

第3章 高频电子线路常用元器件

在高频条件下,集总型的电阻、电容、电感、晶体管等呈现的频率响应,都异于低频信号时,它们将不再显现纯的电阻、电容、电感特性,即使一根导线也会有高频效应。用于高频电路的二极管、晶体管和集成电路等有源器件,主要完成信号的放大、非线性变换等功能。它们与用于低频或其他电子线路的器件没有什么根本不同,只是由于工作在高频范围,对器件的某些性能要求更高。随着半导体和集成电路技术的高速发展,能满足高频应用要求的器件越来越多,出现了一些专门用途的高频半导体器件。

贴片元件具有体积小、重量轻、安装密度高、抗震性强、抗干扰能力强、高频特性好等优点,广泛应用于计算机、手机、电子词典、医疗电子产品、摄录机、电子电度表及 VCD 机等。贴片元件按其形状可分为矩形、圆柱形和异形三类;按种类分有电阻器、电容器,电感器、晶体管及小型集成电路等。贴片元件与一般元器件的标称方法有所不同。

3.1 导 线

用于电子线路的导线,多为铜质并在表面镀以锡或银的软线,使其易于焊接及导电。这些导线一般多为单股导线,也有多股绞合而成的。为使多股导线之间相互隔绝,在表面加有一层绝缘涂层,如图 3.1.1 所示。



图 3.1.1 导线

导线在高频时的集肤效应是由于导线内部磁场的作用,将电子挤向导体的表面,使得导线的中心部分不再是一个有用的导体,且因电流集中在有限的导体表面,致使其在高频信号时的电阻增大,即交流电阻随之增加。同时,由于信号频率的升高,使得电线的杂散电感所呈现的电感抗也会随之升高。一根导线的电感 L 用以下公式计算:

$$L = 2.0l \left[2.303 \lg \left(\frac{4l}{d} - 0.75 \right) \right] \quad (3-1-1)$$

式中: L 为导线的杂散电感(单位为 nH); l 为导线的长度(单位为 cm); d 为导线截面直径(单位为 cm)。

3.2 电 阻

一个实际的电阻器在低频时主要表现为电阻特性,但在高频使用时不仅表现有电阻特性的一面,而且还表现有电抗特性的一面。电阻器的电抗特性反映的就是其高频特性。一

个电阻 R 的高频等效电路如图 3.2.1 所示。其中, C_r 为分布电容, L_r 为引线电感, R 为电阻。

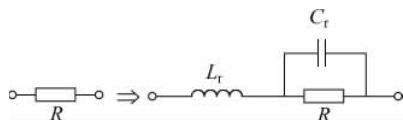


图 3.2.1 电阻的高频等效电路

分布电容和引线电感越小,表明电阻的高频特性越好。电阻器的高频特性与制作电阻的材料、电阻的封装形状和大小有密切的关系。一般来说,金属膜电阻比线绕电阻的高频特性好,贴片电阻比普通电阻的高频特性要好,小尺寸的电阻比大尺寸的电阻高频特性好。频率越高,电阻器的高频特性就越明显。在实际使用时,要尽量减少电阻器高频特性的影响,使之表现为纯电阻。

下面重点介绍贴片电阻的有关知识,其他电阻(如轴向电阻、线绕电阻、功率电阻等)读者可以查阅相关资料自行了解。

3.2.1 贴片电阻的物理结构

贴片电阻(SMD Resistor)是金属玻璃铀电阻器中的一种,是将金属粉和玻璃铀粉混合,采用丝网印刷法印在基板上制成的电阻器,具有耐潮湿、耐高温和温度系数小等特点,可大大节约电路空间成本,使设计更精细化。常规厚膜贴片电阻的物理结构如图 3.2.2 所示。

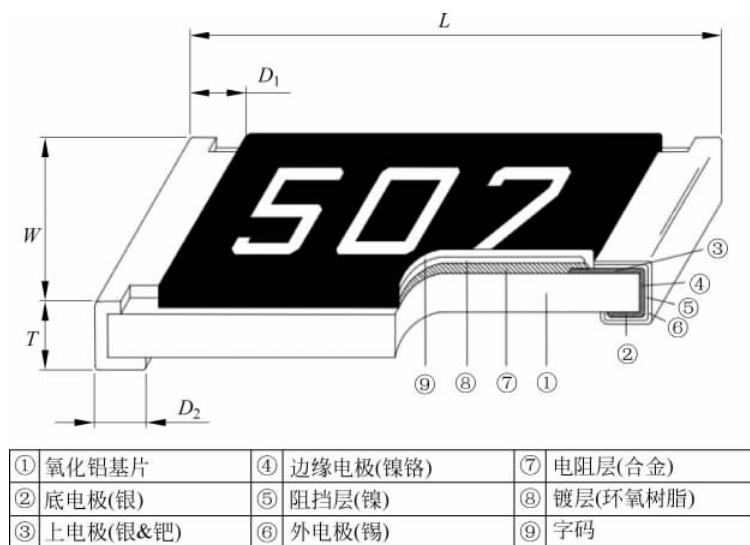


图 3.2.2 常规厚膜贴片电阻物理结构

3.2.2 贴片电阻的封装和性能

贴片电阻常见封装采用两种尺寸代码来表示。一种是由 4 位数字表示的 EIA(美国

电子工业协会)代码,前两位与后两位分别表示电阻的长与宽,以英寸为单位。常说的0805、0603封装就是指英制代码。另一种是米制代码,也由4位数字表示,其单位为毫米。表3.2.1列出了常用的贴片电阻封装参数,表3.2.2列出了贴片电阻的性能参数。

表 3.2.1 贴片电阻封装参数

英制	公制	长 L/mm	宽 W/mm	高 T/mm	正电极 D_1/mm	背电极 D_2/mm
01005	0402	0.40 ± 0.03	0.20 ± 0.03	0.13 ± 0.05	0.10 ± 0.05	0.10 ± 0.05
0201	0603	0.60 ± 0.03	0.30 ± 0.03	0.23 ± 0.03	0.10 ± 0.05	0.15 ± 0.05
0402	1005	1.00 ± 0.10	0.50 ± 0.05	0.35 ± 0.05	0.20 ± 0.10	0.25 ± 0.10
0603	1608	1.60 ± 0.10	0.80 ± 0.15	0.45 ± 0.10	0.30 ± 0.20	0.30 ± 0.20
0805	2012	2.00 ± 0.15	1.25 ± 0.15	0.55 ± 0.10	0.45 ± 0.20	0.40 ± 0.20
1206	3216	3.10 ± 0.15	1.55 ± 0.15	0.55 ± 0.10	0.45 ± 0.20	0.45 ± 0.20
1210	3225	3.10 ± 0.10	2.60 ± 0.15	0.55 ± 0.10	0.50 ± 0.25	0.50 ± 0.20
1812	4832	4.50 ± 0.20	3.20 ± 0.20	0.55 ± 0.20	0.50 ± 0.20	0.50 ± 0.20
2010	5025	5.00 ± 0.10	2.50 ± 0.15	0.55 ± 0.10	0.60 ± 0.25	0.50 ± 0.20
2512	6432	6.35 ± 0.10	3.20 ± 0.15	0.55 ± 0.10	0.60 ± 0.25	0.50 ± 0.20

表 3.2.2 贴片电阻性能参数

型号	额定功率 /W	温度范围 /℃	最大工作电压 /V	阻 值 范 围			温度系数 /PPM·℃ ⁻¹
				0.01%	0.05%	0.1%	
0603	1/10	-55~155	75	24.9Ω~15kΩ			±5
				24.9Ω~100kΩ	4.7Ω~332kΩ		±10,±15
					4.7Ω~332kΩ	4.7Ω~1MΩ	±25,±50
	1/6	-55~155	100	—	10Ω~332kΩ		±25,±50
0805	1/8	-55~155	150	24.9Ω~30kΩ			±5
				24.9Ω~200kΩ	4.7Ω~511kΩ		±10
					4.7Ω~511kΩ	4.7Ω~1MΩ	±15,±25,±50
	1/4	-55~155	150	—	10Ω~499kΩ		±25,±50
1206	1/4	-55~155	300	24.9Ω~49.9kΩ			±5
				24.9Ω~49.9kΩ	4.7Ω~1MΩ		±10,±15,±25,±50
	1/3	-55~155	400	—	10Ω~1MΩ		±25,±50
1210	1/3	-55~155	400	24.9Ω~49.9kΩ			±5
2010				24.9Ω~49.9kΩ	4.7Ω~1MΩ		±10,±15,±25,±50
2512	3/4	-55~155	400	24.9Ω~2kΩ	24.9Ω~2kΩ		±10,±15,±25,±50
	1	-55~155	400	—		4.7~100Ω	±25,±50

3.2.3 贴片电阻的标称方法

贴片电阻器的阻值和一般电阻器一样,在电阻体上标明。共有三种阻值标称法,但标称方法与一般电阻器不完全一样。

1) 数字索位标称法(一般 0805 及以上尺寸矩形片状电阻采用)

数字索位标称法就是在电阻体上用 3 位数字来标明其阻值,如图 3.2.3 所示。它的第 1 位和第 2 位为有效数字,第 3 位表示在有效数字后面所加 0 的个数(如果有 4 位数字,那么前 3 位是有效数字)。如果是小数,则用 R 表示小数点,并占用 1 位有效数字,其余 2 位是有效数字。



图 3.2.3 数字索位标称法

例如: 472 表示 $47 \times 10^2 = 4700\Omega$, 151 表示 $15 \times 10^1 = 150\Omega$, 100 表示 $10 \times 10^0 = 10\Omega$, 2R4 表示 2.4Ω , R15 表示 0.15Ω 。

2) E96 数字代码与字母混合标称法(一般 0603 尺寸矩形片状电阻采用)

数字代码与字母混合标称法也是采用 3 位标明电阻阻值,即“2 位数字+1 位字母”,其中 2 位数字表示的是 E96 系列电阻代码,第 3 位是用字母代码表示的指数码(倍率)。完整的阻值代码如表 3.2.3 所示。

表 3.2.3 E96 系列标准电阻代码表

指数码											
代码	A	B	C	D	E	F	G	H	X	Y	Z
指数	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
阻值代码											
阻值	代码	阻值	代码	阻值	代码	阻值	代码	阻值	代码	阻值	代码
100	01	147	17	215	33	316	49	464	65	681	81
102	02	150	18	221	34	324	50	475	66	698	82
105	03	154	19	226	35	332	51	487	67	715	83
107	04	158	20	232	36	340	52	499	68	732	84
110	05	162	21	237	37	348	53	511	69	750	85
113	06	165	22	243	38	357	54	523	70	768	86
115	07	169	23	249	39	365	55	536	71	787	87
118	08	174	24	255	40	374	56	549	72	806	88
121	09	178	25	261	41	383	57	562	73	825	89
124	10	182	26	267	42	392	58	576	74	845	90
127	11	187	27	274	43	402	59	590	75	866	91
130	12	191	28	280	44	412	60	604	76	887	92
133	13	196	29	287	45	422	61	619	77	909	93
137	14	200	30	294	46	432	62	634	78	931	94
140	15	205	31	301	47	442	63	649	79	953	95
143	16	210	32	309	48	453	64	665	80	976	96

例如：51D 表示 $332 \times 10^3 = 332\text{k}\Omega$ ，88A 表示 $806 \times 10^0 = 806\Omega$ ，39Y 表示 $249 \times 10^{-2} = 2.49\Omega$ 。

3) 色环标称法(一般圆柱形固定电阻器采用)

圆柱形贴片固定电阻与一般电阻一样，大多采用 4 环(有时采用 5 环或 3 环)标明其阻值，如图 3.2.4 所示。第 1 环和第 2 环是有效数字，第 3 环是倍率，代表乘的次方数，第 4 环表示误差。5 色环电阻一般是金属膜电阻，为更好地表示精度，用 4 个色环表示阻值，另一个色环表示误差。色环电阻颜色-数值对照表如表 3.2.4 所示。



图 3.2.4 圆柱形贴片固定电阻器

表 3.2.4 色环电阻颜色-数值对照表

色环	第 1 环	第 2 环	第 3 环(乘法)	第 4 环(误差环)
黑	0	0	$\times 1$	—
棕	1	1	$\times 10$	$\pm 1\%$
红	2	2	$\times 100$	$\pm 2\%$
橙	3	3	$\times 1000$	—
黄	4	4	$\times 10\ 000$	—
绿	5	5	$\times 100\ 000$	$\pm 0.5\%$
蓝	6	6	$\times 1\ 000\ 000$	$\pm 0.2\%$
紫	7	7	$\times 10\ 000\ 000$	$\pm 0.1\%$
灰	8	8	$\times 100\ 000\ 000$	—
白	9	9	$\times 1\ 000\ 000\ 000$	$+5\sim-20\%$
金	—	—	—	$\pm 5\%$
银	—	—	—	$\pm 10\%$
无色环	—	—	—	$\pm 20\%$

例如：棕绿黑表示 15Ω ，误差 $\pm 20\%$ ，“蓝灰橙银”表示 $68\text{k}\Omega$ ，误差 $\pm 10\%$ 。

3.3 电 感

电感器又称扼流器、电抗器、动态电抗器，它的物理特性是阻碍电流的变化。电感器在没有电流通过的状态下，电路接通时它将试图阻碍电流流过它；在有电流通过的状态下，电路断开时它将试图维持电流不变。

电感量也称自感系数，大小主要取决于线圈的圈数(匝数)、绕制方式、有无磁芯及磁芯的材料等。通常线圈圈数越多，绕制的线圈越密集，电感量就越大。有磁芯的线圈比无磁芯的线圈电感量大。磁芯导磁率越大的线圈，电感量也越大。

电感量的基本单位是亨利(简称亨)，用字母 H 表示。常用的单位还有毫亨(mH)、微亨(μH)和纳亨(nH)，它们之间的关系是： $1\text{H}=1000\text{mH}$ ， $1\text{mH}=1000\mu\text{H}$ ， $1\mu\text{H}=1000\text{nH}$ 。

3.3.1 常用的高频电感

常用的高频电感的种类有贴片电感、磁珠、色环电感、中周电感、模压电感、空芯电感、磁环电感和工字形电感等。图 3.3.1 列举了几种常见的电感。



图 3.3.1 几种常见的电感

下面以中频变压器、高频扼流圈和空芯电感为例,简单介绍高频电感的特点,其他电感(如贴片电感、色环电感等)读者可以查阅相关资料自行了解。

1) 中周电感

中周电感,也称中频变压器、中周,如图 3.3.2 所示,是超外差式晶体管收音机中特有的一种具有固定谐振回路的变压器,但谐振回路可在一定范围内微调,以便接入电路后能达到稳定的谐振频率。借助于磁芯相对位置的变化来完成微调。

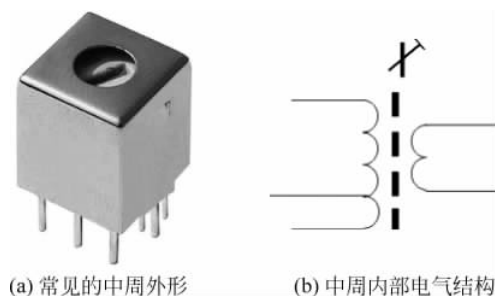


图 3.3.2 中周电感

收音机中的中周电感大多是单调谐式,结构较简单,占用空间较小。由于晶体管的输入和输出阻抗低,为了使中周电感能与晶体管的输入和输出阻抗匹配,初级有抽头,且具有圈数很少的次级耦合线圈。双调谐式的优点是选择性较好且通频带较宽,多用在高性能收音机中。

2) 高频扼流圈

高频扼流圈中,线圈有的绕在铁氧体芯上,有的是空心的,匝数为几百或几十,自感系数为几毫亨。这种扼流圈只对高频交变电流有较大的阻碍作用,对低频交变电流的阻碍作用很小,对直流的阻碍作用更小,因此可以用来“通直流、阻交流、通低频、阻高频”。

高频扼流圈和低频扼流圈都是电感线圈。电感线圈有抑制电流变化的特性,电感越大这种效应越明显。这种效应对电流的阻碍作用表现为感抗,感抗的大小和电感的工作频率与它本身电感的大小有关。在老式甲类音频功率放大器中的低频扼流圈,其作用就是“通直流、隔交流”。但是这个理想情况是无法满足的,只能近似于“通直流、阻交流”。只要能满足放大器的需要,稍微损耗一小部分交流成分也是允许的,在这里扼流圈的感抗要大些。频率一定(音频范围是 20Hz~20kHz)的时候就要求电感比较大,一般是毫亨数量级。而高频扼流圈一般工作在高频电流中,其作用大多也是选频,这就要求其电感不是很大,一般是微亨数量级。其实“通直流、阻交流”和“通低频、阻高频”的说法是针对应用场合来说的。但宗旨都是调整电感的电感量,来满足特定应用场合的需要。

3) 空芯电感

在进行无线电电路设计时,需要一些特定数值或形式的空气芯线圈,称为空气芯电感,简称空芯电感,如图 3.3.3 所示。在需求量不大或是进行可行性试验时,这类线圈常需自行设计及制作。



图 3.3.3 空芯电感

高频电路最常用到的单层空气芯线圈可按下列公式计算所需的线圈匝数

$$n = \frac{\sqrt{L(24r + 25l)}}{r} \quad (3-3-1)$$

式中: n 为线圈匝数; L 为所需电感量(单位为 μH); l 为线圈长度(单位为 cm); r 为线圈内半径(单位为 cm)。

依据设计公式(3-3-1)所制作的线圈,其电感量的精确度仅在线圈长度 l 与其半径 r 大致相等时最佳,但在信号频率为甚高频以上时,精确度会受到影响。同时,用以制作线圈的导线,最好选用漆包线,以避免各线匝之间因接触而短路。所需导线的型号(粗细)可由线圈长度 l 与匝数 n 来决定。

3.3.2 电感的高频特性

电感线圈在高频频段除表现出电感 L 的特性外,还具有一定的损耗电阻 r 和分布电容。在分析一般的长、中、短波频段电路时,通常可以忽略分布电容的影响。因而,电感线圈的等效电路可以表示为电感 L 和电阻 r 串联,如图 3.3.4 所示。

电阻 r 随频率增高而增加,这主要是由于趋肤效应的影响。所谓趋肤效应,是指随着工作频率的增高,交流电流集中流过导线表面这一现象,如图 3.3.5 所示。当频率很高时,导线中心部位几乎完全没有电流流通,这相当于把导线的横截面积减小为导线的圆环面积,导线的有效面积较直流时大为减少,电阻 r 增大。工作频率越高,圆环的面积越小,导线电阻就越大。

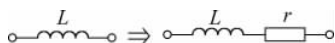


图 3.3.4 电感线圈的串联等效电路



图 3.3.5 趋肤效应示意图

在无线电技术中通常不是直接用等效电阻 r , 而是引入线圈的品质因数 Q 这一参数来表示线圈的损耗性能。品质因素定义为无功功率与有功功率之比

$$Q = \frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}} \quad (3-3-2)$$

设流过电感线圈的电流为 I , 则电感 L 上的无功功率为 $I^2 \omega L / 2$, 而线圈的损耗功率, 即电阻 r 的消耗功率为 $I^2 r / 2$, 故由式(3-3-2)得到电感的品质因数

$$Q_0 = \frac{I^2 \omega L / 2}{I^2 r / 2} = \frac{\omega L}{r} \quad (3-3-3)$$

Q_0 值是一个比值, 它是感抗 ωL 与损耗电阻 r 之比, Q_0 值越高损耗越小。一般情况下, 线圈的 Q_0 值常为几十到一二百左右。 Q_0 值越高, 电路的损耗越小, 效率越高。

在电路分析中, 为了计算方便, 有时需要把图 3.3.6(a)所示的电感与电阻串联形式的线圈等效电路转换为电感与电阻的并联形式。如图 3.3.6(b)所示, 图中的 L_p 、 R 表示并联形式的参数。

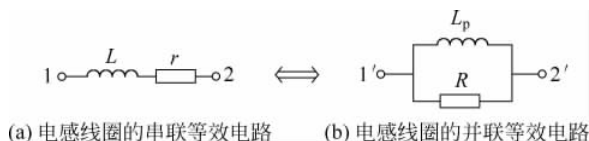


图 3.3.6 电感线圈的串、并联等效电路

根据等效电路的原理, 在图 3.3.6(a)中 1、2 两端的导纳应等于图 3.3.6(b)中 1'、2' 两端的导纳, 即

$$\frac{1}{r + j\omega L} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L_p} \quad (3-3-4)$$

根据式(3-3-3)和式(3-3-4), 可以得到

$$R = r(1 + Q_0^2) \quad (3-3-5)$$

$$L_p = L(1 + 1/Q_0^2) \quad (3-3-6)$$

一般, $Q_0 \gg 1$ 。

$$R \approx Q_0^2 r = \frac{\omega^2 L^2}{r} \quad (3-3-7)$$

$$L_p \approx L \quad (3-3-8)$$

上述结果表明, 一个高 Q 电感线圈, 其等效电路可以表示为串联形式, 也可以表示为并联形式。在两种形式中, 电感值近似不变, 串联电阻与并联电阻的乘积等于感抗的平方。

由式(3-3-7)可以看出, r 越小 R 就越大, 即损耗小。反之, 则损耗大。一般的, r 为几

欧的量级,变换成 R 则为几十到几百千欧。

Q_0 也可以用并联形式的参数表示。由式(3-3-7)得

$$r \approx \frac{\omega^2 L^2}{R} \quad (3-3-9)$$

上式代入式(3-3-3)得

$$Q_0 = \frac{R}{\omega L} \approx \frac{R}{\omega L_p} \quad (3-3-10)$$

上式表明,若以并联形式表示 Q_0 时,则为并联电阻与感抗之比。

3.4 电 容 器

电容从原理上可以分为无极性可变电容、无极性固定电容、有极性电容等,从材料上可以分为 CBB 电容(聚乙烯)、涤纶电容、瓷片电容、云母电容、独石电容、电解电容、钽电容等。常用的高频电容有云母电容、电解电容、贴片电容和可变电容等。

3.4.1 电容容量值

电容的单位是法拉,简称法,符号是 F,由于法拉这个单位太大,所以常用的电容单位有毫法(mF)、微法(μ F)、纳法(nF)和皮法(pF)等,换算关系如下。

$$1\text{F} = 10^3\text{mF} = 10^6\mu\text{F}$$

$$1\mu\text{F} = 10^3\text{nF} = 10^6\text{pF}$$

由于电容单位 F 的容量非常大,所以看到的一般都是 μ F、nF、pF。在常见的电路图中, μ F、pF 有的将 F 省略掉显示为 μ 、p。实际的电容标注法一般是小于 9900pF 用 pF 表示,大于 0.01 μ F(含 0.01)用 μ F 表示。

1. 电容器容量标称方法

1) 字母数字混合标法

这种方法是国际电工委员会(IEC)推荐的表示方法,具体内容是:用 2~4 位数字和 1 个字母表示标称容量,其中数字表示有效数值,字母表示数值的单位。字母有时既表示单位也表示小数点。

例如:470n 表示 0.47 μ F,22n 表示 0.022 μ F,3n3 表示 3300pF, μ 22 表示 0.22 μ F。

2) 数字表示法

这种方法是只标数字不标单位的直接表示法。采用此法的仅限 pF 和 μ F 两种。如电容量上标志的 3、47、6800、0.01 分别表示 3pF、47pF、6800pF、0.01 μ F。电解电容器如标志 1、47、220,则分别表示 1 μ F、47 μ F 和 220 μ F。

3) 乘方数表示法

一般用 3 位数字表示电容器容量大小,其单位为 pF。其中第 1、2 位为有效值数字,第 3 位表示乘方数,即表示有效值后 0 的个数,如表 3.4.1 所示。

例如:221 表示 22 加 1 个 0 = $22 \times 10^1 = 220\text{pF}$,472 表示 47 加 2 个 0 = $47 \times 10^2 = 4700\text{pF}$,683 表示 68 加 3 个 0 = $68 \times 10^3 = 68\,000\text{pF} = 0.068\mu\text{F}$ 。

表 3.4.1 乘方数表示法

序号	3 位数字	容 值
1	10	10+无=10pF
2	101	10+0=100pF
3	102	10+00=1000pF
4	103	10+000=0.01μF
5	104	10+0000=0.1μF
6	105	10+00000=1μF
7	106	10+000000=10μF
8	107	10+0000000=100μF

4) 符号表示法

这种方法多用于贴片或小型电解电容,读法与用乘方数表示多少有些相似的地方,使用时要注意它的容量单位一般都是 μF 级的,如表 3.4.2 所示。

表 3.4.2 符号表示法容量表

表 示 字 符	容值/μF	表 示 字 符	容值/μF
0R1	0.1	100	10
R15	0.15	150	15
R22	0.22	220	22
R33	0.33	330	33
R39	0.39	390	39
R47	0.47	470	47
R56	0.56	560	56
R68	0.68	680	68
R82	0.82	820	82
010	1	101	100
1R5	1.5	151	150
2R2	2.2	221	220
3R3	3.3	331	330
3R9	3.9	391	390
4R7	4.7	471	470
5R6	5.6	561	560
6R8	6.8	681	680
8R2	8.2	821	820

5) 色码表示法

这种方法是用不同的颜色表示不同的数字,其颜色和识别方法与电阻色码表示法一样,单位为 pF。

2. 电容器的误差精度

电容器的误差是指实际电容量和标称电容量允许的最大偏差范围。常用的电容器精度等级和电阻器的表示方法相同,一般用字母表示百分比误差,分别是: D 表示±0.5%,F 表示±1%,G 表示±2%,J 表示±5%,K 表示±10%,M 表示±20%,N 表示±30%,P 表示