



连续信号处理放大器与零漂技术放大器比较

概述

运算放大器作为各电子系统中的基础器件被广泛应用，且发挥着举足轻重的作用。同时，为适应不同的设计挑战，放大器的种类也非常的多，现在已经有上千个放大器型号在市面上出售。同时，从技术上看，放大器关键指标中的失调电压(V_{os})、失调电压温漂(TCV_{os})、偏置电流(I_b)、带宽、压摆率($Slew Rate$)、噪声、供电电压及供电电流却互相之间需要做折衷。工程师在选择和使用放大器的时候就变得比较麻烦。对于精密运算放大器，自然会追求其失调电压及其漂移的优良特性，此时往往遇到两个选择：是选择传统的连续信号处理放大器还是零漂放大器。这两种放大器究竟有什么区别？是否适合于目标系统呢？

精密运算放大器一般指的是失调电压在 1 mV 以内，失调电压温漂在 $2 \mu V/^\circ C$ 以内的运算放大器。这些都是很好的指标，对达到系统的性能至关重要。而现在在国内市面上达到这个性能指标的运算放大器，除治精微的 ZJA3000 系列以外，均为零漂类型的放大器。现阶段，因为零漂运算放大器只能适用于直流或者低频的应用，极大地限制了使用范围，所以有些厂家直接将其零漂的原理隐藏起来。但工程师却可能因为这种信

息隐瞒选错放大器，导致项目失败或者系统存在可靠性隐患的情况下出厂。本文从原理上探讨了两种运算放大器的差异及适用范围，以解除工程师在此方面的困惑。

ZJA3000 系列产品具有极低的失调电压(优于 $35 \mu V$)、失调电压漂移(优于 $0.5 \mu V/^\circ C$)、输入电流(优于 $25 pA$)和电压噪声 ($11 nV/\sqrt{Hz} @ 1k Hz$)，非常适用于精密传感器接口、电压放大、电流至电压转换、有源滤波器等信号调理电路。

ZJA3000 系列产品可以工作在很宽的供电电压范围，双电源从 $\pm 2.25 V$ 至 $\pm 18 V$ ，单电源从 $4.5 V$ 至 $36 V$ 均可。

ZJA3000 系列产品具有 MSL-1 额定性能，符合最严格的组装工艺标准。在 $-40^\circ C$ 至 $125^\circ C$ 的额定温度范围内提供性能保证，适合要求最严苛的工作环境。

ZJA3000 系列产品具体封装形式如下：

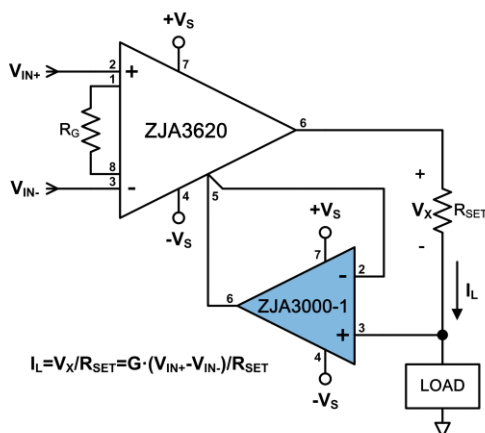
ZJA3000-1 (单通道)：SOIC-8，MSOP-8

ZJA3000-2 (双通道)：SOIC-8，MSOP-8

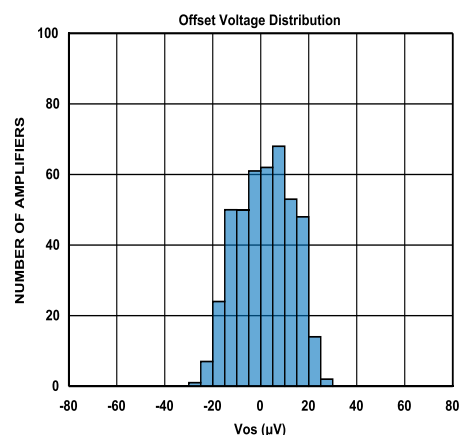
ZJA3000-4 (四通道)：SOIC-14，TSSOP-14

典型应用图

电流至电压转换电路



25 °C 失调电压分布，SOIC-8 封装



目录

概述.....	1	零漂放大器的噪声较大	6
典型应用图.....	1	零漂放大器的可用带宽	7
典型特性	1	零漂放大器的线性度差	8
版本修订记录（修订版 A）	2	零漂放大器不适合做通道间切换的应用	9
介绍	3	参考文献.....	10
原理介绍	3	相关器件.....	11
零漂放大器偏置电流毛刺	5		

版本修订记录（修订版 A）¹

2022 年 11 月——修订版 A

¹本文中由上海治精微电子有限公司提供的信息是准确和可靠的。但是，上海治精微电子有限公司对其使用不承担任何责任，也不对任何使用它可能导致侵犯第三方专利或其他权利的情况承担任何责任。规格如有更改，恕不另行通知。本文中的商标和注册商标是其各自所有者的财产。对本文中任何专利或专利权，上海治精微电子有限公司均未通过暗示或其他方式授予许可。

介绍

放大器是模拟电路的基本器件和主要组成部分之一，也是系统设计的常用 IC，已经经历数次技术演进。而放大器的起点是基于双极性的连续信号处理放大器，比如经典的 741, NE5532, OP07, OP27 等均采用此技术。但随着性能的演进，基于零漂技术（zero drift）的放大器出现，它们有其技术特长，但往往不可避免具备这类技术在使用时需要注意的地方。

现在国内运算放大器的现状是，对于失调电压在 1 mV 以内，失调电压温漂在 $2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 以内的运算放大器除 ZJA3000 以外，基本都是采用零漂技术实现的。对于基于经典放大器的设计电路做替换，尤其是对于安全性、可靠性要求比较严格的场合，比较稳妥的办法是继续使用连续信号处理的放大器，如 ZJA3000，而不是去冒险采用零漂的放大器。基于成本的考量采用零漂放大器则更危险，因为经过优化设计的零漂放大器其实也并不便宜，更何况放大器在系统的成本中占比并不大。

原理介绍

图 1 是经典放大器 OP07 的原理图，可以看到其输入级、中间级和输出级均为经典的三极管，对信号进行连续处理。ZJA3000 使用的就是基于类似技术并做精心封装后修调以达到设计目标，从而可以完美地用于这些放大器的适用系统和应用中。

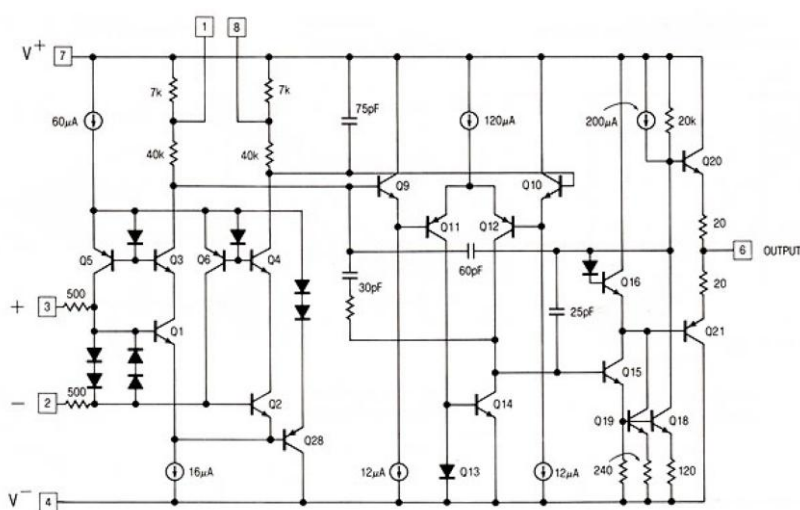


图1. 经典连续信号处理放大器 OP07 原理图

零漂技术主要是斩波(chopping)、自稳零(auto-zero)技术或者两者的组合。图2是斩波放大器技术原理示意图, 它是以输入端反向相加来实现误差消除的; 图3是自稳零技术的框图, 它是将误差存储并消除来实现的, 所以用到电容。可以看到它们的特点是可以对放大器自身的漂移做实时补偿, 从而实现温度漂移较小的目的。这是这项技术的初衷也是其特长所在。

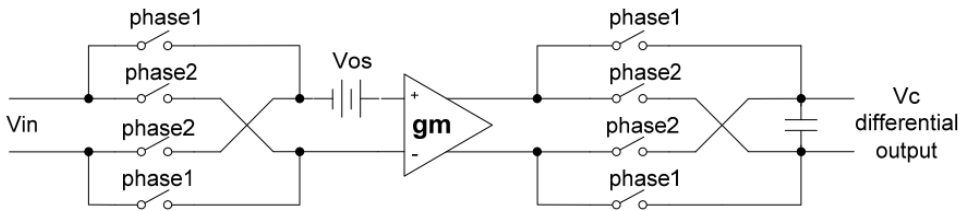


图2. 斩波放大器原理图

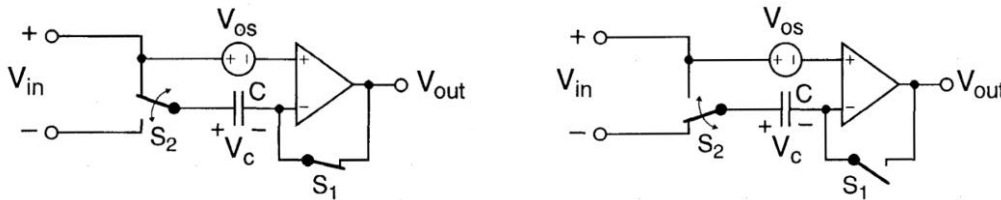


图3. 自稳零放大器的两个阶段

从频域看这两种零漂技术的差异也很明显。图4(b)是斩波技术的频谱图, 可以看到它将原来的低频噪声搬到了斩波频率及其谐波附近。图4(c)是自稳零技术的频谱图, 它没有将频谱完全搬移, 但低频噪声有所下降、高频噪声有所抬升。图4(d)是某款业界用量很广的零漂放大器采用的技术, 它采用了斩波和自稳零结合的结构。

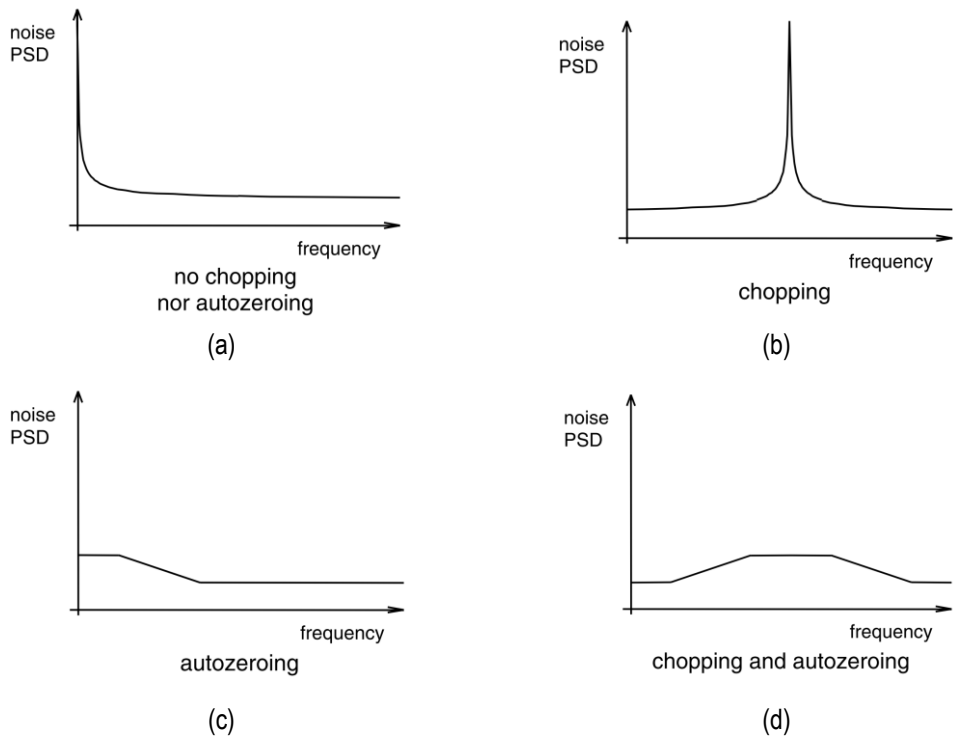


图4. 主要零漂技术的频谱图

不管是斩波技术还是自稳零技术，它们的输入级均使用了开关切换的技术。使用开关的一个很大的问题是 CHARGE INJECTION。其导致的原因如图 5 所示，这是半导体的原理导致的。在开关处于闭合、导通阶段时没有问题，但此时存储的电荷在开关处于关断阶段时向源极 S、漏极 D 扩散，从而导致泄漏等问题。

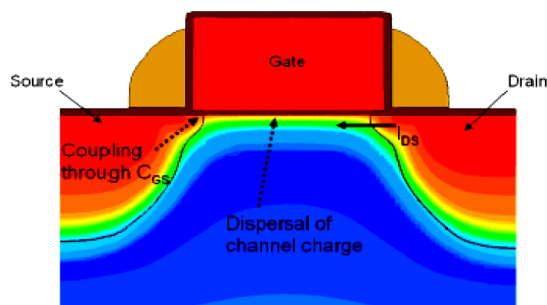


图5. Charge Injection 原理图

同时也正因为零漂技术放大器使用了开关切换的过程，有下面一些使用的问题：

- 零漂放大器输入级会有瞬态的毛刺，表现形式是偏流的毛刺；
- 零漂放大器的开关频率会直接馈通到输出端，表现为一个周期性噪声；
- 零漂放大器从原理上其线性度指标，如交调指标 IMD、总谐波失真指标 THD+N，等比较差，所以芯片厂有时候往往并不提供给工程师；
- 其噪声性能也会比较差，零漂技术为获得其较好的低频噪声，其噪声会在高频出现，且比较大，所以零漂技术放大器的厂商往往将这些产品的频谱只显示到内部斩波或者自稳零频率附近，而更高频率的噪声频谱往往不提供；
- 而为满足系统的需求或者达到跟连续信号处理放大器一样的噪声，零漂技术放大器不得不在其输出端使用滤波器，这样系统设计变得复杂，可用频率范围就变得比数据手册上给的带宽窄很多；
- 其饱和恢复时间长、建立时间长。

零漂放大器偏置电流毛刺

零漂放大器偏置电流并不象连续信号处理放大器那样是干净、连续的，反而是表现出周期性的毛刺。其毛刺的严重程度因放大器的设计而不同。而这些毛刺非常容易看到：将放大器接成增益为 1 的放大器，在输出端用示波器即可看到电压输出。图 6 是一个国际公司的零漂技术放大器输出的波形，可以看到其输出的毛刺非常明显，达到 mV 级。

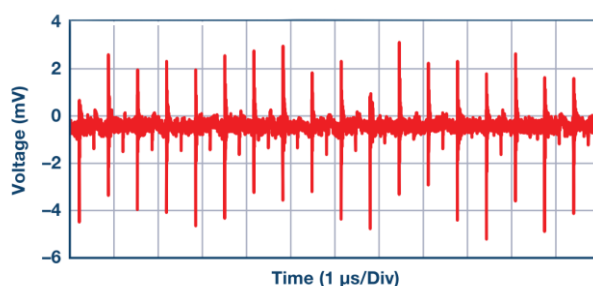


图6. 国际公司零漂放大器偏置电流毛刺在输出端的波形图

如果用更加复杂的电路（放大倍数为 10,000）直接观察其偏置电流，其毛刺过程如图 7，且峰值达到 650 μA 。而没有经过精心设计的零漂放大器的偏置电流毛刺会更大。

同时，放大器的输入电流噪声也会很大，从而对系统的噪声贡献很大，尤其是在信号源输出阻抗较高或者反馈电阻阻值较大时更加明显，甚至成为主要的噪声源。

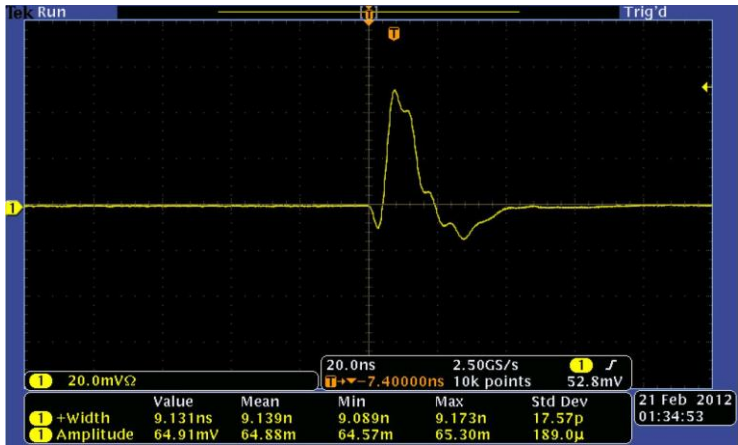


图7. 零漂放大器偏流毛刺图

这些毛刺是周期性的，对于系统设计风险很大。但这些在零漂放大器的数据手册上是完全不会体现出来，因为数据手册上提供的是时间平均的偏置电流值。

具体到使用中会有下面的影响：

- 同相放大输入：信号源的输入阻抗不能太高，否则毛刺会很高。当放大器与输出阻抗较大的传感器（如应变片、热电阻等）接口时会造成很大的问题。
- 反相放大输入：反馈电阻阻值较大的时候会造成毛刺和噪声很大。这些在构建电流到电压转换 TIA、有源滤波器时限制很大，且会降低系统的性能。

而连续信号处理的放大器 ZJA3000 偏置电流非常干净，而且非常优秀：在室温下优于 20 pA，在 -40 $^{\circ}\text{C}$ 至 125 $^{\circ}\text{C}$ 整个温度范围内保证在 5 nA 以内。ZJA3000 可以替代 JFET 运算放大器，且具备比现有很多 JFET 运放高得多的精度及温漂性能。

零漂放大器的噪声较大

零漂放大器的噪声大主要是下面几个因素引起的：

- CMOS 工艺的较大噪声并没有消除，仅仅是搬移；
- 开关频率馈通引起的噪声，这一般是放大器自身的开关频率及其谐波；
- 由于开关切换导致的偏置电流毛刺引起的高频噪声。

对于噪声搬移已经在图 4 中看得很明白了。这基本决定了零漂放大器只能用于直流及低频的应用中。本文会在后面再专门论述。

零漂放大器的开关频率引起的噪声一般需要滤除。但一个不确定性是其开关频率在各芯片之间有较大差别（根据工艺和设计不同而有差异，一般可以按照其典型频率 $\pm 20\%$ 来考虑），而这个公差一般芯片厂并不提供，所以工程师只能留出较大的余量以保证设计的鲁棒性。

偏置电流的毛刺在时域（图 6 和图 7）已经看得很清楚了，其频域特性如图 8 所示，可以看到高频毛刺非常清晰。

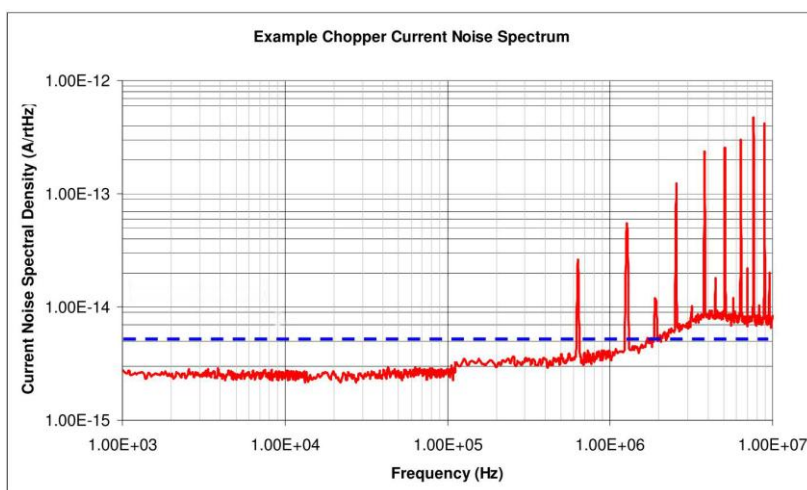


图8. 斩波放大器的典型电流噪声频谱

零漂放大器的可用带宽

零漂放大器的带宽从数据手册看跟连续信号处理放大器往往接近，但实际使用中却达不到。这是怎么一回事呢？

这需从它们的电压噪声频谱看，而往往这些产品的电压噪声频谱并没有告诉工程师全部信息：频谱图在斩波或者自稳零频率附近，甚至更低频率即终止，而更宽带的频谱则被隐藏起来了。

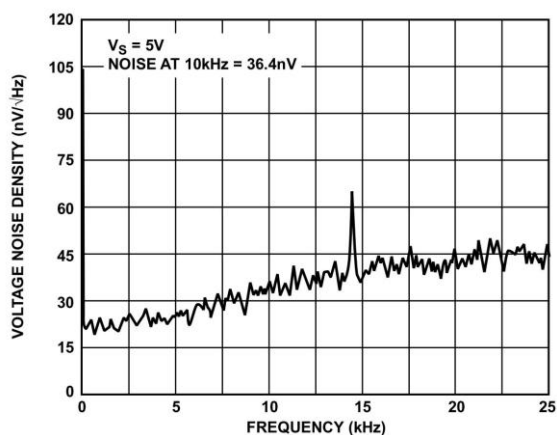


图9. 某国际公司 5 V 供电增益带宽积 2.5 MHz 的零漂放大器噪声频谱只提供到 25 kHz

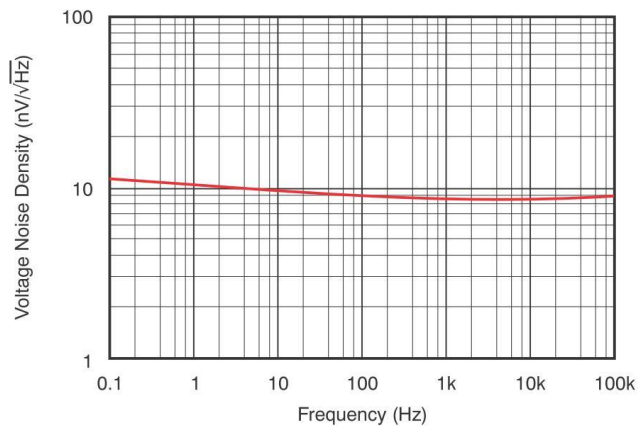


图10. 某国际公司 30 V 供电增益带宽积 2 MHz 的零漂放大器噪声频谱只提供到 100 kHz

而实际上,在更宽频谱范围的电压噪声如图 11 所示。可以看到在斩波或者自稳零频率的更高频段噪声大幅增加,其各次谐波处更是明显。这是跟图 4 的理论分析匹配的,尽管它们是经过精心设计的零漂运放。

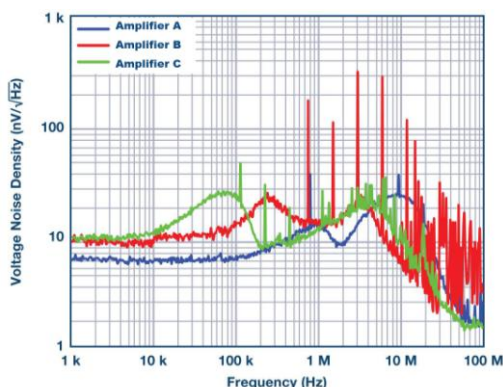


图11. 国际公司三款经过精心设计的零漂放大器的较宽频率下的电压噪声频谱

在这种情况下,同时也是解决偏置电流毛刺的方法,只能在放大器输出端或者反馈回路中构建滤波器。但这其实就是降低了放大器的可用频率范围。另外一个方法是使用较高的增益。但这两个方法的实质都是降低使用频率以避免斩波、自稳零带来的高频噪声。这与连续信号处理放大器完全不同,也让习惯了用增益带宽积 (GBP) 来做频率估算的工程师带来很大困扰。

所以使用零漂放大器的时候需要注意 GBP 的使用可能并不奏效;零漂放大器实际可用带宽明显低于其数据手册标明的带宽。而如果使用连续信号处理放大器就没有这方面的顾虑。

零漂放大器的线性度差

零漂放大器由于自身原理的限制,导致其线性度,一般是总谐波失真 (THD+N),会比较差。早期的零漂放大器甚至都不提供这个性能。较新的经过精心设计的零漂放大器尽管提供此信息,但其性能跟 ZJA3000 比存在很大差距。

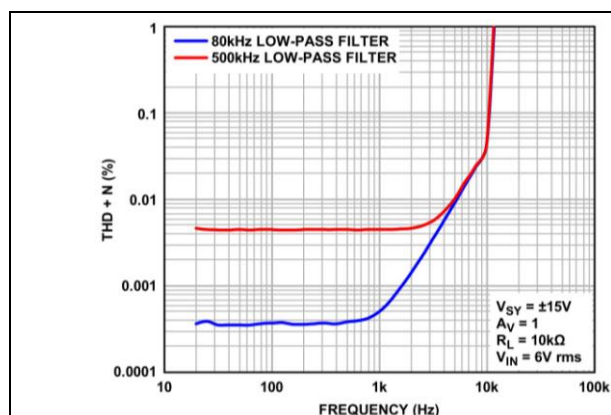


图12. 某国际公司新发布零漂放大器的 THD+N

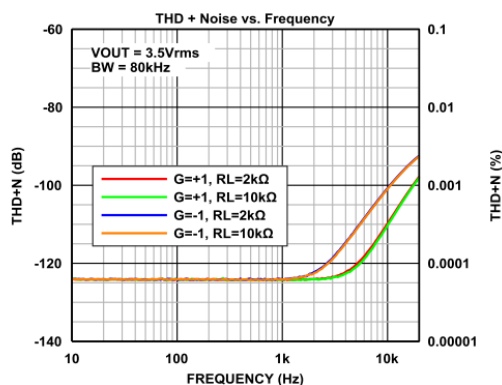


图13. ZJA3000 的 THD+N

图14. 零漂放大器与 ZJA3000 的 THD+N 的比较

从图中可以看到:

- 零漂放大器在输入信号更大、指标相对更好的情况下,其 100 Hz 的 THD+N 在-110 dB 左右,而 ZJA3000 达到-125 dB,完全可以满足专业音响级等对线性度要求高的需求。
- ZJA3000 的良好线性保持频率范围宽,直到音频范围也在-100 dB;而零漂放大器在 5 kHz 即只有-80 dB。

所以对于需要线性放大的应用或者控制回路，零漂放大器将带来很大的困难。比如在电力线继电保护中，往往需要采集高次谐波的信息，如果使用零漂放大器，这些信息将恶化；在高速、多通道数据采集卡中零漂放大器更是不可取。

零漂放大器不适合做通道间切换的应用

零漂放大器，尤其是没有经过仔细设计的零漂放大器，其建立时间和过载恢复时间往往比较长，有些甚至会达到几十 mS。而 ZJA3000 保证在 7 μ S 以内。

型号	正向输入过载恢复(μ S)	反向输入过载恢复(μ S)
ZJA3000	3.5	6.5
零漂放大器 A	12.3	18
零漂放大器 B	650	25,000
零漂放大器 C	40,000	35,000

表1. ZJA3000 与零漂放大器饱和恢复时间对比

这个特性使得零漂放大器在通道切换的应用中会极大拖累系统的通道切换及采样时间或者是控制回路的响应速度。或者使得本来可以使用多通道切换更经济的方案不得不修改为更为昂贵的多通道同步采样的方案。比如在电力线继电保护的一些应用中是需要做通道切换的，如果不小心采用了建立时间、过载恢复时间更长的零漂放大器将造成系统响应时间变慢或者不达标的情况。

总结起来，零漂放大器有其技术特性，比较适合需要非常高的温度稳定性的直流或者低频应用。但在其余更多的场合下，尤其是用于替换传统连续信号处理放大器的时候需要特别小心，而治精微的 ZJA3000 在这些场景下既有优良的直流特性，又有连续信号处理放大器的交流特性，可以实现“无忧”使用或者替换。

	ZJA3000	零漂运放
与经典产品（如 OP07）原理一样？	✓	✗
输入偏流(Ib)有毛刺？	没有	有，且可能很大
输出端需要滤除毛刺？	不用	需要
有用宽带与数据手册一致？	✓	明显低于数据手册
数据手册的噪声频谱全面？	✓	一般会在斩波频率附近截止
线性度（THD+N）好？	✓	不好，一般不提供
建立时间快？	✓	一般较慢
饱和恢复时间快？	✓	一般较慢
适用多通道切换应用场景？	✓	✗
适合安全性要求高的场合？	✓	尽量不要用

参考文献

1. ZJA3000 datasheet
2. OP07 LTC datasheet
3. “Zero-Drift Amplifiers: Now Easy to Use in High Precision Circuits”, Analog Dialogue 49-07, July 2015
4. “Intrinsic Noise Sources in Chopper Intrinsic Noise Sources in Chopper Amplifiers”, TI
5. “A 3 μ V-Offset Operational Amplifier with 20nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ Input Noise PSD at DC Employing both Chopping and Autozeroing”, ISSCC 2002 / SESSION 23 / ANALOG TECHNIQUES / 23.4

相关器件

型号	描述	注释
ZJA3000-1/2/4	36 V 精密运放	单路、双路及四路，3 MHz 带宽，35 μV 失调电压，0.5 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ，SOIC/MSOP-8，SOIC/TSSOP-14 封装
ZJA3620	36 V 精密仪表放大器	125 μV 最大失调电压，2 nA 最大输入电流，高共模抑制比，SOIC-8 封装
ZJA3600	36 V 精密仪表放大器	25 μV 最大输入失调电压，50 μV 最大输出失调电压，最大输入电流 100 pA，共模抑制比大于 110 dB，增益误差小于 0.0005 %，SOIC-8 封装