

主动控制中的控制器设计与实现

Controller Design and Development for Active Control

吴文伟 王 飞 翁震平 编

主动控制中的控制器 设计与实现

Controller Design and Development for Active Control

吴文伟 王 飞 翁震平 编

内 容 简 介

本书以主动控制器的软硬件设计为主题,内容涵盖控制芯片的选择,软件开发平台的使用,编程所需的C语言知识,定时、A/D、D/A、信号处理的操作与实现方法,并以STM32和C6647为例分别讨论了具体控制器硬件的实现。

本书适合对以振动噪声控制为研究方向的研究生或工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

主动控制中的控制器设计与实现/吴文伟,王飞,
翁震平编,—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.1

ISBN 978-7-5661-1437-2

I. ①主… II. ①吴… ②王… ③翁… III. ①控制器
—设计 IV. ①TM57

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第320003号

选题策划 史大伟

责任编辑 薛 力

封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区东大直街124号

邮政编码 150001

发行电话 0451-82519328

传 真 0451-82519699

经 销 新华书店

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 17.5

字 数 455千字

版 次 2017年3月第1版

印 次 2017年3月第1次印刷

定 价 55.00元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

目前对振动噪声主动控制的研究方兴未艾,国内众多高校、院所与公司投入了大量人力、物力和财力进行理论与产品开发。这是好事,值得肯定,表明主动控制终于在国内受到了重视,因为不论是理论研究还是产品研发我们均已落后国外太多。振动噪声的主动控制融合了电子、信号处理、控制工程、振动力学、声学、机械设计以及材料等学科,代表减振降噪的最高水准与最新技术;但不容乐观的是,从国内最早的一批主动控制研究成果算起,少说也有十几年了,但是大部分成果还都停留在试验阶段,并没有真正应用于工程实际,或者说还没有能够经受实践考验的产品面世。

作者所在的船舶振动噪声重点实验室属于国内最早的一批研究主动控制的机构,在主动控制领域做过诸多尝试与探索,虽然并没有可大规模生产的产品面世;但是研发的一些其他相关设备却是所在领域的成功尝试。在此将研究与研发过程中的一些成果、经验分享出来,只为对主动控制感兴趣的科研人员、工程技术人员或学生提供一个可快速上手的途径,节省一些不必要的时间。

本书以主动控制器的软硬件设计为主题,内容涵盖控制芯片的选择,软件开发平台的使用,编程所需的C语言知识,定时、A/D、D/A、信号处理的操作与实现方法,并以STM32和C6748为例讨论了具体控制器硬件的实现。

本书内容翔实、详略得当,对实现主动控制器所需的各个功能进行分解讨论,化整为零,一一攻克。从控制器芯片的选择开始,对比讨论了基于C51内核、AVR内核cortex—M内核的芯片以及DSP,读者可根据实际要求对比选择合适的芯片系列。

接着讨论了Keil,MDK和CCS三种软件开发系统的使用,帮助读者快速建立工程以及调试与仿真;然后基于控制器运行所需的基本功能,讨论了定时、A/D、D/A功能实现,包括基本的寄存器设置和编程,此外还讨论了常用的几种信号处理技术包括卷积、FFT、FIR和IIR滤波以及LMS自适应算法。最后根据实例分别讨论了以STM和C6748为例控制器硬件的实现,包括A/D和D/A芯片的选型,系统的搭建与测试等。

本书抛砖引玉,希望各科研机构或学者可以不吝分享,共同促进振动噪声主动控制的快速健康发展。

作者水平有限,文中内容难免有不准确或疏漏的地方,望读者批评指正。

编 者

2016年11月

目 录

1	引言	1
1.1	主动控制方法的优点与挑战	1
1.2	主动控制系统的组成	3
1.3	主动控制中控制器的功能	4
2	适用于主动控制的 MCU	6
2.1	MCS-51 系列	6
2.2	AVR 系列	7
2.3	MSP430 系列	9
2.4	STM 32 系列	11
2.5	C2000 系列	18
3	开发平台	22
3.1	KeilC 51	22
3.2	RealView MDK	36
3.3	CCS	43
4	C 语言精粹	61
4.1	数据类型	61
4.2	关键字	66
4.3	数组	74
4.4	指针	77
4.5	运算符	80
4.6	程序结构	88
4.7	函数	93
5	定时功能	99
5.1	AT89C52	99
5.2	STM32F103ZET6	103
5.3	TMS320F2812	116
6	模数转换	124
6.1	模拟信号与数字信号	124
6.2	模数转换	124
6.3	模数转换器	126
6.4	STC12C5620AD	130

6.5	STM32F103ZET6	141
6.6	TMS320F2812	149
7	数模转换	166
7.1	数模转换器	166
7.2	PCF8591	169
7.3	STM32F103ZET6	176
7.4	DAC7724	181
8	信号处理	197
8.1	FFT 的 C 语言实现	197
8.2	卷积的 C 语言实现	203
8.3	FIR 的 C 语言实现	208
8.4	IIR 的 C 语言实现	212
8.5	LMS 算法	218
9	基于 TIC6748 的主动控制器	224
9.1	背景介绍	224
9.2	总体方案设计	225
9.3	芯片的具体参数	226
9.4	控制器硬件配置	230
9.5	软件调试	235
10	基于 STM32F407ZET6 的半主动控制器	244
10.1	背景介绍	244
10.2	总体方案设计	245
10.3	软件调试	250
	参考文献	271

1 引 言

1.1 主动控制方法的优点与挑战

主动控制主要基于波的干涉性质：

(1) 波的独立传播原理——各波源所激发的波可在同一介质中独立传播；相遇后再分开，传播情况（频率、波长、传播方向等）与未相遇时相同，互不干扰，好像从未相遇。

(2) 位移矢量叠加原理——在波所重叠的区域里，介质的质点同时参与全部波所引起的振动，质点的位移等于全部波单独传播时所引起的位移的矢量和。

(3) 一切波都能发生干涉，包括水波、声波、光波等，干涉是波所特有的现象之一（波特有的现象还有波的衍射）。

不论振动还是噪声本质上均是借助波的传播在起作用，因此利用干涉性质，产生一个相对干扰源幅值相同、频率相同、相位完全相反的波即可完全抑制振动或噪声，如图 1.1 所示。

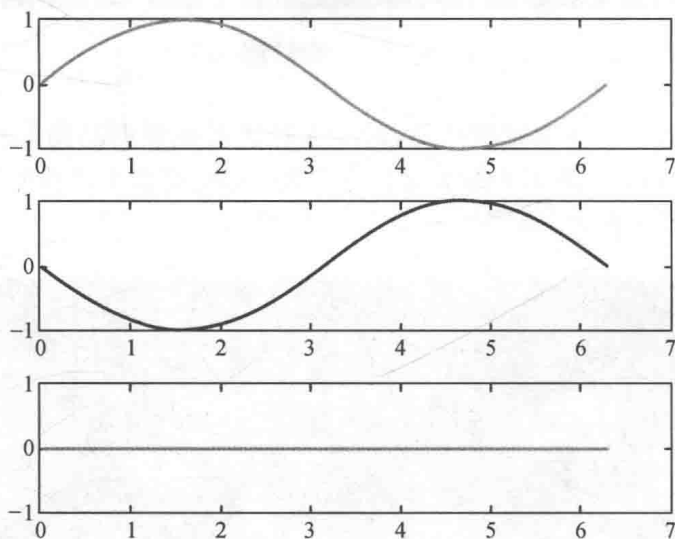


图 1.1 主动控制的工作原理

振动噪声的主动控制应用最为广泛的一个例子是主动降噪耳机，如图 1.2 所示。随着科技的进步，主动降噪耳机正在加速进入普通人的生活，所适用的场合也从飞机、轨道交通等扩展到公交车、商场等日常场合。另外针对帕金森患者发明的防抖动勺子，极大地方便了患者的进餐，如图 1.3 所示。



图 1.2 主动降噪耳机



图 1.3 市场上的某款防抖动勺子

以上是体量比较小的主动控制产品,对于大体格的成熟产品则有汽车、轨道交通、飞机、舰船内的主动降噪等。图 1.4 是市场上的某款内部舱室带主动降噪的车辆。图 1.5 是市场上某款配备主动减振的车辆。



图 1.4 带主动降噪的车辆

综上可以发现,主动控制主要针对被动控制所不能解决或者即使可以解决,但方案或措施也往往不切实际的问题。例如航母甲板上的指挥人员,若使用被动的方式将飞机起飞和降落的声音降低到人耳可以接受的范围,在目前来看是不可行的,或者使用传统的由吸

某车XTS在悬架中加入了名叫MRC的电磁减振系统
该系统能够在1毫秒内进行1000次的计算，以保持车身稳定



图 1.5 配备主动减振的车辆

声材料做成的耳罩虽然可以隔离飞机的噪声,但同时也妨碍了人员之间的交流;采用主动技术的耳机,则可在隔离噪声的同时保证人员之间的正常交流。

相比被动控制,主动控制就像外科医生手中的手术刀,针对性强,可以实施精确控制。而且借助规模化生产,主动控制产品的价格甚至会低于相应被动产品的价格。

对上面几种主动控制产品进行观察可以发现,各产品之间差异较大,即使控制噪声,主动降噪耳机与含有主动降噪功能的车辆之间也有比较大的差异。同样的问题在主动减振方面依然存在。主动控制相关产品开发的难点在于除了概念、方式之外,各产品之间的通用元器件较少。作动器、控制器,甚至传感器都需要根据具体控制对象进行设计。这也正是本书的写作目的,本书主要针对主动控制中的核心部件——控制器,展开软硬件设计方面的讨论。

1.2 主动控制系统的组成

主动控制系统与自动控制系统中的闭环控制系统相比并无多大差别,如图 1.6 所示。由于主动控制系统的最终目的是将振动或者噪声降低为零,因此可以将图 1.6 改变为图 1.7,即去掉给定量,并将比较器移到控制器内部。

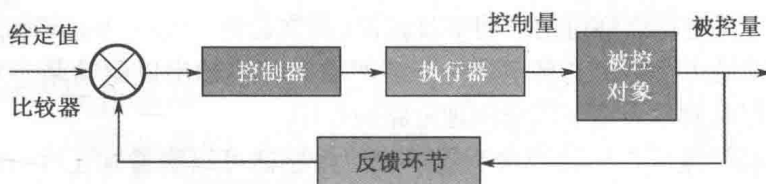


图 1.6 闭环控制系统框图

根据图 1.7 可以将完整的主动控制系统分为以下几个部分。

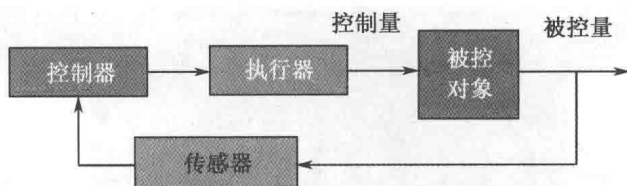


图 1.7 主动控制系统框图

1.2.1 控制器

对于任意控制系统,控制器的重要性不言而喻,在系统中起着类似人类大脑的作用。

1.2.2 执行器

在主动控制领域一般将其称为作动器,原因是相比被动控制方式,主动控制的特点在于其可以输出能量,具体根据应用场合的不同可以分别转化为声波或者振动。

1.2.3 传感器

在系统中的作用类似人的感官,对于主动噪声控制其可能是麦克风,主动结构声控制其可能是加速度传感器或(和)麦克风,主动振动控制则可能是加速度传感器或速度传感器等。

1.3 主动控制中控制器的功能

实践中应用于主动控制的控制器,通常由于紧凑、便携、安装方便等方面的要求,除了需要具备基本的分析、计算和处理等功能外,在信号采集方面一般要求具有信号调理功能,A/D 转换模块;在信号输出方面则根据执行机构的不同,要求具有模数转换功能或直接 I/O 输出功能,另外由于执行机构功率的大小则要求内置功率放大模块或外置功率放大模块,如图 1.8 所示。

其中,A/D 和 D/A 转换器分别用于将模拟信号转变为数字信号和将数字信号转变为模拟信号,后文将对其进行详细讨论。功率放大器(英文名称:Power Amplifier),简称“功放”,则比较简单,主要是指在给定失真率条件下能产生大功率输出以驱动某一负载(例如扬声器)的放大器。在此简单介绍下信号调理电路的作用。

加速度传感器、速度传感器或水听器模拟传感器可以测量加速度、速度和声压等物理量;由于传感器的输出通常是相当小的电压、电流或电阻变化,因此,并不能直接转换为数字信号,必须在转换之前进行调理。调理的主要功能包括以下几点。

(1) 放大或衰减

放大提高输入信号电平以更好地匹配模拟-数字转换器(ADC)的范围,提高测量精度和灵敏度。此外,使用放置在更接近信号源或转换器的外部信号调理装置,可以通过在信号被环境噪声影响之前提高信号电平来提高测量的信号-噪声比。

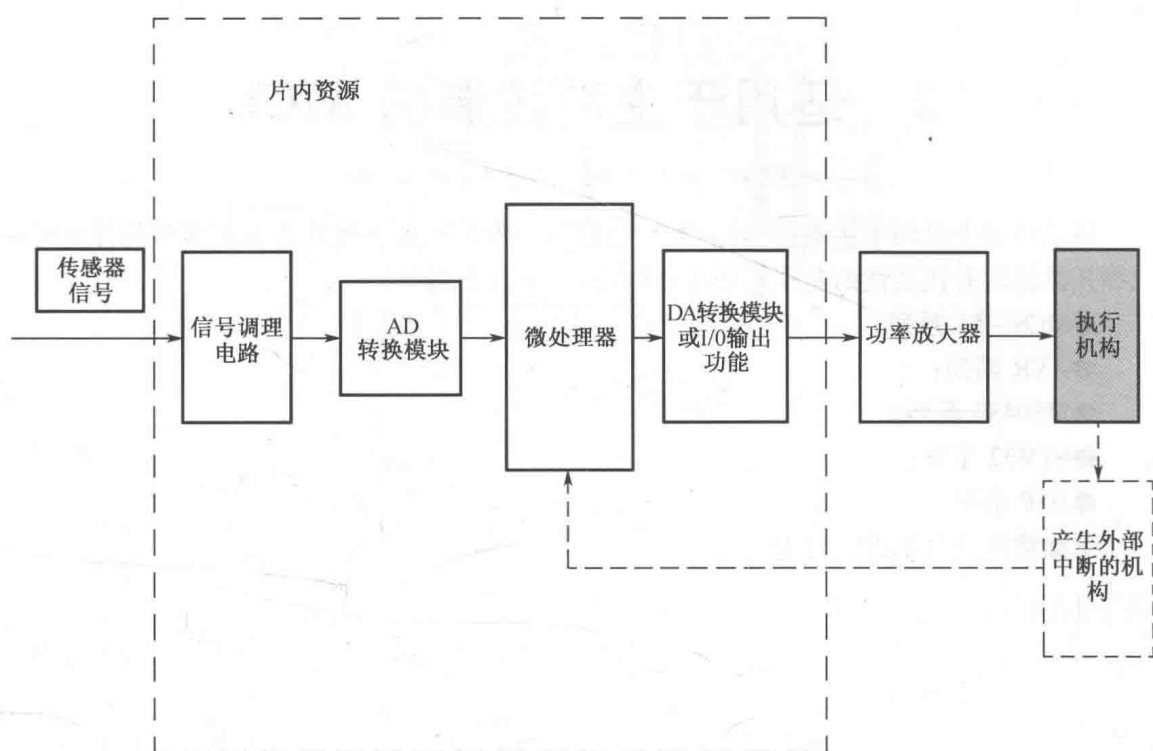


图 1.8 主动控制中控制器应具有的功能

衰减,与放大相反的过程,在电压(即将被数字化的信号)超过数字化仪器输入范围时十分必要。这种形式的信号调理降低了输入信号的幅度,使调理信号处于 ADC 范围之内。衰减对于测量高电压十分必要。

(2) 隔离

隔离信号的调理设备通过使用变压器、光或电容性的耦合技术,无须物理连接即可将信号从源传输至测量设备。除切断接地回路之外,隔离也阻隔了高电压浪涌以及较高的共模电压,从而既保护操作人员也保护昂贵的测量设备。

(3) 过滤

滤波器在一定的频率范围内去除不希望的噪声。几乎所有的数据采集应用都会在一定程度上受到 50 Hz 或 60 Hz 噪声(来自于电线或机械设备)的影响。大部分信号调理装置都包括为最大程度上抑制 50 Hz 或 60 Hz 噪声而专门设计的低通滤波器。

(4) 激励

激励对于部分转换器是必需的。例如,应变计、电热调节器和 RTD (Resistance Temperature Detector)需要外部电压或电流激励信号。通常 RTD 和电热调节器测量使用一个电流源来完成,电流源将电阻的变化转换为可测量的电压。应变计,是一种超低电阻设备,通常需要一个电压激励用于惠斯登(Wheatstone)电桥的配置。

2 适用于主动控制的 MCU

目前市场上可用于主动控制的 MCU 包括(但不限于,此处是作者根据多年的开发经验选择几款比较有代表性的芯片系列进行讨论)以下几个系列:

- MCS-51 系列;
- AVR 系列;
- MSP430 系列;
- STM32 系列;
- DSP 系列。

下面将对其分别进行讨论。

2.1 MCS-51 系列

MCS-51 是对美国 Intel 公司生产的一系列单片机的总称,包括 8031,8051,8751,8032,8052,8752 等,其中 8051 是最早、最典型的产品。该系列的其他单片机均是在 8051 的基础上对功能进行增、减或改变得到的,人们习惯于用 8051 称呼 MCS51 系列单片机。

在 HMOS 技术大发展的背景下,Intel 公司在 MCS-48 系列的基础上于 1980 年推出 8 位 MCS-51 系列单片机,与之前的机型相比,功能增强了许多,指令和运行速度均超过 Intel 8085 的 CPU 和 Z80 的 CPU,成为工业控制系统中较为理想的机种。较早的 MCS-51 的典型时钟为 12 MHz,而目前与 MCS-51 单片机兼容的一些单片机的时钟频率已经可以达到 40 MHz 或者更高。

由于后来 Intel 公司将 MCS51 的核心技术授权给了其他公司,所以目前市场上有很多公司在做以 8051 为核心的单片机。

51 单片机由中央处理器(CPU)、程序存储器(ROM)、数据存储器(RAM)、定时/计数器、并行接口、串行接口和中断系统等几大单元以及数据总线、地址总线和控制总线三大总线组成,如图 2.1 所示。

(1) 中央处理器

中央处理器(CPU)是整个单片机的核心部件,属于 8 位数据宽度的处理器,能够处理 8 位二进制数据或代码。CPU 负责控制、指挥和调度整个单元系统协调的工作,完成运算和控制输入输出等功能。

(2) 数据存储器(RAM)

8051 内部有 128 个 8 位用户数据存储单元和 128 个专用寄存器单元,统一编址。专用寄存器只能用于存放控制指令数据,用户对此只能访问,不能用于存放用户数据。所以,用户能够使用的 RAM 只有 128 个,可存放读写的数据,运算的中间结果或用户自定义的字型表。

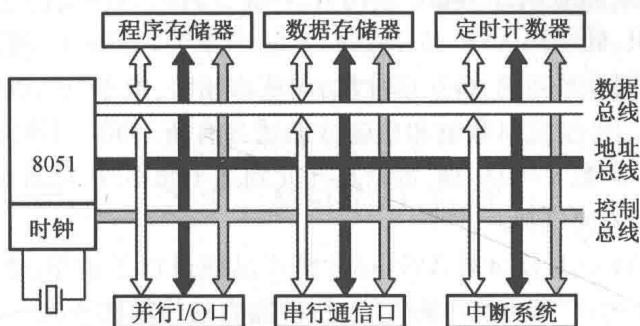


图 2.1 51 单片机的内部结构

(3) 程序存储器 (ROM)

8051 共有 4096 个 8 位 ROM, 用于存放用户程序, 原始数据或表格。

(4) 定时/计数器 (ROM)

8051 有两个 16 位的可编程定时/计数器, 用于实现定时或计数功能, 产生中断用于控制程序转向。

(5) 并行输入输出 (I/O) 口

8051 共有 4 组 8 位 I/O 口 (P0, P1, P2 或 P3), 用于对外数据的传输。

(6) 全双工串行口

8051 内置一个全双工串行通信口, 用于与其他设备进行串行数据传送, 该串行口既可以用作异步通信收发器, 也可以用作同步移位器。

(7) 中断系统

8051 具备较完善的中断功能, 有两个外部中断、两个定时/计数器中断和一个串行中断, 可满足不同的控制要求, 并具有 2 级优先级选择。

(8) 时钟电路

8051 内置最高频率达 12 MHz 的时钟电路, 用于产生维持单片机运行的脉冲时序, 8051 单片机需外置振荡电容。

52 系列是 51 系列的增强型, 有 8032, 8052, 8752, 8952 四个机种。8052 的 ROM 为 8 KB, RAM 为 256 B; 8032 的 RAM 也是 256 B, 没有 ROM, 这两种单片机比 8051 和 8031 多了一个定时器/计数器, 增加了一个中断源。

2.2 AVR 系列

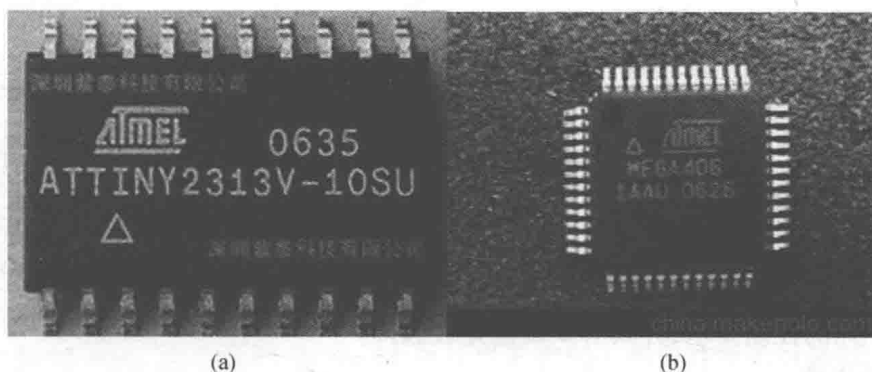
8051 结构的单片机采用复杂指令系统 CISC 体系。CISC 结构存在指令系统不等长、指令数多、CPU 利用效率低和执行速度慢等缺陷, 已不能满足和适应实际中高档电子产品和嵌入式系统应用的需要。ATMEL 公司发挥其在 FLASH 存储器技术上的优势特长, 于 1997 年研发和推出了全新配置、采用精简指令集 RISC 结构的新型单片机, 简称 AVR 单片机。

为满足不同的需求和应用,ATMEL 公司对 AVR 单片机内部资源进行了相应的扩展和裁剪,推出了 tiny AVR、低功耗 AVR 和 megaAVR 三个系列,分别对应低、中、高 3 个档次的数十种型号产品。这三个系列的 AVR 单片机,内核均相同,指令系统也兼容,只是在内部资源的配备及片内集成的外围接口数量和功能方面适当有所不同。不同型号的 AVR 单片机封装形式也不一样,引脚数 8~100 脚,价格从几元到几十元不等,可满足不同场合和不同应用的需求,用户可根据需要选择。

自 2002 年以来,ATMEL 公司对 AVR 单片机产品线进行了调整,逐步停止性能重叠的低功耗 AVR 单片机中的 AT90S 系列的生产,用性能更加优越的 megaAVR 系列代替。例如停止 AT90S4414、AT90S8515 等芯片的生产,用 ATmega8515 替代 AT90S8515,用 ATMEGA8535 替代 AT90S8535,用 ATmega8 代替 AT90S4433 等。

Tiny AVR 系列的 AVR 内部的资源相对较少,引脚也较少,适合应用在家用电器等需要简单控制的领域,如空调、微波炉、电冰箱和烟雾报警等。

Mega AVR 系列单片机的性能不仅优越,而且具有良好的性价比,例如现在广泛使用的 MEGA8 单片机的市场价格不超过 10 元,却有 1 KB 的 SRAM,8 KB 的 FLASH 和 512 字节的 EEPROM。图 2.2 分别是 tiny AVR 单片机和 mega AVR 单片机。



(a)

(b)

图 2.2 AVR 单片机

(a) tiny AVR 单片机; (b) mega AVR 单片机

AVR 单片机采用 RISC 结构,其速度、内存容量、外围接口的集成度以及使用的开发和仿真技术等方面均充分体现和代表了当前单片机嵌入式系统发展的趋势,也正是由于这些显著特点,加上其极高的性价比使其在短时间内成为市场上的主流 IC 芯片之一。芯片的具体特点包括:

(1) 哈佛结构,具备 1MIPS/MHz 的高速运行处理能力;

(2) 超功能精简指令集(RISC),具有 32 个通用工作寄存器,克服了 8051MCU 采用单一 ACC 进行处理造成的瓶颈现象;

(3) 快速的存取寄存器组、单周期指令系统,大大优化了目标代码的大小、执行效率,部分型号 FLASH 非常大,特别适用于使用高级语言进行开发;

(4) 做输出时与 PIC 的 HI/LOW 相同,可输出 40 mA(单一输出),做输入时可设置为三态高阻抗输入或带上拉电阻输入,具备 10~20 mA 灌电流的能力;

(5) 片内集成多种频率的 RC 振荡器、上电自动复位、看门狗、启动延时等功能,外围电路更加简单,系统更加稳定可靠;

(6)大部分 AVR 片上资源丰富,带 E2PROM, PWM, RTC, SPI, USART, TWI, ISP, AD, Analog Comparator 和 WDT 等;

(7)大部分 AVR 除了具有 ISP 功能外,还有 IAP 功能,方便升级或销毁应用程序。

2.3 MSP430 系列

MSP430 系列单片机是美国德州仪器(TI)于 1996 年推向市场的一种 16 位超低功耗、具有精简指令集(RISC)的混合信号处理器(Mixed Signal Processor)。之所以称之为混合信号处理器,是因为针对实际应用需求,将其多个不同功能的模拟电路、数字电路模块和微处理器集成在一个芯片上,以提供“单片机”解决方案。

自 1996 年 MSP430 的第一代产品 3xx 系列起,目前已有 1 系列、2 系列、G2 系列、4 系列、5 系列、6 系列、FRAM 系列、低电压系列和 RF 片上系统总共超过 450 种可供选择的器件。每个系列均有自己的特点,这点可以通过 MSP430 的器件标号了解具体特性。以下将针对每种系列进行简单的描述。

(1)1 系列

MSP430F1x 系列 MCU 的工作电压为 1.8 ~ 3.6 V,能够提供 8 MIPS 计算能力。该系列提供 1 ~ 60 KB 的 FLASH 空间或者 1 ~ 16 KB 的 ROM 空间,具备 512B ~ 10 KB 的 RAM。通用 I/O 管脚数目有 14, 22 和 48 三种。

片上外设包括 10 位或 12 位的 SAR(逐次逼近型)型 ADC、12 位的 DAC、模拟比较器、DMA、16 × 16 硬件乘法器和通用同步异步收发器(USART,支持 UART 和 SPI 接口)等。

该系列在低功耗模式下, RAM 保持状态消耗电流为 0.1 μA , 实时时钟状态消耗电流为 0.7 μA 。从待机模式下唤醒仅需 6 μs , 工作状态电流消耗为 200 $\mu\text{A}/\text{MIPS}$ 。

(2)2 系列

MSP430F2x 系列 MCU 工作电压为 1.8 ~ 3.6 V,能够提供 16 MIPS 计算能力。该系列提供高达 120 KB 的 FLASH 空间,具备 128 B ~ 8 KB 的 RAM。通用 I/O 管脚相比 1 系列具有更多的选择,具备 10/16/24/32/48 或 64 个管脚。该系列片上还集成了极低功耗振荡器 VLO,可以提供 12 KHz 的振荡,另外 I/O 管脚增加了内部上下拉功能。

片上外设相比 1 系列增加了 16 位和 24 位的 Σ - Δ 型 ADC 和片上运算放大器。通信接口方面新增了通用串行通信组(USCI)模块,可以支持 SPI, I2C, LIN, IrDA 和 UART 接口。

该系列的器件在低功耗模式下, RAM 保持状态消耗电流为 0.1 μA , 实时时钟状态消耗电流为 0.7 μA 。VLO 活动情况下待机消耗电流为 0.3 μA 。从待机模式下唤醒耗时减少为不到 1 μs 。工作状态电流消耗为 220 $\mu\text{A}/\text{MIPS}$ 。

(3)4 系列

MSP430F4x 系列 MCU 的种类较多,该系列的最大特点是一般都具备 LCD 驱动器,且该系列还有较多针对具体应用的优化型号。CPU 性能方面,该系列可以提供 8MIPS 或者 16MIPS 的计算能力。除了 MSP430 常见的基本外设外,该系列器件还引入了 RTC 时钟和 32 × 32 位乘法器等新外设。4 系列的低功耗性能基本与 1 系列相当。

(4) FRAM 系列

FRAM 系列是 MSP430 中基于铁电存储器的产品,铁电存储器相比 FLASH 可进一步降低功耗,并提升了读写速度,特别是写速度提高 100 倍以上。FRAM 系列器件能够提供最高 24 MHz 的 CPU 工作频率。存储空间上,能够提供 4 ~ 16 K 的 FRAM 作为非易失存储器,还可提供 1 ~ 2 K 的 SRAM。

除了与传统存储器技术有关的优点外,FRAM 还具有系统级安全优势。由于取消了电荷泵,消除了容易受到物理攻击的一个关键软肋。FRAM 还能够抵御电场、磁场以及辐射的影响。由于 FRAM 状态不以电荷形式存储,阿尔法粒子不太可能使位改变,并且 FRAM 软错误率(SER)低于可检测到的极限。除了这种抗外部干扰能力,FRAM 还具有防分裂能力,即写入/擦除周期中的功率损失不会造成数据损坏。且常常可以通过加密对数据进行保护。FRAM 的高写入速度和高寿命使开发人员可以更为频繁地生成密钥,从而更好地保护数据传输。

外设方面与其他系列相近。另外由于 FRAM 的使用引入了存储器保护单元(MPU)。FRAM 系列的功耗降低至 82 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 。

(5) G2 系列

MSP430G2x 系列 MCU 是针对经济型应用推出的 MSP430 产品,外设相比其他系列有所精简,相应的价格也大幅降低至与 8 位微控制器相当。G2 系列仍然可以提供高达 16 MIPS 的计算能力,工作电压为 1.8 ~ 3.6 V。存储空间可以提供 512 B 到 16 KB 的 FLASH 空间, RAM 有 128 B, 256 B, 512 B 三档可选。

外设方面可以提供 10 位的 SAR 型 ADC、模拟比较器、定时器等。G2 系列器件能够提供的 I/O 管脚相对较少,只有 4/10/16/24 四种可供选择。串行口可以支持 I²C, SPI 和 UART。另外 G2 系列还具备非常有特色的电容触摸 I/O,可方便地用于触摸按键的设计。G2 系列的低功耗性能与 2 系列基本相当。

(6) 5/6 系列

MSP430F5x 系列 MCU 和 MSP430F6x 系列 MCU 比较接近,6 系列增加了 LCD 驱动器。这两个系列是 MSP430 中性能最高的两个系列,能够提供高达 25 MIPS 的性能。存储空间方面可以提供高达 256 KB 的 FLASH 空间和 18 K 的 SRAM。外设方面新增分辨率 PWM 模块、增加 USB 通信接口、具备 5 V 驱动能力的 I/O、24 位精度的 Sigma - Delt 型 ADC。这两个系列器件的管脚数目较多,片上外设非常丰富,同一类型外设 on 片上具备多个可供选择。这两个系列的产品将 MSP430 的工作功耗降到 165 $\mu\text{A}/\text{MIPS}$,唤醒时间不大于 5 μs 。

(7) MSP430L09x

MSP430L09x 低电压系列是针对 1.5 V 电池供电推出的超低电压控制器,能够在 0.9 ~ 1.65 V 的电压范围内工作。CPU 工作速度为 4 MHz,内部的非易失存储器只有 ROM,可以通过外部存储器加载代码。器件管脚数目较少,仅提供 11 个 I/O 接口。外设方面提供定时器、看门狗和 APOOL 模块。APOOL 模块集成了参考电压、8 位 ADC、8 位 DAC、比较器和电源电压检测的功能。低电压系列具备极低的工作功耗,在 1.3 V 供电的情况下工作功耗仅为 45 $\mu\text{A}/\text{MHz}$,待机模式电流消耗为 6 μA 。

(8) CC430

CC430 是集成有射频模块的 SOC(片上系统)器件,实际是将 5 系列 MSP430 的内核与 1 GHz 以下射频通信芯片 CC1101 整合在一起。该系列器件能够提供最高 20 MHz 的 CPU

运行速度,8~32 KB 的 FLASH 空间以及 2~4 KB 的 SRAM。外设方面能够提供 MSP430 的通用外设。工作功耗为 180 $\mu\text{A}/\text{MIPS}$,RAM 保持电流为 1 μA 。

(9) MSP432

MSP43 系列 MCU 完美组合了 TI 的 MSP430 低功耗 DNA、先进的混合信号功能以及 ARM® 32 位 Cortex™ M4F RISC 引擎的高性能处理功能。MSP432P4x MCU 适用于高效数据处理和增强型低功耗操作均至关重要的大量嵌入式应用。工作电压为 1.62~3.7 V。

①性能方面

具有高达 48 MHz 的 CPU 速度,3 位 ARM® Cortex® - M4F,全 ARM 指令集,浮点单元(FPU),DSP 扩展,3.4Coremark/MHz。

②安全方面

256 位 AES 加密,JTAG 存取锁定以及 4 个 IP 保护区域。另外具有 EnergyTrace™ 技术,能够实时测量电源和调试,生成应用能源曲线,包括电流和 CPU 状态。

具有 24 通道 14 位的差动 ADC,采样速率高达 1 MSPS,全速时能耗为 200 μA 。

存储器方面具有高达 256 KB 的闪存和高达 64 KB 的 RAM。

MSP432 内部整合了 LDO 与 DC/DC 转换器,是市场上少数整合了 DC/DC 转换器的 MCU 产品,在操作电压方面,其范围为 1.62~3.7 V,在主动模式下可以达到 95 $\mu\text{A}/\text{MHz}$,睡眠模式(振荡器工作状态下)的消耗电流为 850 nA。同时还集成了针对超低功耗进行优化的外设,包括:

- (1)相较于低压降稳压器 LDO,集成的 DC/DC(除 LDO 外)能够节省 40% 的能耗;
- (2)8 个独立段上配备了具有可选择保留的 64 KB RAM,每个 RAM 段可省电 30 nA;
- (3)在采样传感器为 1 MSPS 时,低功耗高速模数转换器(ADC)的流耗仅有 375 μA ;
- (4)相较于闪存,存储在 ROM 中的 Driver Library 可将耗电量减少 35%。

2.4 STM 32 系列

在讨论 STM32 系列之前,有必要先弄清楚 ARM 公司的 Cortex 系列划分原则。

ARM Holdings 是全球领先的半导体知识产权(IP)提供商,于 1991 年成立于英国剑桥,是苹果、诺基亚、Acorn、VLSI、Technology 等公司的合资企业。ARM 公司通过出售芯片技术授权,建立起新型的微处理器设计、生产和销售商业模式。ARM 将其技术授权给其他著名的半导体、软件和 OEM 厂商,每个厂商得到的都是一套独一无二的 ARM 相关技术及服务。利用这种合伙关系,ARM 很快成为许多全球性 RISC 标准的缔造者。

ARM 公司将经典处理器 ARM11 以后的产品更名为 Cortex,并分成 A、R 和 M 三类,旨在为各种不同的市场提供服务。

Cortex 系列属于 ARMv7 架构,该架构是到 2010 年为止 ARM 公司最新的指令集架构(2011 年,ARMv8 架构在 TechCon 上推出)。ARMv7 架构定义了三大分工明确的系列:“A”系列面向尖端的基于虚拟内存的操作系统和用户应用;“R”系列针对实时系统;“M”系列针对微控制器。

由于应用领域不同,基于 v7 架构的 Cortex 处理器系列所采用的技术也不相同,基于 v7A 的称为 Cortex - A 系列,基于 v7R 的称为 Cortex - R 系列,基于 v7M 的称为 Cortex - M