

## 手机中耳机驱动的设计考虑和解决方案

作者: David Guo

### 简介

高保真用于描述音响设备的性能。高保真音响设备具有理想的总谐波失真加噪声 (THD+N) 性能和精确的频率响应, 使得设备具有非常出色的主观测试结果。

便携式高保真音响设备给客户带来更高质量的音乐聆听体验。但与手机相比, 便携式高保真音响设备比较大, 很不方便。由于市场需求增加和技术进步, 现在已经可以将高保真功能集成到纤薄的手机中。

通常, 音频数模转换器 (DAC) 无法很好地驱动低阻抗耳机。为达到很好的性能, 运算放大器用在音频DAC后面进行信号调理, 包括电流到电压 (I到V) 转换、滤波、衰减和差分到单端转换。运算放大器必须具有低噪声、低失真和强驱动能力。运算放大器还必须在客户的主观测试中表现良好。ADI公司的许多运算放大器在音乐爱好者中享有盛名, 比如AD797、OP275、AD8620和ADA4627-1。在便携手机应用中, 器件的静态电流和封装也很重要。ADA4841-2、ADA4896-2、ADA4075-2、ADA4807-2和AD8397具有理想的噪声和失真性能, 同时拥有较小的封装, 很适合这类应用。本应用笔记重点讨论高保真耳机驱动应用的电路并争对不同系统设计要求推荐合适的运算放大器。

### 信号链

此类应用采用高性能、低功耗音频DAC可实现高达127 dB的动态范围 (DNR) 和-120 dB的THD+N。某些高性能音频DAC可配置为电压输出或电流输出。配置电流输出可提供更好的DNR和THD+N。

对于电压输出配置, 调理电路是一个差动放大器电路, 其将左声道或右声道的差分信号转换为单端信息 (参见图1)。

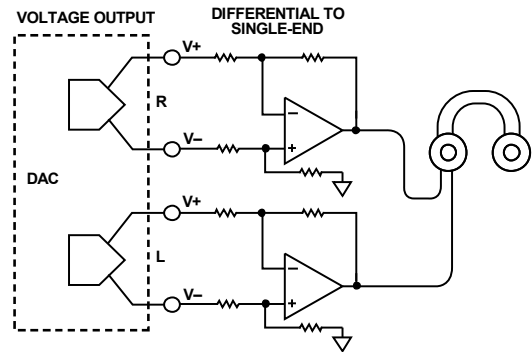


图1. 电压输出配置

对于电流输出配置, 需要一个I转V电路来将左声道和右声道的差分电流信号转换为差分电压信号, 后接一个差动放大器电路 (参见图2)。

在手机应用中, 器件的功耗至关重要。在本应用笔记中, 为分析方便, 选择 $\pm 5\text{ V}$ 电源作为例子。

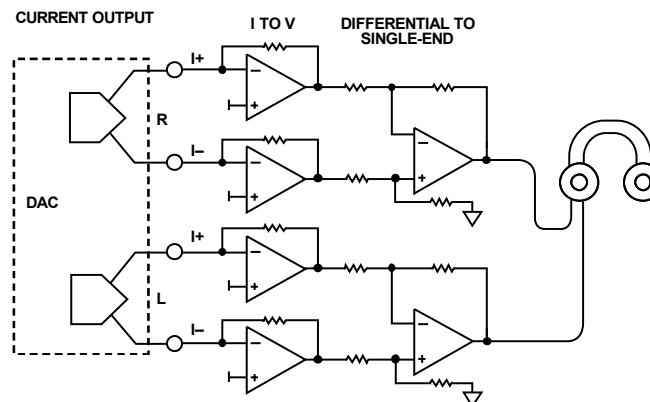


图2. 电流输出配置

## 目录

简介 .....	1	输出级（一阶低通滤波器） .....	6
信号链 .....	1	输出级（二阶低通滤波器） .....	6
修订历史 .....	2	用于输出级的推荐运算放大器 .....	6
I 转 V 级 .....	3	THD+N 与 $V_{OUT}/I_{OUT}$ 测量 .....	7
用于手机中 I 转 V 级的推荐运算放大器 .....	3	THD+N 与 $V_{OUT}/I_{OUT}$ 结果 .....	7
THD+N 与 $V_{OUT}$ 测量 .....	4	设计指南 .....	7
THD+N 与 $V_{OUT}$ 结果 .....	4	总结 .....	8
耳机基础 .....	4		

## 修订历史

2016年10月—修订版0：初始版

## I转V级

电流输出DAC的理想I到V转换器是接地电阻。然而，多数DAC的工作特性与输出电压不是线性关系。标准做法是将运算放大器用作I到V转换器，在反相输入端产生一个虚拟地。通常，运算放大器输出级会吸收时钟能量和电流阶跃。但是，图3显示 $C_F$ 电容一面将高频能量分流到地，一面正确地重现具有超低THD和交调失真 (IMD) 的理想输出。

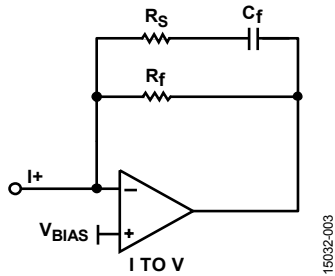


图3. I转V级

该电路有四个器件：

- $R_F$ 为反馈电阻。为使噪声最低，第一级 (I转V) 的增益应最大化。然而，失真与运算放大器的开环增益 ( $A_{OL}$ ) 相关。 $A_{OL}$ 越高，失真性能越好。通常， $A_{OL}$ 在一定输出电压范围内规定 (参见图3)。以ADA4896-2为例，当输出为-4 V至4 V (使用±5 V电源) 时， $A_{OL}$ 最低是100 dB，如果输出提高到-4 V至4 V以外时， $A_{OL}$ 会降低，从而导致失真变差。假设DAC的最大输出电流为1 mA，则：

$$R_F = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT}} = \frac{4 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 4 \text{ k}\Omega$$

- $C_F$ 为与 $R_F$ 并联的反馈电容。 $C_F$ 和 $R_F$ 形成传递函数中的一个极点，因此该低通滤波器的截止频率 ( $f_c$ ) 为：

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_F C_F}$$

假设 $f_c$ 为100 kHz，则：

$$C_F = \frac{1}{2\pi R_F f_c} = \frac{1}{2\pi \times 4 \text{ k}\Omega \times 100 \text{ k}\Omega} \approx 390 \text{ pF}$$

- $R_S$ 为与 $C_F$ 串联的电阻。为实现更好的稳定性和THD+N性能， $R_S$ 典型值为100  $\Omega$ 。
- $V_{BIAS}$ 为电压偏置。通常，音频DAC会产生直流失调电流。为使有效输出信号最大，应在同相输入端增加一个 $V_{BIAS}$ 以抵消DAC直流失调电流产生的直流电压。

## 用于手机中I转V级的推荐运算放大器

用作耳机驱动器I转V级的运算放大器的关键指标包括电源、 $I_Q$ 、电压噪声和电流噪声、THD+N、封装、共模抑制比 (CMRR)、电源抑制比 (PSRR)、 $A_{OL}$ 和压摆率。推荐用于I到V转换的器件有ADA4841-2、ADA4896-2、ADA4075-2和ADA4807-2。关于这些器件，有以下要点需要说明：

- 所有器件都有低噪声、低功耗、小封装特性。
- ADA4807-2利用最低 $I_Q$ 实现低噪声和轨到轨输入/输出 (RRIO)，并集成了电源关断功能，可进一步降低功耗。
- ADA4075-2额定电源为9 V (最小值)，不是轨到轨输出 (RRO)器件，封装最小。
- THD+N是主要性能指标。图4和图5分别是THD+N的测试电路和测试结果。

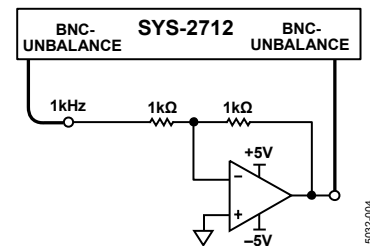


图4. 无负载时的THD+N测试

## THD+N与 $V_{OUT}$ 测量

为了确定THD+N性能不降低情况下的最大输出，需测量THD+N与 $V_{OUT}$ 的关系。

通常，音频DAC电流输出可等效为一个电阻串联一个电压源。也就是说，可认为I转V电路是一个反相放大器电路。为简单起见，设置增益为-1来确定运算放大器的THD+N性能（参见图5）。下面是利用Audio Precision的SYS-2712来测量THD+N与 $V_{OUT}$ 关系的详细步骤：

- 电源为 $\pm 5\text{ V}$ 。
- SYS-2712模拟分析仪产生1 kHz正弦波作为放大器电路的输入。放大器电路的输出馈入SYS-2712以获得THD+N数据。
- SYS-2712分析仪的带宽配置为22 kHz。
- 为了利用SYS-2712评估软件获得输出范围内的THD+N，模拟分析仪的输入配置为自动调节量程，即分析仪的输入级增益随不同的输入信号（包括40 mV、160 mV、300 mV、600 mV、1.2 V、2.5 V和5 V）自动提高。通常，增益越大，分析仪的噪声电平和THD+N越差。

## THD+N与 $V_{OUT}$ 结果

图5所示为推荐运算放大器的THD+N与 $V_{OUT}$ 测量结果。当 $V_{OUT}$ 小于1.2 V rms时，四款运算放大器的THD+N性能相似。

当 $V_{OUT}$ 大于1.2 V rms时，SYS-2712模拟分析仪切换到2.5 V量程，提高内部可编程增益放大器（PGA）的增益。噪声恶化，THD+N性能略微降低。导致性能降低的是SYS-2712。这不是运算放大器的真实性能，因为SYS-2712在较大PGA增益下的噪声变差。

随着 $V_{OUT}$ 继续提高到放大器的最大输出电压，THD+N性能急剧降低。对于ADA4841-2、ADA4896-2和ADA4807-2，电压约为3.5 V rms（4.9 V峰值）。这与这些器件的RRO特性是一致的。对于ADA4075-2，电压约为2.13 V rms（3.0 V峰值）。这与ADA4075-2数据手册中2 V到轨输出电压是一致的。

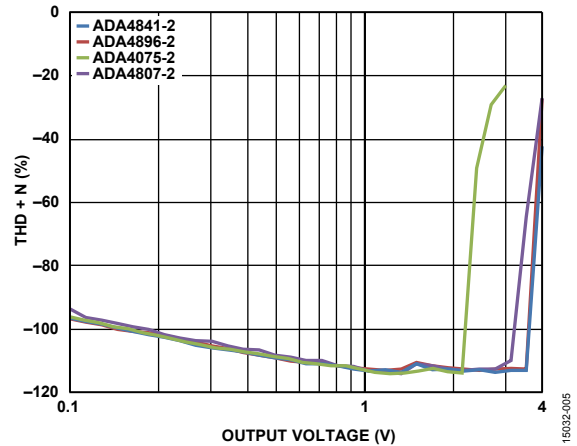


图5. 推荐运算放大器的THD+N结果

## 耳机基础

输出级由负载（耳机）的特性决定。耳机有两个关键性能指标：阻抗和灵敏度。

阻抗通常在1 kHz时测量。低阻抗耳机在8  $\Omega$ 到32  $\Omega$ 范围内，高阻抗耳机在大约100  $\Omega$ 到600  $\Omega$ 范围内。随着阻抗提高，耳机需要更大的电压（电流一定时）来驱动。因此，当电压一定时，耳机的响度会因阻抗提高而降低。近年来，通常降低新型耳机的阻抗以支持手机等电池供电便携式电子设备的较低电压。对运算放大器而言，阻抗越低意味着负载越重，因而需要更大的电流驱动能力才不会失真。

灵敏度衡量耳机在给定功率驱动下的响度。它可表示为每毫瓦的声压级（SPL）dB（dB/mW）或每伏的SPL dB（dB/V）。

通过分析现场录音的波形文件，最大SPL可达到120 dB。平均SPL低于100 dB。所需的峰值功率通过下式确定：

$$P = 10 \left( \frac{\text{所需SPL} - \text{灵敏度}}{10} \right)$$

表1详细列出了一些耳机的主要规格。阻抗范围在8  $\Omega$ 至600  $\Omega$ 。表中列出了所需的峰值功率、峰值电压和峰值电流。

由表1可见，所需的平均功率低于2 mW。为了重现现场录音的效果，耳机驱动器必须输出更大功率。

对于低阻抗耳机，所需峰值电流最大可达80 mA，并且在该

电流下的THD+N不能降低。

对于高阻抗耳机，输出电压必须很高。例如，使用Beyer Dynamic的DT880 (600  $\Omega$ ) 时，运算放大器需输出12 V电压，这在 $\pm 5$  V系统中是不可能的。如果产品的目标是驱动高阻抗耳机，需提高放大器电路的电源电压。

表1. 耳机的灵敏度、阻抗、峰值电压和峰值电流

制造厂商	型号	灵敏度 (dB/mW)	阻抗 ( $\Omega$ )	频率 (Hz)	平均功率 (mW)	峰值功率 (mW)	峰值电压 (V)	峰值电流 (mA)
SONY	XBA-4	108	8	3至28000	0.158	15.849	0.356	44.510
Audio-Technica	ATH-CHX7	100	16	15至22000	1.000	100.000	1.265	79.057
Shure	SE215	107	20	22至17500	0.200	19.953	0.632	31.585
Apple	Earpod	109	23	5至21000	0.126	12.589	0.538	23.396
Grado	Alice M1	100	32	20至22000	1.000	100.000	1.789	55.902
Creative	AURVANA Air	102	32	20至20000	0.631	63.096	1.421	44.404
KOSS	PP	101	60	10至25000	0.794	79.433	2.183	36.385
Sennheiser	HD650	98	300	10至39500	1.585	158.489	6.895	22.985
Beyer Dynamic	DT880	96	600	5至35000	2.512	251.189	12.277	20.461

## 输出级（一阶低通滤波器）

输出级将差分电压信号转换为单端电压信号。图6所示为常见差分放大器电路，也称为减法器电路。

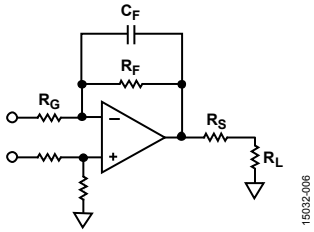


图6. 差分转单端电路

$R_G$ 和 $R_F$ 决定电路增益，一般小于1。电阻的阻值必须较小，通常为1 k $\Omega$ ，以免产生较大噪声。 $R_F$ 和 $C_F$ 形成传递函数中的一个极点。因此，该低通滤波器的 $f_C$ 为：

$$f_C = \frac{1}{2\pi R_F C_F}$$

$R_S$ 决定耳机驱动器的输出阻抗或阻尼系数。高阻尼系数( $R_L/R_S$ )可改善源（耳机驱动器）对负载（耳机）的控制。耳机阻抗不是纯电阻，会随频率而改变。由于阻抗随频率而变化，较高的 $R_S$ 可能引起较大的失真（尤其是低频失真）。从性能角度看，应使 $R_S$ 为较低的值。一般而言，阻尼系数应高于1。

从安全角度看，较高 $R_S$ 可衰减功率以防止耳机受损，另外在输出短接至地时还能保护放大器。热插拔耳机时可能发生这种情况。图7显示了一个4层评估板的ADA4807-2 (LFCSP) 最大功耗与环境温度的关系。

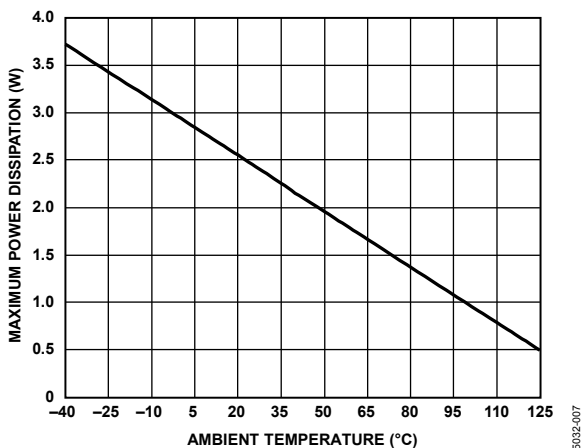


图7. ADA4807-2最大功耗与环境温度的关系（4层评估板）

环境温度为85°C时，功耗 ( $P_D$ ) 为1.274 W。假设电源为 $\pm 5$  V，则最大输出电压为2 V rms。 $R_S = 10 \Omega$ ，并且 $R_S$ 短接至地。每通道 $P_D$  (ADA4807-2) 为：

$$P_D = (V_S \times I_S) + \left( \frac{V_S}{2} \times \frac{V_{OUT}}{R_L} \right) - \frac{V_{OUT}^2}{R_L}$$

$$P_D = 610 \text{ mW}$$

考虑到ADA4807-2为双通道器件，故总 $P_D$ 为1.22 W。本例中的输出电流为200 mA，ADA4807-2短路电流为80 mA，因此 $R_S$ 可以更小以提高阻尼系数。对于短路电流大于200 mA的运算放大器， $R_S$ 必须至少为10  $\Omega$ ，以免运算放大器在输出短接至地的状态下受损。

## 输出级（二阶低通滤波器）

与一阶低通滤波器相比，二阶低通滤波器具有更陡的滚降响应，可移除指定频段中的更多噪声。

利用单端输入多路反馈低通滤波器的设计公式，很容易设计带差分输入的双极点低通滤波器。如图8所示，复制器件得到等效频率响应。通常，该滤波器提供贝塞尔响应，具有线性相位。

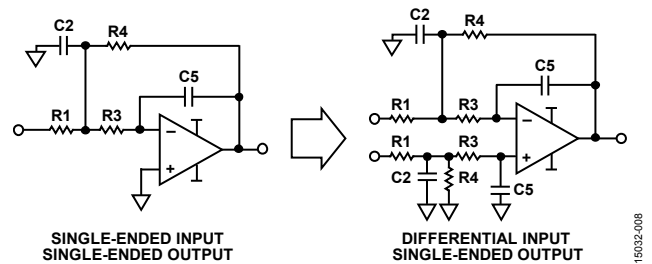


图8. 二阶多路反馈 (MFB) 滤波器

## 用于输出级的推荐运算放大器

输出级运算放大器的关键性能指标与I转V级相似。在32  $\Omega$  负载时，输出级运算放大器的THD+N典型值必须小于-100 dB。手机耳机驱动器的输出级推荐采用的运算放大器有ADA4841-2、ADA4807-2和AD8397。有四点需要考虑：

- 所有这些运算放大器都是低噪声、低功耗、小封装器件。
- ADA4807-2实现了低噪声和RRIO，其 $I_Q$ 最低。它还集成了电源关断功能，可进一步降低功耗。

在16 Ω负载时，AD8397的THD+N典型值小于-100 dB。其在主观测试中表现也很好。缺点是AD8397的I<sub>Q</sub>较高，约为12 mA。

16 Ω负载时THD+N小于-100 dB是关键性能指标。图9和图10分别是测试电路和测试结果。

相关规格参见ADA4841-2、ADA4807-2和AD8397数据手册。

### THD+N与V<sub>OUT</sub>/I<sub>OUT</sub>测量

图9所示为用于测量大负载下THD+N的电路。下面详细说明THD+N与V<sub>OUT</sub>/I<sub>OUT</sub>测量：

- 电源为±3.3 V。减法器的增益约为0.243。
- SYS-2712产生1 kHz正弦波作为放大器电路的输入。放大器电路的输出馈入SYS-2712模拟分析仪以确定THD+N。
- SYS-2712分析仪的带宽配置为22 kHz。
- 为了测量THD+N与V<sub>OUT</sub>/I<sub>OUT</sub>的关系，SYS-2712配置为输出100 mV rms到4 V rms信号。

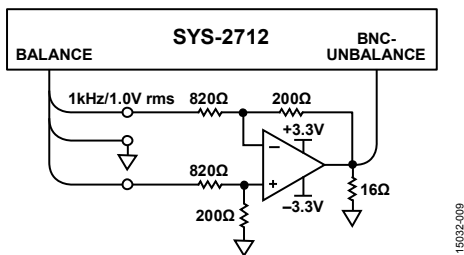


图9. 16 Ω负载时的THD+N测试

### THD+N与V<sub>OUT</sub>/I<sub>OUT</sub>结果

图10和图11所示为推荐运算放大器的THD+N与V<sub>OUT</sub>/I<sub>OUT</sub>测量结果。

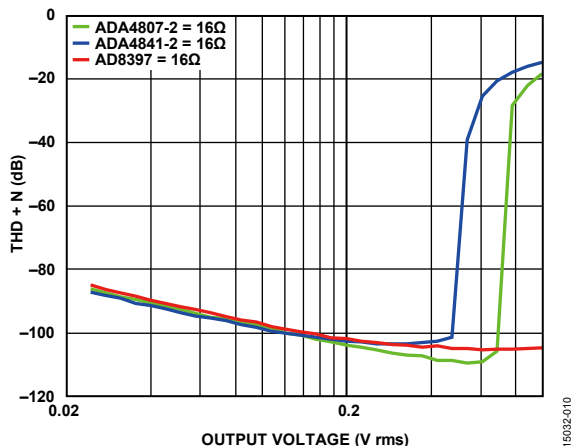


图10. THD+N与V<sub>OUT</sub>的关系，(ADA4841-2、ADA4807-2和AD8397)

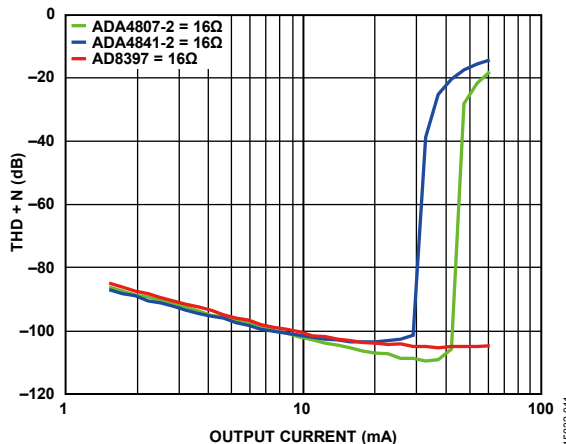


图11. THD+N与I<sub>OUT</sub>的关系，(ADA4841-2、ADA4807-2和AD8397)

表2详细列出了最大电流和最大输出功率，参数设置为<-100 dB THD+N和16 Ω负载。图11显示了如下结果：

- 当I<sub>OUT</sub>达到某一电流阈值时，THD+N性能急剧降低。
- AD8397在16 Ω负载时具有高电流驱动能力。
- ADA4807-2最大输出电流为42 mA，I<sub>Q</sub>仅为1.2 mA，推荐用于对功耗有预算的应用。

多数情况下，2 mW输出功率足以驱动耳机。此时，THD+N很重要；如表2所示，2 mW时所有推荐运算放大器的THD+N都小于-100 dB。

表2. 16 Ω负载时的最大电流和输出功率

参数	ADA4841-2	ADA4807-2	AD8397
THD+N <-100 dB 时的最大电流	29.1 mA	42.1 mA	125 mA
THD+N <-100 dB 时的输出功率	13.6 mW	28.4 mW	250 mW
2 mW输出功率时的THD+N	-102.7 dB	-102.7 dB	-101.4 dB

### 设计指南

1 kΩ电阻产生的噪声为4 nV/√Hz，比多数运算放大器的电压噪声还大。电路中的电阻值必须精心选择，不得超过1 kΩ。

屏蔽在手机中非常重要。为达到THD+N < -100 dB的要求，必须消除哪怕极小的干扰，否则THD+N性能就会降低，尤其是一边聆听音乐一边上网浏览时。金属屏蔽有助于防止性能降低。

为了更好地散热，应将LFCSP封装的裸露焊盘焊接到电路板焊盘，并通过过孔将其连接到电路板另一侧的较大实心铜层。该铜层可以是电路板的接地或电源层，具体使用哪一层，请参阅ADA4841-2、ADA4807-2和AD8397数据手册。

使用低压差稳压器（LDO）作为运算放大器的电源。将去耦电容（0.1  $\mu\text{F}$ 和4.7  $\mu\text{F}$ ）放在运算放大器电源引脚附近。

音频路径中的电容必须为NP0陶瓷型，以提供更好的失真性能。使用薄膜电阻以获得最佳THD性能。金属膜电阻也是合适的，但成本通常更高。

## 总结

表3列出了电压输出DAC或电流输出DAC的不同解决方案和考虑。

要创造一款出色的产品，有很多事情需要考虑。在实际应用中，根据不同条件（例如电源、目标负载电阻、功耗预算和预期性能），客户可以选择合适的解决方案来设计电路以实现个人期望。

表3. 推荐的不同解决方案

参数	DAC电压输出	DAC电流输出	
		I转V级	输出级
低成本	<a href="#">ADA4841-2</a>	<a href="#">ADA4841-2</a>	<a href="#">ADA4841-2</a>
高性能	<a href="#">AD8397</a>	<a href="#">ADA4807-2</a> , <a href="#">ADA4896-2</a> , <a href="#">ADA4075-2</a>	<a href="#">AD8397</a>
高性能、低功耗	<a href="#">ADA4807-2</a>	<a href="#">ADA4807-2</a> , <a href="#">ADA4896-2</a> , <a href="#">ADA4075-2</a>	<a href="#">ADA4807-2</a>