

电 子 元 件
国外资料之一

国外电阻器发展概况

(内 部 资 料)

电子元件国外资料编辑组

一九七三年十二月

电子元件国外资料之一

国外电阻器发展概况

编辑者：电子元件国外资料编辑组

发行者：北京市750信箱

1974年1月出版

9.828

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

要采用先进技术，必须发挥我国人民的聪明才智，大搞科学试验。外国一切好的经验、好的技术，都要吸收过来，为我所用。学习外国必须同独创精神相结合。

出 版 说 明

遵照伟大领袖毛主席关于“外国一切好的经验、好的技术，都要吸收过来，为我所用”和“批判地吸收外国文化”的教导，在有关部门的大力支持下，收集并编写了这套介绍国外电子元件技术水平和动向的资料，供有关方面分析参考。

这套资料按专业共分电阻器、电容器、厚膜薄膜集成电路、电子陶瓷材料与器件、压电材料与器件、磁性材料与器件、继电器、斩波器、接插件、开关、电声器件、石英谐振器及其器件、电表、微电机、化学电源与物理电源、电线电缆等十六个分册。

对其中错误与不当之处，请批评指正。

编 者

一九七三年十二月

目 录

一、概述	(1)
1.1.发展过程简述	(1)
1.2.生产研制现状	(2)
1.3.分立电阻元件与集成电路的关系	(4)
1.4.电阻器的发展趋势	(7)
1.5.电阻器的可靠性	(9)
1.6.电阻器的生产自动化	(12)
二、固定电阻器	(13)
2.1.线绕电阻器	(14)
2.2.碳质电阻器	(17)
2.2.1.热分解碳膜电阻器	(18)
2.2.2.合成碳质实心电阻器	(18)
2.3.金属膜电阻器和金属氧化膜电阻器	(19)
2.3.1.金属膜电阻材料	(19)
2.3.2.金属膜电阻的工艺	(25)
2.3.3.金属膜电阻的结构	(29)
2.3.4.金属膜电阻的水平	(29)
2.4.金属玻璃釉电阻器	(30)
2.4.1.金属玻璃釉电阻材料和工艺	(30)
2.4.2.金属玻璃釉电阻的水平	(41)
2.5.高频和大功率电阻器	(44)
2.5.1.高频小功率电阻器	(44)
2.5.2.高频大功率电阻器	(44)
2.6.高阻和高压电阻器	(50)
2.7.高精密块金属膜电阻器	(54)
2.7.1.块金属膜电阻的性能	(54)
2.7.2.块金属膜电阻的结构与工艺	(55)
2.8.小片式电阻器	(56)
2.9.电阻网路	(62)
2.9.1.概况	(62)
2.9.2.阻值调整	(62)
2.9.3.印刷电阻电路	(63)
2.10.各种固定电阻器的比较和发展趋势	(65)

三、电位器	(6 8)
3.1.线绕电位器	(6 9)
3.2.合成碳质电位器	(7 2)
3.3.金属膜电位器	(7 4)
3.3.1.合金金属膜电位器	(7 4)
3.3.2.Cr-SiO ₂ 薄膜金属陶瓷电位器	(7 6)
3.3.3.氮化钼膜电位器	(7 8)
3.3.4.块金属膜电位器	(8 0)
3.4.金属玻璃釉膜电位器	(8 0)
3.5.导电塑料电位器	(8 4)
3.6.无触点电位器	(8 7)
3.6.1.光电电位器	(8 7)
3.6.2.磁敏电位器	(9 1)
3.7.非线性函数电位器	(9 7)
3.8.微调电位器、电阻器网络	(9 9)
3.9.电位器的现况和发展趋势	(100)
四、半导体电阻和探测器	(105)
4.1.热敏电阻器	(107)
4.1.1.普通负温度系数热敏电阻	(108)
4.1.2.玻璃热敏电阻和临界热敏电阻	(109)
4.1.3.硅热敏电阻	(110)
4.1.4.钛酸钡正温度系数热敏电阻	(111)
4.1.5.低温热敏电阻	(112)
4.1.6.高温热敏电阻	(113)
4.1.7.塑料热敏电阻	(114)
4.1.8.热敏电阻辐射热探测器	(115)
4.1.9.特种热敏电阻	(115)
4.2.可见光光敏电阻器	(117)
4.2.1.硫化镉和硒化镉光敏电阻器	(118)
4.2.2.其他光敏电阻器	(119)
4.2.3.应用	(120)
4.3.红外光电探测器	(121)
4.3.1.本征型红外探测器	(122)
4.3.2.掺杂型红外探测器	(125)
4.3.3.多元和多色光电探测器	(126)
4.3.4.红外探测器的其他问题	(129)
4.3.5.红外探测器的发展趋势	(131)
4.4.压敏电阻器	(131)

4.4.1.碳化硅压敏电阻器.....	(132)
4.4.2.氧化锌压敏电阻器.....	(133)
4.4.3.单颗粒层压敏电阻器.....	(137)
4.4.4.作压敏电阻用的半导体二极管.....	(138)
4.4.5.膜状压敏电阻器.....	(139)
4.4.6.压敏电阻器的应用.....	(139)
4.4.7.特种压敏电阻器.....	(140)
4.5.湿敏器件.....	(144)
4.5.1.碳湿敏电阻.....	(144)
4.5.2.硫酸钙湿敏电阻.....	(145)
4.5.3.氧化物湿敏电阻.....	(146)
4.5.4.其他.....	(147)
4.6.磁敏电阻器.....	(148)
4.6.1.工作原理.....	(148)
4.6.2.材料、结构和特性.....	(148)
4.6.3.应用.....	(150)
4.7.力敏电阻器.....	(152)
4.7.1.硅力敏电阻器.....	(153)
4.7.2.硒碲合金换能器.....	(154)
4.8.气敏电阻器.....	(154)
参考文献.....	(156)

国外电阻器发展概况

一、概 述

1.1. 发展过程简述⁽¹⁾

电阻器作为一种通用电子元件，迄今已有八十到九十年的历史了。随着无线电电子学的迅速发展，电阻器作为电子元件工业的一个基本组成部份仍在不断前进，在第二次世界大战后，几个主要资本主义国家都投入大量人力物力研制各种尖端军事装备所需要的电子设备和元件，并大力推行自动化生产线，因而，电阻器目前无论在生产规模和技术上都达到了新的水平。根据某些国家统计数字估计，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路（双列直插式），从而为电子设备进一步小型化做出了新的贡献。

然而，电阻器制造业同样也经历了很长一段从小到大，从低级到高级的发展过程。电阻器远在上一世纪就已应用于电力和弱电技术，不过，当时的电阻器则非常原始，而真正广泛地应用到无线电设备中还是从本世纪二十年代才开始的。

各国在电阻器生产和研制方面都具有不同的特点，发展道路和内容也互有差异，迄今为止，合成碳质电阻器仍然是欧美各国的主要品种，它分实芯和薄膜两种，实芯合成电阻器是历史最为悠久的一种电阻器，1885年首创于美国，1925年研制成实芯电阻器模压工艺之后，即开始大量生产。这种电阻器主要特点是可靠性高，工艺简单，适合于大量生产。例如，美国1959年实芯电阻器的产量约占电阻器总产量的80%以上，直到1970年仍然还占60%以上，其中不少都用于军事电子设备中。日本战后投入大量生产，近几年来随着半导体收音机发展，其产量也不断在增加，1972年整个碳质合成实芯电阻器的产量达38亿只。

合成膜电阻器于1897年在英国首先制成，1925年美国国际电阻公司（IRC）研究成一种自动化连续沉积合成膜的技术，目前这项技术仍在应用。

热分解碳膜电阻器1925年由德国发明，1930年德国西门子公司完成了这种电阻器的大量生产工艺方式。随后相继传入英、日等国。英国1934年开始大量生产，而日本的碳膜电阻器是在1937年才投入大量生产。但是，1971年日本碳膜电阻器产量达96亿多只，占其电阻器总产量的63%左右。

碳膜电阻器在美国迟至第二次世界大战中，由于对精密电阻器的大量需要和生产大量精密线绕电阻器有困难，所以才促使这种电阻器生产和应用。

苏联1935年开始研制碳膜电阻器，据报导，1948年其产量超过了任何一个国家，1958年占整个苏联非线绕电阻器总产量的80%以上。由此可见，碳膜电阻器在苏、日、西德等国家应用很普遍。但是这种电阻器在美国和法国尚未被广泛使用，仅限于稳定和精密的电子设备之中。

为了进一步改善碳膜电阻器的性能，美国贝尔实验室在1950年创制了硼碳膜电阻器，它的温度系数比碳膜好得多，而且其它性能也得到了改善。

线绕电阻器也是一种很古老的电阻元件，最初日本的神田选吉于1889年在“电学杂志”上发表了有关这方面的文章，1900年美国研究成把珐瑯用于线绕电阻器上。当时，线绕电阻器主要采用铜镍和镍铬合金丝。1946年和1949年美国分别研制成镍铬铝合金和镍铬铜合金丝。这两种材料的电阻率均为 $800\Omega/\text{cmf}$ （注：cmf即园米耳呎，即0.001吋的直径，长度为一呎），温度系数则为 $20\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ，与前两种比较，其优点是温度稳定性高，有效阻值上限高。此外在包封材料，结构等方面也有许多新的发展，如由于使用了新型树脂（环氧树脂，硅树脂）作包封材料，使得产品在防潮性能方面得到了很大的改善，同时也提高了工作温度。

金属膜电阻器是德国在1926年发明的，是用树脂酸铂溶液制成金属铂膜电阻器，1937年Rosenthal绝缘材料公司发现在溶液里加入其它金属，如金和银之后能使温度系数降低。根据文献记载，对金属薄膜性能的研究早在19世纪末叶就开始了，后来由于金属膜的阻值范围窄，工艺复杂，成本较高，所以曾一度被丢弃，只是从五十年代开始，由于对耐热性和耐磨性以及高稳定性等要求的提出，加之真空蒸发工艺的采用，才使金属膜电阻器得以复兴，不仅扩大了工业生产，而且在制造工艺和金属膜材料性能研究方面都取得了一系列的成效。美国1952年制成金属膜电阻器，1954年开始出售镍铬合金膜电阻器。日本大约是1959~1960年前开始出售这种产品。苏联开始生产金属膜电阻器是在1952年底。

金属氧化膜电阻器是在1931年由美国发明的，1946年又加入氧化铋改进了这种薄膜的稳定性，且发现改变锡—铋含量可以调整正负温度系数。1952年美国康宁玻璃公司首先宣称制成EC型金属氧化膜电阻器。目前许多国家都能生产这种电阻器。

在电位器方面最早出现的是线绕电位器，到目前已经有几十年的历史了。战后由于火箭和导弹技术的发展，许多新型的电位器也相继出现，如金属膜、金属氧化膜、合成实芯、多转精密线绕、导电塑料和无接点电位器（包括光电电位器和磁敏电位器）等。特别是从六十年代开始美国研制成一种新型的高性能电阻材料，即金属玻璃釉（或叫金属陶瓷），用来制做固定电阻器，这种电阻材料因其耐热、负荷能力强，阻值范围宽，而且耐磨，所以被广泛用来制造金属陶瓷电位器。最近几年又将这种材料配制成浆料，用丝网印刷法制成各式各样的厚膜电阻器以适应厚膜集成电路的需要。

1.2. 生产研制现状⁽²⁻⁴⁾

目前整个资本主义世界电子元件工业发展已经相当庞杂，据估计，生产的电子元件总共有4000种左右，厂商已经达到6000多家，而根据1962年美英日法西德五国统计总共

有2998家电子元件企业，从业人员大约40万人，电阻器现在的生产研制规模，一方面缺乏资料，另方面国外没有统一准确的统计数字，所以很难如实反映，现将掌握的一些情况列述如下。

日本电子工业生产总值还不到美国的 $\frac{1}{3}$ ，但电子元件，特别是阻容元件的产量则相当大。据统计电容器为美国的2.5倍，电阻器则为美国的三倍还多（见表1-1和表1-2）。日本电阻器大约有30%向外出口，而其中大部份是向美国出口。

表 1—1 美国电阻器生产情况 （单位：百万只，百万美元）

年 别 品 种	1 9 6 7		1 9 6 8		1 9 6 9		1 9 7 0		1 9 7 1	
	产量	产 值	产量	产 值	产量	产 值	产量	产 值	产量	产 值
可 变 电 阻 器	333	168.44	353	164.75	335	157.74	266	130.99	270	123.1
固 定 电 阻 器	4069	277.08	4768	254.88	5344	276.16	4257	234.30	3629	208.1
碳 膜	163	20.90	149	17.12	163	21.20	132	18.30	2607	62.6
碳质(实芯)	3079	76.79	3660	73.16	4029	82.93	2992	59.57		
金 属 膜	437	47.31	574	49.79	735	56.33	780	54.08	685	53.3
线 绕	264	63.16	264	52.86	274	59.31	257	60.52	242	53
其 它	126	68.32	121	61.95	143	56.39	96	41.83	122	39.1
合 计	4392	445.52	5121	419.63	5679	433.90	4523	365.29	3826	331.1

表 1—2 日本电阻器生产情况 （单位：百万只，百万日元）

年 别 品 种	1 9 6 7		1 9 6 8		1 9 6 9		1 9 7 0		1 9 7 1	
	产量	产 值	产量	产 值	产量	产 值	产量	产 值	产量	产 值
可 变 电 阻 器	274	34.33	358	44.82	572	70.30	625	76.54	693	29001
固 定 电 阻 器	3271	42.11	5765	63.06	9569	92.84	13008	119.96	13888	37727
碳 膜	1458	17.33	3517	31.12	6330	50.43	8629	64.61	9623	20567
碳质(实芯)	1699	12.18	2027	13.97	2873	18.95	3934	23.33	3863	7671
金 属 膜	33	2.88	58	4.35	121	6.36	201	10.26	174	2556
线 绕	53	6.39	88	8.61	115	9.03	136	12.10	142	3714
其 它	28	3.34	74	5.01	130	8.08	108	9.66	84	3219
合 计	3544	76.44	6123	107.88	10141	163.13	13633	196.47	14581	66728

表 1—3 日本 48 家固定电阻器企业分布情况

(据1973年3月日本“JEE”杂志报导)

品 种	企业数	品 种	企业数
合成碳质电阻器	12	金属膜电阻器	30
碳膜电阻器	23	电路板印刷电阻器	8
陶瓷电阻器	11	线绕电阻器	27
功率型薄膜电阻器	14	其它	13
玻璃密封电阻器	4		

在日本电阻企业中, 68%的从业人员都集中于固定电阻器生产部门, 只有32%的人员从事可变电阻器的生产, 而且其中又有75%的人在生产碳质电阻器部门。日本电阻制造业有两个主要特点: 一是中小型企业多, 如1000人以下的企业约占所有电阻企业的80%; 二是电阻器生产专业性强, 如专业企业(即电阻器产值占企业总产值70%以上的企业)数占电阻企业总数的73%, 而其产量占70%以上。近几年日本电阻企业数目比1962年前大为减少, 主要原因, 一方面由于资本主义竞争, 使企业兼并、倒闭, 另一方面是有一部份企业在集成电路影响下转产改行。

综上所述, 目前在主要资本主义国家中电阻器工业企业构造有两个共同的特点, 即中小型企业多和生产专业化。

表 1—4 日本电阻器工业企业构造 (按从业人员数划分)

从 业 人 员 规 模	专 业		兼 营		合 计	
	企业数 (个)	产 值 (百万日元)	企业数 (个)	产 值 (百万日元)	企业数 (个)	产 值 (百万日元)
1000人以上	5	13690	4	9854	9	23544
500—999人	6	9793	2	781	8	10774
300—499人	2	1306	3	867	5	2173
100—299人	11	3918	2	1032	13	4950
50—99人	5	339	0	—	5	339
20—49人	4	171	1	12	5	183
合 计	33	29217	12	12546	45	41763

1.3. 分立电阻元件与集成电路的关系 (5~10)

国外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, 使整个电子工业的结构发生了深刻的变革, 同时对电阻器制造业影响也不小, 尽管如此电阻器仍不失作

为分立元件使用的特色。据估计电阻器全世界的产量比十年前增加了三倍左右，发展最快的还算日本，日本1962年生产电阻器12.78亿只，但是1971年生产了146亿只，1972年估计为161亿只，这就是说比1962年增长了十几倍，美国1970年生产电阻器45亿只，而1963年则为29.6亿只，增长速度比较缓慢，近一倍。

英国电子元件1962年产值为1.37亿英镑，到1972年电子元件总产值增加到3.38亿英镑，其中固定电阻器为1200万英镑，电容器为3000万英镑。

由于集成电路的迅速发展，在美国电阻器的生产已经出现下降的趋势。在日本近两年来由于彩色电视机和立体声设备等大幅度增产（如1969年彩色电视机476万台，1970年578万台，1971年为747万台），加之出口量增大，电阻器的生产不但没有出现下降的倾向，而且每年仍以平均20%的速率在增长。不过，预料在不久的将来分立元件减少的倾向在日本也会出现。但是，也不能断言将来所有的分立元件都会减少。根据美国统计，在电阻器方面，碳质电阻器是在减少（如图1-1a所示），但金属膜电阻器和一度曾被人们认为走下坡路的线绕电阻器将继续增加（如图1-1b所示）。日本和英国的情况也基本如此，日本1970年线绕电阻器为1.36亿只，比1969年增长20%，金属膜电阻器1970年为2.01亿只，比1969年增长66%。

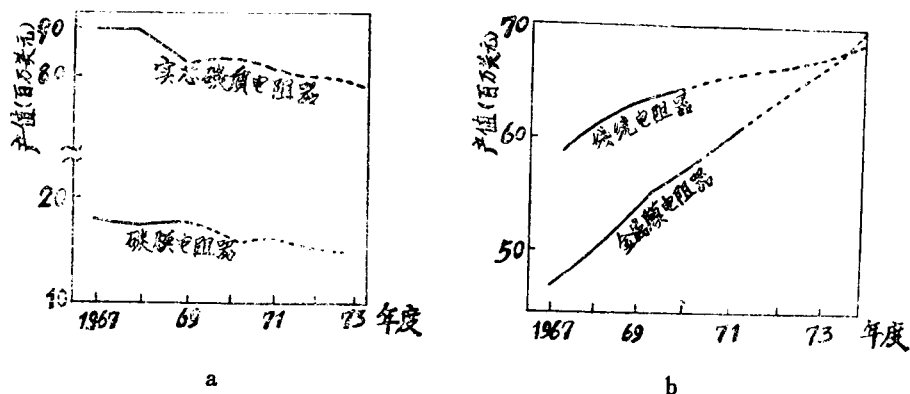


图 1-1 美国某些分立电阻元件动向（估计）

然而，目前国外普遍认为，所有电子元件，其中也包括电阻器的发展总是与集成电路技术发展密切相关。这就是说，集成电路在电子设备中被日益广泛采用，不仅取代一部份分立电阻器，而且迫使电阻器制造业寻求新的出路，反过来又促进了电阻器工业的发展。例如日本多摩电气公司正在致力于对付集成电路进攻的手段，试制高效能电阻器以及研究新技术和新产品。同时，美国许多电阻器制造厂商为寻求新的出路，正大力发展各种形式的封装电阻网路和微型片状电阻器，以适应集成电路发展的需要。

为了说明集成电路对电子元件的影响，列表如下：

表 1—5 74位数电子计算机对元件需要量的变化

项 目	设备种类	晶体管式 电子计算机	集成电 路电子计算机	大规模集成电路 电子计算机
元 件 项 目		8500	1600	165
焊 接 点		20000	16000	945

表 1—6 电子计算机中元件需要量的变化

元 件 名 称	机 器 种 类	晶 体 管 式 电 子 计 算 机	集 成 电 路 化 大 型 电 子 计 算 机	减 少 率 (%)
电 容 器		47000只	3000只	84
薄膜, 铝, 钽 电 容 器		21000只	9000只	77
碳 膜 电 阻 器		155000只	23000只	93
晶 体 管		52000只	9000只	94
二 极 管		177000只	22000只	92

电子设备集成化对电阻器工业的影响是肯定的, 从上面两个表例中可以清楚地看出, 而日本作为民用电子设备占首位的国家, 并在世界上最先进入民用电子设备的集成电路化, 其影响更是可想而知的。目前根据各公司所公布的集成电路电视机, 其分立元件减少率为20~40%, 例如, 以前在晶体管式电视机中使用350~360个电阻器, 而集成化后, 减少为120~150个, 若干年后可能会减少到100个以下。随着集成电路的不断发展, 这一取代过程也是不可避免的。但是不可能完全取代。分立电阻元件仍将继续存在, 与集成电路相互补充, 共同使用。因为集成电路虽具有一系列分立元件无法比拟的优点, 但同时它还存在着不少一时难以克服的缺点, 如元件参数范围窄, 不少元件还不能集成化, 尤其是大功率、高精密、高频等方面的应用尚受限制, 仍需分立元件来弥补, 所以分立电阻元件的许多品种在今后相当长一段时间里仍要继续发展, 特别是小型电位器、精密微调电位器和高压大功率电阻器等。同时, 在改进现有分立电阻元件的性能和可靠性方面, 在制造工艺、材料代用和结构更新等方面, 仍有大量工作需要去做。为了进一步说明在集成电路大力发展的形势下, 分立电阻器发展的前景, 特将美、英、日有关人士的典型观点列述如下:

英国电子元件专家G.W.A.Dummer(杜默)认为, 集成电路的发展对一般元件的影响是肯定的, 特别是通用固定电阻器易于实现集成化, 所以其销路肯定会下降, 但是大功率电阻器、小型可变电阻器、金属玻璃釉微调电位器今后仍将继续发展。

日本人认为, 由于集成电路的特性和使用条件的限制, 电子设备全部采用集成电路是很困难的。因而, 一方面采用分立元件的电子设备仍继续存在, 另一方面集成电路和一些特定的外贴分立元件构成混合集成电路, 在这种情况下对分立电阻元件要求是: 大功率、高稳定、高精密、低噪音、高阻值和廉价等等。

美国人认为, 电阻器现在仍是一种非常活跃的元件。为了适应集成电路的发展, 电阻器除了进一步小型化作为分立元件继续存在之外, 还可以将若干个电阻器制成一个完整的电阻網路。这种电阻網路可以取平装结构或双列直插式结构。由此看来, 电阻器制造业正在克服商业上和技术上的种种困难, 继续取得进展。

此外, 热敏电阻和压敏电阻作为一种半导体补偿元件, 不象其它分立元件那样在集成电路“冲击”下就减产。从下面统计表和图中可以看出, 日本和美国的热敏电阻及压敏电阻在1968~1969年正是其它分立元件生产下降的时候, 它们却以一定的比例稳步上

升。

热敏电阻，目前全世界年产量已达十亿只，在日本除了工业用途外，大量使用于半导体收音机中作温度补偿及电视机中的去磁电路。因为日本收音机每年生产三千多万架，其中大部份为半导体收音机，因此热敏电阻今后仍将继续增加。

表 1—7 日本热敏电阻、压敏电阻生产情况

(单位：百万只，百万日元)

年代 品 种	1966		1967		1968		1969		1970		1971	
	产量	产值	产量	产值	产量	产值	产量	产值	产量	产值	产量	产值
热敏电阻	50	654	53	674	74	937	108	1711	108.7	1152	101	1076
压敏电阻	28	829	29	867	42	1037	66	1458	83	1832	100.9	1767

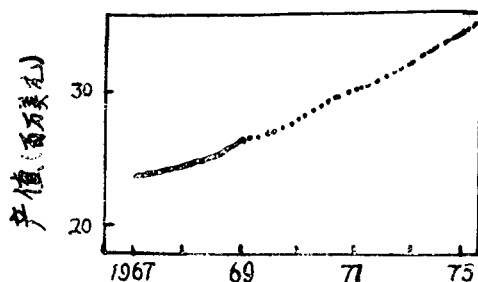


图 1-2 美国热敏电阻、压敏电阻的发展动向

1.4. 电阻器的发展趋势 (7)(10~16)

电阻器今后发展的方向和生产研制的重点，显然取决于电子设备的需要。对宇宙航行，卫星通讯和其它军用电子设备来说，无疑要求高可靠、高稳定、高精度、大功率和小型化的电阻元件，对于民用电子设备来说，主要是要求物美价廉的产品，而工业用电子设备则要求介于以上两者之间。

精密电阻器现在主要还是采用线绕型，线绕电阻器精度可以达到 $\pm 0.01\%$ ，最高可做到 $\pm 0.002\%$ ，此外，国外早就用金属膜电阻器做精密元件，而且精度高于 $\pm 1\%$ 。若用块状金属膜做精密电阻器，其精度可达 0.001% 。由于金属膜电阻器性能稳定可靠，所以被英国人称为“电阻器王国的贵族”。精密电阻器很少要求在高温下使用，因此今后研究的主要目标是进一步改善稳定性和更严格地控制温度系数。

据报导，美国贝尔实验室正在研究一种温度系数接近于零的高稳定性电阻器，这种电阻器是由同时溅射Ta-50原子%—铝薄膜制成，而后在 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 下经两小时半热处理即可得到电阻温度系数(TCR)接近零的金属膜电阻器，其稳定性可以达到 $0.3\%/1000$ 小时。

大功率高压方面的重点在大功率线绕电阻器和金属氧化膜电阻器。线绕型可以做到400瓦，若采用空心气冷或水冷，其功率还可以大大提高。氧化膜电阻器也被用作大功

率高压电阻元件，因为金属氧化膜的负荷能力强，日本已做出直流额定电压达300KV的高压电阻器。

高阻值型通常还是用合成碳膜，但若需要高稳定性和低温度系数时，就得使用金属膜，而金属膜电阻器最大值只有1M Ω ，且最高有效极限电压也只有350V。英国Mullard电阻器公司最近研制成一种新型金属玻璃釉电阻器，阻值可达33M Ω ，稳定性远远超过合成碳膜电阻器。

小型化和新结构方面，一直是电阻器发展的重要内容，近几年来电阻器制造厂为了适应集成电路发展的需要，一方面生产小型片电阻（日本生产的片电阻器尺寸只有1~2 $\times$ 1mm²）作为混合集成电路的外贴元件（片状电阻器还可供集成电路维修用）。另一方面，更多的是用厚膜或薄膜技术制造模压式的电阻網路，这种电阻網路有的是将几个固定电阻器组合在一起，有的是将一个微调电位器和几个固定电阻器组合成一个双列直插式结构。这种封装电阻網路也可以具有两个或三个单转微调电位器。除此以外，电阻器亦可与其它元件组成各种不同的網路，如电阻器和电容器，电阻器和二极管等。据报导，人们对双列直插式结构是非常响应的，因为它的外型小，可以紧缩装配空间，而且灵活机动，但是双列直插式比其它封装结构价格贵20%左右，散热仍是一个严重的问题，虽然可以采用散热片型封装结构或小功率集成电路。不过，这些问题今后一定会有办法逐步解决的。

电位器和微调电位器最重要的一个发展趋势仍然是小型化的问题。为满足集成电路的需要，美国已做成3.6 $\times$ 3.6 $\times$ 2.1mm的电位器。金属玻璃釉和金属膜材料适合于制做小型、高性能、高稳定性的电位器，特别是用金属玻璃釉做微调电位器国外报导的最多。碳质实芯电位器因为价廉，转动寿命长，而且容易做成函数式，对民用很适合。若在性能上加以改进，仍然是有发展前途的。电位器在结构上名目繁多，现在国外出现一种直线推拉和直线滑动式结构，构造简单，使用方便。

近来，关于磁敏无接点电位器的许多报导已经引起人们的注意，它是根据霍尔效应原理用锑化铟材料制成的。这种无接点电位器结构比光电电位器简单，没有机械磨擦，寿命长，无噪音，具有良好的重现性，分辨率无限，其发展前景是很有希望的。

关于热敏电阻，近几年来在材料基础研究方面进展迟缓，负温系数热敏电阻只是品种不断增加，因而而在其推广应用方面报导也较多，今后仍需提高稳定性和一致性。正温系数热敏电阻方面，随着材料研究工作的深入进行，制造工艺也趋于成熟，现在着重于改善产品性能，提高正温特性，降低电压系数。为了满足空间技术的需要，国外已发展了超高温（2500 $^{\circ}$ K）热敏电阻和超低温（-269 $^{\circ}$ C液氮）热敏电阻。为了适应集成电路发展，国外前几年就已经采用射频溅射法制造薄膜热敏电阻，并用丝网印刷工艺制做厚膜热敏电阻，这种热敏电阻除了与集成电路配用外，还可以做成红外探测器，以扩大其应用范围。另外据日本1971年“应用物理杂志”报导，采用石墨、石蜡和聚乙烯混合物可以制成温度系数异常大的热敏电阻，其电阻率可以从20 $^{\circ}$ C时的10³欧姆·厘米增加到85 $^{\circ}$ C时的10¹¹欧姆·厘米，但是，这种热敏电阻稳定性如何，尚值得研究。

压敏电阻到目前为止仍然还是用碳化硅SiC作基本材料，这种压敏电阻主要是用于30V以上的电压控制。今后随着电子设备晶体管化和集成电路化的发展，对10V以下的电

压控制也提出了要求, SiC压敏电阻不能满足这样的要求, 因此今后SiC压敏电阻的需要量不可能指望有什么大幅度的增加, 相反, 以氧化锌 (ZnO) 为主体的陶瓷做成的ZNR压敏电阻 (日本松下电器公司) 可用于0.6V~20KV这样宽范围的电压控制。1972年5月日本东芝公司宣称已研制出世界上最高水平的TNR氧化物压敏电阻, 并开始大量生产, 月产量10万只, 其价格为然纳二极管的1/10, 市售价格从数十日元~数千日元, 主要成份是氧化镍和氧化锌等, 工作电压范围为50V~50KV。电压非线性系数 α 在50以上, 比以前的产品性能大大提高。

1.5. 电阻器的可靠性⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾

国外对电子设备可靠性的研究最初是由美国在第二次世界大战后开始的。据说美国在第二次世界大战期间, 由于生产的电子装备有一半以上发生故障而宣告失利, 日本偷袭珍珠港便是其中一例。大战后美国有关部门, 对电子设备发生的故障进行了广泛的研究和探讨, 积累了大量的资料, 使可靠性得到了提高。例如美国对民兵导弹电子设备进行了多年的研究, 使其可靠性提高到0.009%/1000小时, 而1962年只有0.07%/1000小时。

并且对宇宙飞行设备电子元件可靠性研究也做了大量工作, 积累了许多的资料, 他们分析可靠性的数据来源主要是“水手”4—7号宇宙飞船、“先驱者”6—9号宇宙飞船和“民兵”I及II导弹系统, 特别是“民兵”导弹系统可以说是一个高可靠性的元件研究计划。美国在元件可靠性研究方面所积累的数据 (元件小时数) 参见下表。

表 1—8 美国积累的元件可靠性数据

元 件 类 型	元 件 小 时 数		
	“水 手”	“先 驱 者”	“民 兵”
电 阻 器	410174364	353290800	87991934000
电 容 器	165865881	143226000	13571397000
二 极 管	242176068	305548800	54463219000
晶 体 管	122847849	95484000	16677635998
集 成 电 路	18263777	—	—

表 1—9 “水手” 1971 年电子元件总数

元 件 类 型	数 量	百 分 比 (%)
电 阻 器	11504	39
电 容 器	4423	15
二 极 管	4816	17
晶 体 管	3404	12
集 成 电 路	3040	10
其 它 元 件	2002	7
合 计	29189	100

如果表1-8和表1-9对应的话,以电阻器为例,使用11504个电阻器积累了410,174,364元件小时,即用这么多电阻器进行了大约四万多小时(约五年)的可靠性试验。

对于可靠性的要求随着空间电子设备的发展日益提高,整个电子系统所用元件数量的不断增加,可靠性就成为必须注意的关键因素了,同时对电子元件可靠性的要求亦更加明确了。例如英国建立了一条海底电缆,使用有653个增音机,每个增音机有70个新型电阻器,总共需要45710个电阻元件,规定寿命为20年(160000小时)如果以90%的成功率来计算的话,那么所要求的失效率为 10^{-11} 小时,即比美国MIL标准规定的最高可靠性水平还要高三个数量级。真正要达到这样高的可靠性看来是困难的,一方面没有充分的试验数据来证实达到这一可靠性水平的可能性,另一方面,这种可能性事实上是非常小的。所以,提出可靠性的要求,并根据这个要求选用什么样的元件,都必须经过一些应用来考察和通过现场试验数据来确定。从表1-10可见,美国在可靠性方面所积累的试验数据及电阻器在几种宇宙飞船中的失效率指标和研究结果是有说服力的。

表 1—10 各种电阻元件失效率(故障率)

元 件 类 型	故 障 率 (故障次数/10 ⁶ 小时)			研究结果
	“民兵”导弹数据	“水手”4—7号宇宙飞船数据	“先驱者”宇宙飞船数据	
电 阻 器	0.00022	0.0013	0.0030	
合 成 碳 实 芯	0.00011	—	—	0.0003
薄 膜 电 阻 器	0.00034	—	—	—
金 属 膜 电 阻 器	—	—	—	0.002
碳 膜 电 阻 器	—	—	—	0.003
线 绕 电 阻 器	0.0005	—	—	—
精 密 型 电 阻 器	—	—	—	0.02
功 率 型 电 阻 器	—	—	—	0.03

所谓可靠性,就是指某种元件在一定时间内和规定的条件下能发挥其特定作用或功能而不发生故障(失效)的概率,作为衡量可靠性的尺度,一般采用故障率,即每1000小时发生故障的次数这一概念。

作为故障率的数值,也可用 10^{-9} /小时(Fit)为单位来表示,但更常用的则是%/1000小时。美国用于OGO卫星的电阻器故障率1965年11月为1.1Fit,1968年6月为1.0Fit,即可靠性提高了1/10左右,由表1-10可见,美国“民兵”式导弹系统中电阻器的故障率为0.22Fit,其中合成实芯碳质电阻器为0.11Fit。这说明近几年来美国电阻器可靠性在提高。

为了减少故障率数值,换言之,为了提高可靠性,必须对电阻器的生产工艺进行适当的管理和适当的设计,此外,对电阻器用户来说,合理的使用方法也是非常重要的。