

利用 ADI 公司产品进行电路设计  
放心运用这些配套产品迅速完成设计。  
欲获得更多信息和技术支持, 请拨打 4006-100-006 或  
访问 [www.analog.com/zh/circuits](http://www.analog.com/zh/circuits)。

连接/参考器件	
AD5542A/ AD5541A	16 位电压输出 nanoDAC®, 1 μs 建立时间
ADR421	2.5 V XFET®低噪声、精密基准电压源
AD8675	精密运算放大器
OP1177	精密运算放大器

## 如何利用 16 位电压输出 DAC AD5542A/AD5541A 实现高精度电平设置

### 电路功能与优势

利用电压输出 DAC 实现真正的 16 位性能不仅要求选择适当的 DAC, 而且要求选择适当的配套支持器件。针对精密 16 数模转换应用, 本电路使用 AD5542A/AD5541A 电压输出 DAC、ADR421 基准电压源以及用作基准电压缓冲的 AD8675 超低失调运算放大器, 提供了一款低风险解决方案。

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 AD8675 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。

需要时, 精密、低失调 OP1177 可以用作可选的输出缓冲器。这一器件组合可以提供业界先进的 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。

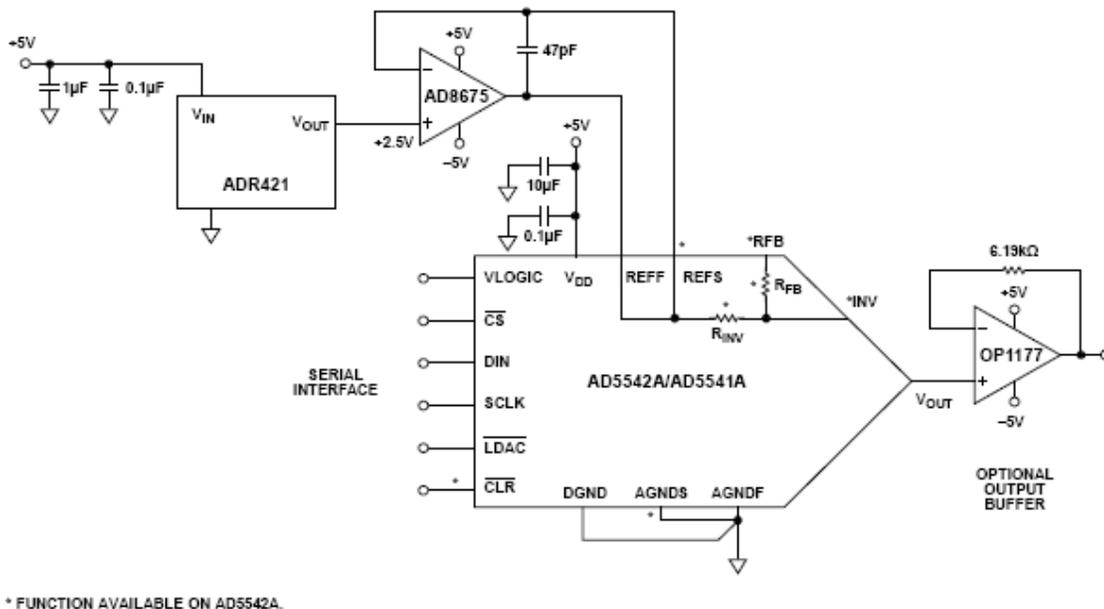


图 1. 精密 DAC 配置 (简化的原理示意图: 未显示去耦和所有连接)

Rev.0

“Circuits from the Lab” 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 “Circuit from the Lab”. (Continued on last page)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
Fax: 781.461.3113

©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 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）

室温下，此电路的实测零电平误差和增益误差分别为  $\pm 0.7$  LSB 和  $\pm 2$  LSB。在整个温度范围内（ $-40^\circ\text{C}$  至  $+85^\circ\text{C}$ ），零

电平误差为  $\pm 1.5$  LSB，增益误差为  $\pm 3$  LSB。这些测量结果是从 AD5542A 的  $V_{OUT}$  直接获得，没有连接输出缓冲器。

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 AD8675 运算放大器作为 AD5542A 的低阻抗输出基准电压缓冲。AD8675 具有 120 dB 的开环增益，是一款精密、36 V、 $2.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  运算放大器。其典型失调电压为  $10 \mu\text{V}$ ，典型温漂小于  $0.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，噪声为  $0.1 \mu\text{V}$  峰峰值（0 Hz 至 10 Hz），因而 AD8675 特别适合那些需要最小误差源的应用。

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。本电路所用的可选输出放大器为高精度 OP1177。DAC 的输出阻抗恒定（典型值  $6.25 \text{ k}\Omega$ ），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  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 、16 引脚 LFCSP 或 16 引脚 TSSOP 封装。AD5541A 采用  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 、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。

AD8675 和 ADR421 采用 8 引脚 MSOP 或 SOIC 封装，OP1177 采用 8 引脚 MSOP 封装。

可选输出运算放大器为采用单位增益配置的 OP1177，它包括一个与反相输入端串联的  $6.19 \text{ k}\Omega$  电阻。此电阻用于抵消偏置电流，并与 AD5542A 的输出电阻相匹配，后者约为  $6.25 \text{ k}\Omega \pm 20\%$ 。

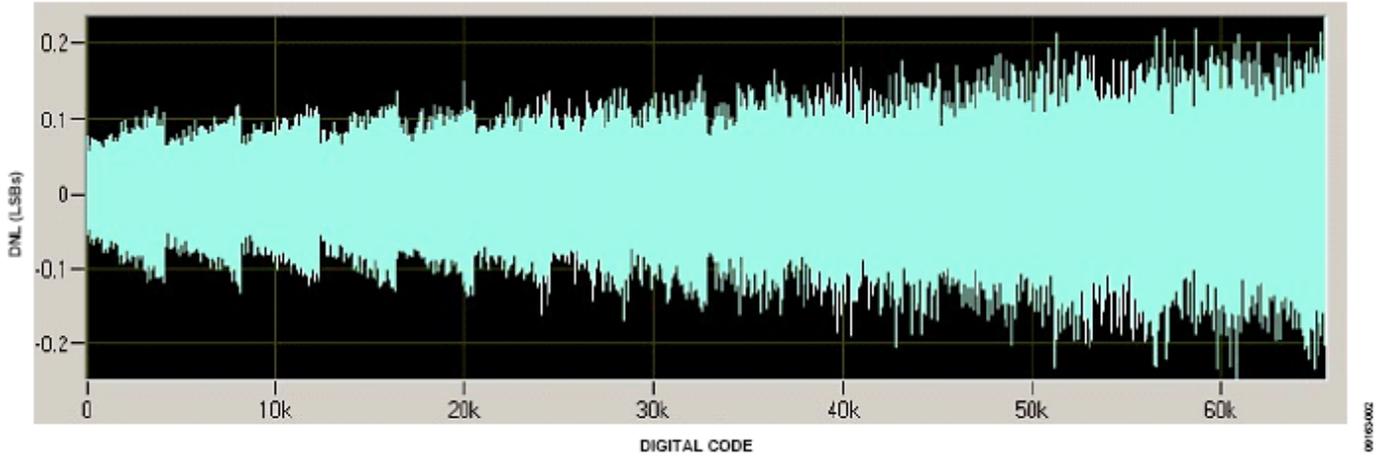


图2. 微分非线性

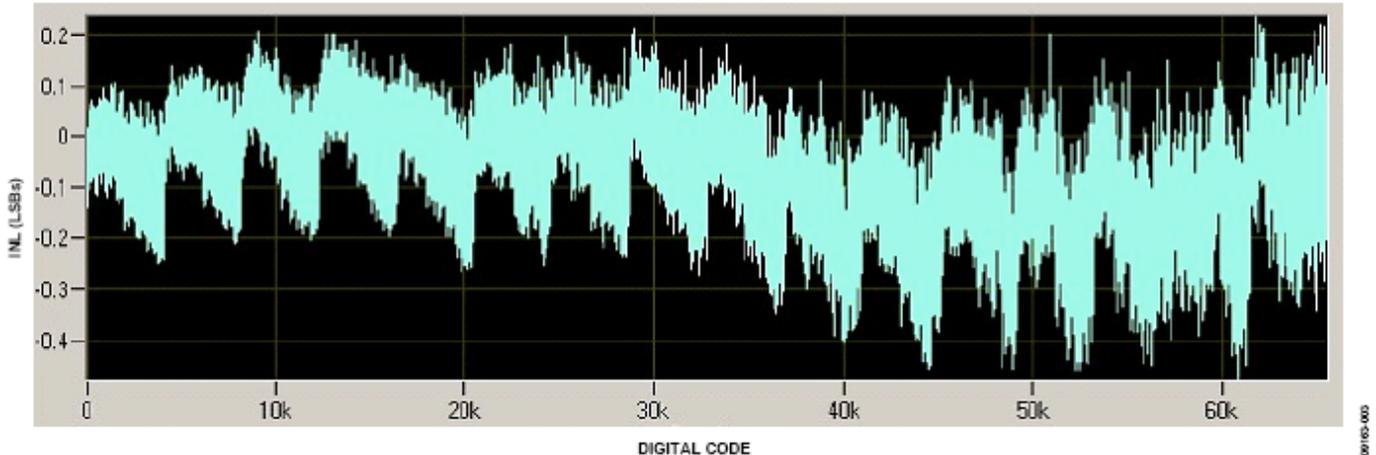


图3. 积分非线性

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、高性能系统中，通过基准电压源 ADR421 和基准电压缓冲 AD8675 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。

#### 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。图 1 所示电路提供了 16 位分辨率，DNL 和 INL 均为  $\pm 1$  LSB。图 2 和图 3 显示了该电路的 DNL 和 INL 性能。

#### 零电平误差和增益误差测量

室温下，零电平误差( $V_{ZSE}$ )和增益误差( $V_{GE}$ )的测量结果分别为  $\pm 0.7$  LSB 和  $\pm 2$  LSB。在整个温度范围内 ( $-40^{\circ}\text{C}$  至  $+85^{\circ}\text{C}$ )，零电平误差为  $\pm 1.5$  LSB，增益误差为  $\pm 3$  LSB。

#### 布局考虑

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  $\mu\text{F}$  和 0.1  $\mu\text{F}$  电容进行旁路。这些电容应尽可能靠近该器件，0.1  $\mu\text{F}$  电容最好正对着该器件右上方。10  $\mu\text{F}$  电容应为钽珠型或陶瓷型电容。0.1  $\mu\text{F}$  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瞬态电流所导致的高频，该 0.1  $\mu\text{F}$  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

[AD8628](#) 是另一款适合用作本电路中基准电压缓冲的优秀运算放大器，它提供低失调电压和超低偏置电流，开环增益为 125 dB。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。

[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  $R_{\text{FB}}$  和  $R_{\text{INV}}$ ，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

4/10—Revision 0: Initial Version

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.