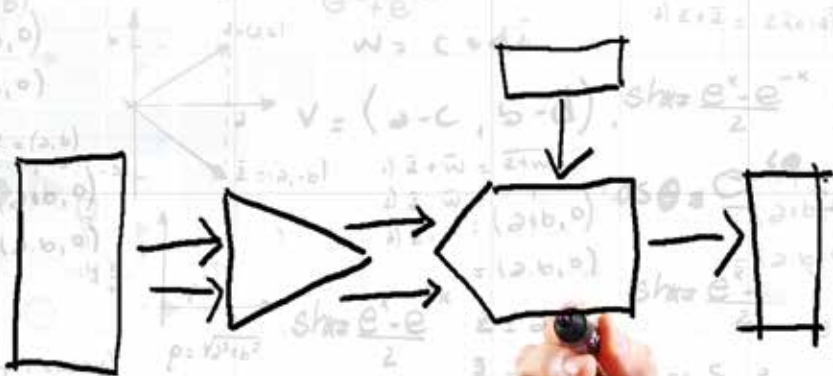


# 模拟工程师

口袋参考书

作者 Art Key 和 Tim Green，编辑



电子版下载地址：

[www.ti.com.cn/analogrefguide](http://www.ti.com.cn/analogrefguide)

THESE MATERIALS ARE PROVIDED "AS IS." TI MAKES NO WARRANTIES OR REPRESENTATIONS WITH REGARD TO THESE MATERIALS OR USE OF THESE MATERIALS, EXPRESS, IMPLIED OR STATUTORY, INCLUDING FOR ACCURACY, COMPLETENESS, OR SECURITY. TI DISCLAIMS ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, QUIET ENJOYMENT, QUIET POSSESSION, AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS WITH REGARD TO THESE MATERIALS OR USE THEREOF. TI SHALL NOT BE LIABLE FOR AND SHALL NOT DEFEND OR INDEMNIFY YOU AGAINST ANY THIRD PARTY CLAIM THAT RELATES TO OR IS BASED ON THESE MATERIALS. IN NO EVENT SHALL TI BE LIABLE FOR ANY ACTUAL, SPECIAL, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR INDIRECT DAMAGES, HOWEVER CAUSED, ON ANY THEORY OF LIABILITY AND WHETHER OR NOT TI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES, ARISING IN ANY WAY OUT OF THESE MATERIALS OR YOUR USE OF THESE MATERIALS.

---

**模拟工程师口袋参考书**

**第四版**

**第四版**

Art Kay 和 Tim Green

特别感谢以下人员提供的技术支持和审查工作：

Kevin Duke

Rafael Ordonez

John Caldwell

Collin Wells

Ian Williams

Thomas Kuehl

©Copyright 2014, 2015 德州仪器 (TI) 公司。版权所有。

## 编者的话

这本口袋参考书是常用板级和系统级设计公式的实用快速指南。收集的这些公式是基于50多年的模拟板级和系统级专业知识。数年间，通过参考和查阅一个装满打印文件的文件夹，我们汇总整理了这本口袋参考书中的大部分材料。这些磨损严重的纸张已经被精心整理，而这部指南中提供的信息也都装订成册，不会再轻易遗失了。

以下是所包含的主要领域的简要概述：

- 关键常数与换算
- 分立元件
- AC和DC模拟方程式
- 运算放大器基本配置
- 运算放大器带宽和稳定性
- 传感器概述
- PCB传输线R, L, C
- 导线R, L, C
- 二进制、十六进制、十进制格式
- A/D和D/A转换

我们希望这些收集的公式对您同样有用。请将您对于下一版模拟工程师口袋参考书的意见和/或想法发至[artkay\\_timgreen@list.ti.com](mailto:artkay_timgreen@list.ti.com)

其它资源：

- 浏览TI Precision Lab ([www.ti.com.cn/precisionlabs](http://www.ti.com.cn/precisionlabs))，为模拟工程师准备的综合在线培训课程，将原理应用到实际环境、动手示例中。
- 在TI Designs—高精度参考设计库中搜索全部板级和系统级电路 ([www.ti.com.cn/precisiondesigns](http://www.ti.com.cn/precisiondesigns))。
- 在Precision Hub中阅读TI高精度模拟专家撰写的指导博客 ([www.ti.com.cn/thehub](http://www.ti.com.cn/thehub))。
- 在德州仪器在线技术支持社区中寻找解决方案、获得帮助、并与同行工程师和TI专家们分享知识、解决问题 (<http://www.deyisupport.com>)。

<b>换算</b> .....	<b>7</b>
物理常数.....	8
标准十进制前缀.....	9
公制换算.....	9
温度换算.....	10
误差换算 (ppm和百分比).....	10
<b>分立元件</b> .....	<b>11</b>
电阻器色标.....	12
标准电阻器值.....	13
实际电容器模型和技术规格.....	14
实际电容器与频率之间的关系.....	15
电容器类型概述.....	16
标准电容值.....	17
电容值标记与公差.....	17
二极管与LED.....	18
<b>模拟</b> .....	<b>19</b>
电容器方程式 (串联、并联、电荷、能量).....	20
电感器方程式 (串联、并联、能量).....	21
电容器充电与放电.....	23
RMS与平均电压定义.....	24
RMS与平均电压示例.....	24
对数数学定义.....	27
dB定义.....	28
对数尺度.....	29
极点与零点定义和示例.....	30
相移时间.....	34
<b>放大器</b> .....	<b>35</b>
基本运算放大器配置.....	36
运算放大器带宽.....	41
满功率带宽.....	42
小信号阶跃响应.....	43
噪声方程式.....	44
相位裕量.....	48
稳定性开环SPICE分析.....	50
仪表放大器滤波器.....	53
<b>PCB和导线</b> .....	<b>55</b>
PCB导体间距.....	56
内层PCB传输线的自发热.....	57
1oz和2oz纯铜的PCB传输线阻抗.....	58
封装类型和尺寸.....	60
PCB平行电路板电容.....	61
PCB微带线电容和电感.....	62
PCB邻近铜传输线电容.....	63
PCB过孔电容和电感.....	64
普通同轴电缆技术规格.....	65
同轴电缆方程式.....	66
不同类型导线 (AWG) 单位长度电阻.....	67
不同类型导线的最大电流.....	68
<b>传感器</b> .....	<b>69</b>
温度传感器概述.....	70
热敏电阻.....	71
电阻式温度检测器 (RTD).....	72
二极管温度特性.....	74
热电偶 (J和K).....	76
<b>A/D转换</b> .....	<b>81</b>
二进制/十六进制换算.....	83
A/D和D/A转换函数 (LSB, 数据格式, FSR).....	84
量化误差.....	90
信噪比 (SNR).....	91
总谐波失真 (THD).....	92
信噪比与失真 (SINAD).....	94
有效位数 (ENOB).....	94
无噪声分辨率与有效分辨率.....	95
建立时间 (原文为setting time) 与换算精度.....	95



## 换算

- 标准十进制前缀
- 公制换算
- 温标换算
- 误差换算 (ppm和百分比)

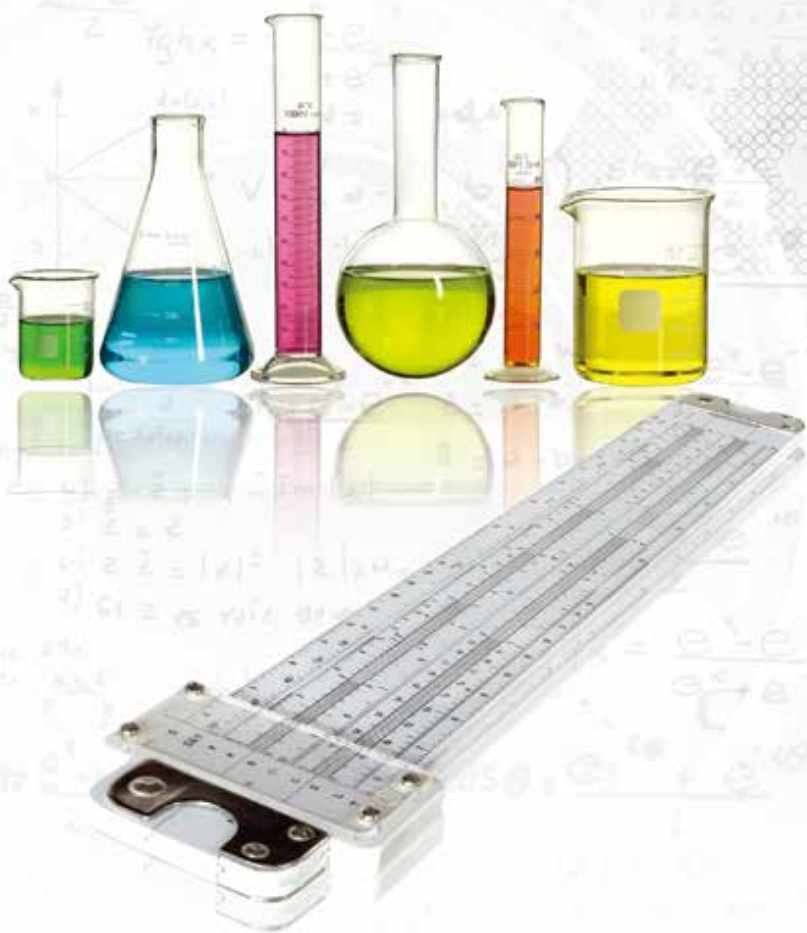


表1: 物理常数

常量	符号	值	单位
真空中的光速	c	$2.997\ 924\ 58 \times 10^8$	m/s
绝对介电常数	$\epsilon_0$	$8.854\ 187\ 817\ 620 \times 10^{-12}$	F/m
真空介电常数	$\mu_0$	$1.256\ 637\ 0614 \times 10^{-6}$	H/m
普朗克常数	h	$6.626\ 069\ 57 \times 10^{-34}$	J•s
玻尔兹曼常数	k	$1.380\ 648\ 8 \times 10^{-23}$	J/K
法拉第常数	F	$9.648\ 533\ 99 \times 10^4$	C/mol
阿伏伽德罗常数	$N_A$	$6.022\ 141\ 29 \times 10^{23}$	1/mol
统一原子质量单位	$m_u$	$1.660\ 538\ 921 \times 10^{-27}$	kg
电子电荷	q	$1.602\ 176\ 565 \times 10^{-19}$	C
电子静止质量	$m_e$	$9.109\ 382\ 15 \times 10^{-31}$	kg
质子质量	$m_p$	$1.672\ 621\ 777 \times 10^{-27}$	kg
引力常数	G	$6.673\ 84 \times 10^{-11}$	Nm <sup>2</sup> /kg <sup>2</sup>
标准地心引力	$g_n$	9.806 65	m/s <sup>2</sup>
冰点	$T_{ice}$	273.15	K
最大水密度	$\rho$	$1.00 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>
水银密度 (0° C)	$\rho_{Hg}$	$1.362\ 8 \times 10^4$	kg/m <sup>3</sup>
气体常数	R	8.314 462 1	J/(K•mol)
空气中的声速 (273° K时)	$c_{air}$	$3.312 \times 10^2$	m/s

表2: 标准十进制前缀

乘子	前缀	缩写
$10^{12}$	tera	T
$10^9$	giga	G
$10^6$	mega	M
$10^3$	kilo	k
$10^{-3}$	milli	m
$10^{-6}$	micro	μ
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a



**表3: 英制到公制换算**

单位	符号	等量	单位	符号
英寸	in	25.4mm/in	毫米	mm
密耳	mil	0.0254mil/mm	毫米	mm
英尺	ft	0.3048m/ft	米	M
码	yd	0.9144m/yd	米	m
英里	mi	1.6093km/mi	公里	km
圆密耳	cir mil	5.067x10 <sup>-4</sup> mm <sup>2</sup> /cir mil	平方毫米	mm <sup>2</sup>
平方码	yd <sup>2</sup>	0.8361m <sup>2</sup>	平方米	m <sup>2</sup>
品脱	pt	0.5682L/pt	升	L
盎司	oz	28.35g/oz	克	g
磅	lb	0.4536kg/lb	公斤	kg
卡路里	cal	4.184J/cal	焦耳	J
马力	hp	745.7W/hp	瓦特	W

**表4: 公制到英制换算**

单位	符号	换算	单位	符号
毫米	mm	0.0394in/mm	英寸	in
毫米	mm	39.4mm/mil	密耳	mil
米	M	3.2808ft/m	英尺	ft
米	m	1.0936yd/m	码	yd
公里	km	0.6241mi/km	英里	mi
平方毫米	mm <sup>2</sup>	1974 cir mil/mm <sup>2</sup>	圆密耳	cir mil
平方米	m <sup>2</sup>	1.1960yd <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	平方码	yd <sup>2</sup>
升	L	1.7600pt/L	品脱	pt
克	g	0.0353oz/g	盎司	oz
公斤	kg	2.2046lb/kg	磅	lb
焦耳	J	0.239cal/J	卡路里	cal
瓦特	W	1.341x10 <sup>-3</sup> hp/W	马力	hp

**示例**

将 10mm 换算为密耳值。

**答案**

$$10 \text{ mm} \times 39.4 \frac{\text{mil}}{\text{mm}} = 394 \text{ mil}$$

表5: 温度换算

$$\begin{aligned} ^\circ\text{C} &= \frac{5}{9}(\text{°F} - 32) && \text{华氏度到摄氏度} \\ ^\circ\text{F} &= \frac{9}{5}(\text{°C}) + 32 && \text{摄氏度到华氏度} \\ \text{K} &= \text{°C} + 273.15 && \text{摄氏度到开} \\ \text{°C} &= \text{K} - 273.15 && \text{开到摄氏度} \end{aligned}$$

表6: 误差换算

$\text{Error}(\%) = \frac{\text{Measured} - \text{Ideal}}{\text{Ideal}} \times 100$	测得值的误差
$\text{Error}(\% \text{ FSR}) = \frac{\text{Measured} - \text{Ideal}}{\text{Full-scale range}} \times 100$	误差占满量程范围的百分比
$\% = \frac{\text{ppm}}{10^6} \times 100$	百万分率转换为百分比
$\text{m}\% = \frac{\text{ppm}}{10^6} \times 100 \times 1000$	百万分率转换为千分比
$\text{ppm} = \% \times 10^4$	百分比转换为百万分率
$\text{ppm} = \text{m}\% \times 10$	千分比转换为百万分率

**示例**

当理想值为 0.1V，范围为 5V 时，计算 0.12V 测量值的误差。

**答案**

$\text{Error}(\%) = \frac{0.12\text{V} - 0.1\text{V}}{0.1\text{V}} \times 100 = 20\%$	测量值的误差
$\text{Error}(\% \text{ FSR}) = \frac{0.12 - 0.1\text{V}}{5\text{V}} \times 100 = 0.4\%$	占 FSR 的百分比

**示例**

将 10ppm 转换为百分比和千分比。

**答案**

$\frac{10 \text{ ppm}}{10^6} \times 100 = 0.001\%$	百万分率转换为百分比
$\frac{10 \text{ ppm}}{10^6} \times 100 \times 1000 = 1 \text{ m}\%$	百万分率转换为千分比

## 分立元件

- 电阻器色标
- 标准电阻器值
- 电容技术规格
- 电容类型概述
- 标准电容值
- 电容标记和公差

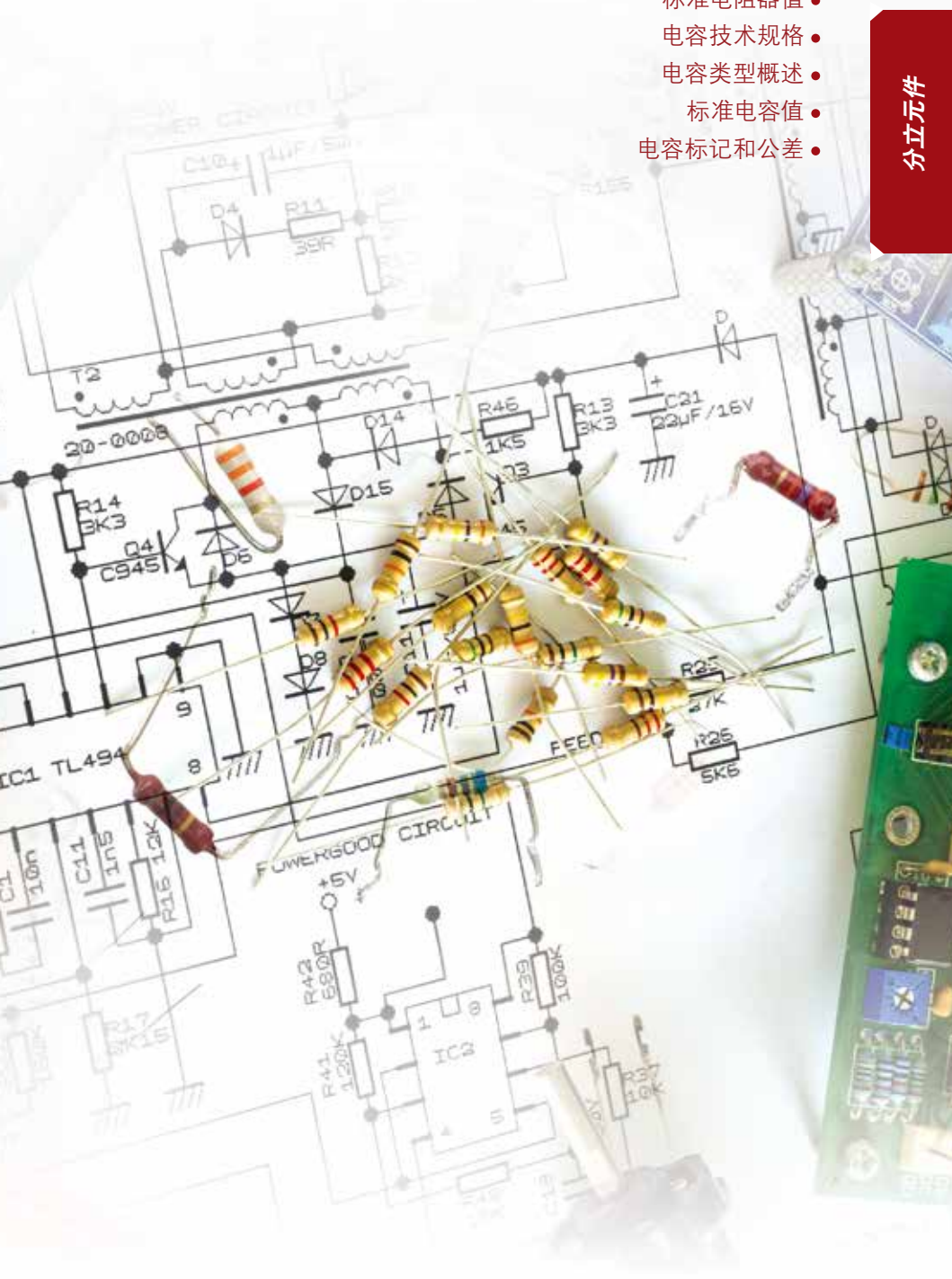


表7: 电阻器色标

颜色	代表的数字	有效值后0的个数	公差	温度系数	故障率
黑色	0	0		250	
棕色	1	1	1%	100	1
红色	2	2	2%	50	0.1
橙色	3	3		15	0.01
黄色	4	4		25	0.001
绿色	5	5	0.5%	20	
蓝色	6	6	0.25%	10	
紫色	7	7	0.1%	5	
灰色	8	8	0.05%	1	
白色	9	9			
金色	无有效数字	-1	5%		
银色	无有效数字	-2	10%		
无色带	无有效数字	无有效数字	20%		

4色带示例: 黄紫橙银表示4、7和3个0。即, 一个47k $\Omega$ , 10%的电阻器。

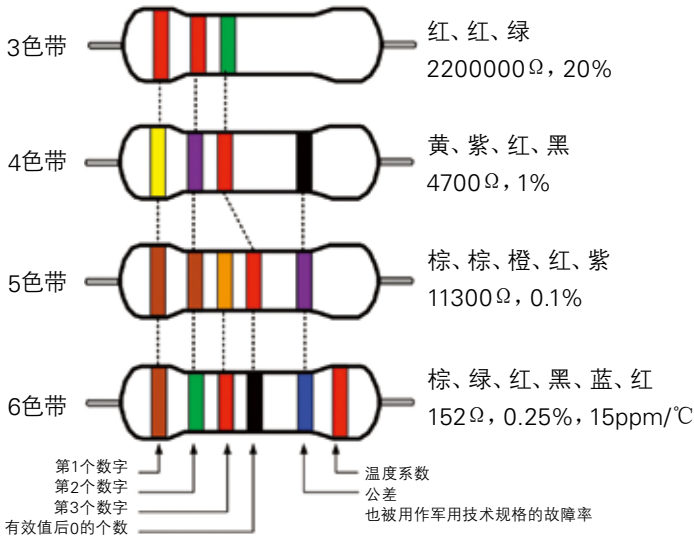


图1: 电阻器色标

表8: 标准电阻器值

10至100十进位的标准电阻值

0.1%	1%	2%	0.1%	0.25%	0.5%	1%	2%	5%	10%	0.1%	0.25%	0.5%	1%	2%	5%	10%	0.1%	0.25%	0.5%	1%	2%	5%	10%
10.0	10.0	10	10.0	14.7	14.7	21.5	21.5	31.6	31.6	31.6	46.4	46.4	46.4	46.4	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1
10.1			10.1	14.9		21.8		32.0			47.0			47			69.0						
10.2	10.2	10.2	10.2	15.0	15.0	22.1	22.1	32.4	32.4		47.5			47.5	69.8	69.8							
10.4			10.4	15.2		22.3		32.8			48.1			48.1	70.6	70.6							
10.5	10.5	10.5	10.5	15.4	15.4	22.6	22.6	33.2	33.2		48.7			48.7	71.5	71.5							
10.6			10.6	15.6		22.9		33.6			49.3			49.3	72.3	72.3							
10.7	10.7	10.7	10.7	15.8	15.8	23.2	23.2	34.0	34.0		49.9			49.9	73.2	73.2							
10.9			10.9	16.0		23.4		34.4			50.5			50.5	74.1	74.1							
11.0	11.0	11	11.0	16.2	16.2	23.7	23.7	34.8	34.8		51.1			51.1	75.0	75.0							75
11.1			11.1	16.4		24.0		35.2			51.7			51.7	75.9	75.9							
11.3	11.3	11.3	11.3	16.5	16.5	24.3	24.3	35.7	35.7		52.3			52.3	76.8	76.8							
11.4			11.4	16.7		24.6		36.1			53.0			36	77.7	77.7							
11.5	11.5	11.5	11.5	16.9	16.9	24.9	24.9	36.5	36.5		53.6			53.6	78.7	78.7							
11.7			11.7	17.2		25.2		37.0			54.2			54.2	79.6	79.6							
11.8	11.8	11.8	11.8	17.4	17.4	25.5	25.5	37.4	37.4		54.9			54.9	80.6	80.6							
12.0			12.0	17.6		25.8		37.9			55.6			55.6	81.6	81.6							
12.1	12.1	12.1	12.1	17.8	17.8	26.1	26.1	38.3	38.3		56.2			56.2	82.5	82.5							82
12.3			12.3	18.0		26.4		38.8			56.9			56.9	83.5	83.5							
12.4	12.4	12.4	12.4	18.2	18.2	26.7	26.7	39.2	39.2		57.6			57.6	84.5	84.5							
12.6			12.6	18.4		27.1		39.7			58.3			58.3	85.6	85.6							
12.7	12.7	12.7	12.7	18.7	18.7	27.4	27.4	40.2	40.2		59.0			59.0	86.6	86.6							
12.9			12.9	18.9		27.7		40.7			59.7			59.7	87.6	87.6							
13.0	13.0	13	13.0	19.1	19.1	28.0	28.0	41.2	41.2		60.4			60.4	88.7	88.7							
13.2			13.2	19.3		28.4		41.7			61.2			61.2	89.8	89.8							
13.3	13.3	13.3	13.3	19.6	19.6	28.7	28.7	42.2	42.2		61.9			61.9	90.9	90.9							91
13.5			13.5	19.8		29.1		42.7			62.6			62.6	92.0	92.0							
13.7	13.7	13.7	13.7	20.0	20.0	29.4	29.4	43.2	43.2		63.4			63.4	93.1	93.1							
13.8			13.8	20.3		29.8		43.7			64.2			64.2	94.2	94.2							
14.0	14.0	14.0	14.0	20.5	20.5	30.1	30.1	44.2	44.2		64.9			64.9	95.3	95.3							
14.2			14.2	20.8		30.5		44.8			65.7			65.7	96.5	96.5							
14.3	14.3	14.3	14.3	21.0	21.0	30.9	30.9	45.3	45.3		66.5			66.5	97.6	97.6							
14.5			14.5	21.3		31.2		45.9			67.3			67.3	98.8	98.8							

## 实际电容器模型和技术规格

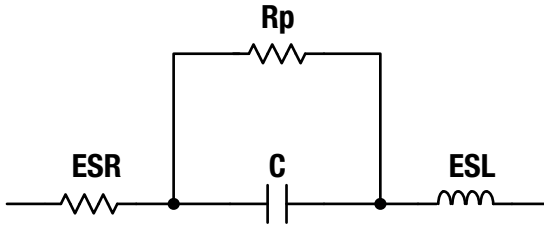


图2: 实际电容器模型

表9: 电容器技术规格

参数	说明
C	电容器的标称值 表11中列出了标准电容值
ESR	等效串联电阻 理想值为0 陶瓷电容器具有最佳的ESR（通常为毫欧级）。钽电解电容器的ESR为数百毫欧，而铝电解电容器的ESR为欧姆级。
ESL	等效串联电感 理想值为0 ESL范围在100pH至10nH之间
Rp	Rp为并联泄露电阻（或称为绝缘电阻） 理想值为无限小 其范围可以从某些电解电容器的数十兆欧，至陶瓷电容器的几十千兆欧。
电压额定值	可以施加到电容器上的最大电压 超过这个值会损坏电容器
电压系数	电容随施加电压的变化值，单位ppm/V 高压系数会引入失真 COG电容器具有最低的系数 在把电容器用于信号处理（诸如滤波）的应用中，电压系数最重要
温度系数	电容值在温度范围内的变化率，单位ppm/°C 理想情况下，温度系数为0 最大指定漂移值通常在10至100ppm/°C的范围内，或者更大，这取决于电容器类型（详细内容请见表10）

## 实际电容器模型和技术规格

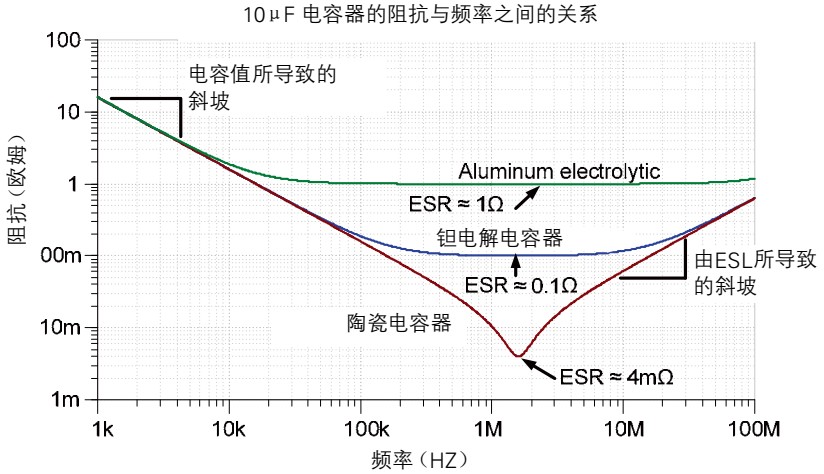


图3: ESR和ESL对于电容器频率响应的影响

表10: 电容器类型概述

电容器类型	说明
COG/NPO (1类陶瓷电容器)	用于信号路径、滤波、低失真、音频和高精度应用中 有限电容范围: 0.1pF至0.47 $\mu$ F 最低温度系数: $\pm 30\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 低压系数 最小压电效应 良好公差: $\pm 1\%$ 至 $\pm 10\%$ 温度范围: $-55^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$ ( $150^\circ\text{C}$ 以及更高温度) 对于较大的电容值, 电压范围也许会受到限制
X7R (2类陶瓷电容器)	用于去耦合和其它应用, 在这些应用中, 对精度和低失真没有要求 X7R是2类陶瓷电容器的一个示例 其它类型电容器的详细信息请参见EIA公差表 电容值范围: 10pF至47 $\mu$ F 温度系数: $\pm 833\text{ppm}/^\circ\text{C}$ (在温度范围内 $\pm 15\%$ ) 实质电压系数公差: $\pm 5\%$ 至 $-20\%/+80\%$ 温度范围: $-55^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$ 对于较大的电容值, 电压范围也许会受到限制
Y5V (2类陶瓷电容器)	用于去耦合和其它应用, 在这些应用中, 对精度和低失真没有要求 Y5V是2类陶瓷电容器的一个示例 其它类型电容器的详细信息请参见EIA公差表 温度范围内的温度系数: $-20\%/+80\%$ 温度范围: $-30^\circ\text{C}$ 至 $85^\circ\text{C}$ 其它特性与X7R和其它2类陶瓷电容器相似
氧化铝电解电容器	用于需要大电容值的大型去耦合和其它应用 需要注意的是, 电解电容器是被极化的电容器, 如果极性被接反了, 就会损坏电解电容器 电容值范围: 1 $\mu$ F至68000 $\mu$ F 温度系数: $\pm 30\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 实质温度系数公差: $\pm 20\%$ 温度范围: $-55^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$ ( $150^\circ\text{C}$ 以及更高温度) 具有比其它类型电容器高的ESR
钽电解电容器	电容值范围: 1 $\mu$ F至150 $\mu$ F 与氧化铝电解电容器相类似, 不过尺寸更小
聚丙烯薄膜电容器	电容值范围: 100pF至10 $\mu$ F 极低电压系数 (低失真) 成本比其它类型电容器要高 单位电容值尺寸要大于其它类型电容器 温度系数: 在温度范围内为2% 温度范围: $-55^\circ\text{C}$ 至 $100^\circ\text{C}$



表11: 标准电容值表

标准电容值表											
1	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.7	3
3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1

图4: 电容器标记代码



## 示例

将电容器标记转化为电容值。

$$\begin{matrix} 2 & 2 & 3 & K \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \rightarrow \end{matrix} \text{"K"} = \pm 10\%$$

$$\begin{matrix} 2 & 2 & 3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \end{matrix} \text{22 000 pF} \\ = 22\text{nF} = 0.022\mu\text{F}$$

表12: 陶瓷电容器公差标记

代码	公差	代码	公差
B	$\pm 0.1 \text{ pF}$	J	$\pm 5\%$
C	$\pm 0.25 \text{ pF}$	K	$\pm 10\%$
D	$\pm 0.5 \text{ pF}$	M	$\pm 20\%$
F	$\pm 1\%$	Z	+ 80%, -20%
G	$\pm 2\%$		

表13: EIA电容器公差标记 (2类电容器)

第一字母符号	低温限值	第二数字符号	高温限值	第二字母符号	温度额定值范围内的最大电容值变化
Z	+10° C	2	+45° C	A	$\pm 1.0\%$
Y	-30° C	4	+65° C	B	$\pm 1.5\%$
X	-55° C	5	+85° C	C	$\pm 2.2\%$
		6	+105° C	D	$\pm 3.3\%$
		7	+125° C	E	$\pm 4.7\%$
				F	$\pm 7.5\%$
				P	$\pm 10.0\%$
				R	$\pm 15.0\%$
				S	$\pm 22.0\%$
				T	$\pm 22\% \sim 33\%$
				U	$\pm 22\% \sim 56\%$
				V	$\pm 22\% \sim 82\%$

## 示例

X7R: -55°C 至 +125°C,  $\pm 15.0\%$

## 二极管和LED

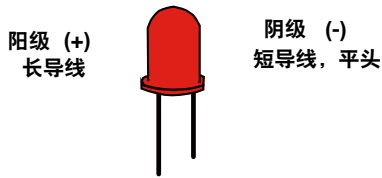


图5: 二极管和LED引脚名称

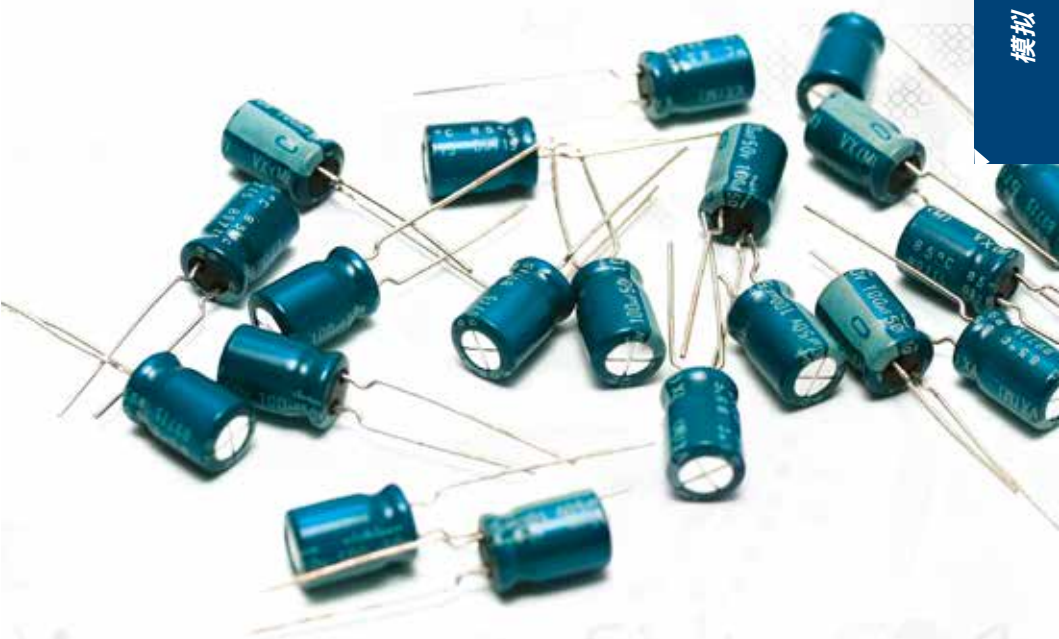
颜色	波长 (nm)	电压 (大概范围)
红外	940-850	1.4至1.7
红	660-620	1.7至1.9
橙/黄	620-605	2至2.2
绿	570-525	2.1至3.0
蓝/白	470-430	3.4至3.8

表14: 不同颜色LED的正向压降

注释: 此处给出的电压为近似值, 其目的是显示LED二极管正向电压压降的一般趋势。  
如需更加精确的值, 请参考厂商数据表。

## 模拟

- 电容器方程式（串联、并联、充电、能量）
- 电感器方程式（串联、并联、能量）
- 电容器充电与放电
- RMS和平均电压定义
- 针对普通信号的RMS
- 对数律
- dB定义
- 用示例定义极点和零点



## 电容器方程式

$$C_t = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} \quad (1) \text{ 串联电容器}$$

$$C_t = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2) \text{ 2个串联电容器}$$

$$C_t = C_1 + C_2 + \dots + C_N \quad (3) \text{ 并联电容器}$$

### 在这里

$C_t$  = 等效总电容值

$C_1, C_2, C_3 \dots C_N$  = 元件电容器

$$Q = CV \quad (4) \text{ 电荷存储量}$$

$$Q = It \quad (5) \text{ 单位时间内通过导体横截面的电量}$$

### 在这里

$Q$  = 以库伦为单位的电荷量 (C)

$C$  = 以法拉第为单位的电容值 (F)

$V$  = 以伏特为单位的电压值 (V)

$I$  = 以安培为单位的电流值 (A)

$t$  = 以秒为单位的时间长度 (s)

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (6) \text{ 流经一个电容器的即时电流}$$

### 在这里

$i$  = 流经电容器的即时电流

$C$  = 以法拉第为单位的电容值 (F)

$\frac{dv}{dt}$  = 电压的瞬时变化率

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (7) \text{ 储存在电容器中的能量}$$

### 在这里

$E$  = 储存在电容器中的能量, 单位为焦耳 (J)

$V$  = 以伏特为单位的电压

$C$  = 以法拉第为单位的电容值 (F)

**电容器方程式**

$$L_t = L_1 + L_2 + \dots + L_N \quad (8) \text{ 串联电感器}$$

$$L_t = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_N}} \quad (9) \text{ 并联电感器}$$

$$L_t = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (10) \text{ 2个并联电感器}$$

**在这里**

$L_t$  = 等效总电感

$L_1, L_2, L_3 \dots L_N$  = 元件电感

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (11) \text{ 1个电感器上的瞬时电压}$$

**在这里**

$v$  = 电感器上的瞬时电压

$L$  = 以亨利为单位的电感值 (H)

or

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (12) \text{ Energy stored in an inductor}$$

**在这里**

$E$  = 储存在电感器中的能量, 单位焦耳 (J)

$I$  = 以安培为单位的电流值 (A)

$L$  = 以亨利为单位的电感值 (H)

## RC电路充电方程式

$$V_C = V_S \left[ 1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \right] \quad (13) \text{ General relationship}$$

## 在这里

$V_C$  = 任一瞬时时间点上, 电容器的电压 (t)

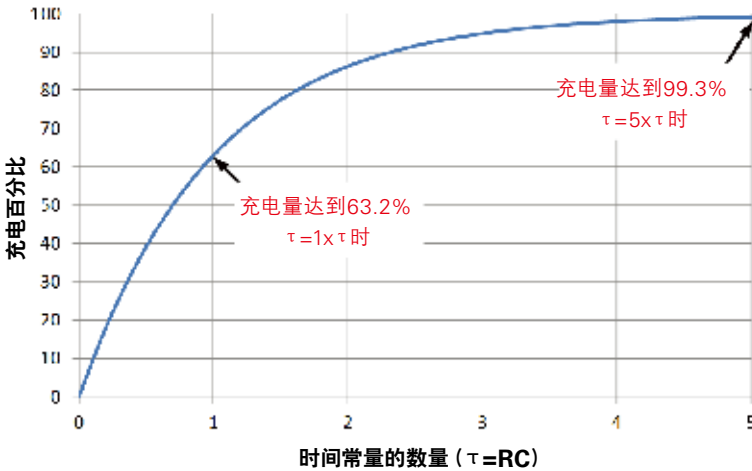
$V_S$  = 为RC电路充电的源电压

t = 以秒为单位的时间长度

$\tau = RC$ , 电容器充放电的时间常数

图形化方程式13生成以下的电容器充电曲线。需要注意的是, 在5个时间常量时, 电容器的充电量达到了99.3%。在实际应用中, 通常认为电容器已充满电。

充电百分比与时间常量之间的关系



充电百分比与时间常量之间的关系

## RC电路放电方程式

$$V_C = V_i \left[ e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \right] \quad (14) \text{ General Relationship}$$

### 在这里

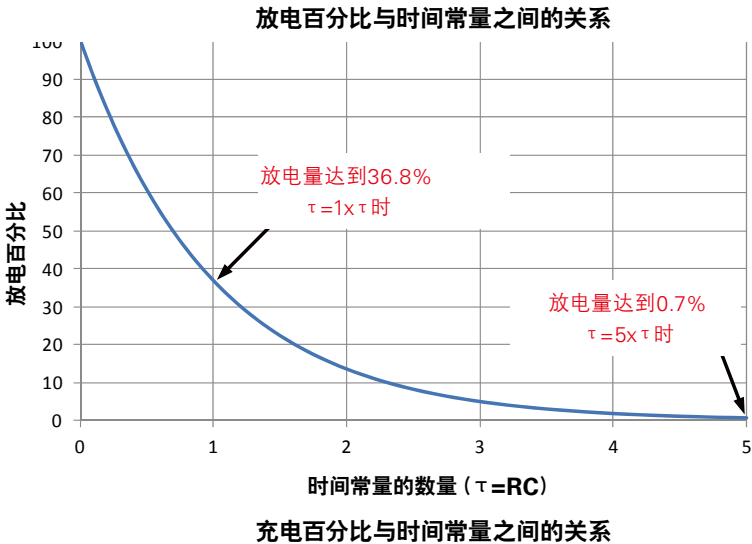
$V_C$  = 任一瞬时时间点上, 电容器的电压 ( $t$ )

$V_S$  = 为RC电路充电的源电压

$t$  = 以秒为单位的时间长度

$\tau = RC$ , 电容器充放电的时间常数

图形化方程式14生成以下的电容器放电曲线。需要注意的是, 在5个时间常量时, 电容器放电至总电量的7%。在实际应用中, 通常认为电容器已完全放电。



**RMS电压**

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} [V(t)]^2 dt} \quad (15) \text{ General relationship}$$

**在这里**

$V(t)$  = 连续时间函数

$t$  = 以秒为单位的时间长度

**平均电压**

$$V_{\text{MEAN}} = \frac{1}{(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} V(t) dt \quad (16) \text{ General relationship}$$

**在这里**

$V(t)$  = 连续时间函数

$t$  = 以秒为单位的时间长度

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{PEAK}}}{\sqrt{2}} \quad (17) \text{ RMS for full wave rectified sine wave}$$

$$V_{\text{MEAN}} = \frac{2 \times V_{\text{PEAK}}}{\pi} \quad (18) \text{ Mean for full wave rectified sine wave}$$

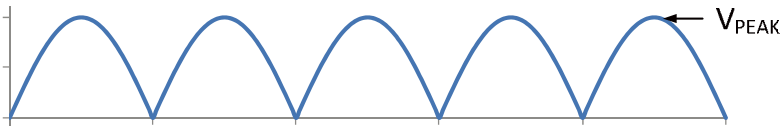


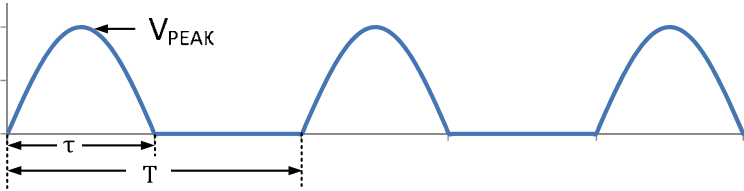
图8: 正弦波全波整流



**RMS电压和平均电压**

$$V_{RMS} = V_{PEAK} \sqrt{\left(\frac{\tau}{2T}\right)} \quad (19) \text{ RMS for a half-wave rectified sine wave}$$

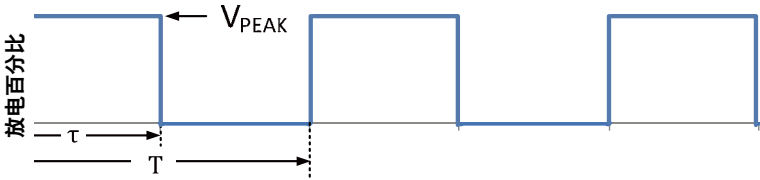
$$V_{MEAN} = \frac{2 \times V_{PEAK}}{\pi} \left(\frac{\tau}{T}\right) \quad (20) \text{ Mean for a half-wave rectified sine wave}$$



**图9: 正弦波半波整流**

$$V_{RMS} = V_{PEAK} \sqrt{\frac{\tau}{T}} \quad (21) \text{ RMS for a square wave}$$

$$V_{MEAN} = V_{PEAK} \frac{\tau}{T} \quad (22) \text{ Mean for a square wave}$$

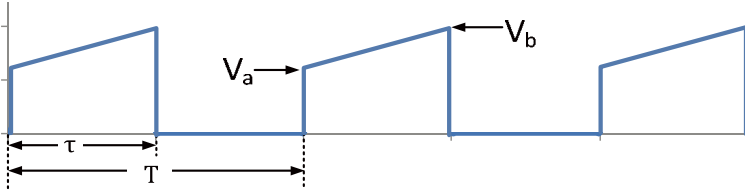


**图10: 方波**

**RMS电压和平均电压**

$$V_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{V_a^2 + V_a \cdot V_b + V_b^2}{3}\right) \left(\frac{\tau}{T}\right)} \quad (23) \text{ RMS for a trapezoid}$$

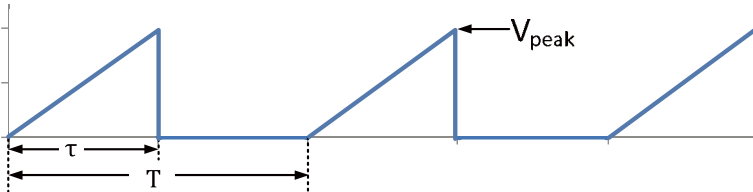
$$V_{MEAN} = \frac{\tau}{2T} (V_a + V_b) \quad (24) \text{ Mean for a trapezoid}$$



**图11: 梯形波**

$$V_{RMS} = V_{PEAK} \sqrt{\frac{\tau}{3T}} \quad (25) \text{ RMS for a triangle wave}$$

$$V_{MEAN} = \frac{\tau}{2T} V_{PEAK} \quad (26) \text{ Mean for a triangle wave}$$



**图12: 三角波**

## 对数数学定义

$$\log\left(\frac{A}{B}\right) = \log(A) - \log(B) \quad (27) \text{ Log of dividend}$$

$$\log(AB) = \log(A) + \log(B) \quad (28) \text{ Log of product}$$

$$\log(A^x) = x \log(A) \quad (29) \text{ Log of exponent}$$

$$\log_b(X) = \frac{\log_a(X)}{\log_a(b)} \quad (30) \text{ Changing the base of log function}$$

$$\log_2(X) = \frac{\log_{10}(X)}{\log_{10}(2)} \quad (31) \text{ Example changing to log base 2}$$

$$\ln(X) = \log_e(X) \quad (32) \text{ Natural log is log base e}$$

$$e = 2.718282 \quad (33) \text{ Exponential function to 6 digits}$$

## 替代表示法

$$\exp(x) = e^x \quad (34) \text{ Different notation for exponential function}$$

$$3.54\text{E}-2 = 3.54 \times 10^{-2} \quad (35) \text{ Different notation for scientific notation, sometimes confused with exponential function}$$

## dB定义

### 波特图基础知识

针对振幅或增益波特图的频率响应是电压增益随频率变化而产生的变化值。这个变化值在一个波特图上被指定出来，这是一条频率与单位为dB（分贝）的电压增益之间的关系曲线。通常情况下，波特图被绘制为半对数曲线，频率在x轴上，而对数尺度和增益在y轴上，线性刻度。频率响应的另外一半是相移与频率之间的关系，绘制的是频率与相移度数之间的关系。相位曲线图通常绘制为半对数曲线图，频率在x轴上，对数尺度、相移在y轴上，线性刻度。

### 定义

$$\text{Voltage gain (dB)} = 20 \log \left( \frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}}} \right) \quad (36) \text{ Voltage gain in decibels}$$

$$\text{Power gain (dB)} = 10 \log \left( \frac{P_{\text{OUT}}}{P_{\text{IN}}} \right) \quad (37) \text{ Power gain in decibels}$$

$$\text{Power Measured (dBm)} = 10 \log \left( \frac{\text{Power Measured (W)}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (38) \text{ Used for input or output power}$$

A (V/V)	A (dB)
0.001	-60
0.01	-40
0.1	-20
1	0
10	20
100	40
1,000	60
10,000	80
100,000	100
1,000,000	120
10,000,000	140

**表15: 常见增益值和dB等效值表**

滚降率是增益随频率的减少量

十倍频是频率十倍增加量或减少量（从10Hz至100Hz为一个十进位）

倍频是频率加倍或减半（从10Hz至20Hz就是一个倍频）

图13显示的是一种用图形化方式确定对数轴上的值，而这些值没有直接出现在坐标轴网格线上。

1. 假定 $L = 1\text{cm}$ ;  $D = 2\text{cm}$ , 用尺子测量。
2.  $L/D = \log_{10}(f_p)$
3.  $f_p = 10^{(L/D)} = 10^{(1\text{cm}/2\text{cm})} = 3.16$
4. 针对十倍频范围进行调整 (对于此示例,  $f_p = 31.6\text{Hz}$ )

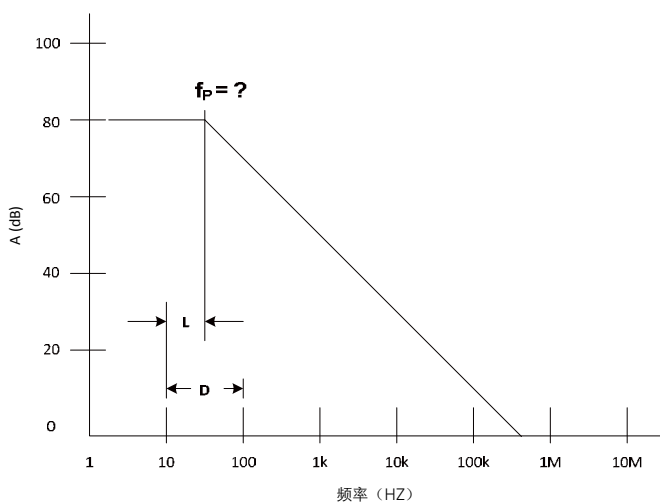


图5: 在对数轴上找到未直接显示在网格线上的值

波特图：极点

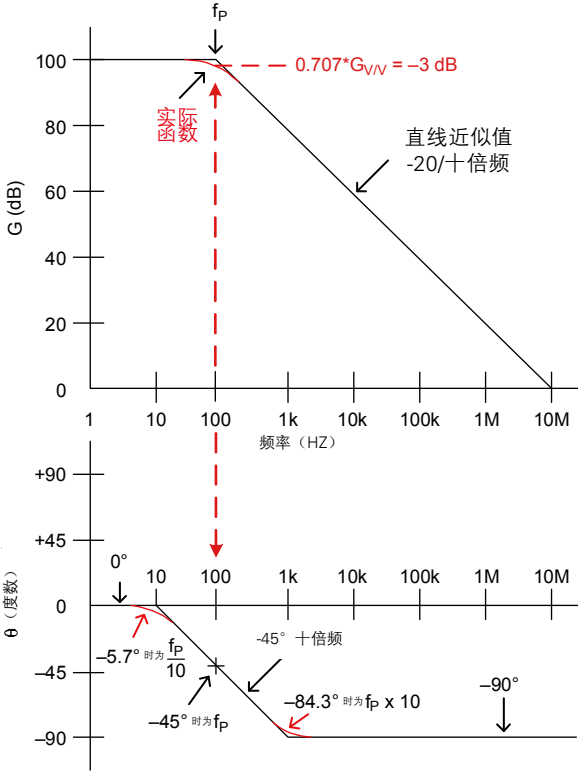


图14: 极点增益与相位

- 极点位置 =  $f_p$  (截止频率)
- 振幅 ( $f < f_p$ ) = GDC (例如, 100dB)
- 振幅 ( $f = f_p$ ) = -3dB
- 振幅 ( $f > f_p$ ) = -20dB/十倍频
- 相位 ( $f = f_p$ ) =  $-45^\circ$
- 相位 ( $0.1f_p < f < 10f_p$ ) =  $-45^\circ$  /十倍频
- 相位 ( $f > 10f_p$ ) =  $-90^\circ$
- 相位 ( $f < 0.1f_p$ ) =  $0^\circ$

**极点 (方程式)**

$$G_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{G_{DC}}{j\left(\frac{f}{f_p}\right) + 1} \quad (39) \text{ As a complex number}$$

$$G_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{G_{DC}}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_p}\right)^2 + 1}} \quad (40) \text{ Magnitude}$$

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_p}\right) \quad (41) \text{ Phase shift}$$

$$G_{dB} = 20 \text{ Log}(G_V) \quad (42) \text{ Magnitude in dB}$$

**在这里**

- $G_V$  = 以V/V为单位的电压增益
- $G_{dB}$  = 以分贝为单位的电压增益
- $G_{DC}$  = dc或低频电压增益
- $f$  = 频率, 单位Hz
- $f_p$  = 极点出现时的频率
- $\theta$  = 从输入到输出的信号相移
- $j$  = 表示虚数或 $\sqrt{-1}$

波特图 (零点)

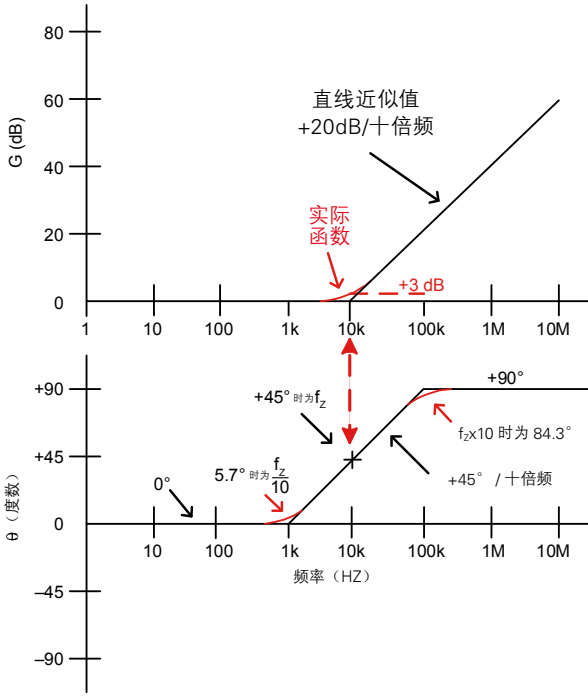


图15: 零点增益与相位

- 零点位置 =  $f_z$
- 振幅 ( $f < f_z$ ) = 0dB
- 振幅 ( $f = f_z$ ) = +3dB
- 振幅 ( $f > f_z$ ) = +20dB/十倍频
- 相位 ( $f = f_z$ ) = +45°
- 相位 ( $0.1 f_z < f < 10 f_z$ ) = +45° /十倍频
- 相位 ( $f > 10 f_z$ ) = +90°
- 相位 ( $f < 0.1 f_z$ ) = 0°



**零点 (方程式)**

$$G_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = G_{DC} \left[ j \left( \frac{f}{f_Z} \right) + 1 \right] \quad (43) \text{ As a complex number}$$

$$G_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = G_{DC} \sqrt{\left( \frac{f}{f_Z} \right)^2 + 1} \quad (44) \text{ Magnitude}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{f}{f_Z} \right) \quad (45) \text{ Phase shift}$$

$$G_{dB} = 20 \text{ Log}(G_V) \quad (46) \text{ Magnitude in dB}$$

**Where**

$G_V$  = voltage gain in V/V

**在这里**

$G_V$  = 以V/V为单位的电压增益

$G_{dB}$  = 以分贝为单位的电压增益

$G_{DC}$  = dc或低频电压增益

$f$  = 频率, 单位Hz

$f_p$  = 极点出现时的频率

$\theta$  = 从输入到输出的信号相移

$j$  = 表示虚数或 $\sqrt{-1}$

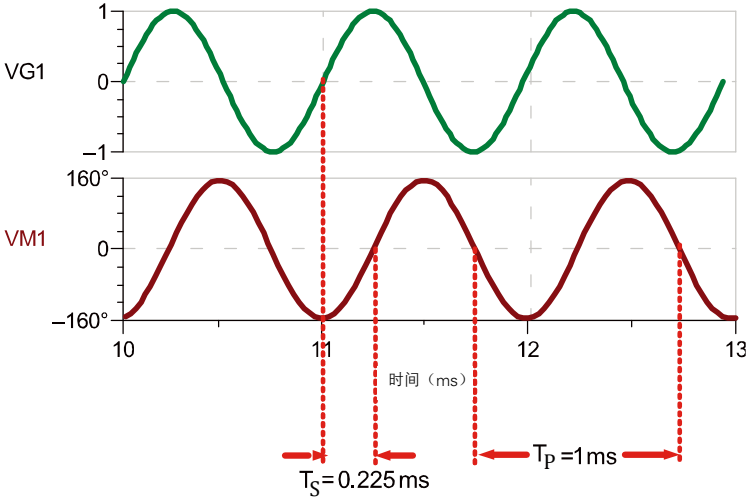


图16: 相移时间

$$\theta = \frac{T_s}{T_p} \cdot 360^\circ$$

(47) Phase shift from time

**在这里** $T_s$  = 从输入到输出信号的时移 $T_p$  = 信号周期 $\theta$  = 信号从输入到输出的相移**示例**

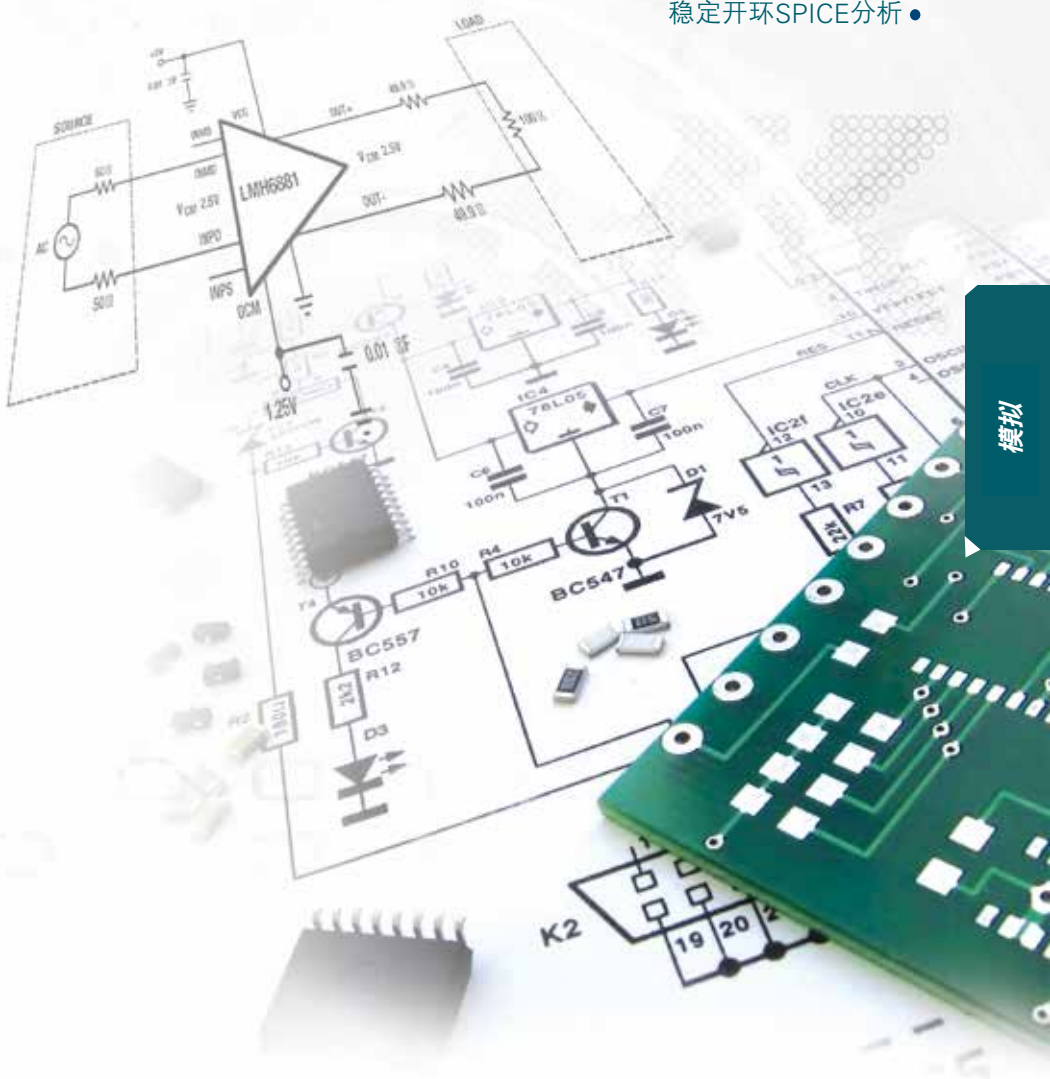
计算图 16 中相移的度数。

**答案**

$$\theta = \frac{T_s}{T_p} \cdot 360^\circ = \left( \frac{0.225 \text{ ms}}{1 \text{ ms}} \right) \cdot 360^\circ = 81^\circ$$

## 放大器

- 基本运算放大器配置
- 运算放大器带宽
- 满功率带宽
- 小信号阶跃响应
- 噪声方程式
- 稳定性方程式
- 稳定开环SPICE分析



## 基本运算放大器配置

$$G_{CL} = 1$$

(48) 针对缓冲器配置的增益

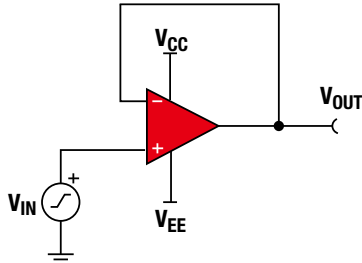


图17: 缓冲器配置

$$G_{CL} = \frac{R_f}{R_1} + 1$$

(49) Gain for non-inverting configuration

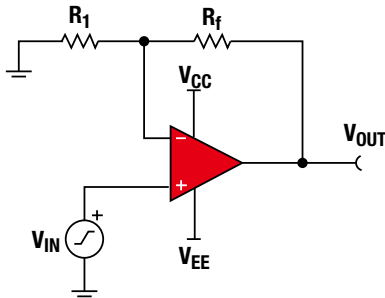


图18: 同相配置

基本运算放大器配置 (继续)

$$G_{CL} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (50) \text{ Gain for inverting configuration}$$

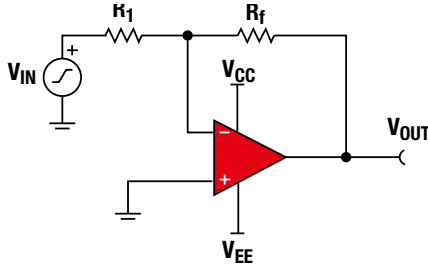


图19: 反相配置

$$V_{OUT} = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_N}{R_N} \right) \quad (51) \text{ Transfer function for inverting summing amplifier}$$

$$V_{OUT} = -\frac{R_f}{R_1} (V_1 + V_2 + \dots + V_N) \quad (52) \text{ Transfer function for inverting summing amplifier, assuming } R_1 = R_2 = \dots = R_N$$

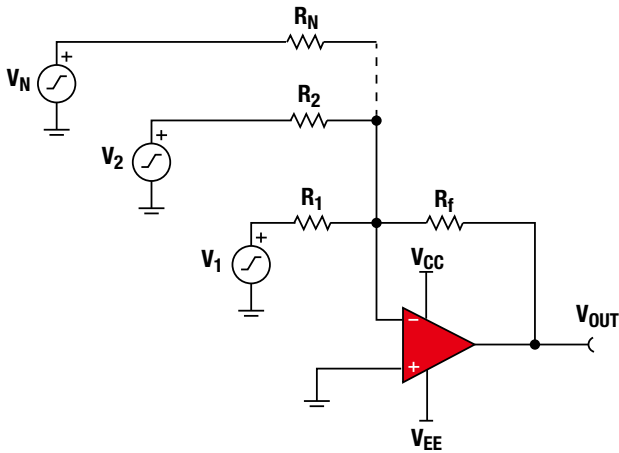


图20: 反向加法配置

基本运算放大器配置 (继续)

$$V_{OUT} = \left( \frac{R_f}{R_{in}} + 1 \right) \left[ \frac{V_1}{N} + \frac{V_2}{N} + \dots + \frac{V_N}{N} \right] \quad (53) \text{ 针对非反向加法放大器的转换函数}$$

在这里

$R_1 = R_2 = \dots = R_N$

N = 输入电阻器的数量

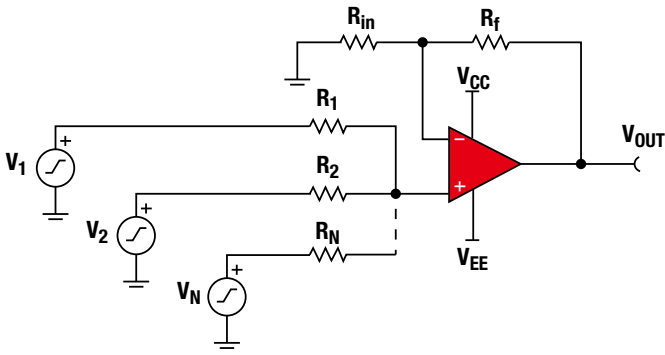


图21: 同相加法配置

### 具有Cf滤波器的简单同相放大器

$$G_{LF} = \frac{R_f}{R_1} + 1 \quad (54) \text{ Gain for non-inverting configuration for } f < f_c$$

$$G_{HF} = 1 \quad (55) \text{ Gain for non-inverting configuration for } f \gg f_c$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (56) \text{ Cut off frequency for non-inverting configuration}$$

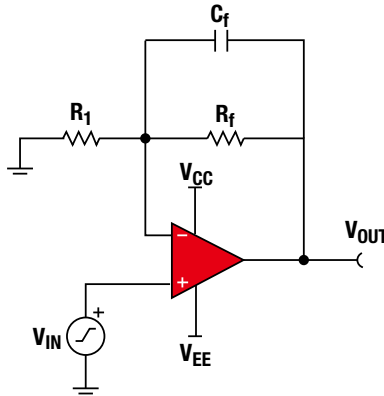


图22: 具有Cf滤波器的同相放大器

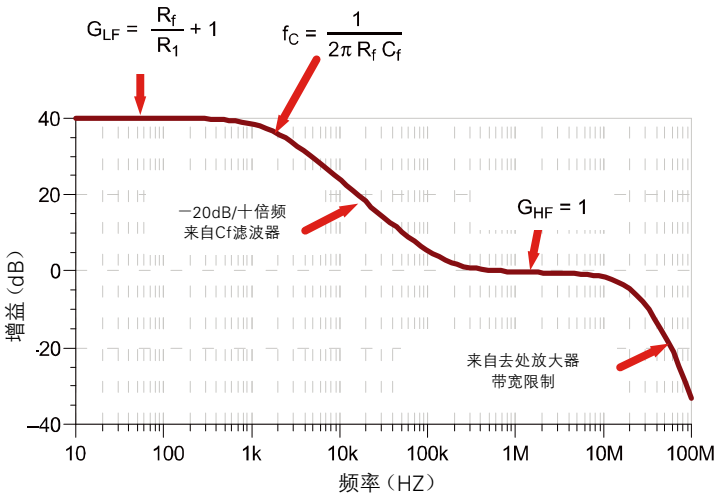


图23: 针对具有Cf滤波器的同相运算放大器的频率响应

具有 $C_f$ 滤波器的简单反相放大器

$$G_{LF} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (57) \text{ Gain for inverting configuration for } f < f_c$$

$$G_{HF} = -20\text{dB/十倍频 (在} f_c \text{之后, 直到达到运算放大器带宽限制)} \quad (58) \text{ Gain for inverting configuration for } f > f_c$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (59) \text{ Cutoff frequency for inverting configuration}$$

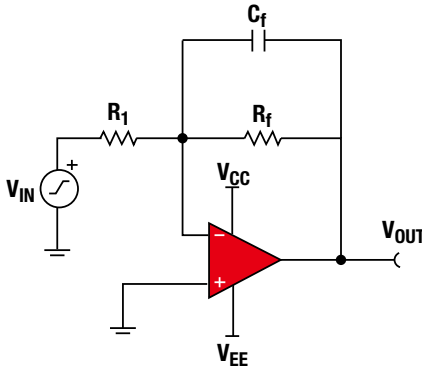


图24: 具有 $C_f$ 滤波器的反相放大器

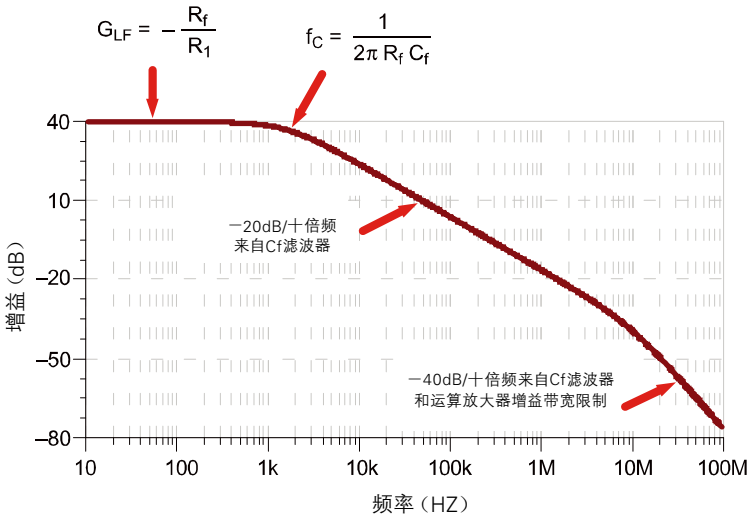


图25: 针对具有 $C_f$ 滤波器的反相运算放大器的频率响应



## 运算放大器带宽

$$GBW = \text{Gain} \cdot BW$$

(60) Gain bandwidth product defined

### 在这里

GBW = 增益带宽积，在运算放大器数据表技术规格中列出

增益 = 闭环增益，由运算放大器增益配置设定

BW = 放大器的带宽限制

### 示例

使用方程式 60 来确定带宽

增益 = 100 (从放大器配置中得出)

GBW = 22MHz (数据表中给出)

$$BW = \frac{GBW}{\text{Gain}} = \frac{22\text{MHz}}{100} = 220 \text{ kHz}$$

需要注意的是，在下方显示的AOL曲线中，用图形化的方法可以确定同样的结果。

### 开环增益和相位与频率之间的关系

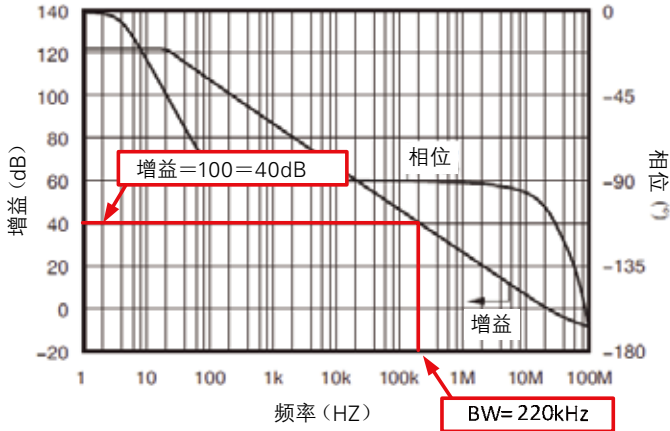


图26: 使用 $A_{OL}$ 找到闭环带宽

## 满功率带宽

$$V_P = \frac{SR}{2\pi f} \quad (61) \text{ Maximum output without slew-rate induced distortion}$$

## 在这里

$V_P$  = 在由转换率引入的失真出现前，最大峰值输出电压

SR = 转换率

f = 施加信号的频率

最大输出电压与频率之间的关系

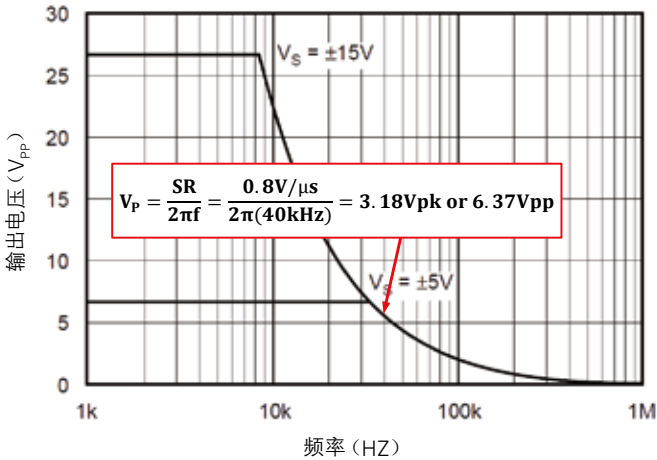


图27: 无转换率引入失真情况下的最大输出

需注意的是，上图是使用方程式61绘制出的针对OPA277的图形。示例计算结果给出了OPA277在40kHz时的峰值电压。这一结果可通过图形化的方法或通过方程式来确定。

## 示例

$$V_P = \frac{SR}{2\pi f} = \frac{0.8V/\mu s}{2\pi(40kHz)} = 3.18Vpk \text{ or } 6.37Vpp$$

## 小信号阶跃响应

$$\tau_R = \frac{0.35}{f_C} \quad (62) \text{ Rise time for a small signal step}$$

## 在这里

$\tau_R$  = 小信号阶跃响应的上升时间

$f_C$  = 运算放大器电路的闭环带宽

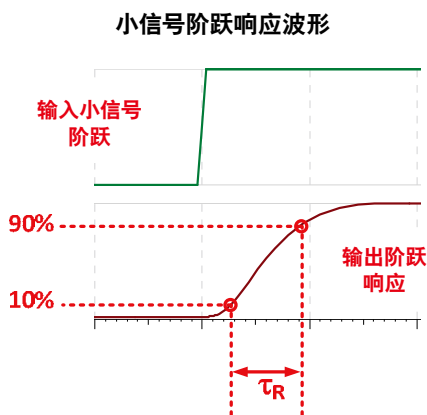


图28: 无转换率引入失真的最大输出

## 运算放大器噪声模型

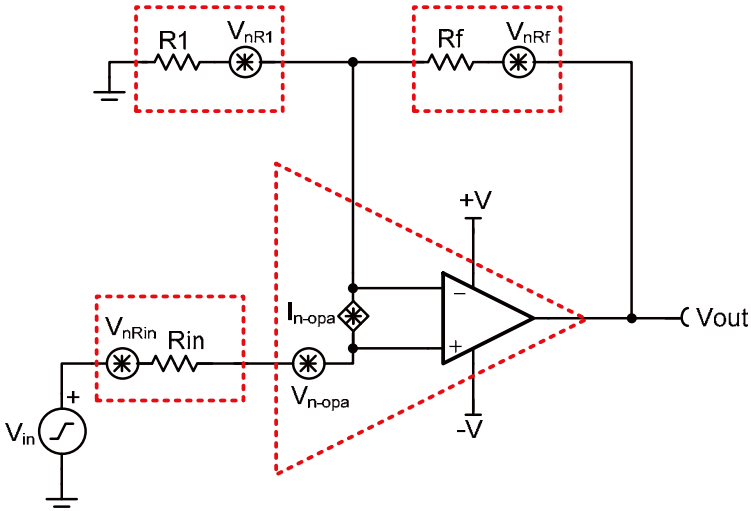


图29: 运算放大器噪声模型

运算放大器固有噪声:

- 由运算放大器导致的噪声 (电流噪声+电压噪声)
- 电阻器噪声

噪声带宽计算

$$BW_N = K_N f_c \quad (63) \text{ Noise bandwidth}$$

在这里

$BW_N$  = 系统的噪声带宽

$K_N$  = 针对不同滤波器阶数的砖墙校正因数

$f_c$  = 系统的 -3dB 带宽

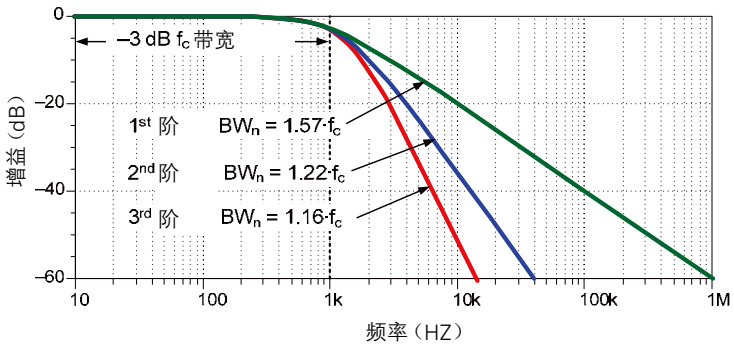


图30: 针对3个不同滤波器阶数的运算放大器带宽

表16: 针对噪声带宽的砖墙校正因数

极点数	KN砖墙校正因数
1	1.57
2	1.22
3	1.13
4	1.12

宽频带总体噪声计算

$$E_N = e_{BB} \sqrt{BW_N} \quad (64) \text{ Total rms noise from broadband}$$

在这里

$E_N$  = 来自宽频带噪声的总rms噪声

$e_{BB}$  = 宽频带噪声频谱密度 (nV/rtHz)

$BW_N$  = 噪声带宽 (Hz)

## 1/f总体噪声计算

$$E_{N\_NORMAL} = e_{BF} \sqrt{f_O} \quad (65) \text{ Normalized 1/f noise at 1 Hz}$$

### 在这里

$E_{N\_NORMAL}$  = 1Hz时的标准1/f噪声

$e_{BF}$  = 在1/f区域内测得的噪声频谱密度

$f_O$  = 测得1/f  $e_{BF}$  噪声时的频率

$$E_{N\_FLICKER} = E_{N\_NORMAL} \sqrt{\ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right)} \quad (66) \text{ 1/f total noise calculation}$$

### 在这里

$E_{N\_FLICKER}$  = 由抖动所导致的总rms噪声

$E_{N\_NORMAL}$  = 1Hz时的标准1/f噪声

$f_H$  = 上限截止频率或噪声带宽

$f_L$  = 下限截止频率, 通常情况下被设定在0.1Hz

**表17: 峰值到峰值换算**

标准偏差的数量	读数在范围内的概率
2σ (same as ±1σ)	68.3%
3σ (same as ±1.5σ)	86.6%
4σ (same as ±2σ)	95.4%
5σ (same as ±2.5σ)	98.8%
6σ (same as ±3σ)	99.7%
6.6σ (same as ±3.3σ)	99.9%

### 热噪声计算

$$E_{n_R} = \sqrt{4kTR\Delta f} \tag{67} \text{ Total rms Thermal Noise}$$

$$e_{n_R} = \sqrt{4kTR} \tag{68} \text{ Thermal Noise Spectral Density}$$

#### 在这里

$E_{n_R}$  = 电阻导致的总rms噪声, 也被称为热噪声 (V rms)

$e_{n_R}$  = 电阻的噪声频谱密度, 也被称为热噪声 ()

k = 玻尔兹曼常数  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

T = 温度, 单位开

$\Delta f$  = 噪声带宽, 单位Hz

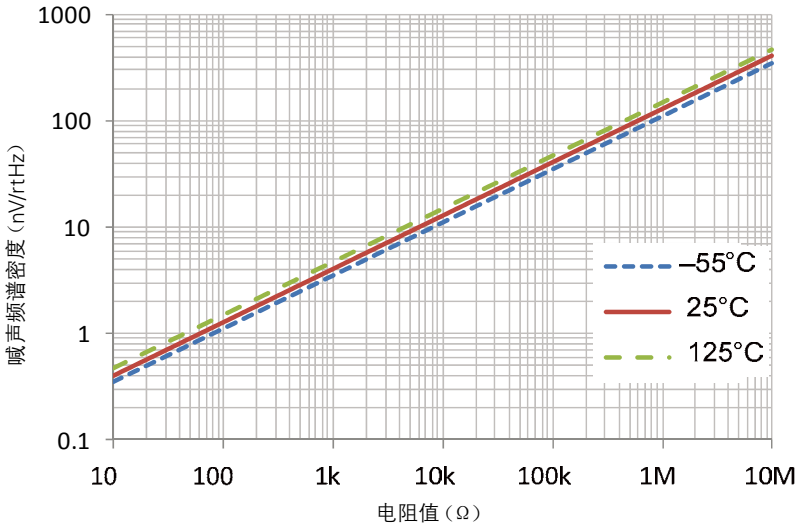


图31: 噪声频谱密度与电阻值之间的关系

### AC响应与频率之间的关系 (主导2极点系统)

Figure 32 illustrates a bode plot with four different examples of ac peaking.

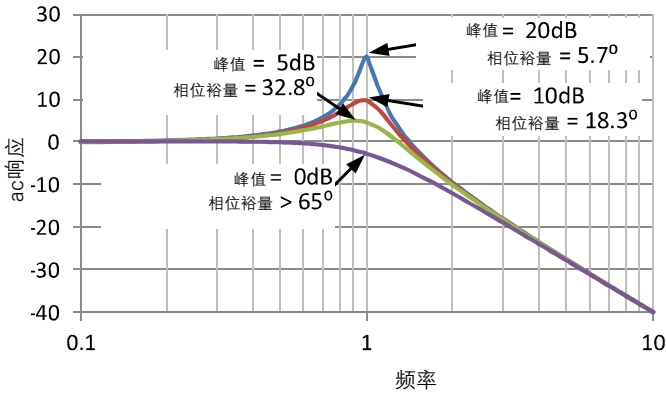


图32: 稳定性—ac峰值关系示例

### 相位裕量与ac峰值之间的关系

这个曲线图显示的是针对任一指定ac峰值水平的相位裕量。需要注意的是，稳定运行需要大于等于 $45^\circ$ 的相位裕量。

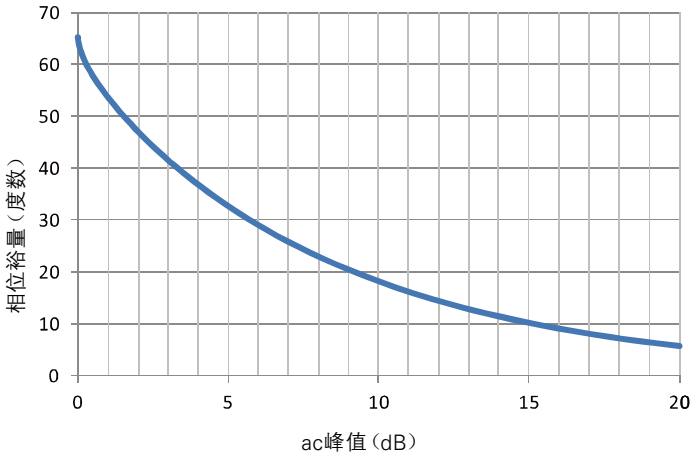


图33: 稳定性—针对2极点系统的相位裕量与峰值之间的关系



### 瞬时过冲 (主导2极点系统)

图34显示的是两个具有不同过冲百分比的示例。

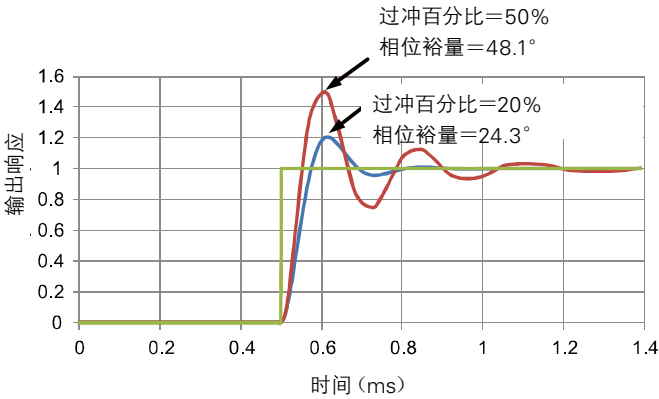


图34: 稳定性—瞬时过冲示例

### 相位裕量与过冲百分比之间的关系

这幅图显示的是针对任一指定瞬时过冲级别的相位裕量。需要注意的是，稳定运行需要大于等于45°的相位裕量。

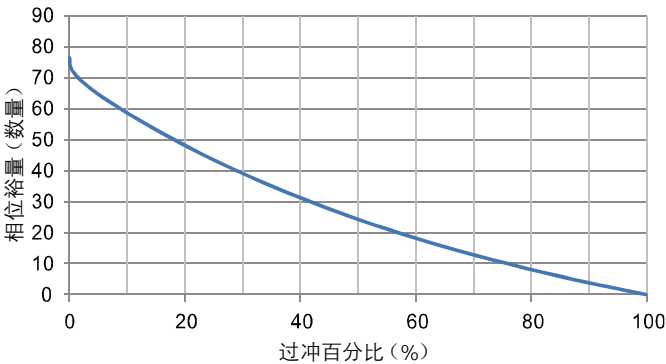


图35: 稳定性—相位裕量与过冲百分比之间的关系

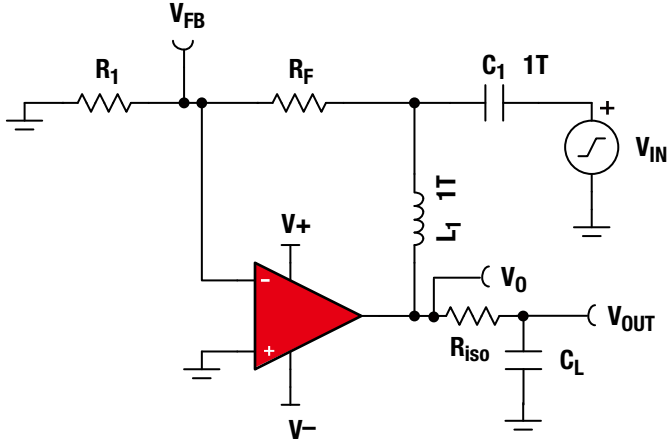


图36: 用于实现稳定性的常见spice测试电路

$$A_{OL\_LOADED} = \frac{V_O}{V_{FB}} \quad (69) \text{ Loaded open-loop gain}$$

$$\beta = \frac{V_{FB}}{V_O} \quad (70) \text{ Feedback factor}$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{V_{FB}} \quad (71) \text{ Closed-loop noise gain}$$

$$A_{OL\_LOADED} \times \beta = V_O \quad (72) \text{ Loop gain}$$

### 在这里

$V_O$  = 运算放大器输出上的电压。

$V_{OUT}$  = 传送至负载的输出电压, 也许对应用比较重要, 但是在稳定性分析中不将其考虑在内。

$V_{FB}$  = 反馈电压

$R_F$ ,  $R_1$ ,  $R_{ISO}$  和  $C_L$  = 运算放大器反馈网络和负载。其它运算放大器拓扑将具有不同的反馈网络; 然而, 在大多数情况下, 测试电路是相同的。图37显示的是例外情况(多个反馈)。

$C_1$  和  $L_1$  是使SPICE分析更加便捷的组件。它们的值大到 (1TF, 1TH)能够在dc频率上实现电路闭合, 但是不能在ac频率上实现电路打开。为了实现收敛, SPICE在dc频率上需要闭环运行。

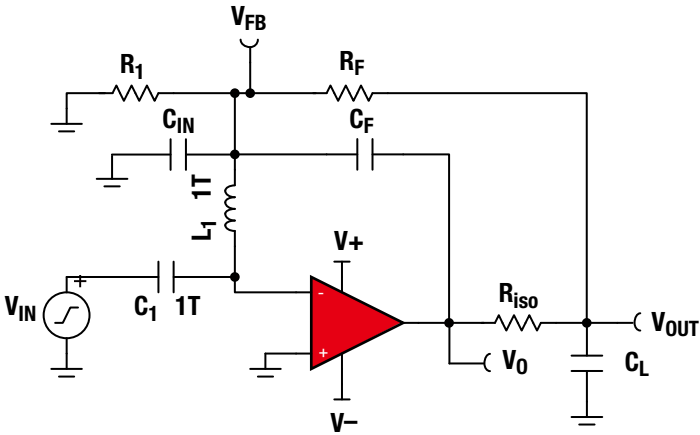


图37: 用于实现稳定性的其它(多个反馈) SPICE测试电路

$$A_{OL\_LOADED} = V_o \quad (73) \text{ Loaded open loop gain}$$

$$\beta = \frac{V_{FB}}{V_o} \quad (74) \text{ Feedback factor}$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{V_o}{V_{FB}} \quad (75) \text{ Closed-loop noise gain}$$

$$A_{OL\_LOADED} \times \beta = V_{FB} \quad (76) \text{ Loop gain}$$

### 在这里

$V_o$  = 运算放大器输出上的电压。

$V_{OUT}$  = 传送至负载的输出电压,也许对应用比较重要,但是在稳定性分析中不将其考虑在内。

$V_{FB}$  = 反馈电压

$R_F$ ,  $R_1$ ,  $R_{ISO}$  和  $C_L$  = 运算放大器反馈网络。由于有2条反馈路径,此环路在输入上被断开。

$C_1$  和  $L_1$  是使SPICE分析更加便捷的组件。它们的值大到 (1TF, 1TH) 能够在dc频率上实现电路闭合,但是不能在ac频率上实现电路打开。为了实现收敛,SPICE在dc频率上需要闭环运行。

$C_{IN}$  = 运算放大器数据表中得出的等效输入电容。由于此模型已经将其包括在内,所以通常情况下无需增加这个电容值。然而,当使用这个仿真方法时,此电容被1TH电感器所隔离。

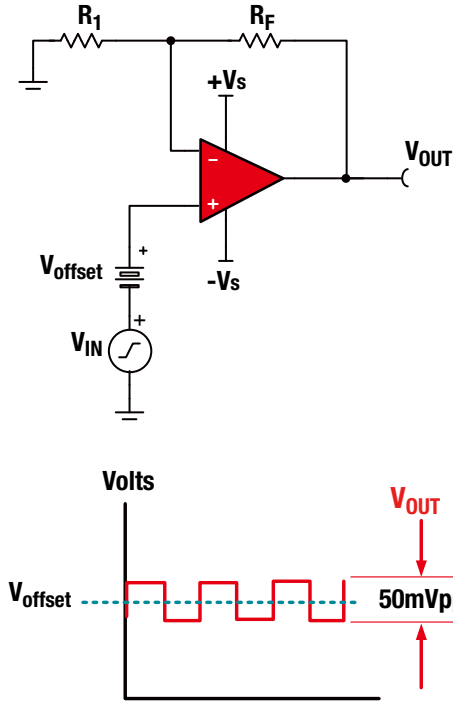


图38: 瞬时真实环境稳定性测试

### 测试小窍门

- 选择测试频率
- 小信号 () ac输出方波 (例如, 1kHz)
- 调节 $V_{IN}$  振幅来产生输出 $\leq 50mV_{pp}$
- 最差情况通常出现在 $V_{offset} = 0$ 的时候 ( $I_{OUT} = 0A$ 时,  $R_O$ 最大)
- 在需要时使用 $V_{offset}$ 来检查所有输出工作点, 以确保稳定性
- 设定范围 = ac耦合并扩大垂直范围寻找 $V_{OUT}$ 上的过冲量、下冲量和振铃
- 为了实现最佳分辨率, 在 $V_{OUT}$ 上使用1x衰减范围探针

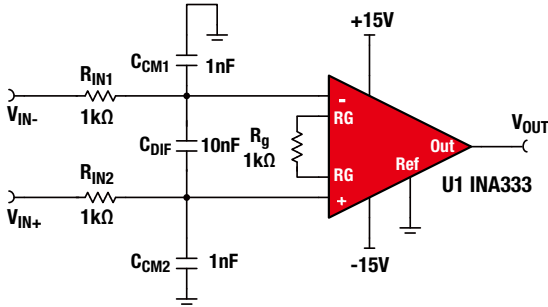


图39: 针对仪表放大器的输入滤波器

$$\text{Select } C_{\text{DIF}} \geq 10C_{\text{CM1}}$$

(77) Differential filter is sized 10 times the common-mode filter

$$R_{\text{IN1}} = R_{\text{IN2}}$$

(78) Input resistors must be equal

$$C_{\text{CM1}} = C_{\text{CM2}}$$

(79) Common-mode capacitors must be equal

$$f_{\text{CM}} = \frac{1}{2\pi R_{\text{IN1}} C_{\text{CM1}}}$$

(80) Differential filter cutoff

$$f_{\text{DIF}} = \frac{1}{2\pi(2R_{\text{IN1}})(C_{\text{DIF}} + \frac{1}{2}C_{\text{CM1}})}$$

(81) Common-mode filter cutoff

### 在这里

$f_{\text{DIF}}$  = 差分截止频率

$f_{\text{CM}}$  = 共模截止频率

$R_{\text{IN}}$  = 输入电阻

$C_{\text{CM}}$  = 共模滤波器电容

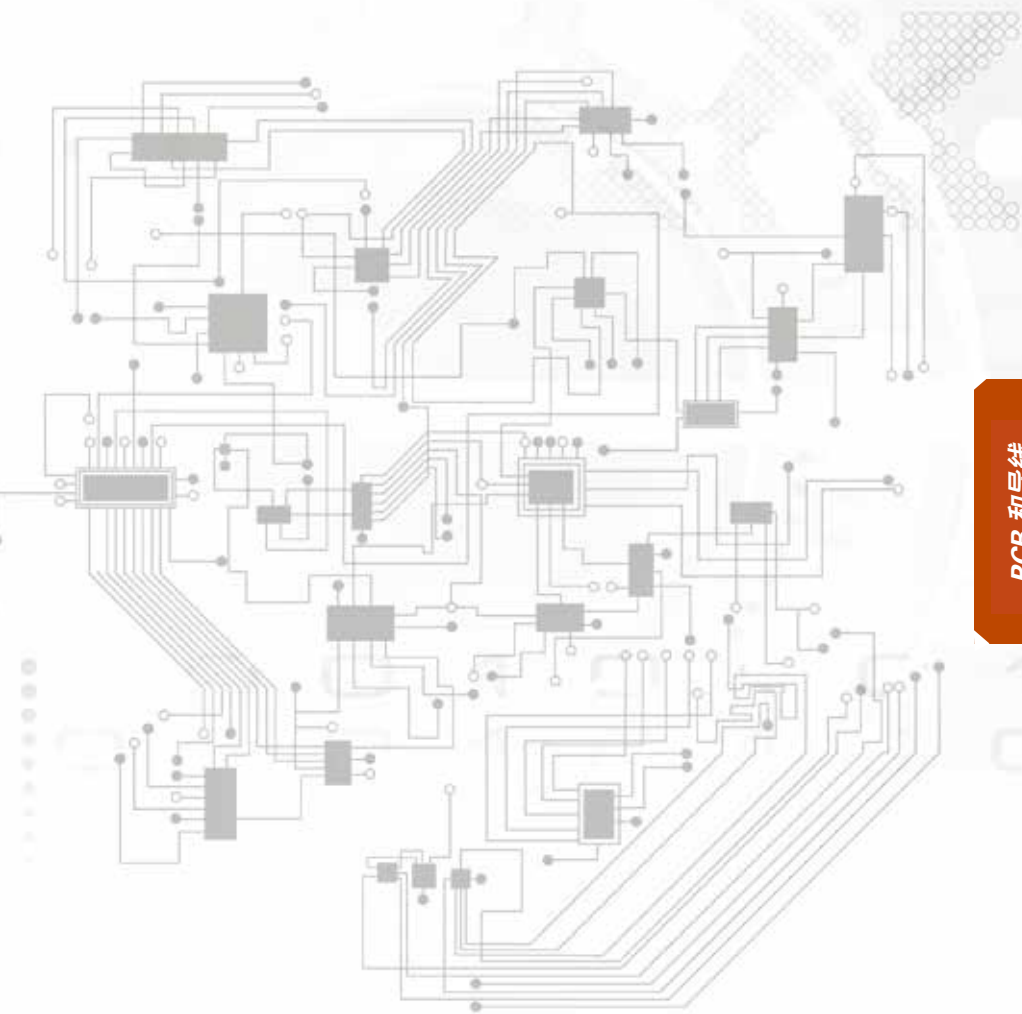
$C_{\text{DIF}}$  = 差分滤波器电容

请注意: 选择将把差分模式截止频率设定为比共模截止频率低10倍。这就防止了因元件公差所导致的共模噪声被转换为差分噪声。



## PCB 和导线

- 1oz和2oz纯铜的PCB传输线电阻
- 实现PCB安全运行的导体间距
- 纯铜导体的载流能力
- 封装类型与尺寸
- PCB传输线电容与电感
- PCB过孔电容与电感
- 常见同轴电缆技术规格
- 同轴电缆方程式
- 不同类型导线单位长度电阻
- 不同类型导线最大电流



## 基本运算放大器配置

导体之间的电压 (dc或ac峰值)	最小间距						
	裸板				组装		
	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7
0-15	0.05 mm [0.00197 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.05 mm [0.00197 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]
16-30	0.05 mm [0.00197 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.05 mm [0.00197 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.25 mm [0.00984 in]	0.13 mm [0.00512 in]
31-50	0.1 mm [0.0039 in]	0.6 mm [0.024 in]	0.6 mm [0.024 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.13 mm [0.00512 in]
51-100	0.1 mm [0.0039 in]	0.6 mm [0.024 in]	1.5 mm [0.0591 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.5 mm [0.020 in]	0.13 mm [0.00512 in]
101-150	0.2 mm [0.0079 in]	0.6 mm [0.024 in]	3.2 mm [0.126 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.4 mm [0.016 in]
151-170	0.2 mm [0.0079 in]	1.25 mm [0.0492 in]	3.2 mm [0.126 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.4 mm [0.016 in]
171-250	0.2 mm [0.0079 in]	1.25 mm [0.0492 in]	6.4 mm [0.252 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.4 mm [0.016 in]
251-300	0.2 mm [0.0079 in]	1.25 mm [0.0492 in]	12.5 mm [0.492 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.8 mm [0.031 in]
301-500	0.25 mm [0.00984 in]	2.5 mm [0.0984 in]	12.5 mm [0.492 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.8 mm [0.031 in]	1.5 mm [0.0591 in]	0.8 mm [0.031 in]

B1内部导体

B2无涂层外部导体，海平面3050米以下

B3无涂层外部导体，3050米以上

B4覆盖有永久聚合物涂层的外部导体（任一海拔）

A5在组装时具有保形涂层的外部导体（任一海拔）

A6外部元件引线/端接、无涂层、海平面3050米以下

A7外部元件引线端接，具有保形涂层（任一海拔）

经许可摘自IPC-2221B，表6-1。

如需额外信息，请在[www.ipc.org](http://www.ipc.org)中下载完整技术规格。



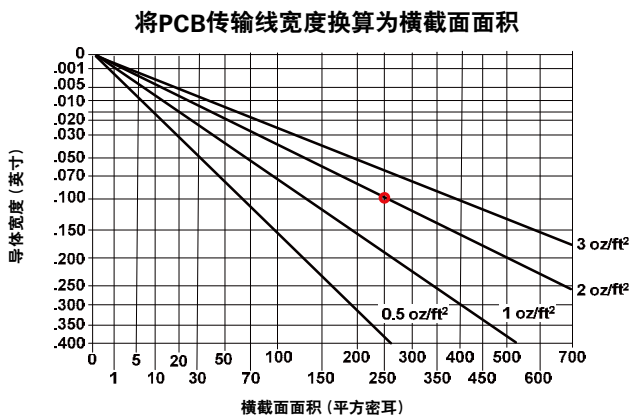
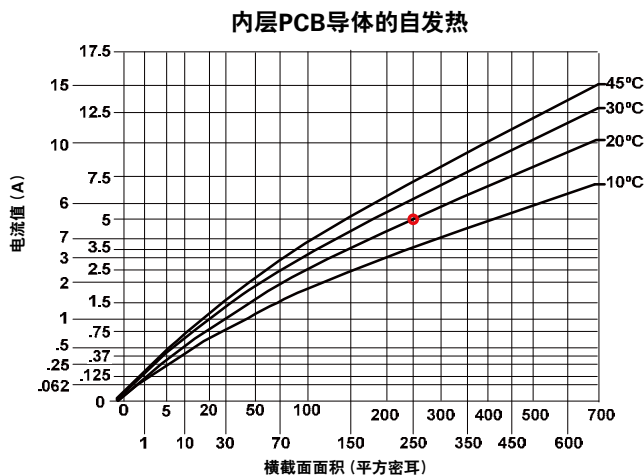


图40: 内层PCB传输线的自发热

#### 示例

找到使PCB传输线（宽度0.1英寸，并使用2oz/ft<sup>2</sup>纯铜）温度上升20° C的电流值。（假定传输线在PCB的外部。）

#### 答案

首先使用下方图表将0.1英寸转化为250平方密耳。然后使用上部图表找到与10° C和250平方密耳相关的电流（答案 = 5A）。

经许可摘自IPC-2152, 图5-1。

如需获得其它信息，请在[www.ipc.com](http://www.ipc.com)内下载完整技术规格。

针对1oz铜覆区的PCB传输线电阻

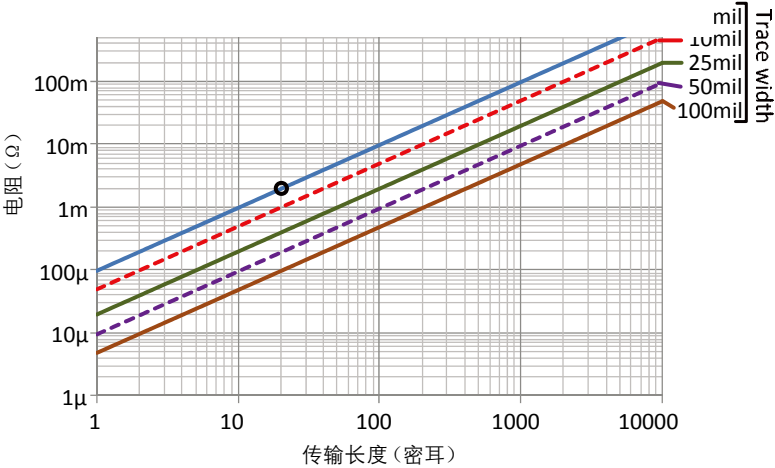


图41: 25°C时, 对于1oz铜覆区, PCB传输线电阻与长度和宽度的关系

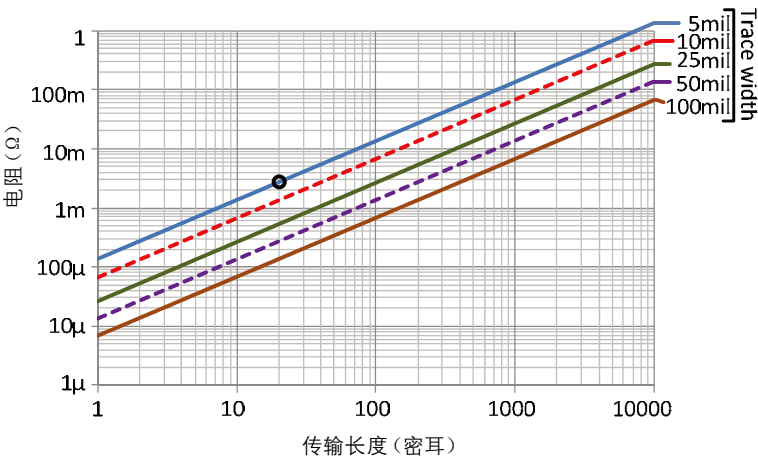


图42: 125°C时, 对于1oz铜覆区, PCB传输线电阻与长度和宽度的关系

示例

25°C和125°C时, 20密耳长、5密耳宽传输线对于1oz铜覆区厚度的电阻是多少?

答案

$R_{25C} = 2m\Omega$ ,  $R_{125C} = 3m\Omega$ 。这两个点已在曲线上圈出。

## 针对2oz铜覆区的PCB传输线电阻

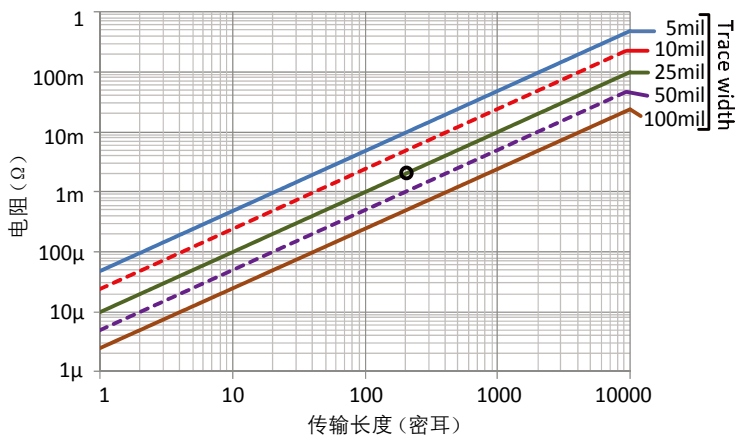


图43: 25°C时, 对于2oz铜覆区, PCB传输线电阻与长度和宽度的关系

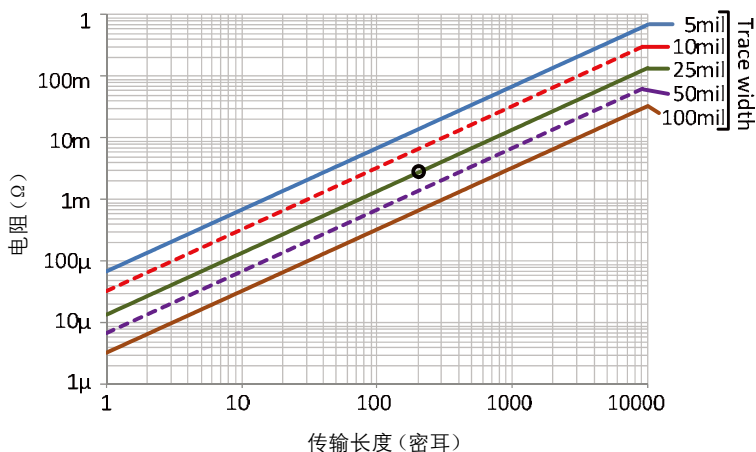


图44: 125°C时, 对于2oz铜覆区, PCB传输线电阻与长度和宽度的关系

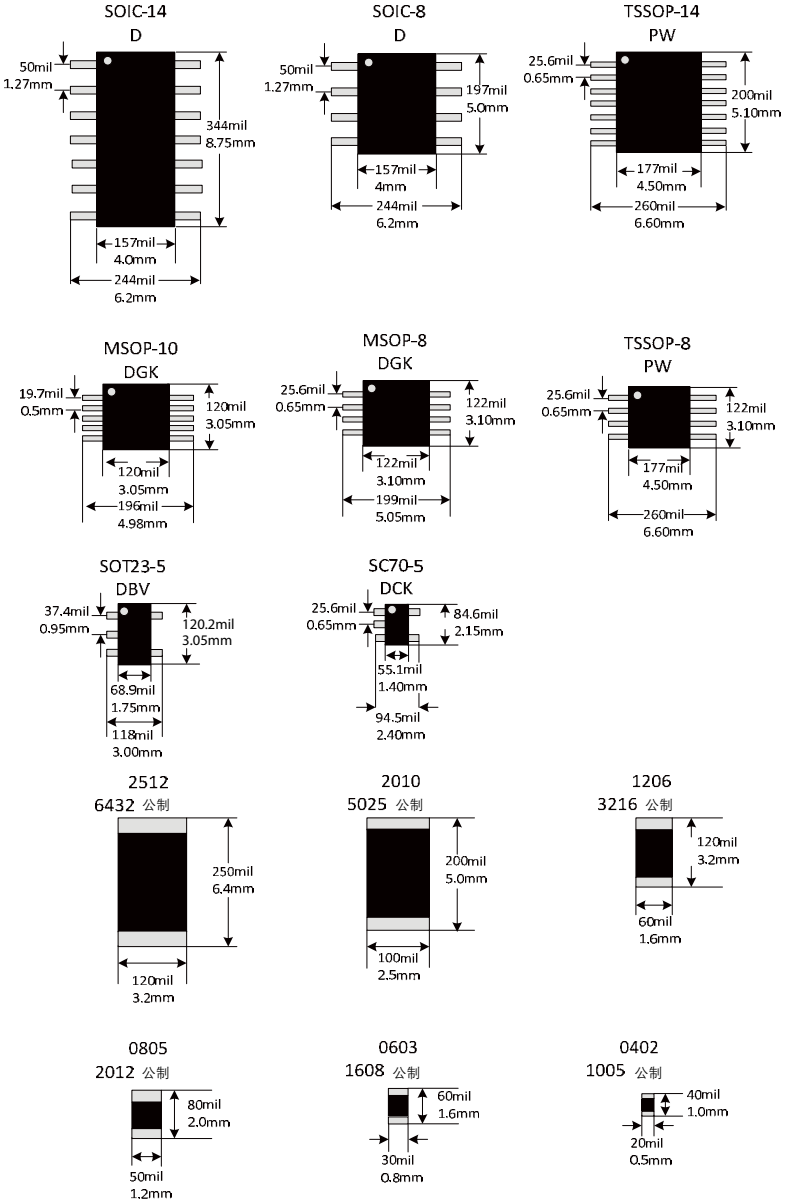
## 示例

25°C和125°C时, 200密耳长、25密耳宽传输线对于2oz铜覆区厚度的电阻是多少?

## 答案

$R_{25C} = 2m\Omega$ ,  $R_{125C} = 3m\Omega$ 。这两个点已在曲线上圈出。

常见封装类型和尺寸



## PCB平行板电容

$$C(\text{pF}) = \frac{k \cdot \ell \cdot w \cdot \epsilon_r}{h} \quad (82) \text{ Capacitance for parallel copper planes}$$

## 在这里

$k$  = 真空电容率。

给出了公制和英制常数。

$k = 8.854 \cdot 10^{-3} \text{ pF/mm}$ , 或  $2.247 \cdot 10^{-4} \text{ pF/mil}$

$\ell$  = 长度 (公制为mm, 英制为mil)

$w$  = 宽度 (公制为mm, 英制为mil)

$h$  = 平面之间的间隔 (公制为mm, 英制为mil)

$\epsilon_r$  = PCB相对介电常数 (对于FR-4,  $\epsilon_r = 4.5$ )

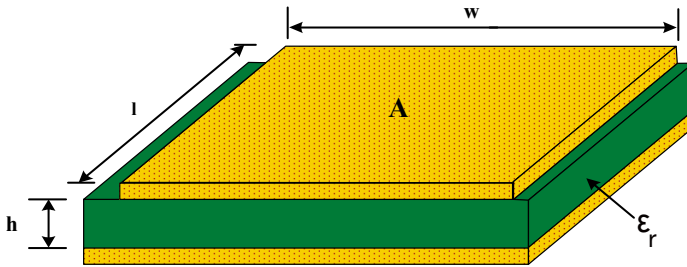


图45: PCB平行板电容

**示例** 计算  $\ell=5.08\text{mm}$ ,  $w=12.7\text{mm}$ ,  $h=1.575\text{mm}$ ,  $\epsilon_r = 4.5$  时的总电容

$$C(\text{pF}) = \frac{(8.854 \cdot 10^{-3} \text{ pF/mm}) \cdot (5.08\text{mm}) \cdot (12.7\text{mm}) \cdot (4.5)}{1.575\text{mm}} = 1.63\text{pF}$$

**示例** 计算  $\ell=200\text{mil}$ ,  $w=500\text{mil}$ ,  $h=62\text{mil}$ ,  $\epsilon_r = 4.5$  时的总电容

$$C(\text{pF}) = \frac{(2.247 \cdot 10^{-4} \text{ pF/mil}) \cdot (200\text{mil}) \cdot (500\text{mil}) \cdot (4.5)}{62\text{mil}} = 1.63\text{pF}$$

## 微带线电容与电感

$$L(\text{nH}) = k_L \cdot \ell \cdot \ln\left(\frac{5.98 \cdot h}{0.8 \cdot w + t}\right) \quad (83) \text{ Inductance for microstrip}$$

$$C(\text{pF}) = \frac{k_C \cdot \ell \cdot (\epsilon_r + 1.41)}{\ln\left(\frac{5.98 \cdot h}{0.8 \cdot w + t}\right)} \quad (84) \text{ Capacitance for microstrip}$$

## 在这里

$k_L$  = 单位长度PCB电感。

给出了公制和英制常量。

$k_L = 2\text{nH/cm}$ , 或  $5.071\text{nH/in}$

$k_C$  = 单位长度PCB电容。

给出了公制和英制常量。

$k_C = 0.264\text{pF/cm}$ ,  $0.67056\text{pF/in}$

$\ell$  = 微带线长度 (公制为mm, 英制为mil)

$w$  = 微带线宽度 (公制为mm, 英制为mil)

$t$  = 铜覆区厚度 (公制为mm, 英制为mil)

$h$  = 平面之间的间隔 (公制为mm, 英制为mil)

$\epsilon_r$  = 相对介电常数, 对于FR-4, 大约为4.5

对于英制来说:

铜覆区厚度 (mil) =  $1.37 \cdot (\text{盎司数量})$

即, 1oz Cu = 1.37mil

即,  $\frac{1}{2}\text{oz Cu} = 0.684\text{mil}$

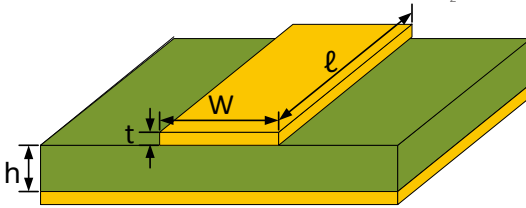


图48: PCB微带线电容与电感

**示例** 计算  $\ell=2.54\text{cm}$ ,  $w=0.254\text{mm}$ ,  $t=0.0356\text{mm}$ ,  $h=0.8\text{mm}$ ,  $\epsilon_r = 4.5$  时, FR-4 类型电路板的总电感和电容

$$L(\text{pF}) = (2 \text{ nH/cm}) \cdot (2.54\text{cm}) \cdot \ln\left(\frac{5.98 \cdot 0.8\text{mm}}{0.8 \cdot 0.254\text{mm} + 0.0356\text{mm}}\right) = 15.2\text{nH}$$

$$C(\text{pF}) = \frac{(0.264\text{pF/cm}) \cdot (2.54\text{cm})(4.5 + 1.41)}{\ln\left(\frac{5.98 \cdot 0.8\text{mm}}{0.8 \cdot 0.254\text{mm} + 0.0356\text{mm}}\right)} = 1.3\text{pF}$$

**示例** 计算  $\ell=1\text{in}$ ,  $w=10\text{mil}$ ,  $t=1.4\text{mil}$ ,  $h=31.5\text{mil}$ ,  $\epsilon_r = 4.5$  时, FR-4 类型电路板的总电感和电容

$L = 15.2\text{nH}$ ,  $C=1.3\text{pF}$ . 注释 这个问题与上面的问题一样, 只不过采用的是英制。

## 相邻纯铜传输线

$$C(\text{pF}) \approx \frac{k \cdot t \cdot \ell}{d} \quad (85) \text{ Same layer}$$

$$C(\text{pF}) \approx \frac{k \cdot \epsilon_r \cdot w \cdot \ell}{h} \quad (86) \text{ Different layers}$$

## 在这里

$\ell$  = 纯铜传输线的长度 (mil, 或mm)

$k = 8.854 \cdot 10^{-3} \text{pF/mm}$ , 或  $k = 2.247 \cdot 10^{-4} \text{pF/mil}$

$t$  = 传输线厚度 (mil, 或mm)

$d$  = 同一层传输线之间的距离 (mil, 或mm)

$w$  = 传输线的宽度 (mil, 或mm)

$h$  = 平面之间的间隔 (mm, 或mil)

$\epsilon_r$  = PCB介电常数 (对于FR-4,  $\epsilon_r = 4.5$ )

对于英制来说:

铜覆区厚度 (mil) =  $1.37 \cdot (\text{盎司数量})$

即, 1oz Cu = 1.37mil

即, 1/2oz Cu = 0.684mil

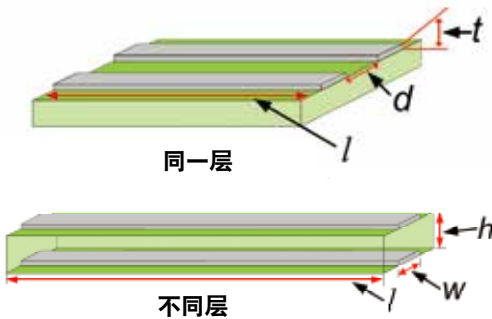


图47: 相邻纯铜传输线的电容

**示例** 计算两个情况下的总电容值:  $\ell=2.54\text{mm}$ ,  $t=0.0348\text{mm}$ ,

$d=0.254\text{mm}$ ,  $w=0.635\text{mm}$ ,  $h=1.6\text{mm}$ ,  $\epsilon_r = 4.5$  时, FR-4 类型电路板的值

$$C(\text{pF}) \approx \frac{(8.854 \cdot 10^{-3} \text{ pF/mm}) (0.0348\text{mm}) (2.54\text{mm})}{0.254\text{mm}} = 0.0031\text{pF Same layer}$$

$$C(\text{pF}) \approx \frac{(8.854 \cdot 10^{-3} \text{ pF/mm}) (4.5\text{mm}) (0.635\text{mm}) (2.54\text{mm})}{1.6\text{mm}} = 0.04\text{pF Adjacent layers}$$

**示例** 计算两个情况下的总电容值:  $\ell=100\text{mil}$ ,  $t=1.37\text{mil}$ ,  $d=10\text{mil}$ ,

$w=25\text{mil}$ ,  $h=63\text{mil}$ ,  $r = 4.5$  时, FR-4 类型电路板的值

$C = 0.0031\text{pF}$  (同层),  $C=0.04\text{pF}$  (邻层)。注释: 这个问题与上面的问题一样, 只不过采用的是英制。

## PCB过孔电感和电感

$$L(\text{nH}) \approx k_L \cdot h \left[ 1 + \ln \left( \frac{4h}{d} \right) \right] \quad (87) \text{ Inductance for via}$$

$$C(\text{pF}) \approx \frac{k_C \cdot \epsilon_r \cdot h \cdot d_1}{d_2 - d_1} \quad (88) \text{ Capacitance for via}$$

## 在这里

$k_L$  = 单位长度PCB电感。

给出了公制和英制常量。

$k_L = 0.2\text{nH/mm}$ , 或  $5.076 \cdot 10^{-3}\text{nH/mil}$

$k_C$  = 单位长度PCB电容。

给出了公制和英制常量。

$k_C = 0.0555\text{pF/mm}$ , 或  $1.41 \cdot 10^{-3}\text{pF/mil}$

$h$  = 平面之间的间隔

$d$  = 过孔直径

$d_1$  = 过孔周围垫片的直径

$d_2$  = 到内部层接地平面的距离

$\epsilon_r$  = PCB介电常数 (对于FR-4,  $\epsilon_r = 4.5$ )

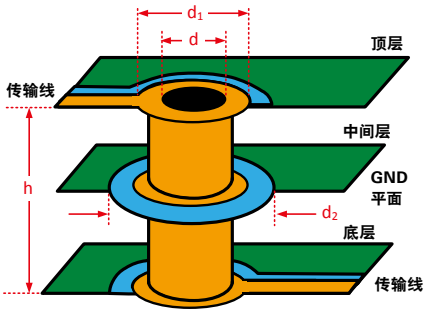


图48: 过孔的电感和电容

**示例** 计算  $h=1.6\text{mm}$ ,  $d=0.4\text{mm}$ ,  $d_1=0.8\text{mm}$ ,  $d_2=1.5\text{mm}$  时的总电感和电容

$$L(\text{nH}) \approx (0.2 \text{ nH/mm}) \cdot (1.6\text{mm}) \left[ 1 + \ln \left( \frac{4 \cdot 1.6\text{mm}}{0.4\text{mm}} \right) \right] = 1.2\text{nH}$$

$$C(\text{pF}) \approx \frac{(0.0555\text{pF/mm}) \cdot (4.5) \cdot (1.6\text{mm}) \cdot (0.8\text{mm})}{1.5\text{mm} - 0.8\text{mm}} = 0.46\text{pF}$$

**示例** 计算  $h=63\text{mil}$ ,  $d=15.8\text{mil}$ ,  $d_1=31.5\text{mil}$ ,  $d_2=59\text{mil}$  时的总电感和电容  
 $L = 1.2\text{nH}$ ,  $C=0.46\text{pF}$ 。注释 这个问题与上面的问题一样,只不过采用的是英制。



## 同轴电缆信息

类型	$Z_0$	电容/长度 (pF/英尺)	外径 (英寸)	750MHz时, 每100英尺的dB衰减	电介质类型	应用
RG-58	53.5 $\Omega$	28.8	0.195	13.1	PE	测试设备并且RF功率为几百瓦, 数百MHz
RG-8	52 $\Omega$	29.6	0.405	5.96	PE	RF功率几kW, 最高几百MHz
RG-214/U	50 $\Omega$	30.8	0.425	6.7	PE	
9914	50 $\Omega$	26.0	0.405	4.0	PE	
RG-6	75 $\Omega$	20	0.270	5.6	PE	视频和CATV应用。RF功率几百瓦, 最高几百MHz, 如果可以接受损耗的话, 有时频率会更高
RG-59/U	73 $\Omega$	29	0.242	9.7	PE	
RG-11/U	75 $\Omega$	17	0.412	3.65	PE	RF功率几kW, 最高数百MHz
RG-62/U	93 $\Omega$	13.5	0.242	7.1	ASP	在某些测试设备中使用, 以及100 $\Omega$ 视频应用
RG-174	50 $\Omega$	31	0.100	23.5	PE	微型同轴电缆主要用于测试设备互连。由于损耗较高, 所以通常长度较短。
RG-178/U	50 $\Omega$	29	0.071	42.7	ST	

## 同轴电缆方程式

$$\frac{C}{\ell} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (89) \text{ Capacitance per length}$$

$$\frac{L}{\ell} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (90) \text{ Inductance per length}$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (91) \text{ Characteristic impedance}$$

## 在这里

L = 电感, 单位亨利 (H)

C = 电容, 单位法拉第 (F)

Z = 阻抗, 单位欧姆 (W)

d = 内部导体的直径

D = 屏蔽层内径, 或介电绝缘体的直径

$\epsilon$  = 绝缘体的介电常数 ( $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_o$ )

$\mu$  = 导磁系数 ( $\mu = \mu_r \mu_o$ )

$\ell$  = 电缆长度

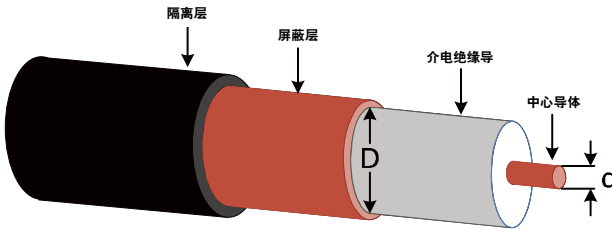


图49: 同轴电缆剖视图

表20: 不同类型导线 (AWG) 单位长度电阻

AWG	标准	外径		面积		dc电阻	
		in	mm	圆密耳	mm <sup>2</sup>	Ω / 1000 ft	Ω / km
36	Solid	0.005	0.127	25	0.013	445	1460
36	7/44	0.006	0.152	28	0.014	371	1271
34	Solid	0.0063	0.160	39.7	0.020	280	918
34	7/42	0.0075	0.192	43.8	0.022	237	777
32	Solid	0.008	0.203	67.3	0.032	174	571
32	7/40	0.008	0.203	67.3	0.034	164	538
30	Solid	0.010	0.254	100	0.051	113	365
30	7/38	0.012	0.305	112	0.057	103	339
28	Solid	0.013	0.330	159	0.080	70.8	232
28	7/36	0.015	0.381	175	0.090	64.9	213
26	Solid	0.016	0.409	256	0.128	43.6	143
26	10/36	0.021	0.533	250	0.128	41.5	137
24	Solid	0.020	0.511	404	0.205	27.3	89.4
24	7/32	0.024	0.610	448	0.229	23.3	76.4
22	Solid	0.025	0.643	640	0.324	16.8	55.3
22	7/30	0.030	0.762	700	0.357	14.7	48.4
20	Solid	0.032	0.813	1020	0.519	10.5	34.6
20	7/28	0.038	0.965	1111	0.562	10.3	33.8
18	Solid	0.040	1.020	1620	0.823	6.6	21.8
18	7/26	0.048	1.219	1770	0.902	5.9	19.2
16	Solid	0.051	1.290	2580	1.310	4.2	13.7
16	7/24	0.060	1.524	2828	1.442	3.7	12.0
14	Solid	0.064	1.630	4110	2.080	2.6	8.6
14	7/22	0.073	1.854	4480	2.285	2.3	7.6

表21: 最大电流与AWG的关系

线规 号数	聚乙烯氯丁橡胶聚氯 乙烯 (半刚性), 80°C 时	聚丙烯聚乙烯 (高密 度), 90°C 时	聚氯乙烯尼龙, 105°C 时	Kynar 聚乙烯热塑 料, 125°C 时	Kapton Teflon 硅薄膜, 200°C 时
AWG	I <sub>max</sub> (A)	I <sub>max</sub> (A)	I <sub>max</sub> (A)	I <sub>max</sub> (A)	I <sub>max</sub> (A)
30	2	3	3	3	4
28	3	4	4	5	6
26	4	5	5	6	7
24	6	7	7	8	10
22	8	9	10	11	13
20	10	12	13	14	17
18	15	17	18	20	24
16	19	22	24	26	32
14	27	30	33	40	45
12	36	40	45	50	55
10	47	55	58	70	75

注释: 导线处于 25C 的大气环境中。

### 示例

在室温环境中, 可以施加到 30 线规 Teflon 导线的最大电流是多少? 自发热将为多少?

### 答案

$I_{max} = 4A$

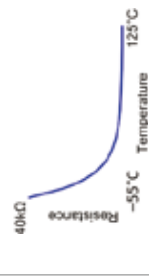
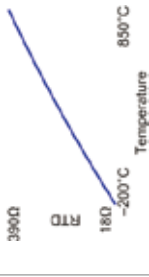
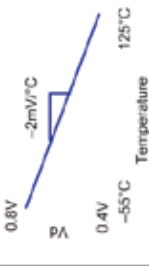
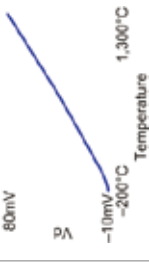
导线温度 = 200°C

## 传感器

- 热敏电阻
- 电阻式温度检测器 (RTD)
- 二极管温度特性
- 热电偶 (J和K)



表21: 最大电流与AWG的关系

	热敏电阻	RTD	二极管	热电偶
<b>温度范围</b>				
<b>成本</b>	-55° C < T < 150° C 低	-200° C < T < 850° C 高	-55° C < T < 150° C 低	-250° C < T < 1800° C 低
<b>准确度</b>	单个温度准确度较好 在整个范围内准确度较差	出色的准确度	在不校准的情况下, 准确度差	在使用多项式校正的情况下, 准确度较好
<b>线性</b>	极其非线性。遵循倒数(1 of 对数函数	线性相当好 满量程范围内非线性 < 4.5% 相对简单的二次函数	线性相当好 斜率根据电流激励、二极管类型、以及二极管工艺发生变化	线性相当好 满量程范围内非线性 < 10% 复式10阶多项式
<b>构造</b>	不太坚固耐用	视类型而定(可以很坚固耐用)	坚固耐用	最坚固耐用
<b>输出范围</b>	通常为几十到几百kW 满量程 电阻非常宽的变阻范围	PT100为18至390W PT1000为180至3.9kW	0.4至0.8V	几十毫伏
<b>应用范围</b>	通用	科学和工业应用	低成本温度监视器 低成本线性响应	工业温度测量
<b>通性</b>	需要激励	需要激励	需要激励	自供电 需要冷端补偿

**热敏电阻：电阻到温度转换，Steinhart-Hart方程式**

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c (\ln(R))^3 \quad (92) \text{ Convert resistance to temperature for a thermistor}$$

**在这里**

T = 温度，单位开

a, b, c = Steinhart-Hart方程式常数

R = 电阻，单位欧姆

**热敏电阻：温度到电阻转换，Steinhart-Hart方程式**

$$R = \exp \left[ \left( y - \frac{x}{2} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( y + \frac{x}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (93) \text{ Convert temperature to resistance for a thermistor}$$

$$x = \frac{a - \frac{1}{T}}{c} \quad (94) \text{ Factor used in Equation 93}$$

$$y = \sqrt{\left( \frac{b}{3c} \right)^3 + \frac{x^2}{4}} \quad (95) \text{ Factor used in Equation 93}$$

**在这里**

R = 电阻值，单位 $\Omega$

T = 温度，单位开

a, b, c = Steinhart-Hart方程式常数

x, y = 温度到电阻换算方程式中用到的Steinhart-Hart因子

**RTD温度与电阻换算方程式**

$$R_{\text{rtd}} = R_0 [1 + A_0 T + B_0 T^2 + C_0 (T - 100) T^3] \quad (96) \text{ RTD resistance for } T < 0^\circ\text{C}$$

$$R_{\text{rtd}} = R_0 [1 + A_0 T + B_0 T^2] \quad (97) \text{ RTD resistance for } T > 0^\circ\text{C}$$

**在这里**

$R_{\text{rtd}}$  = 温度范围内 (-200°C < T < 850°C) 的RTD电阻  
 $R_0$  = 对于PT-100为100W, 对于PT-1000为1000W  
 $A_0, B_0, C_0$  = Callendar-Van Dusen 常数  
 T = 温度, 单位摄氏度 (°C)  
 RTD电阻与温度换算方程式 (T > °C)

**RTD温度与电阻换算方程式**

$$T = \frac{-A_0 + \sqrt{A_0^2 - 4B_0 \left(1 - \frac{R_{\text{RTD}}}{R_0}\right)}}{2B_0} \quad (98) \text{ RTD resistance for } T > 0^\circ\text{C}$$

**在这里**

$R_{\text{RTD}}$  = 温度范围内 (-200°C < T < 850°C) 的RTD电阻  
 $R_0 = 100\text{W}$   
 $A_0, B_0, C_0$  = Callendar-Van Dusen常数  
 T = 温度, 单位摄氏度 (°C)  
 表23: 针对不同RTD标准的Callendar-Van Dusen系数

**表23: 针对不同RTD标准的Callendar-Van Dusen系数**

	IEC-751 DIN 43760 BS 1904 ASTM-E1137 EN-60751	JISC 1604	美国工业标 准D-100	美国工业 标准	ITS-90
$A_0$	+3.9083E-3	+3.9739E-3	+3.9787E-3	+3.9692E-3	+3.9888E-3
$B_0$	-5.775E-7	-5.870E-7	-5.8686E-7	-5.8495E-7	-5.915E-7
$C_0$	-4.183E-12	-4.4E-12	-4.167E-12	-4.233E-12	-3.85E-12

**示例**

电阻值为 60 的 ITS-90 PT-100 温度是多少?

**答案**

$$T = \frac{- (3.9888 \cdot 10^{-3}) + \sqrt{(3.9888 \cdot 10^{-3})^2 - 4(-5.915 \cdot 10^{-7}) \left(1 - \frac{120}{100}\right)}}{2(-5.915 \cdot 10^{-7})} = 50.5^\circ\text{C}$$



## RTD电阻与温度换算方程式

$$T = \sum_{i=0}^n \alpha_i (R_{\text{rtd}})^i \quad (99) \text{ RTD resistance for } T < 0^{\circ}\text{C}$$

### 在这里

T = 温度, 单位摄氏度 (°C)

RRTD = 温度范围内 (T < 0°C) 的RTD电阻

$\alpha_i$  = T < 0°C时, 将RTD电阻换算为温度的多项式系数

表24: 针对5阶RTD电阻至温度换算的系数

	IEC-751 DIN 43760 BS 1904 ASTM-E1137 EN-60751	JISC 1604	美国工业标准 D-100	美国工业标准	ITS-90
$\alpha_0$	-2.4202E+02	-2.3820E+02	-2.3818E+02	-2.3864E+02	-2.3791E+02
$\alpha_1$	2.2228E+00	2.1898E+00	2.1956E+00	2.1973E+00	2.2011E+00
$\alpha_2$	2.5857E-03	2.5226E-03	2.4413E-03	2.4802E-03	2.3223E-03
$\alpha_3$	-4.8266E-06	-4.7825E-06	-4.7517E-06	-4.7791E-06	-4.6280E-06
$\alpha_4$	-2.8152E-08	-2.7009E-08	-2.3831E-08	-2.5157E-08	-1.9702E-08
$\alpha_5$	1.5224E-10	1.4719E-10	1.3492E-10	1.4020E-10	1.1831E-10

### 示例

电阻值为 60  $\Omega$  的 ITS-90 PT-100 温度是多少?

### 答案

$$T = (-2.3791E + 02) \cdot (60)^0 + (2.2011E + 00) \cdot (60)^1 + (2.3223E - 03) \cdot (60)^2 + \dots + (2.3223E - 03) \cdot (60)^5 = -98.6^{\circ}\text{C}$$

## 二极管方程式与温度

$$V_D = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_S}\right) \quad (100) \text{ Diode voltage}$$

### 在这里

$V_D$  = 相对于温度和电流的二极管电压

$n$  = 二极管理想因子 (范围从1至2)

$k$  =  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K, 玻尔兹曼常数

$T$  = 温度, 单位开

$q$  =  $1.60 \times 10^{-19}$ C, 一个电子的电量

$I$  = 正向二极管电流, 单位安培

$I_S$  = 饱和电流

$$I_S = \alpha T^{(3/n)} \exp\left(-\frac{qV_G}{nkT}\right) \quad (101) \text{ Saturation current}$$

### 在这里

$I_S$  = 饱和电流

$\alpha$  = 与结横截面积有关的常数

$V_G$  = 相对于温度和电流的二极管电压

$n$  = 二极管理想因子 (范围从1至2)

$k$  =  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K, 玻尔兹曼常数

$T$  = 温度, 单位开

$q$  =  $1.60 \times 10^{-19}$ C, 一个电子的电量

## 二极管电压与温度之间的关系

图50显示的是一个二极管温度漂移示例。根据二极管特性以及正向电压的不同，这条曲线的斜率和偏移将会发生变化。然而，二极管漂移的典型值大约为  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。在室温下，通常会出现 $0.6\text{V}$ 的正向压降。

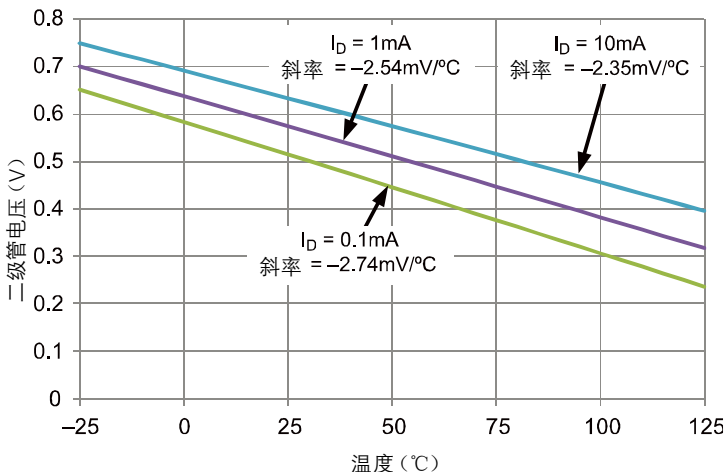


图50: 二极管压降与温度之间的关系

将温度转换为电压的J型热电偶 (ITS-90标准)

$$V_t = \sum_{i=0}^n c_i (T)^i \quad (102) \text{ Thermoelectric voltage}$$

在这里

$V_T$  = 热电电压

T = 温度, 单位摄氏度

$c_i$  = 转换系数

表25: J型热电偶温度到电压转换系数

	-219°C 至 760°C	760°C 至 1,200°C
$c_0$	0.0000000000E+00	2.9645625681E+05
$c_1$	5.0381187815E+01	-1.4976127786E+03
$c_2$	3.0475836930E-02	3.1787103924E+00
$c_3$	-8.5681065720E-05	-3.1847686701E-03
$c_4$	1.3228195295E-07	1.5720819004E-06
$c_5$	-1.7052958337E-10	-3.0691369056E-10
$c_6$	2.0948090697E-13	—
$c_7$	-1.2538395336E-16	—
$c_8$	1.5631725697E-20	—

## 将电压转换为温度的J型热电偶 (ITS-90标准)

$$T = \sum_{i=0}^n c_i (V_t)^i \quad (103) \text{ Temperature}$$

表26: J型热电偶电压到温度转换系数

	-219°C至 0°C	0°C至 760°C	760°C至 1,200°C
$c_0$	0.00000000E+00	0.00000000E+00	-3.113581870E+03
$c_1$	1.952826800E-02	1.978425000E-02	3.005436840E-01
$c_2$	-1.228618500E-06	-2.001204000E-07	-9.947732300E-06
$c_3$	-1.075217800E-09	1.036969000E-11	1.702766300E-10
$c_4$	-5.908693300E-13	-2.549687000E-16	-1.430334680E-15
$c_5$	-1.725671300E-16	3.585153000E-21	4.738860840E-21
$c_6$	-2.813151300E-20	-5.344285000E-26	—
$c_7$	-2.396337000E-24	5.099890000E-31	—
$c_8$	-8.382332100E-29	—	—

将温度转换为电压的K型热电偶 (ITS-90标准)

$$V_T = \sum_{i=0}^n c_i (T)^i \quad (104) \text{ Thermoelectric voltage for } T < 0^\circ\text{C}$$

$$V_t = \left[ \sum_{i=0}^n c_i (T)^i \right] + \alpha_0 e^{[\alpha_1(T-126.9686)]^2} \quad (105) \text{ Thermoelectric voltage for } T > 0^\circ\text{C}$$

[在这里](#)

$V_T$  = 热电电压

T = 温度, 单位摄氏度

$C_i$  = 转换系数

$\alpha_0, \alpha_1$  = 转换系数

表27: K型热电偶温度至电压转换系数

	-219°C至 760°C	760°C至 1,200°C
<b>C<sub>0</sub></b>	0.0000000000E+00	-1.7600413686E+01
<b>C<sub>1</sub></b>	3.9450128025E+01	3.8921204975E+01
<b>C<sub>2</sub></b>	2.3622373598E-02	1.8558770032E-02
<b>C<sub>3</sub></b>	-3.2858906784E-04	-9.9457592874E-05
<b>C<sub>4</sub></b>	-4.9904828777E-06	3.1840945719E-07
<b>C<sub>5</sub></b>	-6.7509059173E-08	-5.6072844889E-10
<b>C<sub>6</sub></b>	-5.7410327428E-10	5.6075059059E-13
<b>C<sub>7</sub></b>	-3.1088872894E-12	-3.2020720003E-16
<b>C<sub>8</sub></b>	-1.0451609365E-14	9.7151147152E-20
<b>C<sub>9</sub></b>	-1.9889266878E-17	-1.2104721275E-23
<b>C<sub>10</sub></b>	-1.6322697486E-20	—
<b>α<sub>0</sub></b>	—	1.1859760000E+02
<b>α<sub>1</sub></b>	—	-1.1834320000E-04

## 将电压转换为温度的K型热电偶 (ITS-90标准)

$$T = \sum_{i=0}^n c_i (V_t)^i \quad (106) \text{ Temperature}$$

表28: K型热电偶电压到温度转换系数

	-219°C至 0°C	0°C至 760°C	760°C至 1,200°C
<b>C<sub>0</sub></b>	0.0000000E+00	0.0000000E+00	-1.3180580E+02
<b>C<sub>1</sub></b>	2.5173462E-02	2.5083550E-02	4.8302220E-02
<b>C<sub>2</sub></b>	-1.1662878E-06	7.8601060E-08	-1.6460310E-06
<b>C<sub>3</sub></b>	-1.0833638E-09	-2.5031310E-10	5.4647310E-11
<b>C<sub>4</sub></b>	-8.9773540E-13	8.3152700E-14	-9.6507150E-16
<b>C<sub>5</sub></b>	-3.7342377E-16	-1.2280340E-17	8.8021930E-21
<b>C<sub>6</sub></b>	-8.6632643E-20	9.8040360E-22	-3.1108100E-26
<b>C<sub>7</sub></b>	-1.0450598E-23	-4.4130300E-26	—
<b>C<sub>8</sub></b>	-5.1920577E-28	1.0577340E-30	—
<b>C<sub>9</sub></b>	—	-1.0527550E-35	—

表29: 不同材料的塞贝克系数

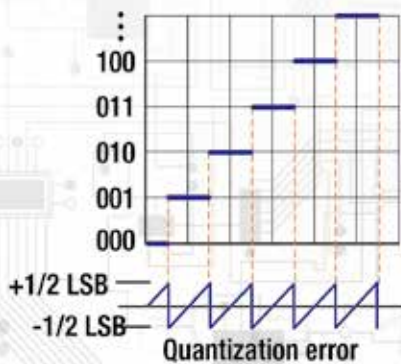
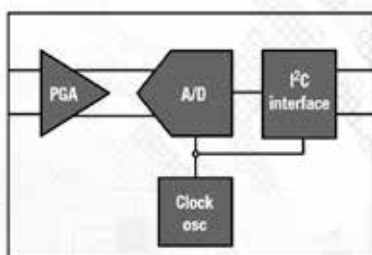
材料	塞贝克系数	材料	塞贝克系数	材料	塞贝克系数
铝	4	金	6.5	铯	6
铈	47	铁	19	硒	900
铋	-72	铅	4	硅	440
镉	7.5	水银	0.6	银	6.5
碳	3	镍铬铁合金	25	钠	-2.0
铜镍合金	-35	镍	-15	钽	4.5
铜	6.5	铂	0	碲	500
锗	300	钾	-9.0	钨	7.5

注释: 单位均为V/°C。所有数据均在0°C下测得。



## A/D 转换

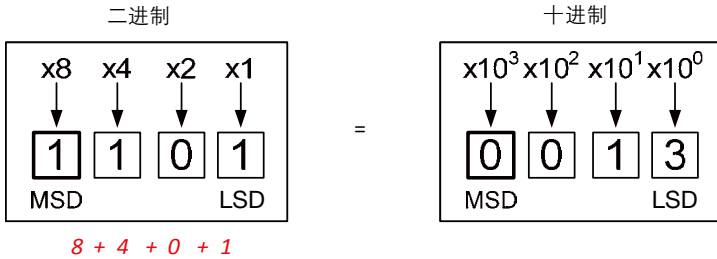
- 二进制/十六进制换算
- A/D和D/A转换函数
- 量化误差
- 信噪比 (SNR)
- 信噪比和失真 (SINAD)
- 总谐波失真 (THD)
- 有效位数 (ENOB)
- 无噪声分辨率与有效分辨率



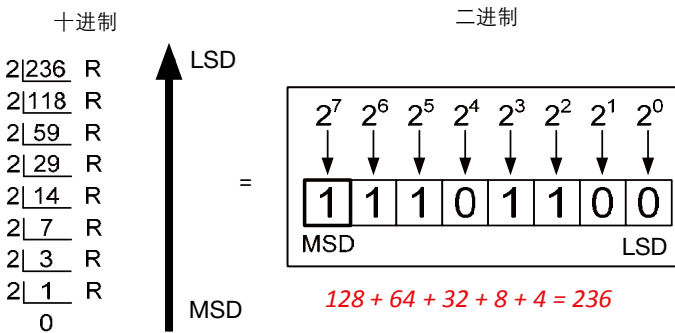
计数系统：二进制、十进制和十六进制

二进制 (基数-2)					十进制 (基数-10)					十六进制 (基数-16)															
					0					1															
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F

换算示例：二进制转换为十进制



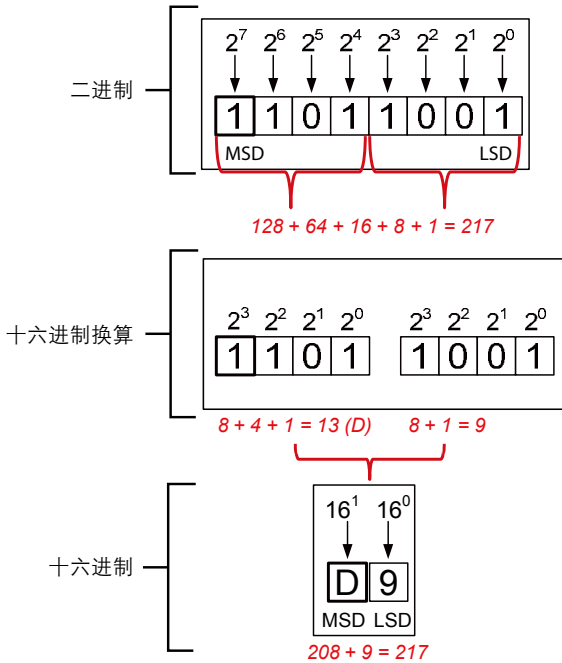
换算示例：十进制转换为二进制



LSD=最低有效位

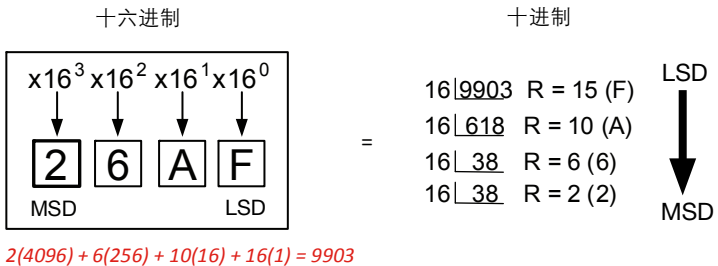
MSD=最高有效位

换算示例：二进制转[转换为]十六进制



换算示例：十六进制转[转换为]十进制以及  
十进制转[转换为]十六进制

十进制 (基数-10)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
十六进制 (基数-16)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F



LSD=最低有效位

MSD=最高有效位

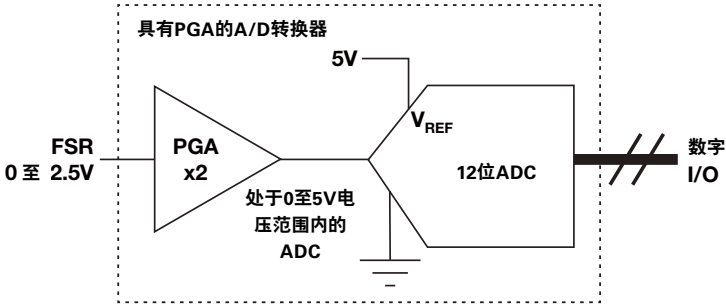


图51: 单极性输入ADC满量程范围(FSR)]

## 单极性输入ADC满量程范围(FSR)]

$$FSR = \frac{V_{REF}}{PGA}$$

$$1LSB = \frac{FSR}{2^n}$$

针对以上电路的计算示例。

$$FSR = \frac{V_{REF}}{PGA} = \frac{5V}{2} = 2.5V$$

$$1LSB = \frac{FSR}{2^n} = \frac{2.5V}{2^{12}} = 610.35\mu V$$

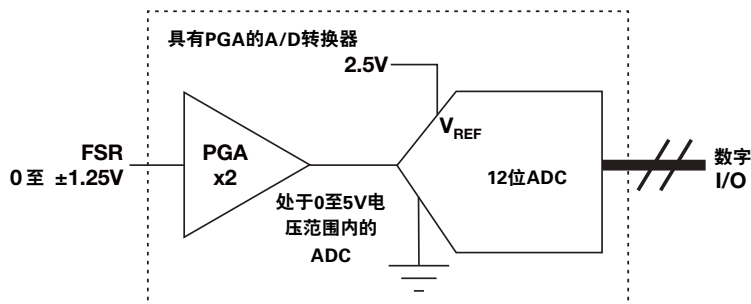


图52: 双极性输入ADC满量程范围(FSR)]

### 双极性输入ADC满量程范围(FSR)

$$FSR = \frac{V_{REF}}{PGA}$$

$$1LSB = \frac{FSR}{2^n}$$

针对以上电路的计算示例。

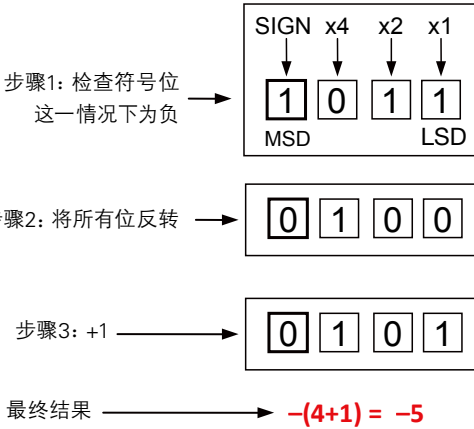
$$FSR = \frac{\pm V_{REF}}{PGA} = \frac{\pm 2.5V}{2} = \pm 1.25V \Rightarrow 2.5V$$

$$1LSB = \frac{FSR}{2^n} = \frac{2.5V}{2^{12}} = 610.35\mu V$$

表30: 不同的数据格式

编码	标准二进制	偏移二进制	二进制补码
二进制	十进制值	十进制值	十进制值
11111111	255	127	-1
11000000	192	64	-64
10000000	128	0	-128
01111111	127	-1	127
01000000	64	-64	64
00000000	0	-128	0

将二进制补码换算为十进制数: 以负数为例



将二进制补码换算为十进制数: 以正数为例

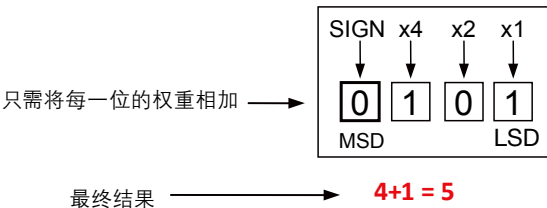


表31: LSB电压与分辨率和基准电压之间的关系

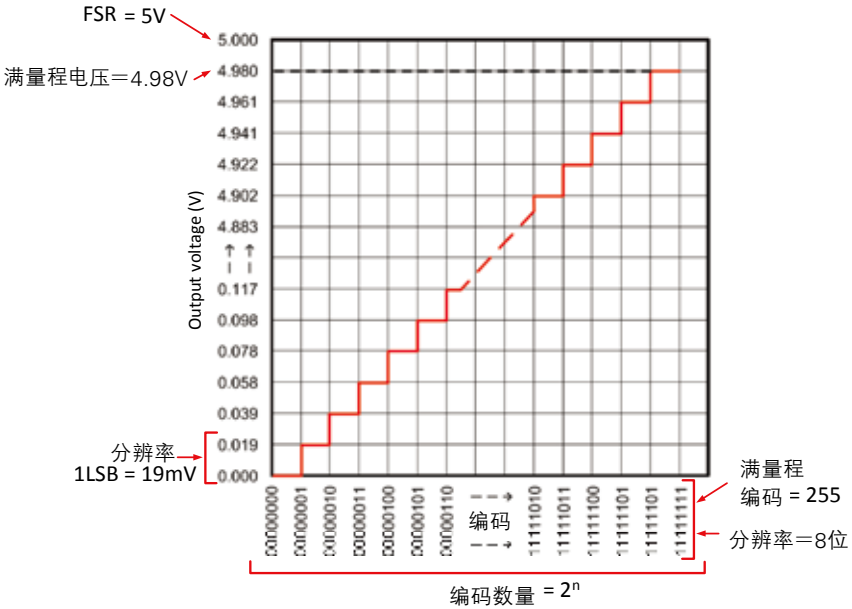
		FSR (满量程范围)			
		1.024V	1.25V	2.048V	2.5V
分辨率	8	4 mV	4.88 mV	8 mV	9.76 mV
	10	1 mV	1.22 mV	2 mV	2.44 mV
	12	250 $\mu$ V	305 $\mu$ V	500 $\mu$ V	610 $\mu$ V
	14	52.5 $\mu$ V	76.3 $\mu$ V	125 $\mu$ V	152.5 $\mu$ V
	16	15.6 $\mu$ V	19.1 $\mu$ V	31.2 $\mu$ V	38.14 $\mu$ V
	18	3.91 $\mu$ V	4.77 $\mu$ V	7.81 $\mu$ V	9.53 $\mu$ V
	20	0.98 $\mu$ V	1.19 $\mu$ V	1.95 $\mu$ V	2.384 $\mu$ V
	22	244 nV	299 nV	488 nV	596 nV
	24	61 nV	74.5 nV	122 nV	149 nV

表32: LSB电压与分辨率和基准电压之间的关系

		FSR (满量程范围)			
		3V	3.3V	4.096V	5V
分辨率	8	11.7 mV	12.9 mV	16 mV	19.5 mV
	10	2.93 mV	3.222 mV	4 mV	4.882 mV
	12	732 $\mu$ V	806 $\mu$ V	1 mV	1.221 mV
	14	183 $\mu$ V	201 $\mu$ V	250 $\mu$ V	305 $\mu$ V
	16	45.77 $\mu$ V	50.35 $\mu$ V	62.5 $\mu$ V	76.29 $\mu$ V
	18	11.44 $\mu$ V	12.58 $\mu$ V	15.6 $\mu$ V	19.07 $\mu$ V
	20	2.861 $\mu$ V	3.147 $\mu$ V	3.91 $\mu$ V	4.768 $\mu$ V
	22	715 nV	787 nV	976 nV	1.192 $\mu$ V
	24	179 nV	196 nV	244 nV	298 nV

**DAC定义**

分辨率 = n	用来量化输出的位数
编码数量 = $2^n$	输入编码组合数量
满量程输出范围 = FSR	设定转换器输出范围和LSB电压
$LSB = FSR / 2^n$	每个LSB的电压步进大小
满量程输出电压 = $(2^n - 1) \cdot 1LSB$	DAC的满量程输出电压
满量程输入编码 = $2^n - 1$	可被写入的最大编码
转换函数: $V_{out} = \text{编码数量} \cdot (FSR / 2^n)$	输出电压与输入编码之间的关系



**图53: DAC转换函数**



DAC定义

分辨率 = n	用来量化输入的位数
编码数量 = $2^n$	输出编码组合数量
满量程范围输入 = FSR	设定转换器输入范围和LSB电压
$LSB = FSR / 2^n$	每个LSB的电压步进大小
满量程输入电压 = $(2^n - 1) \cdot 1LSB$	DAC的满量程输入电压
满量程输出编码 = $2^n - 1$	可被读取的最大编码
转换函数: 编码数量 = $V_{in} / (FSR / 2^n)$	输入电压与输出编码之间的关系

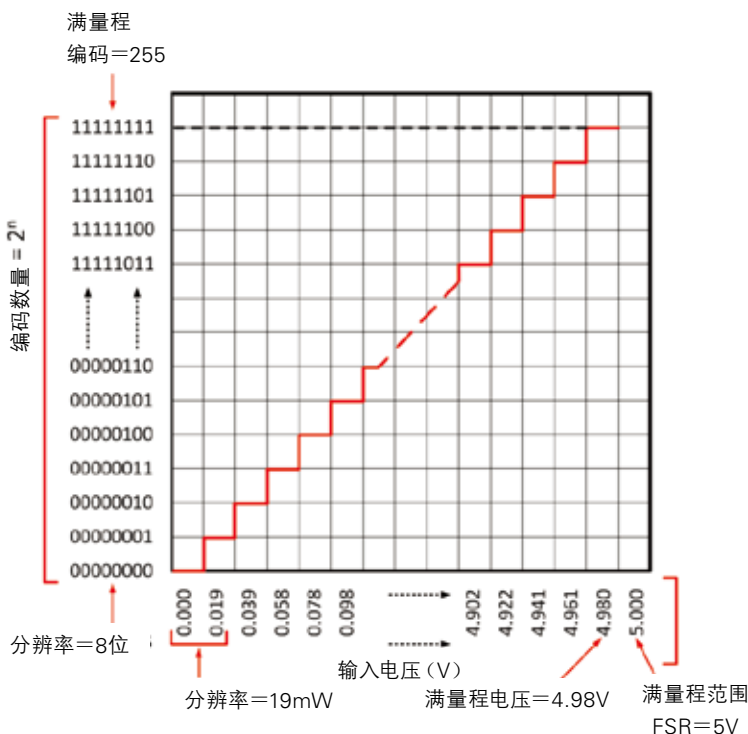
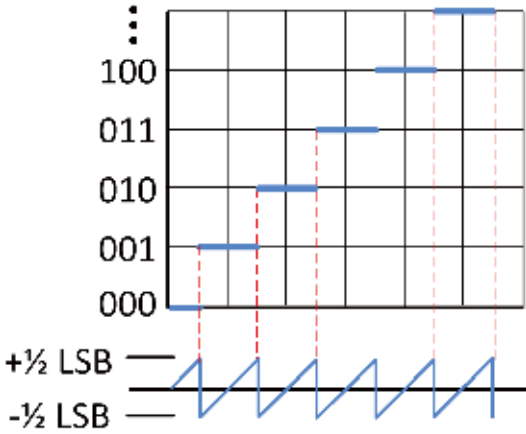


图54: ADC转换函数

### ADC的量化误差



量化误差

图55: 一个A/D转换器的量化误差

#### 图55: 一个A/D转换器的量化误差

此误差由量化过程引入。这个误差的数量是转换器分辨率的函数。一个A/D转换器的量化误差为 $1/2$ LSB。量化误差信号是实际施加的电压与ADC输出之间的差异（如图55所示）。量化信号的rms为。

### 只与量化噪声相关的信噪比 (SNR)

$$\text{MaxRMSSignal} = \frac{\text{FSR}/2}{\sqrt{2}} = \frac{1\text{LSB} \times 2^{N-1}}{\sqrt{2}} \quad (107)$$

$$\text{RMSNoise} = \frac{1\text{LSB}}{\sqrt{12}} \text{ from quantization only} \quad (108)$$

$$\text{SNR} = \frac{\text{MaxRMSSignal}}{\text{RMSNoise}} = \frac{1\text{LSB} \times 2^{N-1}/\sqrt{2}}{1\text{LSB}/\sqrt{12}} = 2^{N-1}\sqrt{6} \quad (109)$$

$$\text{SNR(dB)} = 20\log(\text{SNR}) = [20\log(2)]N + 20\log\left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right) \quad (110)$$

$$\text{SNR(dB)} \approx 6.02N + 1.76 \quad (111)$$

### 在这里

FSR = A/D转换器的满量程范围

1LSB = 1LSB的电压,  $V_{\text{REF}}/2^n$

N = A/D转换器的分辨率

MaxRMSSignal = ADC满量程输入信号的rms等效值

RMSNoise = 量化噪声的rms等效值

SNR = 输入信号的rms值与量化噪声的rms值之比

### 示例

假定只有量化噪声，具有 5V 电压基准的 8 位 ADC 的 SNR 是多少

### 答案

$$\text{SNR} = 2^{N-1}\sqrt{6} = 2^{8-1}\sqrt{6} = 314$$

$$\text{SNR(dB)} = 20\log(314) = 49.9 \text{ dB}$$

$$\text{SNR(dB)} = 6.02(8) + 1.76 = 49.9 \text{ dB}$$

## ADC的量化误差

$$\text{THD}(\%) = \left( \frac{\text{RMSDistortion}}{\text{MaxRMSSignal}} \right) \cdot 100 = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (112)$$

$$\text{THD}(\text{dB}) = 20 \log \left( \frac{\text{RMSDistortion}}{\text{MaxRMSSignal}} \right) \quad (113)$$

## 在这里

THD = 总谐波失真，rms失真与rms信号的比

RMSDistortion = 所有谐波分量的rms总和

MaxRMSSignal = 输入信号的rms值

$V_1$  = 基波，通常为输入信号

$V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$  = 基波的谐波

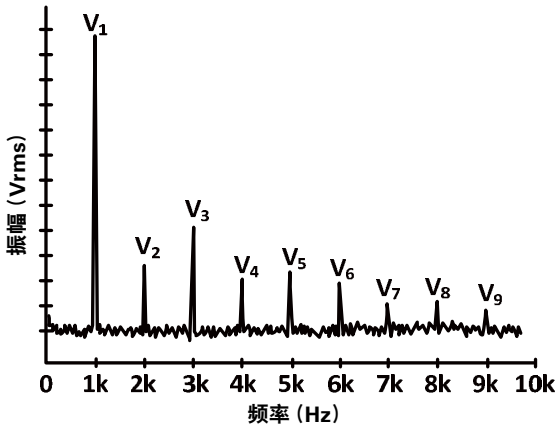


图56: 以Vrms 为单位的基波和谐波

## 总谐波失真 (dBc)

$$\text{THD(dBc)} = 10 \log \left[ 10^{\left(\frac{D_2}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{D_3}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{D_4}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{D_n}{10}\right)} \right] \quad (114)$$

## 在这里

THD = 总谐波失真，波分量的rms值与信号的rms值之比

D1 = 基波，通常为输入信号。这个基波被标准化为0dBc

D2, D3, D4, ..., Dn = 相对于基波测得的基波的谐波

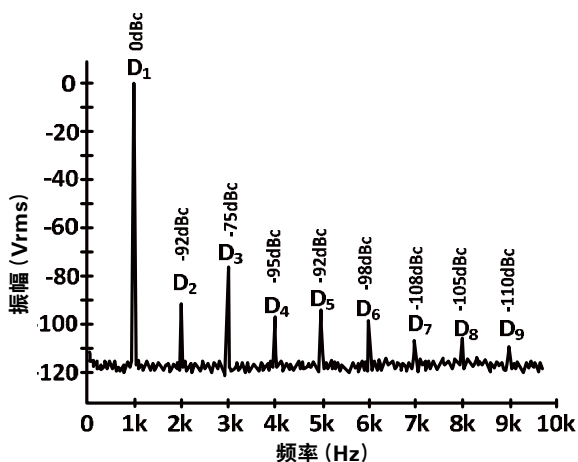


图57: 以dBc为单位的基波和谐波

## 示例

确定上面示例中的 THD。

## 答案

$$\text{THD(dBc)} = 10 \log \left[ 10^{\left(\frac{-92}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-75}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-95}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{-110}{10}\right)} \right]$$

$$\text{THD(dBc)} = -74.76 \text{ dB}$$

**AC信号****信噪比和失真 (SINAD) 以及有效位数 (ENOB)**

$$\text{SINAD(dB)} = 20 \log \left( \frac{\text{MaxRMSSignal}}{\sqrt{\text{RMSNoise}^2 + \text{RMSDistortion}^2}} \right) \quad (115)$$

$$\text{SINAD(dB)} = -20 \log \left( \sqrt{10^{\left(\frac{-\text{SNR(dB)}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{\text{THD(dB)}}{10}\right)}} \right) \quad (116)$$

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD(dB)} - 1.76\text{dB}}{6.02} \quad (117)$$

**在这里**

MaxRMSSignal = ADC满量程输入的rms等效值

RMSNoise = A/D转换器中的噪声的rms等效值

RMSDistortion = 所有谐波分量的rms总和

SINAD = 满量程信噪比与失真的比

THD = 总谐波失真。谐波分量的rms值与信号的rms值之比。

SNR = 输入信号的rms值与量化噪声的rms值之比

**示例**

根据以下指定信息计算 SNR, THD, SINAD 和 ENOB:

MaxRMSSignal = 1.76Vrms

RMSDistortion = 50μVrms

RMSNoise = 100μVrms

**答案**

$$\text{SNR(dB)} = 20 \log \left( \frac{1.76 \text{ Vrms}}{100 \mu\text{Vrms}} \right) = 84.9 \text{ dB}$$

$$\text{THD(dB)} = 20 \log \left( \frac{50 \mu\text{Vrms}}{1.76 \text{ Vrms}} \right) = -90.9 \text{ dB}$$

$$\text{SINAD(dB)} = 20 \log \left( \frac{1.76 \text{ V rms}}{\sqrt{(100 \mu\text{Vrms})^2 + (50 \mu\text{Vrms})^2}} \right) = 83.9 \text{ dB}$$

$$\text{SINAD(dB)} = -20 \log \left( \sqrt{10^{\left(\frac{-83.9 \text{ dB}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-90.9 \text{ dB}}{10}\right)}} \right) = 83.9 \text{ dB}$$

$$\text{ENOB} = \frac{83.9\text{dB} - 1.76\text{dB}}{6.02} = 13.65$$

**总谐波失真 (dBc)****无噪声分辨率与有效分辨率**

$$\text{NoiseFreeResolution} = \log_2 \left( \frac{2^N}{\text{PeaktoPeakNoiseinLSB}} \right) \quad (118)$$

$$\text{EffectiveResolution} = \log_2 \left( \frac{2^N}{\text{rmsNoiseinLSB}} \right) \quad (119)$$

$$\text{PeaktoPeakNoiseinLSB} \approx 6.6 \times \text{rmsNoiseinLSB} \quad (120)$$

$$\text{EffectiveResolution} \approx \text{NoiseFreeResolution} + 2.7 \quad (121)$$

注释：最大有效分辨率永远不会大于ADC分辨率。例如，一个24位转换器的有效分辨率不可能大于24位。

**示例**

假定峰峰值噪声为 7LSB，那么 24 位转换器的无噪声分辨率和有效分辨率分别是多少？

**答案**

$$\text{NoiseFreeResolution} = \log_2 \left( \frac{2^{24}}{7} \right) = 21.2$$

$$\text{EffectiveResolution} = \log_2 \left( \frac{2^{24}}{6.6} \right) = 23.9$$

$$\text{EffectiveResolution} = 21.2 + 2.7 = 23.9$$

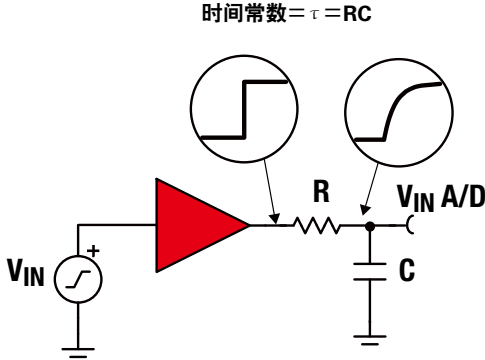


图58: 与A/D转换器相关的RC电路的建立时间

表33: 指定时间后实现的转换精度

以时间常数为单位的 稳定时间 ( $N_{TC}$ )	以位数表示的精度 ( $N$ )	以时间常数为单位的稳定时间 ( $N_{TC}$ )	以位数表示的精度 ( $N$ )
1	1.44	10	14.43
2	2.89	11	15.87
3	4.33	12	17.31
4	5.77	13	18.76
5	7.21	14	20.20
6	8.66	15	21.64
7	10.10	16	23.08
8	11.54	17	24.53
9	12.98	18	25.97

$$N = \log_2(e^{-N_{TC}}) \quad (122)$$

### 在这里

$N = N_{TC}$  个时间常数后, RC电路已稳定的精度位数。

$N_{TC} = RC$  时间常数的数量

注释: 针对FSR步进。针对无PGA前端的单端输入ADC

$$FSR (\text{满量程范围}) = V_{REF}$$



表34: 建立至特定转换精度所需的时间

以位数表示的精度 (N))	以时间常数为单位的稳定时间 ( $N_{TC}$ )	以位数表示的精度 (N)	以时间常数为单位的稳定时间 ( $N_{TC}$ )
8	5.5	17	11.78
9	6.24	18	12.48
10	6.93	19	13.17
11	7.62	20	13.86
12	8.32	21	14.56
13	9.01	22	15.25
14	9.70	23	15.94
15	10.40	24	16.64
16	11.04	25	17.33

$$N_{TC} = \ln(2^N) \quad (123)$$

### 在这里

$N_{TC}$  = 实现N位稳定所需的时间常数的数量

N = 精度位数

注释: 针对FSR步进。针对无PGA前端的单端输入ADC

$$FSR (\text{满量程范围}) = V_{REF}$$



## IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its semiconductor products and services per JESD46, latest issue, and to discontinue any product or service per JESD48, latest issue. Buyers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All semiconductor products (also referred to herein as "components") are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its components to the specifications applicable at the time of sale, in accordance with the warranty in TI's terms and conditions of sale of semiconductor products. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by applicable law, testing of all parameters of each component is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or the design of Buyers' products. Buyers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with Buyers' products and applications, Buyers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI components or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of significant portions of TI information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. TI is not responsible or liable for such altered documentation. Information of third parties may be subject to additional restrictions.

Resale of TI components or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that component or service voids all express and any implied warranties for the associated TI component or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

Buyer acknowledges and agrees that it is solely responsible for compliance with all legal, regulatory and safety-related requirements concerning its products, and any use of TI components in its applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by TI. Buyer represents and agrees that it has all the necessary expertise to create and implement safeguards which anticipate dangerous consequences of failures, monitor failures and their consequences, lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate remedial actions. Buyer will fully indemnify TI and its representatives against any damages arising out of the use of any TI components in safety-critical applications.

In some cases, TI components may be promoted specifically to facilitate safety-related applications. With such components, TI's goal is to help enable customers to design and create their own end-product solutions that meet applicable functional safety standards and requirements. Nonetheless, such components are subject to these terms.

No TI components are authorized for use in FDA Class III (or similar life-critical medical equipment) unless authorized officers of the parties have executed a special agreement specifically governing such use.

Only those TI components which TI has specifically designated as military grade or "enhanced plastic" are designed and intended for use in military/aerospace applications or environments. Buyer acknowledges and agrees that any military or aerospace use of TI components which have **not** been so designated is solely at the Buyer's risk, and that Buyer is solely responsible for compliance with all legal and regulatory requirements in connection with such use.

TI has specifically designated certain components as meeting ISO/TS16949 requirements, mainly for automotive use. In any case of use of non-designated products, TI will not be responsible for any failure to meet ISO/TS16949.

### Products

Audio	<a href="http://www.ti.com/audio">www.ti.com/audio</a>
Amplifiers	<a href="http://amplifier.ti.com">amplifier.ti.com</a>
Data Converters	<a href="http://dataconverter.ti.com">dataconverter.ti.com</a>
DLP® Products	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>
DSP	<a href="http://dsp.ti.com">dsp.ti.com</a>
Clocks and Timers	<a href="http://www.ti.com/clocks">www.ti.com/clocks</a>
Interface	<a href="http://interface.ti.com">interface.ti.com</a>
Logic	<a href="http://logic.ti.com">logic.ti.com</a>
Power Management	<a href="http://power.ti.com">power.ti.com</a>
Microcontrollers	<a href="http://microcontroller.ti.com">microcontroller.ti.com</a>
RFID	<a href="http://www.ti-rfid.com">www.ti-rfid.com</a>
OMAP™ Applications Processors	<a href="http://www.ti.com/omap">www.ti.com/omap</a>
Wireless Connectivity	<a href="http://www.ti.com/wirelessconnectivity">www.ti.com/wirelessconnectivity</a>

### Applications

Automotive and Transportation	<a href="http://www.ti.com/automotive">www.ti.com/automotive</a>
Communications and Telecom	<a href="http://www.ti.com/communications">www.ti.com/communications</a>
Computers and Peripherals	<a href="http://www.ti.com/computers">www.ti.com/computers</a>
Consumer Electronics	<a href="http://www.ti.com/consumer-apps">www.ti.com/consumer-apps</a>
Energy and Lighting	<a href="http://www.ti.com/energy">www.ti.com/energy</a>
Industrial	<a href="http://www.ti.com/industrial">www.ti.com/industrial</a>
Medical	<a href="http://www.ti.com/medical">www.ti.com/medical</a>
Security	<a href="http://www.ti.com/security">www.ti.com/security</a>
Space, Avionics and Defense	<a href="http://www.ti.com/space-avionics-defense">www.ti.com/space-avionics-defense</a>
Video and Imaging	<a href="http://www.ti.com/video">www.ti.com/video</a>

TI E2E™ Community [e2e.ti.com](http://e2e.ti.com)

SSZZ022H

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265



## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a>	通信与电信	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a>	计算机及周边	<a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a>	消费电子	<a href="http://www.ti.com.cn/consumer-apps">www.ti.com.cn/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>	能源	<a href="http://www.ti.com.cn/energy">www.ti.com.cn/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a>	工业应用	<a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a>	医疗电子	<a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a>	安防应用	<a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a>	汽车电子	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a>	视频和影像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>		
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>		
OMAP应用处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/omap">www.ti.com.cn/omap</a>		
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a>	德州仪器在线技术支持社区	<a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated