

仪表放大器共模范围：钻石图

作者：Scott Hunt

简介

对于运算放大器，确定裕量限值是很简单的。设计人员只需考虑两个限制：输入共模电压范围和输出电压摆幅。然而，确定仪表放大器的裕量限值则较为复杂。最常见的仪表放大器架构是集合两到三个运算放大器，每个运算放大器都有自己的输入和输出范围。这些限制结合之后，导致仪表放大器的工作范围取决于共模电压、增益和REF引脚电压。仪表放大器数据手册提供的裕量图会显示饱和边界，但这些图仅代表从最常见配置获得的数据，且仍会引起一些混淆。本应用笔记旨在澄清关于仪表放大器裕量图（也称为 V_{CM} 与 V_{OUT} 关系图或钻石图）的主要混淆之处，并介绍用来动态计算仪表放大器裕量限值的ADI Web工具，它可以大大简化仪表放大器设计。

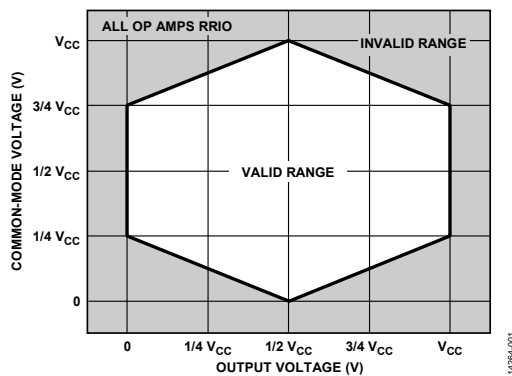


图1. 由轨到轨运算放大器构成的单电源三运放仪表放大器的钻石图

仪表放大器基础

仪表放大器是一个闭环增益模块，运算放大器则设计成高开环增益模块。当通过无源和有源器件的各种组合应用反馈时，运算放大器可配置用来执行许多不同功能，而仪表放大器只能将其输入端之间的差分信号乘以一个固定或可编程的增益量，并抑制两个输入共有的任何信号（共模电压）。仪表放大器具有两个平衡的高阻抗输入，以避免成为传感器或信号源的负载。仪表放大器具有优化的低等效

输入误差和高共模抑制比，可在有大共模电压的情况下测量小信号。

钻石图

虽然仪表放大器似乎不关心输入共模电压，但在内部，它仍必须应对此电压。当外部输入和输出电压本来在规定范围以内时，共模电压（特别是当其接近电源时）可能引起内部节点饱和。钻石图通过绘制每个裕量限值的组合，包括输入范围、输出范围和内部节点，来反映这种限制。钻石图是一种边界图，显示给定输入共模电压（ V_{CM} ）下可实现的输出电压（ V_{OUT} ），或可产生给定输出电压的输入共模电压范围。

虽然仪表放大器数据手册中的钻石图显示了仪表放大器的所有输入范围、输出摆幅和内部裕量限值，但电源电压、REF引脚电压（ V_{REF} ）和增益等电路配置参数也会影响钻石图。对于构成仪表放大器的每个运放，输入和输出裕量限值与电源电压成比例，意味着改变电源电压会使钻石图扩大或收缩。此外，根据仪表放大器理想传递函数，输出电压与差分输入电压、增益和 V_{REF} 相关：

$$V_{OUT} = \text{增益} \times V_{IN_DIFF} + V_{REF}$$

其中：

V_{IN_DIFF} 为差分输入电压，定义为 $V_{+IN} - V_{-IN}$ 。

V_{REF} 为REF引脚电压。

由于 V_{REF} 和增益均影响输出电压，并且输出电压是x轴变量，所以 V_{REF} 和增益也可能影响钻石图形状。传统上，数据手册试图通过一系列图形来显示这些变化并涵盖大多数常见配置，有时候还会通过一组公开公式来描述裕量限值。

为了简化仪表放大器电路的设计和调试过程，[仪表放大器钻石图工具](#)可计算任何用户配置的ADI仪表放大器钻石图限值。

目录

简介	1	信号范围和钻石图相结合以避免饱和.....	3
仪表放大器基础	1	解构钻石图	4
钻石图	1	ADI 公司钻石图工具	5
修订历史.....	2	结语.....	7
如何查看钻石图	3		

修订历史

2016年10月—修订版0：初始版

如何查看钻石图

无需进行详细分析，便可了解如何在设计中使用钻石图，从而确保电路在图中的有效范围内工作。当电路在钻石图范围内工作时，不会发生饱和，仪表放大器会发挥预期性能。为了确保这一点，首先必须了解电路的工作电压范围。

信号范围和钻石图相结合以避免饱和

每个电路都有一个信号工作电压范围，共模和差分输入电压在该范围上变化。信号工作电压范围可直接在钻石图上绘制。如果工作范围完全在钻石图内部，电路就不会有饱和问题。电路的工作范围可以非常简单，给定共模电压时，所需输出范围是一条水平线。更多时候，设计必须考虑（更确切的说法是抑制）一系列共模电压。用图形表示的话，这看起来像是一个从 V_{CM_MIN} 到 V_{CM_MAX} 和从 V_{OUT_MIN} 到 V_{OUT_MAX} 的方框。最后一个麻烦的地方是当输入电压为单端（一个输入为固定电压，而另一个输入为变化电压）

时，共模电压会随着输入信号而变化。表示 V_{CM} 与 V_{OUT} 关系的直线的斜率为 $\pm 1/(2G)$ ，因此，当增益很高时，它趋于水平，但在较低增益时则大不相同。图2至图4显示了三种情况的输入信号条件及其图形表示。

每种条件的适用例子如下：

- 四元件变化电桥是差分输入例子
- 负引脚接地的隔离热电偶测量是+IN单端输入信号例子
- 正供电轨上的高端电流检测是-IN单端输入信号例子

对于特定电路，如果不清楚哪种方法合适，那么只要知道最大和最小共模电压，就可以使用差分输入，因为它是通用方法。不过，所得的方框可能会覆盖电路实际上不会在其中工作的图形区域。

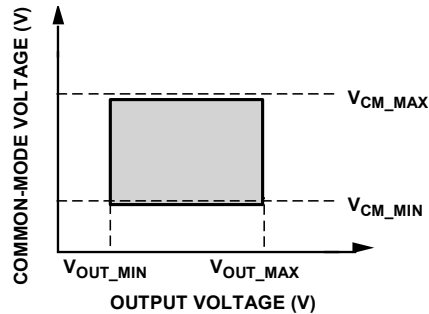
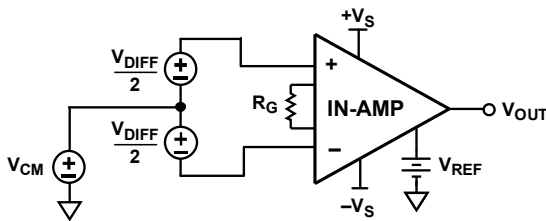


图2. 差分输入信号条件及其图形表示

SINGLE-ENDED AT +IN

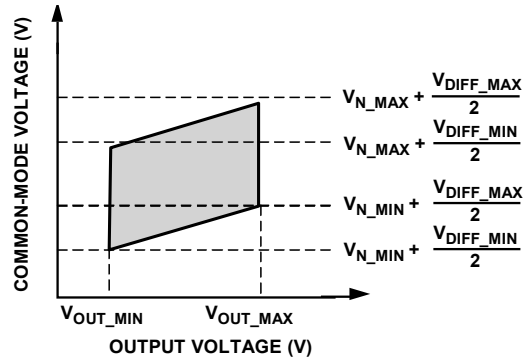
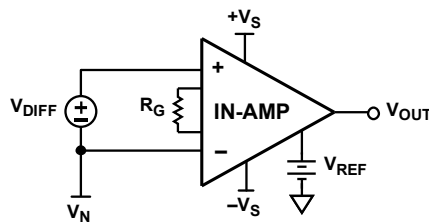


图3. +IN单端输入信号条件及其图形表示

SINGLE-ENDED AT -IN

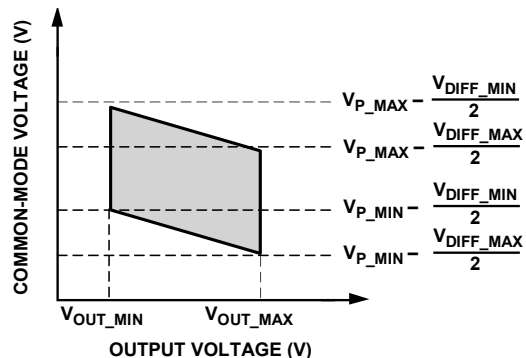
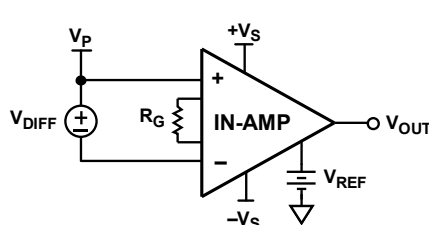


图4. -IN单端输入信号条件及其图形表示

解构钻石图

钻石图代表各种裕量限值的集合。了解这些限值是从哪里来的以及它们出现在钻石图上的位置，可以帮助设计人员更有效地应用仪表放大器。

首先考虑所有仪表放大器都必须遵守的基本限值：输入范围和输出范围。这些限值如图5所示。变换到钻石图中使用的 V_{CM} 与 V_{OUT} 轴上时，输出范围限值表现为 $V_{OUT} = V_{OUT,H}$ 或 $V_{OUT} = V_{OUT,L}$ 的垂直线。换言之，为了避免饱和，水平轴变量 V_{OUT} 必须大于 $V_{OUT,L}$ 且小于 $V_{OUT,H}$ 。

输入范围稍难一点。如果 $V_{IN,DIFF}$ 设置为0 V，假设 V_{REF} 在输出范围以内，则输出电压变为 $V_{OUT} = V_{REF}$ 。在这些条件下，仍在范围以内的最大和最小共模电压分别为额定输入范围限值 $V_{IN,H}$ 和 $V_{IN,L}$ 。当输入位于这些限值之一时，要移动输出电压，其中一个输入必须离开限值。完成移动之后，共模电压(V_{CM} ，定义为 $(V_{+IN} + V_{-IN})/2$)改变 $\pm\Delta V_{OUT} \times 1/(2G)$ ，其中 G 为仪表放大器增益，符号取决于哪一个输入离开限值。从公式中可以看出，增益为1时，斜率(m)为 $\pm 1/2$ 。增益提高时，斜率降低。如果增益高于10左右，则输入范围限值看起来像是一条水平线。

电路设计人员一般会在参考钻石图之前考虑输入范围和输出范围，确定这些基本限值之后，仪表放大器架构施加的其他限值在钻石图上便很明显。理想仪表放大器仅有图5所示的限值以及轨到轨输入和轨到轨输出。多数仪表放大器还有其他钻石图限制。事实上，采用特殊间接电流反馈架构的AD8237是业界仅有的若干能在大多数配置中符合理想钻石图的仪表放大器之一。

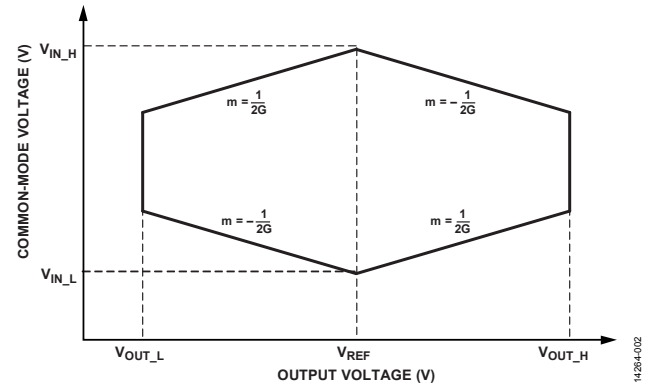


图5. 仅显示输入范围和输出范围限值的钻石图

多数仪表放大器基于图6所示的传统三运放架构，因此，讨论三运放型仪表放大器以对内部限制有所了解是值得的。在三运放仪表放大器中，增益在第一级中应用，而共模电压在第二级中消除。因此，前置放大器级的两个输出为 $V_{CM} \pm G \times V_{IN,DIFF}/2$ 。将这些限值再转换到 V_{CM} 与 V_{OUT} 轴上，前置放大器输出限制的斜率为 $\pm 1/(2 \times G_D)$ ，其中 G_D 为减法器增益。 G_D 典型值为1，如图6电路所示。此斜率与前置放大器增益无关，即使输入范围在较高增益时趋于水平，该内部前置放大器的输出范围限值也不会变平。

唯一需要考虑的其他限值是减法器运放的输入范围。减法器运放的输入位于一个电阻分压器（其在前置放大器正输出与REF引脚之间）的中心。REF引脚电压通常在中间电源电压附近；因此，它也会将减法器运放的输入拉向中间电源电压。结果，此限值通常并不会影响电路，除非 V_{REF} 和前置放大器正输出均非常接近同一电源电压。

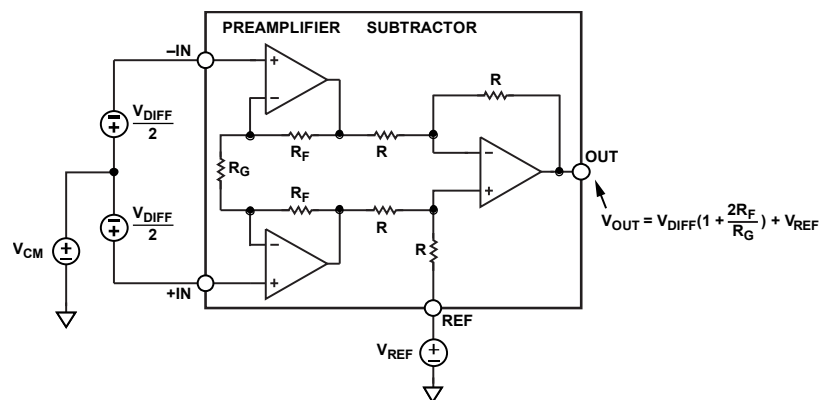


图6. 基本三运放仪表放大器

可将所有这些限值放在一起解释整个图。图7为AD8221数据手册中的G = 100图，标签显示了哪个线段代表哪个限值。输出范围是垂直线，输入范围近乎平坦（斜率为±1/200），前置放大器输出范围的斜率为±1/2。

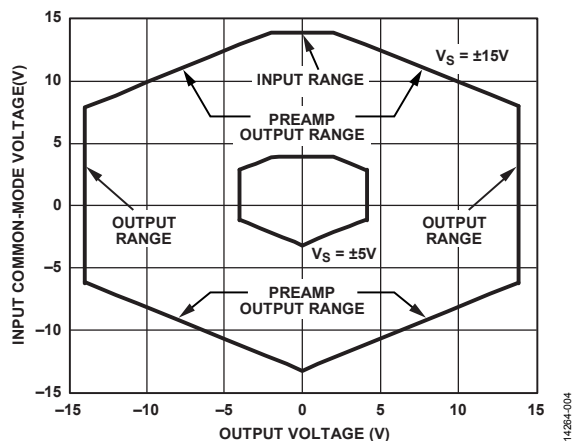


图7. AD8221带标签的钻石图

ADI公司钻石图工具

为了简化生成和使用钻石图的过程，ADI公司开发了一款在线仪表放大器钻石图工具

(www.analog.com/designtools/cn/diamond)。该工具根据用户给定的电路条件计算ADI仪表放大器钻石图，并检测信号范围是否在仪表放大器的工作范围以内（参见图8）。该工具还会检查一些常见错误，例如增益或电源电压是否超出仪表放大器范围。

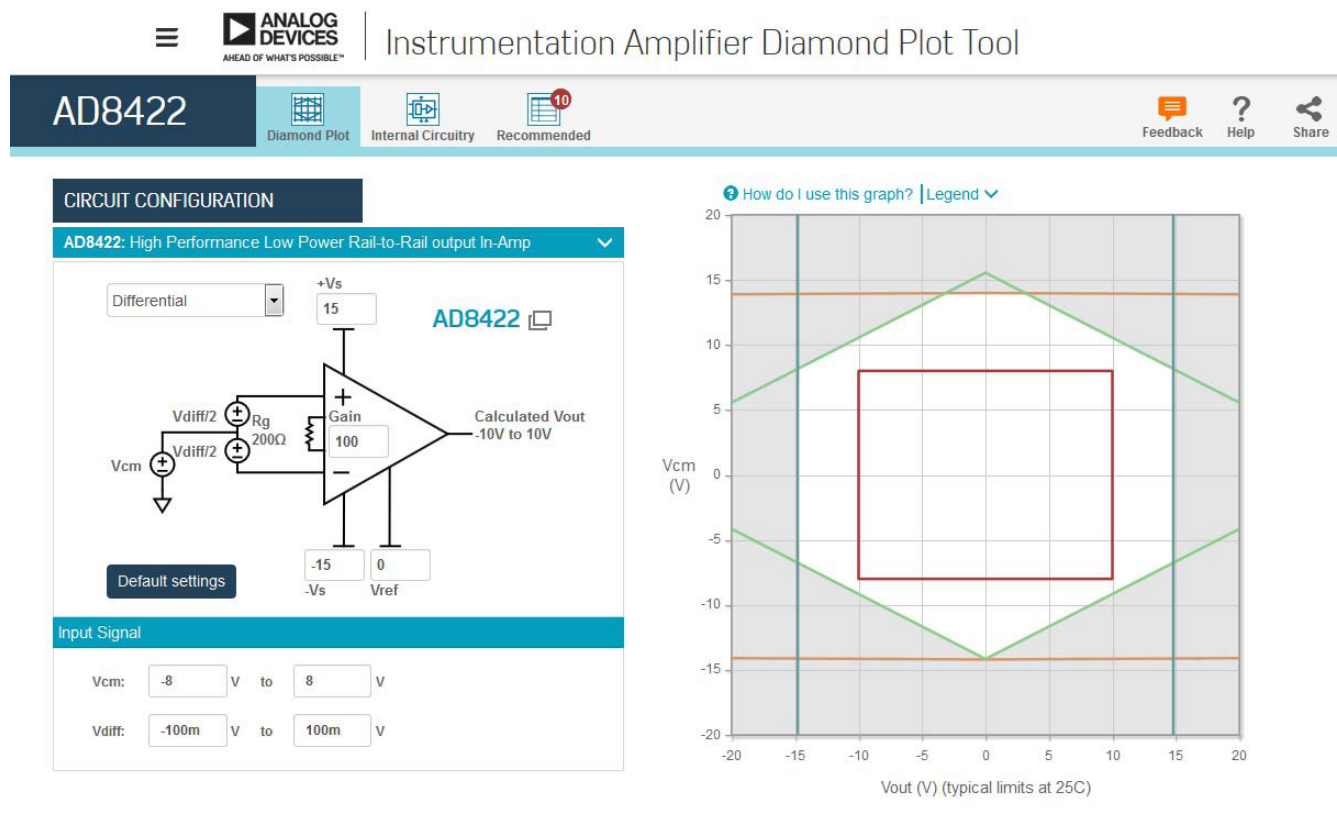


图8. ADI公司仪表放大器钻石图工具屏幕截图

为节省设计时间，仪表放大器钻石图工具还会生成一个满足所有电路条件和裕量要求的推荐仪表放大器列表（参见图9）。此列表可以在工具本身中按参数筛选，只需单击 **Filter this list by specifications**（**按规格筛选此列表**）；也可在 www.analog.com 的参数搜索表格中查看，只需单击 **View**

parametrics for recommended in-amps（**查看推荐仪表放大器参数**）。在工具内部按规格筛选的优点是可以根据所选增益来显示相应的性能指标，便于直接比较哪一款器件更适合设计。

10
Recommended

Recommended in amps, based on settings specified in left panel

[Filter this list by specifications](#)

Part	Description
AD8422	High Performance Low Power Rail-to-Rail output In-Amp
AD8421	High Performance Low Noise In-Amp
AD8420	Wide supply range, micropower, ICF In-Amp
AD8226	Wide Supply Rail-to-Rail output In-Amp
AD8227	Wide Supply Rail-to-Rail output In-Amp
AD8426	Dual Wide Supply Rail-to-Rail output In-Amp
AD8220	JFET input, Rail-to-Rail output In-Amp
AD8224	Dual JFET input, Rail-to-Rail output In-Amp
AD8253	Pin/Software Programmable Gain = 1, 10, 100, 1000 In-Amp
AD627	Wide supply range, micropower, 2 op amp In-Amp

View parametrics for [recommended in-amps](#)

View parametrics for [all in-amps](#)

14284-007

图9. 钻石图工具产生的推荐仪表放大器列表

结语

利用仪表放大器进行设计时，为了避免意外饱和，必须对钻石图有基本了解。虽然钻石图非常有用，但它取决于电路配置，因此，必须根据设计中的特定电路条件来生成钻石图。对于新设计，把钻石图作为仪表放大器选择的第一

准则可节省时间；但在过去，很难通过这种方式来缩小设计选择范围。利用仪表放大器钻石图工具可以快速评估裕量考虑，使得设计人员可以放心地把注意力转移到性能考虑上。