



Etsuji Iwata

### 摘要

许多音频硬件工程师都将德州仪器 (TI) 视为音频全差分放大器 (FDA) 的主要供应商。TI 的音频产品系列包括 [OPA1632](#) 和 [LME49724](#) 等 FDA。音频设备的差分模拟前端需要高保真音频性能。众所周知, TI 的 FDA 可为音频设计提供出色的解决方案, 其音频 FDA 为音频信号链 (例如 D 类功率放大器或音频 ADC 的差分输入) 中的单端到差分转换提供了一种简单的解决方案。

在本应用报告中, 我们将研究双极晶体管技术中的电压和电流噪声产生的影响, 并通过分析比较整个可闻频率范围内的总噪声性能与输入阻抗的变化幅度。

### 内容

1 引言.....	2
2 超 $\beta$ BJT.....	2
3 OPA1637 的优势.....	3
4 OPA1637 的典型应用.....	4
5 总结.....	5
6 参考文献.....	5

### 插图清单

图 2-1. BJT 小信号模型.....	2
图 3-1. OPA1637 的典型应用电路.....	3
图 3-2. 相对于 FDA 输入电阻值的总噪声比较.....	4
图 4-1. 音频 ADC 的差分输入前端示例.....	5

### 表格清单

表 3-1. OPA1637 和 OPA1632 音频 FDA 比较.....	3
---	---

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

虽然音频工程师一直关注的是超低噪声，但通常只考虑放大器的输入参考电压噪声参数。如果源极和反馈网络的阻抗很低，则可以认为是合理的。但是，对于功耗敏感的系统（例如由电池或 USB 供电的系统），低阻抗可能不是合适的选择。电路设计人员必须考虑输入电阻对系统总噪声的影响，从而在噪声和功率间达到合理平衡。

TI 已推出下一代音频 FDA：OPA1637。该器件采用 TI 新颖的模拟双极工艺技术，其使用的超  $\beta$  BJT 器件可解决许多音频应用中出现的问题。

## 2 超 $\beta$ BJT

OPA1637 与上一代器件相比，其不同之处是输入电路的长尾对中存在双极结型晶体管 (BJT)，此技术被称为超  $\beta$  BJT。TI 的超  $\beta$  BJT 其实是具有高  $\beta$ （即高电流增益 (Hfe)）的单个 BJT。

OPA1637 的性能优势来自于制造技术的改进。精密的制造技术使该产品通过简单的结构实现低噪声、高频率响应以及高电流增益。借助这项模拟工艺技术改进，TI 能够设计出具有高直流和交流性能的双极运算放大器。例如，与前几代晶体管相比，BJT 输入运算放大器具有更高的输入阻抗、更低的噪声、更高的带宽和更低的功耗。这些运算放大器的输入阻抗不如 JFET 输入运算放大器那么高，但可以实现高带宽，同时保持良好的直流精度。

这种优势不仅体现在 OPA1637 上，而且体现在其他采用超  $\beta$  晶体管技术的运算放大器中，例如 OPA2202、OPA2210、INA818 和 INA819。

在运算放大器的输入电路中，超  $\beta$  BJT 有几个优势。

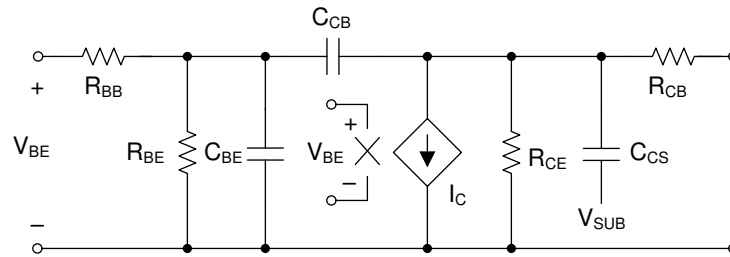


图 2-1. BJT 小信号模型

图 2-1 所示为 BJT 的小信号模型，其电流增益的公式为  $I_B = I_C / \beta$ 。

这个简单的公式说明，对于给定的集电极电流， $\beta$  值越高，基极电流越低。当该晶体管作为运算放大器输入差分对的一部分时，它相当于降低了运算放大器的输入偏置电流。此外，超  $\beta$  可通过预期的和配置的基极电流  $I_B$  来改善运算放大器输入长尾对的输入参考噪声，如以下方程式 1、方程式 2 和方程式 4 计算所示。

在 BJT 小信号模型中，还对输入参考噪声进行了建模。宽带范围内的输入参考电压噪声  $E_N$  和输入参考电流噪声  $I_N$  用 BJT 小信号模型中的参数表示。

$$E_n^2 = 4kTR_{bb} + 2qI_C R_e^2 = 4kT \left( R_{bb} + \frac{1}{2} \frac{I_C}{V_T} \left( \frac{1}{g_m} \right)^2 \right) = 4qV_T \left( R_{bb} + \frac{1}{2\beta I_B} \right) \quad (1)$$

$$I_n^2 = 2qI_B \quad (2)$$

其中  $k$  是热电压公式中所示的玻尔兹曼常数：

$$V_T = kT/q \quad (3)$$

- $V_T$  是热电压
- $k$  是玻尔兹曼常数
- $T$  是温度
- $q$  是基本电荷

$g_m$  是跨导，如下所示：

$$g_m := \delta I_C / \delta V_{BE} = I_C / V_T \quad (4)$$

在 Ebers-Moll 模型中， $V_{BE} = V_T \exp(I_C / I_S)$ ，其中  $R_e$  是等效发射极电阻，相当于  $1/g_m$ 。

总之，输入参考电压和电流噪声都通过超  $\beta$  晶体管保持在低水平。

### 3 OPA1637 的优势

凭借更低的输入偏置电流和输入偏置电流噪声，具有 TI 超  $\beta$  BJT 输入的 OPA1637 使电路设计人员能够使用比上一代音频 FDA 更高的输入电阻值，因此可在终端应用中实现节能。图 3-1 显示了一个示例电路。

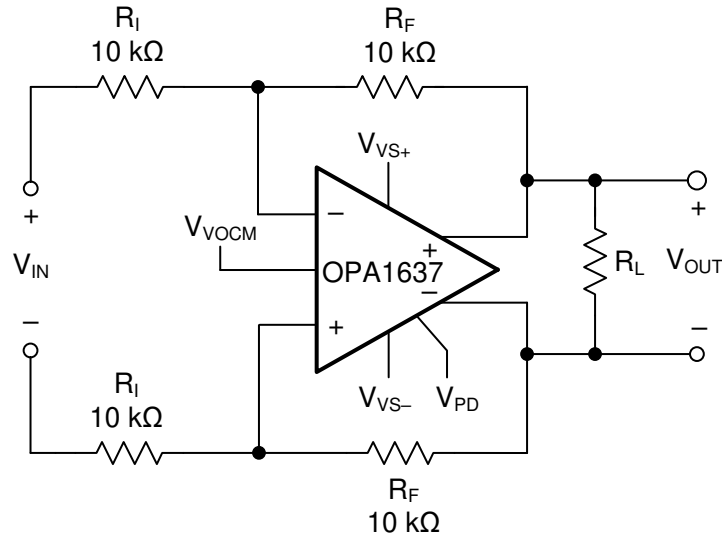


图 3-1. OPA1637 的典型应用电路

OPA1637 的噪声看起来比以前的音频 FDA (例如 OPA1632) 更高，表 3-1 详细比较了这两款器件。

表 3-1. OPA1637 和 OPA1632 音频 FDA 比较

参数	OPA1637	OPA1632
通道数量	1	1
总电源电压 (最小值) (+5V = 5, +/-5V = 10)	3	5
总电源电压 (最大值) (+5V = 5, +/-5V = 10)	36	30
GBW (典型值) (MHz)	9.2	180
压摆率 (典型值) (V/us)	15	50
轨到轨	RRO	否
V <sub>os</sub> (25°C 时的失调电压) (最大值) (mV)	0.2	3
每个通道的 I <sub>q</sub> (典型值) (mA)	0.95	14
每个 GBW 的 I <sub>q</sub> (典型值) (uA/MHz)	103	78
1kHz 时的 V <sub>n</sub> (典型值) (nV/rtHz)	3.7	1.5
V <sub>n</sub> 转折频率 (典型值) (Hz)	5	500
1kHz 时的 THD + N (典型值) (dB)	120	133
CMRR (典型值) (dB)	140	90
输入偏置电流 (最大值) (nA)	2	200
1kHz 时的 I <sub>n</sub> (典型值) (pA/rtHz)	0.3	0.6
I <sub>n</sub> 转折频率 (典型值) (Hz)	10	1000
输出电流 (典型值) (mA)	31	85
工作温度范围 (°C)	-40 至 125	-40 至 85

在图 3-1 所示的实际应用电路中，很明显这些参数并不会对总噪声造成重要影响。图 3-2 显示，在输入电阻值较高（例如 10kΩ）的情况下，OPA1637 由于其电流噪声较低，在整个可闻频率范围内的噪声低于 OPA1632。即使输入电阻值较低（例如 1kΩ），总噪声的差异也很小（小于 0.5uV）。

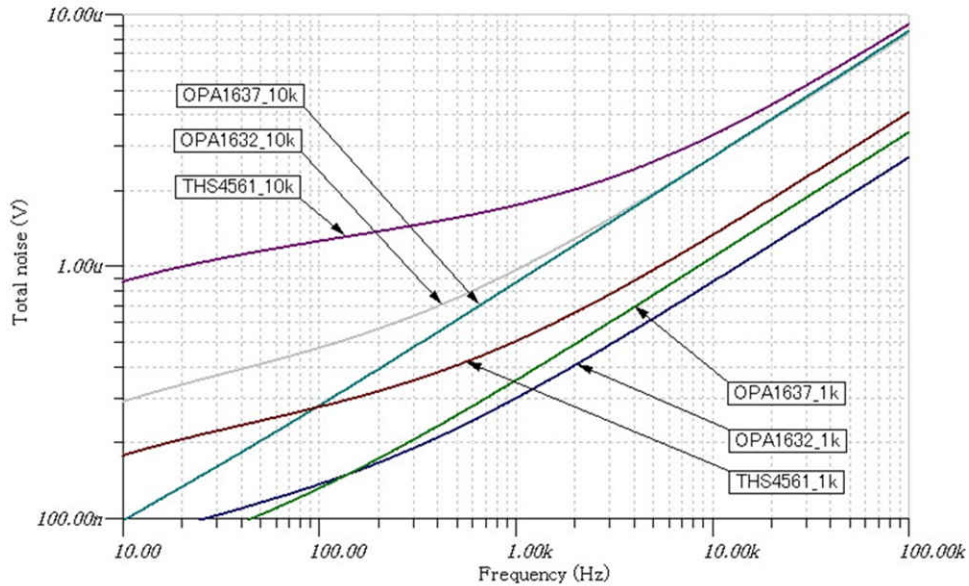


图 3-2. 相对于 FDA 输入电阻值的总噪声比较

OPA1637 和 OPA1632 具有相似的输入拓扑，即差分对 BJT（方程式 3）。宽带输入参考电压和电流噪声由集电极电流和电流增益 ( $\beta$ ) 决定。

$$E_n^2 = 4qV_T \left( R_{bb} + \frac{1}{2} \frac{V_T}{I_C} \right) \quad (5)$$

$$I_n^2 = 2qI_B = 2q \frac{I_C}{\beta} \quad (6)$$

OPA1637 使用超  $\beta$  BJT，可实现卓越的性能，其电源电流降幅是 OPA1632 的 10 倍。OPA1637 的  $1/f$  转折频率比 OPA1632 和其他音频 FDA 低很多。总之，由于 OPA1637 具有低噪声和低功耗，该器件是特别适合音频应用的 FDA 之一。

#### 4 OPA1637 的典型应用

OPA1637 的一个示例用例是驱动差分输入音频 ADC（例如 TLV320ADC5140）。如图 4-1 所示。电路设计人员可以通过使用 ADC 的满量程输入范围来轻松优化电路，从而提高音频性能。与单端输入配置相比，该 ADC 在差分输入配置中具有更高的 THD+N 性能。OPA1637 可以实现从单端到差分的转换电路，同时还能保持高输入阻抗，从而最大限度地减轻任何先前电路上的负载。

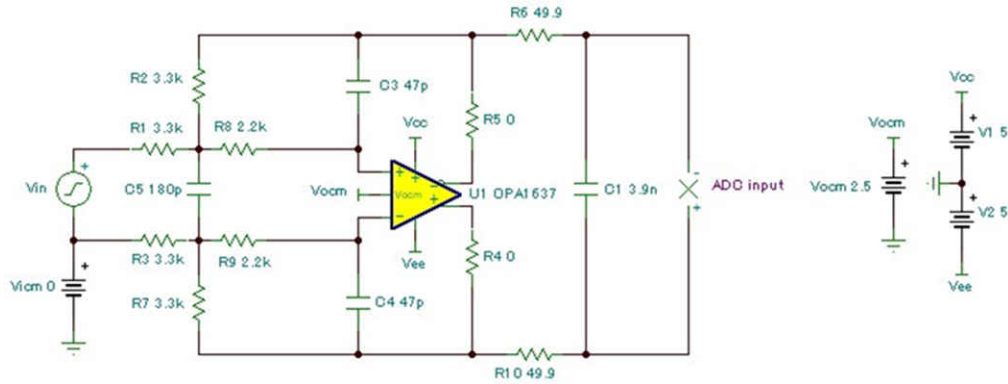


图 4-1. 音频 ADC 的差分输入前端示例

## 5 总结

OPA1637 在差分音频信号链中实现了新颖的音频性能，这是由于其输入结构采用了 TI 的超  $\beta$  BJT 技术。电路设计人员可以构建性能高于上一代可用音频 FDA 的各种音频前端。

## 6 参考文献

1. Vadim V. Ivanov, *Operational Amplifier Speed and Accuracy Improvement: Analog Circuit Design with Structural Methodology*, Springer, April 2006
2. Johan Huijsing, *Operational Amplifiers: Theory and Design, third edition*, Springer, July 2016
3. 德州仪器 (TI), [全差分放大器应用报告](#)
4. *Noise in bipolar transistors (Lecture Number 8)*, University of Oslo, Department of Informatics

## 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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司