

Ronald Michallick

General Purpose Amplifiers

摘要

本应用手册讨论了应用中的压摆率和运算放大器数据表中的压摆率规格之间的差异。虚拟接地（或虚拟零）概念通过假设输入之间的电压差 V_{ID} 为零来简化运算放大器设计。 V_{ID} 必须增大才能生成压摆率。只需超过 100mV 即可达到许多数据表中列出的最大自然压摆率。一些运算放大器整合了压摆增强电路，因此其数据表中的压摆率大于自然压摆率。达到增强压摆率所需的 V_{ID} 可能为数百毫伏。大多数数据表都没有说明存在压摆增强；但是，可以通过检查数据表中的波形图来确定是否存在压摆增强。

内容

1 压摆率定义.....	2
1.1 虚拟接地和压摆率.....	2
2 双极运算放大器压摆率示例.....	2
3 CMOS 运算放大器压摆率示例.....	4
3.1 压摆升压示例 1.....	5
3.2 压摆升压示例 2.....	6
3.3 压摆增强摘要.....	6
4 使用数据表确定增强或无增强的四种方法.....	7
5 压摆率取决于电路信号电平和由反馈网络设置的运算放大器增益.....	10
6 支持正弦波或其他非步进输入需要多大的输出压摆率？.....	11
7 稳定性也会影响观察到的压摆率.....	11
8 总结.....	11
9 参考文献.....	11

插图清单

图 2-1. 简化双极输入级原理图.....	2
图 2-2. 双极 $SR/SR_{[max]}$ 与 V_{ID} 间的关系.....	3
图 3-1. CMOS $SR/SR_{[max]}$ 与 V_{ID} 间的关系.....	4
图 3-2. CMOS 压摆增强简化电路原理图.....	5
图 3-3. 具有增强时的 TLV9001 压摆率.....	5
图 3-4. OPA2991 SR 与 V_{ID} 间的关系（使用对数标度时）.....	6
图 3-5. OPA2991 SR 与 V_{ID} 间的关系（使用线性 SR 标度时）.....	6
图 4-1. TLV9001 过载恢复.....	8
图 4-2. 增益 = 1 时的 LMV831 大信号阶跃响应.....	8
图 4-3. TLV9001 小信号波形.....	9
图 4-4. LMV831 小信号波形.....	9
图 5-1. 具有相同 1V 输出阶跃的两个原理图.....	10
图 5-2. 两个具有 1V 阶跃的波形.....	10

表格清单

表 4-1. 方法 1 中用于确定是否存在增强的器件参数.....	7
表 4-2. 方法 2 中用于确定是否存在增强的器件参数.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 压摆率定义

压摆率是运算放大器中随时间变化最快的输出电压，通常以伏特/微秒 (V/μs) 为单位进行测量。一些低功耗运算放大器以伏特/毫秒 (V/ms) 为单位表示压摆率。数据表压摆率 (SR) 参数是具有大输入信号和单位增益设置的输出电压变化率 (除非另有明确说明)。这一个数值通常是数据表中唯一直接反映压摆率的信息。重要的是要知道，并非所有应用都有这种量级的压摆率。此外还要注意，对于所有输入和配置，压摆率并不是一个恒定值。

1.1 虚拟接地和压摆率

“虚拟接地”概念简化了运算放大器电路的创建和理解。在闭环电路中，运算放大器的大增益使输入电压 (IN+ 和 IN-) 保持相同。输入电压差 (V_{ID}) 假定为零，可简化运算放大器电路的数学计算。在现实中，有三个因素会削弱这个虚拟接地概念。第一个因素是直流失调电压 (V_{OS})。第二个因素是小信号增益。小信号的 V_{ID} 就是 V_{OUT} 除以 A_{OL} (开环增益)。第三个因素是压摆率生成。本应用手册仅重点讨论压摆率。

V_{ID} 必须为非零才能生成压摆率。 V_{ID} 越大，压摆率越大。经过某点后，随着 V_{ID} 增加，压摆率不会再增加。数据表中的压摆率值不受 V_{ID} 进一步增加的影响。

2 双极运算放大器压摆率示例

许多双极运算放大器输入级可简化为图 2-1 中所所示的电路。 V_{ID} ，即 $[IN+]-[IN-]$ 电压，控制偏置电流 (B) 在电流通路 I_1 和 I_2 之间的分配方式。电流 I_1 以 1:1 镜像，以产生输出电流 I_2-I_1 ，该电流可在 $-B$ 至 $+B$ 之间变化。这个输出电流为补偿电容器 (C_C) 充电，并且该充电速率会转化为输出压摆率。

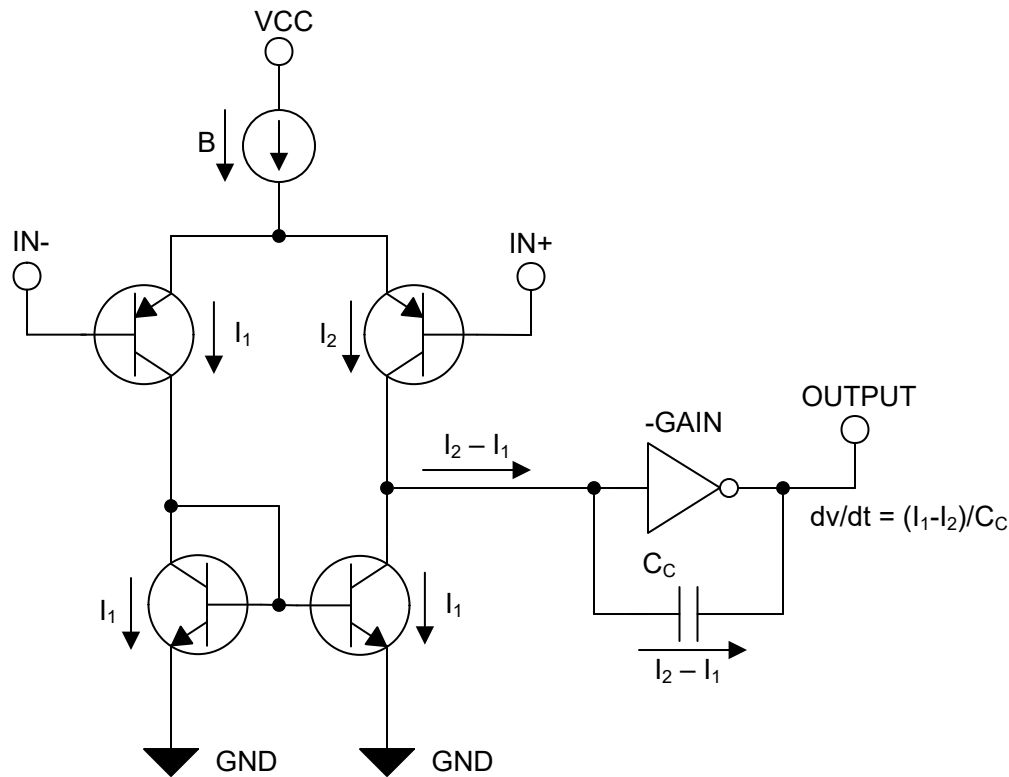


图 2-1. 简化双极输入级原理图

输出压摆率 (SR) 可以从 $-B/C_C$ 至 $+B/C_C$ 之间变化。 B/C_C 的结果是数据表中指定的压摆率。对于某些运算放大器，正压摆率和负压摆率可能稍有不同；在这种情况下，记录的是较慢的压摆率。数据表中的 SR 始终是 SR 的数值，忽略极性。

每个双极运算放大器的电流 B 和电容 C_C 都不同。但是， V_{ID} 与 SR/最大 SR 比率之间的关系在大多数情况下是相似的。这种一致的关系基于两个公式，第一个公式如方程式 1 所示；其中 k = 玻尔兹曼常数， T = 温度 (单位为开尔文)， q = 电子电荷。第二个公式 (方程式 2) 是最大压摆率的百分比。

$$V_{ID} = \frac{k \times T}{q} \times \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (1)$$

$$SR/SR_{[MAX]} = \frac{|I_1 - I_2|}{(I_1 + I_2)} \quad (2)$$

如果在 $V_{ID}=0$ 时 $I_1=I_2$ (更准确地表述为 $V_{ID} = -V_{OS}$)，则会出现零压摆率 (0%)。当 $[I_1$ 和 $I_2]$ 其中一个为零且另一个为全电流时，则会出现最大压摆率 (100%)。这需要 $|V_{ID}| \gg 100\text{mV}$ 。图 2-2 展示了相对于大多数双极运算放大器的最大压摆率， V_{ID} 和压摆率之间的关系。

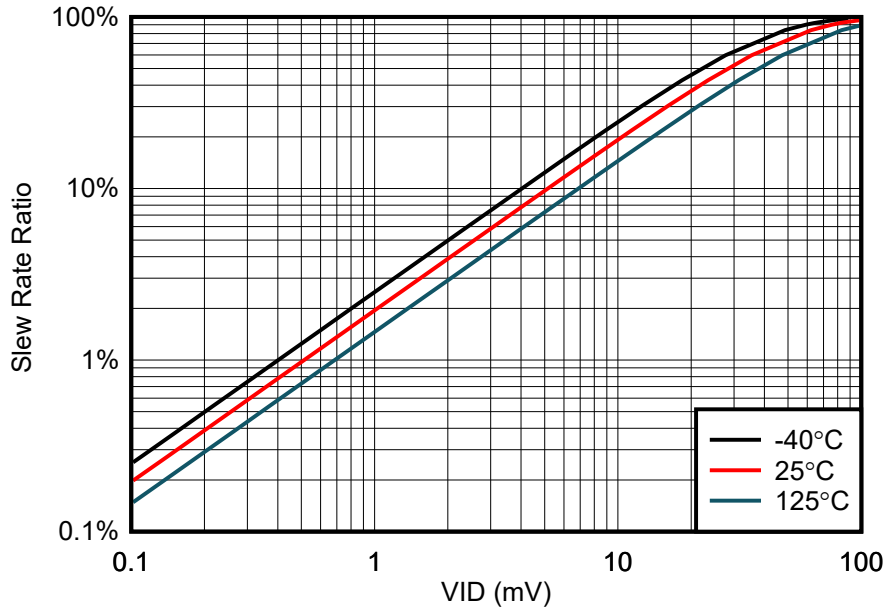


图 2-2. 双极 $SR/SR_{[max]}$ 与 VID 间的关系

双极 $SR/SR_{[max]}$ 与 VID 间的关系图也适用于所有发射器上都有电流源的达林顿双极输入级。第一个发射器上有一些达林顿运算放大器没有电流源。TS321 是第一个发射器上没有电流源的器件示例。对于 TS321 运算放大器， V_{ID} 需要是图表值的两倍。例如， 2mV ($1\text{mV} \times 2$) 提供最大压摆率的 2%。对于 TL074 等 JFET 器件， V_{ID} 需要大八倍；需要 800mV 才能获得最大压摆率。

3 CMOS 运算放大器压摆率示例

CMOS 运算放大器使用 NMOS 和 PMOS 晶体管代替 NPN 和 PNP 晶体管。偏置电流分流取决于电压差的平方加上线性因子。因此，不同的 CMOS 运算放大器之间可能会有一些变化。图 3-1 中绘制的 TLV9001 数据高达 100mV。图 3-1 中的曲线看起来与 V_{ID} 的双极示例类似。大多数其他 CMOS 放大器都显示类似的行为。本应用手册引用了图 3-1，请参阅节 4 和节 5。

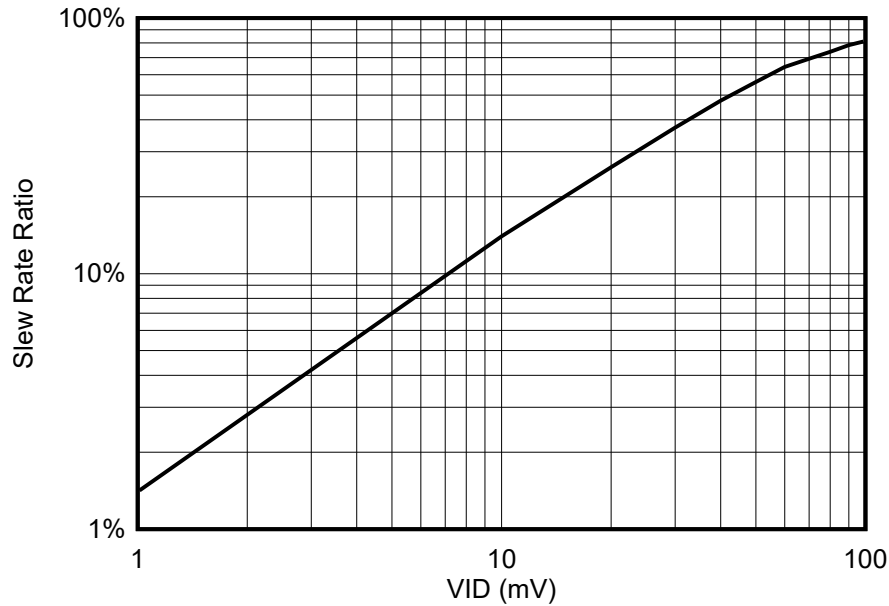


图 3-1. CMOS $SR/SR_{[max]}$ 与 V_{ID} 间的关系

对于 TLV9001，在 $V_{ID} \gg 100\text{mV}$ 情况下，出现 100% 的最大压摆率。但是，内部偏置电流 (B) 和 C_C 电容器提供 $0.5\text{V}/\mu\text{s}$ 的压摆率，而不是数据表中所述的 $2\text{V}/\mu\text{s}$ 。TLV9001 采用压摆增强电路将压摆率提高至 $2\text{V}/\mu\text{s}$ 。图 3-1 是仅基于偏置电流和补偿电容且增强电路未启用时的自然压摆率。

3.1 压摆率提升示例 1

CMOS 压摆增强简化电路原理图 (图 3-2) 包含一个额外的电流源, 当 V_{ID} 变得足够大时, 该电流源会使电容器充电电流增加至超过偏置电流电平。增强功能具有一个死区, 输出电流为零, 而输入 V_{ID} 为低电平。当 V_{ID} 较大时, 增强电流 (I_x) 将随 V_{ID} 输入升高。这种额外电流会显著增加压摆率。升压电路可提供正负电流来提升正负压摆率。

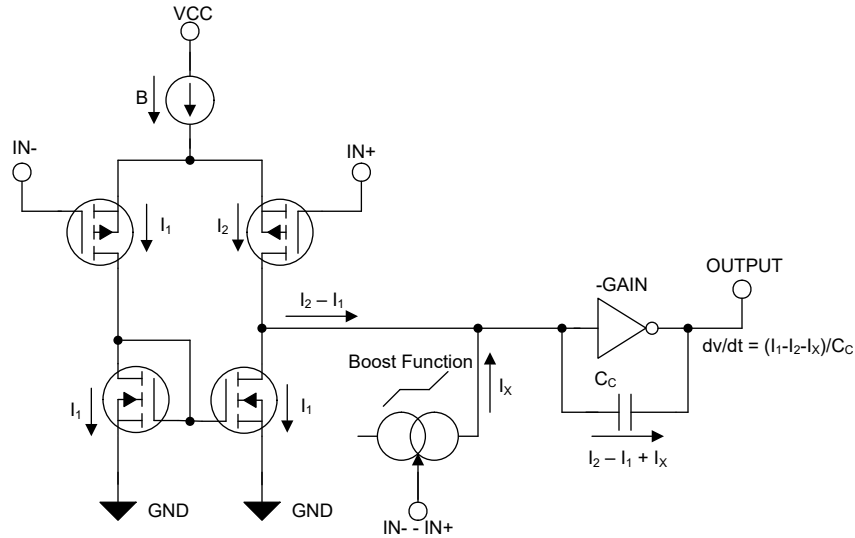


图 3-2. CMOS 压摆增强简化电路原理图

增强电流 (I_x) 与 V_{ID} 可能会成比例, 或它可能在特定的 V_{ID} 电平时跃升。TLV9001 采用图 3-3 中所示的两种方法。负 SR 增强 (红色) 在接近 -140mV 时按比例增加。正压摆率增强 (图 3-3 中显示为黑色) 突然增加至接近 $+270\text{mV}$, 然后按比例升高。无论升压类型如何, 升压电流输出都有限制。对于非常大的 V_{ID} , 压摆率会成为固定值。在 TLV9001 示例中, 较慢的 SR 约为 $2\text{V}/\mu\text{s}$, 与数据表值相符。

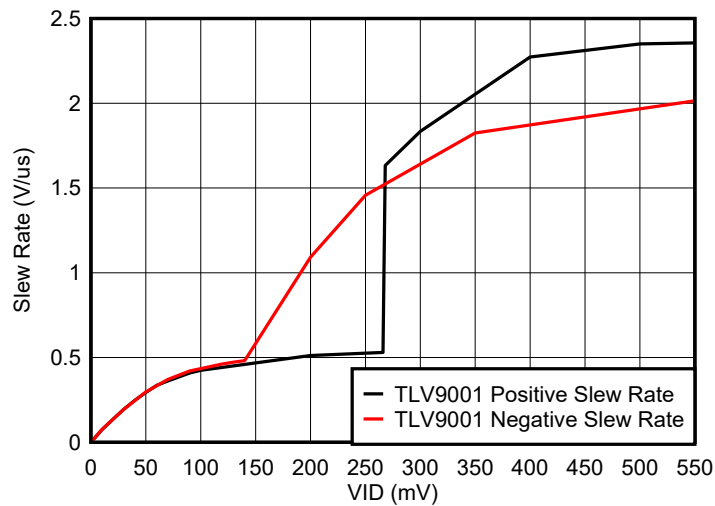


图 3-3. 具有增强时的 TLV9001 压摆率

3.2 压摆升压示例 2

OPA2991 也具有压摆增强，但压摆增强的出现比 TLV9001 要早得多。在大约 60mV 时，压摆增强开始工作，并且初始压摆率较低。随着 V_{ID} 进一步增加，压摆率会在 $V_{ID} = 800\text{mV}$ 时增加至 $32\text{V}/\mu\text{s}$ 。图 3-4 和图 3-5 展示了 OPA2991 压摆率与 V_{ID} 的对数标度和线性标度两种视图。

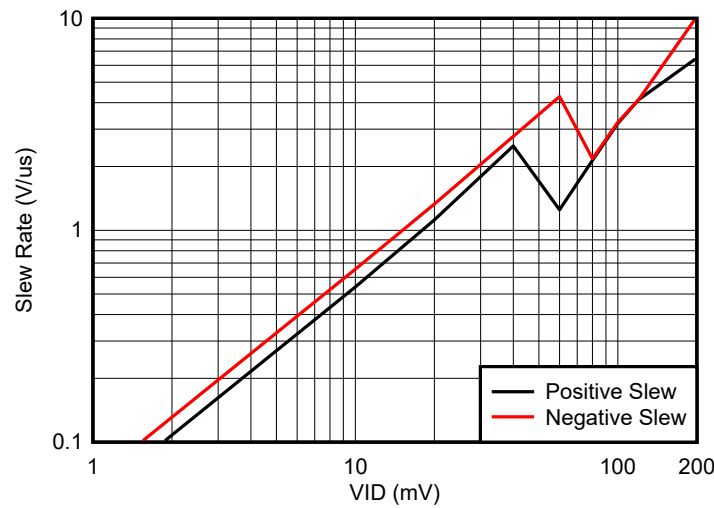


图 3-4. OPA2991 SR 与 V_{ID} 间的关系 (使用对数标度时)

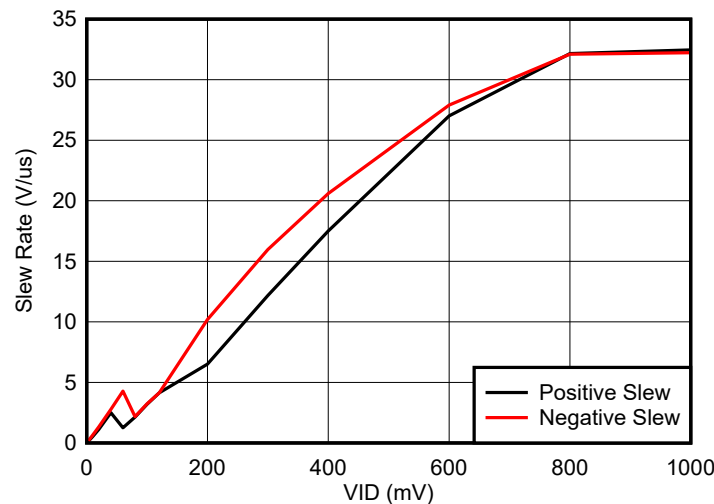


图 3-5. OPA2991 SR 与 V_{ID} 间的关系 (使用线性 SR 标度时)

3.3 压摆增强摘要

大多数运算放大器没有压摆增强和压摆率。要判断运算放大器是否具有压摆增强和压摆率，需要评估列出的数据表值和应用的 V_{ID} 。增强压摆率运算放大器在 V_{ID} 和 SR 之间具有更为复杂的关系。数据表并不总是会提及是否存在 SR 增强或与 V_{ID} 的关系。

有四种方法可以通过数据表推断有无增强。

1. 比较压摆率与增益带宽
2. 与相似 SR 器件比较静态电流
3. 评估大信号响应
4. 评估小信号响应

节 4 以 LMV831 和 TLV9001 的数据表为例，深入介绍了这四种方法。

4 使用数据表确定增强或无增强的四种方法

方法 1：比较压摆率与增益带宽

第一种方法是将以 $V/\mu s$ 为单位的压摆率 (SR) 与以 MHz 为单位的增益带宽积 (GBWP) 进行比较。如果 $SR > GBWP$ ，则器件中可能集成了压摆增强。如果 $SR < GBWP$ ，则器件中不太可能集成增强电路。在 TLV9001 中， $SR > GBWP$ ($2V/\mu s > 1MHz$)，这表明该器件中可能集成了增强电路。在 LMV831 中， $SR < GBWP$ ($2V/\mu s < 3.3MHz$)，这表明该器件不太可能集成增强电路。

表 4-1. 方法 1 中用于确定是否存在增强的器件参数

升压	无升压
器件 TLV9001	器件 LMV831
压摆率 $2V/\mu s$	压摆率 $2V/\mu s$
带宽 1MHz	带宽 3.3MHz

方法 2：与类似 SR 器件比较静态电流

第二种方法是与其他具有相似电源电压最大值和类似压摆率的运算放大器比较每通道静态电流 (I_Q)。 I_Q 和 GBWP 成比例相关。如果 I_Q 非常低或属于较低的双模分布，则应该会进行压摆增强。如果 I_Q 接近中值或高于中值，则应该不会有增强。TLV9001 具有非常低的 I_Q ，因此很可能会有增强。LMV831 的 I_Q 低于中值，但远大于最低 I_Q ，因此使用此测试无法确定有无增强。

表 4-2. 方法 2 中用于确定是否存在增强的器件参数

器件型号	每通道 I_Q (mA)	GBWP (MHz)	SR ($V/\mu s$)	增强 ?
TLV9001	0.06	1	2	有可能
LMV831	0.25	3.3	2	不确定
LMV821-N	0.30	5.6	2	不确定
OPA377	0.76	5.5	2	否
OPA376	0.76	5.5	2	否
TLV376	0.82	5.5	2	否

方法 3：评估大信号响应

使用具有突升和突降的任何大信号图，包括有其他名称（如“过载恢复”）的图表。如果找不到满足这些条件的图表，请使用具有最大输入信号的图表。查看瞬态响应时，请选择 V_{ID} 大于 100mV 的最慢压摆率部分。考虑到电路的噪声增益 (NG)，NG 为 11 时的最慢压摆率部分为 1.1V，而 NG 为 1 时， V_{ID} 为 100mV。如图 4-1 所示，绿色椭圆是最大 V_{ID} 下的最慢压摆率。在这两个波形中都有一个初始较快的压摆率。这种初始上升的压摆率可能是由压摆增强或内部寄生电容馈通所引起。通常，小幅上升由电容馈通引起，大幅上升由压摆增强引起。对于 TLV9001 波形，选定区域 (SR) 为 $0.6V/\mu s$ ，不到数据手册中 $2V/\mu s$ 压摆率的一半。根据此信息，TLV9001 中存在压摆增强。对于 LMV831 波形，所选区域 (SR) 为 $2.2V/\mu s$ 上升和 $1.8V/\mu s$ 下降 SR，接近数据表压摆率 $2V/\mu s$ ；因此，应该不会有增强。

	升压	无升压
器件	TLV9001	LMV831
NG	11	1
V_{IN}	600mV	500mV
所选 SR	$0.6V/\mu s$	$+2.2V/\mu s$ 、 $-1.8V/\mu s$
数据表 SR	$2V/\mu s$	$2V/\mu s$

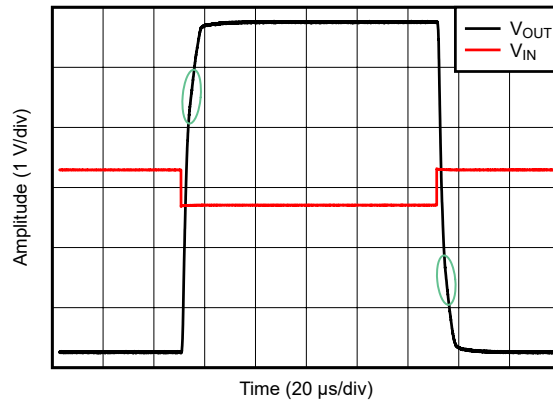


图 4-1. TLV9001 过载恢复

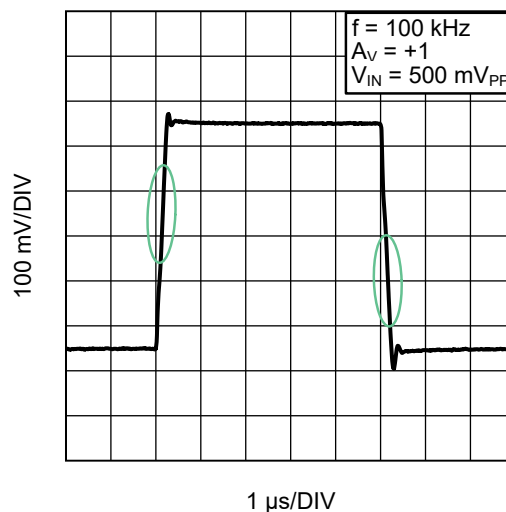


图 4-2. 增益 = 1 时的 LMV831 大信号阶跃响应

方法 4：评估小信号响应

第四种方法是评估小输入信号图中的 SR。使用具有最小输入信号和最高噪声增益的图表。可能需要放大以准确测量分度格放大的波形，从而在任何内部正向容性耦合后获得初始压摆率。TLV9001 波形的时分太长，使得上升和

下降看起来是垂直线，因此无法以任何精度确定波形 SR。TLV9001 波形不能表明有无增强。LMV831 波形是一个非常适合作为指示的波形，因为输入较小，NG 较高，并且放大使得上升和下降时间可供测量。初始压摆率与其余上升压摆率一致，因此可以根据该部分进行评估。绿色椭圆区域的初始 SR 为 $0.25\text{V}/\mu\text{s}$ 。根据图 3-1， 10mV 的 V_{ID} 转换为 14% 的 SR[max]。数据表值 ($2\text{V}/\mu\text{s}$) 的 14% 为 $0.28\text{V}/\mu\text{s}$ 。该波形的小信号压摆率 $0.25\text{V}/\mu\text{s}$ 与计算得出的压摆率 $0.28\text{V}/\mu\text{s}$ 非常匹配。根据这些计算结果，LMV831 器件没有压摆增强。

结果	不确定	无升压
器件	TLV9001	LMV831
NG	1	10
VIN	100mV	10mV
初始 SR	未知	$0.25\text{V}/\mu\text{s}$
数据表 SR × 图 3-1 输出	$1.8\text{V}/\mu\text{s}$	$0.28\text{V}/\mu\text{s}$

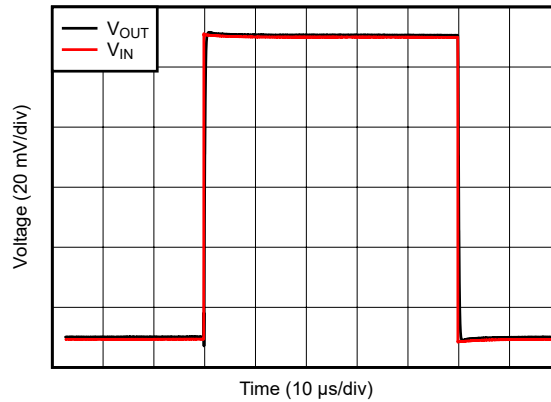


图 4-3. TLV9001 小信号波形

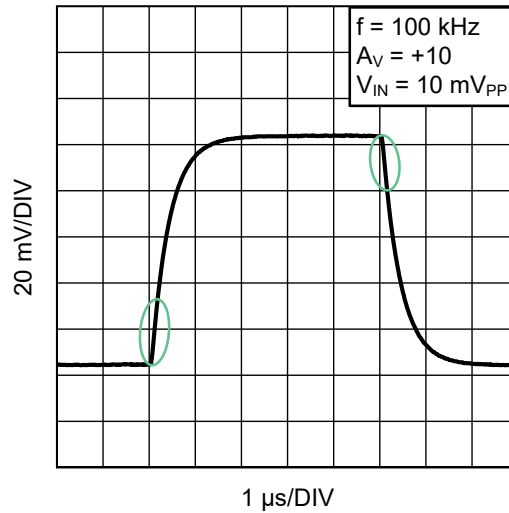


图 4-4. LMV831 小信号波形

5 压摆率取决于电路信号电平和由反馈网络设置的运算放大器增益

图 5-1 有两个可产生 1V 输出阶跃的原理图。在左侧电路中，1V 由大小为 1 的噪声增益放大。在右侧电路中，10mV 由大小为 100 的噪声增益放大。在这些同相电路中，信号增益和噪声增益是等效的。

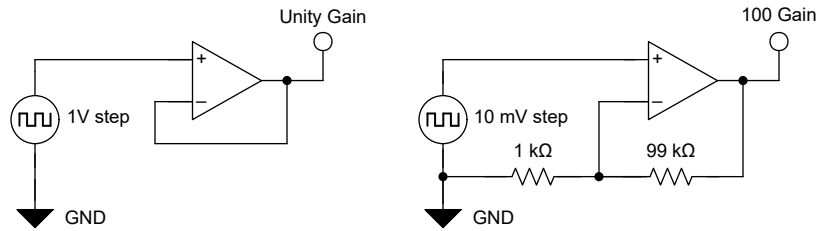


图 5-1. 具有相同 1V 输出阶跃的两个原理图

图 5-1 是根据图 5-1 原理图产生的仿真波形。单位增益 (黑色曲线) 以 $2V/\mu s$ 上升, 与数据表规格相同。100 增益 (红色曲线) 具有较慢的压摆率, 随着电压升高, 压摆率会继续下降。根据图 3-1 输出, 10mV 输入阶跃的初始压摆率为 $70mV/\mu s$, 即 $0.5V/\mu s$ 自然压摆率最大值的 14%。当波形上升一半时, V_{ID} 已降至 5mV。现在, SR 是图 3-1 输出 $0.5V/\mu s$ 的 7%, 即 $35mV/\mu s$ 。

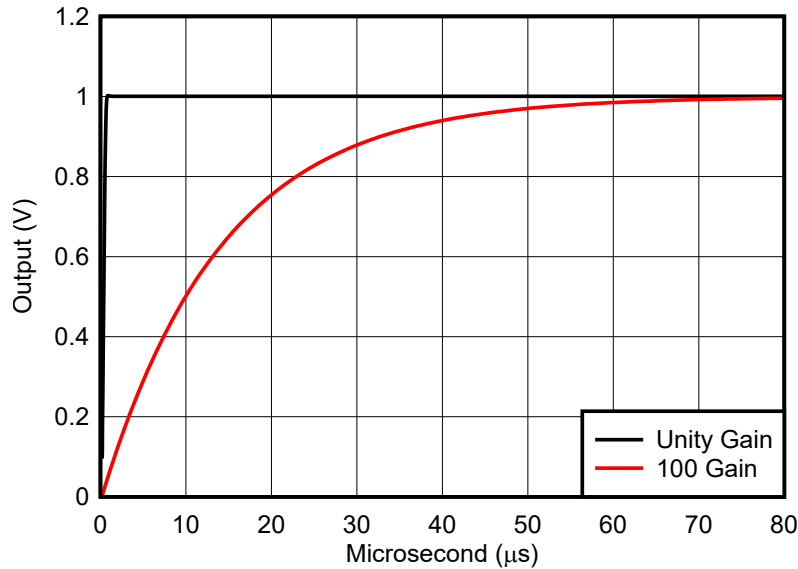


图 5-2. 两个具有 1V 阶跃的波形

即使 TLV9002 器件没有压摆增强, 单位增益压摆率 (自然压摆率 $0.5V/\mu s$) 也比 $G=100$ 曲线快得多。无论是否进行压摆增强, 增益较高的较小输入信号的压摆率必须始终低于增益较低的较大输入信号。

6 支持正弦波或其他非步进输入需要多大的输出压摆率？

方程式 3 展示了输出正弦波的频率 (f) 和峰峰值电压 (V_{PP}) 与峰值压摆率之间的关系。如果运算放大器压摆率不够高，则正弦波变为幅值减小的三角波。对于任何输出波形，压摆率只是波形的一阶导数。通过这些方法可以确定所需的压摆率。

$$SR = V_{PP} \times \pi \times f \quad (3)$$

对于步进输入以外的信号，还应考虑增益带宽积 (GBWP)。应用所需的绝对最小 GBWP 如方程式 4 所示。对于压摆增强器件上的小信号，建议仅使用 GBWP 来为小输入确定足够的运算放大器速度。

$$GBWP = f_{max} \times G_{noise} \quad (4)$$

确定所需的 SR 和 GBWP 后，考虑为了生成该压摆率和增益，要将多大的输入信号分配为 V_{ID} 。选择具有更大 SR 和 GBWP 的运算放大器将减少所需的 V_{ID} ，并可能减小失真。较高的 SR 和 GBWP 具有较高的静态电流。对于低功耗应用，电源电流和交流性能之间必须作出折衷。

7 稳定性也会影响观察到的压摆率

具有 90 度或更大相位裕度的非常稳定的电路具有较长的上升时间，同时因为反馈完全为负，观察到的 SR 较慢。非常稳定的电路优势在于没有过冲。具有 45 度或更低相位裕度的极其稳定和稳定性差的电路具有显著的正反馈效应，会缩短边沿时间并增加观察到的 SR，但代价是出现过冲、振铃或可能的振荡。

8 总结

数据表中的压摆率参数通常是可能的最快输出变化率，以 $V/\mu s$ 为单位。对于低功耗运算放大器，单位可能是 V/ms 。在具有小输入和高增益的应用中，压摆率会降低。需要输入差分电压 V_{ID} 来实现输出压摆率。实现更快的 SR 需要更大的 V_{ID} 。但是， V_{ID} 越大，就越不容易实现虚拟接地运算放大器概念，从而可能导致信号失真增大。最好选择压摆率和带宽比所需高得多的运算放大器来降低信号失真。

9 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [TI 高精度实验室 - 运算放大器压摆率简洁](#) 视频
2. 德州仪器 (TI), [了解运算放大器规格](#) 应用报告
3. 德州仪器 (TI), [TI 高精度实验室 - 运算放大器压摆率 - 实验室](#) 视频

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司