

“十一五”高等院校规划教材

ELECTRONIC SYSTEM DESIGN

本书配套多媒体教学课件

电子系统设计

— 基础篇

余小平 奚大顺 编著



北京航空航天大学出版社

TN02

18

:1

2007

“十一五”高等院校规划教材

电子系统设计

——基础篇

余小平 奚大顺 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书介绍如何进行电子系统设计,综合了模拟电路、数字电路、MCU、ASIC、EDA 等知识;从设计的角度出发,以元器件应用为切入点,以新知识、新器件、新技术为核心,紧密结合工程实践,避免繁琐的数学推导;内容深入浅出、循序渐进,利于自学和教学;各章附有小结和设计练习。所附网上资料包括电子教案、设计相关软件、子程序库等。

本书可以作为电子信息类专业本科和硕士研究生教材或者电子设计竞赛培训教材,也适合广大电路设计者使用。

图书在版编目(CIP)数据

电子系统设计. 基础篇/余小平,奚大顺编著. —北京:

北京航空航天大学出版社,2007.3

ISBN 978-7-81077-993-7

I. 电… II. ①余…②奚… III. 电子系统—系统设计
IV. TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020433 号

© 2007,北京航空航天大学出版社,版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式或手段复制或传播本书内容。

侵权必究。

电子系统设计——基础篇

余小平 奚大顺 编著

责任编辑 王鑫光

*

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(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpresse@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:24.5 字数:627 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 978-7-81077-993-7 定价:32.00 元

前 言

电子信息类专业的技术人员应该具有对电子系统进行分析与设计的能力。各学科知识的综合利用以及设计与实践能力的培养已受到各学校普遍的重视,系统设计类课程亦应运而生。

笔者曾在 1997 年出版过一本《电子设计技术》,此书对设计方法介绍较少,资料偏多,所涉及的不少内容也已过时。

本书从设计和实用的角度出发,首先介绍了电子系统的设计方法,然后从构成电子电路的基本元器件的应用入手,分别讲述了模拟电路、数字电路、D/A 与 A/D 变换电路、单片机应用系统的设计方法以及现代 EDA 工具等知识。最后给出了几个典型的电子系统设计实例。

本书有以下特点:

- ▶ 介绍部分均从设计的角度出发,着重实用,仅对少数设计者较陌生的器件或电路简介其原理。
- ▶ 比较系统、详细地介绍了作为系统基础的常用电子元器件的应用知识。
- ▶ 所选内容较新。如滤波器设计只是很简单地回顾了其基本原理,而主要介绍 Filter-LAB 设计软件和引脚可编程的开关电容滤波器。
- ▶ 讲述上由浅入深,循序渐进,尽量避免繁琐的数学推导,着重各学科知识的综合应用。
- ▶ 各章均附有小结及设计练习,适宜自学和教学。
- ▶ 注意紧密结合工程实践,如对线性稳压器器件的散热进行了比较切合实际的介绍。
- ▶ 本书只能算是设计入门,故为“基础篇”。而“专题篇”则按专题(如测量技术、控制技术、无线电技术等)进一步介绍。

此书既可供广大电子技术应用人员使用,也可作为大学相应专业高年级、硕士研究生和电子设计竞赛的教材,同时又是一本工具书。

余小平、奚大顺为本书主编。余小平编写了第 1、4~8 章,奚大顺编写了第 2、3 章以及 9.1 节,唐蓉编写了 9.2 节,王洪辉编写了 9.3 节。

在编写过程中,借鉴了大量的参考书、文献和近几年新发表的文章,在此向相关的作者表示深切的谢意。所附网上资料中的汇编子程序库由周航慈教授提供,放大器、滤波器设计软件由 Microchip 公司授权,在此一并致谢。

本书的电子教案、汇编子程序库、放大器与滤波器设计软件、字模提取工具等内容可以在北京航空航天大学出版社网站(www.buaapress.com.cn)本书所附资料内下载,书中所涉及的元器件资料可以从中国电子网(www.21ic.com)、中国芯片手册网(www.datasheet.com.cn)查阅。

由于编者水平所限,加之时间紧迫,错误不妥之处在所难免,恳望广大读者提出宝贵意见。

作 者

2007 年元旦

于成都理工大学

目 录

第 1 章 电子应用系统设计导论

1.1 电子应用系统的构成	1
1.2 电子应用系统设计方法和原则	2
1.2.1 电子应用系统设计的一般方法	2
1.2.2 电子应用系统综合设计的一般原则	4
1.3 电子应用系统设计步骤	4
小 结	5

第 2 章 常用电子元器件的应用

2.1 电阻器	6
2.1.1 主要技术参数	6
2.1.2 分类、特性与应用场合	9
2.1.3 电阻器的应用	11
2.1.4 数字电位器	14
2.1.5 电阻衰减器的设计	17
2.2 电容器	19
2.2.1 主要技术参数	19
2.2.2 分类与特性	21
2.2.3 电容器的应用	21
2.2.4 电解电容器的特性与应用	24
2.3 晶体管	25
2.3.1 硅二极管和硅整流桥	26
2.3.2 半导体三极管	31
2.3.3 场效应管	32
2.3.4 功率 VMOS 场效应晶体管	34
2.3.5 晶体管阵列	37
2.4 表面贴装元器件	39
2.4.1 表贴无源元器件	40
2.4.2 表贴有源元器件	45
2.5 光电耦合器	46
2.5.1 “地”电流的影响	46
2.5.2 通用光电耦合器	48
2.5.3 线性光电耦合器	55

2.6 继电器	57
2.6.1 电磁继电器	57
2.6.2 固态继电器	60
2.7 功率驱动	63
2.7.1 几种常见的功率负载	63
2.7.2 常用数字器件的输出特性	65
2.7.3 功率驱动设计	66
2.7.4 电动扬声器的驱动	68
2.8 显示器件	69
2.8.1 LED	72
2.8.2 LED 数码管及其驱动	75
2.8.3 LCD 显示器及其驱动	81
2.8.4 U 型真空荧光显示器	98
小 结	100
设计练习	101
第 3 章 模拟电路设计	
3.1 运算放大器的基本特性	103
3.2 放大器设计	108
3.2.1 负反馈电路	108
3.2.2 基本放大电路	109
3.2.3 放大电路设计要点	111
3.2.4 运算放大器的参数对放大器性能的影响	116
3.2.5 放大电路辅助设计软件	116
3.3 滤波器设计	119
3.3.1 滤波器的基本特性	119
3.3.2 FilterLab 滤波器辅助设计工具	121
3.3.3 开关电容滤波器	125
3.4 电源电路设计	130
3.4.1 模拟线性稳压电源设计	130
3.4.2 数控稳压电源设计	141
3.4.3 数控稳流电源设计	144
3.4.4 开关稳压电源	144
小 结	155
设计练习	156
第 4 章 数字电路系统设计	
4.1 数字电路系统设计概述	157
4.1.1 数字电路系统的结构	157

4.1.2 数字电路系统的设计步骤	157
4.1.3 数字电路系统的设计方法	158
4.2 常用中规模数字逻辑电路的应用	159
4.2.1 模拟开关和数据选择器	159
4.2.2 数值比较器	165
4.2.3 计数器/分频器	168
4.2.4 译码器	171
4.3 锁相环及频率合成器的应用	176
4.3.1 锁相环	176
4.3.2 频率合成器	181
4.4 常用大规模数字芯片	188
4.4.1 集成信号发生器 MAX038	188
4.4.2 单片频率计	192
小 结	196
设计练习	196

第5章 D/A 与 A/D 转换

5.1 D/A 转换器	198
5.1.1 DAC 的主要技术指标	198
5.1.2 DAC 的选择	199
5.1.3 DAC 的应用	200
5.2 A/D 转换器	209
5.2.1 ADC 的分类	210
5.2.2 ADC 的主要技术指标	212
5.2.3 ADC 的选择	212
5.2.4 ADC 的应用	213
小 结	227
设计练习	227

第6章 单片机应用系统设计

6.1 单片机应用系统综合设计概述	229
6.1.1 单片机的发展趋势	229
6.1.2 单片机的应用及选择	230
6.1.3 单片机应用系统综合设计的一般过程	231
6.2 单片机应用系统硬件及接口设计	231
6.2.1 时钟电路设计	232
6.2.2 复位电路设计	232
6.2.3 键盘接口设计	232
6.2.4 显示器接口设计	236

6.2.5 语音接口设计	241
6.2.6 单总线接口设计	244
6.2.7 I ² C 总线接口设计	247
6.3 单片机应用系统程序设计	255
6.3.1 单片机应用系统程序设计编程语言选择	255
6.3.2 单片机应用系统程序设计规范	256
6.3.3 汇编程序设计	258
6.3.4 C51 程序设计	260
6.3.5 C51 与汇编的混合编程	263
小 结	267
设计练习	267

第7章 ASIC 设计

7.1 ASIC 的设计手段	268
7.1.1 ASIC 设计的发展历程	268
7.1.2 ASIC 设计方法	269
7.2 GAL 器件的编程及应用	271
7.2.1 FASTMAP 语言及其应用举例	271
7.2.2 ABEL 语言及其应用举例	277
7.3 CPLD/FPGA 器件的编程及应用	283
7.3.1 VHDL 语言介绍	283
7.3.2 VHDL 文本输入设计步骤	287
7.3.3 VHDL 文本输入设计举例	292
7.4 SOPC 简介	296
小 结	299
设计练习	299

第8章 EDA 工具应用

8.1 Pspice 仿真	300
8.1.1 Pspice 简介	300
8.1.2 Pspice 使用	301
8.2 EWB 仿真	308
8.2.1 EWB 5.0c 的主要功能及其特点	309
8.2.2 EWB 软件的界面及电路分析应用	309
8.3 Proteus 仿真	315
8.3.1 Proteus 软件简介	315
8.3.2 Proteus 在单片机系统仿真中的使用	316
8.4 Protel 99SE 的使用	322
8.4.1 Protel 99SE 的原理图设计	323

8.4.2 电路网表的生成	327
8.4.3 印制电路的设计	327
小 结	330
设计练习	331
 第 9 章 人机对话单元配置与抗干扰设计	
9.1 数字定时器	332
9.1.1 功能要求	332
9.1.2 整体方案调研	332
9.1.3 整体方案论证	333
9.1.4 硬件电路设计	334
9.1.5 程序设计	336
9.2 数控直流稳流电源	346
9.2.1 功能要求	346
9.2.2 总体方案设计	347
9.2.3 硬件设计	348
9.2.4 软件设计	360
9.2.5 DAC 的标度变换算法与线性补偿算法	364
9.2.6 测试数据	364
9.3 滑移脉冲信号发生器	365
9.3.1 设计要求	366
9.3.2 总体方案论证	366
9.3.3 单元电路设计	368
9.3.4 系统软件设计	376
设计练习	378
 参考文献	 381

第1章 电子应用系统设计导论

1.1 电子应用系统的构成

电子应用系统主要是指由多个电子元器件或功能模块组成,能实现较复杂的应用功能的客观实体。如自动控制系统、电子测量系统、计算机系统、通信系统等。一般来说,一个复杂的电子系统可以分解成若干个子系统,其中每个子系统又由若干个功能模块组成,而功能模块由若干电子元器件组成,如图 1.1.1 所示。

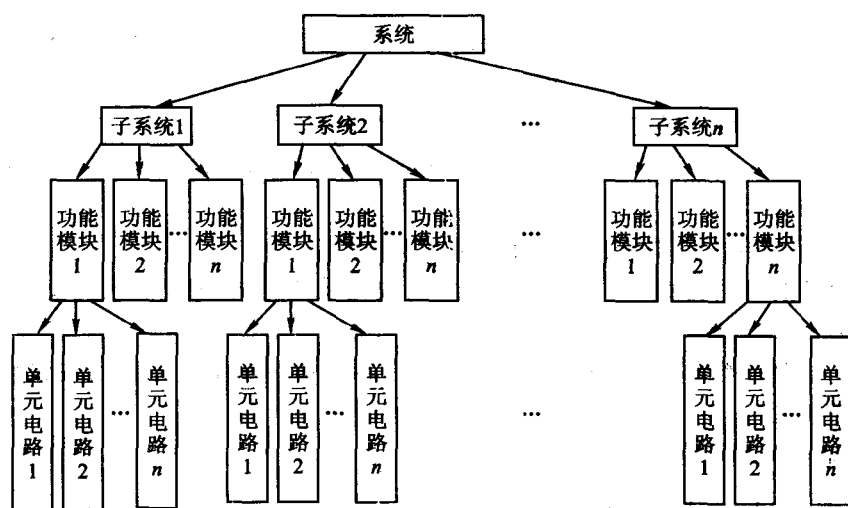


图 1.1.1 电子系统构成示意图

图 1.1.2 为以 MCU/ARM/DSP 为核心的电子测量系统的组成示意图。从图中可知,该电子系统主要由以下分系统组成:模拟子系统、数字子系统、数模混合子系统和 MCU/ARM/DSP 子系统。其中这些子系统又由各个功能模块构成,如数模混合子系统由信号调理与驱动模块、输入输出接口模块、通信接口模块、系统译码与控制模块、电源模块等组成。

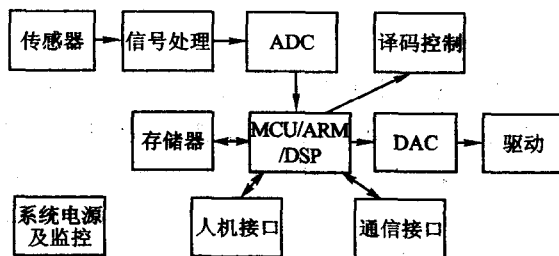


图 1.1.2 以 MCU/ARM/DSP 为核心的电子测量系统组成示意图

1.2 电子应用系统设计方法和原则

1.2.1 电子应用系统设计的一般方法

电子系统设计是系统工程设计,一般是比较复杂的,必须采用有效的方法去管理才能使设计工作顺利并取得成功。

基于系统的功能与结构上的层次性,电子系统设计一般有以下三种方法:自顶向下法(Top to Down)、自底向上法(Bottom to Up)和组合法(TD&BU Combined)。

① 自顶向下法。首先从系统级设计开始,根据系统级所描述的该系统应具备的各项功能,将系统划分为单一功能的子系统,再根据子系统任务划分各部件,完成部件设计后,最后才是元件级设计。

优点:避开具体细节,有利于抓住主要矛盾。适用于大型、复杂的系统设计。

② 自底向上法。根据要实现系统的各个功能要求,从现有的元器件或模块中选出合适的文件,设计各部件,一级一级向上设计,最后完成整个系统。

优点:可以继承经过验证、成熟的部件和子系统,实现设计重用,提高设计效率。多用于系统的组装和测试。

③ 组合法。结合了自顶向下法和自底向上法的优点。

为实现设计的可重复使用以及对系统进行模块化设计测试,现代的系统设计通常采用以自顶向下法为主,结合使用自底向上法的方法。

由于电子电路种类繁多,千差万别,设计方法也因具体情况而不同,因此在设计时,应根据实际情况灵活掌握。

下面详细介绍自顶向下法。

1. 总体方案的设计与选择

选择总体方案是电路应用系统设计的第一步。根据设计任务、指标要求,分析系统应完成的功能,并将系统按功能分解成若干子系统,分清主次和相互关系,形成若干单元功能模块组成的总体方案。

一般需要多个方案,每个方案用方框图的形式表示出来(关键的功能模块的作用一定要表达清楚,还要表示出它们各自的作用和相互之间的关系,注明信息走向等),然后通过实际的调查研究、查阅有关的资料或集体讨论等方式,着重从方案能否满足设计指标要求、结构是否简单、实现是否经济可行等方面,对几个方案进行比较和论证,择优选取。

在方案选择中,还应注意以下两个问题:

- 对不同的方案,应深入分析比较。对关键部分,还要提出各种具体电路,根据设计要求进行分析比较,从而找出最优方案。
- 还需考虑方案的可行性、性能、可靠性、成本、功耗等实际问题。

2. 单元电路的设计与选择

在确定了应用系统的总体方案,绘出了子系统中各部件的详细功能框图后,便可进行单元电路设计。任何复杂的电子电路都是由若干具有简单功能的单元电路组成的,这些单元电路的性能指标往往比较单一。在明确每个单元电路的技术指标后,要分析清楚单元电路的工作原理,设计出各单元的电路结构形式。尽量采用学过的或熟悉的单元电路,也要善于通过查阅资料、分析研究一些新型电路,开发利用新型器件。

根据设计要求和已选定的总体方案的原理框图,确定对各单元电路的设计要求,必要时应详细拟定主要单元电路的性能指标。注意各单元电路之间的相互配合,但要尽量少用或不用电平转换之类的接口电路,以简化电路结构,降低成本。

各单元电路之间要注意在外部条件、元器件使用、连接关系等方面的配合,尽可能减少元器件的数量、类型、电平转换和接口电路,以保证电路最简单,工作最可靠,且经济实用。各单元电路拟定后,应全面地检查一次,看每个单元各自的功能是否能实现,信息是否畅通,总体功能是否满足要求,如果存在问题,必须及时做出局部调整。

3. 元器件的选择

选择元器件时,一般优先选用集成电路。集成电路的广泛应用,不仅减少了电子设备的体积和成本,提高了可靠性,使安装调试和维修变得比较简单,而且大大减化了电子电路的设计。

(1) 集成电路的选择

集成电路的种类繁多,选用方法一般是“先粗后细”,即先根据主体方案考虑应选用什么功能的集成电路,再进一步考虑其具体性能,然后再根据价格等因素选用型号。选择的集成电路不仅要在功能和特性上实现设计方案,而且要满足功耗、电压、温度、价格等多方面的要求。

(2) 阻容元件的选择

电阻和电容种类很多,正确选择电阻和电容是很重要的,不同的电路对电阻和电容性能要求也不同,有些电路对电容漏电要求很严格,有些电路对电阻和电容的精度要求很严格,设计时要根据电路的要求选择性能和参数合适的阻容元件,并要注意功耗、容量、频率、耐压范围是否满足要求。

(3) 分立元器件的选择

分立元器件包括二极管、三极管、场效应管和晶闸管等,选择器件的种类不同,注意事项也不同。例如三极管,在选用时应考虑是NPN管还是PNP管,是大功率管还是小功率管,是高频管还是低频管,并注意管子的电流放大倍数、击穿电压、特征频率、静态功耗等是否满足电路设计的要求。

4. 元器件的参数计算

单元电路的结构、形式确定以后,需要对影响技术指标和参数的元器件进行计算。这种计算有的需要根据电路理论公式进行,有的按照工程估算方法进行,有的可用典型电路参数或经验数据。选用的元器件参数值最终都必须采用标称值。计算电路参数时应注意如下问题:

① 各元器件的工作电流、工作电压、频率和功耗应在允许的范围内,并留有适当的余量,以保证电路在规定的条件下正常工作,达到所要求的性能指标。

② 对于环境温度、其他干扰等工作条件,计算参数时应按最坏的情况考虑。

③ 保证电路性能的前提下,尽可能设法降低成本,减少元器件的品种、功耗和体积,并为安装调试创造有利条件。

④ 在满足性能指标和上述各项要求的前提下,应优先选用现有或容易买到的元器件,以节省时间和精力。

1.2.2 电子应用系统综合设计的一般原则

任何一项系统的设计,都要遵循一定的原则或标准、规范。进行电子应用系统设计,一般要求遵循以下一些原则:

(1) 兼顾技术的先进性和成熟性

当今世界,电子技术的发展日新月异。系统设计应适应技术发展的潮流,使系统能保持较长时间的先进性和实用性。同时也要兼顾技术上的成熟性,以缩短开发时间和上市时间。

(2) 安全性、可靠性和容错性

安全在任何产品中都是第一位的,在电子系统综合设计中也是必须首先考虑的。采用成熟的技术、元器件和部件,可以在一定程度上保证系统的可靠、稳定和安全。系统还应具有较强的容错性,例如,不会因人员操作失误而使整个系统无法工作;或因某个模块出现故障而使整个系统瘫痪等。

(3) 实用性和经济性

在满足基本功能和性能的前提下,系统应具有良好的性价比。

(4) 开放性和可扩展性

系统能够支持不同厂商的产品,支持多种协议,并且符合国际标准及相关协议。除此之外,还应包括:子系统之间、子系统对主系统以及系统对外部的开放。以便在对系统进行升级改造时,不仅可以保护原有资源,还可以降低系统维护、升级的复杂性以及提高效率。

(5) 易维护性

元器件和部件应尽可能采用通用、成熟产品,使系统易于维护。

1.3 电子应用系统设计步骤

电子应用系统功能设计的一般过程有:

(1) 调查研究

这一步的主要工作有:通过调查研究,明确设计任务和要求;确定系统功能指标;了解设计关键;完成系统功能示意框图。简言之,就是必须明确做什么,做到什么程度。

(2) 方案选择与可行性论证

要求综合应用所学知识,同时查阅有关参考资料;要敢于创新,敢于采用新技术,不断完善所提的方案;应提出几种方案,对它们进行可行性论证,从完成的功能、性能和技术指标的程
度、经济性、先进性以及进度等方面进行比较,最后选择一个较好的方案。

首先,进行系统功能划分。把系统所要实现的功能分配给若干个单元电路,画出能表示各单元功能的整机原理框图。

然后,进行方案比较和可行性论证。

最后,确定总体方案。

在方案选择完成后,对各单元电路的功能、性能指标以及与前后级之间的关系均应当明确。

(3) 单元电路设计、参数选择和元器件选择

这一步需要有扎实的电子电路知识。对各单元电路可能的组成形式进行分析、比较,在确定了单元电路后,就可选择元器件。根据某种原则或已确定好的单元电路部分元件的参数,可以计算其余元器件参数和电路参数。

(4) 组装与调试

设计结果的正确性需要验证,需要用仪器进行测试。这样可以发现问题并及时修改,直到所要求的功能和性能指标完全符合要求。

(5) 编写设计文档与总结报告

符合标准形式的设计文件是一个完整设计过程不可缺少的部分。文件的类型要求,内容与格式,可参考原电子工业部制定的部标准《设计文件的管理制度》。软件是电子设备的一个必不可少的组成部分。对于软件文件的组成,可参考国家标准 GB8567—88《计算机软件产品开发文件编制指南》。

① 设计文档的编写。设计文档的具体内容与以上设计过程是相呼应的:

- 系统的设计要求与技术指标的确定;
- 方案选择与可行性论证;
- 单元电路设计、参数选择和元器件选择;
- 参考资料和文献。

② 总结报告的编写。总结报告的具体内容有:

- 设计工作的进程记录;
- 原始设计修改部分的说明;
- 实际电路原理图、程序清单等;
- 功能与指标测试结果(注明所使用的仪器型号与规格);
- 系统的操作使用说明;
- 存在的问题及改进措施等。

小 结

本章主要内容包括电子应用系统构成、电子应用系统设计方法及原则以及电子应用系统设计步骤。

① 一般来说,一个复杂的电子系统可以分解成若干个子系统,其中每个子系统又由若干个功能模块组成,而功能模块由若干电子元器件组成。

② 电子系统设计是系统工程设计,一般是比较复杂的,必须采用有效的方法去管理才能使设计工作顺利并取得成功。基于系统的功能与结构上的层次性,电子系统设计一般有三种方法:自顶向下法、自底向上法、组合法。

③ 任何一项系统的设计,都要遵循一定的原则或标准、规范。电子系统设计也必须遵循一定的原则。

④ 电子应用系统功能设计的一般过程。

第2章 常用电子元器件的应用

电子系统的硬件电路由若干功能电路组成,而功能电路则由众多的电子元器件构成,如图2.1.1所示。正是对电子元器件的深入了解与正确合理使用,才保证了系统的稳定可靠。

本章从设计的角度出发,简要介绍几种常用电子元器件的原理与特性。设计时选用各种电子元器件通常遵循三条原则:

① 元器件的技术参数必须完全满足系统的要求,并留有合理的余地;

② 最高性能/价格比;

③ 满足系统的结构要求(如体积、封装形式等)。

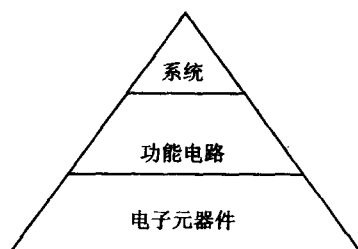


图 2.1.1 电子系统硬件构成

2.1 电阻器

电阻器是一种无源电子元件,是构成电路使用最多也是不可或缺的基本元件之一。据统计,在典型电子系统的诸多电子元器件中,电阻器占元器件总数的40%以上,虽不起眼,但十分重要。

2.1.1 主要技术参数

1. 标称阻值

标称阻值指标注于电阻体上的名义阻值。阻值的单位为欧姆(Ω),例如

$$1\Omega = 10^{-3}\text{k}\Omega = 10^{-6}\text{M}\Omega = 10^{-9}\text{G}\Omega$$

1/4 W 以上的金属膜电阻采用直接标注法。1/4 W 及 1/4 W 以下的金属膜电阻采用四色或五色环标注,表 2.1.1 为四色环标注规则。

表 2.1.1 四色环标注规则

色 别	第一色环 第一位数	第二色环 第二位数	第三色环 应乘位数	第四色环 误差/%
棕	1	1	$\times 10^1 = 10$	± 2
红	2	2	$\times 10^2 = 100$	± 3
橙	3	3	$\times 10^3 = 1000$	± 4
黄	4	4	$\times 10^4 = 10000$	—
绿	5	5	$\times 10^5 = 100000$	± 0.5

续表 2.1.1

色 别	第一色环 第一位数	第二色环 第二位数	第三色环 应乘位数	第四色环 误差/%
蓝	6	6	$\times 10^6 = 1000000$	± 0.2
紫	7	7	$\times 10^7 = 10000000$	± 0.1
灰	8	8	$\times 10^8 = 100000000$	—
白	9	9	$\times 10^9 = 1000000000$	—
黑	—	—	$\times 10^0 = 1$	± 1
金	—	—	$\times 10^{-1} = 0.1$	± 5
银	—	—	$\times 10^{-2} = 0.01$	± 10
无色	—	—	—	± 20

其中,第一、二两个色环为标称阻值的有效数值。

2. 允许误差

允许误差的计算公式如下:

$$\text{允许误差} = \frac{R_{\text{实}} - R_{\text{标}}}{R_{\text{标}}} \times 100\%$$

其中: $R_{\text{标}}$ 为标称阻值; $R_{\text{实}}$ 为实际阻值。表 2.1.2 表示了几种允许误差值。其中市场上金属膜电阻中最常见的为 $\pm 5\%$ 。当允许误差 $\leq \pm 1\%$ 时属精密电阻范畴。目前,精密电阻的允许误差可达 $\pm 0.001\%$ 。

电阻生产厂家根据电阻的种类和允许误差,按表 2.1.2 系列标称值生产普通固定电阻器。它覆盖了一定允许误差下的数个阻值范围。

表 2.1.2 普通固定电阻标称值系列

允许误差/%	阻值范围											
± 50	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
± 10	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7	3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2
± 20	1.0		1.5		2.2		3.3		4.7		6.8	

3. 额定功率

额定功率是指在正常的大气压力 $90 \sim 106.6 \text{ kPa}$ 及环境温度为 $-55 \sim +70^\circ \text{C}$ 的条件下,电阻长期工作所允许耗散的最大功率。

表 2.1.3 为各种电阻额定功率的标称系列值。通常,额定功率与电阻的体积直接相关,即体积越大,额定功率越高。

表 2.1.3 电阻器额定功率标称系列值

额定功率 /W	类 型		标 称 值												
	线 绕	固定电阻器	0.05	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	10	16	25	40	75
			100	150	250	500									
	非 线 绕	固定电阻器	0.05	0.125	0.25	0.5	1	2	5	10	25	50	100		
			0.025	0.05	0.1	0.25	0.5	1	2	3					

4. 最高工作电压

最高工作电压指允许的最大连续工作电压。部分碳膜、金属膜电阻的最高工作电压如表 2.1.4 和表 2.1.5 所列。该电压与气压有关,气压越低,最高工作电压也越低。

表 2.1.4 部分碳膜电阻器的最大工作电压数规格

型 号	额定功率/W	标称电阻范围/M Ω	最高工作电压/V
RT-0.125	0.125	$5.1 \times 10^{-6} \sim 1$	100
RT-0.25	0.25	$1.0 \times 10^{-5} \sim 5.1$	350
RT-0.5	0.5	$1.0 \times 10^{-5} \sim 10$	400
RT-1	1	$2.7 \times 10^{-5} \sim 10$	500
RT-2	2	$4.7 \times 10^{-5} \sim 10$	750
RT-5	5	$4.7 \times 10^{-5} \sim 10$	800
RT-10	10		1000

表 2.1.5 部分碳膜电阻器的最大工作电压数规格

型 号	额定功率/W	标称电阻范围/M Ω	最高工作电压/V
RT-0.125	0.125	$3.0 \times 10^{-5} \sim 510$	150
RT-0.25	0.25	$3.0 \times 10^{-5} \sim 1$	200
RT-0.5	0.5	$1.0 \times 10^{-5} \sim 1$	250
RT-1	1	$3.0 \times 10^{-5} \sim 10$	300
RT-2	2	$3.0 \times 10^{-5} \sim 10$	350

5. 温度系数

温度系数指温度每变化 1℃ 所引起的阻值相对变化的百分率。公式为

$$\text{温度系数} = \pm \frac{\Delta R}{R_{\text{实}}} \bigg|_{\Delta t=1^{\circ}\text{C}} \times 100\%$$

式中: ΔR 为实际阻值的变化量; $R_{\text{实}}$ 为实际阻值。