

Circuit from the Lab™ 实验室电路是经过测试的电路设计，用于解决常见的设计挑战，方便设计人员轻松快捷地实现系统集成。有关更多信息和/或技术支持，请访问：
www.analog.com/zh/CN0181。

连接/参考器件

AD5542A/AD5541A	16 位电压输出 nanoDAC™ 转换器，1 μs 建立时间
ADR421	2.5 V、XFET™ 低噪声精密基准电压源
AD8657	精密、18 V、低功耗、双通道、CMOS、RRIO 运算放大器

精密 16 位电平设置，总功耗低于 5 mW

电路功能与优势

需要能够提供真 16 位电平设置性能的小封装、超低功耗解决方案？针对精密 16 数模转换应用，本电路使用电压输出 DAC [AD5542A/AD5541A](#)、基准电压源 [ADR421BRZ](#) 以及用作基准电压缓冲器的 20 μA [AD8657](#)，提供了一款低功耗、小尺寸解决方案。

基准电压缓冲对于设计至关重要，因为 DAC 基准输入的输入阻抗与码高度相关，如果 DAC 基准电压源未经充分缓冲，将导致线性误差。开环增益高达 120 dB 的 [AD8657](#) 已经过验证和测试，

符合本电路应用关于建立时间、失调电压和低阻抗驱动能力的要求。

图 1 所示的器件组合实现了最小的 PCB 面积和最低的功耗。[AD5542A](#) 采用 3 mm × 3 mm、16 引脚 LFCSP 或 16 引脚 TSSOP 封装。[AD5541A](#) 采用 3 mm × 3 mm、10 引脚 LFCSP 或 10 引脚 MSOP 封装。

这一器件组合可以提供业界领先的 16 位分辨率、±1 LSB 积分非线性(INL)和 ±1 LSB 微分非线性(DNL)，可以确保单调性，并且具有低功耗、小 PCB 和高性价比等特性。

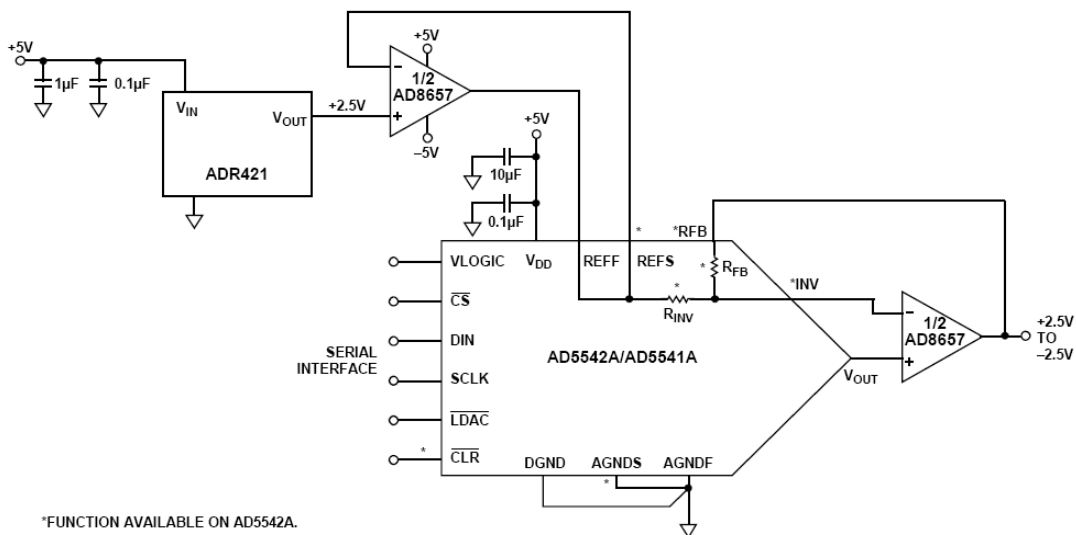


图1. 精密 DAC 配置 (简化的原理示意图: 未显示去耦和所有连接)

Rev.0

Circuits from the Lab™ circuits from Analog Devices have been designed and built by Analog Devices engineers. Standard engineering practices have been employed in the design and construction of each circuit, and their function and performance have been tested and verified in a lab environment at room temperature. However, you are solely responsible for testing the circuit and determining its suitability and applicability for your use and application. Accordingly, in no event shall Analog Devices be liable for direct, indirect, special, incidental, consequential or punitive damages due to any cause whatsoever connected to the use of any Circuits from the Lab circuits. (Continued on last page)

电路描述

对于无误差的理想 DAC，输出电压与基准电压相关，如下式所示：

$$V_{OUT} = \frac{V_{REF} \times D}{2^N}$$

其中 D 为载入 DAC 寄存器的十进制数据字，N 为 DAC 的分辨率。

对于 2.5 V 基准电压且 N = 16，上述公式可简化为下式：

$$V_{OUT} = \frac{2.5 \times D}{65,536}$$

这样，在中间电平时 V_{OUT} 为 1.25 V，在满量程时 V_{OUT} 为 2.5 V。LSB 大小为 $2.5 \text{ V}/65,536 = 38.1 \mu\text{V}$ 。

16 位时，1 LSB 也相当于满量程的 0.0015%，或者 15 ppm FS。基准电压源 ADR421（B 级）的室温初始精度为 0.04%，相当于 16 位时的约 27 LSB。此初始误差可以通过系统校准消除。ADR421（B 级）的温度系数典型值为 1 ppm/°C，最大值为 3 ppm/°C。

假设使用理想基准电压源（基准电压误差已通过系统校准消除），则 AD5542A 的最差情况单极性输出电压（包括误差）可通过下式计算：

$$V_{OUT-UNI} = \frac{D}{2^{16}} \times (V_{REF} + V_{GE}) + V_{ZSE} + INL$$

其中：

$V_{OUT-UNI}$ 为单极性模式最差情况输出。

D 为载入 DAC 的码。

V_{REF} 为施加于 DAC 的基准电压（假设无误差）。

V_{GE} 为增益误差，单位伏特(V)。（注意，基准电压缓冲的失调误差必须包括在增益误差中，因此为基准电压缓冲选用的运算放大器必须具有低输入失调电压特性。）

V_{ZSE} 为零电平误差（失调误差），单位伏特(V)。（注意，可选输出缓冲放大器的失调电压会增加此误差。）

INL 为 DAC 的积分非线性，单位伏特(V)。（注意，可选输出缓冲放大器的非线性会增加此误差。）

本电路采用电压输出 DAC AD5542A，提供真 16 位 INL 和 DNL。AD5541A/AD5542A 的 DAC 架构为分段 R-2R 电压模式 DAC。采用这种配置，输出阻抗与码无关，而基准电压源的输入阻抗则与码高度相关。

因此，基准电压缓冲的选择对于码相关基准电流的处理非常重要，如果 DAC 基准电压缓冲不充分，可能会导致线性误差。选择配合精密电压输出 DAC 使用的基准电压缓冲时，运算放大器的开环增益、失调电压、失调误差温度系数和电压噪声也是重要的选择指标。基准电压电路中的失调误差会引起 DAC 输出端产生增益误差。

本电路采用驱动/检测配置（开尔文检测）的低功耗 CMOS 运算放大器 AD8657 作为 AD5542A 的低阻抗输出基准电压缓冲。AD8657 具有 120 dB 的开环增益，是一款精密、18 V、50 nV/√Hz 运算放大器。其最大失调电压为 350 μV，典型温漂小于 2 μV/°C，噪声为 5 μV p-p（0.1 Hz 至 10 Hz），因而 AD8657 特别适合那些需要最小误差源的应用。AD8657 的另一半用作输出放大器。

AD5542A 有两种工作模式：缓冲模式和非缓冲模式。使用何种工作模式由具体应用及其建立时间、负载阻抗、噪声等要求而定。可以选择输出缓冲器来优化直流精度或快速建立时间。DAC 的输出阻抗恒定（典型值 6.25 kΩ），且与码无关，但为了将增益误差降至最小，输出放大器的输入阻抗应尽可能高。输出放大器还应具有 1 MHz 或更高的 3 dB 带宽。输出放大器给系统增加了另一个时间常数，因此会延长输出的建立时间。运算放大器的带宽越宽，则 DAC 与放大器组合的有效建立时间越短。

图 1 所示的器件组合实现了最小的 PCB 面积。AD5542A 采用 3 mm × 3 mm、16 引脚 LFCSP 或 16 引脚 TSSOP 封装。AD5541A 采用 3 mm × 3 mm、10 引脚 LFCSP 或 10 引脚 MSOP 封装。

请注意，AD5541A 不包含基准电压和地上的开尔文检测线路、清零功能以及 R_{FB} 和 R_{INV} 电阻。

AD8657 和 ADR421 均采用 8 引脚 MSOP 封装。

测量结果表明，AD5542A/AD5541A 是高精度、低噪声电平设置应用的理想选择。在这一高精度、高性能、低功耗系统中，通过基准电压源 ADR421 和基准电压缓冲 AD8657 保持直流性能水平。测量直接在 V_{OUT} 上进行，没有连接可选的输出缓冲器。

电源电流测量

总电源电流和个别器件的电源电流利用精密电流表进行测量。

经过测量，该电路的总电源电流为 0.97 mA，而数据手册中的最大值小于 1.5 mA。

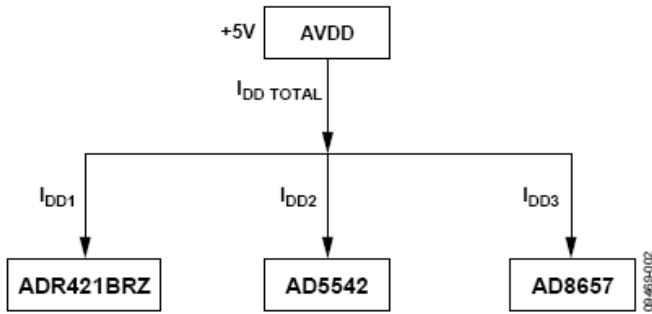


图2. 电源电流测量

表 1 列出了测量结果和数据手册值。整个系统功耗很低（小于 5 mW），但精度非常高。

	Data Sheet Spec (mA)	Measured (mA)
ADR421BRZ, I_{DD1}	0.39 (typ), 0.50 (max)	0.316
AD5542A, I_{DD2}	0.3 (typ), 1.21 (max)	0.472
AD8657, I_{DD3}	0.018 (typ), 0.022 (max)	0.192
$I_{DDTOTAL}$	0.708 (typ), 1.732 (max)	0.970

积分非线性和微分非线性测量

积分非线性(INL)误差指实际 DAC 传递函数与理想传递函数的偏差，用 LSB 表示。差分非线性(DNL)误差指实际步进大小与 1 LSB 的理想值之间的差异。该电路提供 16 位分辨率，DNL 和 INL 均为 ± 1 LSB。图 3 和图 4 分别显示了实测的 INL 和 DNL 性能。

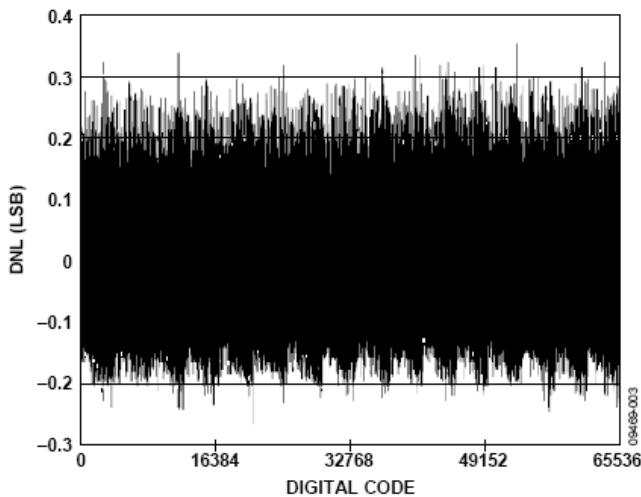


图3. 微分非线性(DNL)测量

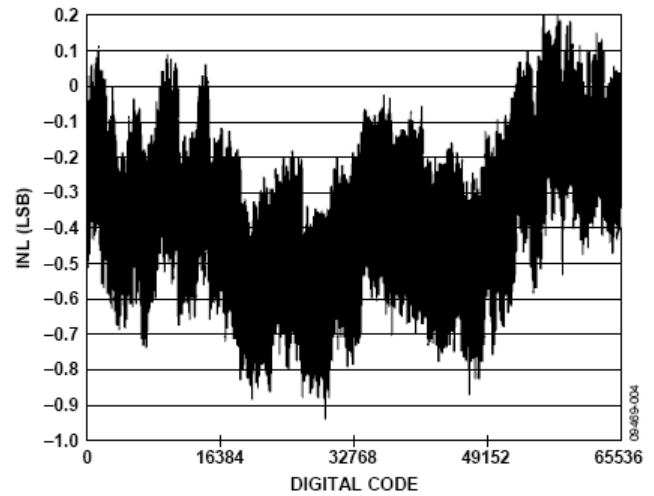


图4. 积分非线性(INL)测量

布局布线考虑

在任何注重精度的电路中，必须仔细考虑电路板上的电源和接地回路布局。包含本电路的印刷电路板(PCB)应将模拟部分与数字部分分离。如果该电路所在系统中有其它器件要求AGND至DGND连接，则只能在一个点上连接。该接地点应尽可能靠近AD5542A/AD5541A。本电路应该采用具有较大面积接地层和电源层的多层PCB。有关布局和接地的更多讨论，请参考教程MT-031。

AD5542A/AD5541A的电源应使用 10 μ F 和 0.1 μ F 电容进行旁路。这些电容应尽可能靠近该器件，0.1 μ F 电容最好正对着该器件。10 μ F 电容应为钽珠型或陶瓷型电容。0.1 μ F 电容必须具有低等效串联电阻(ESR)和低等效串联电感(ESL)，普通陶瓷型电容通常具有这些特性。针对内部逻辑开关引起的高频瞬态电流所导致的高频，该 0.1 μ F 电容可提供低阻抗接地路径。有关正确去耦技术的更多信息，请参考教程MT-101。

电源走线应尽可能宽，以提供低阻抗路径，并减小电源线路上的毛刺效应。时钟和其它快速开关的数字信号应通过数字地将其与电路板上的其它器件屏蔽开。

常见变化

针对要求更高精度的应用，应当考虑使用运算放大器AD8675。在 10 V时，它要求约 2.3 mA的电源电流。

零漂移运算放大器AD8628是另一款适合用作本电路中基准电压缓冲器的优秀放大器，它提供低失调电压和超低偏置电流，开环增益为 125 dB，要求约 1 mA的电源电流。

ADR421 (2.5 V)可以用ADR423 (3.00 V)或ADR424 (4.096 V)代替，二者均为低噪声基准电压源，与ADR421 同属一个基准电压源系列。超低噪声基准电压源ADR441和ADR431也是合适的替代器件，提供 2.5 V输出。AD8661是可选输出缓冲器的另一个不错的选择。它是一款CMOS运算放大器，采用了ADI公司的DigiTrim®专利技术，可实现低失调电压，并具有低输入偏置电流和宽信号带宽等特性，要求约 1 mA的电源电流。

AD8605或AD8655（均采用+2.7 V至+5.5 V单电源供电）也是可以考虑的选择，不过由于所有轨到轨运算放大器都有的输出级限制，在近 0 V输出时具有非线性（参见教程MT-035）。AD5542A的内置电阻 R_{FB} 和 R_{INV} ，可以配合外部运算放大器提供双极性电压输出。（更多信息请参考AD5542A数据手册。）

进一步阅读

Kester, Walt. 2005. *The Data Conversion Handbook*. Analog Devices. Chapters 3 and 7.
MT-015 Tutorial, *Basic DAC Architectures II: Binary DACs*. Analog Devices.
MT-016 Tutorial, *Basic DAC Architectures III: Segmented DACs*. Analog Devices.
MT-031 Tutorial, *Grounding Data Converters and Solving the Mystery of AGND and DGND*. Analog Devices.
MT-035 Tutorial, *Op Amp Inputs, Outputs, Single-Supply, and Rail-to-Rail Issues*. Analog Devices.
MT-101 Tutorial, *Decoupling Techniques*. Analog Devices.
Voltage Reference Wizard Design Tool.

数据手册和评估板

[AD5542A Data Sheet](#)
[AD5541A Data Sheet](#)
[AD5542A Evaluation Board](#)
[AD5541A Evaluation Board](#)
[ADR421 Data Sheet](#)
[AD8675 Data Sheet](#)
[OP1177 Data Sheet](#)

修订历史

3/11—Revision 0: Initial Version

(Continued from first page) Circuits from the Lab circuits are intended only for use with Analog Devices products and are the intellectual property of Analog Devices or its licensors. While you may use the Circuits from the Lab circuits in the design of your product, no other license is granted by implication or otherwise under any patents or other intellectual property by application or use of the Circuits from the Lab circuits. Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" are supplied "as is" and without warranties of any kind, express, implied, or statutory including, but not limited to, any implied warranty of merchantability, noninfringement or fitness for a particular purpose and no responsibility is assumed by Analog Devices for their use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from their use. Analog Devices reserves the right to change any Circuits from the Lab circuits at any time without notice but is under no obligation to do so.