

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 www.analog.com/CN0397。

连接/参考器件

AD7798	3 通道、低噪声、低功耗、16 位、 Σ - Δ 型 ADC，内置片内仪表放大器
AD8500/ AD8502	单通道/双通道、低功耗、精密 CMOS 运算放大器
ADR3433	低功耗、高精度、3.3 V 基准电压源

适用于智能农业的超低功耗光识别系统

评估和设计支持

电路评估板

[CN-0397 电路评估板 \(EVAL-CN0397-ARDZ\)](#)

[ADICUP360 评估板 \(EVAL-ADICUP360\)](#)

设计和集成文件

[原理图、布局文件、物料清单](#)

电路功能与优势

图 1 所示电路使用三个光电二极管，它们对不同波长（红、绿、蓝）敏感，用以测量对植物光合作用有效的光谱上的光强度水平。测量结果可用来优化光源以满足特定植物的需求，

提高生长率，以及最大程度地减少能量损失。

本电路采用三个精密电流电压转换级，它们驱动一个具有三路差分输入的单电源、低功耗、低噪声、16 位、 Σ - Δ 型模数转换器 (ADC)。

该电路不同于传统方法，没有任何机械和光学组件，仅使用电气元件来实现相同的目标。

电路典型功耗低于 10 mW，非常适合电池供电的便携式现场应用。

印刷电路板 (PCB) 采用 Arduino 兼容扩展板尺寸设计，并与 Arduino 兼容平台板 [EVAL-ADICUP360](#) 对接，便于快速开发原型。

Rev. 0

Circuits from the Lab® reference designs from Analog Devices have been designed and built by Analog Devices engineers. Standard engineering practices have been employed in the design and construction of each circuit, and their function and performance have been tested and verified in a lab environment at room temperature. However, you are solely responsible for testing the circuit and determining its suitability and applicability for your use and application. Accordingly, in no event shall Analog Devices be liable for direct, indirect, special, incidental, consequential or punitive damages due to any cause whatsoever connected to the use of any Circuits from the Lab circuits. (Continued on last page)

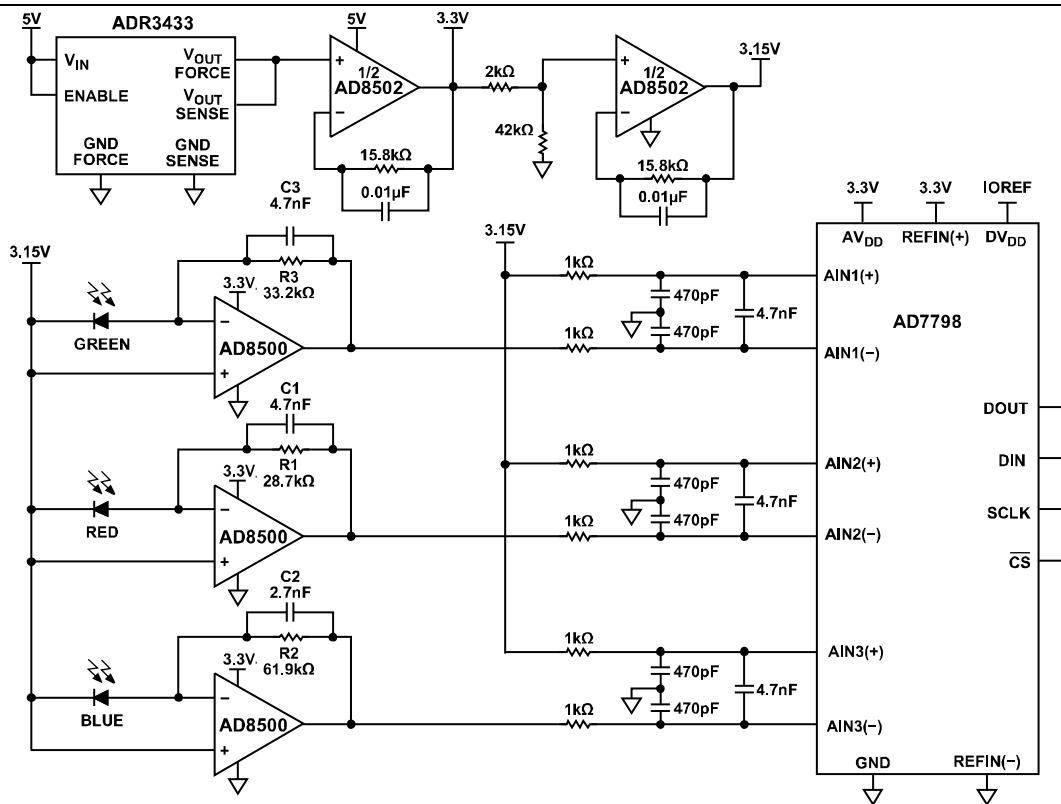


图1. 超低功耗、单电源、16 位电压输入 ADC (原理示意图, 未显示所有连接和去耦)

电路描述

简介

虽然植物能在整个可见光谱上发生光合作用，但其对红光和蓝光波长的响应较大，对绿光波光的响应较小，参见图 2 中的光合作用有效辐射 (PAR) 曲线。

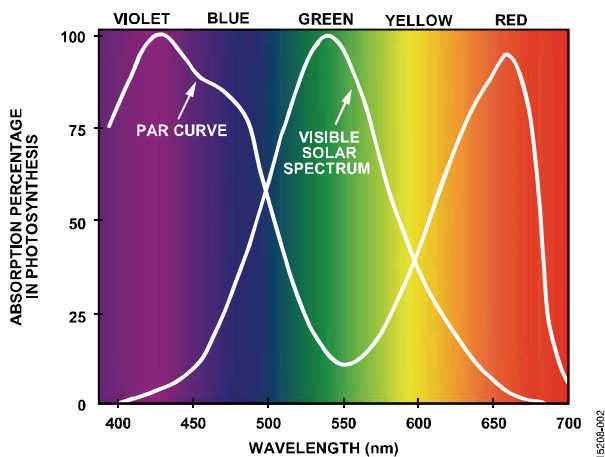


图2. 典型 PAR 曲线和可见光谱

绿光光谱大部分被树叶反射，红光和蓝光光谱则被吸收并用于光合作用。根据此数据，光检测电路可以设计来测量能被植物利用的波长上的光强度，并优化光源以实现最快的生长率。

本应用选择的光电二极管支持测量植物光合作用所需的蓝光和红光波长，也能测量大部分未被使用的绿光和黄光波长，使得用户能够优化其照明系统的效率。

本电路借助 Everlight Americas, Inc (3220 Commander Dr., Suite 100, Carrollton, TX 75006) 的光电二极管进行测试。本电路能够测量传感器特定波长的光。本应用所用的光电二极管在 470 nm (蓝光: CLS15-22C/L213B/TR8)、550 nm (绿光: CLS15-22C/L213G/TR8) 和 620 nm (红光: CLS15-22C/L213R/TR8) 时具有峰值灵敏度，偏离峰值时急剧滚降。

本应用所用的光电二极管具有高分流电阻，工作在光伏模式下 (零偏置) 以使暗电流引起的误差最小。

电流电压转换

选择偏置电流非常低的合适放大器对本应用很重要，因为光电二极管输出可能只有数百皮安，大输入偏置电流会引入相当大的误差。

用作跨阻放大器的 AD8500 是一款低功耗精密 CMOS 运算放大器，最大电源电流仅 1 μ A。AD8500 的最大失调电压为 1 mV，典型输入偏置电流为 1 pA。因此，低功耗和低输入偏置电流特性使 AD8500 成为最佳选择。

三个 AD8500 电流电压转换器以 3.15 V 的共模电压工作。3.15 V 共模电压使得二极管阴极可以连在一起, Hamamatsu S7505-01 等三通道二极管封装就是这种情况。

二极管电流为 0 时, 3.15 V 共模电压在 AD8500 级的输出端提供 0.15 V 裕量。因此, 当二极管电流随着光强度提高而增大时, AD8500 级的输出信号从 3.15 V 向地摆动。

选择适当的增益电阻 R1、R2 和 R3, 使得在满量程强度时, AD8500 输出信号始终高于 +0.15 V。这样, 总峰峰值输出摆幅等于

$$V_{p-p} = 3.15 \text{ V} - 0.15 \text{ V} = 3.0 \text{ V}$$

0.15 V 到 3.15 V 摆幅在 3.3 V 基准电压设置的 AD7798 ADC 范围以内。当 AD7798 工作在缓冲模式时, 输入范围两端至少需要 100 mV 的裕量。

选择各通道的反馈电阻, 使得对于同样水平的光强度, 满量程信号摆幅达到最大。电阻值利用光电二极管的最大期望输出电流和 3.0 V 的满量程值峰峰值信号摆幅计算。

$$R_{FB} = \frac{I_{DMAX}}{V_{FS p-p}}$$

电阻计算详见“光强度转换为电流及通道增益选择”部分。

选择反馈电容来将带宽限制在大约 1 kHz, 并提供良好的相位裕量。跨阻放大器稳定性、带宽和噪声的详细分析参见 [传感器信号调理第 5 章](#)。

电路稳定性和带宽可利用 [ADI 公司光电二极管向导设计工具](#) 进行详细分析。

3.3 V ADC 基准电压由 ADR3433 提供。ADR3433 是一款低功耗、高精度 (0.1%) CMOS 基准电压源, 噪声很低 (0.1 Hz 至 10 Hz 范围内为 25 μV p-p)。该器件的工作电流很低 (最大值为 100 μA), 适合用于低功耗应用。

AD8502 (AD8500 的双通道版本) 用于缓冲 ADR3433 输出和 3.15 V 共模电压。3.15 V 共模电压由电阻分压器产生。

AD8502 每放大器消耗的最大电源电流为 1 μA, 最大失调电压为 3 mV, 非常适合用作缓冲器。

模数转换

ADC 为低功耗、低噪声、完整的 16 位 Σ-Δ 型 ADC AD7798, 提供三路差分输出。ADC 的输出码计算如下:

$$CODE = (2^N \times AIN \times GAIN) / V_{REF}$$

其中:

AIN 为模拟输入电压。

N 为位数。

GAIN 为仪表放大器增益。

V_{REF} 为外部基准电压值。

对于 3.3 V 基准电压, GAIN = 1 且 N = 16, 上述公式可简化为下式:

$$\text{输出码} = (65,535 \times AIN) / 3.3$$

此式在中间电平时产生输出码 32,767, 在满量程时产生输出码 65,535 V。

LSB 大小为 3.3 V / 65,536 = 50.35 μV。

16 位时, 1 LSB 相当于满量程的 0.0015%, 或者 15 ppm FS。

3.15 V 共模电压驱动 ADC 差分输入的正输入引脚, 以免在 ADC 内部缓冲器开启时发生任何裕量问题。

每个 ADC 输入通道还有一个共模和差分滤波器用来降低噪声。共模滤波器由 1 kΩ/470 pF 组合构成, 截止频率为 340 kHz。差模滤波器由 2 kΩ/4.7 nF 组合构成, 截止频率为 17 kHz。

噪声测量

系统有效分辨率由噪声决定, 通常用无噪声码分辨率来表示。

表 1 给出了零电流和满量程电流时板上光电二极管的噪声分布。为实现零电流, 光电二极管被覆盖起来。针对每种条件采集总共 1000 个样本。

表 1. 光强度为零和满量程时的噪声 (1000 样本)

通道	光强度	峰峰值噪声 (LSB)	无噪声码分辨率 (位)
红光	零	1	16.0
红光	满量程	3	14.4
蓝光	零	1	16.0
蓝光	满量程	3	14.4
绿光	零	1	16.0
绿光	满量程	3	14.4

无噪声码分辨率通过下式计算：

$$\text{无噪声码分辨率} = \log_2 \left(\frac{2^N}{\text{峰峰值噪声}} \right)$$

其中：

N 为位数。

峰峰值噪声为噪声分布的扩展。

满量程时测得的最大噪声分布为 3 LSB。代入公式中，求得无噪声码分辨率为 14.4 位。零电平时的噪声小于 1 LSB。

光强度转换为电流及通道增益选择

光电二极管的输出电流与所施加的光强度大致呈线性关系，但红光、绿光和蓝光二极管的相对灵敏度不同。因此，各通道的增益必须单独确定以便选择最佳的反馈电阻值。

近似零偏置（短路）输出电流与光强度（照度）的关系必须根据光电二极管数据手册确定。例如，Everlight CLS15-22C/L213R/TR8 红光二极管指定 86 nA 对应 100 lux，即灵敏度 $S = 86 \text{ nA}/100 \text{ lux} = 860 \text{ pA}/\text{lux}$ 。反馈电阻值 R_{FB} 通过下式计算：

$$R_{FB} = \frac{V_{FSP-P}}{S \times INT_{MAX}}$$

其中：

V_{FSP-P} 为所需的峰峰值满量程输出电压摆幅，3.0 V。

S 为从数据手册获得的灵敏度（单位为 pA/lux，Everlight 红光二极管的灵敏度为 860 pA/lux）。

INT_{MAX} 为满量程时的最大光强度（单位为 lux，直射太阳光为 120,000 lux）。

将红光二极管参数代入公式中得到 $R_{FB} = 29,069 \Omega$ ，电路中的红光通道反馈电阻使用最接近的标准值 28.7 kΩ。

对绿光和蓝光通道可进行类似的计算，分别得到 33.2 kΩ 和 61.9 kΩ 的 R_{FB} 值。

现在就可以写出光强度 (lux) 与 ADC 输出码 $CODE_{ADC}$ 的一般关系式：

$$\text{光强度} = \left(\frac{CODE_{ADC}}{2^N} \right) \times \left(\frac{V_{REF}}{V_{FS-PP}} \right) \times 120,000 \text{ 勒克斯}$$

其中：

$CODE_{ADC}$ 为 ADC 输出码。

N 为 ADC 分辨率 (16)。

V_{REF} 为 ADC 基准电压 (3.3 V)。

V_{FS-PP} 为二极管输出电流最大时运算放大器的满量程峰峰值输出摆幅 (3.0 V)。

颜色图谱测量

测试多种白色光源以确定其对电路中光电二极管的 470 nm、550 nm 和 620 nm 窄带滤波器的响应。

图 3 显示对一个 30 cm 处 3.5 W 白色 LED 光源的响应。图 4 显示对一个 30 cm 处 10 W LED 泛光灯光源的响应。图 5 显示对一个 35 cm 处 50 W LED 白炽灯光源的响应。

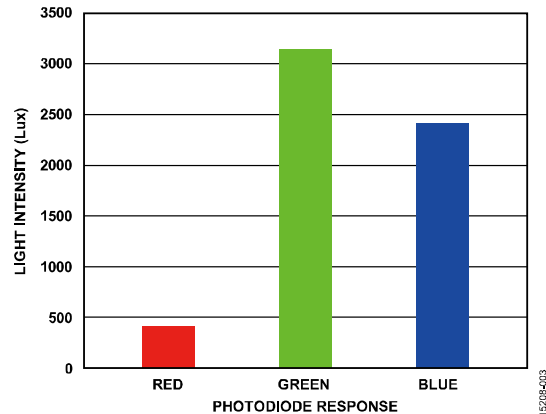


图 3. 30 cm 处 3.5 W 白色 LED 光源的强度

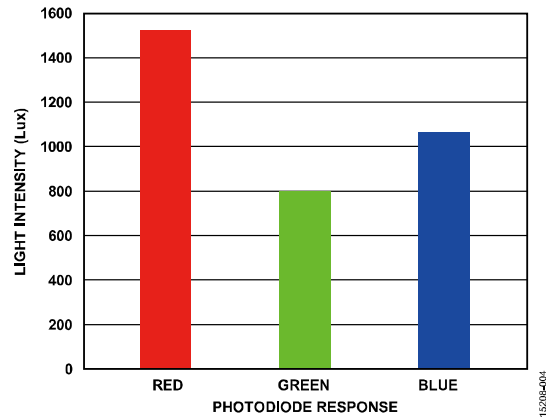


图 4. 30 cm 处 10 W LED 泛光灯光源的强度

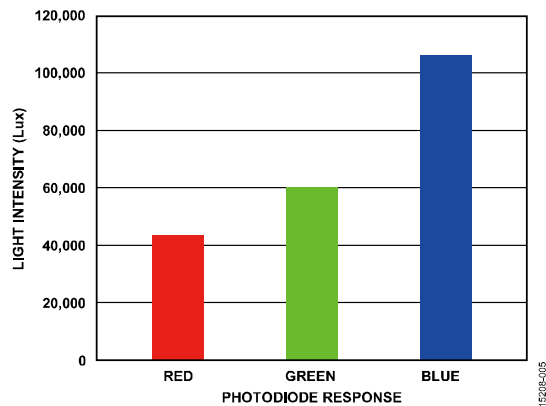


图 5. 35 cm 处 50 W LED 白炽灯光源的强度

电路板布局考量

光电二极管的高阻抗电流通路容易产生漏电流，必须考虑予以屏蔽。为使屏蔽体发挥作用，必须将其连接到正确的基准电位（参见应用笔记 AN-347—屏蔽和接地）。

应当精心考虑电路板上的电源和接地回路布局。印刷电路板必须将模拟部分与数字部分分离。如果该电路所在系统有多个器件要求模拟地至数字地连接，则只能在一个点上进行连接。所有器件的电源必须通过至少 0.1 μF 的电容器旁路。这些旁路电容必须尽可能靠近器件，电容最好正对着器件。所选 0.1 μF 电容必须具有低有效串联电阻 (ESR) 和低有效串联电感 (ESL)，例如陶瓷型电容。0.1 μF 电容为瞬变电流提供低阻抗接地路径。电源走线必须尽可能宽，以提供低阻抗供电路径。为实现最佳性能，必须采用适当的布局、接地和去耦技术（请参考指南 MT-031—实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团，以及指南 MT-101—去耦技术）。

包括原理图、布局和物料清单的完整文档位于 CN-0397 设计支持包中 (www.analog.com/CN0397-DesignSupport)。

常见变化

EVAL-CN0397-ARDZ 板上装有 Everlight CLS15-22C/L213x/TR8 二极管。不过，电路板上有一个用于安装 Hamamatsu S7505-01 二极管的位置，该二极管在单一封装中集成所有三个二极管，其阴极在内部相连。

如果用其他二极管替换板上的 Everlight 二极管，则还需要根据特定二极管规格，更换反馈电阻和电容。反馈电阻和电容的焊盘足够大，便于拆除和安装不同元件。

如果愿意用一定的功耗来换取更低的偏置电流，可以使用 AD8617、AD8609 和 AD8641，其最大偏置电流为 1 pA。

AD7795（6 通道）和 AD7708（8 通道/10 通道）也是低功耗 16 位 Σ-Δ 型 ADC，适合需要更多光电二极管通道来更精细地分析光谱的应用。

电路评估与测试

本电路使用 EVAL-CN0397-ARDZ 电路板和 EVAL-ADICUP360。EVAL-CN0397-ARDZ 利用 Arduino 兼容引脚叠加在 EVAL-ADICUP360 板上。

设备要求

需要以下设备：

- 带 USB 端口和 Windows XP、Windows Vista（32 位）或 Windows 7（32 位）的 PC
- EVAL-CN0397-ARDZ 电路评估板
- EVAL-ADICUP360 评估平台板或同等 Arduino 接口
- USB A 转 USB 微型电缆
- ADuCM360 软件 (IDE)
- EVAL-CN0397-ARDZ 示例代码（参见 CN-0397 用户指南）

开始使用

将示例代码载入 ADuCM360 IDE，请按照工具链设置用户指南中的说明操作。

功能框图

图 6 所示为测试设置的功能框图。

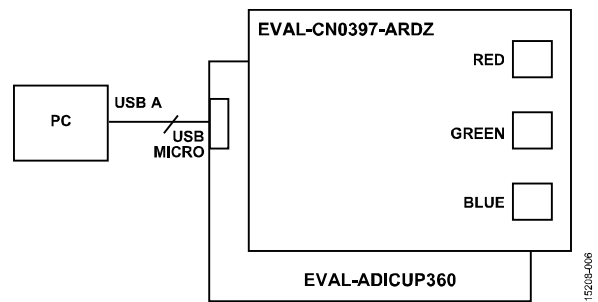


图 6. 测试设置功能框图

设置

连接 EVAL-CN0397-ARDZ，利用 Arduino 兼容接头和对应接头将其安装在 EVAL-ADICUP360 板上方，如图 2 所示。

表 2. EVAL-CN0397-ARDZ 和 EVAL-ADICUP360 板之间的连接

EVAL-CN0397-ARDZ	EVAL-ADICUP360
ICSP	SPI
POWER	POWER
ANALOG	ADCL
DIGI1	PWMH
DIGIO	PWML

然后将 USB 电缆从 EVAL-ADICUP360 的调试端口连接到计算机 USB 端口。

测试

示例代码经编译并加载到 [EVAL-ADICUP360](#) 上且将 [EVAL-CN0397-ARDZ](#) 安装在上面之后，器件与 PC 通信并显示各通道的读数。该电路可利用不同光源在不同距离处进行测试并观测各通道的读数。

关于测试设置以及如何使用 [EVAL-ADICUP360](#) 和示例代码来捕捉数据的详细信息，请参阅 [CN-0397 用户指南](#)。

关于 [EVAL-ADICUP360](#) 板的信息，请参阅 [EVAL-ADICUP360 工具链设置用户指南](#)。

图 7 显示 [EVAL-CN0397-ARDZ](#) 评估板的实物照片。

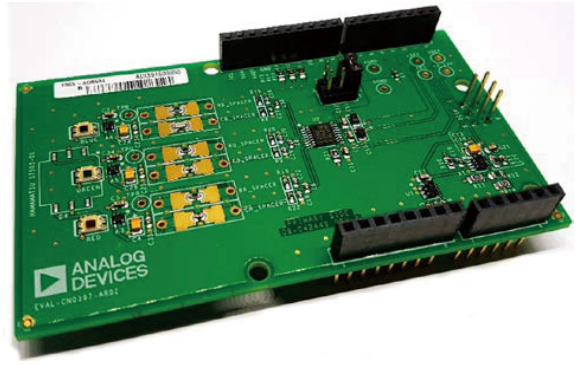


图 7. [EVAL-CN0397-ARDZ](#) 评估板

15208407

更多资料

CN-0397 设计支持包:

www.analog.com/CN0397-DesignSupport

ADI 公司光电二极管向导设计工具

Kester, Walt. *数据转换手册*第 3 章和第 7 章。ADI 公司, 2005。

Kester, Walt. *传感器信号调理*第 5 章。ADI 公司, 1999 年。

指南 MT-015, *DAC 基本架构 II: 二进制 DAC*。ADI 公司。

指南 MT-031, *实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团*。ADI 公司。

指南 MT-035, *运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题*。ADI 公司。

指南 MT-059, *补偿输入电容对电流电压转换器所用电压反馈和电流反馈型运算放大器的影响*。ADI 公司。

指南 MT-101. *去耦技术*。ADI 公司。

AN-347, *屏蔽和防护*。ADI 公司。

Koning, Ross E. *光*。植物生理学信息网站。1994 年。

Marigold Lighting, Inc., 22 Bruce St. W., Goderich, Ontario, Canada N7A 3Z9.

数据手册和评估板

[EVAL-CN0397-ARDZ](#)

[EVAL-ADICUP360](#)

[AD8500 数据手册](#)

[AD7798 数据手册](#)

[AD8502 数据手册](#)

[ADR3433 数据手册](#)

修订历史

2016 年 10 月—修订版 0: 初始版

(Continued from first page) Circuits from the Lab reference designs are intended only for use with Analog Devices products and are the intellectual property of Analog Devices or its licensors. While you may use the Circuits from the Lab reference designs in the design of your product, no other license is granted by implication or otherwise under any patents or other intellectual property by application or use of the Circuits from the Lab reference designs. Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, Circuits from the Lab reference designs are supplied "as is" and without warranties of any kind, express, implied, or statutory including, but not limited to, any implied warranty of merchantability, noninfringement or fitness for a particular purpose and no responsibility is assumed by Analog Devices for their use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from their use. Analog Devices reserves the right to change any Circuits from the Lab reference designs at any time without notice but is under no obligation to do so.