种, 流行体系结构有 30 多个系列, 其中 8051 体系的占有多半。进行单片机的确切、完全分类比较困难, 本章从总线位数、系统总线结构和指令集等三个方面进行描述。

按单片机数据总线的位数可将单片机分为 4 位、8 位、16 位、32 位机。4 位单片机一般做专门用途, 用于各种规模较小的家电类消费产品, 而逻辑、运算等功能相对较弱。典型应用如 BP 机、电话机、电子表和家用电器的遥控器等设备中。一般的单片机厂家均有自己的 4 位单片机产品, 如 EPSON 公司的 SMC62 系列、OKI 公司的 MSM64 系列、台湾义隆 EM 系列等。8 位单片机是目前品种最为丰富、应用最为广泛的单片机, 有着体积小、功耗低、功能强、性能价格比高、易于推广应用等显著优点。MCS-51 系列及其兼容机型在 8 位机中占主导地位, 开发工具和各类软、硬件资源也比较丰富, 各大厂家如 Intel、Atmel、Philips 等都有各自的产品系列。非 MCS-51 系列单片机有 MOTOROLA 的 68HC05/08 系列、MICRO-CHIP 的 PIC 单片机以及 ATMEL 的 AVR 单片机等。16 位单片机的操作速度及数据吞吐能力在性能上比 8 位机有较大提高。目前以 INTEL 的 MCS-96/196 系列、TI 的 MSP430 系列及 MOTOROLA 的 68HC11 系列为主。8 位和 16 位单片机主要应用于工业控制、智能仪器仪表、便携式设备等场合。其中 TI 的 MSP430 系列以其超低功耗的特性广泛应用于低功耗场合。32 位单片机是单片机的发展趋势, 随着技术发展及开发成本和产品价格的下降将会与 8 位机并驾齐驱。生产 32 位单片机的厂家与 8 位机的厂家一样多, MOTOROLA、TOSHIBA、HITACHI、NEC、EPSON、MITSUBISHI、SAMSUNG 群雄割据, 其中以 32 位 ARM 单片机及 MOTOROLA 的 MC683 × ×、68K 系列应用相对广泛。基于 ARM 核的单片机占据了 2001 年的 32 位单片机市场 75% 的份额。

数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 是单片机的一种特殊变形, DSP 的设



计目的侧重于保证数据的顺利通行,结构尽量简单;而单片机的设计侧重于不妨碍程序的流程,以条件判断为主,并保证软件系统的逻辑及转移功能等要求。但随着需求的变化和技术的发展,DSP系列得到迅速发展,某些机型逐渐具备单片机的各种逻辑功能,DSP和单片机的界限越来越模糊,把DSP看作单片机,或当作单片机来使用在当前是适当的。本书此后的叙述也不再严格区分,而把DSP也归入单片机中。

除了从总线宽度上区分外,还可从系统结构和指令集上进行单片机分类,由于两者具有较为紧密的联系,这里将其结合起来阐述。单片机一直存在两种基本系统总线结构:冯·诺伊曼(Von Neumann)总线结构和哈佛(Harvard)总线结构。而单片机也可从指令集方式划分为复杂指令集计算机CISC(Complex Instruction Set Computer)和精简指令计算机RISC(Reduced Instruction Set Computer)两种。冯·诺伊曼结构采用统一总线,程序存储器PRAM或数据存储器DRAM都映射到同一地址空间,总线宽度与CPU类型匹配;而哈佛结构具有独立的程序总线 and 数据总线。过去还常将采用这两种结构的计算机分别对应成复杂指令集计算机CISC和精简指令计算机RISC。CISC的指令一般是微码microcode,每条指令由CPU解码为许多基本指令,基于CISC的微控制器一般很复杂,都采用冯·诺伊曼结构,而所需要的程序存储器比RISC的少。微码在CPU产生而限制了CISC器件的带宽,其指令集也比RISC器件大。RISC架构的单片机则以较小、较简洁的指令来设计微处理器(Micro Processor)晶片(Chip),以能快速执行程序。采用RISC的单片机一般大多数指令都可可在一个机器周期内完成,即单周期指令。系统结构的区别在单片机的选择中是值得考虑的。

由于技术的迅速发展,这种分类和对应关系也不尽然一一对应了,比如DSP采用哈佛总线结构,但又是RISC;MCS-51系列是哈佛总线结构,是CISC,而兼容MCS-51的AVR单片机却又是RISC,这一点是值得注意的。对具体的产品进行分类,哈佛结构的单片机包括:MCS-51系列、AVR系列、PIC系列、DSP系列和MSP430系列等;冯·诺伊曼结构则有MCS-96系列等。而传统的单片机大多采用CISC,如MCS-51系列、MCS-96等,新型单片机倾向于采用RISC,包括AVR系列、PIC系列、DSP系列、MSP430系列和ARM系列等。微机系统总线结构和指令集技术发展日新月异,涉及的知识也比较专业,有兴趣的读者可进一步阅读相关文献,以提高对单片机的理论认知和使用、设计水平。

单片机的发展特点有:①CPU功能增强。在功能方面,单片机都有由原来较为单一的功能芯片发展到可提供各种不同功能组合的机型的历程,以适应不同应用场合的需要,达到最优的性能价格比。还值得注意的是,MCU单片机集成DSP,或者DSP集成MCU也是值得注意的发展趋势;②内部集成资源增多。在单片机资源集成方面,一些外部接口功能单元也集成到芯片上,如A/D转换器、PWM(脉宽调制)、PCA(可编程计数阵列)、WDT(看门狗定时器)、高速I/O口等;③引脚的多功能化。单片机的引脚一般都具有多个功能,由使用者根据具体情况进行配置使用,这极大丰富了硬件电路设计和软件设计的思路;④低电压低功耗。低电压低功耗设计是电子产品的普遍趋势,过去单片机大多采用+5V工作电压,而新型单片机则多采用+3.3V电压;此外,宽工作电压范围也是一个趋势,这极大提高了单片机的工作性能;⑤通信和网络化功能增强。过去单片机大多只内嵌UART,来设计RS-232和RS-485等串行接口形式;而新型单片机则将I²C、SPI等串行总线,甚至CAN(Controller Area Network BUS)等现场总线也集成到单片机内部;⑥片内存储器增多。在存储器方面,由原来需外扩程序存储器和数据存储器,到片内ROM、EPROM,再到目前普遍提供



的 OPT (一次可编程) 存储器和可反复编程的 flash memory (PEROM), 并且存储器的容量也在不断扩大。数据存储器也从原来较少的 SRAM 发展到提供较多的 SRAM, 甚至片内提供 EEPROM (电气可擦除 ROM) 等; ⑦丰富的编程方式。值得指出的是通过 JTAG 口的在线编程, 在片编程技术 (In System Programming, ISP) 及在应用中编程 (In Application Programming, IAP) 等三种技术, 这些技术都是通过单片机上引出的编程线、串行数据、时钟线等对单片机编程, 编程线可与 I/O 线共用, 不增加单片机的额外引脚。ISP 为开发调试提供了方便, 并使单片机系统远程调试、升级成为现实。JTAG 接口则极大方便了硬件的开发、调试, 并为许多新型单片机所支持。这意味着即使是成品电路板, 特别是那些采用非可拆卸芯片的电路板也可方便地进行仿真、调试和软件升级, 而不必借助硬件仿真器和编程器等开发工具。

此外, 采用各种新工艺, 如从 TTL 改为 CMOS, CMOS 改用高速 CMOS (HC) 等; 提高单片机的工作频率; 根据不同的应用需求, 采用多种封装形式等也是单片机的普遍趋势。目前市场上的单片机, 即使是同一结构核心的系列单片机, 如 51 系列, 既有 8 脚、20 脚的简化功能的单片机, 也有 40 脚、68 脚、84 脚等具有较完善功能和较多 I/O 口的单片机; 既有 8MHz 或 12MHz 等较低工作频率的 51 单片机, 也有采用 40MHz 甚至更高的, 而 DSP 最高工作频率已经超过 1GHz。单片机的迅速发展和系列产品的极大丰富, 为使用者提供了很大的选择空间。

由于单片机技术的迅速发展和应用, 许多芯片制造商 (如 Intel、ADM、ATMEL、MOTOROLA、PHILIPS、TOSHIBA、OKI 等) 纷纷推出自己的单片机产品, 但由于使用的内核技术不同, 因而出现了各种具有不同指令系统且不能相互兼容的单片机系列。根据电力电子控制的需要, 以及结合笔者的使用经验, 将对以下几种目前国内应用较为广泛的单片机系列进行简要介绍, 供读者设计选用和参考。这些单片机包括: MCS-51 系列单片机、与 51 兼容的 AVR 和 PIC 系列单片机等 8 位单片机, MCS-96 系列单片机、TI 公司的 MSP430 系列和 DSP 系列等 16 位单片机, 此外对 32 位 ARM 单片机也作了简要的介绍等。限于篇幅, 2.6 节只推荐了一些性价比较高的单片机型号, 其他单片机及各单片机更详细的资料, 书中不作详细介绍, 有兴趣的读者可自行阅读有关参考文献。

在电力电子控制技术中, 除了各类单片机外, 可编程类器件也是需要值得注意的。这类器件的最大特点就是资源配置自由。使用者可自由地将器件配置为各种存储器、逻辑阵列或其组合, 极大地丰富了硬件设计方式, 也使得硬件系统具有较长的生命力。此外, 这类器件还有助于设计出保密性高、具有自主知识产权的硬件功能模块。这类器件包括可编程通用外围接口和可编程逻辑阵列等两类, 由于这类器件设计比较专业, 本章对此仅进行扼要介绍。

2.2 8 位单片机

单片机的特点和性能指标主要包括: 总线结构、指令集、地址扩展功能、流水线结构、硬件乘法器、寄存器数量、中断时间等。所谓地址扩展功能, 是指单片机是否支持程序和数地址空间的扩展。读者在进行资料阅读和机型选择时请对此首先考虑。本书对各单片机特点进行描述时也对此着重指出。

单片机的指令执行一般有如下阶段: 取指、译码、取操作数和执行。传统的设计使这四



个阶段需要分时执行,而流水线结构则改变了这一执行过程。所谓两级流水线结构,是实现在一个周期内同时完成一条指令的执行和下一条指令的取指,较大限度地提高了每个时钟周期的效率。多级流水线结构则能同时实现更多的过程,如 DSP 芯片 TMS320F2407 等都采用了四级流水线结构,可在同一机器周期内完成四个指令的不同指令阶段。

不少 8 位单片机不具备硬件乘法器,乘法的实现需要通过加、减法的移位操作来得到,这就会导致极大的资源开销,在设计涉及大量数值计算的系统时,这一点是必须考虑的。

单片机的中断需要进行现场保护,如程序指针保护等,不同的单片机需要不同的时间来处理这个过程,本书将这个时间定义为中断时间。由于中断在单片机系统中起着重要的作用,中断时间是必须加以考虑的。

单片机的差异还表现在其他方面,包括:低功耗、超低功耗设计;内部集成各种资源,如 A/D 转换器、WDT;多种通信接口,如 I²C、SPI、UART 和现场总线等;采用各种存储器芯片,如 EPROM、EEPROM、Flash 和 OTP 等;采用不同等级的工作频率,如 8MHz、12MHz,一直到 40MHz、50MHz 等。由于各种单片机各自的系列产品都比较丰富,基本上都可找到满足要求的型号,故本节对此种资源对比不作特别说明。此后的 16 位单片机基本上也如此。

2.2.1 MCS-51 系列单片机

MCS-51 系列单片机是 Intel 公司于 1980 年继 MCS-48 单片机后推出的第二代 8 位单片机系列。其技术特点为:①采用哈佛结构总线,指令集为 CISC;②可进行程序和数据存储器的外部地址扩展;③硬件系统结构比较简单,只有硬件加法器和减法器,没有硬件乘法器;④同一时间的内部寄存器只有 7 个(R0~R7),内存空间也比较少(只有 128B 或 256B)。

总的来看,51 单片机具有如下优点:①开发工具和软、硬件资源十分丰富,相关的资料相当齐全;②作为一种久经考验的经典单片机,性能相当稳定;③型号和种类相当丰富,选择余地大,容易找到替代型号;④硬件的扩展设计既可采用地址总线的形式,也可利用 I/O 端口来实现。

而其主要缺点是:①系统总线只有 8 位,没有硬件乘法器,数据处理能力相对不足;②采用 CISC,指令相对 RISC 复杂;③主流机型不支持在线编程等新型编程方式,只能通过仿真器来进行电路板调试,然后用编程器来烧写程序;④在电力电子控制中,51 单片机适合于设计小型系统,或者在多 CPU 系统中用作通信、显示等辅助 CPU,难以独立完成较为复杂的算法。

由于特殊的社会背景和单片机本身优良的性价比,51 单片机曾一度在国内单片机应用中占统治地位。直到今天,MCS-51 及其兼容系列单片机仍然是工业控制、家电等各类产品的主要机种之一。而且,随着技术的发展和市场的需要,MCS-51 及其兼容系列单片机也是新品种层出不穷。与以往的 8031 或 8051 相比,新型 51 单片机除了在内部存储器和存储容量方面有较大变化以外,还具有以下特点:在 CPU 的处理速度上,突破原来 Intel 公司 MCS-51 系列最高 12MHz 主频的限制,可工作于 24MHz、甚至达 40MHz 的晶振频率;有些芯片内带 RC 的振荡电路,不要外加晶振也能用内部振荡器工作;在结构形式上也有不少变化,有适用于家电控制的具有优良性价比的小型封装 CPU(如 89C1051、89C2051 等),也有尽可能集成各种外围电路和接口功能复杂的 CPU(如内含复位电路、WDT、A/D 转换器、PWM



输出口、模拟比较器等,包括 AT89C55WD、8xC552 等);在 CPU 功耗方面,增加了单片机的节电方式,进一步降低功耗,延长电池供电 CPU 系统的工作时间。此外,为了降低 CPU 的功率损耗,也设计生产了可工作于 2.7V 的低电压等级 CPU。目前,与 MCS-51 系列单片机指令系统兼容的主要产品有:LG 公司的 GMS90 系列与 GMS97 系列、PHILIPS 的 51LPC 系列、ATMEL 公司的 89 系列、台湾华邦电子的 W78E5X 系列等。其中 LG 和 PHILIPS 的为 OPT 结构,而 89 系列和 W78E5X 为 Flash 工艺。

为了让读者了解 MCS-51 系列单片机的特性情况,便于设计选型,表 2-1、表 2-2 分别列出了常用的 AT89 系列和 PHILIPS 公司系列产品的特性情况,其他系列的 51 单片机可参考该两表进行对比选择。表 2-3 列出了 MCS-51 系列单片机汇编指令系统,表 2-4 列出了相关的伪指令,这两个表可帮助读者理解阅读本书此后各章节的程序,或作为具体系统设计的参考。

表 2-1 Atmel 公司 89 系列单片机产品特性表

器件型号	Flash/KB	EEPROM/KB	RAM/B	在线编程	SPI	UART	WDT	中断源	T/C	I/O 口	比较器	晶振频率/MHz	工作电压/V
低功耗 20 脚 C51													
AT89C1051	1	—	64	—	—	Y	—	3	2	15	Y	24	2.7~6
AT89C2051	2	—	128	—	—	Y	—	6	2	15	Y	24	2.7~6
AT89C4051	4	—	128	—	—	Y	—	6	2	15	Y	24	2.7~6
工业标准 C51 (FLASH)													
AT89C51	4	—	256	—	—	Y	—	6	2	32	—	24	4~6
AT89C52	8	—	256	—	—	Y	—	6	3	32	—	24	4~6
AT89C55	20	—	256	—	—	Y	—	6	3	32	—	24	4~6
AT89LV51	4	—	256	—	—	Y	—	6	2	32	—	12	2.7~6
AT89LV52	8	—	256	—	—	Y	—	6	3	32	—	12	2.7~6
AT89LV55	20	—	256	—	—	Y	—	6	3	32	—	12	2.7~6
在线可编程 C51													
AT89S53	12	—	256	Y	Y	Y	Y	6	3	32	—	24	4~6
AT89S8252	8	2	256	Y	Y	Y	Y	6	3	32	—	24	4~6
AT89LS53	12	—	256	Y	Y	Y	Y	6	3	32	—	12	2.7~6
AT89LS8252	8	2	256	Y	Y	Y	Y	6	3	32	—	12	2.7~6
AT89S4D12	4	128	256	Y	Y	—	—	—	—	5	—	12	3~3.6
一次编程 (OTP) C51													
AT87F51	4	—	128	—	—	Y	—	6	2	32	—	24	4~6
AT87F52	8	—	256	—	—	Y	—	6	3	32	—	24	4~6
AT87F55	20	—	256	—	—	Y	—	6	3	32	—	24	4~6
AT87F51RC	32	—	512	—	—	Y	—	6	3	32	—	24	4~6
快数闪存 (Quick Flash) C51													
AT80F51	4	—	128	—	—	Y	—	6	2	32	—	24	4~6
AT80F52	8	—	256	—	—	Y	—	6	3	32	—	24	4~6