

# 具有两个运放的仪表放大器的 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图

作者: Pete Semig

模拟应用工程师, 精密型放大器

## 背景

在 TI E2E™ 社区中, 针对仪表放大器最常见的问题涉及到解释产品数据表中给出的“共模电压与输出电压 ( $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$ )”关系曲线图。对这幅曲线图的曲解和误解将导致那些说明失真输出波形、错误器件增益或“阻塞”输出的论坛帖子随之出现。当答复某个应用问题时, 验证器件工作在“ $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系”曲线图的限值范围之内始终是我检查的第一件事。

本文介绍了一款具有两个运算放大器(运放)的仪表放大器的  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图, 并透彻地分析了这种放大器拓扑。此外, 还推导出了内部节点方程, 并使用这些方程来绘制每个内部放大器的输入共模和输出摆幅限值与仪表放大器的共模电压之间的函数关系曲线。最后, 介绍了一款用于模拟  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图的软件工具。

## $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 的关系曲线图

仪表放大器之所有内部放大器的输入共模和输出摆幅限制因素在  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图中进行了表示。

两运放仪表放大器的典型  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图示于图 1。该曲线图的内部限定了仪表放大器的线性工作区, 因为曲线图中的每根线对应于两个内部放大器之一的某个输入或输出限制因素。 $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图是针对一个特定的电源电压、基准电压和增益而规定的, 如图 1 所示。

在  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图的边界以外运作将致使器件工作于一种非线性模式, 如图 2 所示。

一篇包括三个部分的系列文章和博客帖子讨论了广泛使用的三运放仪表放大器的  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图。<sup>[1, 2]</sup> 两运放仪表放大器因其低成本和相对大的  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图而很受欢迎。

图 1: 两运放仪表放大器的  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图

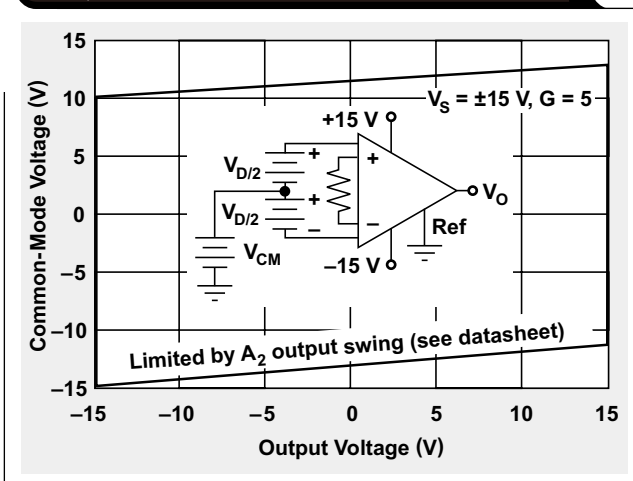
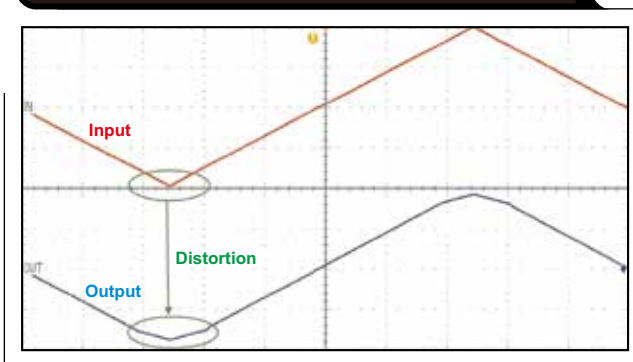


图 2: 由于违犯  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  的关系而产生的仪表放大器输出失真<sup>[1]</sup>



### 两运放仪表放大器的分析

图 3 描绘了连接至一个输入信号的典型两运放仪表放大器。该拓扑具有高输入阻抗且仅需一个电阻器  $R_G$  来设定增益，这与三运放拓扑是相同的。

另外，图 3 还表达了共模 ( $V_{CM}$ ) 和差模 ( $V_D$ ) 电压的定义。理想情况下，差分放大器（例如：运放、差动放大器、仪表放大器）可抑制共模电压  $V_{CM}$ 。

然而，从  $V_{+IN}$  和  $V_{-IN}$  至输出的信号路径不平衡降低了器件的共模抑制比 (CMRR)，特别是在整个频率范围内（图 4）。CMRR 的这种下降是两运放仪表放大器的成本通常低于同档次三运放仪表放大器的主要原因之一。

用于图 3 所示电路的转移函数在 (1) 式中给出。请注意电压并未出现在该式中，因为在理想的情况下其被仪表放大器所抑制。

$$V_O = (V_{+IN} - V_{-IN}) \times G + V_{REF} = V_D \times G + V_{REF} \quad (1)$$

推导该拓扑的转移函数有助于理解  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图。

图 5 示出了图 3 中原理图的一幅更加传统的制图。为了确定基准电压在输出端上产生的电压  $V_{O(VREF)}$ ，通过把输入电源短路至地来应用叠加。

放大器  $A_2$  根据  $R_{FA2}$  与  $R_R$  之比给  $V_{REF}$  施加一个反相增益。同样， $A_1$  根据  $R_{FA1}$  与  $R_{OA2}$  之比给  $A_2$  的输出电压施加一个反相增益。(2) 式描述了用于  $V_{REF}$  的转移函数。

$$\begin{aligned} V_{O\_VREF} &= V_{REF} \left( \frac{-R_{FA2}}{R_R} \right) \left( \frac{-R_{FA1}}{R_{OA2}} \right) \\ &= V_{REF} \left( \frac{R_{FA1} \times R_{FA2}}{R_R \times R_{OA2}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

图 3：两运放仪表放大器的拓扑

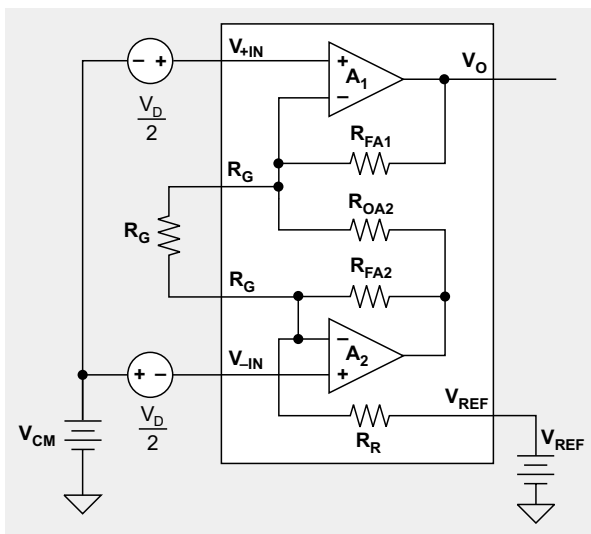


图 4：两运放与三运放拓扑的 CMRR 比较

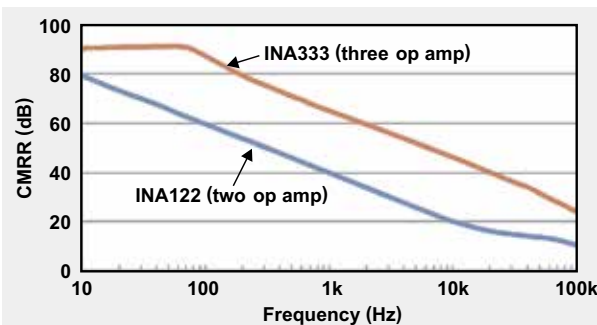
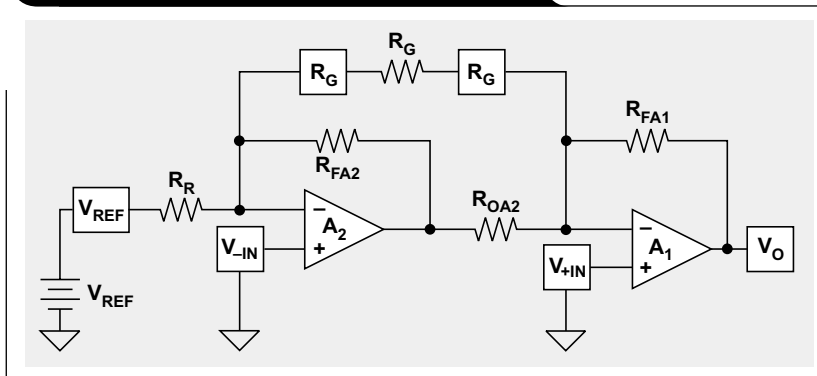


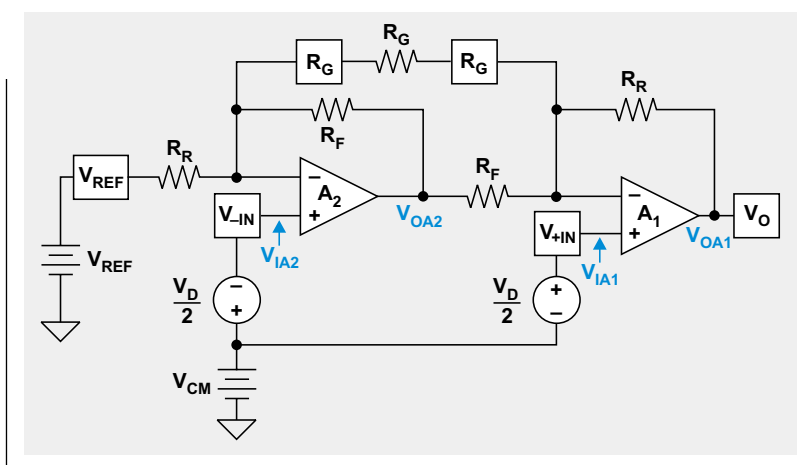
图 5：用于图 3 的替换制图



施加至仪表放大器之基准电压的增益应为 1 V/V。为了满足这一要求，设定  $R_{FA1} = R_R$  和  $R_{FA2} = R_{OA2} = R_F$ 。图 6 示出了经过更新的两运放拓扑，该拓扑产生了用于基准电压的单位增益。此外，为了便于今后的分析还给内部节点做了标记。

尽管只有两个放大器和五个电阻器，但图 6 中的电路却有 6 个增益项。这是因为每个放大器给三个输入信号施加了增益。虽然可能很明显  $A_2$  给  $V_{-IN}$  和  $V_{REF}$  施加了增益，不过  $A_2$  也通过  $A_1$  和  $R_G$  输入两端的虚短路给  $V_{+IN}$  施加了增益。同样， $A_1$  给  $V_{OA2}$ 、 $V_{+IN}$  和  $V_{-IN}$  施加了增益。(3)~(8) 式描述了与两运放仪表放大器相关的 6 个增益项。

图 6：两运放拓扑（给内部节点做了标记）



$$G_{A2VR} = \frac{-R_F}{R_R} \tag{3}$$

$$G_{A2V-IN} = 1 + \frac{R_F}{R_G \parallel R_R} \tag{4}$$

$$G_{A2V+IN} = \frac{-R_F}{R_G} \tag{5}$$

$$G_{A1VOA2} = \frac{-R_R}{R_F} \tag{6}$$

$$G_{A1V+IN} = 1 + \frac{R_R}{R_G \parallel R_F} \tag{7}$$

$$G_{A1V-IN} = \frac{-R_R}{R_G} \tag{8}$$

(9) 式和 (10) 式描述了放大器  $A_1$  和  $A_2$  的输出电压。

$$V_{OA1} = V_O = V_{+IN}(G_{A1V+IN}) + V_{-IN}(G_{A1V-IN}) + V_{OA2}(G_{A1VOA2}) \tag{9}$$

$$V_{OA2} = V_{+IN}(G_{A2V+IN}) + V_{-IN}(G_{A2V-IN}) + V_{REF}(G_{A2VR}) \tag{10}$$

用 (10) 式代替 (9) 式中的  $V_{OA2}$ ，并通过简化得出了 (11) 式。

$$V_O = V_{+IN}(G_{A1V+IN} + G_{A2V+IN}G_{A1VOA2}) + V_{-IN}(G_{A1V-IN} + G_{A2V-IN}G_{A1VOA2}) + V_{REF} \tag{11}$$

(11) 式中增益项之间的关系示于 (12) 式。

$$\begin{aligned} G_{A1V+IN} + G_{A2V+IN}G_{A1VOA2} &= -(G_{A1V-IN} + G_{A2V-IN}G_{A1VOA2}) \\ &= G_{A1V+IN} - G_{A1V-IN} = 1 + \frac{R_R}{R_F} + \frac{2R_R}{R_G} \end{aligned} \tag{12}$$

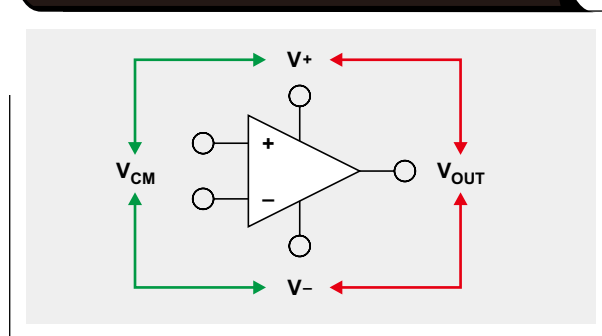
最后，采用 (11) 和 (12) 式，两运放仪表放大器的转移函数如 (13) 式所示，其与 (1) 式相符。

$$\begin{aligned} V_O = V_{OA1} &= (V_{+IN} - V_{-IN}) \times G + V_{REF} \\ &= V_D \times \left( 1 + \frac{R_R}{R_F} + \frac{2R_R}{R_G} \right) + V_{REF} \end{aligned} \tag{13}$$

### 运放限制因素

仪表放大器的线性操作取决于其主要构件的线性操作：运放。当输入和输出信号分别处在器件的输入共模和输出摆动范围之内时，运放线性地工作。用于给运放供电的电源电压 ( $V_+$  和  $V_-$ ) 限定了这些范围 (图 7)。

图 7：运放输入共模和输出摆动范围取决于电源<sup>[1]</sup>



共模和输出摆幅限值的实例示于图 8。请注意，共模范围和输出摆动范围不必相同。

### 两运放节点方程

在扎实地了解了两运放仪表放大器和运放限制因素之后，下一步是细阅如图 6 中所示的节点方程。 $V_{OA2}$  和  $V_{OA1}$  的方程已分别由 (10) 式和 (13) 式给出。用于图 6 中的  $V_{IA1}$  和  $V_{IA2}$  的方程给出如下：

$$V_{IA1} = V_{+IN} = V_{CM} + \frac{V_D}{2} \quad (14)$$

$$V_{IA2} = V_{-IN} = V_{CM} - \frac{V_D}{2} \quad (15)$$

$V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  的关系曲线图会随着增益和基准电压而变化。因此，必须求解 (10) 式和 (13)~(15) 式，以得出作为增益项、 $V_{CM}$  和  $V_{REF}$  之函数的  $V_O$ 。实现这点的一个重要关系是通过 (13) 式求解  $V_D$  获得的，如 (16) 式所示。

$$V_O = V_D \times G + V_{REF} \rightarrow V_D = \frac{V_O - V_{REF}}{G} \quad (16)$$

在完成了所有的正确代换并求解了  $V_O$  之后，(17)~(20) 式在两款两运放仪表放大器的输出端捕捉其线性工作区，作为每个放大器的增益项、 $V_{CM}$  和  $V_{REF}$ 、以及共模和输出限制因素 ( $V_{IA1}$ 、 $V_{IA2}$ 、 $V_{OA1}$ 、 $V_{OA2}$ ) 的一个函数。

$$V_{O\_IA1} = 2 \times G \times (V_{IA1} - V_{CM}) + V_{REF} \quad (17)$$

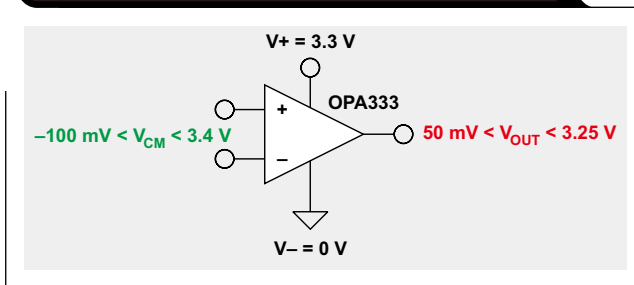
$$V_{O\_IA2} = -2 \times G \times (V_{IA2} - V_{CM}) + V_{REF} \quad (18)$$

$$V_{O\_OA1} = V_{OA1} \quad (19)$$

$$V_{O\_OA2} = 2V_{CM} - V_R + 2G_{A1}V_{OA2} (V_{OA2} - V_{CM}) \quad (20)$$

如欲工作在线性区域中，则  $V_{IA1}$  上的电压一定不能违犯 A1 的输入共模范围。同样，节点  $V_{OA1}$  上的电压切不可违犯 A1 的输出摆幅限制。对于运放 A2 的  $V_{IA2}$  和  $V_{OA2}$  情况也是如此。内部运放限制的数值在仪表放大器的数据表中通常并未明确地表述。作为此类信息的替代，可通过采用“检查器件的限制因素”与“测量线性工作区”两者的组合来确定这些数值。

图 8: 运放  $V_{CM}$  和  $V_{OUT}$  范围 (对于 3.3 V 电源) [1]



为了把输入共模范围移动至更靠近负电源电压，有些仪表放大器（如 INA122）采用精准型晶体管缓冲器对输入进行电平移位。[1] 当采用单电源运作时这是特别有用处的。

图 9 示出了 TINA-TI™ 仿真，其针对 INA122 之内部放大器的最大和最小共模以及输出摆幅限值标绘了 (17)~(20) 式。线性工作区位于所有直线的内部。

图 9:  $V_{CM}$  与  $V_{OUT}$  关系曲线图

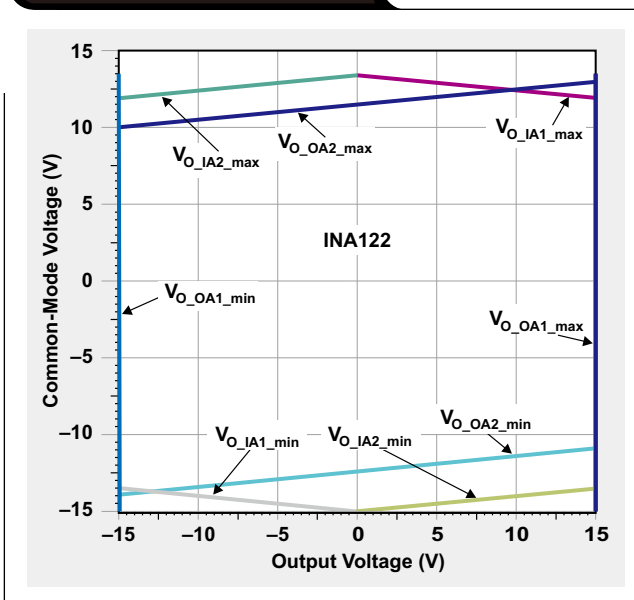
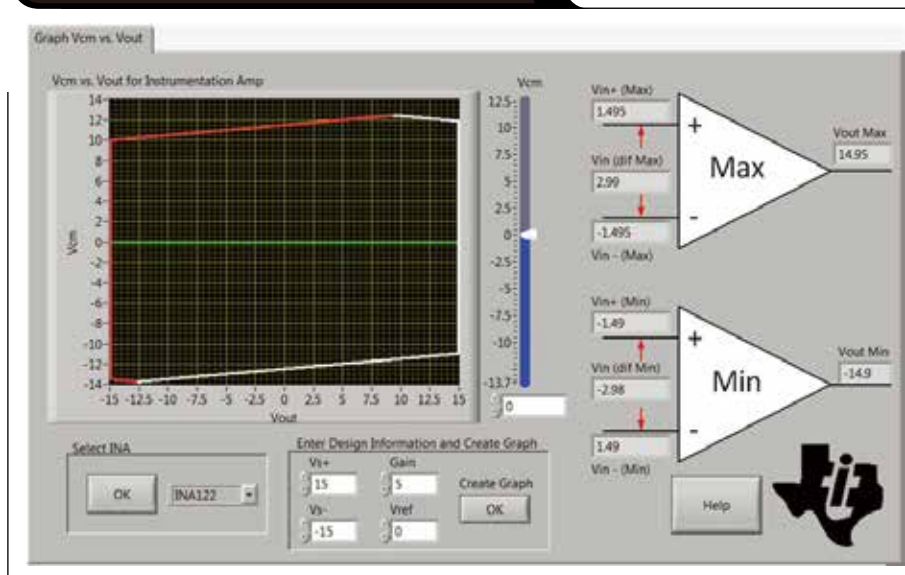


图 10: 用于生成 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图的软件工具

开发了一款软件工具，以使针对变动的增益、基准电压和电源电压来生成 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图的工作得以简化。下载链接请见本文末尾处的“相关网站”。图 10 示出了给定的标准数据表条件下 INA122 的 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图。请注意，其与图 1 和图 9 吻合得很好。不过，图 1 中的数据表曲线图仅描述了 $A_1$ 和 $A_2$ 的输出限制，而此软件工具则包括了共模限制因素。最后，要注意的是该软件工具是可以下载的，用以为两运放和三运放仪表放大器生成 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图。

## 总结

本文讨论了两运放仪表放大器的最大误解概念：数据表中给出的 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图。在推导内部节点方程的同时对两运放拓扑进行了全面透彻的分析。这些方程用于生成 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图。由可下载软件工具提供的输出被发现与 INA122 数据表中给出的对应曲线图相当一致。这款工具为设计人员提供了一种确保仪表放大器在其设计中执行线性操作的简单方法。

## 鸣谢

本文作者希望感谢在德州仪器负责开发用于生成 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图之软件工具的 Art Kay，以及在技术方面为本文提供大力支持的 Collin Wells。

## 参考文献

1. 作者：Peter Semig 和 Collin Wells，《仪表放大器 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图》，第一部分、第二部分和第三部分，EDN Network，2014 年 12 月。
2. 作者：Peter Semig，《仪表放大器 $V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图是如何随着电源和基准电压而变化的》，TI 精密技术杂谈，2015 年 1 月 30 日。

## 相关网站

软件工具：

**$V_{CM}$ 与 $V_{OUT}$ 关系曲线图生成器**

产品信息：

**INA122**

**INA333**

**OPA333**

订阅 AAJ:

[www.ti.com/subscribe-aaaj](http://www.ti.com/subscribe-aaaj)

TI Designs 参考设计库提供完整的设计方案，由资深工程师团队精心创建，支持汽车、工业、医疗、消费等广泛应用的设计。在这里，您能找到包括原理图、物料清单、设计文件及测试报告的全面设计方案。登陆TI Designs，找寻更多适合您的参考设计！简单设计，从TI起步。

马上登录 [ti.com.cn/tidesigns](http://ti.com.cn/tidesigns) 查询最适合您的设计文档。



WEBENCH® 设计中心: 易于使用且可提供定制结果的设计工具。  
PowerLab™ 参考设计库, 包含了近千个适用于所有应用的参考设计。  
电源在线培训课程

[www.ti.com.cn/webench](http://www.ti.com.cn/webench)  
[www.ti.com.cn/powerlab](http://www.ti.com.cn/powerlab)  
[www.ti.com.cn/powertraining](http://www.ti.com.cn/powertraining)

**WEBENCH® Designer My Designs**

Clocks	Filters	传感器
电源	FPGA/μP	LED

输入您的供电要求:

直流  交流

最小 最大

输入电压  V  V

输出电压  V 输出电流  A

环境温度  °C

多负载 **Power Architect** 单输出 **开始设计**

**WEBENCH® Designer My Designs**

最小 最大

输入电压  V  V

输出电压  V 输出电流  A

环境温度  °C

**SIMPLE SWITCHER®**

开始设计 ▶

德州仪器在线技术支持社区

[www.deyisupport.com](http://www.deyisupport.com)

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



[weibo.com/tisemi](http://weibo.com/tisemi)

## 热门产品

DAC8760	用于 4-20mA 电流回路应用的单通道、16 位、可编程电流/电压输出 DAC
DAC7760	单通道、12 位可编程电流输出和电压输出 DAC
ADS1247	极低噪声、精密 24 位 模数转换器
ADS1120	具有串行外设接口的低功耗、低噪声、16 位 ADC
ISO7242	四通道 2/2 25Mbps 数字隔离器
ISO7631FM	4kV <sub>PK</sub> 低功耗三通道、150Mbps 数字隔离器
TPS54062	4.7V 至 60V 输入、50mA 同步降压转换器
TLK105L	工业温度、单端口 10/100Mbps 以太网物理层
SN65HVD255	CAN 收发器具有快速循环次数, 可用于高度已加载网络

了解更多, 请搜索以下产品型号:



## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a>	通信与电信	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a>	计算机及周边	<a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a>	消费电子	<a href="http://www.ti.com.cn/consumer-apps">www.ti.com.cn/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>	能源	<a href="http://www.ti.com.cn/energy">www.ti.com.cn/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a>	工业应用	<a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a>	医疗电子	<a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a>	安防应用	<a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a>	汽车电子	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a>	视频和影像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>		
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>		
OMAP应用处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/omap">www.ti.com.cn/omap</a>		
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a>	德州仪器在线技术支持社区	<a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated