



应用札记

ANC202609001

常用外围无源器件的特性及选择

作者：黄山

通信作者：成红玉

校阅：林风

圣邦微电子（北京）股份有限公司

2026 年 9 月 22 日

商标

SGMICRO 是圣邦微电子（北京）股份有限公司的商标。本文档中的所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2026 圣邦微电子（北京）股份有限公司 版权所有。

未经 SGMICRO 事先书面许可，任何单位或个人不得摘抄、复制或改编本文档的部分或全部内容。

欲了解更多关于 SGMICRO 的信息，请访问网站 www.sg-micro.com。

摘要

电阻、电容、电感是模拟电路与开关电源中最基础也最容易被忽视其非理想特性的三类无源器件：阻值对了增益却偏了，容值够了滤波效果却差了，感值选了电感却发热严重。这些问题的根源往往不在于参数本身，而在于对温度特性、直流偏置效应、自热效应、饱和特性、寄生参数及降额规范的忽略。本文梳理三类器件在工程选型中需要同步关注的参数边界、环境约束、失效风险与布局要点，为模拟电路设计、开关电源设计及系统可靠性评估提供一套可对照执行的选型框架。

目录

1 电阻.....	3
1.1 电阻主要参数.....	3
1.2 贴片电阻标称阻值与偏差 ^{[1][2]}	3
1.2.1 5%精度，E-24 系列.....	3
1.2.2 1%精度，E-96 系列.....	4
1.3 额定功率、额定电压和功率降额.....	4
1.3.1 静态额定值：功率与电压.....	4
1.3.2 温度降额曲线.....	5
1.3.3 脉冲功率场景.....	6
1.4 贴片电阻热评估.....	7
1.5 温度系数 TCR.....	8
1.6 电流采样电阻走线 ^[6]	9
1.7 电阻选型流程总结.....	9
2 电容.....	10
2.1 电容主要参数.....	10
2.2 MLCC	10
2.2.1 MLCC 的分类.....	10

2.2.2 MLCC 的关键电气特性.....	11
2.2.3 MLCC 的噪声问题.....	13
2.3 铝电解电容.....	13
2.3.1 铝电解电容主要参数.....	14
2.3.2 铝电解电容寿命评估.....	15
2.3.3 生命末期设计余量.....	16
2.4 电容选型流程总结.....	16
3 功率电感.....	17
3.1 功率电感主要参数.....	17
3.2 电感的饱和特性.....	17
3.3 电感的温升特性.....	18
3.4 电感的等效模型与自谐振频率.....	18
3.5 电感的耐压特性.....	19
3.6 功率电感的损耗分析.....	19
3.6.1 铜损.....	19
3.6.2 铁损.....	20
3.7 电感选型流程总结.....	20
4 参考文献.....	21
5 附录.....	21
5.1 E-96 系列系数.....	21
5.2 E-96 系列 Code 对应关系.....	22

1 电阻

电阻（Resistor）是电路中最基础的无源器件，主要实现限流、分压、电流采样、阻抗匹配、负载设定等功能。常用类型包括贴片电阻、色环电阻、NTC 热敏电阻等。色环电阻采用色标标识与轴向引线封装，其相对于常规贴片电阻的 SMT 生产流程更为繁琐；NTC 热敏电阻阻值随温度显著变化，不属于固定阻值电阻。因此，本文主要以贴片电阻为例展开说明。

1.1 电阻主要参数

电阻选型的第一步，是明确应用场景对阻值、精度、功率、温度系数（Temperature Coefficient of Resistance, TCR）和耐压的基本需求。表 1 以一颗典型贴片电阻为例，展示其主要参数如下：

表 1 电阻主要参数示例¹

主要参数	
阻值	10kΩ
电阻容差（精度）	1%
功率	0.063W（70℃）
温度系数	±150ppm/℃
温度范围	-55℃~155℃
直流电压	50V（满额定功率时的最大连续电压），100V 最大过压，100V 介电耐压

Tips: 阻值决定功能，精度和温度系数决定全温区准确性，功率和电压则决定了安全性，其缺一不可。

1.2 贴片电阻标称阻值与偏差^{[1][2]}

贴片电阻阻值通过丝印编码标识，不同精度对应不同编码体系。

1.2.1 5%精度，E-24 系列

E-24 系列电阻用 3 位数字或代码表示，如图 1 所示。

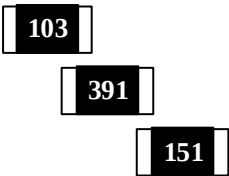


图 1 E-24 系列电阻示例

E-24 表示的数字对应关系为 $10^{n/24}$ ，其中 n 值为 0~23，故 E-24 系列电阻对应系数如表 2 所示。

¹ 参数示例引自 Yageo 的 AA0402 厚膜贴片电阻系列的通用规格书。

表 2 E-24 系列系数

E-24 Decode Value					
10	11	12	13	15	16
18	20	22	24	27	30
33	36	39	43	47	51
56	62	68	75	82	91

E-24 贴片电阻阻值的表示方式：

a) 大于 10 欧姆的电阻：XYZ，其中 XY 为 E-24 系列的系数，Z 代表对应的指数部分，电阻值表示为 $XY * 10^Z$ 。如图 1 所示的电阻带有 103 字样，XY 为 10，Z 为 3，故电阻阻值为 $10 * 10^3 = 10k\Omega$ 。

b) 小于 10 欧姆的电阻：XRY，其中用 R 来代表小数点，如 5R1 表示 5.1Ω 。

1.2.2 1%精度，E-96 系列

E-96 系列电阻用 4 位数字或代码表示，精度更高、阻值更密集，如图 2 所示。

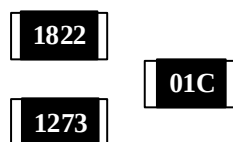


图 2 E-96 系列电阻

E-96 表示的数字对应关系为 $10^{n/96}$ ，其中 n 值为 0~95，E-96 系列电阻对应系数表详见附录 5.1，工程中直接对照厂商丝印手册更高效。

E-96 贴片电阻阻值的表示方式：

a) 大于 10 欧姆的电阻：WXYZ，其中 WXY 为 E-96 系列的系数，Z 代表对应的指数部分，电阻值表示为 $WXY * 10^Z$ 。如图 2 所示的电阻带有 1822 字样，WXY 为 182，Z 为 2，电阻阻值为 $182 * 10^2 = 18.2k\Omega$ 。

b) 小于 10 欧姆的电阻：XRY，其中用 R 来代表小数点，如 5R10 表示 5.1Ω 。

c) E-96 还有一种 **Multiplier Code** 标注法，其 Code 与 E-96 系列系数对应关系详见附录 5.2。如图 2 所示的电阻带有 01C 字样，其中 01 对应 E-96 系列系数为 100，C 对应 10^2 ，故电阻阻值为 $100 * 10^2 = 10k\Omega$ 。

Tips: 精度要求不高（如上下拉、限流）选 E-24 $\pm 5\%$ 即可，经济实惠；分压基准、增益设定、电流采样等关键路径须选 E-96 $\pm 1\%$ 或更高精度。

1.3 额定功率、额定电压和功率降额**1.3.1 静态额定值：功率与电压**

电阻的选型除了电阻阻值以外，额定功率与额定电压是尤为重要的关键指标，是电阻的封装选型的重要判断依据。常见贴片电阻的额定功率，额定电压与贴片电阻封装的对应关系如表 3 所示。

表 3 常见贴片电阻的额定功率与额定电压²

封装		额定功率 P_r ($\leq T_s=70^\circ\text{C}$)	额定电压 U_r
英制	公制		
0201	0603	1/20W	25V
0402	1005	1/16W	50V
0603	1608	1/10W	50V
0805	2012	1/8W	150V
1206	3216	1/4W	200V
1210	3225	1/3W	200V
1812	4832	1/2W	200V
2010	5025	3/4W	200V
2512	6432	1W	200V

Tips: 选封装时，先算稳态功耗，再比对表 3，功耗不超过 $T_s=70^\circ\text{C}$ 额定功率 P_r 的 60%（II 区降额），且工作电压不超过额定电压 U_r 的 70%。功率和电压必须同时满足，取两者限制的较小值。

1.3.2 温度降额曲线

规格书上标称的额定功率仅适用于小等于 70°C 环境； 70°C 至 $T_{\max}$ 之间线性降额至 0。工程上按 II 区降额标准执行，稳态功率降额系数 0.6，即实际功耗 $\leq 0.6 \times P_r$ ($T < T_s$ 时)，高于 T_s 时进一步线性衰减。电阻 II 区应用的降额标准如表 4 所示。

表 4 电阻 II 区应用的降额标准^[3]

降额参数		
稳态功率	$T < T_s$	$\leq 0.6 \times P_r$
	$T \geq T_s$	$\leq [0.6 - (T - T_s)/(T_{\max} - T_s)] \times P_r$
瞬态单脉冲功率		$\leq 0.7 \times P_m(t_1)$
多脉冲功率	$t_2 > 100\mu\text{s}, t_2/t_1 > 200$	$\leq 0.7 \times P_m(t_1)$
	$t_2 > 100\mu\text{s}, t_2/t_1 \leq 200$	$\leq 0.01 \times P_m(t_1) \times (t_2/t_1)^{0.85}$
	$t_2 \leq 100\mu\text{s}$	$\leq 0.01 \times P_m(100\mu\text{s} \times (t_1/t_2)) \times (t_2/t_1)^{0.85}$
稳态电压		$\leq 0.7 \times U_r$
瞬态电压		$\leq 0.7 \times U_m$

其中， U_r 为额定最高工作电压， U_m 为峰值脉冲电压， P_r 为厂家给定在温度低于 T_s 时的额定功率， T_s 为厂家给定额定工作温度， $T_{\max}$ 为标称最大工作温度， t_1 为脉冲宽度， P_m 为脉宽 t_1 下能支持的最大单次脉冲功率， (t_1+t_2) 为脉冲周期。最终 II 区降额后的电阻功率曲线如图 3 所示。

² 不同厂商不同系列电阻的额定功率和额定电压略有差别。

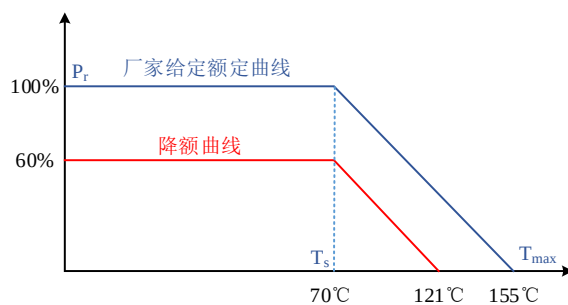
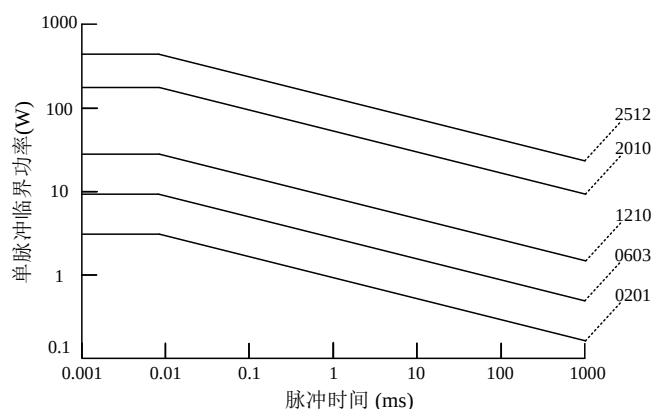


图 3 II 区降额标准的电阻应用功率

Tips: 70°C 以上环境（如密闭机箱、靠近发热源）必须按降额曲线重新核算功率上限，不可直接使用 25°C 标称值。

1.3.3 脉冲功率场景

电阻除了直流工作情况外，对于 RC 吸收电路，启动保护电路等应用场景，均涉及到电阻的瞬时大功率工作的情况。针对此场景一般电阻厂商会提供单脉冲峰值功率曲线（不同厂商之间可能存在一定差异，以各厂商提供的曲线为准），如图 4 所示。

图 4 电阻单脉冲峰值功率曲线^[4]

该曲线代表电阻在不同脉宽（时间长度 t_1 ）下能支持的最大单次脉冲功率 P_m ，其中脉宽是以矩形波为标准，如图 5 所示。

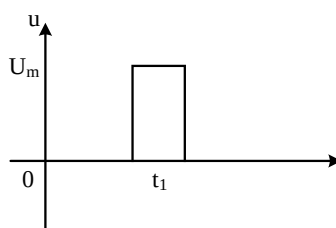


图 5 电阻的单脉冲功率

实际应用时电阻的功率与时间的关系多种多样，故需要对不同的应用场景进行脉宽的等效拟合。例如，RC 放电波形的等效矩形脉冲宽度 $T = \tau / 2$ ，其中 $\tau = RC$ 为该电路的时间常数；三角波的等效矩形脉冲宽度 $T = t / 3$ ，其中 t 为三角波的持续时间；半正弦波的等效矩形脉冲宽度 $T = t / 2$ ，其中 t 为半正弦波的持续时间；阻尼震荡波形的等效矩形脉冲宽度 $T = \tau / 4$ ，其中 τ 为时间常数。

对于多脉冲的功率场景，其降额功率需要通过最大单次脉冲功率 P_m ，功率脉宽（时间长度 t_1 ），以及通断比 t_2/t_1 进行评估， t_1 与 t_2 的定义如图 6 所示。

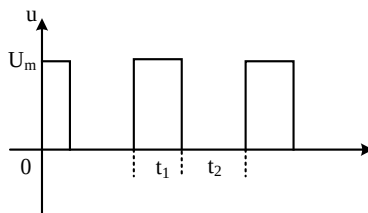


图 6 电阻的多脉冲功率

脉冲功率分为单脉冲和多脉冲两种场景。单脉冲直接查厂商的 $P_m(t_1)$ 曲线即可；多脉冲因热累积效应，需按以下三种场景降额评估：

- 1) $t_2 > 100\mu s$ 且 $t_2/t_1 > 200$ ：脉冲间隔足够长，热完全散尽，等效于单脉冲，按 $\leq 0.7 \times P_m(t_1)$ 执行。
- 2) $t_2 > 100\mu s$ 且 $t_2/t_1 \leq 200$ ：热积累不可忽略，按照 $\leq 0.01 \times P_m(t_1) \times (t_2/t_1)^{0.85}$ 的标准进行降额。
- 3) $t_2 \leq 100\mu s$ ：脉宽极短， P_m 需以等效脉宽 $t_1 = 100\mu s \times (t_1/t_2)$ 为基准重新查曲线，再代入公式 $\leq 0.01 \times P_m(t_1) \times (t_2/t_1)^{0.85}$ 的标准进行降额。

Tips: 多脉冲是电阻选型中最容易被忽视的失效原因，单脉冲满足不代表多脉冲满足。必须实测实际波形中的 t_1 和 t_2 ，按场景套公式核算，不能凭经验估算。

1.4 贴片电阻热评估

由于电阻的额定功率，和温度强相关，如何正确评估电阻的温度是明确所选的电阻是否满足应用要求的重要手段。贴片电阻的热量主要通过热传导经焊盘传递至 PCB（占 90% 以上），因此 PCB 的散热能力是决定电阻实际温升的关键。工程上以电阻端子部位温度作为监测点，应确保该点温度在降额曲线所允许的范围。

PCB 走线宽度直接影响散热效果。走线越宽，温升越低，允许施加的功率越高，如图 7 所示。因此，高功率场景下，除选大封装外，还应增大焊盘连接铜皮的面积和宽度。

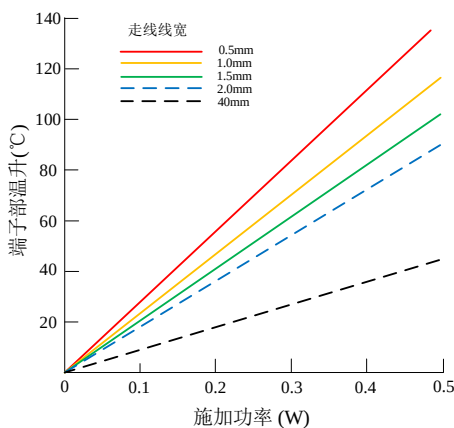


图 7 走线宽度和温升^[5]

Tips: 故在不同的应用条件下，相同的电阻可以工作的功率上限也是完全不同的，所以对于电阻的应用条件评估需要根据电压，功率等级，并结合实际工作环境进行评估，才能决定最终的电阻选型。

1.5 温度系数 TCR

电阻的温度系数 TCR，即温度每变化 1°C 时电阻阻值的相对变化量（单位 ppm/°C），计算公式见式(1)。

$$TCR = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \times 10^6 \text{ ppm/}^\circ\text{C} \quad (1)$$

其中， R_1 为基准温度条件下的阻值； T_1 为基准温度； R_2 为任意温度条件下的阻值； T_2 为任意温度。

对于普通贴片电阻而言，TCR 决定了其工作温度范围内阻值精度的最大偏移量。常规厚膜电阻的 TCR 通常在 $\pm 100 \sim \pm 200 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ 之间，薄膜电阻可做到 $\pm 10 \sim \pm 50 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ ，精密金属箔电阻甚至可低至 $\pm 1 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ 以下。

工程设计时需特别关注：TCR 与初始容差叠加，共同构成全温度范围内的总阻值偏差。例如，一颗 $\pm 1\%$ 、 $\pm 150 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ 的电阻在 85°C 温升（ $25^\circ\text{C} \rightarrow 110^\circ\text{C}$ ）下，额外漂移达 $150 \times 10^{-6} \times 85 = 1.275\%$ ，总偏差超过 2.2%，远超初始容差本身。因此，对于低温漂要求严苛的场景（如精密基准分压、高增益放大器、高精度电流源），TCR 往往比初始容差更具选型优先级。宁可选 $0.5\% + 25 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ 的薄膜电阻，也不选 $0.1\% + 200 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ 的厚膜电阻。

除常规电阻外，还有一类以 TCR 为核心利用目的的热敏电阻。其阻值随温度显著变化，灵敏度远高于普通电阻，广泛应用于温度检测与温度补偿场景。

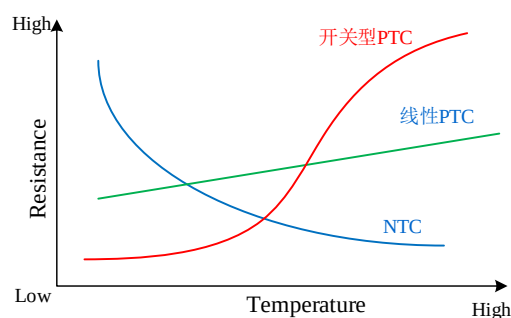


图 8 热敏电阻的温度特性曲线

根据温度系数的正负，热敏电阻分为两类：

- 1) NTC（负温度系数热敏电阻）：阻值随温度升高而下降，灵敏度极高，微小温度变化即可引起阻值明显变化。主要应用于输入浪涌抑制、过温保护等场景。
- 2) PTC（正温度系数热敏电阻）：阻值随温度升高而上升，根据特性差异又可分为两种：①开关型 PTC，阻值随温度升高呈非线性急剧跃升，多用于过流/过温保护电路；②线性 PTC，阻值随温度呈近似线性变化，可用于高精度温度检测及温漂补偿。

Tips: 常规电阻选型时，TCR 越低越好，优先保障阻值在全温区内稳定；热敏电阻选型时追求的是阻值随温度的可预测变化，需结合具体应用场景选用 NTC 或 PTC，并匹配相应信号调理电路。

1.6 电流采样电阻走线^[6]

电流采样电阻的选型（低阻值、高精度、低温漂）必须配合正确的 PCB 布局才能发挥性能。核心方法是开尔文四线制连接，如图 9 所示，将电压检测点与电流通路分开，避免走线电阻引入误差。

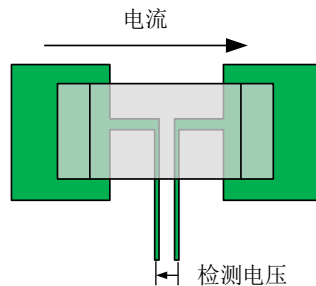


图 9 开尔文连接法

即使采用开尔文连接，电流流入方向与检测点位置仍会影响检测精度。典型情况下，电流方向可分为三类：①电流直线穿过采样电阻，②电流以直角方向流入电阻、并以相同方向流出，③电流以直角方向流入电阻、并以相反方向流出。方向①时，检测点越靠近电阻焊盘中心位置，误差越小；方向②、③时，铜箔对检测结果的影响显著增大，最佳检测点可能会偏离中心位置，具体位置需通过仿真确定。因此，在 PCB 布局时，应优先保证电流路径以直线方式穿越采样电阻，避免直角拐弯；若受布局限制无法实现直线走线，则需通过仿真确定最优检测点位置。

Tips: 采样电阻的精度最终取决于“电阻本身+PCB 走线+检测位置”三者的综合误差。选对了电阻但布局不当，误差照样翻倍。原则上让电流直线穿过电阻，电压检测线从焊盘内侧直接引出，且两条检测线尽量等长对称。

1.7 电阻选型流程总结

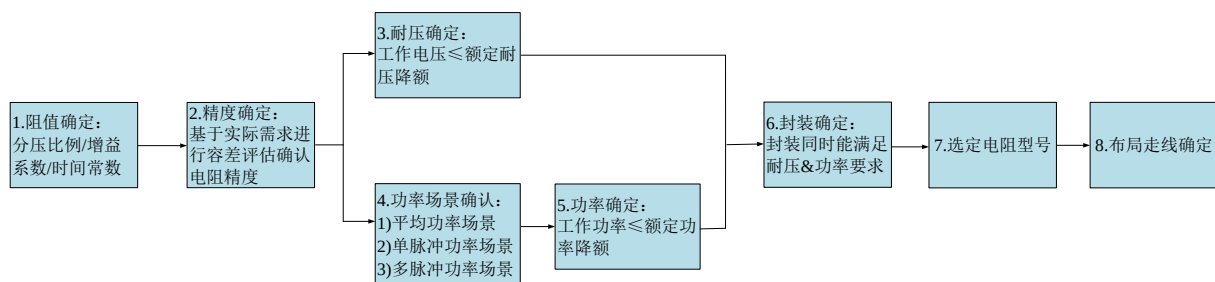


图 10 电阻选型流程图

2 电容

电容 (Capacitor) 是电路构成的主要基础无源器件之一，主要帮助电路实现储能、滤波、耦合、旁路、稳压等功能，工程中常用的电容类型包括：多层陶瓷电容器 (Multilayer Ceramic Capacitor, MLCC)，铝电解电容器、钽电解电容器等。

2.1 电容主要参数

电容选型的第一步，是明确应用场景对容值、精度、等效串联电阻 (Equivalent Series Resistance, ESR)、耐压、温度范围和使用寿命的基本需求。表 5 以 MLCC 电容典型参数为例，展示主要参数：

表 5 MLCC 基本参数示例³

MLCC 基本参数	
电容	22 μ F
容差	$\pm 20\%$
额定电压	10 Vdc
温度特性	X5R
工作温度	-55°C~85°C
封装/外壳	0603 (1608M)
厚度尺寸 (最大值)	0.8mm

2.2 MLCC

MLCC 是由印好内电极的陶瓷介质膜片以错位方式叠合，经高温烧结形成陶瓷芯片，再在芯片两端封上金属外电极，形成类似独石的结构，故也称为独石电容器。其优势在于体积小、无极性、高频特性好、ESR 低。

2.2.1 MLCC 的分类

MLCC 依据介质材料的不同分为三类，其特性对比如下：

表 6 MLCC 特性对比

类别	介质类型	温度特性	直流偏置特性	老化特性	典型应用
Class I 陶瓷电容	非铁电介质	线性，变化极小	几乎无影响	几乎无	振荡器、谐振回路、高频耦合
Class II 陶瓷电容	铁电介质	非线性	显著下降	有老化现象	旁路、去耦、一般滤波
Class III 陶瓷电容	铁电介质	非线性，变化极大 (-82%~+22%)	极为严重	老化明显	对容值稳定性要求极低的场合

Class I 陶瓷电容的温度容量特性 (Temperature Characteristic of Capacitance, TCC) 依据美国电子工业协会 (EIA) 标准采用“字母+数字+字母”代码形式表示，具体含义如表 7 所示。例如，C0G 表示温度容量特性为 $0 \pm 30 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ ；U2J 表示温度容量特性为 $-750 \pm 120 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。

³ 参数示例引自 Murata 的 GRM187R61A226ME15 系列 MLCC 的通用规格书。

表 7 EIA 标准 Class I 陶瓷电容温度容量特性表示含义

Significant Digits of Temperature Coefficient		Multiplier of Temperature Coefficient		Tolerance in ppm/°C	
C	0.0	0	-1	G	±30
M	1.0	1	-10	H	±60
P	1.5	2	-100	J	±120
R	2.2	3	-1000	K	±250
S	3.3	5	+1	L	±500
T	4.7	6	+10	M	±1000
U	7.5	7	+100	N	±2500
		8	+1000		

Class II & III 陶瓷电容的温度容量特性依据美国电子工业协会（EIA）标准，具体字母与数字表示含义如表 8 所示。例如，X7R 表示工作温度范围为-55°C~+125°C且容值变化不超过±15%；Y5V 表示工作温度范围为-30°C~+85°C且容值变化不超过-82%~+22%。相对于 Class II 陶瓷电容，Class III 陶瓷电容的温度特性极差，且容值受直流偏置电压影响严重，依据美国电子工业协会（EIA）标准，结尾字母为 T、U、V 的陶瓷电容均为 Class III 陶瓷电容。

表 8 EIA 标准 Class II & Class III 陶瓷电容温度容量特性表示含义

Minimum Temperature		Maximum Temperature		Capacitance Change Permitted	
X	-55°C	4	+65°C	A	±1.0%
Y	-30°C	5	+85°C	B	±1.5%
Z	+10°C	6	+105°C	C	±2.2%
		7	+125°C	D	±3.3%
		8	+150°C	E	±4.7%
		9	+200°C	F	±7.5%
				P	±10%
				R	±15%
				S	±22%
				T	+22%/-33%
				U	+22%/-56%
				V	+22%/-82%

Tips: Class I 精度最高、最稳定，但容值通常≤10nF；Class II 是工程中最常用的权衡选择，容值可达 μF 级，精度可接受；Class III 虽容值大但稳定性差，仅推荐用于对容值变化不敏感的低成本场合。

2.2.2 MLCC 的关键电气特性

电容在实际电路中并非理想状态，其等效模型为“C+ESL+ESR”，如图 11 所示。因此，使用时需关注其不同频率下的阻抗特性与 ESR 特性，如图 12 所示。

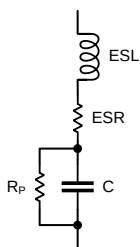
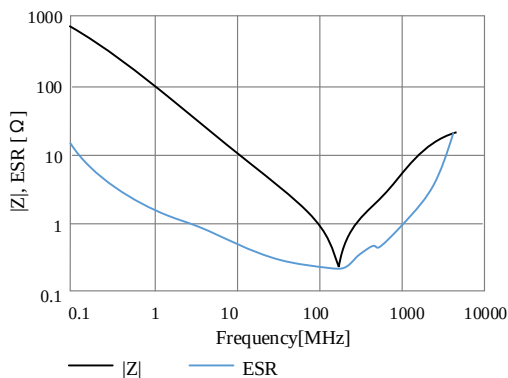


图 11 电容等效模型

图 12 MLCC 的 $|Z|$ 与 ESR 的频率特性曲线示意^[7]

基于该模型可引申出两个关键参数：

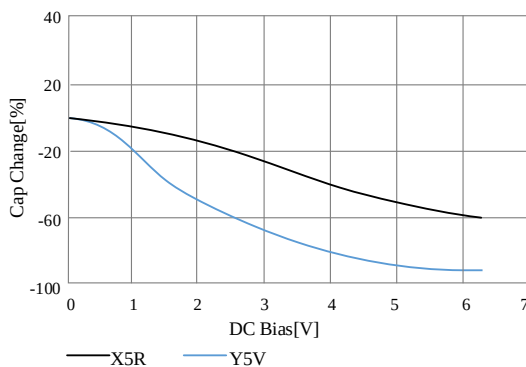
- 1) **损耗角正切 (DF)**：主要反应了电容的发热特性以及频率特性，DF 越小代表发热损耗越低、高频特性越好。

$$\tan \delta = \frac{\text{有功损耗功率}}{\text{无功储能功率}} \approx 2\pi f * C * \text{ESR} \quad (2)$$

- 2) **自谐振频率 (SRF)**：电容工作在 SRF 以下呈容性，以上呈感性，滤波电路中需确保目标频率低于 SRF。

$$f_{\text{SRF}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C * \text{ESL}}} \quad (3)$$

对于 Class II & III 陶瓷电容在实际应用的容值选取时，需要考虑直流偏置电压对陶瓷电容的影响，随着偏置电压上升实际陶瓷电容的有效容值越低，如图 13 所示。故对 Class II & III 陶瓷电容一般推荐额定耐压值至少在直流偏置电压的 2 倍以上。

图 13 MLCC 有效容值与直流偏置电压关系示意^[8]

另外，如上文所描述，不同类型的 MLCC 具有不同的温度容量特性，故电容的温度特性也是应用中需要重点关注的参数。电路设计需要将 MLCC 全温度范围内的容值变化纳入容差分析。

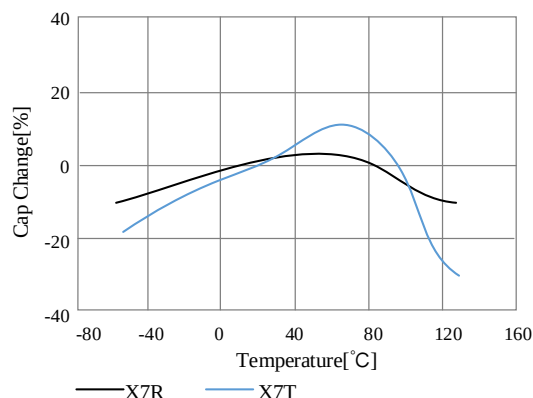


图 14 MLCC 有效容值与温度关系示意^[9]

Tips: 滤波/去耦应用中，不仅要看标称容值，还要确认目标频率下电容呈容性 (<SRF) 且 ESR 足够低；Class II/III 电容的直流偏置效应最为隐蔽：同一颗 22μF/10V 电容在 5V 偏压下可能只剩 10μF，务必查 datasheet 的有效容值-电压曲线。

2.2.3 MLCC 的噪声问题

所有电介质在电场下都会发生机械形变，称为压电逆效应或电致伸缩效应。MLCC 作为开关电源输出滤波电容时，周期性交流电压导致其产生周期性的形变，通过焊盘拉扯 PCB 产生“噪声”，大封装电容（如 1206，1210 等）尤为明显。当该噪声频率处于 20Hz~20kHz 时即可被人耳接收，产生人们都能听见的噪音。

一般开关电源开关频率大多在 100kHz 以上，稳态运行时不会导致噪音的产生。但当负载存在大幅度 20Hz~20kHz 动态变化时，可能引发噪声问题，整机设计时需考虑降噪处理。

Tips: 音频设备、静音场景中，如遇 MLCC 啸叫，可通过选择小封装电容、选用柔性端子 MLCC、改用聚合物电容、或增加外部机械阻尼（如点胶固定）来缓解。

2.3 铝电解电容

铝电解电容以铝金属为正极、表面氧化铝层为介质，按电解质类型分为液体、固态及混合型铝电解电容器。其特点在于大电容，这是通过对铝箔表面进行蚀刻增大表面积，并以埃米级极薄的氧化被膜作为介质而实现的。

三类铝电解电容的特性对比如下：

表 9 铝电解电容特性对比

类型	电解质形态	ESR	寿命	低温特性	典型应用
非固体 (液态)	电解液	较高	有限	差（-40℃容值大幅下降）	通用电源平滑、工业设备
固态	导电高分子	低	显著提升	较好	高频低纹波电源、DC-DC 模块
混合型	电解液+导电高分子	低	较长	较好	汽车电子、高可靠性电源

2.3.1 铝电解电容主要参数

铝电解电容的主要参数如下表所示：

表 10 铝电解电容基本参数示例⁴

铝电解电容基本参数	
工作温度范围	-55°C~+105°C
额定电压范围	6.3V _{DC} ~50V _{DC}
静电容量范围	10μF~1800μF
容量允许公差	±20% (120Hz/20°C)
漏电流	1≤0.01CV 或 3 (μA) (取两者中的较大值, 施加额定电压 2 分钟后测量)
耐久性	在+105°C±2°C下施加额定电压和额定纹波电流 2000 小时后, 在+20°C下测试: - 容量变化率: ≤±30%; - 损耗角正切 (tanδ): 不超过初始限值的 200%; - 漏电流: 不超过初始限值。
高温存放寿命	在+105°C±2°C下无电压存放 1000 小时, 符合上述耐久性限制。
耐焊接热	回流焊接在+20°C下稳定后: - 容量变化率: ≤±10%; - 损耗角正切 (tanδ): 不超过初始限值; - 漏电流: 不超过初始限值。

1) **电压降额**: 铝电解电容的容值几乎不受直流偏置电压影响, 使用时保证最大稳态电压不超过额定值的 90%, 瞬时浪涌电压不超过标称额定电压值, 即符合一般降额标准。

2) **温度特性**: 铝电解电容的容值随温度变化显著。非固体铝电解电容低温下容值下跌, 温度升高容值回升 (如图 15); 同时其 ESR 随温度降低而明显升高 (如图 16)。

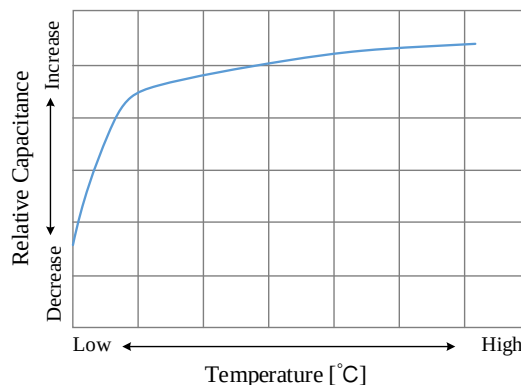


图 15 非固体铝电解电容的容值随温度变化趋势示意

⁴ 参数示例引自 Panasonic 的 EEEFP1V101A 铝电解电容的通用规格书。

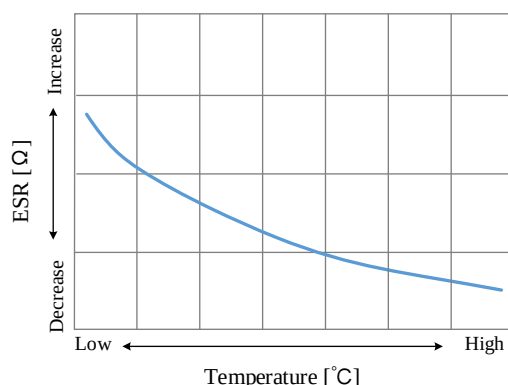


图 16 非固体铝电解电容的 ESR 随温度变化趋势示意

Tips: 低温场景（户外设备、汽车冷启动）中，铝电解电容的实际容值和 ESR 与常温差异巨大，设计时必须按最低工作温度下的实际参数核算纹波电压和环路稳定性。固态/聚合物铝电解电容的低温特性明显优于非固体电容，需以具体 datasheet 为准。

2.3.2 铝电解电容寿命评估

铝电解电容的寿命是选型中必须量化评估的维度。其失效机制是电解液在温度影响下气化，逐渐渗透到封口橡胶中，导致容量下降、ESR 上升，最终开路失效（电解液干涸）。温度是决定寿命的第一要素。

铝电解电容在应用时需结合实际应用场景严格对使用寿命进行评估，对于非固体铝电解电容一般符合“10°C 2 倍的定律”（工作温度每降低 10°C，寿命延长一倍），可按照该原则简单评估，详细寿命评估公式如下所示。

$$L_X = L_0 \times 2^{\frac{T_0 - T_X}{10}} \times 2^{\frac{\Delta T_0 - \Delta T_X}{5}} \quad (4)$$

$$\Delta T_X = \Delta T_0 \times \left(\frac{I_X}{I_0}\right)^2 \quad (5)$$

其中， L_X 为实际使用温度为 T_X 时的预期寿命（h）； L_0 为最高使用温度和额定纹波电流条件下规定的保证寿命（h）； T_0 为最高使用温度（°C）； T_X 为实际使用温度（电容表面温度）（°C）； ΔT_0 为额定纹波电流下的电容内部温升（°C）； ΔT_X 为等效实际纹波电流下的电容内部温升（°C）； I_0 为额定纹波电流（A）； I_X 为等效实际纹波电流（A）。

表 11 纹波电流频率校正系数示例⁵

频率(Hz) 容值(μF)	120	1k	10k	100k
10~470	0.65	0.85	0.95	1.00
560~1800	0.75	0.9	0.95	1.00

等效实际纹波电流通常包含多种频率分量，需按式(6)通过频率校正系数（如表 11），采用线性插值或对数插值计算等效合成：

⁵ 参数示例引自 Panasonic 的 EEEFP1V101A 铝电解电容的通用规格书。

$$I_X = \sqrt{\left(\frac{I_{f1}}{F_{f1}}\right)^2 + \left(\frac{I_{f2}}{F_{f2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{fn}}{F_{fn}}\right)^2} \quad (6)$$

其中， F_{fn} 为对应纹波电流频率的校正系数； I_{fn} 为特定频率下的纹波电流分量。

以如下电容规格为例：

最高使用温度和额定纹波电流条件下规定的保证寿命	3000h
最高使用温度	105℃
实际使用温度	85℃
额定纹波电流	1.9A (100kHz)
实际纹波电流	0.95A (10kHz)
额定纹波电流下的电容内部温升	5℃

等效实际纹波电流：

$$I_X = \frac{0.95A}{0.95} = 1A \quad (7)$$

电容内部温升：

$$\Delta T_X = 5^\circ\text{C} \times \left(\frac{1A}{1.9A}\right)^2 = 1.385^\circ\text{C} \quad (8)$$

最终该应用条件下的铝电解电容寿命为：

$$L_X = 3000h \times 2^{\frac{105^\circ\text{C}-85^\circ\text{C}}{10}} \times 2^{\frac{5^\circ\text{C}-1.385^\circ\text{C}}{5}} \approx 19807h \quad (9)$$

固态/聚合物铝电解电容的寿命显著优于非固体电容，一般情况下仅考虑环境温度因素即可，无需复杂的纹波电流核算。不同厂商的聚合物电容寿命计算方式略有差异，需以厂家 datasheet 为准。

Tips: 铝电解电容的寿命评估温度是关键，纹波需算等效值，计算所得寿命低于设备预期工作年限，则需选更高耐温等级、更大封装或改用固态/混合型电容。

2.3.3 生命末期设计余量

铝电解电容在生命末期，ESR 显著升高、容值显著下降。很多用电设备在生命末期出现异常，很大程度与此有关。开关电源等对阻抗敏感的电路设计中，需将生命末期的参数偏移纳入设计裕量。

Tips: 在电源输出滤波等高可靠性场景中，即使根据寿命公式计算满足需求，也应额外预留 20%~30% 的 ESR 余量，确保生命末期仍能正常工作。

2.4 电容选型流程总结

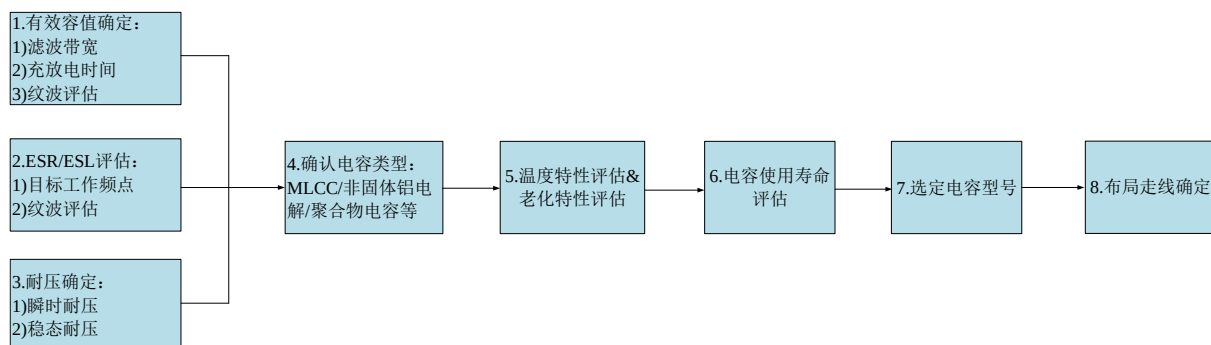


图 17 电容选型流程图

3 功率电感

电感（Inductor）是电子电路中的三大基础无源器件之一，能够把电能转化为磁能并存储起来。功率电感是电源系统中的核心器件，利用电感特性实现电压转换和滤波，其性能直接决定电源的转换效率、输出纹波和带载能力。如何选择合适的电感，是电源设计的关键步骤。

3.1 功率电感主要参数

电感选型的第一步，是明确应用场景对感值、精度、直流电阻（Direct Current Resistance, DCR）、饱和电流、温升电流、自谐振频率（Self-Resonant Frequency, SRF）和耐压的基本需求。表 12 以一颗典型的功率电感为例，展示其主要参数：

表 12 功率电感基本参数示例⁶

功率电感基本参数			
特性	测试条件	数值	公差/备注
电感值 L	100kHz/10mA	6.8μH	±20%
额定电流 I _{RP,40K}	ΔT=40K	6.5A	最大值
饱和电流@10% I _{SAT,10%}	IΔL/L<10%	3.2A	典型值
饱和电流@30% I _{SAT,30%}	IΔL/L<30%	6.8A	典型值
直流电阻 R _{DC}	@20°C	28.3mΩ	典型值
直流电阻 R _{DC}	@20°C	31.7mΩ	最大值
自谐振频率 f _{SRF}		18MHz	典型值
操作电压 V _{OP}	DC	80V	最大值

Tips: 感值决定纹波大小，DCR 决定直流损耗，饱和电流决定峰值限流点，温升电流决定热安全，四项缺一不可。自谐振频率需远高于开关频率。

3.2 电感的饱和特性

电感的核心风险在于磁饱和。随着电感电流上升，磁场强度相应提高，磁芯磁导率下降，导致电感量下降。如图 18 所示，电感感量随电流增加呈下降趋势。极端情况下，电感趋于“纯导线”，即常说的电感饱和。电感饱和瞬间，感抗消失，电流急剧上升，可能损坏功率器件和负载。在电源系统设计时，必须避免该情况的发生。

⁶ 参数示例引自 Würth 的 7443845030068 功率电感的通用规格书。

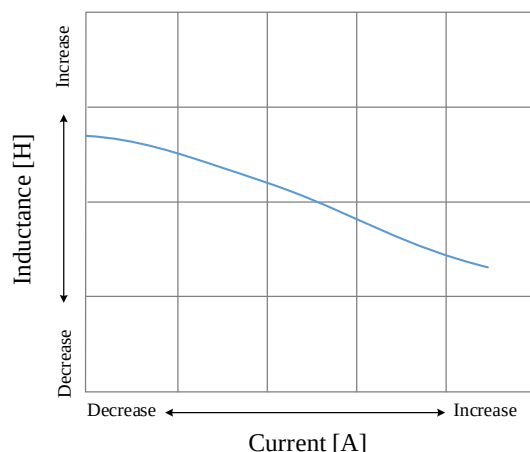


图 18 电感感量受电感电流的影响示意

Tips: 电源设计时，电感峰值电流不得超过饱和电流（ I_{SAT} ）的标称值，并预留 20% 以上裕量。若系统存在负载瞬变，还需将瞬态过冲电流纳入峰值电流计算。

3.3 电感的温升特性

电感的额定电流（温升电流）是评估电感散热特性的重要指标，通常定义为：不借助外部散热条件下，电感施加直流电流后整体温升达到限定值（常规 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ）时的电流值。不过由于其测试条件为直流电流，故该参数仅为散热能力的参考；实际电源系统中，功率电感中同时存在交流成分，交流部分产生的热损耗无法通过该参数得到正确评价。

如图 19 所示电感温升曲线，实际温升是铜损与铁损之和共同作用的结果。

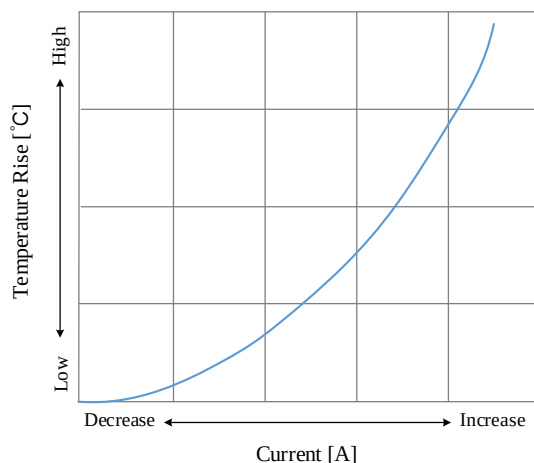


图 19 电感温升曲线示意

Tips: 温升电流是热安全的“底线参数”，实际应用中建议负载平均电流不超过 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 时的温升电流的 80%。对于高频或大纹波电流应用，需额外评估交流损耗带来的附加温升。

3.4 电感的等效模型与自谐振频率

实际电感并非理想器件，除串联电阻 DCR 外，因匝间/层间存在寄生电容，其等效模型为“ $L+DCR+C$ ”如图 20 所示。

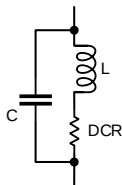


图 20 电感等效模型

由上述等效模型可得出自谐振频率（SRF）：

$$f_{\text{SRF}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (10)$$

阻抗特性如图 21 所示。工作频率小于 SRF，电感呈感性（阻抗随频率上升而上升），可用作功率转换；工作频率约等于 SRF，电感呈纯阻性（阻抗最大），滤波效果最佳；工作频率大于 SRF，电感呈容性（阻抗随频率上升而下降），丧失电感功能。

Tips: 作为功率电感使用，必须保证整个工作频段电感始终在感性区间。一般建议电源的开关频率不超过 SRF 的 50%。

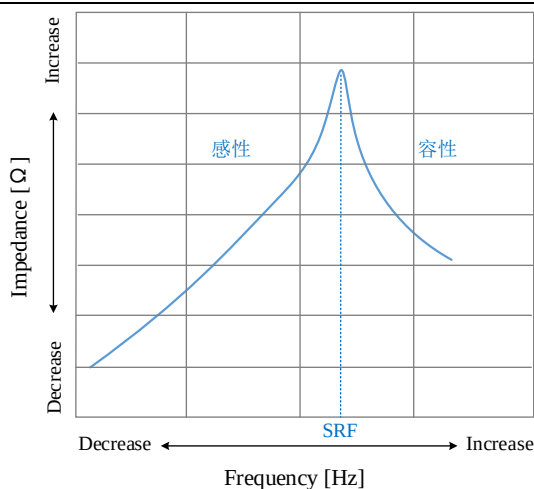


图 21 电感的阻抗特性示意

3.5 电感的耐压特性

电感的耐压主要取决于漆包线绝缘层，层间绝缘材料、磁芯的介电强度等。不同类型的电感耐压能力差异显著：一般的绕线电感天然耐压就极高（几百伏以上），多数场景无需过多考虑耐压；一体成型电感（线圈埋入磁粉压制而成）其绝缘特性受到生产制程影响，部分产品耐压仅为几十伏。使用此类电感时必须查阅 datasheet 确认最大工作电压 V_{OP} ，并确保稳态电压不超过额定值的 80%。

3.6 功率电感的损耗分析

功率电感的损耗可以分为**铜损**（绕组损耗）和**铁损**（磁芯损耗）两大类。准确理解两种损耗的构成，是优化电源效率和进行热评估的基础。

3.6.1 铜损

铜损由直流损耗和交流损耗两部分构成。

1) **直流损耗**：由直流电阻 DCR 产生，遵循焦耳定律。DCR 越小（线径越粗、绕组越短）这部

分的损耗越小。

2) **交流损耗**：高频电流流过绕组时，因趋肤效应和邻近效应，绕组交流电阻（ACR）远大于DCR，产生额外的交流铜损。

- **趋肤效应**：交变电流通过导线时，电流在导线横截面上分布不均匀。导体表面电流密度大于中心密度，且频率越高趋势越明显。有效导电截面积减小， $ACR \gg DCR$ 。
- **邻近效应**：多根导线并排或分层绕制时，相邻导线产生的交变磁场在彼此内部感应涡流，导致电流被挤压在导线贴近邻线的一侧，有效导电面积大幅缩小，ACR 进一步增大。

Tips：根据绕组的铜线横截面积、长度和匝数可准确评估直流铜损；交流铜损则需结合工作频率下的 ACR/DCR 比值进行估算，该比值通常由电感厂商提供或通过阻抗分析仪测量获得。

3.6.2 铁损

铁损由磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗三部分组成。

1) **磁滞损耗**：磁芯材料在磁化过程中，部分能量转化为势能，另一部分因克服材料内部摩擦转化为热能。磁滞回线的面积直观反映了磁滞损耗的大小（面积越大，损耗越高）。主要影响因素包括最大工作磁通密度（B）、最大磁场强度（H）、剩磁（Br）和矫顽力（Hc）。通过增大磁芯截面积，优化磁路设计、合理开气隙以降低磁通密度摆幅，可有效改善磁滞损耗。

2) **涡流损耗**：磁芯在交变磁场中产生感应电势，因磁芯材料电阻率有限，感应电势会驱动涡流流动，能量以热能形式耗散。采用高电阻率材料（如铁氧体）或将磁芯制成薄片状（如硅钢片叠片）可显著降低涡流损耗。

3) **剩余损耗**：主要由磁化弛豫效应或磁性滞后效应引起，通常较低，工程中可忽略不计。

由于各家电感厂商一般无法提供磁芯材料的详细关键参数，实际应用中难以通过理论计算获得铁损的准确值。部分一线厂商提供了电感损耗计算工具或损耗曲线图，可依据实际工况给出对应电感的铁损损耗，辅助用户进行相关设计评估。

Tips：高频应用（>1MHz）中铁损占比急剧上升，需优先选用低损耗磁芯材料；低频大电流应用中铜损占主导，需优先降低 DCR。实际工程中最可靠的方法是利用厂商提供的在线仿真工具等进行评估，而非自行推导。

3.7 电感选型流程总结

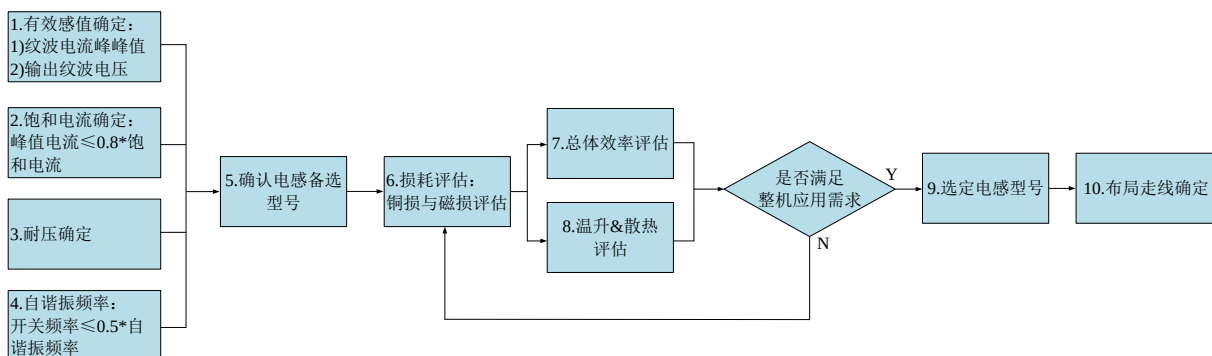


图 22 电感选型流程总结

4 参考文献

- [1] International Electrotechnical Commission. Marking codes for resistors and capacitors: IEC 60062[S]. Edition 6.0. 2016-07.
- [2] International Electrotechnical Commission. Preferred number series for resistors and capacitors: IEC 60063[S]. Edition 3.0. 2015-03.
- [3] 国防科学技术工业委员会. 元器件降额准则: GJB/Z 35-1993[S]. 1993-09-30.
- [4] KOA Corporation. 电阻器的脉冲功率耐性技术说明[EB]. 2024-08-28.
- [5] KOA Corporation. 片式电阻器的发热和温升技术说明[EB]. 2026-03-30.
- [6] KOA Corporation. 使用电流检测电阻器检测电压技术资料[EB]. 2018-12-20.
- [7] Murata Manufacturing Co., Ltd. What are impedance/ESR frequency characteristics in capacitors? [EB]. 2013-02-14.
- [8] Murata Manufacturing Co., Ltd. The voltage characteristics of electrostatic capacitance[EB]. 2012-11-28.
- [9] Murata Manufacturing Co., Ltd. What is the temperature characteristics of ceramic capacitors[EB]. 2012-10-15.

5 附录

5.1 E-96 系列系数

E-96 Decode Value					
100	102	105	107	110	113
115	118	121	124	127	130
133	137	140	143	147	150
154	158	162	165	169	174
178	182	187	191	196	200
205	210	215	221	226	232
237	243	249	255	261	267
274	280	287	294	301	309
316	324	332	340	348	357
365	374	383	392	402	412
422	432	442	453	464	475
487	499	511	523	536	549
562	576	590	604	619	634
649	665	681	698	715	732
750	768	787	806	825	845
866	887	909	931	953	976

5.2 E-96 系列 Code 对应关系

E-96 Multiplier Code						
Code	1	2	3	4	5	6
R-Value	100	102	105	107	110	113
Code	7	8	9	10	11	12
R-Value	115	118	121	124	127	130
Code	13	14	15	16	17	18
R-Value	133	137	140	143	147	150
Code	19	20	21	22	23	24
R-Value	154	158	162	165	169	174
Code	25	26	27	28	29	30
R-Value	178	182	187	191	196	200
Code	31	32	33	34	35	36
R-Value	205	210	215	221	226	232
Code	37	38	39	40	41	42
R-Value	237	243	249	255	261	267
Code	43	44	45	46	47	48
R-Value	274	280	287	294	301	309
Code	49	50	51	52	53	54
R-Value	316	324	332	340	348	357
Code	55	56	57	58	59	60
R-Value	365	374	383	392	402	412
Code	61	62	63	64	65	66
R-Value	422	432	442	453	464	475
Code	67	68	69	70	71	72
R-Value	487	499	511	523	536	549
Code	73	74	75	76	77	78
R-Value	562	576	590	604	619	634
Code	79	80	81	82	83	84
R-Value	649	665	681	698	715	732
Code	85	86	87	88	89	90
R-Value	750	768	787	806	825	845
Code	91	92	93	94	95	96
R-Value	866	887	909	931	953	976

Code	A	B	C	D	E	F	G	H	X	Y	Z
Multiplier	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³

修订记录

注意:历史版本的页码可能与当前版本的页码不同。

日期	版本	描述
2026-09-22	REV.A	首次发布

重要声明

本文中如涉及本公司具体产品型号,SGMICRO 保留其更改电路设计、产品规格和产品描述的权利,恕不另行通知。
本文档内容仅供参考。本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何承诺。对于本文中可能出现的错误,以及因本文档提供的信息和使用本文档而造成的任何附带或间接损失,本公司不作任何明示或暗示的陈述和保证。
此文档未授予任何知识产权许可。除了 SGMICRO 在其产品的销售条款和条件中声明的责任外,本公司概不承担任何其他责任。

www.sg-micro.com

联系方式

圣邦微电子(北京)股份有限公司

地址:北京市海淀区西三环北路 87 号国际财经中心 D
座 11 层
邮编:100089
电话:010-88825716/17

深圳办事处

地址:深圳市南山区科技园高新南六道 6 号迈科龙大厦
15 层
邮编:518063
电话:0755-26715323

上海办事处

地址:上海市徐汇区漕溪北路 88 号圣爱大厦 1706 室
邮编:200030
电话:021-64396434