

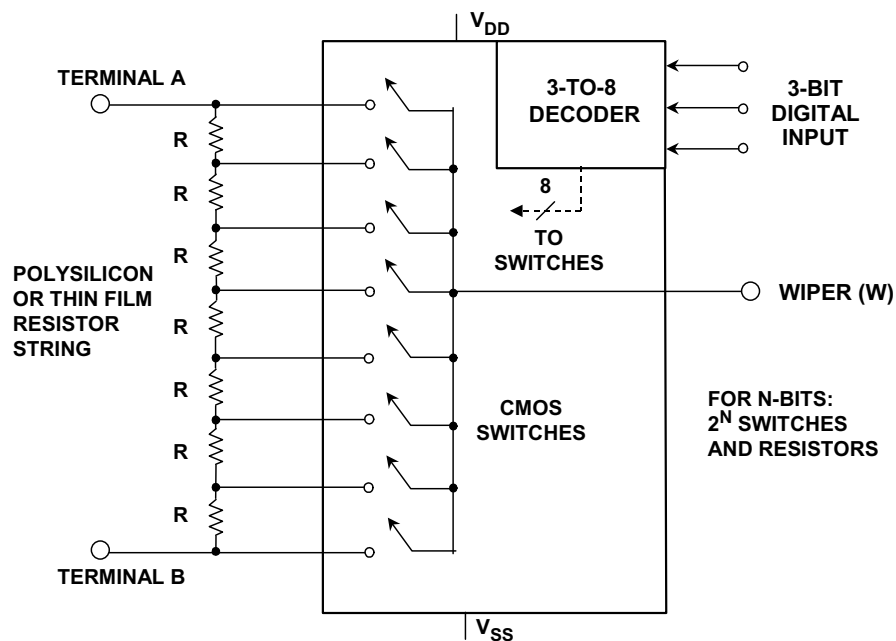
## 数字电位计

### 简介

机械电位计自电子学创立之初即已开始使用，为各种传感器、电源或者需要某类校准的任何器件的输出调节提供了一种便利的方法。时序、频率、对比度、亮度、增益和失调调节，如此等等，不一而足。然而，机械电位计始终面临诸多问题，其中包括物理尺寸、机械磨损、游标污染、电阻漂移，对振动、温度和湿度敏感；需要螺丝刀、布局不灵活等问题。

数字电位计避免了机械电位计存在的固有问题，是那些利用微控制器或另一个数字器件来提供必要控制信号的新设计的理想替代型产品。对于那些不使用任何片上微控制器的人，也提供手动控制的数字电位计。与机械电位计不同，在主动控制应用中，数字电位计可以实现动态控制。

数字电位计基于以前在[MT-014指南](#)中描述的CMOS“串DAC”架构，其基础示意图如图1所示。请注意，在正常串DAC配置中，A端和B端连接于基准电压之间，而W(游标)端则为DAC输出。串DAC配置中还多出一个R电阻，将A端与基准电压相连。



**图1：基于“串DAC”架构的3位CMOS数字电位计**

实际上，数字电位计配置利用了这样一个事实：CMOS开关的共模电压可以处于电源之间的任意位置——数字输入选择的开关只是将游标与电阻串上的相应抽头相连。A至B的相对极性可能是正，也可能是负。

电阻串表示端到端电位计电阻，传统的“DAC输出”成为数字电位计的游标。电阻可以是多晶硅(TC ~ 500 ppm/°C)或薄膜(TC ~ 35 ppm/°C)，取决于所需要的精度。

电阻串中的电阻数决定着电位计的分辨率或“步长”，目前，其范围为32(5位)至1024(10位)。可编程电阻的值为： $R_{WB}(D) = (D/2^N) \cdot R_{AB} + R_W$ ，且 $R_{WA}(D) = [(2^N - D)/2^N] \cdot R_{AB} + R_W$ 。其中， $R_{WB}$ 为W端与B端之间的电阻， $R_{WA}$ 为W端与A端之间的电阻，D为步长值的十进制等效值，N为位数， $R_{AB}$ 为额定电阻， $R_W$ 为游标电阻。

开关为CMOS传输门，可使任何给定步进与输出之间的导通电阻变化降至最低水平。A端和B端上的电压可以是任何值，只要处于电源电压 $V_{DD}$ 和 $V_{SS}$ 之间即可。

### 采用小型封装的现代数字电位计

图2展示了采用小型封装的三种数字电位计。虽然I<sup>2</sup>C<sup>®</sup>串行接口非常流行，但数字电位计同时提供SPI<sup>®</sup>、升/降计数器和手动增量/减量接口。

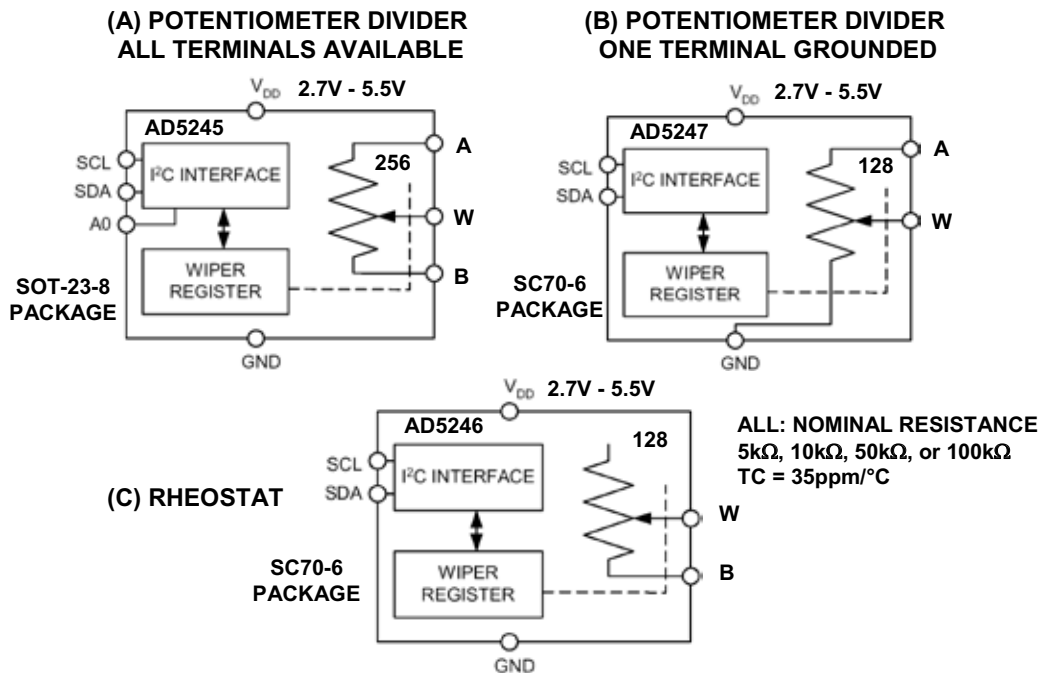


图2：采用小型封装的典型数字电位计示例

图2A中的AD5245采用8引脚SOT-23封装，有256个位(即8位)。A0引脚支持器件被唯一确定，因而可以在同一总线上放置两个器件。薄膜电阻串( $R_{AB}$ )提供5 k $\Omega$ 、10 k $\Omega$ 、50 k $\Omega$ 和100 k $\Omega$ 四种选项， $R_{AB}$ 温度系数为35 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。电位计的三个端全部可用。工作电源电压的范围为+2.7 V至+5.5 V。电源电流的最大值为8  $\mu\text{A}$ ，同时内置一个命令位，用于关断器件，使其进入零功耗状态。电压噪声约等于 $R_{AB}$ 的热噪声。(注意，一个1 k $\Omega$ 电阻在室温下的热噪声约为4 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )。

图2B所示AD5247与AD5245相似，只是它有128个位置(7位)，B端接地，并且采用的是SC70 6引脚封装。AD5247不具备A0功能。最后，图2C所示AD5246与AD5245类似，只是它是可变电阻器连接的，其W端和B端可供外部使用。

在单电位计(如AD5245、AD5246和AD5247)以外，数字电位计同时提供双路、三路、四路和十六路等版本。在单个封装中嵌入多个器件，这种做法可在组合电位计应用中实现1%的匹配性能，同时也有利于减少PC板空间需求。图3总结了现代数字电位计的一些特性。

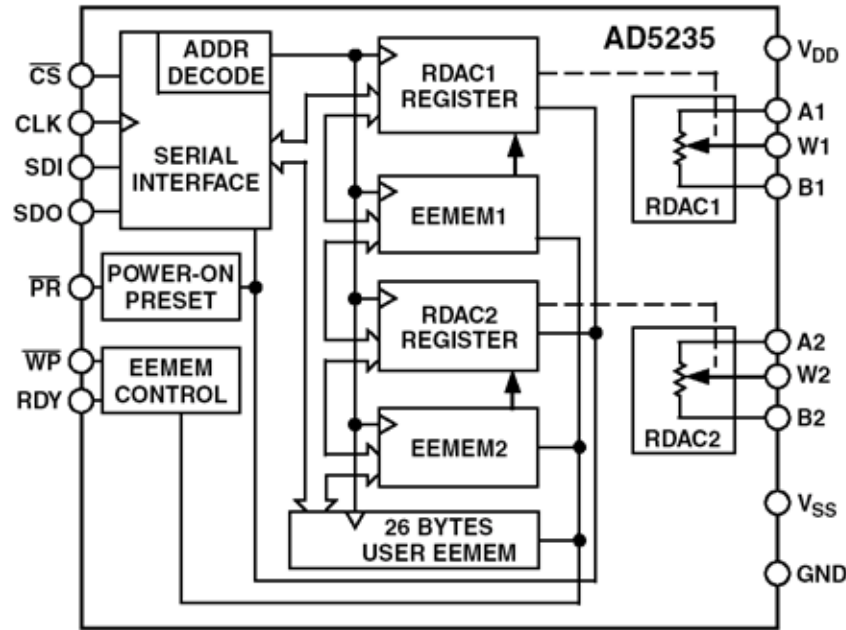
- ◆ Resolution (wiper steps): 32 (5-Bits) to 1024 (10-Bits)
- ◆ Nominal End-to-End Resistance: 1k $\Omega$  to 1M $\Omega$
- ◆ End-to-End Resistance Temperature Coefficient: 35ppm/ $^{\circ}\text{C}$  (Thin Film Resistor String), 500ppm/ $^{\circ}\text{C}$  (Polysilicon Resistor String)
- ◆ Number of Channels: 1, 2, 3, 4, 6
- ◆ Interface Data Control: SPI, I<sup>2</sup>C, Up/Down Counter Input, Increment/Decrement Input
- ◆ Terminal Voltage Range: +15V,  $\pm 15\text{V}$ , +30V, +3V,  $\pm 3\text{V}$ , +5V,  $\pm 5\text{V}$
- ◆ Memory Options:
  - Volatile (No Memory)
  - Nonvolatile E<sup>2</sup>MEM
  - One-Time Programmable (OTP) - One Fuse Array
  - Two-Time Programmable - Two Fuse Arrays

**图3: CMOS数字电位计的特性**

### 内置非易失性存储器的数字电位器

数字电位计(如AD5245、AD5246和AD5247)主要用在主动控制应用中，因为它们没有非易失性存储器。因此，如果移除电源，则设置会丢失。然而，多数易失性数字电位计有一种上电预置功能，上电时强制使器件进入中间电平码。

显然，市场上需要能够在电源移除和重新加电后保持设置不变的数字电位计。这就要求使用非易失性片内存储器来存储目标设置。[AD5235](#)是一款双通道10位数字电位计，以片内E<sup>2</sup>MEM存储目标设置(参考文献4)。功能框图如图4所示。



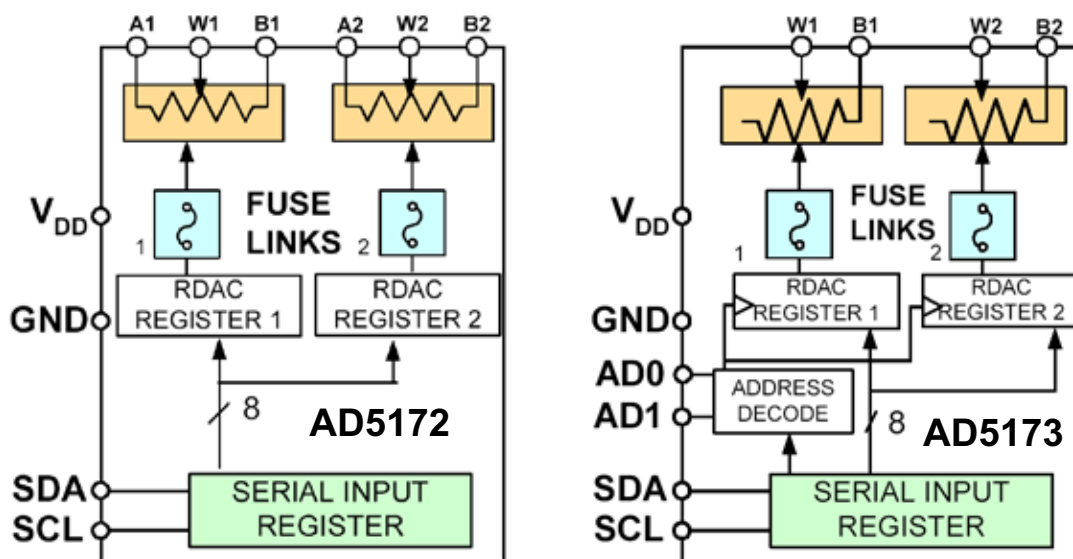
**图4: AD5235 非易失性存储器、双通道1024位数字电位计**

这些器件可实现与机械电位计相同的电子调整功能，而且具有增强的分辨率、固态可靠性和出色的低温度系数性能。AD5235通过一个标准串行接口可实现多种编程，支持16种工作模式和调整模式，包括暂存区编程、存储器存储和检索、递增/递减、对数抽头调整、游标设置回读以及用户自定义的额外E<sup>2</sup>MEM。AD5235的另一主要特性是，实际电阻容差以0.1%的精度存储于E<sup>2</sup>MEM。因而可以获知实际的端到端电阻，这对精密应用中的校准和容差匹配具有重要意义。新的E<sup>2</sup>MEM系列数字电位计([AD5251](#)/[AD5252](#)/[AD5253](#)/[AD5254](#))同样提供这种功能。在暂存区编程模式下，可以直接将具体设置编程至RDAC寄存器，使其设置W-A端和W-B端之间的电阻。RDAC寄存器也可用以前存储于E<sup>2</sup>MEM寄存器中的一个值来加载。E<sup>2</sup>MEM中的值可以更改或保护。

当更改RDAC寄存器时，可将新设置的值保存至E<sup>2</sup>MEM。以便在系统加电时自动传送到RDAC寄存器。E<sup>2</sup>MEM也可以通过直接编程和外部预置引脚控制来检索。线性步进递增和递减命令使RDAC寄存器中的设置向上或向下变化，每次一步。对于游标设置中的对数变化，则通过一个左/右位移命令按±6 dB的步进来调整电平。AD5235采用薄型TSSOP-16封装。所有器件的保证工作温度范围均为-40°C至+85°C扩展工业温度范围。

## 一次性可编程(OTP)数字电位计

[AD5172/AD5173](#)是双通道256位、一次性可编程(OTP)数字电位计，采用熔丝连接技术来实现在存储器中保持电阻设置的功能(参考文献5)。功能框图如图5所示。请注意，AD5172配置为一个三端电位计，而AD5173则采用变阻器引脚排列。AD5172/AD5173提供2.5 k $\Omega$ 、10 k $\Omega$ 、50 k $\Omega$ 和100 k $\Omega$ 四种版本。电阻串的温度系数为35 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ，电源电压范围为2.7 V至5.5 V。



**图5: AD5172/AD5173 256位、一次性可编程双通道I<sup>2</sup>C数字电位计**

对于那些不需要在存储器中对数字电位计设置进行一次以上编程(即一次性设置)的用户来说，OTP比E<sup>2</sup>MEM方法更具成本优势。这些器件可实现与多数机械调整器和可变电阻器相同的电子调整功能，而且具有增强的分辨率、固态可靠性和更好的温度系数性能。

AD5172/AD5173通过一种2线I<sup>2</sup>C兼容数字控制来编程。它们允许在永久性设置电阻值之前进行无限次调整。在OTP激活期间，将在确定最终值之后发送一个永久熔断熔丝命令；结果将游标位置固定于给定的设置(类似于将环氧树脂涂在机械式调整器上)。与同系列的其他OTP数字电位计不同，AD5172/AD5173拥有一个独特的临时OTP覆盖功能，允许在必要时重新进行调整，在接下来的上电条件期间将恢复OTP设置。该功能允许用户将AD5172/AD5173以用户自定义预设用于主动控制应用。

为了验证永久性编程是否成功，ADI对OTP验证机制进行了专门设计，结果，可在读取模式下从两个验证位识别熔丝状态。对于在工厂中编程AD5172/AD5173的应用来说，ADI提供专门的器件编程软件，支持Windows® 95至XP®的全部平台，包括Windows NT®。该软件应用实际上消除了采用外部I<sup>2</sup>C控制器或主机处理器的必要，从而极大地缩短了用户的开发时间。AD5172/AD5173提供评估套件，其中包括可以针对工厂编程应用转换的软件、连接器和线缆。AD5172/AD5173采用MSOP-10封装。所有器件的保证工作温度范围均为-40°C至+125°C汽车应用温度范围。在独有的OTP功能以外，AD5172/AD5173因支持可编程预设并且具有出色的温度稳定性和小尺寸等优势，因而非常适合其他通用数字电位计应用。

[AD5170](#)(参考文献6)是一款可二次编程的8位数字电位计，功能框图如图6所示。请注意，提供第二熔丝阵列，以支持“二次”编程能力。与AD5172/AD5173相似，在进行永久性设置之前可以无限次编程。AD5170的电气特性类似于AD5172/AD5173。

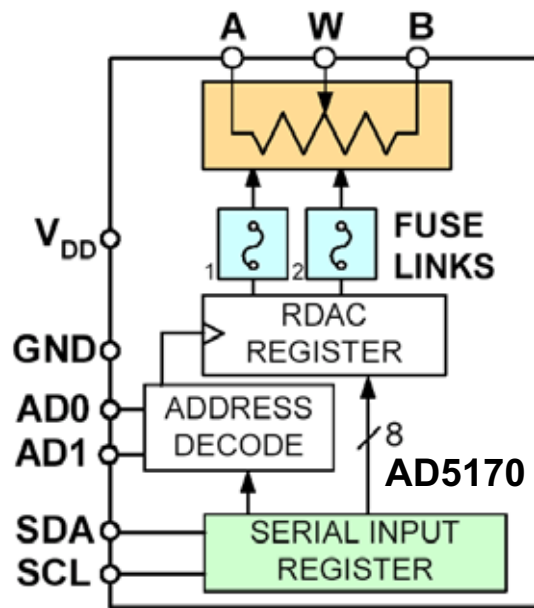


图6: AD5170 256位、可二次编程的I<sup>2</sup>C数字电位计



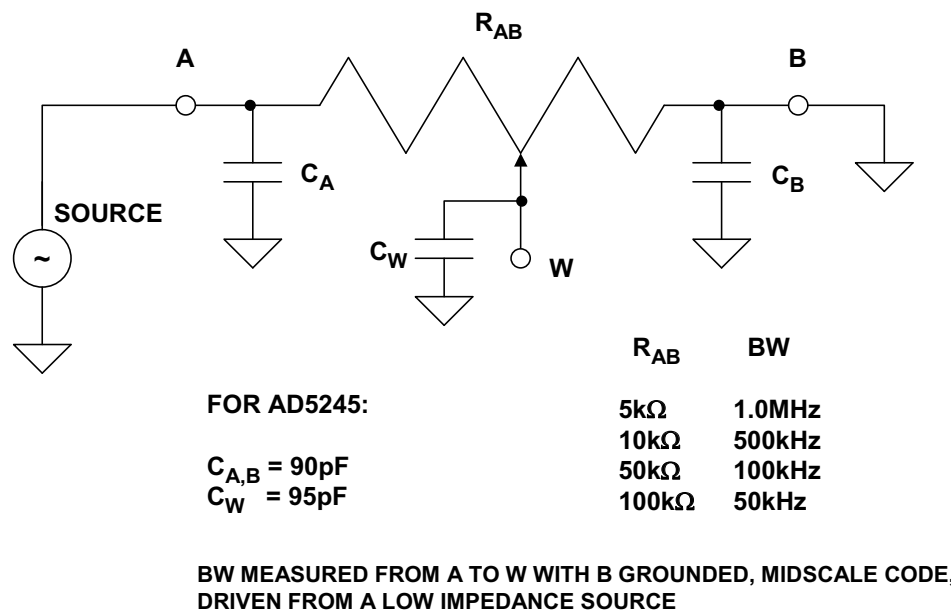
## 精度达1%的数字电位计

[AD5291/AD5292](#)均为单通道、256/1024位数字电位计<sup>1</sup>，端到端电阻容差误差小于1%，额定温度系数为35 ppm/°C，并具有20次可编程存储器。这些器件能够在高电压下工作；同时支持±10.5 V至±15 V双电源和+21 V至+30 V单电源。

AD5291/AD5292的游标设置可通过SPI数字接口控制。将电阻值编程写入20次可编程存储器之前，可进行无限次调整。这些器件不需要任何外部电压源来帮助熔断熔丝，并提供20次永久编程的机会。在20-TP激活期间，一个永久熔断熔丝指令会将游标位置固定(类似于将环氧树脂涂在机械式调整器上)。

## 数字电位计的交流考虑因素

数字电位计可用于交流应用中，但需要考虑内部电容产生的带宽限制问题。图7所示为一种数字电位计的交流模型，其中，电容分别表示为 $C_A$ 、 $C_B$ 和 $C_W$ 。



**图7：数字电位计带宽模型**

数字电位计的带宽取决于配置。受可变电阻影响，它同时具有动态性。例如，如果A端为输入，B端接地，W端为输出，则可通过公式 $BW = 1/[2\pi(R_{WB}||R_{WA})\cdot C_W]$ 求出带宽的近似值。最低带宽发生于中间电平时，此时，这种配置下的等效电阻为最大值。图中展示了AD5245的典型值，以及在中间电平下测得的各种电阻对应的带宽。该简化模型可在SPICE仿真中用于预测电路性能。比如，在把数字电位计用作运算放大器反馈网络的一部分时。在直接把数字电位计置于信号路径时需要考虑的另一个问题是，其电阻为所施加电压的函数且略有非线性特征。这种效应会导致少量失真。

例如，在中间电平下把一个1 V rms、1 kHz的信号应用于上述配置时，AD5245的THD为0.05%。对于数字电位计在交流应用中的具体用例，请参见本指南末尾。

## 应用范例

像运算放大器一样，数字电位计是许多电路的构件模块。由于数字电位计采用数字控制模式，因而除了基本的调整或校准应用之外，还可用在主动控制应用之中。例如，数字电位计可以用在可编程电源之中，如图8A所示。典型的可调低压差稳压器(如anyCAP系列)有一个FB引脚，应用电阻分压器后会产生可变输出电压。如图所示，R1和R2分别为反馈电阻和输入电阻。FB电路有一个内置的同相放大器，可使1.2 V带隙基准电压源增益至目标输出电压。

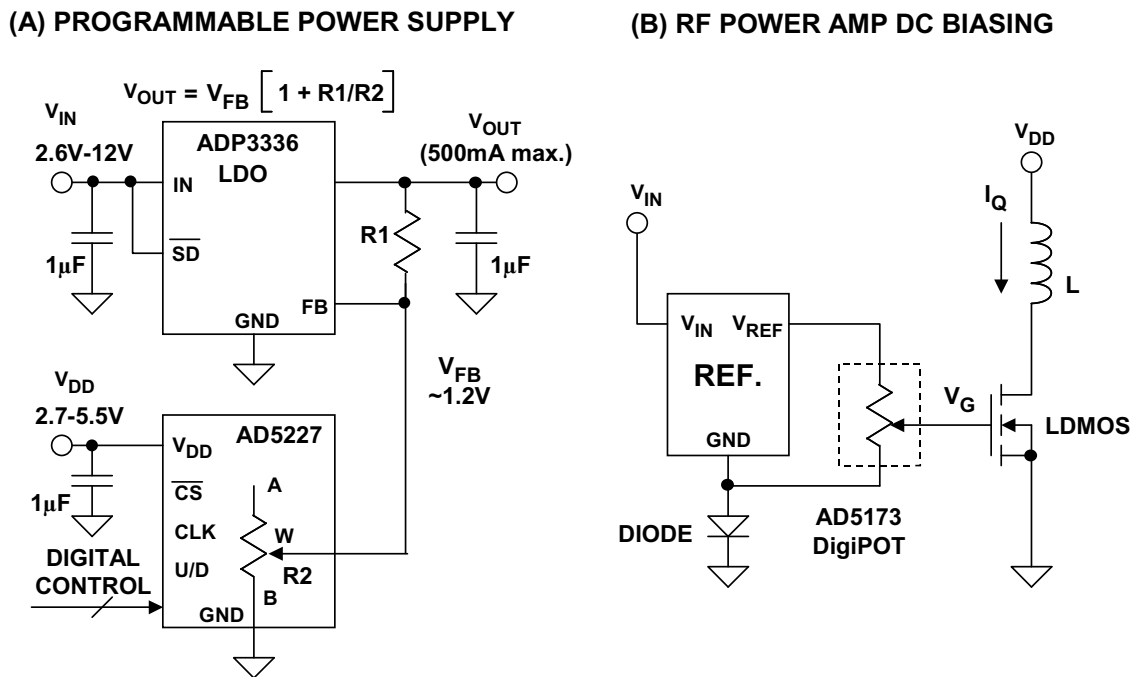


图8：数字电位计的两种电路应用

类似地，电子设备制造商在电源中使用数字电位计，在可靠性测试中，调整电源电压使其覆盖所有电源电压条件。这种电压余量微调方式会加快老化过程，从而缩短上市周期。



由于数字电位计拥有最佳的性价比优势，因而在许多应用中，表现出了取代传统DAC之势。例如，在无线基站中，射频功率放大器在生产过程中，其最佳阈值电压即存在较大差异。这种差异会影响发射的信号的非线性度和功效。如果稳压效果较差的放大器输出过多功率，结果也会干扰无线网络中的邻近单元。尽管DAC广泛用于偏置射频功率放大器，但是，许多用户发现，数字电位计更适合这类应用，因为后者采用非易失性存储器，有利于简化设计。如图8B所示，其中利用一次可编程数字电位计来校准射频功率放大器的直流偏置点，而校准则用工厂软件进行编程，无需使用任何外部控制器。请注意，电路中添加了二极管，以补偿放大器的温度系数。

## 总结

与机械电位计和微调筒<sup>®</sup>相比，数字电位计具有许多显著优势，因而在现代系统中得到了广泛应用。凭借出色的可靠性、灵活性和易用性，数字电位计成为了传统电位计的首选替代品。数字电位计也可用作许多主动控制应用中的可编程构建模块。

实际上，在现代电子系统中，数字电位计的应用潜力是无穷的——只需想想机械电位计和微调筒的诸多传统应用即可认识到这一点。若要详细了解这些器件对于设计的好处，请参阅参考文献1-13。以下总结少数几种应用：

- 通用应用：传感器校准、系统增益和失调调整、可编程增益放大器、可编程滤波器、可编程给定值设定、传统数模转换器、电压电流转换器、线路阻抗匹配。
- 计算机和网络设备：可编程电源、电源微调、电池充电器给定值设定、温度控制给定值设定。
- 液晶显示器：背光、对比度和亮度调整；液晶面板共模电压调整；可编程伽玛校正；液晶投影仪基准电压发生器。
- 消费电子应用：PDA背光调整、电子音量控制。
- 射频通信：射频功率放大器偏置、DDS/PLL幅度调整、VCXO频率调谐、变容二极管偏置、对数放大器斜率和截距调整、正交解调器增益和相位调整、RFID读卡器校准。
- 汽车电子：发动机控制装置给定值设定、传感器校准、执行器控制、仪器仪表控制、导航/娱乐显示调整。
- 工业和仪器仪表：系统校准、浮动基准电压源DAC、可编程4至20 mA电流发射器。

- 光学通信：激光偏置电流调整、激光调制电流调整、光接收器信号调理、光衰减器、波长控制器。

### 参考文献：

1. Walt Heinzer, "[Design Circuits with Digitally Controllable Variable Resistors.](#)" *Analog Dialogue*, Vol 29, No. 1, 1995. <http://www.analog.com>.
2. Hank Zumbahlen, "Tack a Log Taper onto a Digital Potentiometer," *EDN*, January 20, 2000.
3. Mary McCarthy, "Digital Potentiometers Vary Amplitude In DDS Devices," *Electronic Design*, Ideas for Design, May 29, 2000.
4. Alan Li, "[Versatile Programmable Amplifiers Use Digital Potentiometers with Nonvolatile Memory.](#)" *Analog Dialogue*, Vol. 35, No. 3, June-July, 2001.
5. Reza Moghimi, "Difference Amplifier Uses Digital Potentiometers ," *EDN*, May 30, 2002.
6. Mark Malaeb, "[Single-Chip Digitally Controlled Data-Acquisition as Core of Reliable DWDM Communication Systems.](#)" *Analog Dialogue*, Vol. 36, No. 5, September-October, 2002.
7. Peter Khairolomour, "Rotary Encoder Mates with Digital Potentiometer," *EDN*, Design Idea, March 6, 2003.
8. Alan Li, "Versatile Programmable Amplifiers Using Digital Potentiometers with Nonvolatile Memory," [Application Note AN-579](#), Analog Devices.
9. Alan Li, "Programmable Oscillator Uses Digital Potentiometers," [Application Note AN-580](#), Analog Devices.
10. Alan Li, "Resolution Enhancements of Digital Potentiometers with Multiple Devices," [Application Note AN-582](#), Analog Devices.
11. Alan Li, "AD5232 Programmable Oscillator Using Digital Potentiometers, " [Application Note AN-585](#), Analog Devices.
12. Alan Li, " ADN2850 Evaluation Kit User Manual," [Application Note AN-628](#), Analog Devices.
13. Walt Kester, [Analog-Digital Conversion](#), Analog Devices, 2004, ISBN 0-916550-27-3, Chapter 8. Also available as [The Data Conversion Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7841-0, Chapter 8.

Copyright 2009, Analog Devices, Inc. All rights reserved. Analog Devices assumes no responsibility for customer product design or the use or application of customers' products or for any infringements of patents or rights of others which may result from Analog Devices assistance. All trademarks and logos are property of their respective holders. Information furnished by Analog Devices applications and development tools engineers is believed to be accurate and reliable, however no responsibility is assumed by Analog Devices regarding technical accuracy and topicality of the content provided in Analog Devices Tutorials.