

利用数字电位计实现开关模式电源的快速、线性调节

作者: Miguel Usach, ADI公司

若能够精细调节电源的输出电压, 就能够移除电源路径上的容差和压降、验证系统限幅的运作, 或者实现微处理器的简单动态电压控制。本文探讨调节开关模式电源(SMPS)的多种方案, 并提出将带有数字电位计的开关调节器用作反馈控制元件的解决方案, 同时强调了设计问题以及解决问题的途径。最后, 提出一种采用AD5141单通道非易失性digiPOT来解决本应用常见限制的简单方法。

在高电流系统中, 开关模式电源调节器相比线性调节器具有更高的效率, 其在电流高于100 μ A时的典型效率超过90%。

在低压差(LDO)调节器中, 效率取决于静态电流(I_q)和正向压降, 静态电流越高则效率越低, 如公式1所示。

$$LD_{EFFICIENCY}(\%) = \frac{V_{OUT} I_{OUT}}{V_{IN} (I_{OUT} + I_q)} + 100 \quad (1)$$

目前LDO的静态电流相当低, 因此如果I_q与I_{LOAD}相比极小, 则可以忽略。然后, LDO效率只需等于(V_{OUT}/V_{IN}) $\times$ 100。LDO无法储存大量未使用的能量, 因此未输送到负载的功率以热量形式在LDO内部耗散。LDO效率典型值为低于83%。

由于开关调节器具有较低的损耗, 因而正在逐步取代ATE、FPGA以及仪器仪表等要求高电流或动态负载应用中的线性调节器。

系统设计人员经常需要调节电源电压, 从而优化其电平或者在极端条件下对系统性能进行特性表征时迫使器件偏离标称值。该功能通常在线测试(ICT)期间执行, 而制造商希望保证产品在标称电源的 $\pm 10\%$ 范围内正常工作(举例而言)。

这一步骤称为裕量调整, 即有意识地在预期范围内改变电源电压。此外, 精细调节输出电压的能力使其可以补偿电源路径上的电源容差和压降。

其他应用, 比如微处理器的动态电压控制, 必须能即时改变电压, 即在低功耗模式下降低电压而在高性能模式下增加电压。

SMPS工作方式与LDO类似, 如图1所示。输出电压与内部基准电压相比较, 其差值关联至脉冲宽度调制器。

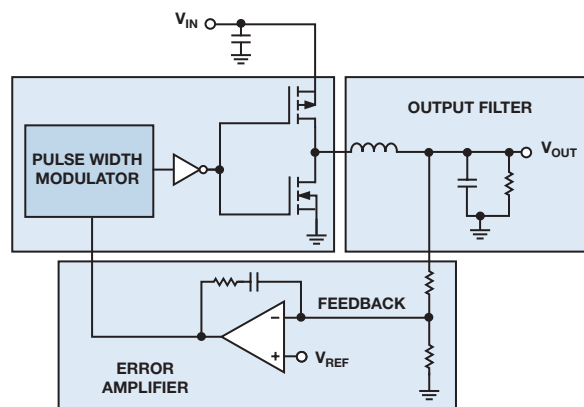


图1. SMPS压控环路

脉冲宽度调制器将斜坡与放大器输出进行比较, 生成PWM信号来控制开关, 从而向负载供电。

控制反相放大器引脚电压, 便可调节输出电压。

这可以通过外部方式实现, 比如使用DAC或数字电位计。某些调节器允许使用串行接口(比如PMBUS、I²C或SPI)在内部控制反馈电压。表1比较了全部三种方法的调节能力和功耗。

表1. 基准分析小结——可调节SMPS

方法	粗调	微调	供电轨	典型功耗
DAC	中	高	V _{MIN} < 2.5 V	>100 μ A
digiPOT	高	中	V _{MIN} < 2.3 V	<20 μ A
内部寄存器	高	低	不适用	低

某些数字电位计采用非易失性存储器, 因此可在测试期间编程输出电压。相比其他两种方式, 这项易于使用的特性具有极大的优势。

线性化传递函数

公式2描述了根据反馈电阻R₁和R₂的比值而确定的SMPS输出电压:

$$V_{OUT} = V_{FEEDBACK} \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (2)$$

其中, V_{FEEDBACK}是内部基准电压。

使用数字电位计直接替换 R_1 和 R_2 前，需考虑一些问题。数字电位计内部有两个电阻串 R_{AW} 和 R_{WB} 。

两串电阻互补。

$$R_{AW} = R_{AB} - R_{WB} \quad (3)$$

其中， R_{AB} 是端到端电阻或标称值。

以 R_{AW} 和 R_{WB} 代替 R_1 和 R_2 可实现对数传递函数。数字码和输出电压之间的非线性关系降低了低端分辨率。图2显示了一个16抽头数字电位计示例。

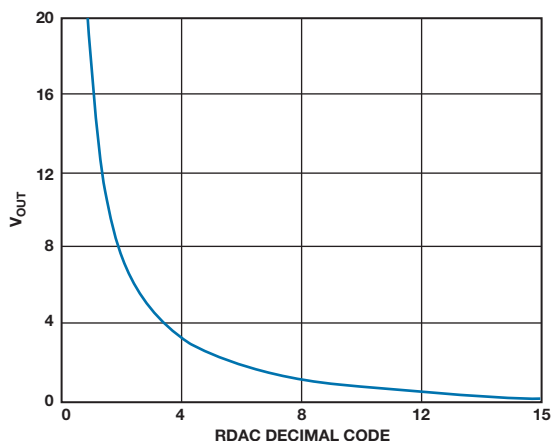


图2. 对数传递函数

有多种方法可以克服这个问题；最常用的方法是在可变电阻模式下使用数字电位计，或者将电阻与电位计串联。

最小化容差

由于电阻容差，将数字电位计与外部电阻一同使用可能导致失配问题。精密器件可能具有1%的电阻容差，但大部分数字电位计只能达到20%的电阻容差。

这种情况下，可通过串联/并联电阻组合减少失配，如图3和图4所示；其缺点是动态范围也会缩小。

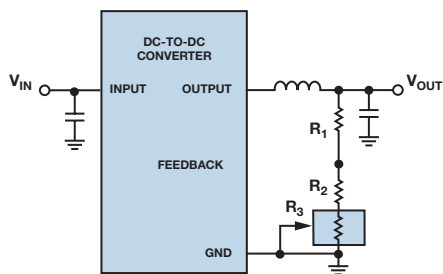


图3. 可变电阻和串联电阻

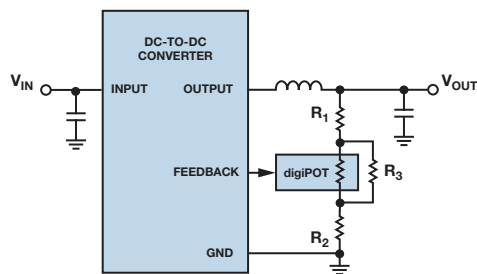


图4. 电位计模式

在可变电阻模式下，串联电阻必须足够高，才能忽略数字电位计的容差，即 $R_2 \geq 10 \times R_{AB}$ 。在电位计模式下，并联电阻必须足够小，即

$$R_3 \leq \frac{R_{AB}}{10}.$$

使用串联-并联组合对电位计进行线性化可能十分复杂，如图5中的等效电路所示。

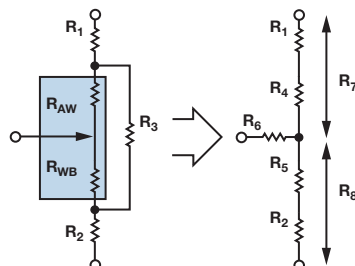


图5. 最终Y-Δ变换

其中：

$$R_4 = \frac{R_{AW} \times R_3}{R_{AB} + R_3} \quad (4)$$

$$R_5 = \frac{R_{WB} \times R_3}{R_{AB} + R_3} \quad (5)$$

$$R_7 = R_1 + R_4 \quad (6)$$

$$R_{AW} = R_{AB} + R_{WB} \quad (7)$$

反馈输入引脚通常具有较高的阻抗，因此 R_6 的影响可以忽略。

增加带宽

开关调节器工作在较高频率下(通常高于1 MHz)，因而允许使用小数值外部元件。在最差情况下，它必须为动态负载供电，因此反馈电阻网络必须提供足够的带宽，才能精确跟踪输出电压。由于存在寄生内部开关电容，数字电位计可用作低通滤波器。

如果反馈网络无法提供足够的带宽，则输出电压可能振荡，如图6所示。

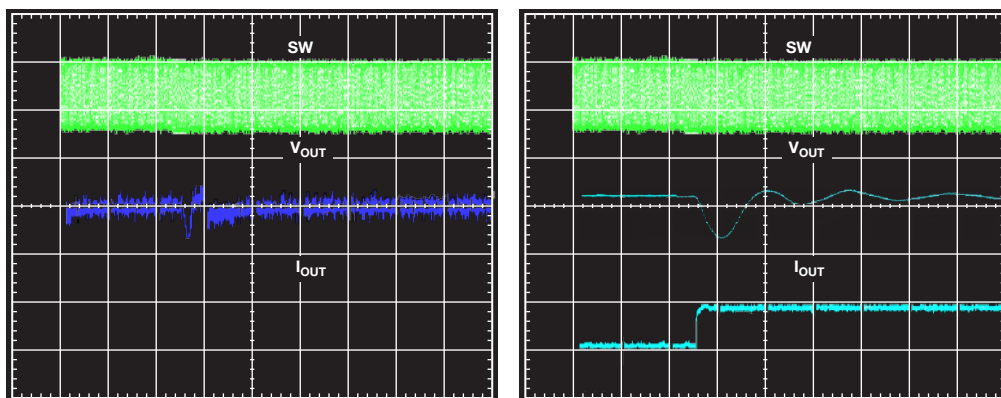


图6. 分立式反馈电阻与数字电位计的关系(带宽受限)

克服这一限制的一种简单方法，是将一个电容并联放置在输出与反馈网络之间(如图7所示)，以便降低高频阻抗，并最大程度地缩短振荡时间。

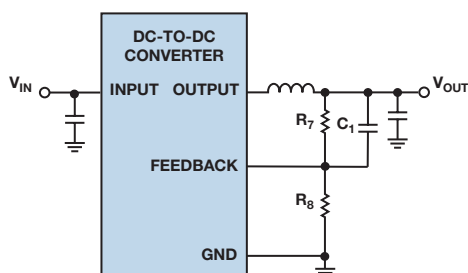


图7. 并联电容降低高频阻抗，最大程度地减少振荡

更为简单但效果不打折扣的解决方案

ADI最新的AD5141 digiPOT克服了其他数字电位计的问题。该器件的专有线性增益设置模式允许对每一个电阻串进行单独控制，从而：

$$R_{AW} \neq R_{AB} - R_{WB} \quad (8)$$

如果使能该模式，则无需外部电阻。电阻容差也可以忽略不计，同时传递函数总误差仅与内部电阻串失配有关，而后者通常不足1%。

每一个电阻串都有一个对应的EEPROM位置，因此上电时可载入每一个电阻串的独立值。此外，器件还为快速反馈环路提供高达3 MHz的带宽，如图8所示。

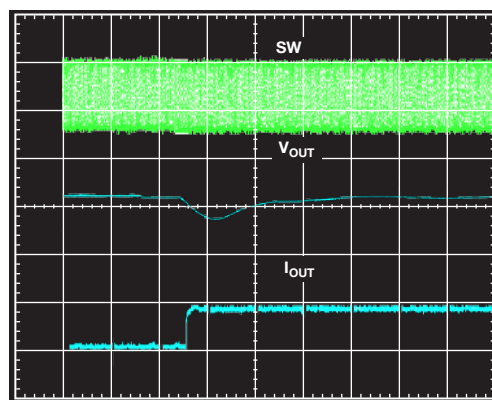


图8. 线性增益设置模式下的AD5141 (10 kΩ)版本

结论

由于效率较高，开关模式电源调节器通常用于高电流应用中。本文描述了数字控制输出电压的几种方法。

由于在预定义输出状态下为系统上电具有内在优势，因而可使用内置非易失性存储器的数字电位计解决方案。设计人员所面临的主要权衡取舍包括提供足够的分辨率、精度和带宽，以便获得出色的性能。AD5141 digiPOT可让设计人员实现效果不打折扣的最优解决方案。

有关文中任意产品的更多信息，请访问：www.analog.com。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区，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。

ezchina.analog.com。



全球总部

One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部

上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编 : 201203
电话 : (86 21) 2320 8000
传真 : (86 21) 2320 8222

深圳分公司

深圳市福田区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心 4205-4210 室
邮编 : 518048
电话 : (86 755) 8202 3200
传真 : (86 755) 8202 3222

北京分公司

北京市海淀区
上地东路 5-2 号
京蒙高科大厦 5 层
邮编 : 100085
电话 : (86 10) 5987 1000
传真 : (86 10) 6298 3574

武汉分公司

湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编 : 430073
电话 : (86 27) 8715 9968
传真 : (86 27) 8715 9931

亚洲技术支持中心

免费热线电话 : 4006 100 006
电子邮箱 :
china.support@analog.com
技术专栏 :
www.analog.com/zh/CIC
样品申请 :
www.analog.com/zh/sample
在线购买 :
www.analog.com/zh/BOL
在线技术论坛 :
ezchina.analog.com