

# 选择尽可能减少音频应用失真的电容器

Zak Kaye

Applications Engineer, Precision Analog-to-Digital Converters

## 引言

在音频信号链中使用电容器通常充满神秘色彩，很少进行定量分析来证明电容器选择的合理性。由于许多电容器的成本高于它们所用于的集成电路，因此确定一种能够平衡成本、尺寸和性能的解决方案是一项挑战。

本文简要概述了电容器技术，并比较了在实际音频应用中使用各种电容器的情况。比较中用到的电容器配置为对精密音频数据转换器的输入进行交流耦合。通过分析数据转换器输出，可以轻松比较电容器对信号路径失真的影响。目标是帮助您在音频信号链应用中做出有关电容器选择的明智决策。

## 电容器技术

多层陶瓷电容器 (MLCC) 因其容积效率和相对较低的价格而在许多应用中广受欢迎。此电容器技术的优势主要在于其使用特殊的电介质材料。要了解原因，请回想一下，简单并联极板电容器的电容符合**公式 1**。

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \quad (1)$$

其中  $k$  是放置在极板之间的电介质材料的相对介电常数（简称介电常数）， $\epsilon_0$  是自由空间的介电常数， $A$  是电容器极板的面积， $d$  是极板之间的距离。

**公式 1** 表明，对于给定的电容值，具有较高介电常数的材料可实现较小的电容器体积。这解释了具有特定额定电压的  $10\mu\text{F}$  电容器的尺寸差异很大，因为完全取决于电容器的电介质。

MLCC 电容器分为不同的类别，主要取决于其热范围和该范围内的稳定性。II 类陶瓷通常被称为“高  $k$ ”，因为它们的相对介电常数范围介于 3,000 (X7R) 到 18,000 (Z5U)。相比之下，I 类 COG/NP0 电容器的相对介电常数往往在 6 到 200 之间。它们是“高性能”陶瓷电容器，因为它们的电容比大多数其他电介质更稳定。

使用聚乙烯或聚丙烯等材料的塑料薄膜电容器往往具有更低的相对介电常数（通常小于 3），并且还具有很好的稳定性。**表 1** 显示了电容器中使用的一些常见电介质材料的相对介电常数。

材料	$\epsilon_r$ (k)
真空吸尘器	1
聚硫乙烯	3
聚对苯二甲酸乙二醇酯	3.3
聚丙烯	2.2
浸渍纸	2 至 6
聚脂薄膜	3.1
云母	6.8
氧化铝	8.5
五氧化二钽	27.7
顺电陶瓷 (I 类)	5 至 90
钛酸锶	310
钛酸钡 (II 类)	3,000 至 8,000

**表 1.** 常见电介质材料的相对介电常数

在智能扬声器等便携式电子产品中<sup>[1]</sup>，由于尺寸小且成本低，因此使用高  $k$  MLCC 是很有吸引力的。不过，请务必注意，虽然它们的相对介电常数非常高，但它们的电容会随施加的电压和温度而显著变化，这会降低信号链性能。电容的这种变化主要是由于在电介质中使用了高浓度的钛酸钡。钛酸钡本质上为铁电，这意味着增加材料内的电场强度会降低其相对介电常数。根据**公式 1**，这也会导致电容减小。因此，向电容器施加时变电压会导致时变电容，从而使流经电容器的电流失真。电容随施加电压的变化称为电容器的电压系数，这可能是电容器阻抗相对较高的低频频谱中的主要失真源。此外，随着信号幅度的增加，会出现更大的失真。在较高的频率下，由于电容器阻抗较低，失真不太明显，因此电容器上的压降可忽略不计。

## 利用 MLCC 尽可能减少失真

尽可能降低电容器上的压降将减轻失真。为此，一种做法是增加与电容器串联的阻抗，以限制流过电容器的电流。为了证明这一点，我们在德州仪器 (TI) TLV320ADC5140

音频模数转换器 (ADC) 评估模块 (EVM) 上进行了总谐波失真加噪声 (THD+N) 测量<sup>[2]</sup>，输入端采用 4.7 $\mu$ F X7R 0805 交流耦合电容器。该 ADC 具有可设置为 2.5k $\Omega$ 、10k $\Omega$  或 20k $\Omega$  的可编程输入阻抗。图 1 所示为采用了此电容器并同时使用 1V<sub>RMS</sub> 输入信号来改变输入阻抗的情况下在单通道中获得的结果。

如图 1 所示，失真在较低频率下会增加，并在电容器和 ADC 输入阻抗形成的高通滤波器的 -3dB 截止频率时达到峰值。这是因为 -3dB 处是电容器阻抗等于负载阻抗的位置，此时电容器上的电压最高。对于输入阻抗为 2.5k $\Omega$  的情况，截止频率约为 13Hz，但失真开始的位置要远得多，大约在 400Hz，并在 13Hz 左右达到峰值。

正如预期的那样，失真的变化与阻抗的增加呈相当线性的关系。这种方法的缺点是增加器件的输入阻抗会使信噪比性能降低几分贝。此外，在外部添加串联电阻也会导致额外的噪声并增加增益误差。增加的增益误差可能需要校准，因此会增加系统的复杂性。如果设计对成本敏感或对面积敏感，增加阻抗可能效果很好，但注重性能的设计会受到这种方法的不利影响。

另一种选择是增加电容器的容值，直到其阻抗在目标频带中足够低，从而减少失真。图 2 显示了失真随频率的变化，而图 3 显示了因类似规格电容器的输入电容发生变化而导致的失真随输入幅度的变化。请注意，测试的 47 $\mu$ F 电容器采用了 1206 封装，增大封装尺寸也会略微减少失真。但是，主要影响仍然是电容的急剧增加。

图 3 中使用 100Hz 输入信号获取的数据表明，增大电容对于交流耦合应用非常有效。电容大于 47 $\mu$ F 的 MLCC 很容易以 0805 或 1206 封装形式提供。

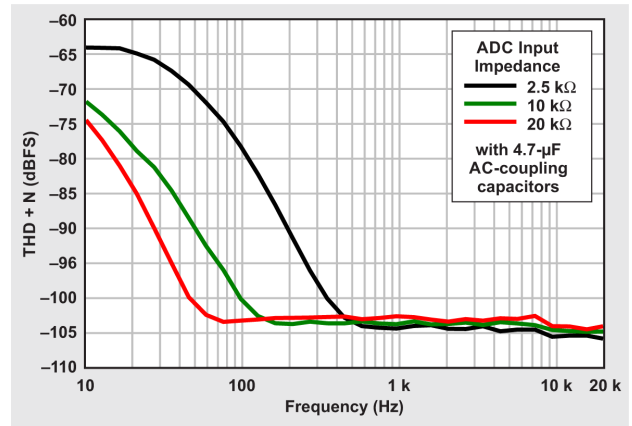


图 1. THD + N 随 ADC 输入阻抗的变化

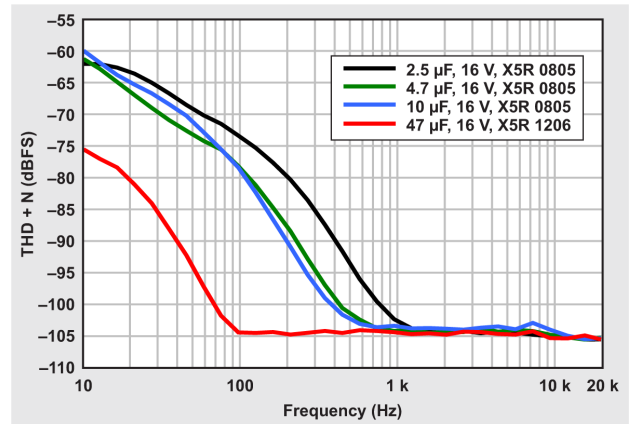


图 2. THD + N 随交流耦合电容的变化

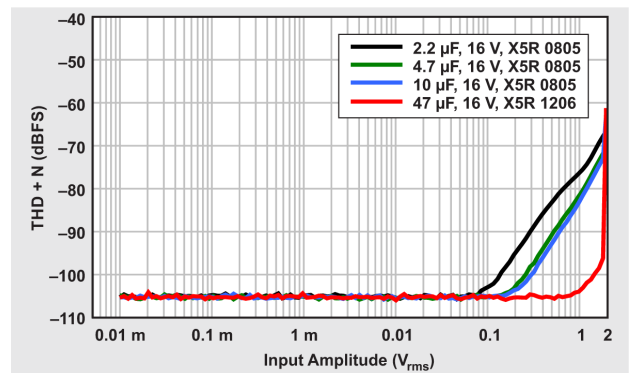


图 3. THD + N 随 100Hz ADC 输入信号的变化

这两种减轻失真的方法都涉及通过增大电阻或增大电容来显著降低高通滤波器的截止频率。当使用 MLCC 进行交流耦合时，一个好的经验法则是将转角频率放置在距离指定通带两个十倍频程的位置。或者，换句话说，使电容器比所需的电容器大 100 倍，或者在受支持的合理情况下尽可能大。当使用过大的电容器时，即使是很小的串联电阻也会使截止频率极低。这意味着不会过滤不良的低频噪声，

例如互补金属氧化物半导体前端的典型  $1/f$  噪声。在信号链的更下游应用数字滤波将抑制典型的  $1/f$  噪声。但是，仍然很难完全消除陶瓷电容器对音频频带低音区域的影响。需要高性能的应用仍然需要使用更好的技术。

在模拟滤波器设计等许多音频应用中，更好的解决方案是使用 C0G/NP0 陶瓷电容器，因为此类电容器的性能要好得多，并且仍然采用小型封装。虽然这是一个很好的解决方案，但并不总是可行。在音频信号链中，保持低电阻可更大程度降低噪声，但这样做需要针对给定的截止频率增加电容。容值大于  $1\mu\text{F}$  的 C0G/NP0 电容器不容易找到，因此它们在交流耦合和其他高通滤波器应用中的实用性有限。

### 非陶瓷电容器

对于必须避免使用 MLCC 的应用，存在其他电容器技术。我们也使用了 TLV320ADC6140 EVM<sup>[3]</sup> 搭配以下电容器类型执行了 THD+N 测试：

- 标准  $1\mu\text{F}$  0805 X5R 电容器。
- $1\mu\text{F}$  表面贴装技术 (SMT) 钽电容器。
- $1\mu\text{F}$  穿孔铝电解电容器。
- $1\mu\text{F}$  SMT 薄膜电容器。

图 4 显示了该测试的数据。正如预期的那样， $1\mu\text{F}$  SMT 薄膜电容器在整个音频带宽内提供最佳性能，电解电容器次之。该薄膜电容器采用 1206 表面贴装封装，包含金属化丙烯酸电介质，并具有 12V 额定电压。

执行测试时，其他包含聚酯和聚丙烯电介质以及具有更高额定电压的  $1\mu\text{F}$  薄膜电容器与图 4 中所示的性能没有明显偏差。薄膜电容器的主要缺点是其相对介电常数较低。因此，薄膜电容器往往比对应的 MLCC 电容器大得多。

在文章发布时，该测试中使用的 1206 电容器是现成可用的最小表面贴装  $1\mu\text{F}$  薄膜电容器。大于  $3.3\mu\text{F}$  的表面贴装薄膜电容器将需要 1810 或更大的封装，或传统的穿孔盒式封装。

另一方面，钽和铝电解电容器往往比薄膜电容器更小。电解电容器具有极化电介质，这意味着其阳极必须保持比阴极更高的电压，否则电容器可能会损坏。对这些电容器进行的两组测量可以论证电解效应。第一项测试对电容器施

加了 +5V 直流偏置以确保极性正确。第二项测试没有应用外部偏置，但用于测试的 TLV320ADC6140 在内部将其输入偏置为 1.5V，因此这些电容器实际上略微反向偏置。由于这种内部偏置，在 +5V 测试用例的评估模块输入端提供的是 +6.5V 电压。通过比较这两组数据可以看出，当极化电容器未正确偏置时，性能会有显著差异。高性能应用必须保证正直流偏置，或避免使用极化电容器进行交流耦合。

这项测试并非详尽无遗：仅用于对不同电容器技术的性能提供一些大致分析。影响电容器性能的因素有很多，因此应根据应用需求仔细选择电容器。关于电容器的最佳指标，音频社区存在很多争论。本文重点介绍了电容器差异如何影响实际应用中的失真。

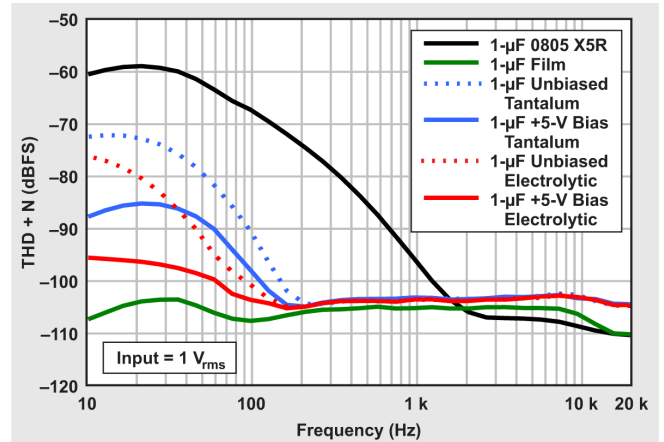


图 4. 使用非陶瓷电容器时的 THD + N 变化

图 5 显示了用于测试的电路板，表 2 显示了此测试中包含的所有电容器及其各自的特性。

数量	类型	值	电压	封装
1	陶瓷 X5R	$2.2\mu\text{F}$	16V	0805
2	陶瓷 X5R	$4.7\mu\text{F}$	16V	0805
3	陶瓷 X5R	$10\mu\text{F}$	16V	0805
4	陶瓷 X5R	$47\mu\text{F}$	6.3V	1206
5	陶瓷 X5R	$1\mu\text{F}$	16V	0805
6	金属膜	$1\mu\text{F}$	12V	1206
7	钽	$1\mu\text{F}$	35V	1206
8	铝电解电容器	$1\mu\text{F}$	50V	径向穿孔
未显示	橙色滴膜	$1\mu\text{F}$	100 V	径向穿孔
未显示	WIMA 膜	$1\mu\text{F}$	50V	发送
未显示	陶瓷 X7R	$4.7\mu\text{F}$	16V	0805

表 2. 失真比较中使用的电容器

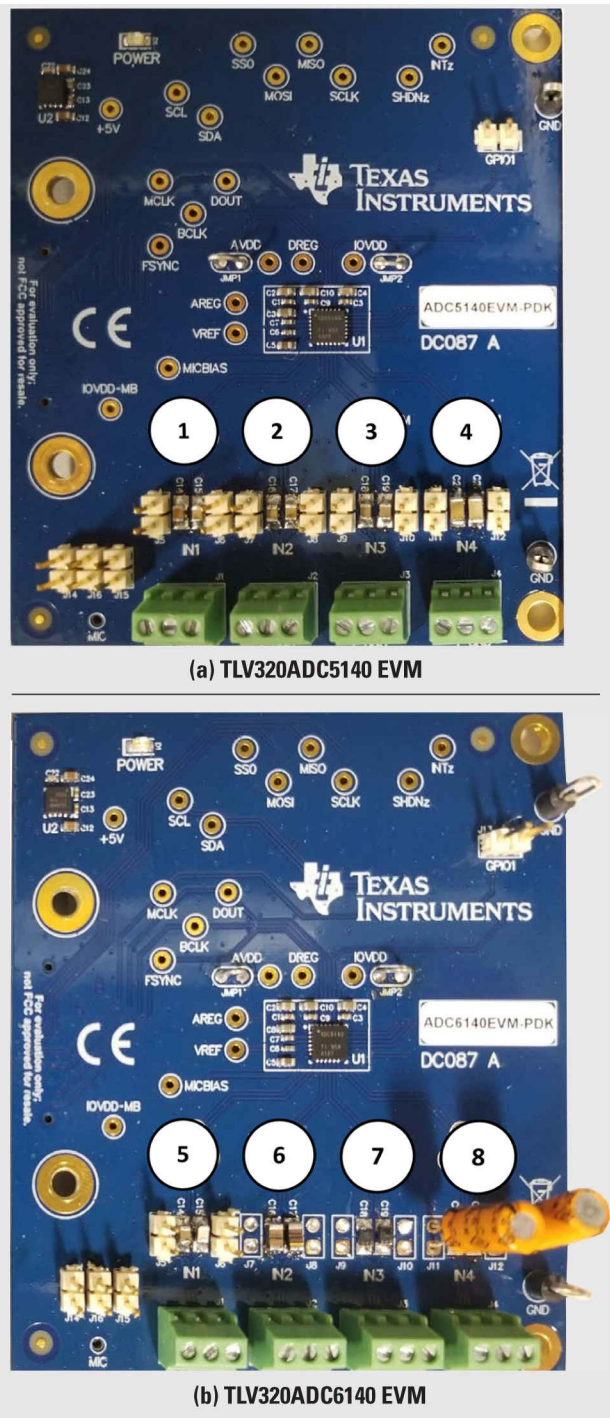


图5. 评估模块和测试的电容器

## 结论

选择电容器时需要考虑很多因素。本文主要介绍音频数据转换器交流耦合应用中的电容器，但所提供的数据也适用于其他应用。MLCC 电容器十分常用，但它们会显著降低音频信号链的性能。通过使用容值更大的电容器并增加电容器承受的负载阻抗，可以尽可能减少 MLCC 电容器的失真。对于高性能应用，在可用时使用 COG/NPO 电容器，在可行时使用薄膜电容器。

## 参考文献

1. 智能扬声器集成电路和参考设计，德州仪器 (TI)。
2. TLV320ADC5140 四通道 768kHz Burr-Brown™ 音频 ADC 评估模块，德州仪器 (TI) (ADC5140EVM-PDK)。
3. TLV320ADC6140 评估模块，德州仪器 (TI) (ADC6140EVM-PDK)。
4. J. Caldwell, “Signal distortion from high-K ceramic capacitors,” EDN, June 16, 2013.
5. J. Caldwell, “More about understanding the distortion mechanism of high-K MLCCs,” EE News, December 23, 2013.
6. Kemet Corp., “Introduction to Capacitor Technologies,” 2013.

## 相关网站

### 产品信息:

[TLV320ADC5140](#)

[TLV320ADC6140](#)

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2020 Texas Instruments Incorporated

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司