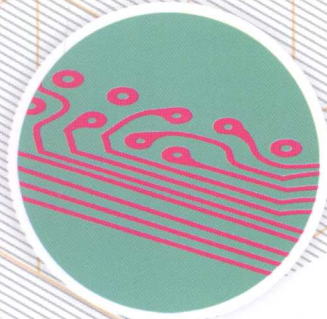
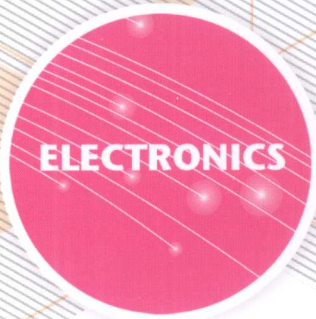
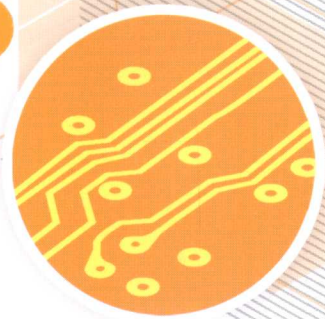
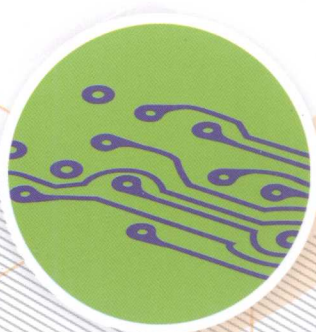


大学生电子设计竞赛指导系列

新版大学生 电子设计竞赛

硬件电路设计指导

陈之勃 陈永真 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

013048443

TN702
303

大学生电子设计竞赛指导系列

新版大学生电子设计竞赛 硬件电路设计指导

陈之勃 陈永真 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



北航

C1656572

TN702
303

844840810

内 容 简 介

全国大学生电子设计竞赛为大学生提供了理论与实践相结合的一个绝好机会。本书作者将多年的科研、教学、产品研发而得到的独特性设计思路进行归纳整理,多次成功应用于全国大学生电子设计竞赛中。总结经验教训,这些独特的设计思路不仅对普通高校的电子设计竞赛指导教师有所帮助,而且为大学生毕业后工作打下良好的基础。

全书共7章:第1章为无源元件,第2章为有源元件,第3章为从晶体管放大器到集成运算放大器,第4章为放大器设计,第5章为数字控制电路及数字控制与设计,第6章为线性电源设计,第7章为开关电源设计。

读者对象可以为参加全国大学生电子设计竞赛的高校学生、指导教师,也可以是电气、电子工程师、科研人员,以及从事电子技术领域的技术人员和广大电子爱好者。

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

新版大学生电子设计竞赛硬件电路设计指导/陈之勃,陈永真编著. —北京:电子工业出版社,2013.6
(大学生电子设计竞赛指导系列)

ISBN 978-7-121-20577-4

I. ①新… II. ①陈… ②陈… III. ①硬件—电子电路—电路设计—竞赛—高等学校—自学参考资料
IV. ①TN702

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第116550号

策划编辑:柴燕

责任编辑:桑昀

印刷:北京京师印务有限公司

装订:北京京师印务有限公司

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:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:364千字

印次:2013年6月第1次印刷

印数:4000册 定价:39.00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 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

全国大学生电子设计竞赛是做什么的？一般看来，全国大学生电子设计竞赛是全国、各省高校的参赛队的电子设计竞技，指导教师新、奇、特设计思路的充分展示，更是对各高校电子技术教学科研水平的检验，现在已成为高校评估必不可少的项目之一。正因为如此，全国各高校对全国大学生电子设计竞赛越来越重视。这也是推动全国大学生电子设计竞赛的强大动力。

对参赛学生而言，可以直接看到的是竞赛获奖证书、所在学校的奖励政策等。事实上，无论对学校还是对参赛学生，全国大学生电子设计竞赛的意义绝对远不止这些。作者通过多年来对全国大学生电子设计竞赛的指导和赛后思考，从更深远的意义考虑，对于参赛学校而言，全国大学生电子设计竞赛是提高教师教学水平、改进教学的好方法之一，通过参赛，可以找到教学中的不足；对于参赛学生而言，全国大学生电子设计竞赛更是大学生获得电子设计能力、巩固所学知识、把所学的理论首次应用于实践的最好机会。通过参加竞赛，学生可以找到学习过程中的不足，找到努力的方向，为毕业后从事专业技术工作打下更好的基础，为提高就业质量做好准备。

2008年，美国次贷危机引发了全球性经济危机。在这个全球大背景下，我国的经济也受到冲击，对于大学生来说就是工作更难找了。真的是大学生过剩了吗？事实并非如此，在大学生找不到工作的同时，企业也在为找不到合格的工程技术人才而发愁，甚至影响企业的发展。从表面上看这两件事是矛盾的，但是仔细分析，这两件事却是互为因果的。那么问题出在哪儿？

问题就出在大学生在学校期间的实践机会太少，学生几乎成为“考试机器”已是不争的事实，很多学习优秀的学生除了考试之外，别的什么也不会。

那么，学校不是在加强实践性教学环节吗？我们的学生在学校的实践性教学环节中都做了什么？只有学生自己最清楚，至少学生自身是有责任的。如果说学生到学校读书是为了改变命运，为了自己将来能找到理想的工作，这没有错误，关键是如何引导学生学到能够改变自己命运的知识和能力。作为电气、电子信息类、测控类和对电子技术感兴趣的学生，不仅要学好书本上的理论知识，还要在实践能力、分析问题和解决问题的能力上狠下工夫，利用课余时间多参与和电气、电子有关的实践活动，锻炼自己的实践能力和创新精神。

很多学生可能会说，我不知道该做什么，也没人指导我，我还没有玩电子线路的经济能力和环境。那么全国大学生电子设计竞赛为这些学生提供了良好的机会。首先，学校为参赛学生提供的赛前培训，不仅可以使学生获得实际工程设计的培训，而且还能够得到电子线路设计、制作、调试的培训与锻炼。其次，在赛前培训和整个竞赛过程中，所需的器件、测试设备、实践环境都是学校提供的，参赛学生基本上不需要花一分钱，需要的只是全身心地投入。如果在赛前的暑假拿出中考和高考的精神，相信会学到很多理论知识，并得到实践能力

的锻炼；如果提前一年去做这件事，采用“慢火炖”的方式，将会消化更多的知识与设计思路。把握住全国大学生电子设计竞赛这个难得的机会，参赛学生肯定会有收获的。

如果参赛学生在指导教师的指导下，能够在四天的时间里独立完成试题要求的内容，可以相信，这些学生在求职时会比没有参加过全国大学生电子设计竞赛的学生具有明显的优势。作者以及作者的合作者指导过的学生，由于能够很清楚地说明所参加竞赛的内容，以及理论、实践方面的解决方法，用人单位一般也非常看重学生的这段经历，故也优先录用这样的学生。

众所周知，当今的世界已经进入了信息时代，似乎工业革命和工业革命所带来的技术和知识被信息技术所淡化，所以有位“211”学校的老师就提出了“电烙铁加万用表时代已经过去”的观点，也就是说硬件电路已不再重要。在这样的思潮冲击下，各高校的硬件电路教学被逐渐淡化，甚至出现了在全国大学生电子设计竞赛中硬件电路设计水平完全不合格的局面。但是，大学生毕业后真正面临就业时，制造业对求职者的硬件设计能力是非常看重的，因为制造业很缺乏硬件电路工程师。作者所在的学校在历次电子设计竞赛中，都能力克群雄、取得好成绩，其根本原因不仅是有兢兢业业的指导教师，更重要的是指导教师在硬件电路设计上具备非常强的能力和超常灵活的思路，指导学生将所学的理论知识应用于实践的能力，这些都是在日常教学、科研工作中积累的成果。正因为如此，本书以硬件电路为主线，着重讲述了在与电子设计竞赛相关的领域中，如何应用硬件电路实现具体实际要求的思路。

总结历届全国大学生电子设计竞赛的经验与教训，无论是参赛学校还是参赛学生，都应该认真对待竞赛，这就是北京理工大学出版社每两年一次出版全国大学生电子设计竞赛优秀试题选的主要原因。在这些书中，选编的内容均为获得国家一等奖、二等奖的作品，几乎全部为国内知名大学的杰作。对大多数省属本科院校而言，具有很高的参考价值，是赛前的必读书籍。

为了让高等院校学生在全国大学生电子设计竞赛中能够取得理想的成绩，作者将多年来指导电子设计竞赛实践和多年来电子线路教学、科研的经验心得奉献给读者。

本书采用新颖的设计思路，从而使读者获得性能优异的设计作品；对于多数省属高校参赛学生与指导教师，如何利用自己现有的资源和基本技能取得更好的竞赛成绩，积累参赛经验，锻炼队伍，使参赛学生获得电子线路的设计、制作和调试能力，为毕业后就业打下良好的基础；这种设计思路还可用于大学生毕业后电子线路的设计工作。

本书的另一个目的，就是让这本书不仅成为对电子设计竞赛有价值的参考书，而且也能成为学生完成从校园到职场转型的指导性参考书。

本书由陈之勃、陈永真编著，参加编写的还有李锦。本书共7章：第1章为无源元件，第2章为有源元件，第3章为从晶体管放大器到集成运算放大器，第4章为放大器设计，第5章为数字控制电路及数字控制与设计，第6章为线性电源设计，第7章为开关电源设计。

由于水平有限，本书不可避免地存在一些缺点和错误，敬请广大读者和专业人员提出宝贵意见。

作者于辽宁工业大学

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 无源元件	1
1.1 无源元件的参数优选系列与精度	1
1.1.1 无源元件的参数优选值	1
1.1.2 无源元件参数精度	2
1.1.3 无源元件参数优选值的标注方式	2
1.1.4 用数码表示额定电压	5
1.1.5 无源元件参数精度的表示方式	5
1.1.6 电阻功率的标注	6
1.2 电阻	6
1.3 电容器	10
1.3.1 电容器的种类	10
1.3.2 电容器的用途	12
1.3.3 铝电解电容器应用中需要注意的问题	15
1.3.4 国内主要电容器制造商	17
第 2 章 有源元件	18
2.1 各类二极管	18
2.1.1 小信号二极管	18
2.1.2 整流二极管	19
2.1.3 快速反向恢复二极管	23
2.1.4 二极管的正向压降与低正向压降的肖特基二极管	28
2.2 双极型晶体管特性分析	29
2.2.1 共发射极电流增益 (h_{ic}) 多大为好	29
2.2.2 开关应用	30
2.2.3 线性应用	30
2.2.4 高频应用	31
2.2.5 功率应用	32
2.3 小信号双极型晶体管	32
2.4 功率双极型晶体管	32
2.5 MOSFET	34
2.5.1 MOSFET 的原理分析	34

2.5.2	功率 MOSFET 的应用注意事项	38
第 3 章	从晶体管放大器到集成运算放大器	40
3.1	简单的晶体管放大器存在的问题	40
3.1.1	开环增益的变化	40
3.1.2	实际最大动态电压范围的实现	41
3.1.3	非线性失真	41
3.1.4	不能放大直流或变化缓慢的信号	42
3.1.5	没有共模抑制能力	42
3.1.6	很难形成运算电路	42
3.2	消除简单的晶体管放大器存在的问题	43
3.2.1	稳定直流工作点	43
3.2.2	稳定直流工作点不能稳定交流电压增益	43
3.3	晶体管差分放大电路不能完全消除直流偏置对输出的影响	44
3.4	交直流等权重的负反馈引入与负反馈的作用	45
3.4.1	放大器开环增益变化的原因	45
3.4.2	引入负反馈降低放大器增益的变化	45
3.4.3	反馈深度	46
3.5	负反馈对放大器的要求	47
3.6	集成运算放大器的基本构成	48
3.6.1	输入级	48
3.6.2	中间放大级	51
3.6.3	输出级	52
3.6.4	偏置电路	53
3.7	集成运算放大器的发展历程	54
3.7.1	早期的集成运算放大器	54
3.7.2	第二代集成运算放大器	55
3.7.3	新型集成运算放大器	59
3.8	应用集成运算放大器遇到的理论挑战与分析	60
3.8.1	负反馈需要放大器具有更高的开环增益	60
3.8.2	负反馈展宽带宽实际上是放大器本身性能已经有了质的飞跃	60
3.8.3	负反馈需要付出的代价	61
3.8.4	负反馈不能解决所有问题	62
3.9	真空管放大器不需要深度负反馈	62
3.10	集成运算放大器的优势	63
3.10.1	集成运算放大器构成的电路具有几乎完美的功能	63
3.10.2	集成运算放大器可以完成所有模拟电路的功能	64
3.10.3	集成运算放大器可以尽可能简化电路	65
3.10.4	集成运算放大器构成的电路的性能价格比是最高的	66

3.10.5	集成运算放大器可以减少电子工程师的劳动	67
3.10.6	集成运算放大器的通用性	67
3.11	电子设计竞赛所需要的集成运算放大器	70
3.11.1	不需要通用型集成运算放大器	70
3.11.2	需要高精度或精密型集成运算放大器	70
3.11.3	需要高速或宽带型集成运算放大器	70
3.11.4	需要低功耗型集成运算放大器	71
3.11.5	需要极低工作电压型集成运算放大器	71
3.11.6	需要集成比较器	71
3.11.7	怎样得到电子设计竞赛需要的性能优异的集成运算放大器	73
第4章	放大器设计	74
4.1	低噪声/微弱信号放大器的设计	74
4.1.1	器件的选择	74
4.1.2	低噪声放大器设计实例	77
4.2	高速、宽带放大器的设计	81
4.2.1	多级级联宽带放大器	82
4.2.2	单级宽带放大器	85
4.2.3	宽带集成运算放大器的选择与电路的选择	85
4.3	小信号高共模抑制比放大器的设计	87
4.3.1	高共模抑制比的实现	87
4.3.2	差动放大器参数	87
4.3.3	高输入阻抗的获得	88
4.3.4	同相并联差动放大器	88
4.3.5	实际的解决方案详解	92
4.3.6	测量放大器设计的电磁兼容与电路板设计	93
4.3.7	制作调试要点	94
4.4	各类比较器电路设计	96
4.4.1	比较器与运算放大器的区别	96
4.4.2	现实中的比较器	99
4.4.3	单电平比较器	99
4.4.4	同相输入迟滞比较器	100
4.4.5	反向输入迟滞比较器	101
4.4.6	迟滞比较器的应用	102
4.4.7	窗口比较器	103
第5章	数字控制电路及数字控制与设计	105
5.1	数字控制电路设计	105
5.1.1	利用计数器集成电路设计数字控制单元电路	105

5.1.2	防抖电路设计	111
5.1.3	带有防抖电路的4位数字控制单元电路	111
5.2	串行数据转换为并行数据的接口设计	113
5.2.1	74HC595	113
5.2.2	利用74HC595实现串行数据的并行输出	115
第6章 线性电源设计		121
6.1	通用线性集成稳压器概述	121
6.1.1	通用线性集成稳压器的分类	121
6.1.2	通用集成电路命名方法	121
6.2	正电压固定电压78××三端集成稳压器	122
6.2.1	78××三端集成稳压器的封装形式与引脚功能	122
6.2.2	78××三端集成稳压器的内部电路原理	124
6.3	负输出固定电压79M××集成稳压器	126
6.3.1	负输出固定电压输出的79M××集成稳压器的原理	126
6.3.2	79××系列集成稳压器的封装形式与引脚功能	128
6.4	电压可调集成稳压器	129
6.4.1	电压可调集成稳压器LM317、LM337系列的工作原理	129
6.4.2	LM317的工作原理	129
6.4.3	LM317的封装形式与引脚功能	131
6.4.4	LM337的工作原理	131
6.4.5	LM337的封装形式与引脚功能	134
6.5	集成稳压器的性能分析	135
6.5.1	极限参数	135
6.5.2	热特性	136
6.5.3	输出电压与输出电压的温度系数	137
6.5.4	电源电压调整率	140
6.5.5	负载效应	141
6.5.6	静态电流和调整端电流	142
6.5.7	静态电流和调整端电流变化范围	143
6.5.8	最小输出电流	143
6.5.9	纹波电压抑制比	147
6.5.10	动态响应	149
6.5.11	输出阻抗	152
6.5.12	最小输入-输出电压差与结温的关系	153
6.5.13	输出噪声电压	155
6.5.14	短路电流限制值与输出峰值电流	155
6.6	输出电压5V的线性稳压电源设计	157
6.6.1	稳压电源的基本性能要求	157

6.6.2	稳压器的选择	158
6.6.3	整流器电路的选择	158
6.6.4	整流变压器的选择	158
6.6.5	滤波电容器的选择	160
6.6.6	热设计	160
6.6.7	其他元件的选择	161
6.6.8	完整的整机电路	161
6.7	运算放大器供电的对称电源的制作	161
6.7.1	集成稳压器的选择	162
6.7.2	整流器电路与原件的选择	162
6.7.3	整流变压器的选择	162
6.7.4	滤波电容器的选择	162
6.7.5	热设计	162
6.7.6	整机完整电路	163
6.7.7	其他电路元件的选择	163
6.7.8	电路调节要点	163
6.8	数字控制的 0~25V/1A 可调稳压电源的制作	164
6.8.1	稳压器的选择	164
6.8.2	电位器调节输出电压和数字控制输出电压的选择	164
6.8.3	控制方式和步进电压的选择	165
6.8.4	输出电压检测电阻的参数选择	166
6.8.5	如何调节到 0V	166
6.8.6	继电器的控制	166
6.8.7	整流器电路与滤波电容器的选择	167
6.8.8	整流变压器的选择与输出电压的切换	168
6.8.9	热设计	169
6.8.10	其他电路元件的选择	170
6.9	线性电流源设计	170
6.9.1	作为恒流源应用的集成稳压器的选择与分析	170
6.9.2	集成稳压器作为恒流源应用的一般方法	171
6.9.3	恒流值的调节	171
6.9.4	带有限压功能的恒流源的实现	174
6.9.5	数字控制电流源	176
6.10	恒流型电子负载	181
6.10.1	恒流型电子负载简介	181
6.10.2	数控恒流型电子负载的实现	182
第 7 章	开关电源设计	185
7.1	开关电源概述	185

7.1.1	我国的电源产业规模与人才需求的矛盾	185
7.1.2	电子设计竞赛中开关型电源的特点	185
7.1.3	开关电源的基础	186
7.2	非隔离降压型开关电源设计	188
7.2.1	分立元件的非隔离降压型变换器需要注意的问题	188
7.2.2	悬浮电压检测	190
7.3	采用悬浮电压检测的降压型开关电源解决方案 (2011年电子设计竞赛试题解决方案)	191
7.3.1	试题	191
7.3.2	方案的选择	192
7.3.3	电路设计	193
7.4	隔离型低纹波电压开关稳压电源的设计实例 (应用准谐振技术)	194
7.4.1	应用 NCP1207A/B 需要考虑的问题	194
7.4.2	用 NCP1207A/B 构成的准谐振式开关电源设计	203
参考文献		207

第1章 无源元件



1.1 无源元件的参数优选系列与精度

1.1.1 无源元件的参数优选值

无源元件的参数的标称是采用优选值系列。其具体标称方法是，在同一数量级中有多少个标称值。一般称为E×××系列，如E3、E6、E12、E24、E48、E96、E192等。

利用式(1-1)可获得不同优选值系列的数值：

$$E = \sqrt[n]{10} \quad (1-1)$$

式中的 n 为系列标称值号，如E6系列中的 $n=6$ 等。这样就可以得到E6、E12、E24、E48、E96、E192的两个相邻标称值的比值分别为1.467799、1.211528、1.10069、1.04914、1.02475、1.01216。

从1.00开始，分别连续乘以以上6个数，如E6系列从1.0开始连续乘以1.467799，就会得到1.0、1.5、2.2、3.3、4.7、6.8，共6个数值，同样也可以得到E12、E24、E48、E96、E192的系列标称值。在同一个数量级中，E6、E12、E24、E48、E96、E192的标称系列值分别为6、12、24、48、96、192个数值。

很显然，在大多数应用中，E48、E96、E192系列的48、96、192个数值相对太多，并且48、96、192个数值并不常用，常用的是E6、E12、E24系列，为了方便读者，在这里将E6、E12、E24系列重新列写一次，参见表1-1。

表 1-1 常用的 E6、E12、E24 系列标称值

E6	E12	E24	E6	E12	E24
10	10	10	33	33	33
		11			36
	12	12		39	39
		13			43
15	15	15	47	47	47
		16			51
	18	18		56	56
		20			62
22	22	22	68	68	68
		24			75
	27	27		82	82
		30			91

1.1.2 无源元件参数精度

优选值系列不是与无源元件的精度一一对应的。但是 E6、E12、E24 标称值系列的精度肯定不能达到 1%，因为只有两位有效数字。因此，E6、E12、E24 系列只能用于 2%、5%、10%、20% 标称系列。如果需要较高精度，则需要在 E6、E12、E24 标称值系列的有效位后加 0，以增加有效位数，或者选择更高的标称系列。

无源元件的参数精度还受线性度、自身噪声、温度系数、时间漂移、偏置电压系数等因素的影响，这些因素的影响总和要低于精度数值。因此，一些无源元件的精度仅能做到 5%，尽管借助先进制造技术可以将参数精度控制在 1% 的范围内，但是，上述因素的影响如果大于 1%，这个无源元件的精度将不能达到 1%，最常见的就是电容器的电容量。

以电阻器为例，其精度一般可以用以下 3 个量来表征。

1) 温度系数 α

温度系数表示温度每变化 1°C ，电阻器阻值的相对变化量，即

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)} \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right) \quad (1-2)$$

式中 R_1 、 R_2 ——当温度为 t_1 和 t_2 时电阻器的电阻值。

2) 电压系数 α_v

电压系数表示电压每变化 1V，电阻器阻值的相对变化量，即

$$\alpha_v = \frac{R_2 - R_1}{R_1(U_2 - U_1)} \left(\frac{1}{\text{V}} \right) \quad (1-3)$$

式中 R_1 、 R_2 ——电压为 U_1 和 U_2 时电阻器的电阻值。

3) 噪声电动势

电阻器的噪声电动势在一般电路中可以不考虑，但在弱信号系统中不可忽视。线绕电阻器只有热噪声（分子扰动引起），仅与阻值、温度和外界电压的频带有关。薄膜电阻除有热噪声外，还有电流噪声，电源噪声近似认为与外加电压成正比。

1.1.3 无源元件参数优选值的标注方式

1) 直接数字标注

当无源元件的尺寸大到可直接标注参数时，可以通过直接标注的方式表示无源元件的参数，如电解电容器、尺寸比较大的薄膜电容器、尺寸比较大的电阻、尺寸比较大的电感等。

直接标注的好处是，参数直观显示，简单明了。但是，直接标注需要无源元件的表面积较大。如果无源元件的尺寸不够，将不能直接标注。

2) 色环表示

随着电子电路从真空管时代步入晶体管时代，甚至是集成电路时代，实际的功率损耗大大减小，无源元件的体积也随之大大缩小。如真空管时代的 0.5W、1W、2W、5W 电阻变为现在的 1/4W、1/8W 甚至 1/16W 电阻。对应的参数只能通过简单的标注方式来标注，这就是色环标注方式。

采用色环标注方式的多为小型轴向引线电阻，如图 1-1 所示。

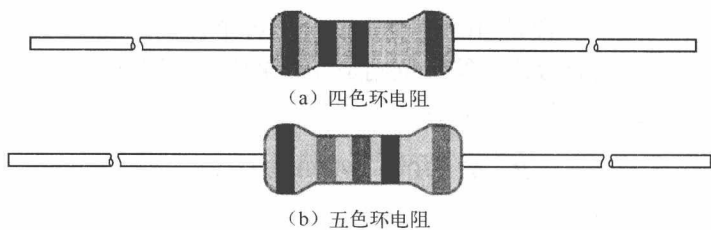


图 1-1 小型轴向引线电阻

也可以采用色环标注方式标注小型电感（即“色环电感”），电容器基本上不使用色环或色点标注方式。

以色环电阻为例，各个色环所代表的数值及其在整个参数中所表达的参数，如图 1-2 所示。

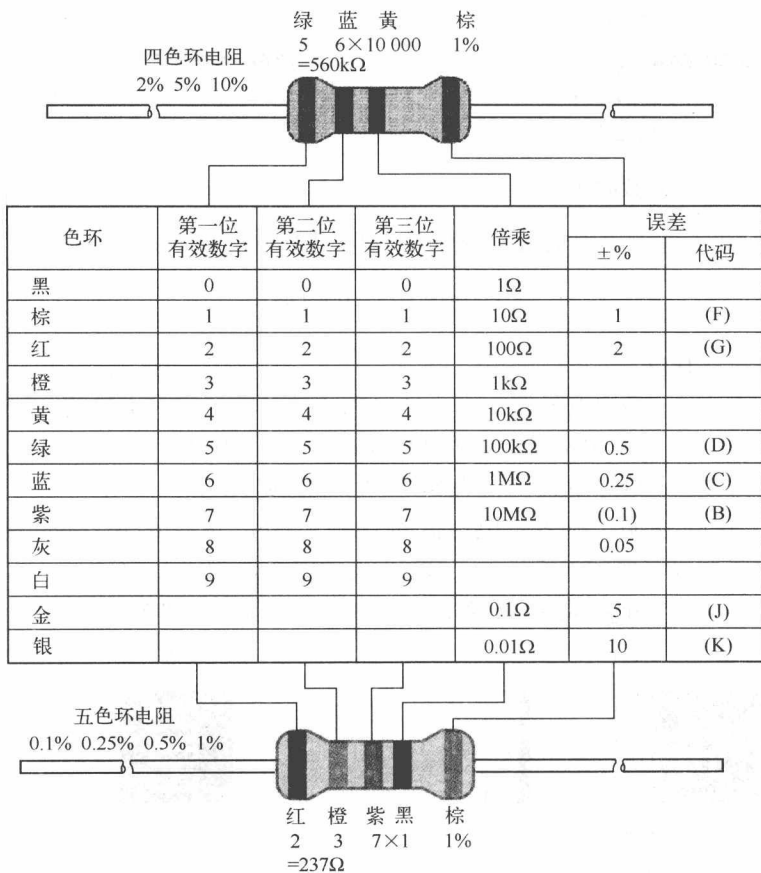


图 1-2 色环电阻的色环颜色所代表的数字和各色环表达参数时的作用

3) 数字表示

无源元件表达参数的第三种方式是数字表示。

采用数字表达参数的多为小型电阻、贴片电阻、小型贴片电容器和小型贴片电感。图 1-3

为三位数的贴片电阻。

在标注的数字中，最后一位是 10^n 幂位，前面的各个位则是电阻值的有效位。例如，三位数字的前两位是电阻值的有效位，第三位则是 10^3 幂位。在图 1-3 中，数字 473 表示电阻值的有效位是 47， 10^n 幂位为 3，表示 10^3 。电阻值为

$$R = 47 \times 10^3 = 47000(\Omega) \quad (1-4)$$

47000Ω通常称为 47kΩ。

四位数字的前三位是电阻值的有效位，第四位是 10^4 幂位，如图 1-4 所示。

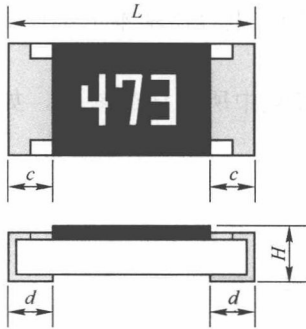


图 1-3 三位数的贴片电阻

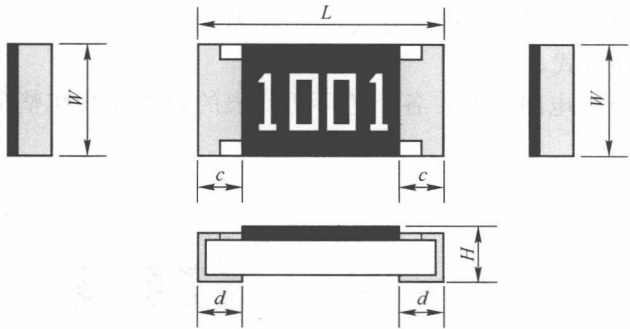


图 1-4 四位数字的贴片电阻

例如，数字 1001 表示电阻值的有效位是 100， 10^n 幂位为 1 表示 10。电阻值为

$$R = 100 \times 10 = 1000(\Omega) \quad (1-5)$$

1000Ω通常称为 1kΩ。

对于小于 10Ω 大于 1Ω 的电阻值，由于数字的 10^n 幂位无法给出负数，所以在用数字表示该范围内电阻值时，通常在整数部分之后和小数部分之前加上一个大写的“R”。例如，6R8 表示整数的个位为 6，小数点后第一位为 8，即电阻值为 6.8Ω。

如果是低于 1Ω 的电阻，则表示电阻值的方法为字母“R”表示个位，字母“R”后面的数字就是电阻的有效位，如图 1-5 所示。R050 表示电阻值为“0.05Ω”。

较低的电阻值，如 $1\text{m}\Omega$ 可以用 R001 表示，省略 R 前面的“0”，如图 1-6 所示。

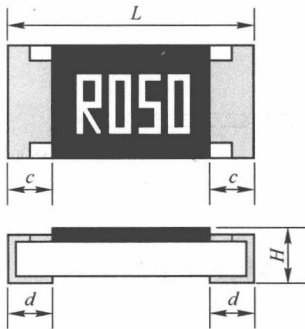


图 1-5 低于 1Ω电阻贴片电阻的电阻值的标注形式

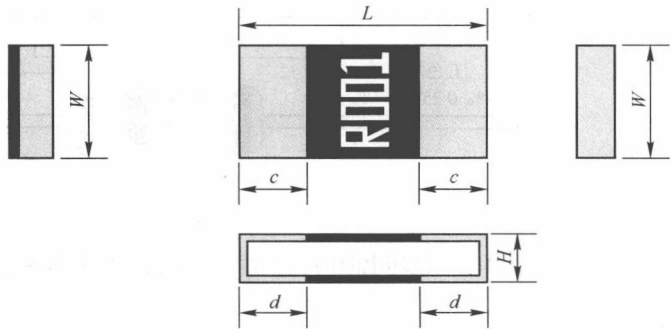


图 1-6 低阻值贴片电阻的数字表示

用数字表示无源元件参数时，电阻的单位是Ω，电容的单位是 pF，电感的单位是μH。