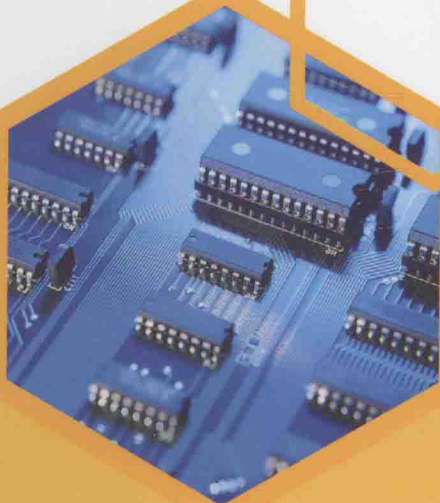


高等职业教育精品工程规划教材 • 中国电子教育学会推荐教材

# AVR单片机应用技术 项目化教程

欧阳明星 编著



- ★ 突出核心能力的培养
- ★ 项目化编写模式
- ★ 实训环节精炼、实用



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等职业教育精品工程规划教材

# AVR 单片机应用技术 项目化教程

欧阳明星 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书为作者在本校“大学生电子创新设计”第二课堂培训讲义及“全国大学生电子设计竞赛”等赛前培训资料基础之上,经过三年实践与编修最终成书,为“广东省教学成果奖”培育项目。本书以项目为载体,以任务为驱动,借助 Proteus 仿真调试手段,系统深入地介绍 AVR 单片机编程应用技术。全书设计有广告灯、数字时钟、频率计、电压表、差分转换器、双机串行通信、万年历、红外遥控音量控制器、数字调谐收音机等 15 个项目,内容涉及单片机编程基础、I/O 口原理与操作、人机交互接口、定时/计数器、PWM 调制、A/D-D/A 转换器、串行通信口、SPI/IIC 总线接口等。项目由浅入深,并给出源程序(全部调试通过)、流程图、原理图、波形图等,内容完整详实,逻辑清晰,实例丰富,便于自学。

本书可作为高职大专院校电子信息、应用电子技术、自动化、计算机信息工程等专业教材,也可作为智能电子、仪器测量、通信、自动控制等有关领域从事单片机编程的工程技术人员参考用书,也可作为培训教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

AVR 单片机应用技术项目化教程 / 欧阳明星编著. —北京: 电子工业出版社, 2013.1  
高等职业教育精品工程规划教材

ISBN 978-7-121-19009-4

I. ①A… II. ①欧… III. ①单片微型计算机—高等职业教育—教材 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 278248 号

责任编辑: 郭乃明

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 19 字数: 469 千字

印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 35.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

单片机具有体积小、价格低、开发周期短等特点，广泛应用于各行各业。随着电子技术的飞速发展，单片机工艺及技术得到长足的进步，向体积更小、性能更好、速度更快、功能更强的方向发展，众多新型单片机应运而生。在众多工程应用领域，新型单片机与传统结构单片机面临竞争，然新型单片机无论在体系结构、内部组成都有其自身的特点，在资源、速度、性能、价格等方面有显著特点，故应用上具有明显的优势。AVR 单片机是一种比较流行的新型单片机，自诞生以来，以其速度快、功能强、可靠性好等特点，颇受工程技术人员欢迎，并迅速应用于诸多领域。

随着经济快速发展和技术不断进步，行业企业对人才需求出现新的变化，对从业人员的知识和技能有较高的要求，尤其是在嵌入式编程技术领域，这对高职教育提出新的要求。近来，各高职院校按照教育部的教学改革要求，不断开展各种形式的课程改革与专业建设，使高职教育有了较快发展，企业对职业教育的认知度和认可度逐年提高。本书结合当前职业教育的特点，注重动手能力的培养，以项目为载体，以任务为驱动，系统而深入地介绍 AVR 单片机编程及应用技术。

本书介绍了单片机的基础知识、AVR 单片机内核结构和应用，系统阐述了 ATmega16 单片机的原理、结构与应用。项目由简入繁，全部在虚拟平台或实物板调试通过，并给出源程序、流程图、原理图、波形图等。内容由浅入深、完整翔实、逻辑清晰、例程丰富，力求使读者易于接受，以便不同层次读者自学。总体而言，本书有以下几个方面特点：

**1. 结构合理，层次分明，逻辑清晰。**本书重构教学内容，在编排上注重结构合理、层次分明，逻辑清晰，以便适合不同层次读者自学。

**2. 强调动手能力的培养，符合职业教育特点。**本书以项目为载体，以任务为驱动，体现职业教育的特点，内容上便于实施“教、学、做”一体化教学。

**3. 精选项目案例。**结合教学内容，精选项目案例以体现教学内容，融入教学目标，项目寓趣味性和实用性于一体，对提高学生技能有明显帮助。结合高职学生特点，在项目选择上，贴近实际，难易适度，大多数项目均具有很强的可操作性，对仪器工具、调试条件没特殊要求。

**4. 使用 C 语言编程。**全书所有项目、例题均使用编程效率高、可移植性好的 C 语言编程实现，可读性好。

**5. 借助虚拟仿真平台辅助教学手段。**借助虚拟仿真实验平台无论是在教学还是工程项目开发中都是有效而快捷的手段。通过 Proteus 软件仿真模拟单片机运行过程，学生能直观地看到程序运行结果，边讲、边做、边练习，是现今比较流行的单片机一体化教学手段。

**6. 传统与现代结合。**无论是“传统教学”还是现代流行的“项目式教学”，均有各自不可忽视的缺点，本书取二者之长处，扬长避短，既不失传统教学的系统连贯性，又不失项目教学的实践性，二者相得益彰。

本书的编写参考了国内外有关单片机及其他相关书籍和资料，在此向有关作者表示感谢，本校电子创新实验室的学生对项目程序的调试做了许多工作，在此表示感谢。限于时间仓促和作者之水平，本书错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。如有意见或建议，请发邮件至 [kjdx2005@126.com](mailto:kjdx2005@126.com) 联系。

编 者

2012 年 6 月

于广东松山职业技术学院

# 目 录

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 项目 1 单片机基础            | (1)  |
| 任务 1.1 计算机数学基础        | (1)  |
| 1.1.1 数制              | (1)  |
| 1.1.2 数制间的互相转换        | (2)  |
| 1.1.3 二进制数运算          | (4)  |
| 1.1.4 计算机表示数字的方法      | (7)  |
| 1.1.5 计算机中的编码         | (9)  |
| 任务 1.2 单片微型计算机原理      | (11) |
| 1.2.1 单片机组成           | (11) |
| 1.2.2 单片机特点           | (15) |
| 1.2.3 常见单片机的介绍        | (16) |
| 任务 1.3 单片机应用及开发过程     | (18) |
| 1.3.1 单片机应用           | (18) |
| 1.3.2 单片机开发过程         | (19) |
| 1.3.3 单片机编程语言         | (21) |
| 任务 1.4 AVR 单片机简介      | (21) |
| 1.4.1 AVR 单片机特点       | (21) |
| 1.4.2 AVR 单片机分类       | (22) |
| 1.4.3 ATmega 内核单片机简介  | (22) |
| 任务 1.5 ATmega16 单片机原理 | (26) |
| 1.5.1 中央处理单元 (CPU)    | (26) |
| 1.5.2 寄存器             | (28) |
| 1.5.3 存储器组织           | (29) |
| 1.5.4 引脚功能            | (30) |
| 1.5.5 单片机工作模式         | (32) |
| 项目总结                  | (33) |
| 项目训练                  | (33) |
| 项目 2 单片机程序设计基础        | (34) |
| 任务 2.1 一个简单的单片机程序     | (34) |
| 2.1.1 单片机软件开发平台       | (35) |
| 2.1.2 I/O 口结构         | (38) |
| 任务 2.2 单片机 C 语言编程基础   | (40) |
| 2.2.1 C 语言的特点         | (41) |
| 2.2.2 C 语言构成要素        | (42) |

|        |                       |       |
|--------|-----------------------|-------|
| 2.2.3  | 运算符与表达式 .....         | (43)  |
| 2.2.4  | 数据类型与数据结构 .....       | (46)  |
| 2.2.5  | C 语言程序语句 .....        | (54)  |
| 2.2.6  | C 语言函数 .....          | (59)  |
| 任务 2.3 | 项目设计 .....            | (63)  |
| 2.3.1  | 基本 I/O 口操作 .....      | (63)  |
| 2.3.2  | 简易电子琴 .....           | (65)  |
| 2.3.3  | 流水灯 .....             | (69)  |
| 项目总结   | .....                 | (71)  |
| 项目训练   | .....                 | (73)  |
| 项目 3   | 人机交互接口 .....          | (74)  |
| 任务 3.1 | 键盘输入设备 .....          | (74)  |
| 3.1.1  | 非编码键盘 .....           | (75)  |
| 3.1.2  | 编码键盘 .....            | (78)  |
| 任务 3.2 | 输出显示设备 .....          | (79)  |
| 3.2.1  | 数码管 .....             | (79)  |
| 3.2.2  | 液晶显示器 .....           | (85)  |
| 任务 3.3 | 单片机中断系统 .....         | (102) |
| 3.3.1  | 中断概述 .....            | (102) |
| 3.3.2  | ATmega 16 的中断 .....   | (103) |
| 3.3.3  | ATmega 16 的外部中断 ..... | (105) |
| 3.3.4  | 函数的中断 .....           | (107) |
| 任务 3.4 | 项目设计 .....            | (107) |
|        | 数字密码锁 .....           | (107) |
| 项目总结   | .....                 | (116) |
| 项目训练   | .....                 | (116) |
| 项目 4   | ATmega 16 定时计数器 ..... | (117) |
| 任务 4.1 | ATmega16 定时器原理 .....  | (118) |
| 4.1.1  | 定时工作原理 .....          | (118) |
| 4.1.2  | 波形发生器 .....           | (119) |
| 任务 4.2 | T/C0 定时/计数器 .....     | (120) |
| 4.2.1  | T/C0 定时/计数器工作原理 ..... | (121) |
| 4.2.2  | T/C0 定时/计数器工作模式 ..... | (122) |
| 4.2.3  | T/C0 定时/计数器寄存器 .....  | (125) |
| 4.2.4  | T/C0 定时/计数器应用 .....   | (127) |
| 任务 4.3 | T/C2 定时器 .....        | (130) |
| 4.3.1  | T/C2 定时器工作原理 .....    | (130) |
| 4.3.2  | T/C2 定时器寄存器 .....     | (132) |
| 4.3.3  | T/C2 定时器应用 .....      | (135) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 任务 4.4 T/C1 定时/计数器 .....         | (137) |
| 4.4.1 T/C1 定时/计数器工作原理 .....      | (137) |
| 4.4.2 T/C1 定时/计数器工作模式 .....      | (138) |
| 4.4.3 T/C1 定时/计数器寄存器 .....       | (140) |
| 4.4.4 T/C1 定时/计数器应用 .....        | (143) |
| 任务 4.5 项目设计 .....                | (152) |
| 4.5.1 数字时钟 .....                 | (152) |
| 4.5.2 数字频率计 .....                | (156) |
| 项目总结 .....                       | (160) |
| 项目训练 .....                       | (160) |
| 项目 5 数字信号转换 .....                | (161) |
| 任务 5.1 D/A 转换器 .....             | (161) |
| 5.1.1 D/A 转换器工作原理 .....          | (161) |
| 5.1.2 集成 D/A 转换器 .....           | (163) |
| 任务 5.2 A/D 转换器 .....             | (165) |
| 5.2.1 逐次渐进比较式 A/D 转换器 .....      | (166) |
| 5.2.2 A/D 转换器的性能参数 .....         | (166) |
| 任务 5.3 ATmega16 集成 A/D 转换器 ..... | (167) |
| 5.3.1 A/D 转换器结构 .....            | (168) |
| 5.3.2 A/D 转换器工作原理 .....          | (168) |
| 5.3.3 集成 A/D 转换器的寄存器 .....       | (172) |
| 5.3.4 A/D 转换器应用 .....            | (175) |
| 任务 5.4 项目设计 .....                | (177) |
| 5.4.1 简易数字电压表 .....              | (177) |
| 5.4.2 差分信号转换 .....               | (179) |
| 项目总结 .....                       | (185) |
| 项目训练 .....                       | (185) |
| 项目 6 串行通信接口 .....                | (186) |
| 任务 6.1 串行通信基础 .....              | (186) |
| 6.1.1 串行通信与并行通信 .....            | (186) |
| 6.1.2 串行通信方式 .....               | (186) |
| 6.1.3 同步通信与异步通信 .....            | (187) |
| 6.1.4 串行通信接口规范 .....             | (188) |
| 任务 6.2 ATmega16 异步串行通信接口 .....   | (191) |
| 6.2.1 串行通信接口特点 .....             | (191) |
| 6.2.2 串行通信接口组成 .....             | (192) |
| 6.2.3 串行通信接口寄存器 .....            | (193) |
| 任务 6.3 单片机 I/O 口模拟串行通信 .....     | (199) |
| 6.3.1 单片机模拟串行口输出 .....           | (199) |

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| 6.3.2 单片机模拟串行口输入 .....            | (201) |
| 任务 6.4 项目设计 .....                 | (204) |
| 6.4.1 双机串行通信 .....                | (204) |
| 6.4.2 字符串收发通信 .....               | (208) |
| 项目总结 .....                        | (211) |
| 项目训练 .....                        | (211) |
| 项目 7 同步串行通信接口 .....               | (213) |
| 任务 7.1 I <sup>2</sup> C 总线 .....  | (213) |
| 7.1.1 I <sup>2</sup> C 总线概述 ..... | (213) |
| 7.1.2 ATmega16 单片机的 TWI 总线 .....  | (216) |
| 任务 7.2 SPI 总线 .....               | (220) |
| 7.2.1 SPI 总线概述 .....              | (220) |
| 7.2.2 ATmega16 的 SPI 接口 .....     | (221) |
| 任务 7.3 项目设计 .....                 | (224) |
| 实时时钟万年历 .....                     | (224) |
| 项目总结 .....                        | (236) |
| 项目练习 .....                        | (236) |
| 项目 8 红外线遥控音量控制电路 .....            | (237) |
| 任务 8.1 PGA2310 原理 .....           | (237) |
| 8.1.1 引脚功能 .....                  | (237) |
| 8.1.2 内部结构 .....                  | (238) |
| 8.1.3 串行通信口 .....                 | (238) |
| 8.1.4 PGA2310 功能 .....            | (238) |
| 任务 8.2 红外遥控原理 .....               | (240) |
| 8.2.1 红外编码传输 .....                | (240) |
| 8.2.2 红外接收解码 .....                | (241) |
| 8.2.3 系统原理图 .....                 | (243) |
| 任务 8.3 软件设计 .....                 | (245) |
| 任务 8.4 测试与结论 .....                | (253) |
| 项目 9 数控调频收音机 .....                | (254) |
| 任务 9.1 单芯片 FM 接收 .....            | (254) |
| 9.1.1 TEA5767 概述 .....            | (254) |
| 9.1.2 TEA5767 工作原理 .....          | (255) |
| 9.1.3 TEA5767 应用 .....            | (257) |
| 任务 9.2 TEA5767 PLL 频率合成 .....     | (258) |
| 9.2.1 PLL 频率合成 .....              | (258) |
| 9.2.2 电台搜索算法 .....                | (259) |
| 任务 9.3 TEA5767 编程操作 .....         | (260) |
| 9.3.1 通信接口 .....                  | (260) |

---

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 9.3.2 TEA5767 寄存器.....                | (261) |
| 任务 9.4 FM 调频接收设计.....                 | (264) |
| 9.4.1 FM 接收硬件设计.....                  | (264) |
| 9.4.2 FM 软件设计.....                    | (266) |
| 任务 9.5 调试与总结.....                     | (269) |
| 附录 A: AVR 单片机汇编指令简表.....              | (271) |
| 附录 B: AVR 单片机选型表.....                 | (276) |
| 附录 C: 常用的 ATmega 内核 AVR 单片机引脚功能图..... | (279) |
| 附录 D: USB 程序下载工具.....                 | (289) |
| 附录 E: ATmega16 单片机学习板.....            | (292) |
| 参考文献.....                             | (293) |

# 项目 1 单片机基础

单片机是一种集成 CPU、存储器、I/O 设备的可编程半导体集成电路芯片，属于微型计算机的一种类型。单片机具有体积小、集成度高、功能强、使用灵活、价格低廉、稳定可靠等优点，被广泛应用于家用电器、智能仪器、电子通信、工业控制等领域。微型计算机有传统的冯·诺依曼和哈佛结构，有单时钟周期结构 CPU 和多时钟指令 CPU，流水线指令技术亦在单片机中有应用，这些新技术极大提高了单片机的性能。

## 任务 1.1 计算机数学基础

### 1.1.1 数制

所谓数制就是数的制式，是人们利用符号计数的一种科学方法。数制的种类繁多，常用的数制有二进制、十进制、十六进制等。

进位数制的特征概括如下：

(1) 有一个固定的数基  $r$ ，数的每一位只能取大于等于 0、小于  $r$  的数，即符号集为  $\{0, 1, 2, \dots, r-1\}$ ；

(2) 逢  $r$  进位，它的第  $i$  个数位对应于一个固定的数值  $r^i$ ， $r^i$  称为该数的“权”。小数点左边权值为数基  $r$  的正次幂，依次为 0, 1, 2, 3,  $\dots$ ,  $m$  次幂，小数点右边权值为数基  $r$  的负次幂，依次为 -1, -2, -3,  $\dots$ ,  $-m$ 。在计数过程中，当它的某位计满  $r$  时向它的邻近高位进 1。一个  $r$  进制的数可以按权展开表示为：

$$\begin{aligned} D &= D_m \times r^m + D_{m-1} \times r^{m-1} + D_{m-2} \times r^{m-2} + \dots + D_1 \times r^1 + D_0 \times r^0 + D_{-1} \times r^{-1} + \dots + D_{-m} \times r^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^m (D_i \times r^i) \end{aligned}$$

#### 1. 十进制

十进制 (Decimal) 是人类日常生产生活最常用的数制，数基为 10，逢十进一，借一当十，有 0, 1,  $\dots$ , 9 十个数符，权为  $\dots$ ,  $10^2$ ,  $10^1$ ,  $10^0$ ,  $10^{-1}$ ,  $\dots$  如十进制数 1659.56 可以表示为  $1659.56 = 1 \times 10^3 + 6 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 9 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1} + 6 \times 10^{-2}$

#### 2. 二进制

二进制 (Binary) 是一种便于计算机存储和识别的进制，数基为 2，逢二进一，借一当二，只有 0 和 1 两个数符，权为  $\dots$ ,  $2^2$ ,  $2^1$ ,  $2^0$ ,  $2^{-1}$ ,  $\dots$  二进制数 1001.10 按权展开可以写成  $1001.10 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2}$

二进制表示比较简单，便于在计算机中存储和运算，因此计算机中均采用二进制数，且这种进制是计算机能唯一识别的。

### 3. 十六进制

十六进制（Hexadecimal）的数基为 16，逢十六进一，借一当十六。十六进制共有 16 个数符号，其中 0~9 十个符号与十进制相同，另外超出 9 的 6 个符号用字母 A~F 表示（不区分大小写，其中 A 表示十进制中的 10、B 表示 11，依此类推），其权为 $\dots, 16^2, 16^1, 16^0, 16^{-1}, \dots$ 十六进制数 AF6.C8 按权展开可以写为

$$AF6.C8 = A \times 16^2 + F \times 16^1 + 6 \times 16^0 + C \times 16^{-1} + 8 \times 16^{-2}$$

### 4. 数制表示方法

在实际使用中，参与运算的数应明确标注其所采用的进制方式以避免歧义，从而导致运算结果的错误。实际中以下两种表示数进制的方式比较常用。

#### （1）下标法

将参与运算的数用方括号括起来，并用数制 2、10、16 等作为下标，如：

[15606789]<sub>10</sub>，表示十进制；

[10011000]<sub>10</sub>，表示十进制；

[10111110]<sub>2</sub>，表示二进制；

[12fc12bc]<sub>16</sub>，表示十六进制。

#### （2）字母尾缀法

在数的后面添加字母来表示不同进制，二进制添加字母 B，十进制添加字母 D，十六进制添加字母 H，如：

1234D，表示十进制 1234；

1010D，表示十进制 1010；

1010B，表示二进制 1010；

1C880H，表示十六进制数 1C880。

注意：如果是在 C 语言编译器中，表示十六进制数在数前面加 0x，如 0x1C880。十进制是最常用的进制，其后的字母 D 通常可以省略，如 12 表示的就是十进制的 12。

## 1.1.2 数制间的互相转换

二进制数便于计算机存储和运算，但二进制表示的数不直观，不便于人们记忆和使用，此时可以用十六进制来表示二进制，而人们生产生活已习惯的十进制数最常用，因此通常需要在这三种数制之间进行转换。

### 1. 二/十进制互相转换数

#### （1）二进制数转换成十进制数

将二进制数进行权展开，并按乘权相加的规则进行运算，得到的和即为对应十进制数，如二进制数 10110 转换成十进制过程如下：

$$[10110]_2 = 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 = [22]_{10}$$

$$10110.11B = 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = 22.75D$$

## (2) 十进制数转换成二进制数

十进制数转换成二进制数复杂些，需要进行除法取余运算，其规则可以概括为“除二取余倒记数”，即将需要转换的十进制数除以2，取其余数，其商再除以2再取余数，直到除尽为止，将所有余数按逆序排列便可得到其二进制数，如456D转换成二进制数的过程为

456/2, 商为228, 余数为0

228/2, 商为114, 余数为0

114/2, 商为57, 余数为0

57/2, 商为28, 余数为1

28/2, 商为14, 余数为0

14/2, 商为7, 余数为0

7/2, 商为3, 余数为1

3/2, 商为1, 余数为1

将余数结果按逆序排列，将最后一次除法运算的商写在最高位，转换之后的二进制数为111001000B。显然，将该二进制数乘权相加其结果为456D。此外，如果二进制数有小数部分，则小数部分和整数部分分开转换，整数部分按“除二取余倒记数”进行转换，小数部分按“乘二取整顺记数”进行转换，即将小数部分乘以2取商的整数部分（小数点右边数），再将商的小数部分（小数点左边）乘以2，依次不断重复，直到满足所需计数精度即可，将限于篇幅不再赘述。

## 2. 二/十六进制互相转换

二进制数与十六进制数之间的转换比较简单。将二进制数转换成十六进制数的方法为将二进制数从右到左，每四个排成一组，不足四个的在左边补零，每组4个二进制数乘权相加即可得到相应的十进制数，如10011011B，转换成十六进制为

1001 1011

$$1001 = (1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 9)$$

$$1011 = (1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = B)$$

所以结果为9BH。

十六进制数转换成二进制数为二进制数转换成十六进制数的逆过程，将每一位十六进制数转成4位二进制数即可，例如137FH，转换成二进制数为

1=0001B

3=0011B

7=0111B

F=1111B

故结果为0001001101111111B。

## 3. 十/十六进制互相转换

十进制数转换成十六进制数与十进制数转换成二进制数类似，为除16取余数逆记数，将

最后一次除法运算的商写在最高位。如 500D 转换成十六进制其过程如下：

500/16, 商为 31, 余数为 4

31/16, 商为 1, 余数为 15

因此其结果为 1F4H。

十六进制数转换成十进制数与二进制数转换成十进制数类似, 按乘权相加法进行转换, 如 3F45H 转换成十进制的过程为

$$3 \times 16^3 + F \times 16^2 + 4 \times 16^1 + 5 \times 16^0 = 12288 + 3840 + 64 + 5 = 16197D$$

### 1.1.3 二进制数运算

二进制运算分为算术运算和布尔逻辑运算。二进制的算术运算与十进制的加减乘除的运算方法和基本规则一样, 为逢二进一, 借一当二。布尔逻辑运算是二进制特有的一种运算, 是计算机中实现编程操作的重要运算, 它是基于基本的与或非的数理逻辑运算, 以位为基本运算单位, 互相之间不受影响。

#### 1. 算术运算

##### (1) 加法运算

二进制的加法运算的规则为

$$0+0=0$$

$$0+1=1$$

$$1+1=10 \text{ (1 为向高位的进位数)}$$

【例 1-1】求  $X+Y$ , 其中  $X=10001110$ ,  $Y=11001111$ 。

解: 按照二进制加法运算规则

$$\begin{array}{r} 1000\ 1110 \\ +1100\ 1111 \\ \hline 10101\ 1101 \end{array}$$

结果为 101011101, 有 9 位二进制, 1 为运算结果的第 9 位进位位。

##### (2) 减法运算

二进制减法运算规则为

$$0-0=0$$

$$1-0=1$$

$$1-1=0$$

$$0-1=1 \text{ (向高位借 1 作 2)}$$

【例 1-2】求  $X-Y$ , 其中  $X=11000011$ ,  $Y=00101101$ 。

解: 按照二进制加法运算规则,

$$\begin{array}{r} 11000011 \\ -00101101 \\ \hline 10010110 \end{array}$$

结果为 10010110。

## (3) 乘法运算

乘法运算的规则为

$$0 \times 0 = 0$$

$$0 \times 1 = 0$$

$$1 \times 1 = 1$$

【例 1-3】求  $X \times Y$ ，其中  $X=1001$ ， $Y=0101$ 。

解：按照二进制乘法规则，

$$\begin{array}{r}
 1001 \\
 \times 0101 \\
 \hline
 1001 \\
 0000 \\
 1001 \\
 +0000 \\
 \hline
 0101101
 \end{array}$$

结果为 0101101B

## (4) 除法运算

除法运算规则为

$$0 \div 1 = 0$$

$$1 \div 1 = 1$$

【例 1-4】求  $X \div Y$ ，其中  $X=10110100$ ， $Y=1001$ 。

解：按照二进制除法规则

$$\begin{array}{r}
 101000 \\
 1001 \overline{) 101101000} \\
 \underline{1001} \phantom{000} \\
 1001 \phantom{000} \\
 \underline{1001} \phantom{000} \\
 0000000
 \end{array}$$

结果商为 101000B，余数为 0。

## 2. 逻辑运算

在布尔逻辑中，基本的逻辑关系有与、或、非、异或等。

## (1) 逻辑与运算

一个事件由多个条件决定，如果决定这件事的所有条件均满足该事件才成立，则所有条件之间满足逻辑“与”关系。逻辑与运算用“.”或“&”逻辑运算符表示，其基本运算规则如下

$$0 \times 1 = 0$$

$$1 \times 1 = 1$$

$$0 \times 1 = 0$$

计算机中的逻辑与运算就是将二进制逐位进行逻辑与运算。

**【例 1-5】**求 X 与 Y 的逻辑与运算，其中 X=10110111，Y=00001111。

解：按照二进制逻辑与规则，逐位进行逻辑与，即

$$\begin{array}{r} 10110111 \\ \& 00001111 \\ \hline 00000111 \end{array}$$

其结果为 00000111B。

#### (2) 逻辑或运算

一个事件由多个条件决定，当决定这个事件的任意一个条件满足，该事件即可成立，则所有条件满足逻辑“或”关系。逻辑或运算使用“+”或“|”逻辑符号表示，其基本运算规则如下

$$\begin{array}{l} 0+1=1 \\ 1+1=1 \\ 0+0=0 \end{array}$$

计算机中的逻辑或运算就是将二进制逐位进行逻辑或运算。

**【例 1-6】**求 A 与 B 的逻辑或运算，其中 A=10110111，B=10000110。

解：按照二进制逻辑或运算规则，逐位进行逻辑或，即

$$\begin{array}{r} 10110111 \\ | 00001111 \\ \hline 10111111 \end{array}$$

其结果为 10111111B。

#### (3) 逻辑非运算

逻辑“非”即为逻辑“反”，条件满足时事件不成立，条件不满足时事件成立。用 X 表示条件，用 Y 表示事件结果，X 与 Y 的逻辑非可以表示为

$$Y = \bar{X}$$

逻辑非的运算规则为

$$\begin{array}{l} \bar{0}=1 \\ \bar{1}=0 \end{array}$$

**【例 1-7】**求 X 的逻辑非，X=11001000。

解： $\bar{X} = \overline{11001000} = 00110111$

其结果为 00110111B。

#### (4) 逻辑异或运算

决定事件结果的两个条件如果相同时事件不成立，只有两个条件不同时事件才成立，这就是逻辑异或，用逻辑符号“ $\oplus$ ”表示。逻辑异或的运算规则如下

$$\begin{array}{l} 0\oplus 0=0 \\ 1\oplus 1=0 \\ 0\oplus 1=1\oplus 0=1 \end{array}$$

**【例 1-8】**求 A 和 B 的逻辑异或运算，A=1000，B=1101。

解：

$$\begin{array}{r}
 1000 \\
 \oplus 1101 \\
 \hline
 0101
 \end{array}$$

异或之后的结果为 0101B。

### 1.1.4 计算机表示数字的方法

计算机能识别的数只有二进制数，所以在计算机中均是用二进制表示数和进行数的存储及运算。数有定点整数和浮点数，有正数，还有负数。计算机中所使用的二进制数的长度与数的大小和范围有关系。

#### 1. 机器数与真值

数值本身大小称为数的真值，如-1CH 的真值为-0011100，+63H 的真值为+1100011。显然“+”号和“-”号是人为添加的用于识别数的符号的标记，计算机无法识别这些标记。为了能够让计算机识别数的符号，通常在数值中设定一位符号位，且约定符号位为数的最高位。以 8 位二进制为例，通常将 D7 位设为数的符号位 S，S=0 表示正数，S=1 表示负数，带上符号位 S 的数就称为该数的机器数。

| D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| S  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  |

所以-1CH 的机器数为 10011100B (9CH)，+63H 的机器数为 011000011B (63H)。

#### 2. 数的原码、反码与补码

计算机中可以用三种码表示数，即原码、反码、补码。

##### (1) 原码

原码与机器数相同，最高位为符号位，设有一数 X，其原码记为[X]<sub>原</sub>。以 8 位数为例，-12H，+36H 的原码分别为 10010010B 和 00110110B，表示成

$$[10010010]_{\text{原}} \quad [00110110]_{\text{原}}$$

在原码表示法中，0 有两个原码：

$$[+0]_{\text{原}}=00000000 \quad [-0]_{\text{原}}=10000000$$

##### (2) 反码

反码是数的另一种表示方法，在原码基础上保持最高位符号位不变，将其余位逐位取反即可。设有一数 X，其反码记为[X]<sub>反</sub>，以 8 位数为例

$$X=-12\text{H}, [X]_{\text{原}}=10010010, [X]_{\text{反}}=11101101$$

$$X=+0, [X]_{\text{原}}=00000000, [X]_{\text{反}}=00000000$$

$$X=-0, [X]_{\text{原}}=10000000, [X]_{\text{反}}=11111111$$

需要特别注意的是，正数的反码与原码相同，反码只对负数有效。

##### (3) 补码

补码是数的又一种表示方法，求一个数的补码是在其反码的最低位加上“1”并舍去进位