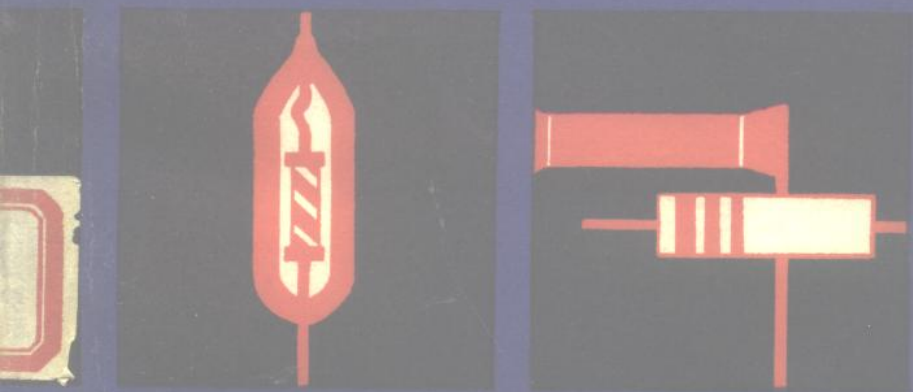


电阻器

DIANZUQI



技术标准出版社

73.273
131

电 阻 器

天津大学无线电材料与元件教研室 编

31054 / 3



内 容 简 介

本书系统介绍了电阻器的基本性能及各种参数的意义，并介绍各种固定电阻器、电位器以及敏感电阻器的结构、工艺原理和性能特点。对电阻器主要参数的测试方法也作了简要介绍。

本书可供电子工业有关研究、生产和使用电阻器的单位广大技术人员参考使用，也可作为大专院校有关专业的教材或教学参考书。

前 言

本书以天津大学无线电材料与元件专业所用的电阻器教材作为基本内容，同时参考西安交通大学等有关院校的同类教材，以及国内外的一些新发展编写而成。

主要内容包括：电阻器概述；电阻器的基本性能和主要参数的意义；电阻器主要参数的几种专用的测试方法；各种类型固定电阻器的导电机理、工艺原理、结构和性能特点，其中包括一些新结构、新材料和新工艺；电阻网络以及一些新品种和特殊品种电阻器；电位器的基本特性与主要参数，各种类型电位器的基本原理、结构、工艺和性能特点；各种类型敏感电阻器的基本原理、性能特点、主要参数、结构、工艺和应用。

本书由西安交通大学审校，吕乃康同志负责主审。在编写过程中得到有关工厂的热情帮助，在出版过程中得到中国电子学会元件专业学会陈克恭、卜寿彭等同志的支持和帮助，谨此向他们表示衷心的感谢。

本书由天津大学陈其翔同志主编，并编写第一、二、五、七、八章的内容；第三、四章由康翠荣同志编写；第六、九章由李哲同志编写。插图由张志萍同志描绘。

由于我们水平有限，书中所涉及的内容又比较广，因此难免有不少缺点和错误，希广大读者批评指正。

编 者

1980年1月

35942

目 录

前 言

第一章 电阻器概述	(1)
1.1 电阻器的发展	(1)
1.2 电阻器的基本要求	(2)
1.3 电阻器的分类与型号	(3)
1.4 额定功率与标称阻值系列	(6)
第二章 电阻器的一般性能	(9)
2.1 电阻器的阻值	(9)
2.2 电阻器的等效电路与高频性能	(29)
2.3 电阻器阻值与温度的关系	(29)
2.4 电阻器的非线性	(33)
2.5 电阻器的噪声	(41)
2.6 电阻器的功率负荷	(50)
2.7 电阻器的电压限制与电流限制	(61)
2.8 电阻器的脉冲负荷	(66)
2.9 电阻器的老化与机械性能	(75)
2.10 电阻器的可靠性与寿命	(81)
第三章 蒸发与溅射金属膜	(87)
3.1 真空蒸发原理与装置	(87)
3.2 阴极溅射原理与装置	(107)
3.3 金属膜的导电机理	(113)
3.4 蒸发和溅射电阻薄膜的种类及性能	(139)
第四章 薄膜电阻器	(147)
4.1 薄膜电阻器的种类和特点	(147)
4.2 薄膜电阻器的基体	(148)

4.3	真空蒸发金属膜电阻器	(151)
4.4	化学沉积金属膜电阻器	(159)
4.5	金属氧化膜电阻器	(163)
4.6	热分解碳膜电阻器	(171)
第五章	合金型电阻器	(188)
5.1	合金型电阻器的种类及特点	(188)
5.2	电阻合金材料	(189)
5.3	电阻合金线材与箔材	(197)
5.4	线绕电阻器	(199)
5.5	高精密块金属膜电阻器	(205)
5.6	高精密块金属膜电阻器的理论(应力效应)	(211)
第六章	合成型电阻器	(224)
6.1	合成型电阻器的种类和特点	(224)
6.2	合成物的微观结构及电性能	(228)
6.3	碳合成电阻器的导电合成物	(241)
6.4	导电合成物的制备工艺	(250)
6.5	金属玻璃釉电阻器	(259)
第七章	电阻网络及其他	(263)
7.1	集总参数电阻网络	(263)
7.2	分布参数电阻网络	(265)
7.3	一些新品种的电阻器	(267)
第八章	电位器	(273)
8.1	电位器的分类	(273)
8.2	电位器的基本特性与主要参数	(276)
8.3	电位器的主要构件及其材料	(291)
8.4	合金型电位器	(293)
8.5	合成型电位器	(301)
8.6	薄膜型电位器	(306)
8.7	非接触式电位器	(310)

第九章 敏感电阻器	(319)
9.1 热敏电阻器	(320)
9.2 光敏电阻器	(355)
9.3 压敏电阻器	(374)
9.4 湿敏电阻器	(388)
9.5 气敏电阻器	(400)
9.6 磁敏电阻器	(411)
9.7 力敏电阻器	(421)

第一章 电阻器概述

1.1 电阻器的发展

电阻器作为一种通用电子元件，迄今已有九十多年的历史了。随着电子技术的迅速发展，电阻器的生产作为电子工业的一个基本组成部分仍在不断前进。由于采用新技术和自动化生产线，目前电阻器无论从生产规模和质量方面都达到了新水平。全世界各种电阻器每年大约生产 250~300 亿只，在技术上不仅能做出精度高达 0.001% 稳定可靠的电阻器，而且还能生产体积很小的适应集成电路需要的电阻网络。

电阻器的生产也经历了一段从小到大，从低级到高级的发展过程。远在 19 世纪电阻器就已用于电力和弱电技术，当时的电阻器非常原始，真正广泛地应用到电子技术方面，还是从 20 世纪 20 年代开始的。

各国在电阻器生产和研制方面具有不同的特点，迄今为止，合成碳质电阻器仍然是欧美各国的主要品种。实芯电阻器是历史最悠久的一个品种，19 世纪首创于美国，1925 年开始大量生产。这种电阻器可靠性高，工艺简单，价格低廉，适合于大量生产，但电性能较差。

热分解碳膜电阻器 1925 年由德国发明，1930 年投入生产，随后相继传入英、日、苏等国。碳膜电阻器电性能良好，生产工艺简单，目前已成为电阻器最主要的品种之一。

蒸发金属膜电阻器大约从 50 年代开始生产，是一种高稳定、高质量的非线绕电阻器品种。二十多年来质量不断提高，产量不断增加，是极有前途的电阻器品种。近来发展了滚筒蒸发法，对于小型电阻器的产量可大大提高，将来有可能逐步取代碳膜电阻器的地位，成为最主要的电阻器产品。

金属氧化膜电阻器，美国 1952 年开始生产。它是一种耐热性良好的电阻器，性能可与金属膜电阻器相媲美，目前许多国家均有生产。

线绕电阻器是一种历史悠久的品种，目前在大功率和高精密方面还保持着重要地位。线绕电阻器由于高频性能差，限制了它在电子技术中的广泛使用。

近来用金属箔制成的块金属膜电阻器，在高精密方面已超过了线绕电阻器，而且具有良好的高频性能，因此可逐步取代线绕电阻器在高精密方面的地位。

电位器是一种机电元件，它可把机械位移转换成电压变化，一般由电阻体和可移动的电刷所组成。目前除线绕电位器外，还有合成碳膜、实芯、金属膜、金属玻璃釉和导电塑料电位器等品种。为了避免机械摩擦，还发展了非接触式的光电电位器等。从输出函数特性方面有直线式和各种函数特性的电位器。从形状和结构方面，更是千变万化，品种很多，不可一一列举。

敏感电阻器是指电阻值随温度、光通、电压、机械力、磁通、湿度、气体等外界因素表现敏感的电阻器。它们一方面可作为把非电量变为电信号的传感器用，另一方面可完成电路的某种功能，如稳压、温度补偿过压保护开关和记忆等。这类电阻器虽然发展也较早，但近来由于科学技术的发展，品种越来越多，应用越来越广，在尖端科学、军事技术和国民经济各个方面有很重要的地位。

六十年代集成电路的发展使电子元件小型化跨入了新的时代，电子工业的结构发生了深刻的变革。但从目前看来，集成电路不可能完全取代分立元件。因为分立元件有很大的灵活性，元件参数范围宽，精密度高，质量好。而且目前还有不少元件不能集成化，仍需用分立元件来弥补。所以电阻器的许多品种在今后相当长的一段时间里仍需继续发展。主要方向是：高可靠、高稳定、高精密、低噪声、高阻值、大功率、高压、高频、微小型化、电阻网络、电位器以及各种敏感电阻器等。

1.2 电阻器的基本要求

电阻器的各项性能指标应根据产品特点和使用范围在产品的技术条件中具体规定，但总的说来应该满足以下几方面的基本要求：

(1) 可靠性 近代无线电电子设备日趋复杂，一台复杂的电子设备，如电子计算机等，都是由成千上万个电子元件组成的。其中任何一个元件的损坏，都将影响设备的正常工作。因此，为了保证电子设备可靠工作，每个元件都必须具有很高的可靠性。

(2) 稳定性 电阻器在储存和工作过程中，由于环境条件和电负荷的作用或本身的老化，都有可能使电阻器的性能参数发生变化，影响设备的正常工作。所以，电阻器的性能参数必须具有一定的稳定性，才能保证设备的正常和有效地工作。

(3) 耐恶劣环境的能力 近代电子设备的应用范围越来越广，使用条件也日益复杂，不但会在任何地区，如热带、沙漠、高山和海洋等地区使用，而且还会在特殊的条件下，如大加速度的情况下使用。因此，电阻器必须具有能够适应各种恶劣环境的能力，如耐高温和低温，耐潮湿，耐低气压，耐尘土、盐雾和霉菌的腐蚀作用，耐辐射以及耐振动、冲击和加速度的破坏作用。

(4) 性能参数 电阻器的性能参数包括：额定功率、标称阻值和允许偏差、电阻温度系数、高频特性和脉冲响应时间、非线性、电流噪声以及耐压等方面。这些参数直接影响使用电阻器的电路功能，或间接反映出电阻器质量的好坏。

(5) 小型化 目前电子设备的小型化已发展到使用高度集成化的大规模集成电路，对于未集成化的分立元件也应尽量小型化，以满足科学研究、国防装备以及民用产品的需要。

1.3 电阻器的分类与型号

随着电子技术的不断发展，电阻器也不断发展和改进，品种日益增多。一般电阻器可根据电阻体的材料或电阻器的用途进行分类。

1.3.1 根据电阻体的材料分类

电阻器根据电阻体所用的材料可分为：合金型、薄膜型和合成型三大类。

合金型电阻器是指用块状的电阻合金拉制成电阻合金线或碾压成电阻合金箔所制成的电阻器，包括用合金线制成的线绕电阻

器和用合金箔制成的块金属膜电阻器，它们均具有块状金属的优良性能。

薄膜型电阻器是在玻璃或陶瓷基体上，用不同的工艺方法淀积一层电阻薄膜制成的，其厚度从几十埃到几个微米。包括热分解碳膜、金属膜、金属氧化膜等品种。

合成型电阻器的电阻体是导电颗粒和有机（或无机）粘结剂的机械混合物，可以制成薄膜和实芯两种形式，如合成碳膜、合成实芯和金属玻璃釉电阻器等。

薄膜型和合成型这两大类电阻器的电阻体均不是用整块材料加工制成的，它们的导电材料内部具有分散结构，电性能与块状结构的材料有所不同。在习惯上把这两类电阻器统称为非线性电阻器。

1.3.2 根据电阻器的用途分类

电阻器根据其用途可分为以下几种类型：

(1) 通用电阻器 可以满足一般电子技术的要求。其额定功率范围从 0.05~2 瓦，少数为 5~10 瓦。标称阻值范围从 1 欧~22 兆欧，允许偏差为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 三个等级。

(2) 精密电阻器 具有较高的精度和稳定性，额定功率一般不超过 2 瓦，标称阻值从 0.01 欧~20 兆欧，允许偏差范围为 $\pm 2\sim\pm 0.001\%$ 。

(3) 高频电阻器 主要是薄膜型电阻器，适用于高频电路，用作匹配阻抗、衰减器、等效负载等。阻值一般较小，不超过 1 千欧，功率范围较宽，可达 100 瓦，采用循环水冷和蒸发冷却可高达 50 千瓦或更高。

(4) 高压电阻器 在高压装置、测量设备以及电视机中作为分压器和泄放电阻器等。结构特点细长，额定功率范围为 0.5~15 瓦，工作电压可高达 35 千伏或更高，标称阻值很高，可达 1000 兆欧。

(5) 高阻电阻器 阻值在 10 兆欧以上，最高可达 10^{12} 欧，甚至达 10^{14} 欧，用于测量仪器。散耗功率一般很小。

电阻器的分类如图 1-1 所示。

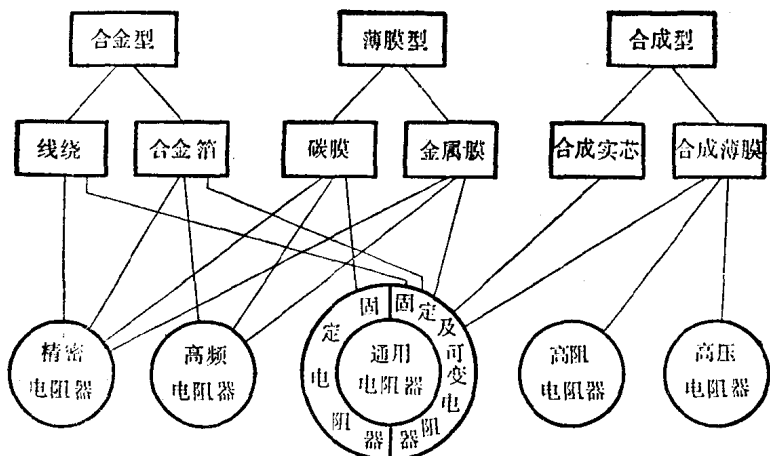


图 1-1 电阻器的分类示意图

此外，电阻器还可按结构形状的不同分为：圆柱形、管形、平面形、圆盘形、马蹄形等。按引出线形式不同分为：轴向引线、径向引线、同向引线、无帽结构等。按保护方式不同分为：无保护、涂漆、塑压、密封和真空密封等。

根据部标准 SJ 153—73 《电阻器、电容器型号命名方法》，电阻器型号由四个部分组成：

第一部分 主称（用字母表示）

电阻器——R；电位器——W。

第二部分 材料（用字母表示）

碳膜——T；氧化膜——Y；合成膜——H；沉积膜——C；
有机实芯——S；玻璃釉膜——I；无机实芯——N；
线绕——X；金属膜——J。

第三部分 分类（用数字或字母表示）

普通——1 或 2；精密——7；超高频——3；高压——8；
高阻——4；特殊——9；高温——5；高功率——G；
微调——W；可调——T；多圈——D。

第四部分 序号（用数字表示）

举例：精密金属膜电阻器的型号是 RJ 71。

1.4 额定功率与标称阻值系列

工业上大量生产的电阻器，为了达到既满足使用者对规格的各种要求，又能使规格品种简化到最低的程度，除了少数特殊的电阻器之外，一般都是按标准化的额定功率系列和标称阻值系列生产的。

根据部标准 SJ 617—73，线绕电阻器的额定功率系列为：0.05, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 10, 16, 25, 40, 50, 75, 100, 150, 250, 500 瓦。非线绕电阻器的额定功率系列为：0.05, 0.125, 0.5, 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 瓦。

根据部标准 SJ 618—73，电阻器的标称阻值应符合表 1—1 所列数值，或表列数值再乘以 10^n ，其中 n 为正整数或负整数。

表 1—1 电阻器的标称阻值系列

E24 允许偏差 $\pm 5\%$	E12 允许偏差 $\pm 10\%$	E6 允许偏差 $\pm 20\%$	E24 允许偏差 $\pm 5\%$	E12 允许偏差 $\pm 10\%$	E6 允许偏差 $\pm 20\%$
1.0	1.0	1.0	3.3	3.3	3.3
1.1			3.6		
1.2	1.2		3.9	3.9	
1.3			4.3		
1.5	1.5	1.5	4.7	4.7	4.7
1.6			5.1		
1.8	1.8		5.6	5.6	
2.0			6.2		
2.2	2.2	2.2	6.8	6.8	6.8
2.4			7.5		
2.7	2.7		8.2	8.2	
3.0			9.1		

根据部标准 SJ 619—73，精密电阻器的标称阻值系列如表 1—2 所示，其允许偏差应符合下列系列： $\pm 2\%$ ， $\pm 1\%$ ， $\pm 0.5\%$ ， $\pm 0.2\%$ ，

±0.1%, ±0.05%, ±0.02%, ±0.01%, ±0.005%, ±0.002%, ±0.001%。

表 1—2 精密电阻器的标称阻值系列

E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48
100	100	100	143	143		205	205	205	294	294	
101			145			208			298		
102	102		147	147	147	210	210		310	310	310
104			149			213			305		
105	105	105	150	150		215	215	215	309	309	
106			152			218			312		
107	107		154	154	154	221	221		316	316	316
109			156			223			320		
110	110	110	158	158		226	226	226	324	324	
111			160			229			328		
113	113		162	162	162	232	232		332	332	332
114			164			234			336		
115	115	115	165	165		237	237	237	340	340	
117			167			240			344		
118	118		169	169	169	243	243		348	348	348
120			172			246			352		
121	121	121	174	174		249	249	249	357	357	
123			176			252			361		
124	124		178	178	178	255	255		365	365	365
126			180			258			370		
127	127	127	182	182		261	261	261	374	374	
129			184			264			379		
130	130		187	187	187	267	267		383	383	383
132			189			271			388		
133	133	133	191	191		274	274	274	392	392	
135			193			277			397		
137	137		196	196	196	280	280		402	402	402
138			198			284			407		
140	140	140	200	200		287	287	287	412	412	
142			203			291			417		

续表 1—2

E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48
422	422	422	536	536	536	681	681	681	866	866	866
427			542			690			876		
432	432		549	549		695	695		887	887	
437			556			706			898		
442	442	442	562	562	562	715	715	715	909	909	909
448			569			723			920		
453	453		576	576		732	732		931	931	
459			583			741			942		
464	464	464	590	590	590	750	750	750	953	953	953
470			597			759			96 ₅		
475	475		604	604	604	768	768	768	976	976	
481			612			777			988		
487	487	487	619	619		787	787				
493			626			796					
499	499		634	634	634	806	806	806			
505			642			816					
511	511	511	649	649		825	825				
517			657			835					
523	523		665	665	665	845	845	845			
530			673			856					

第二章 电阻器的一般性能

2.1 电阻器的阻值

所谓电阻是指导电材料在一定程度上阻碍电流流通，并将电流的能量转换成热能的一种物理性能。对于一定的导体，加在导体两端的电压 U 与通过导体的电流 I 之比，称为导体的电阻值，用 R 表示。在电工和电子技术中应用的具有电阻性能的实体元件称为电阻器。

2.1.1 阻值单位及标准

电阻值的单位用欧姆表示。在 1946 年以前，电阻计量标准采用国际欧姆，它是在 0°C 下，高 106.300 厘米，质量为 14.4521 克的均匀的水银柱的电阻值。1946 年，根据国际计量委员会决议，欧姆定义为一导体两点之间的电阻，当在这两点间加上 1 伏特的恒定电压时，在导体内产生 1 安培的电流，导体内不存在任何电动势。安培和伏特这两个单位在同次会议上也作了相应的定义。这样定义的电阻计量标准称为绝对欧姆，它与国际欧姆之间的关系为：1 绝对欧姆 = 0.99951 国际欧姆。

对于数量较高的电阻值，可以在欧姆前加以一定的词冠，如下所列（欧姆简称欧）：

$$10^3 \text{ 欧} = 1 \text{ 千欧} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$10^6 \text{ 欧} = 1 \text{ 兆欧} = 1 \text{ M}\Omega$$

$$10^9 \text{ 欧} = 1 \text{ 吉欧} = 1 \text{ G}\Omega$$

$$10^{12} \text{ 欧} = 1 \text{ 太欧} = 1 \text{ T}\Omega$$

2.1.2 电阻率与膜电阻

导体的电阻值决定于导体的材料性质和几何尺寸。对于截面积恒定的导体，其电阻值与长度 l 成正比，与截面积 S 成反比：

$$R = \rho l / S \quad (\text{欧}) \quad (2-1)$$

式中： l ——导体的长度，单位为厘米；

S ——导体的截面积，单位为厘米²；

ρ ——与材料特性有关的常数，称为电阻率，单位为欧·厘米。

电阻率在数值上等于长1厘米，截面积为1厘米²的导体所具有的电阻值，单位为欧·厘米。电阻率的倒数称为电导率，用 σ 表示。单位为欧⁻¹·厘米⁻¹。电阻率是表征材料导电性能的重要参数，电阻器所用材料，一般应选择电阻率较高，性能稳定的材料。纯金属材料是良导体，电阻率很低，通常在 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ 欧·厘米左右，而且温度系数较大，因此纯金属不宜用来制造电阻器。用两种或几种金属制成的电阻合金具有较高的电阻率，约在 10^{-4} 欧·厘米左右，而且温度系数也较低，可用来制造性能优良的电阻器。非线绕电阻器采用分散性导体（如炭黑、石墨）和薄膜材料（如热分解碳膜、金属膜），它们的电阻率约在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 欧·厘米范围。半导体材料的电阻率较高，但由于半导体受外界光、热以及其它物理因素的作用较为敏感，因此一般不宜用来制造性能稳定的电阻器，而适合于制造敏感电阻器。

对于薄膜材料，由于厚度非常小，厚度的精确测量有一定困难，而且这时导体的电阻率已不再是一个常数。因为这时薄膜不再是密实和完整的导体，薄膜具有一定的不连续性和凹凸不平。在这种情况下，导体的电阻率与厚度有密切的关系，通常是膜层越薄，电阻率也越大。因此，对于薄膜材料一般不采用电阻率，而采用膜电阻来表征薄膜的特性。膜电阻 R_s 与电阻率 ρ 之间的关系可表示为：

$$R_s = \rho/d \quad (2-2)$$

式中： d ——薄膜的厚度。

当 d 很小时， ρ 已不是常数，而 d 不易测量，这时把 ρ/d 看作为一个与薄膜有关的常数是方便的。

对于一个宽度一致的均匀薄膜，可用下式计算其电阻值：

$$R_s = R_s l/w \quad (2-3)$$

式中： l ——薄膜的长度，单位为厘米；

w ——薄膜的宽度，单位为厘米；

R_s ——与薄膜有关的常数，称为膜电阻或方阻，单位为欧或表示为欧/方。