

普通高等教育“十三五”精品规划教材

(机电、控制类)

电子控制课程设计 指导书

王海涛 主编

史丽晨 主审

Electronic Control Course
Design Guidelines
(Mechatronics, Control)



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

电子控制课程设计指导书

(机电、控制类)

王海涛 主编

史丽晨 主审



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书为机电工程类专业电子控制课程设计的指导书,全书共5章,分别为常用电子元器件、电路基础、单片机基础、舞蹈机器人制作、智能小车制作。通过本书的学习与锻炼,能够使学生得到完整的设计过程训练,使学生对机械类电子、传感器和自动控制的软硬件设计过程有全面的了解,使学生逐步掌握机械电子工程设计的基本方法,培养学生的工程观念,将整个专业后续课程的内容有机而系统地结合起来。

本书可作为高等院校工科机械、电气、自动化相关专业电子控制课程设计的指导教材,也可作为参与电子控制相关竞赛的指导书,对电子控制有兴趣的广大读者也可选择阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电子控制课程设计指导书:机电、控制类/王海涛
主编. — 北京:中国水利水电出版社,2019.1
ISBN 978-7-5170-7004-7

I. ①电… II. ①王… III. ①电子控制—课程设计—
高等学校—教学参考资料 IV. ①TM1-41

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第227346号

书 名	电子控制课程设计指导书(机电、控制类) DIANZI KONGZHI KECHENG SHEJI ZHIDAOSHU (JIDIAN、KONGZHI LEI)
作 者	王海涛 主编 史丽晨 主审
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@ waterpub. com. cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京智博尚书文化传媒有限公司
印 刷	北京建宏印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 11印张 203千字
版 次	2019年1月第1版 2019年1月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	35.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前言

FOREWORD

机电工程类电子控制方向课程设计是整个机械类课程体系中较为重要的一个实践性环节,是在完成电类与控制类课程学习后学生对所学知识的综合应用的体现,在整个教学活动中占有重要的地位和作用,其目的是进一步巩固和加深学生所学到的理论知识,培养学生独立解决实际问题的能力,有助于学生建立整套自动化控制生产系统的概念,提高机、电、液、气一体化的实践水平并对其设计有一个较为完整的概念。通过本书的学习与锻炼,能够使学生得到完整的设计过程,使学生对机械类电子、传感器和自动控制的软硬件设计过程有全面的了解,使学生逐步掌握机械电子工程设计的基本方法,培养学生的工程观念,将整个专业后续课程内容有机而系统地结合起来。

本书通过对研究对象的机械构造、电气控制原理的分析,对其提出创新性设计或改进。在整个设计过程中使学生初步掌握机械系统、环境识别与感知系统和运动控制系统的设计思想与实现方法,训练如何查阅资料、图表、数据处理、自动控制以及创新能力的激发,使学生具备独立设计机电一体化产品的能力,提高综合应用已有知识解决问题的能力,更好地培养机械电子工程、机电一体化和电气工程等专业学生的专业技术能力与综合素质。本书主要培养学生以下三点创新能力。

1. 发挥主体,培养学生自主学习能力

机电工程类电子控制技术普遍具有操作性强、更新速度快、实际内容多等特点。在课程设计教学实践环节中,尤其要注意自主性学习、学生学习方法的指导,激发学生的好奇心和求知欲,帮助学生自主学习、独立思考。让学生边看书、边查阅相关资料、边自己动手实践,积极主动地去获取知识、获取信息,逐步掌握千变万化的机电技术,适应信息社会飞速发展的需要。

2. 开放交流,培养学生的团队协作能力

在整个课程设计过程中,尝试以学生为主体,教师起引导作用。根据学生自愿组成若干小组,每组完成一个项目,组内成员各自有不同的分工,由小组长负责牵头。由学生自发组织相关资源自行去学习、收集素材。遇到问题,由小组成员商讨解决,解决不了的与指导教师沟通交流。通过这样的形式,不但培养了学生自己获取信息、传输信息、处理信息和应用信息的能力,



而且也培养了与他人合作的能力。

3. 注重应用和实践,培养学生的创新能力

机电工程类电子控制技术其特有的实践性决定了课程设计过程不宜单靠设计图纸来完成,应该让学生边动脑边动手,将原先设计与思考的东西通过实物展示出来,通过不断的对比和修改,将原先思考与设计环节预料不合理、不充分、不完善的地方纠正过来。对自己的设计做不断的修改和完善,从而达到创新的目的。

总之,课程设计作为专业教学的一个重要组成部分,要努力让学生得到多方面能力的发展,为学生全面素质的发展打下良好的基础。由于受编者个人知识结构层次的制约,书中若出现不当之处,请读者谅解。

感谢国家级教学名师、西北工业大学电子信息学院段哲民教授的审稿意见;感谢陕西省教学名师、西北工业大学电子信息学院李辉教授的审稿意见;感谢西安建筑科技大学机电工程学院的同志学、郭瑞峰、严浩、苏晓峰、胡星、刘金颂、张学峰、刘海霞、张军锋、聂阳文、叶向东、刘昌军、耿素花、王亮亮、郭雅琳、薛婷等老师,陕西威尔张涛、范厚杰、王洁工程师和陶枝茂、康振亚等同学在本书编写与校对过程中给予的帮助,在此表示诚挚的感谢。

编者

2018年9月

目录

CONTENTS

前言

第1章 机电控制系统设计中的常用电子元器件	1
1.1 电子元器件的材质与分类	1
1.1.1 电子器件导电材质	1
1.1.2 电子器件工作性质	1
1.1.3 电流的分类	1
1.1.4 电路常用术语	2
1.2 电阻 (R)——无源器件	2
1.2.1 电阻的基本知识	2
1.2.2 电阻的标称值与读值方法	2
1.2.3 电阻的串、并联计算与检测方法	4
1.2.4 电阻的主要参数	5
1.2.5 电阻的分类	6
1.2.6 电阻的电路符号	7
1.2.7 电阻的功率符号	7
1.2.8 电阻的常见外形	7
1.3 电容 (C)——无源器件	8
1.3.1 电容的基本知识	8
1.3.2 电容的标称值与读值方法	9
1.3.3 电容的串、并联计算与检测方法	10
1.3.4 电容的主要参数	11
1.3.5 电容的分类与比较	12
1.3.6 电容的电路符号	13
1.3.7 电解电容的极性区分	14
1.3.8 电容的常见外形	14
1.3.9 电容的充放电、滤波、隔直通交原理	14
1.4 电感 (L)——无源器件	16
1.4.1 电感的基本知识	16



1.4.2	电感的标称值与读值方法	17
1.4.3	电感的串、并联计算与检测方法	17
1.4.4	电感的主要参数	19
1.4.5	电感的分类	19
1.4.6	电感的电路符号	19
1.4.7	电感的常见外形	20
1.4.8	电感的主要特性	20
1.5	晶体二极管 (D)——有源器件	21
1.5.1	二极管的基本知识	21
1.5.2	二极管的主要特性单向导电性	21
1.5.3	二极管的伏安曲线	22
1.5.4	二极管的检测方法	22
1.5.5	二极管的主要参数	22
1.5.6	二极管的分类	23
1.5.7	二极管的电路符号	24
1.5.8	二极管的常见外形	25
1.6	晶体三极管 (Q)——有源器件	25
1.6.1	三极管的基本知识	25
1.6.2	三极管的结构与电路符号	25
1.6.3	三极管的检测方法	25
1.6.4	三极管的主要参数	26
1.6.5	半导体三极管的频率特性参数	27
1.6.6	三极管的工作原理	28
1.6.7	三极管的特性曲线	28
1.6.8	三极管的分类	29
1.6.9	三极管的常见外形	29
1.7	场效应晶体管 (FET)——有源器件	30
1.7.1	场效应管的基本知识	30
1.7.2	场效应管的结构与电路符号	30
1.7.3	场效应管的检测方法	30
1.7.4	场效应管的主要参数	32
1.7.5	场效应管的工作原理	32
1.7.6	场效应管的特性曲线	32
1.7.7	场效应管的分类	35
1.7.8	场效应管的供电极性	35

1.7.9	场效应管的常见外形	36
1.7.10	场效应管与三极管的比较	36
1.8	晶闸管 (T)——有源器件	37
1.8.1	晶闸管的基本知识	37
1.8.2	晶闸管的结构与电路符号	37
1.8.3	晶闸管的检测方法	38
1.8.4	晶闸管的主要参数	39
1.8.5	晶闸管的伏安特性曲线	39
1.8.6	晶闸管的常见外形	41
第2章 机电控制系统设计中的初级电学概念		42
2.1	电流与电压的参考方向	42
2.1.1	电气量表示符号及其单位	42
2.1.2	电流及其参考方向	43
2.1.3	电压及其参考方向	44
2.2	基尔霍夫定律	44
2.2.1	名词介绍	44
2.2.2	基尔霍夫电流定律	44
2.2.3	基尔霍夫电压定律	45
2.3	电路中的源	45
2.3.1	电压源	45
2.3.2	电流源	46
2.4	电路分析方法	46
2.4.1	支路电流法	47
2.4.2	支路电压法	48
第3章 机电自动控制系统中的单片机基础		49
3.1	单片机编程基础	49
3.1.1	单片机开发软件环境搭建	49
3.1.2	Keil 基本概况介绍	52
3.2	设计实例——点亮你的 LED	54
3.2.1	单片机的内部资源	54
3.2.2	单片机最小系统	55
3.2.3	LED 小灯	57
3.2.4	程序代码编写	59
3.2.5	程序下载	66
3.3	单片机编程语言基础	68



3.3.1	二进制、十进制和十六进制	68
3.3.2	C语言变量类型和范围	69
3.3.3	C语言基本运算符	70
3.3.4	for 循环语句	71
3.3.5	while 循环语句	72
3.3.6	函数的简单介绍	73
3.4	设计实例——定时器与数码管	75
3.4.1	定时器的初步认识	75
3.4.2	定时器的寄存器	76
3.4.3	定时器的应用	79
3.5	设计实例——中断与数码管动态刷新	81
3.5.1	单片机中断系统	81
3.5.2	定时器中断的应用	81
3.5.3	中断的优先级	85
3.6	设计实例——步进电机与蜂鸣器	87
3.6.1	单片机 I/O 口的结构	87
3.6.2	上下拉电阻	89
3.6.3	电机的分类	90
3.6.4	28BYJ-48 型步进电机原理详解	91
3.6.5	让电机转起来	93
3.6.6	转动精度与深入分析	95
3.7	常用开发工具及使用	98
3.7.1	万用表	98
3.7.2	万用表的使用方法	99
3.7.3	示波器	101
3.7.4	示波器的使用	102
第4章	机电综合控制系统设计实例——舞蹈机器人	105
4.1	舞蹈机器人设计的内容和要求	106
4.1.1	舞蹈机器人设计的内容	106
4.1.2	舞蹈机器人设计的数据和要求	107
4.2	方案设计及方案论证	107
4.2.1	设计制作与调试流程	107
4.2.2	方案的比较论证及方案确定	108
4.3	交叉足印竞步机器人步行轨迹规划及仿真	109
4.3.1	建模	110

4.3.2	步态规划	110
4.3.3	仿真与分析	112
4.3.4	弯腰机构的设计	115
4.3.5	转身机构的设计	116
4.3.6	手臂和头部机构的设计	117
4.3.7	材料与型材选择	118
4.4	电气部分	120
4.4.1	方案1	120
4.4.2	方案2	121
4.4.3	电气方案的比较与选择	121
4.4.4	硬件电路设计	122
4.4.5	单片机控制系统	125
4.4.6	信号隔离模块	126
4.4.7	锁存器 74HC595 模块	128
4.5	电机和能源的选择	129
4.5.1	直流电机的特性	130
4.5.2	能源选取	130
4.6	系统的软件设计	131
4.6.1	舞蹈动作的编辑	132
4.6.2	主程序设计	132
4.6.3	子程序设计	133
4.6.4	语音系统程序设计	135
4.7	系统功能测试	139
第5章	机电综合控制系统设计实例——智能小车制作	140
5.1	智能小车简介	140
5.1.1	常见的两种类型	140
5.1.2	智能小车的基本结构	141
5.2	车体设计	142
5.3	硬件设计	143
5.3.1	电源模块设计	143
5.3.2	低压差稳压芯片 LM2940 简介	144
5.3.3	单片机最小系统设计	145
5.3.4	C51 单片机最小系统设计	145
5.3.5	红外收发器设计	147
5.3.6	检测电路设计	149



5.3.7	光电检测部分的发挥设计	152
5.3.8	舵机转向模块设计	152
5.3.9	后轮电机驱动模块设计	154
5.3.10	测速模块	157
5.4	程序设计	158
5.4.1	51 单片机产生 PWM 波	159
5.4.2	舵机的控制	162
5.4.3	程序总体的设计	163
5.4.4	程序设计的发挥与拓展	163
5.5	测试与调试	164

■ 第 1 章 ■

机电控制系统设计中的常用电子元器件

1.1 电子元器件的材质与分类

在进行机电一体化系统控制单元电子设计中会接触到很多种类的电子元件，而如何用好电子元件，使电子元件在电路中发挥其最大的功能作用，则成为评判一个电子控制系统是否合格的基本标准。为给读者提供较为全面的元器件知识，或学习，或参考，本章将对电路设计中常用的电子元件进行详细讲述。

■ 1.1.1 电子器件导电材质

电子器件导电材质可分为导体、半导体和绝缘体。

(1) 导体：电阻系数小，可以导电的物体。例如：银、铜、铝等。

(2) 半导体：介于导体和绝缘体之间，需要达到一定条件才能导电的物体。例如：硅、锗、硒、氧化铜等。

(3) 绝缘体：电阻系数很大，导电性能很差的物体。例如：陶瓷、云母、玻璃、橡胶、塑料、电木、纸、棉纱、树脂、干木材等。

■ 1.1.2 电子器件工作性质

电子器件工作性质可分为有源元件和无源元件。

(1) 有源元件：二极管、三极管、稳压管（受电压控制），既必须有电才能工作的电子元件。

(2) 无源元件：电阻、电容、电感（不受电压控制），既不需要额外供电自身就能够工作的电子元件。

■ 1.1.3 电流的分类

(1) 交流电：大小和方向随时间发生变化的电流，简称交流电（AC），

频率是 50 Hz；符号“~”。

(2) 直流电：大小和方向不随时间发生变化的电流，简称直流电（DC）频率是 0 Hz；符号“—”。

■ 1.1.4 电路常用术语

(1) 击穿：当外施电压超过某一数值时，材料发生剧烈放电或导电的现象，这种现象称为击穿。

(2) 短路：在电路中未经过中间环节（负载或电器），前后直接相连。

(3) 开路：电路某一环节没有接通。断路：不知道的某个地方没有接通。

(4) 通路：在电路中电源正极通过中间环节（负载或电器）后回到负极形成回路。

[短路、开路（断路）、通路称为电路的三种工作状态。]

1.2 电阻 (R)——无源器件

电阻器是电路元件中应用最广泛的一种，在电子设备中约占元件总数的 30% 以上，其质量的好坏对电路工作的稳定性有极大的影响。它的主要用途是稳定和调节电路中的电流与电压，其次还作为分流器分压器和负载使用。

■ 1.2.1 电阻的基本知识

(1) 电阻的定义：电阻就是一种能够阻碍电流通过的器件（阻值越大流过的电流越小）。

(2) 电阻的表示字母为 R ；电位器的表示字母为 W 。

(3) 电阻的种类：固定电阻、可变电阻（电位器）、特种电阻（光敏、气敏、热敏）。

(4) 电阻基本作用：分流、限流、分压、偏置、滤波（与电容器组合使用）和阻抗匹配等。

(5) 电阻的单位：电阻的单位是欧姆（ohm），简称欧，符号是 Ω ，比较大的单位有千欧（ $k\Omega$ ）、兆欧（ $M\Omega$ ）。

(6) 电阻的单位换算公式： $1 M\Omega = 1\,000 k\Omega$ 、 $1 k\Omega = 1\,000 \Omega$ ，以千进位。

■ 1.2.2 电阻的标称值与读值方法

电阻的标称值与读值方法有直标法、文字符号法、数字法和色环法，如图 1-1 所示。

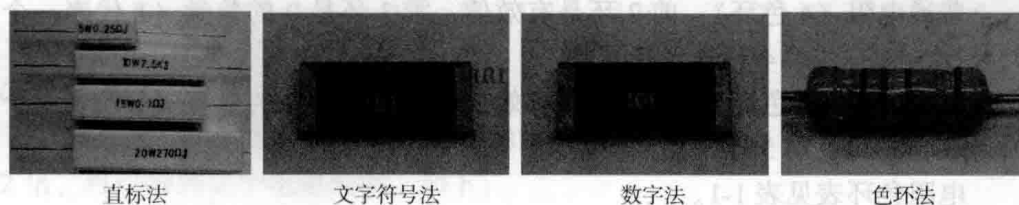


图 1-1 电阻的标称值与读值方法

(1) 直标法：直接将电阻的标称值和误差印在电阻表面。

(2) 文字符号法：用阿拉伯数字和文字符号两者有规律的组合来表示标称阻值，其允许偏差也用文字符号表示。

当数值中含有字母时，此字母相当于小数点。单位表示方法为： $R = \Omega$ ， $K = k\Omega$ ， $M = M\Omega$ 。

例如： $4R7J = 4.7 \Omega \pm 5\%$ ， $4M7K = 4.7 M\Omega \pm 10\%$ 。

(3) 数字法：在电阻器上用数码表示标称值的标志方法。

普通电阻（3 位数）：前 2 位是有效值，第 3 位是 0 的个数，如 102。

精密电阻（4 位数）：前 3 位是有效值，第 4 位是 0 的个数，如 1 001。



举例： $102 = 10 \times 10^2 = 1\ 000 \Omega$ 或 $1K \pm 5\%$ （误差）； $1\ 001 = 100 \times 10^1 = 1\ 000 \Omega$ 或 $1K \pm 1\%$ （误差）。

设计经验：直接在有效值后面写出 0 的个数，然后从个位向前换算，起始单位是 Ω ，够 3 个 0 就是 $k\Omega$ ，够 6 个 0 就是 $M\Omega$ 。例如：1 000 够 3 个 0 可以写成 $1 k\Omega$ ；1 000 000 够 6 个 0 可以写成 $1 M\Omega$ 。

(4) 色环法：用不同颜色的带或点在电阻器表面标出标称阻值和允许偏差，如图 1-2 所示。

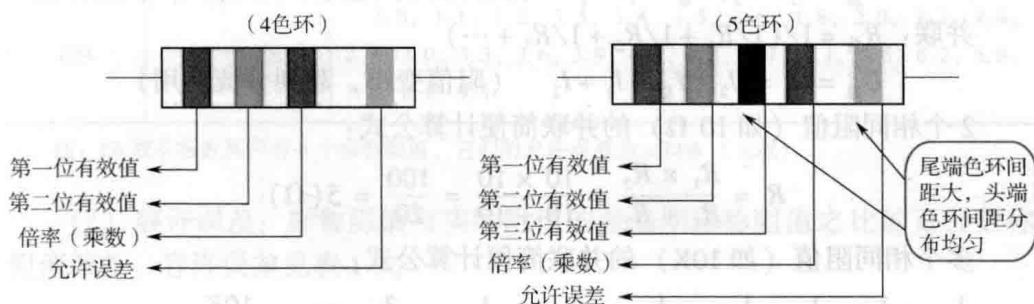


图 1-2 色环法

普通电阻 (4 色环): 前 2 环是有效值, 第 3 环是 0 的数量 (1 代表一个 0, 依次类推), 第 4 环是允许误差。

精密电阻 (5 色环): 前 3 环是有效值, 第 4 环是 0 的数量 (1 代表一个 0, 依次类推), 第 5 环是允许误差。

电阻色环表见表 1-1。

表 1-1 电阻色环表

颜色	第一段	第二段	第三段	乘数	误差	
黑色	0	0	0	1		
棕色	1	1	1	10	$\pm 1\%$	F
红色	2	2	2	100	$\pm 2\%$	G
橙色	3	3	3	1K		
黄色	4	4	4	10K		
绿色	5	5	5	100K	$\pm 0.5\%$	D
蓝色	6	6	6	1M	$\pm 0.25\%$	C
紫色	7	7	7	10M	$\pm 0.10\%$	B
灰色	8	8	8		$\pm 0.05\%$	A
白色	9	9	9			
金色				0.1	$\pm 5\%$	J
银色				0.01	$\pm 10\%$	K
无					$\pm 20\%$	M

1.2.3 电阻的串、并联计算与检测方法

(1) 电阻的串、并联应用计算公式:

串联: $R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

$U_{\text{总}} = U_1 + U_2, I_{\text{总}} = I_1 = I_2$ (阻值增大, 起到降压、分压、限流作用)

并联: $R_{\text{总}} = 1 / (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots)$

$U_{\text{总}} = U_1 = U_2, I_{\text{总}} = I_1 + I_2$ (阻值变小, 起到分流作用)

2 个相同阻值 (如 10 Ω) 的并联简便计算公式:

$$R = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 \times 10}{10 + 10} = \frac{100}{20} = 5(\Omega)$$

多个相同阻值 (如 10K) 的并联简便计算公式:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10K} + \frac{1}{10K} + \frac{1}{10K} = \frac{3}{10K}, \text{ 则 } R = \frac{10K}{3} \approx 3.33 (\text{k}\Omega).$$

例如, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega, R_2 = 2 \text{ k}\Omega, R_3 = 3 \text{ k}\Omega$, 并联计算 R 。

$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{1 \times 6}{1 \times 6} + \frac{1 \times 3}{2 \times 3} + \frac{1 \times 2}{3 \times 2} = \frac{11}{6}$, 则 $R = \frac{6}{11} \approx 0.545 \text{ (k}\Omega\text{)}$ 。

怎么选择2个电阻并联得到需要的阻值： R （需要值）= R （选择值） $\times$ 2倍，可以得到2个电阻的值，如下：

$5 \text{ k}\Omega = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$ ，如何计算 R_1 和 R_2 ？用上面的公式 $5 \text{ k}\Omega \times 2 \text{ 倍} = 10 \text{ (k}\Omega\text{)}$ ，再代入公式 $\frac{10 \times 10}{10 + 10} = \frac{100}{20} = 5 \text{ (k}\Omega\text{)}$

(2) 电阻的检测方法用 VC9802A 数字万用表。将数字万用表红表笔插入 $V\Omega$ 孔，黑表笔插入 COM 孔，转动到合适电阻挡位，表笔各接电阻两端，读取数值，如无显示阻值可能是挡位过小，换大一挡，如还无阻值说明电阻已经损坏，如显示阻值小或 0 说明电阻已经损坏（经验分享：可以将挡位选在 200K 位置，可以快速地辨别挡位的大小）。

万用表测量电阻的过程可以分解为三个步骤：选量程→测试→读数。

■ 1.2.4 电阻的主要参数

(1) 标称阻值：标注在电阻器上的阻值。

“E”表示“指数间距”（exponential spacing）。电阻的标称阻值分为 E6、E12、E24、E48、E96、E192 六大系列，分别适用于允许偏差为 $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 1\%$ 和 $\pm 0.5\%$ 的电阻器。其中 E24 系列为常用数系，E48、E96、E192 系列为高精密电阻数系。标称阻值见表 1-2。

表 1-2 标称阻值

系列	允许误差/%	电 阻 值
E6	± 20 （三级）	1.0, 1.5, 2.2, 3.3, 4.7, 6.8
E12	± 10 （二级）	1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2
E24	± 5 （一级）	1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.7, 3.0, 3.3, 3.6, 3.9, 4.0, 4.3, 4.7, 5.1, 5.6, 6.2, 6.8, 7.5, 8.2, 9.1

注：E6 表示指数间距有 6 个标称阻值，它们的允许误差为 $\pm 20\%$ （三级）。

(2) 容许误差：标称阻值与实际阻值的差值跟标称阻值之比的百分数称阻值偏差。容许误差见表 1-3。



表 1-3 容许误差

等级符号	E	X	Y	H	U	W	B
允许误差/%	±0.001	±0.002	±0.005	±0.01	±0.02	±0.05	±0.1
等级符号	C	D	F	G	J (I)	K (II)	M (III)
允许误差/%	±0.25	±0.5	±1	±2	±5	±10	±20

(3) 电阻的额定功率：电阻器在正常的大气压力为 90 ~ 106.6 kPa 及环境温度为 -55 ~ +70 ℃ 的条件下长期连续工作所容许消耗的最大功率。超过额定功率，会因过热而烧毁损坏。电阻的额定功率见表 1-4。

表 1-4 电阻的额定功率

种 类	额定功率系列
线绕电阻	0.05, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 10, 16, 25, 40, 50, 75, 100, 150, 250, 500
非线性绕电阻	0.05, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100
线绕电位器	0.25, 0.5, 1, 1.6, 2, 3, 5, 10, 16, 25, 40, 63, 100
非线性绕电位器	0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 3

(4) 最高工作电压：能够使电阻长期工作而不过热或电击穿损坏时的最高工作电压，见表 1-5。如果电压超过规定值，电阻器内部产生火花，引起噪声，甚至损坏。

表 1-5 最高工作电压

标称功率/W	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2
最高工作电压/V	100	150	350	500	750	1 000

(5) 温度系数：温度每变化 1 ℃ 所引起的电阻值的相对变化。温度系数越小，电阻的稳定性越好。阻值随温度升高而增大的为正温度系数（PTC），反之为负温度系数（NTC）。

(6) 高频特性：电阻器使用在高频条件下，要考虑其固有电感和固有电容的影响。这时，电阻器变为一个直流电阻（ R_0 ）与分布电感串联，然后再与分布电容并联的等效电路，非线性绕电阻器的 $L_R = 0.01 \sim 0.05 \mu\text{H}$ ， $C_R = 0.1 \sim 5 \text{ pF}$ ，线绕电阻器的 L_R 达几十微亨， C_R 达几十皮法，即使是无感绕法的线绕电阻器， L_R 仍有零点几微亨。

■ 1.2.5 电阻的分类

(1) 线绕电阻器：通用线绕电阻器、精密线绕电阻器、大功率线绕电阻