

利用高带宽、精密 JFET 运算放大器 简化跨阻应用

Raphael Puzio, Luis Chioye



现代 JFET 输入运算放大器（运放）同时具有高输入阻抗、出色的直流和交流性能、低噪声、高带宽和宽电源电压范围，因此成为跨阻运算放大器 (TIA) 应用的自然之选。TIA 是一种电流到电压转换器，通常用作光电二极管等光学传感器的前端，常见于光线路卡、亮度传感器、PM 2.5 检测器及其他更多应用。硅光电二极管会随光线产生输出电流并呈线性变化，其光电流的范围通常从几皮安到几毫安不等。JFET 运算放大器同时具有高输入阻抗、低输入偏置电流（室温下为几皮安）和极低的电流和电压噪声，使其可用于精密的高分辨率光电二极管应用。此外，JFET 运算放大器具有较宽的工作电压范围，并涵盖宽范围的光电二极管输出电流，这一点在 TIA 应用中十分有用，因为这提高了系统的整体分辨率和准确性。图 1 显示了典型的光电二极管跨阻应用。

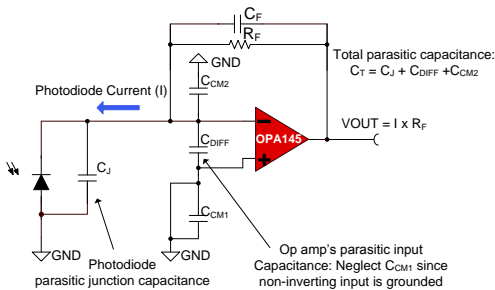


图 1. 光电二极管跨阻放大器

运算放大器上的反馈电阻器 (RF) 利用欧姆定律将光电二极管电流 (I) 转换为电压 (VOUT)，如公式 1 所示：
$$V_{OUT} = I \times R_F \quad (1)$$

反馈电阻器 (RF) 确定跨阻运算放大器的增益，反馈电容器 (CF) 确定电路的闭环带宽。此外，反馈电容器 (CF) 是实现稳定性所必需的，同时还用于补偿运算放大器反相输入的总寄生电容 (CT)：光电二极管结电容 (CJ) 和运算放大器输入电容 (CDIFF + CCM2)。

跨阻运算放大器增益、带宽和稳定性

在为光电二极管 TIA 应用选择运算放大器时，必须仔细考虑以下三个因素，它们决定了实现电路稳定性所必需的运算放大器最小增益带宽积 (fGBW)：TIA 所需的 V/I 增益、所需的闭环 TIA 带宽和光电二极管的寄生结电容 (CJ)。

运算放大器的稳定性与其闭环增益和相位频率响应有关。闭环增益定义为运算放大器的开环增益 (AOL) 与运算放大器的反馈系数 (β) 的乘积，即定义为 $AOL \times \beta$ 。图 2 显示了典型 TIA 的开环增益 (AOL) 和 $1/\beta$ 图的波特图。有关稳定性分析和仿真的更多信息，请参阅 TI 精密实验室 - 运算放大器：稳定性 - 实验室视频系列。

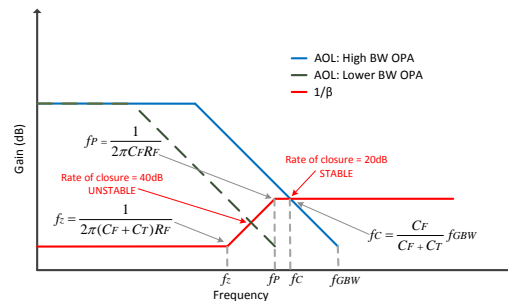


图 2. 跨阻运算放大器电路的 AOL 和 $1/\beta$ 图

图 2 的 $1/\beta$ 曲线在其频率响应上显示了一个零点 (f_z) 和一个极点 (f_p)。在零点 (f_z) 以上， $1/\beta$ 曲线以每十倍频程 +20dB 的速率增加。在极点 (f_p) 以上的频率， $1/\beta$ 曲线保持平坦。在频率 f_c 处， $1/\beta$ 曲线与 AOL 曲线相交，如公式 2 所示：

$$f_c = \frac{C_F}{C_F + C_T} f_{GBW} \quad (2)$$

在公式 2 中， f_{GBW} 是运算放大器的单位带宽增益积。通过分析曲线相交时 AOL 和 $1/\beta$ 的接近速率，可以确定电路的稳定性。对于这种方法，一个简单的经验法则是接近速率必须等于 20dB 才能获得最佳稳定性。因此，为了保持稳定性，AOL 曲线必须在 $1/\beta$ 曲线平坦时与其相交（假设运算放大器单位增益稳定）。如图 2 中较低带宽的运算放大器 AOL 曲线所示，如果 AOL 曲线在 $1/\beta$ 曲线上升时与其相交，则电路可能会不稳定，从而导致许多不利的电路情况。公式 3 给出了避免出现这些问题的必要条件：

$$f_c > f_p \quad (3)$$

将 f_c 和 f_p 的方程式代入方程式 3 提供的不等式，并求解放大器单位带宽增益积 (f_{GBW})，即可得到一个有用的方程式。

公式 4 用于确定放大器最小带宽要求，以确保 TIA 设计的稳定性。因此，更高带宽的放大器支持更高增益和带宽的 TIA 电路，同时还可承受更高的光电二极管寄生电容并保持稳定。不妨设想一种具有以下规格的光电二极管应用案例：跨阻放大器增益为 50K V/A、跨阻放大器带宽为 1MHz，且光电二极管结电容 (Cj) 为 100pF。

$$f_{GBW} > \frac{C_T + C_F}{2\pi R_F C_F} \quad (4)$$

为了进行比较，不妨设想实施两种具有不同带宽的运算放大器：OPA140 具有 11MHz 的增益带宽积，而 OPA828 则具有 45MHz 的带宽积。利用前面推导出的最小带宽方程式，跨阻运算放大器的最小 fGBW 约为 37MHz。使用单级结构时，OPA140 是不稳定的，如图 3 所示。

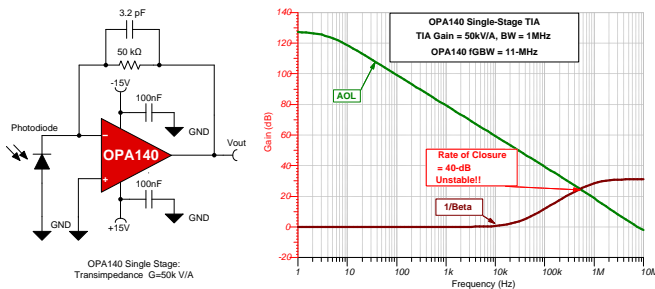


图 3. 单级 OPA140 (f_{GBW} = 11MHz) 稳定性分析 (不稳定)

为了满足 TIA 要求，需要使用双级级联 OPA140。将一个具有 10kΩ 较低增益的跨阻级与一个 5V/V 同相增益级进行级联，如图 4 所示。

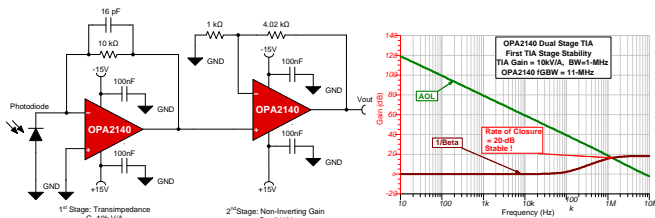


图 4. 另一种两级 OPA140 TIA 放大器 (稳定)

相比之下，具有较高 f_{GBW} 的 OPA828 能够在 1MHz 带宽下支持 50k V/A 的 TIA 增益，同时使用图 5 所示的单级结构提供 55 度的相位裕度。相较于采用相似精度的两个低带宽放大器构建的双级结构版本，采用高带宽精密运算放大器的单级 TIA 可提供更好的噪声性能和精度，因为只有一个放大器会在系统中产生噪声、失调电压和漂移误差。这大大简化了您的设计，同时减少了组件数量、简化了布线并缩小了解决方案尺寸。

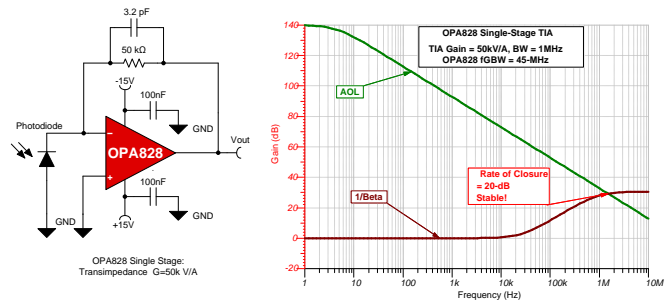


图 5. 单级 OPA828 (f_{GBW} = 45MHz) TIA 稳定性分析 (稳定)

总结

现代 JFET 运算放大器集高输入阻抗、出色的噪声性能、高带宽和宽输出电压范围等特性于一体，因此在高增益、高分辨率跨阻光电二极管电路中使用 JFET 放大器是最佳选择。

表 1. TIA 运算放大器

说明	运算放大器
36V、高速 (45MHz GBW 和 150V/μs SR)、低噪声 (4nV/√Hz) RRO JFET 运算放大器	OPA828
5.5MHz、高压摆率、低噪声、低功耗、RRO 精密 JFET 运算放大器	OPA145
低失调电压、低漂移、低噪声、11MHz、36V JFET 输入 RRO 运算放大器	OPA140

表 2. 相关文档

类型	标题
应用简介	Green-Williams-Lis: 改进的运算放大器 Spice 模型
应用报告	电路设计指导手册: 跨阻放大器

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn上或随附TI产品提供的其他可适用条款的约束。TI提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司