

## Application Note

# TAS27X D 类放大器的 EMI 滤波器选择 - 后置滤波器反馈的优势和设计注意事项



Pavinkumar Ramasamy, Aditya Sundar, Sumit Dubey, Jasjot Singh Chadha

## 摘要

D 类放大器输出作为开关输出，具有载波频率以及音频信号内容。这些开关频率会因连接到扬声器负载的长布线而引起 EMI 辐射问题。为了满足 FCC/CE 等 EMI 辐射规范，D 类放大器输出端通常需要配备 EMI 滤波器。在本应用手册中，我们简要介绍了用于选择和实现 EMI 滤波器的不同技术，还介绍了 TAS27XX 系列器件中的后置滤波器反馈特性，并列出了有关这些器件的滤波器选择注意事项。在使用铁氧体磁珠的情况下，测量了音频放大器的性能。以外，本应用手册还为用户提供了一种基于 Excel 工作表的计算器，并通过一些示例帮助用户评估将 EMI 滤波器用于后置滤波器反馈的可行性。

## 内容

1 简介.....	2
1.1 仅在 D 类输出端连接的电容器.....	2
1.2 D 类输出端连接的 LC 滤波器.....	2
1.3 铁氧体磁珠滤波器.....	2
2 EMI 滤波器注意事项.....	3
2.1 EMI 滤波器的阻抗注意事项.....	3
2.2 高输出电压时的器件可靠性限制.....	3
2.3 EMI 滤波器电流可靠性.....	3
3 后置滤波器反馈.....	4
4 具有后置滤波器反馈的环路稳定性.....	5
5 用户指南：EMI 滤波器建模和后置滤波器反馈验证工具.....	8
6 总结.....	10
7 参考资料.....	10

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

可以使用以下技术实现 D 类输出端的 EMI 滤波器。

### 1.1 仅在 D 类输出端连接的电容器

可以将一个大于 1nF 的大电容直接连接到放大器输出端。不建议采用这种连接方式，因为 D 类输出阻抗的量级极低，大约为  $0.5\ \Omega$ ，无法提供明显的滤波效果（滤波器截止频率  $> 300\text{MHz}$ ）。此外，在 TAS27xx 系列器件中，增加 D 类输出端的电容对边沿速率的影响可以忽略不计。而且，任何直接连接到 D 类输出端的电容器都会严重降低器件效率，并导致非常大的开关电流，进而导致器件关断或出现可靠性问题。出于这些原因，在 TAS27XX 系列器件中，建议不要将最大 200pF 的电容直接连接到 D 类输出端。

### 1.2 D 类输出端连接的 LC 滤波器

在 D 类输出端连接的 L-C 滤波器是相对较好的选择，因为电感器可以在较高频率下提供高阻抗，从而提供足够的 EMI 滤波能力并防止高频开关电流。LC 滤波器的缺点如下：电感器的价格和尺寸（BOM 成本）较高，而且滤波器谐振频率下的电流极高，这会导致器件关断。不过，主要优点是 LC 滤波器是线性的，这意味着滤波器输出端（扬声器上）的 THD+N 不会下降。

### 1.3 铁氧体磁珠滤波器

铁氧体磁珠是成本相对较低的非线性 EMI 滤波器。铁氧体磁珠的阻抗随流经铁氧体磁珠的电流而显著变化，从而使该元件呈现非线性特征。铁氧体磁珠可以建模为与电感器并联的电阻器，从而抑制谐振并降低极高的电流。

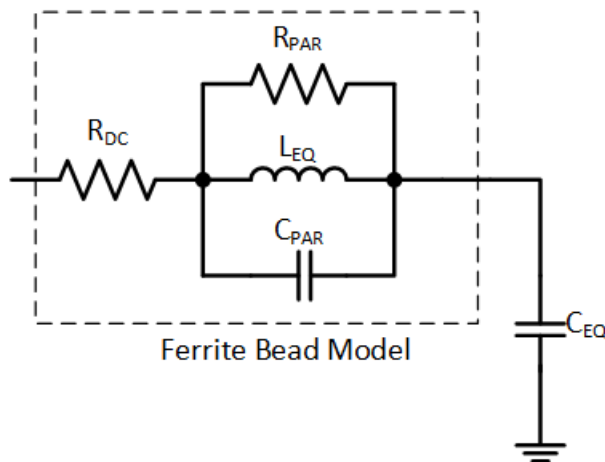


图 1-1. 铁氧体磁珠等效模型

滤波器中的电感器可通过使用铁氧体磁珠实现，与常规电感器相比，其成本更优，但具有非线性。使用成本更低的铁氧体磁珠会降低滤波器之后音频的 THD 性能，从而影响终端系统的音频性能。此类问题迫使客户重新选择基于电感器的滤波器，或使用不会降低 THD 性能但更昂贵的铁氧体磁珠，因此会增加终端系统的成本。在 D 类放大器的输出端使用滤波器的另一个问题是，滤波器会根据其选择的截止频率而降低输出的频率响应。这也会影响频率范围内的音频性能。

表 1-1 比较了不同电感器和铁氧体磁珠的成本。TI 的后置滤波器反馈配置允许使用 MPZ1608S221A 和 2506036017Y2 型铁氧体磁珠，可以显著降低设计成本，同时能够避免与这些元件相关的性能下降问题。

表 1-1. 电感式滤波器的比较 (截至 2024 年 6 月)

器件型号	类型	9k 单价	性能
MAKK2016TR24M	电感器	3.1c	高
NFZ2MSM181SN10L	铁氧体磁珠	11.1c	高
MPZ1608S221A	铁氧体磁珠	2.1c	低
2506036017Y2	铁氧体磁珠	1.9c	低

## 2 EMI 滤波器注意事项

### 2.1 EMI 滤波器的阻抗注意事项

使用 EMI 滤波器时，必须合理选择电感器或磁珠与电容器组合，以避免因谐振导致的过高电流（可能触发器件中的 OCP（过流保护）机制）。避免这种情况的一种简单方法是使用截止频率 ( $\omega_0$ ) 大于 1.5MHz 的滤波器。此步骤是为了避免由于与音频、超声波内容以及 384KHz 和 768KHz 的 D 类开关频率能量的谐振而产生大电流。此外，如果在较高的截止频率下仍然观察到与谐振相关的过流关断，建议增加磁珠或电感值并减小并联电容，以保持相同的截止频率。

### 2.2 高输出电压时的器件可靠性限制

在使用 EMI 滤波器时，器件引脚 VSNS 电压可能会过冲至超过 OUTP，理论上可上升到该电压的两倍。例如，TAS2764 最大 PVDD 电压为 16V，这意味着 VSNS 可能会过冲至 32V。根据 TI 的建议，如果 VSNS 上的电压过冲至超过 30V（在 TAS2764 中）和 40V（在 TAS2780、81、83 中），则必须在将扬声器的反馈连接到 VSNSP 和 VSNSM 之前串联一个 1K $\Omega$ 、4.7K $\Omega$  的外部电阻器（可轻松获得）。只有使用此电阻器才能在 VSNS 引脚上限制通过器件内部 ESD 单元的电流，当扬声器节点上出现高电压振铃时便会激活此电阻器以实现钳位目的。

### 2.3 EMI 滤波器电流可靠性

在选择 EMI 滤波器或铁氧体磁珠时，请确保该元件的额定参数能够支持通过扬声器的最大负载电流。例如，在 TAS2780、81 器件中，扬声器电流峰值可高达 4A，RMS 电流为 2.8A，而在 TAS2764 中，器件 RMS 电流可达 2A 量级。因此，必须合理选择磁珠，以确保可靠性并避免明显降额。例如，2506036017Y2 磁珠的额定最大电流为 2A，因此不适合用于高功率应用。

### 3 后置滤波器反馈

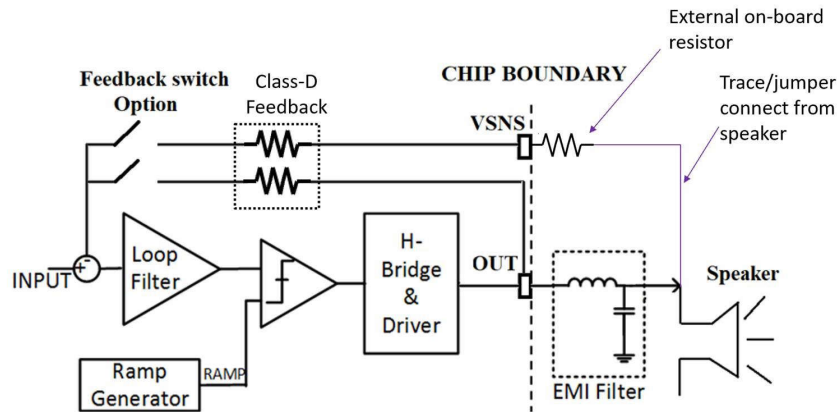


图 3-1. 具有后置滤波器反馈 (PFFB) 的 D 类环路

TI 的后置滤波器反馈允许用户在 D 类环路内添加铁氧体磁珠，如图 3-1 所示。环路配置的这种变化可确保铁氧体磁珠产生的误差是在 D 类环路内产生的，并通过环路增益进行校正。这一点与 TI 的 4 阶 D 类放大器 TAS 2764、2780、2781 和 TAS2783 本身的高环路增益相结合，可确保更大限度地降低由于添加铁氧体磁珠而导致的 THD 下降，让用户可以使用成本更佳铁氧体磁珠，而无需担心这些磁珠的不利影响。此外，由于在使用铁氧体磁珠滤波器之后会闭合环路，因此放大器的频率响应没有下降，从而在音频频带内提供平坦的振幅响应。图 3-2 比较了 TAS2560 的 THD+N 与频率间的关系，其中采用了 2506036017Y2 铁氧体磁珠滤波器并与 100pF 并联电容器耦合。如图 3-2 所示，当铁氧体磁珠像传统 D 类放大器那样位于 D 类环路外部时，THD 在较高频率下会显著降低。但采用新的 PFFB 配置后，由铁氧体磁珠导致的性能下降会显著降低，性能与没有磁珠的 D 类输出性能几乎相同。

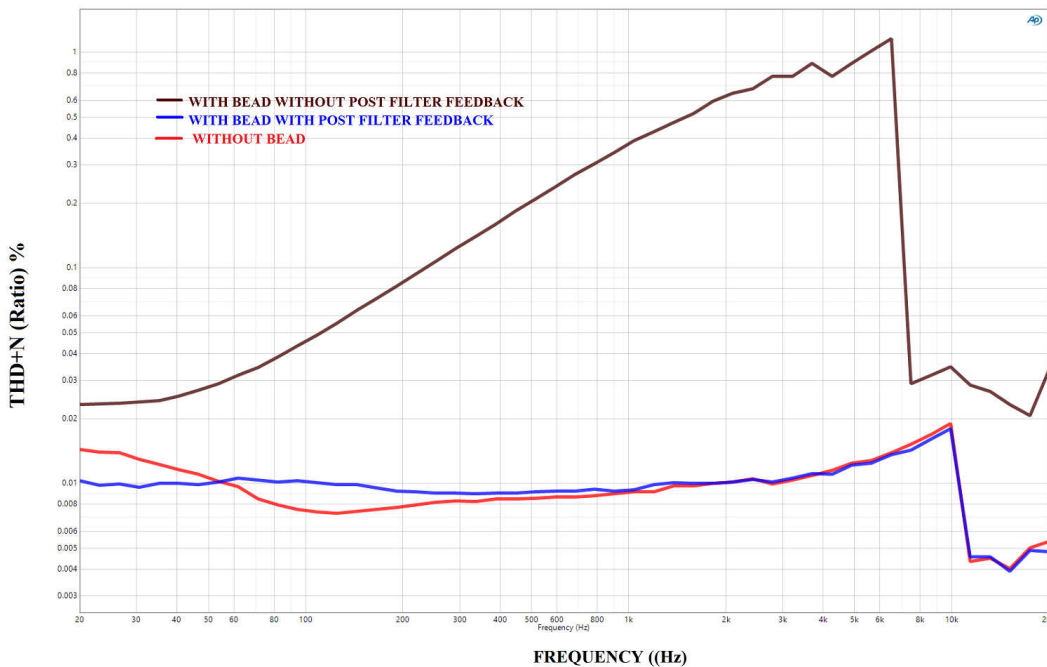


图 3-2. TAS2780 在 1W 功率 4Ω 下采用和不采用 PFFB 时，THD+N 与频率间的关系

## 4 具有后置滤波器反馈的环路稳定性

铁氧体磁珠滤波器现在位于 D 类环路内部，因此在系统中添加了额外的极点，这会对环路的稳定性产生不利影响。在选择正确的滤波器配置时，用户需要考虑额外的指南，以便能够确保 D 类环路保持稳定。为了找到 EMI 滤波器的稳定配置，需要创建 EMI 滤波器的等效模型。该滤波器需要近似为二阶滤波器，如图 1-1 所示。铁氧体磁珠阻抗可分为三个主要区域，例如电感、电阻和电容。通过查看铁氧体磁珠数据表的阻抗图可以轻松确定这些区域（如图 4-1 所示），其中 Z 是磁珠的阻抗，X 是电抗，R 是电阻。

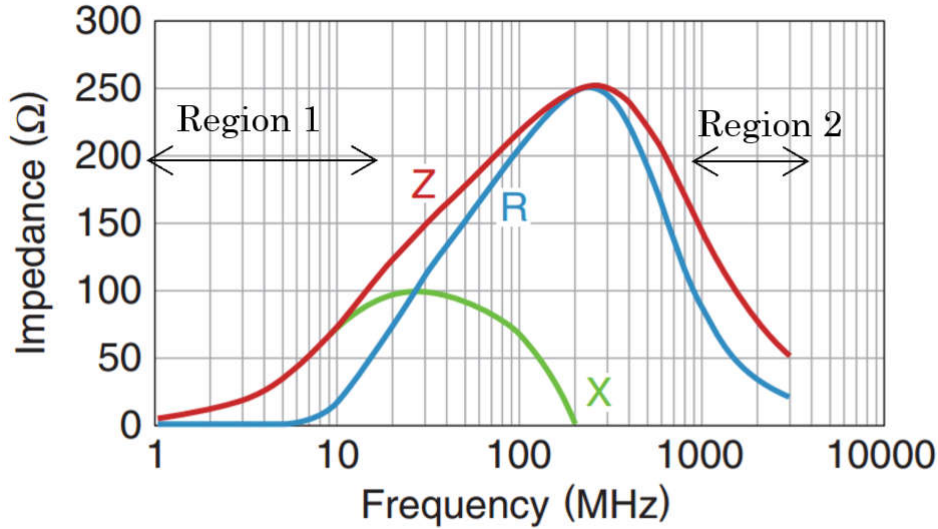


图 4-1. MPZ1608S221A 的阻抗曲线

对于阻抗图中磁珠主要呈现电感性的区域（图 4-1 中的区域 1），可以使用方程式 1 计算  $L_{EQ}$ ，其中  $X_L$  = 频率为“f”时的磁珠阻抗。妥善的做法是让阻抗值与峰值阻抗值相差至少十倍频程以进行准确计算。例如，图 4-1 显示 MPZ1608S221A 在 10MHz 时的阻抗为 70 Ω。可以计算出  $L_{EQ}$  为 1.11 μH。

$$L_{EQ} = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (1)$$

通过类似  $L_{EQ}$  的方法，查看磁珠主要呈现电容性的区域（图 4-1 中的区域 2），可以估算出  $C_{PAR}$ 。可以使用方程式 2 估算  $C_{PAR}$ ，其中  $X_C$  = 频率为“f”时的磁珠阻抗。为了获得准确的计算结果，最好让阻抗值与峰值阻抗值相差至少十倍频程。对于大多数磁珠， $C_{PAR}$  小于 5pF，对环路的稳定性没有影响。用户应进行这些计算，并确保其适用于为用例选择的磁珠。例如，图 4-1 显示 MPZ1608S221A 在 1GHz 时的阻抗为 150Ω。因此，可以计算出  $C_{PAR}$  为 1pF。

$$C_{PAR} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} \quad (2)$$

$R_{PAR}$  可以近似表示为磁珠的峰值阻抗。为了便于计算，此处的  $R_{DC}$  近似为零，而整个峰值阻抗估算为  $R_{PAR}$ 。在图 4-1 中，可以计算出  $R_{PAR}$  为 250Ω。

总输出电容 ( $C_{EQ}$ ) 需要包括用户为滤波而特意添加的电容以及由于铁氧体磁珠输出端的任何其他附加元件（如 ESD 二极管、电路板布线等）而产生的寄生电容。

根据滤波器模型，可以使用以下公式计算滤波器截止频率和 Q 因子：

$$\omega_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{EQ} \cdot C_{EQ}}} \quad (3)$$

$$Q = R_{PAR} \cdot \sqrt{\frac{C_{EQ}}{L_{EQ}}} \quad (4)$$

表 4-1 总结了 TI 的后置滤波器反馈 D 类放大器的稳定性标准。用户需要确保所选滤波器的稳定性标准满足表 4-1 中的指南，才能使 D 类放大器正常运行。

表 4-1. TAS27XX 系列的 PFFB 稳定性标准

截止频率范围 $\omega_0$	最小 $\omega_0, Q$
$\omega_0 < 1.5\text{Mhz}$	无效
$1.5\text{Mhz} < \omega_0 \leq 2.5\text{Mhz}$	$>7.5e5$
$2.5\text{Mhz} < \omega_0 \leq 3\text{Mhz}$	$>8.9e5$
$3\text{Mhz} < \omega_0 \leq 4\text{Mhz}$	$>7.5e5$
$4\text{Mhz} < \omega_0 \leq 5\text{Mhz}$	$>8.3e5$
$5\text{Mhz} < \omega_0 \leq 10\text{Mhz}$	$>1.5e6$
$10\text{Mhz} < \omega_0 \leq 20\text{Mhz}$	$>7.7e5$
$20\text{Mhz} < \omega_0 \leq 30\text{Mhz}$	$>1.54e6$
$30\text{Mhz} < \omega_0 \leq 40\text{Mhz}$	$>1.25e6$
$40\text{Mhz} < \omega_0 \leq 50\text{Mhz}$	$>8e5$
$50\text{Mhz} < \omega_0 \leq 75\text{Mhz}$	$>8e5$
$75\text{Mhz} < \omega_0 \leq 100\text{Mhz}$	$>7.5e5$
$100\text{Mhz} < \omega_0 \leq 150\text{Mhz}$	$>9e5$
$150\text{Mhz} < \omega_0 \leq 250\text{Mhz}$	$>1.5e6$
$250\text{Mhz} < \omega_0 \leq 500\text{Mhz}$	$>7.1e5$

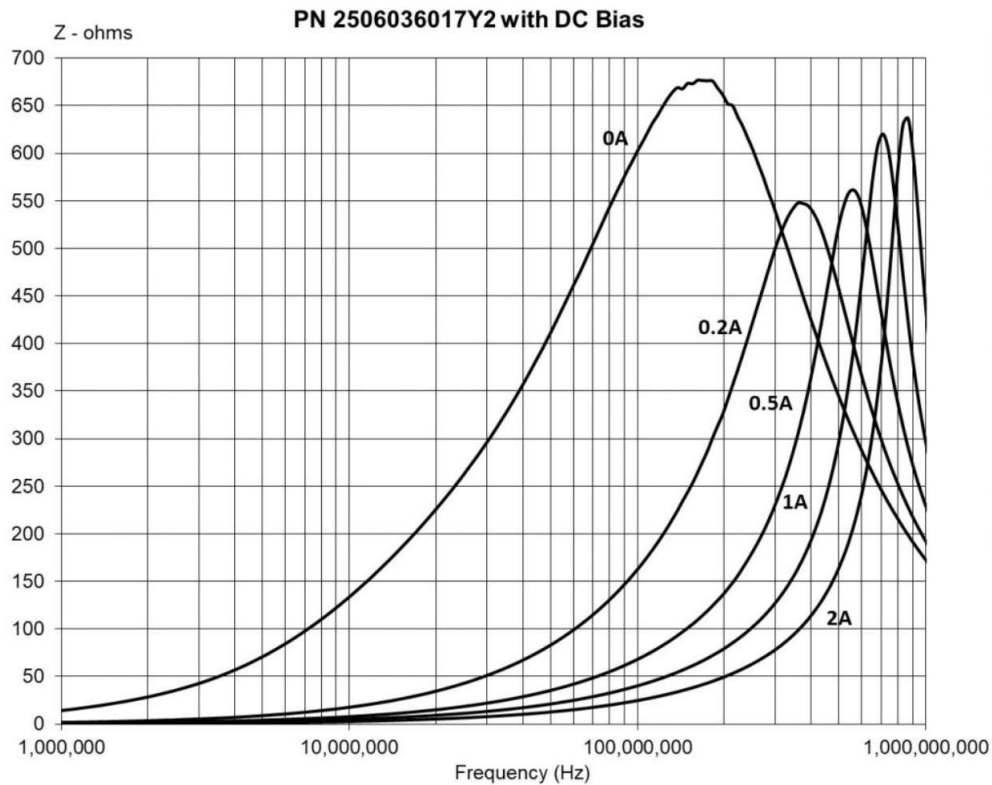


图 4-2. 2506036017Y2 在直流偏置电流下的阻抗与频率间的关系

请注意，一些 EMI 滤波器数据表提供了不同直流偏置电流下的阻抗降额曲线。例如，如图 4-2 所示，2506036017Y2 数据表提供了不同直流电流 ( 0A、0.2A、0.5A、1A 和 2A ) 下的 EMI 滤波器阻抗曲线。因此，如果要在高达 2A 的扬声器大电流应用中使用 D 类放大器，则需要验证每个设置下的稳定性。应在偏置电流范围内验证 PFFB 放大器的 D 类环路稳定性，确保在环路的任何中间工作点都不会出现不稳定情况。

## 5 用户指南：EMI 滤波器建模和后置滤波器反馈验证工具

如前文所述，为了估算 EMI 滤波器 R、L、C 参数，并针对每个直流偏置电流设置来交叉验证具有后置滤波器反馈的环路的稳定性标准，需要进行多次计算，这相对比较麻烦，因此 TI 构建了一个基于 Excel 的自定义 EMI 滤波器验证工具，利用简单的 Excel 电子表格进行相关验证，让用户可以更轻松地进行交叉验证（[铁氧体磁珠阻抗计算器 PFFB 工作表](#)）。

第一步是反向计算 EMI 滤波器 R、L、C 模型以估算  $\omega_0$  和 Q。为此，用户必须根据可在线获取的磁珠数据表来输入以下数据。

1. Rdc (磁珠的直流阻抗)
2. 峰值频率 (Fpeak)
3. 峰值阻抗 (Zpeak)
4. 附加频率 (Freq2) 和该频率下的阻抗 (Z@Freq2)
5. Cpar

例如，假设使用 2506036017Y2，根据数据表，直流偏置电流 = 0，可以估算以下参数：Rdc = 0.12，Fpeak = 180MHz，Zpeak = 675。此外，如果我们选择 Freq2 = 30MHz 和 Z@Freq2 = 300，这些输入作为 Excel 工作簿的输入（绿色），同时 Excel 工作表输出将提供完整的磁珠 R、L、C 模型以及  $\omega_0$  和 Q。我们假设 Cpar=100pF。

INPUTS FROM BEAD DATASHEET				
Rdc		0.12		
Fpeak		1.80E+08		
Z@Wpeak		675		
Freq 2		3.00E+07		
Z@Freq2		300		
Cpar		1.00E-10 (C2_bead)		
<b>Bead RLC Model Parameters calculated</b>				
Rdc		0.12	0.12 ohm	
Rpar		674.88	674.88 ohm	
CEQ		5.06E-13	0.51 pF	
LEQ		1.55E-06	1548.12 nH	
		Wo	12.80 MHz	
		Q	5.424	
		Wo/Q	2.36E+06	

图 5-1. EMI R、L、C 模型以及  $\omega_0$  和 Q 计算器的快照

计算后的输出 Rdc、Rpar、CEQ 和 LEQ 按图 5-1 建模。此外，计算得出的  $\omega_0$  和 Q 可作为 Excel 工作表的输入，以验证 EMI 滤波器是否可用于后置滤波器反馈配置。

可以看到，对于这些值， $\omega_0$  位于 10MHz 至 20MHz 范围内，且  $(\omega_0 / Q) = 2.36e6$ ，即  $>7.7e5$ ，如图 5-1 所示。因此，满足 PFFB 稳定性标准。Check for  $\omega_0$  input range 和  $\omega_0/Q$  Check 两列用于执行相关验证（如图 5-2 所示）。如 Excel 工作表中所示，如果两个条件都满足，则会突出显示一个绿色单元格以表示该滤波器可供使用。



Wo input		12.80 MHz			
Q input		5.42			
Wo/Q ratio		2361623.616			
Range	Q max	Min Wo/Q criterion	Check for Wo input range	Wo/Q CHECK	CONCLUSION
Wo<50KHz	NOT RECCOMENDED DUE TO AUDIO/US		INVALID	INVALID	INVALID
50KHz <Wo<100KHz	NOT RECCOMENDED DUE TO ULTRASONIC		INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
100KHz <Wo<250KHz	NOT STABLE		INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
250KHz <Wo<500KHz	NOT RECCOMENDED DUE TO 384K		INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
500KHz <Wo<1MHz	NOT RECCOMENDED DUE TO 768K		INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
1MHz <Wo< 1.5MHz	0.5	2.00E+06	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
1.5MHz <Wo< 2.5MHz	2	7.50E+05	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
2.5MHz <Wo< 3MHz	2.8	8.93E+05	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
3MHz <Wo< 4MHz	4	7.50E+05	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
4MHz <Wo< 5MHz	4.8	8.33E+05	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
5MHz <Wo< 7.5MHz	4.8	1.04E+06	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
7.5MHz <Wo< 10MHz	4.9	1.53E+06	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
10MHz <Wo< 20MHz	13	7.69E+05	VALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	VALID EMI FILTER FOR USE
20MHz <Wo< 30MHz	13	1.54E+06	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
30MHz <Wo< 40MHz	24	1.25E+06	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
40MHz <Wo< 50MHz	50	8.00E+05	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
50MHz <Wo< 75MHz	62	8.06E+05	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
75MHz <Wo< 100MHz	100	7.50E+05	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
100MHz <Wo< 150MHz	110	9.09E+05	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
150MHz <Wo< 250MHz	100	1.50E+06	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE
250MHz <Wo< 500MHz	350	7.14E+05	INVALID	WoBYQ CRITERIA SATISFIED	REDUCE FILTER Q TO USE

图 5-2. 用于验证 PFFB 稳定性的 EMI 滤波器验证 Excel 工作表的快照

如果没有突出显示的绿色单元格，则表示没有有效的滤波器可供使用，如果  $\omega_0 > 1.5\text{MHz}$ ，则 Q 因子必须减少到允许的限制范围内，如表 4-1 所示。在修改磁珠或滤波电容器参数后，可以再次使用计算器确认满足稳定性标准。

## 6 总结

本应用手册介绍了可用于 D 类输出端 EMI 滤波的不同类型选项以及每种选项的优缺点，并详细介绍了 EMI 滤波器具体使用注意事项。此外，本应用手册还介绍了 TAS27XX 系列器件中的后置滤波器反馈 (PFFB) 特性，并借助相关公式详细说明了环路稳定性限制。最后，本应用手册针对 EMI 滤波器建模和基于 Excel 的后置滤波器反馈稳定性验证工具提供了用户指南，可供用户仅通过提供铁氧体磁珠数据表中的一些输入即可选择适合的滤波器配置。

## 7 参考资料

- 德州仪器 (TI), [后置滤波器反馈 D 类放大器的优势和设计注意事项](#) 应用手册。

## 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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司