

解决方案

利用紧凑型低功耗精密电流源信号链实现更智能的设计

随着光通信、激光雷达、生物成像及工业精密测控技术的快速发展，各类精密电子系统对电流驱动电路的精度、体积、功耗与稳定性提出了更高要求。传统电流源多采用运放、DAC、采样电阻等分立器件搭建，存在电路结构复杂、PCB面积大、功耗高、温漂误差大、一致性差等问题，难以满足现代设备微型化、低功耗、高精度的智能化设计需求。

集成式精密电流源(IDAC)信号链凭借高集成度、低噪声、低温漂、可灵活扩展等优势，有效克服了分立电路的诸多不足，能够在极小尺寸内实现高精度、可编程的稳定电流输出，广泛用于激光驱动、MEMS器件控制、伺服阀控制等精密场景。

本文讲述了IDAC的基础知识、应用场景及性能优化方式，涉及的内容包括在设计中优化其性能：多通道IDAC可通过并联拓展输出电流、采用粗精调组合缩小调节步长、动态功率控制、使用外部基准源改善热漂移、通过滤波优化来降低噪声、提升电源抑制能力、依托H桥拓扑实现双向电流。器件兼容单电源供电，负电源方案可进一步降低损耗。借助SPI菊花链总线，可灵活扩展通道规模，适配各类高精度、高密度电流驱动系统。

IDAC的基本概念及其应用场景

IDAC为精密可编程电流源，也称为精密电流输出型数模转换器，它集成了完整的“数字比特到模拟电流”信号链，可保证稳定、可靠的电流输出指标。IDAC具有极高的输出阻抗，支持多通道可直接并联使用，是工程应用中极具实用价值的关键特性。

在IDAC出现之前，精密可编程电流源普遍采用分立元件实现，图1展示了两者的尺寸对比。电流输出的精度与漂移特性完全取决于所选用的DAC、运算放大器及采样电阻。单通道分立电流源面积约为20mm²，而8通道16位集成IDAC (AD5710R)面积仅4mm²，体积缩减至分立方案的1/5。IDAC实现了完整信号链的高度集成，使输出电流精度得到有效保障。

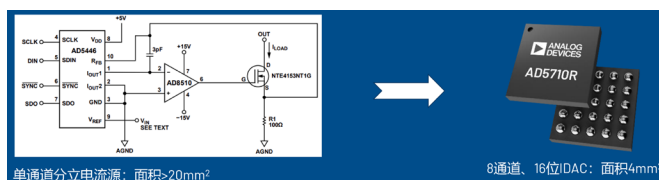


图1：分立及集成方案的尺寸对比

产品应用

IDAC主要面向四大核心场景：光纤网络链路、车载雷达(LiDAR)、电磁MEMS反射镜控制、电磁伺服阀控制系统；

1. 光纤网络连接：可调谐激光器、偏置半导体光学放大器、可变光衰减器、相位控制加热器、调制器、MZM相位、服务器设备
2. 汽车LiDAR：偏置激光器、半导体光学放大器、电磁MEMS镜
3. 电磁MEMS镜像控制：非汽车应用LiDAR、汽车平视显示器、微型投影仪、3D打印、生物成像
4. 电磁伺服阀：液压功率控制、仿真器、伺服液压过程控制、工业控制

在调频连续波激光雷达中，IDAC可提供大电流为激光器偏置，并精准控制电磁MEMS镜。采用电流源驱动MEMS器件，可避免线圈电阻随温度变化导致输出电流波动，从而防止MEMS镜发生不必要的偏移。这类应用的主要挑战在于，在保证高精度的同时，实现低噪声、高电源抑制比与低功耗。此外，系统还需具备完善的诊断与监控功能，确保关键器件工作在安全区间。

在光通信与光子系统中，尤其是可调谐波长激光器应用中，IDAC需要为激光器提供高达600mA的精密偏置电流，并为其多路通道提供100mA及以下的驱动电流。IDAC在光通信领域面临的主要挑战包括：

- 1. 低噪声：驱动器噪声直接影响系统整体精度；
- 2. 高效率：在提供高精度电流的同时，尽可能降低片内功耗；
- 3. 低毛刺：输出更新毛刺必须极低，避免引入激光器相位噪声；
- 4. 微型化：在超小封装内集成多路通道。

IDAC相对于分立设计的优势

相较于分立方案，IDAC在精度、功耗与小型化方面具备显著优势，图2明晰了方案特点。以AD5710R为例，该器件充分满足高端应用需求：

- 1. 精度可靠：AD5710R具备16位分辨率，DNL为±1LSB，保证16位单调性；
- 2. 功耗优化：专为低功耗设计，单通道最大压降仅250mV；
- 3. 超小解决方案尺寸：在2mm×2mm封装内集成8个通道，是目前业内尺寸最小的8通道IDAC

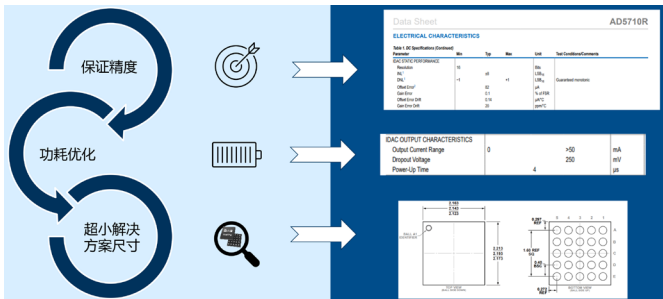


图2：IDAC相对于分立设计的优势

最新“比特到电流源”解决方案

AD5710R与AD5706R是两款新一代高性能“比特到电流”解决方案：

AD5710R（图3）为8通道IDAC，单通道额定输出50mA，转换精度可达16位；芯片内置温漂3ppm/°C的参考基准，最大压降仅250mV。8路通道并联可输出400mA总电流，可通过SPI指令切换为电压源，封装尺寸仅为2.1mm×2.2mm。

AD5706R（图4）是一款4通道IDAC，每个通道可配置为50mA、150mA、200mA、300mA等级，此器件同样具备16位高精度与3ppm/°C片内基准，最大压降300mV；四路并联可实现1.2A大电流输出，采用2.5mm×2.5mm封装。

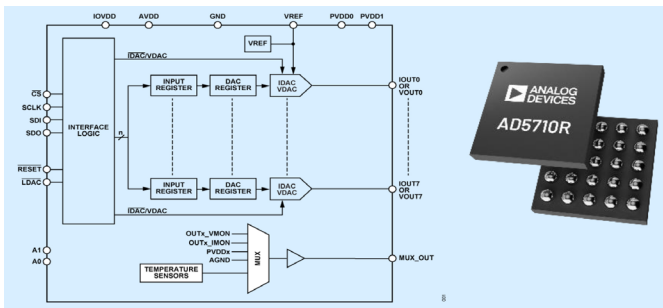


图3：AD5710R

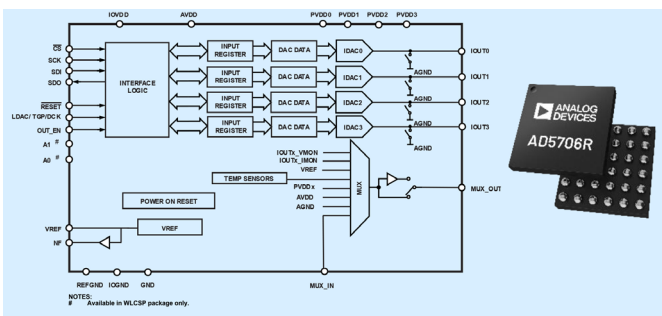


图4：AD5706R

两款器件均配备MUX监测输出，支持系统级诊断与状态监控。

优化电流源性能

针对IDAC的性能优化问题，本文将梳理核心关键技术与优化策略，最大化发挥器件性能优势。下文将从九个维度展开详细阐述：

1. 更大电流和更高分辨率

实现更大电流：多数IDAC单通道最大输出电流为300mA，如需更大驱动电流，可采用多通道并联方案，输出电流随通道数量增加而提高。如图5所示，4路300mA通道并联即可输出1.2A电流，该方式适用于全系列IDAC产品。IDAC产品系列的电压落在1.65V~32V范围，便可灵活用于宽范围的负载阻抗设计。借助多组DAC寄存器配置，各路通道能够同步刷新，实现输出瞬时更新。

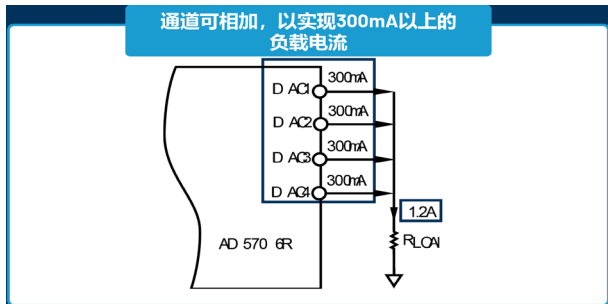


图5：并联通道增大电流

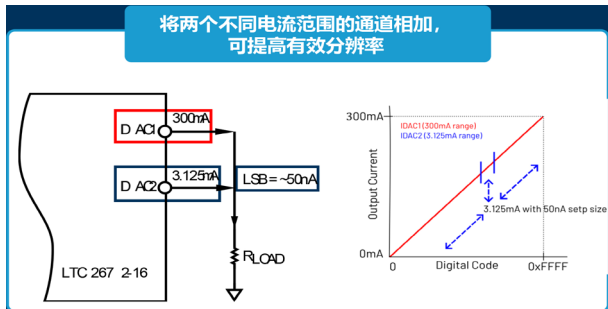


图6：提高分辨率

实现更高分辨率：部分应用的设计限制因素并非最大输出电流，而是电流调节步长，因此需要优化输出分辨率。可采用大小量程通道组合方案，将高量程通道与低量程通道相结合，在同一输出端口实现粗调和精调能力。

以LTC2672为例，如图6所示，一路通道设为300mA大量程，另一路配置3.125mA小量程，最终精调步长可达50nA、粗调步长为4.6μA。该方案可在300mA全量程范围内任意切入50nA精细档位，兼顾大电流输出能力与超高调节分辨率。

2. 使用负电源AVEE大幅降低功耗

该方案通过引入负电源AVEE降低器件内部功耗，从而减少器件发热，从而优化电气性能。应用于AD5770R时，需控制PVDD与AVEE压差在2.5V~5.5V，既可保障输出正常工作，又能实现更低的功耗。

通过图7和图8的对比可以更清晰地说明这一设计思路：图7为未采用AVEE的方案(AVEE=0V/GND)，在10Ω负载、100mA输出电流条件下，单通道功耗约为150mW，6通道总功耗约900mW。如此高的功耗会使芯片自热升温约27℃，进而导致热漂移增大，系统精度下降。

图8在相同负载与输出电流下，采用-2V AVEE并将PVDD配置为1.45V。此时单通道功耗降至约45mW，6通道总功耗仅270mW，功耗降低约70%，芯片自热升温也降至约8℃，热漂移显著减小，系统整体性能大幅提升。

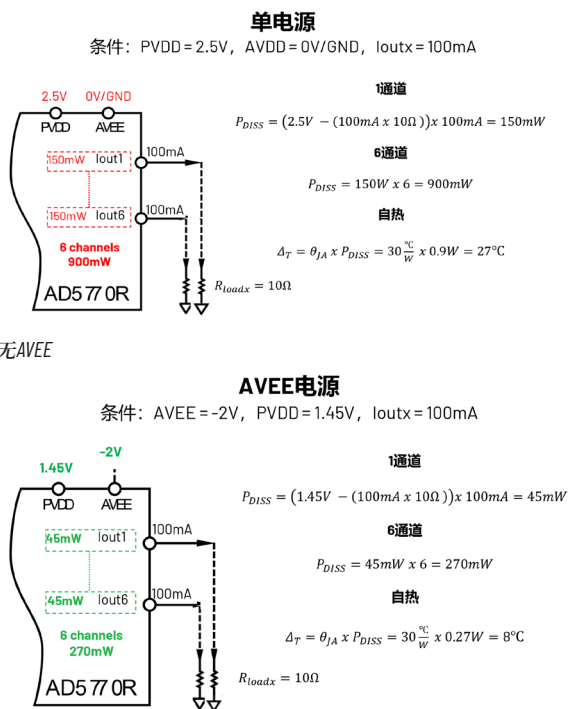


图7: 无AVEE

图8: 使用AVEE

3. IDAC噪声与PSRR优化

多路IDAC通道并联可抑制输出噪声，各通道高频噪声相互独立无关联，总噪声可通过和方根算法计算，如图9所示。在输出端外接电容能够进一步降低高频噪声。交流电源抑制比(AC PSRR)是这类应用中的另一个关键参数。

受限于芯片小型化封装，片内高频滤波能力有限，在各通道输出增设外接电容，可有效提升高频段AC PSRR性能，如图10所示。

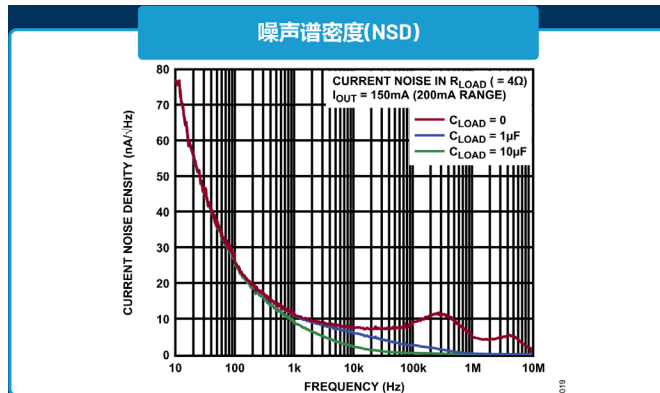


图9: 噪声密度

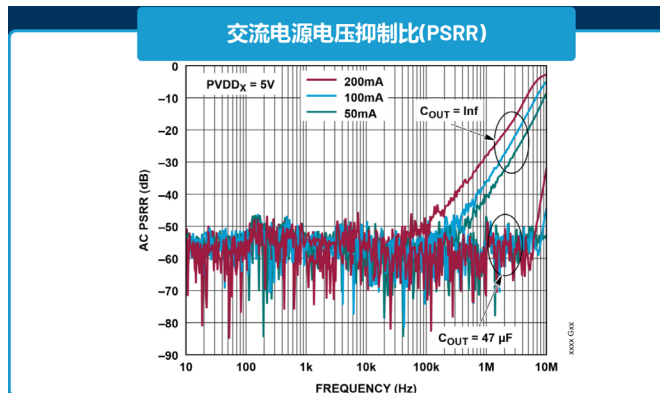


图10: 增加电容负载

4. 外部基准改善温漂

在完成提高电流容量、功耗优化及降低噪声外后，热漂移仍是制约输出精度的关键挑战。IDAC大电流输出工况下芯片发热量大，热漂问题愈发突出。AD5770R集成片内基准，应用便捷，但内置基准典型温漂达15ppm/℃，当器件因高电流输出而升温时，或者系统中的环境温度改变时，这类基准源的漂移会直接转化为输出电流的增益误差，这是影响精度的主要原因。

可外接LTC6655、ADR4525等精密基准器件改善性能，其最大温漂为4ppm/℃，仅为内置基准的1/4。其中LTC6655在-40℃~125℃工作区间内最高温漂低至2ppm/℃，该产品分不同规格，设计者可结合实际需求选型配置。

AD5770R采用内部基准源时，300mA输出电流受温漂影响会产生0.45mA误差；更换LTC6655外置基准后，同等工况下最大误差降至0.06mA，误差优化7倍，图11给出示例。以上误差统计未计入器件手册标称的增益温漂。

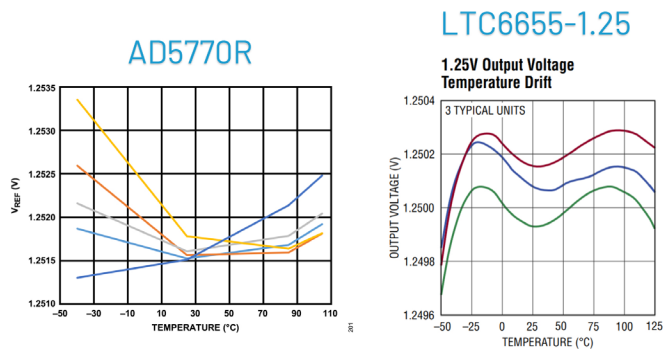


图11：外部基准改善温漂

5. 动态功率控制(DPC)

IDAC驱动负载工作时，电源电压PVDD与负载端电压的压差会使IDAC输出驱动产生额外功耗，并可能造成芯片温度过高，进而影响可靠性并降低系统整体效率。为应对这一挑战，可采用动态功率控制方案，如图11所示，系统以ADI精密微控制器为主控，AC-DC开关电源驱动AD5770R。所有IDAC都具备的监控复用(MUX)功能，借助此功能可以测量输出电流与负载电压的相对值以及温度指标。

依托MUX采集的电流、电压数据，查阅器件手册获取对应压降参数，动态下调每个IDAC通道的PVDD至器件可靠工作的最低电压。该方案适用于全系列IDAC，在输出电压满足规范的前提下最大限度降低芯片功耗与发热。图12对比了启用与关闭动态功率控制的芯片功耗差异，该方法可根据系统需求选择周期性调节或实时调控。

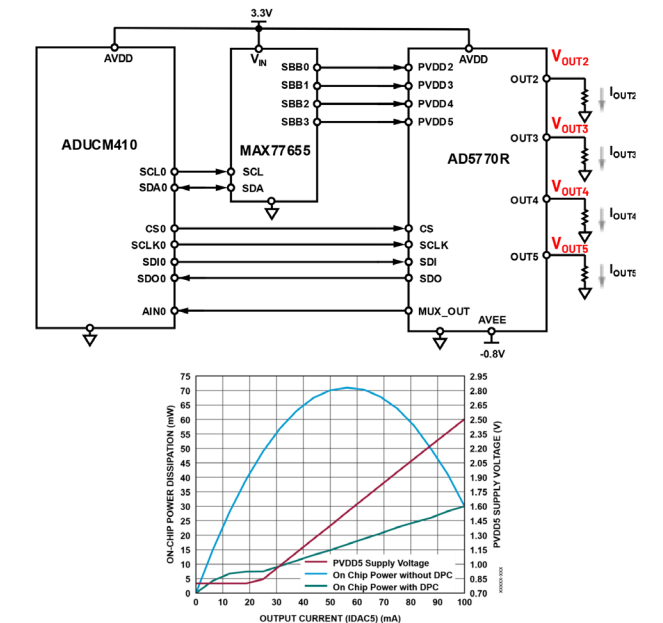


图12：动态功率控制

6. 双向电流和感性负载

多数IDAC仅支持单向灌拉电流输出，某些应用（比如MEMS执行器或SEM/TEM/电机驱动器）需要双极性精密电流驱动，以使负载能够沿两个方向移动。解决方案是借助H桥拓扑并结合模拟开关实现双向电流输出。选用ADG2410、ADG6412由H桥路由，通过H桥切换负载电压极性，系统完成单极性IDAC模拟双向电流。该方案在由负载力驱动的MEMS执行器且需要双向电流的应用中非常有用，能够在3.3V、5V低电压条件下实现较大位移。图13给出使用阻性负载的正弦、三角波电流，负载可流过正负双向电流，验证了采用了单极性IDAC的H桥配置实现双向输出的可行性。

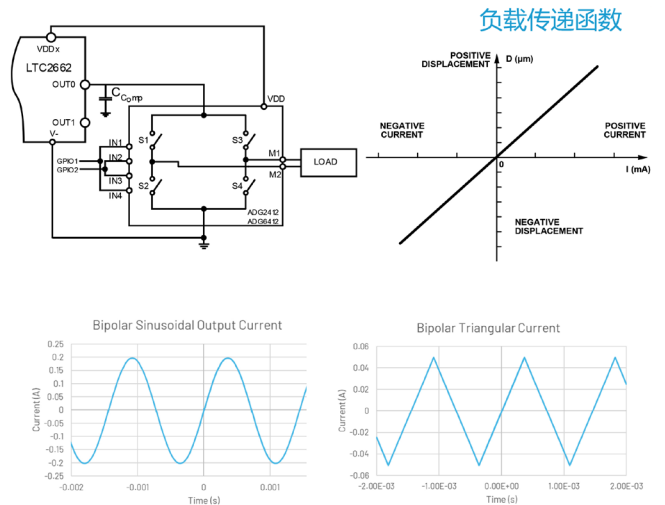


图13：双向电流示例

7. 单电源供电

AD5770R、LTC2672等IDAC产品采用单电源供电，如图14所示，能够大幅精简系统电源架构，无需分别设计多路独立电源轨，可采用统一电源为芯片各引脚供电。其中AD5770R的AVDD、DVDD与PVDD引脚共接同一电源，LTC2672则将PVDD与VCC共用单电源。

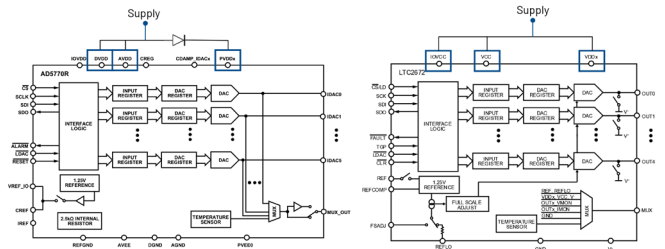


图14：单电源供电

利用单电源配置为IDAC供电，为实现器件额定性能而必须满足的主要条件，要点是确保电源连接正确，使得IDAC在所有工作条件下的表现符合预期。

1. DVDD引脚电压必须等于AVDD引脚电压

2. PVDD引脚电压不得超过AVDD-0.4 V

针对AD5770R，可直接短接AVDD与DVDD。为满足 $PVDD \leq AVDD - 0.4V$ 的约束，常用两种设计：其一在AVDD与PVDD总线间串联二极管（图15），此时AVDD需介于2.9V~5.5V，PVDD引脚上二极管的阴极电压不低于0.8V；其二是为每个DVDD引脚独立配置二极管，抑制多路负载动态耗电带来的电源扰动。

二极管的选择要求：

1. 正向压降 $V_F \geq 0.4V$ ，使得PVDD电源永远不会超过AVDD-0.4V
2. 额定电流值必须能够处理IDAC的总电流，在整个温度范围内实际工作电流不超过其标称值的80%；
3. 选择动态电阻较低的二极管，较低动态电阻有助于输出电流发生变化，有效降低PVDD电源的波动，并直接减小电源噪声与输出误差；
4. 为降低快速电流变化所引起的波动，可以为最敏感电源引脚使用独立二极管。如图15所示，这种方式能够改善通道之间的分辨率，并确保在要求严格的应用场景下依然能保持高精度。

图15给出了几种配置示例。

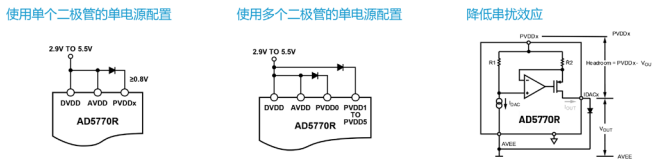


图15：利用单电源配置为IDAC供电

8. 扩展系统数据容量解决方案-SPI扩展来创建32通道器件

将多个器件通过同一SPI总线连接起来，这种架构支持同一SPI接口上挂最多挂4个器件，实现总共32个输出通道，通过AD5710R、AD5706R的AO、A1地址引脚分配片选地址，输出可灵活配置为电流或电压模式。主控制器通过同一SPI总线与全部器件通信，每个AD5710R可以独立设置不同的输出选项，以便系统能够满足不同的通道需求。如图16所示。

该架构通过片选来控制所有四个器件，有效简化PCB设计；任意通道均可并联，以便为需求较高的负载提供更大的电流并提供灵活的设计选项。各芯片基准源互连，确保32路通道输出一致性。此外，AD5706R支持通过MUX-out引脚进行监测，MUX-in引脚支持菊花链连接，这样就可以使用单条走线来监测4个器件的温度和电源。

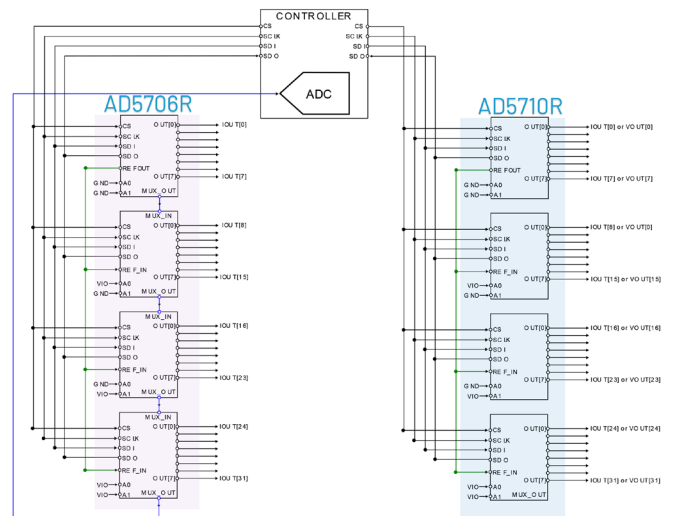


图16：通过SPI扩展来创建32通道

9. SPI接口优化

绝大多数IDAC内置两组配置寄存器，这些寄存器分为流模式（通常是默认模式）和单指令模式，可实现相邻或非相邻地址寄存器的访问。

1. 流模式：使用此模式可以访问存储器中的相邻地址，设置循环计数以循环访问寄存器。如图17，器件设置为流模式，循环计数设为4时，芯片依次遍历4个不同的寄存器地址；写完第4字节后地址指针自动复位至首地址，开启新一轮循环读写。

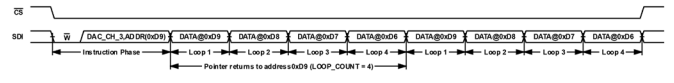


图17：流模式

2. 单指令模式：用于访问存储器中的非相邻地址，可以在同一SPI指令中读取和写入不同的非相邻寄存器。如图18可以看到，在对不同寄存器执行不同操作时，片选线保持低电平，使用者无需在不同操作之间拉高片选线，这样的话通信得以简化，访问多个寄存器所需的时间更少。



图18：单指令模式

结束语

新型精密电流源信号链集成度高、尺寸小巧、功耗更低、输出精度与稳定性更佳。通过通道并联扩流、粗细调分辨率优化、动态功耗控制、基准源补偿、噪声抑制与多通道SPI扩展等技术，可以有效提升电流输出精度，降低系统发热与功耗，拓展驱动能力与应用场景，满足激光驱动、MEMS控制、光通信及工业精密控制对高精度、低噪声、高可靠性电流驱动的需求。

紧凑型低功耗精密电流源信号链能够有效简化硬件设计、提升系统智能化水平，契合现代电子设备小型化、低功耗、高精度的发展趋势，可为各类精密测控与光电系统的优化设计提供可靠的参考方案。

访问我们的在线技术支持社区，与ADI技术专家互动。
提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

ez.analog.com/cn

 **ADI EngineerZone™**
中文技术论坛



analog.com/cn

有关地区总部、销售和代理商的信息，或客户服务和技术支持的联系信息，请访问analog.com/cn/contact。
©2026 Analog Devices, Inc.保留所有权利。商标和注册商标属各自所有人所有。