

Circuits from the Lab[®] Reference Designs

Circuits from the Lab[®] reference designs are engineered and tested for quick and easy system integration to help solve today's analog, mixed-signal, and RF design challenges. For more information and/or support, visit www.analog.com/CN0363.

连接/参考器件

AD7175-2	24位、250 kSPS Σ - Δ 型ADC，具有20 μ s建立时间，集成真轨到轨缓冲器
ADA4528-1	精密、超低噪声、轨到轨输入输出(RRIO)、零漂移运算放大器
AD8615	精密、20 MHz、CMOS、轨到轨输入/输出运算放大器
AD5201	33位数字电位计
ADA4805-1	0.2 μ V/ $^{\circ}$ C失调漂移、105 MHz低功耗、低噪声、轨到轨运算放大器
ADG633	CMOS、 ± 5 V/+5 V/+3 V、三通道单刀双掷开关
ADG733	CMOS、2.5 Ω 低电压、三通道单刀双掷开关
ADG704	CMOS、低压、4 Ω 、4通道多路复用器
ADG819	0.5 Ω 、CMOS、1.8 V至5.5 V、2:1多路复用器/单刀双掷开关

带可编程增益跨阻放大器和数字同步检波功能的双通道色度计

评估和设计支持

电路评估板

[CN-0363电路评估板\(EVAL-CN0363-PMDZ\)](#)

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所示电路是一款双通道色度计，其具有一个调制光源发射器，各通道上有可编程增益跨阻放大器，后接一个噪声非常低的24位 Σ - Δ 型模数转换器(ADC)。ADC的输出连接到标准FPGA夹层卡。FPGA从ADC获得采样数据，实现一个同步检波算法。

通过使用调制光和数字同步检波而非恒流(直流)源，系统可有力地抑制非调制频率的噪声源，提供出色的精度。

该双通道电路以三种不同的波长测量样本与参考容器中的液体的吸收光线之比。这种测量方法构成许多通过吸收光谱测量浓度和表征材料的化学分析和环境监控仪器仪表的基础。

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)

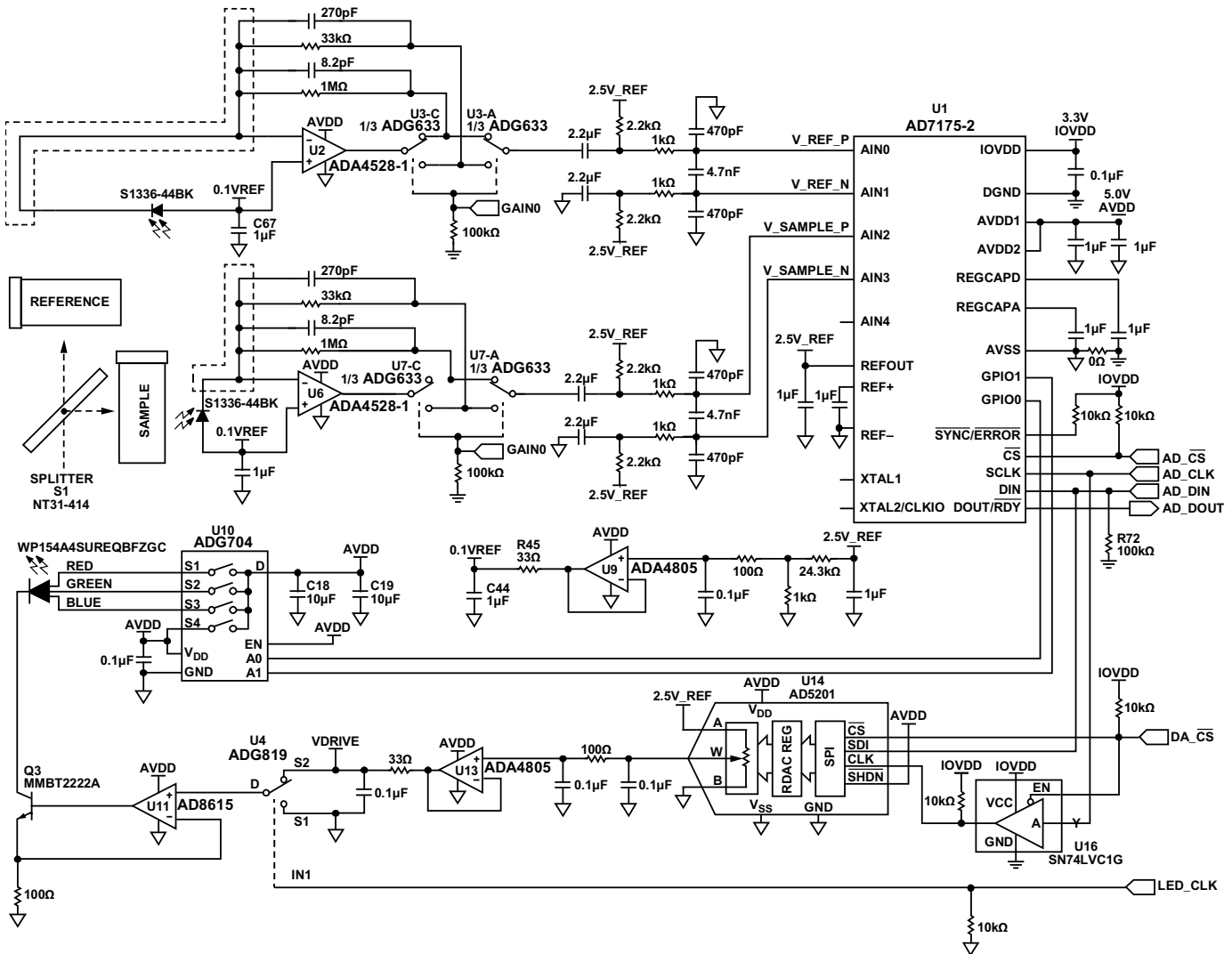


图1. 带可编程增益跨阻放大器和锁定放大器的双通道色度计
(原理示意图：未显示所有连接和去耦)

电路描述

一个设置为用户可编程频率的时钟利用一个恒流驱动器调制三种LED颜色中的一种，该恒流驱动器由运算放大器AD8615、开关ADG819和数字电位计AD5201构成。分光镜将一半光线通过样本容器发送，另一半通过参考容器发送。配置为跨阻放大器的ADA4528-1随后将光电二极管电流转换为输出电压方波，其幅度与从样本或参考容器透射出来的光线成正比。跨阻放大器利用单刀双掷(SPDT)开关ADG633选择两个跨阻增益中的一个。AD7175-2 Σ-Δ ADC对电压进行采样，并将数字数据发送到FPGA进行数字解调。

FPGA首先将一个以数字方式生成的正弦波与LED时钟同步，然后将此正弦波与ADC采样数据相乘，从而实现同步解调。此外，该正弦波的90°相移版本也与ADC数据相乘

以获得调制信号的正交分量。这些操作的结果是产生两个低频解调信号，分别代表各通道接收光线的同相和正交分量。一个窄带FIR低通滤波器滤除所有其他频率成分，这样便很容易计算光电二极管测得的信号的幅度和相移，而与LED时钟不同的频率的光线或电气噪声则被抑制。多路复用器ADG704将供电轨连接至三种颜色LED中的一个，用户可以通过2位地址选择测试波长。AD8615和NPN晶体管构成一个简单的电流源，LED电流由下式给出：

$$I_{LED} = V_{NON-INVERTING} / R_{EMITTER}$$

其中：

$V_{NON-INVERTING}$ 为AD8615同相输入端电压。
 $R_{EMITTER}$ 为连接到晶体管Q3发射极的电阻值。

ADG819 SPDT开关连接到设定电压和地，其控制引脚连接到参考时钟。当时钟在高低之间振荡时，电流源的设定点从0 mA变为所需的输出电流，从而产生一个方波信号。

数字电位计AD5201充当2.5 V基准电压源的可编程电阻分压器，使得LED电流共有33种不同的电流输出设置。

样本和参考容器各接收LED光能的一半，吸收的光量取决于每个容器中介质的类型和浓度。每个容器另一侧的光电二极管产生少量电流，数量与接收到的光量成比例。

每个接收器通道的第一级包含ADA4528-1运算放大器，该运算放大器配置为跨阻放大器，可将光电二极管输出电流转换为电压。ADA4528-1是一款自稳零放大器，其所导致的失调可忽略不计，无 $1/f$ 噪声，宽带噪声则非常低(5.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)。像所有自稳零放大器一样，在自稳零频率处会出现一个噪声尖峰。对于ADA4528-1，该频率约为200 kHz，但电路信号带宽早在此之前即发生滚降。

运算放大器输入偏置电流乘以输出端的反馈电阻值，作为失调电压。运算放大器的输入失调电压出现在输出端会被放大，其增益取决于反馈电阻和光电二极管分流电阻。此外，运算放大器的任何输入电压失调都会出现在光电二极管上，导致光电二极管暗电流增加。ADA4528-1的失调电压很低(2.5 μV)，非常适合这种应用。

图2显示了一个带单反馈电阻的典型跨阻放大器及其理想传递函数。

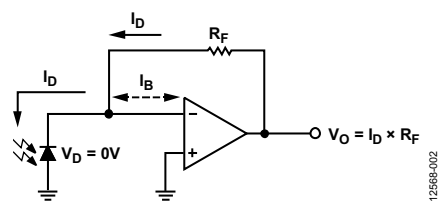


图2. 跨阻放大器传递函数

由于某些被测溶液可能具有非常强的吸收特性，因此有时需要使用大反馈电阻来测量光电二极管产生的极小电流，同时要能够测量与高度稀释溶液相对应的大电流。为了解决这一难题，图1中的光电二极管放大器含有两个不同的可选增益。其中一个增益设为33 k Ω ，另一个设为1 M Ω 。当单SPDT开关连接运算放大器的输出端以便开关反馈电阻时，ADG633的导通电阻会导致跨阻增益误差。为了避免这个问题，图3显示了一种较好的配置，在该配置中，反

馈环路内部的ADG633选择所需电阻，同时第二个开关将系统下一级与所选反馈环路相连。放大器输出端的电压为：

$$V_{TIA\ OUTPUT} = I_{PHOTODIODE} \times R_{FEEDBACK}$$

而不是

$$V_{TIA\ OUTPUT} = I_{PHOTODIODE} \times (R_{FEEDBACK} + R_{ON\ ADG633})$$

它表示增益误差。但是，由于其中一个ADG633位于反馈环路之外，该级的输出阻抗即为ADG633的导通电阻(通常52 Ω)，而非闭环工作时与运算放大器输出有关的极低输出阻抗。ADG633漏电流(典型值5 pA)引起的误差可忽略不计。

哪怕诸如ADA4528-1这类最好的轨到轨输出放大器，其输出都无法完全摆动至供电轨。此外，ADA4528-1上的输入失调电压可以为负，虽然其数值非常小。运算放大器ADA4805-1不是通过一个负电源来保证放大器绝不削波，并且保证它能驱动至0.0 V，而是提供一个100 mV缓冲电压来偏置光电二极管阳极和ADA4528-1。ADA4805-1非常适合用作基准电压缓冲器，因为当驱动去耦用大容量负载时，它能保持单位增益稳定性。另外还使用第二个ADA4805-1来缓冲用以设置LED电流的数字电位计AD5201输出。

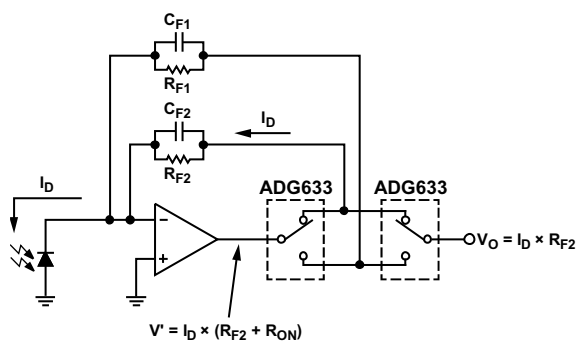


图3. 可编程增益跨阻放大器

光电二极管放大器输出电压可在0.1 V至5.0 V范围内摆动。对于33 k Ω 范围而言，4.9 V输出范围对应148.5 μA 的满量程光电二极管电流。对于1 M Ω 范围，其对应4.9 μA 的满量程光电二极管电流。使用1 M Ω 的增益设置工作时，务必保护光电二极管不受外界光线影响，以防放大器饱和。虽然下文所述的同步检波方案能够有力地衰减任何不与LED时钟同步的频率，但若ADC返回饱和和数据，检波方案将无法正常工作。

各通道的增益设置可通过FPGA板独立选择。

ADC采样速率和调制频率选择

AD7175-2 ADC配置有sinc5+sinc1滤波器，输出数据速率为250 kSPS，可采样单周期建立对两个通道采样。这种配置使得各通道的有效采样速率为25 kSPS(各通道每隔40 μs输出数据)。任何高于12.5 kHz的频率(例如方波调制的奇数谐波)都会混叠回到ADC通带中，只要其不是刚好位于调制频率之上，同步解调级就会抑制这些频率。为了防止调制波形的混叠频率折回到基频，应根据以下关系选择调制频率：

$$F_{MODULATION} = \frac{F_{SAMPLE}}{2 \times n + 0.5}$$

其中：

$F_{MODULATION}$ 为调制频率。

F_{SAMPLE} 为ADC有效输出数据速率。

n 为整数(对应于调制频率的谐波)。

例如在本系统中，有效输出数据速率为25 kSPS，因此，如果需要1 kHz左右的调制频率，该频率必须是1020 Hz ($n = 12$) 或943 Hz ($n = 13$)以避免混叠问题。采样这种方法选择调制频率，前端即无需使用陡峭的抗混叠滤波器。

数字同步检波

本电路不是在硬件中实现同步检波(参见 [电路笔记 CN-0312](#))，而是获得时间采样数据并利用FPGA实现数字同步检波。图4是FPGA中实现的数字同步检波模块的示意图。FPGA产生交流激励信号驱动LED，以数字方式产生的正弦波在数字锁相环中锁定该信号。输入信号与数字正弦波和90°相移版本相乘，产生两个低频解调信号，其分别与输入信号在调制频率的同相和正交分量成正比。如图4所示，幅度为这两个分量的平方和之根。有关该解调技术的更多信息，请参阅“了解详情”部分。

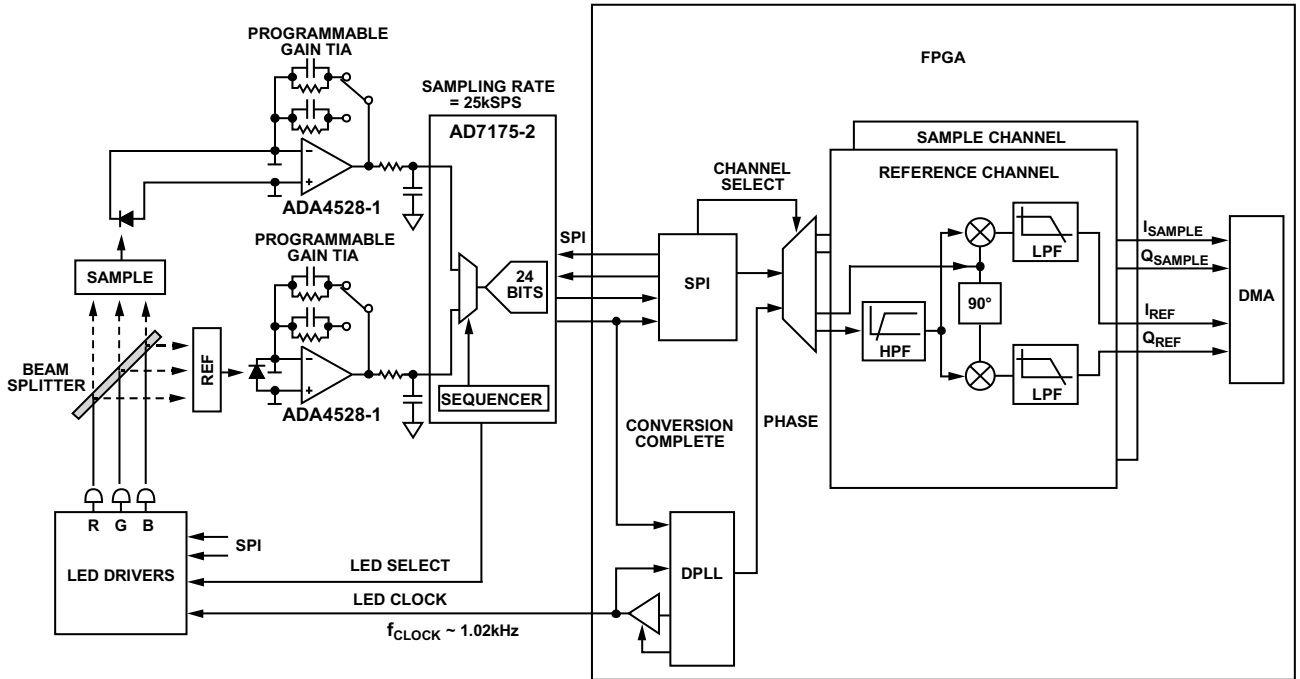


图4. 包括FPGA同步检波器的系统框图

电源

EVAL-CN0363-PMDZ板由外部6 V至12 V直流电源供电。电路的模拟部分由来自低压差稳压器ADP7102的AVDD = 5 V供电。电路的数字部分由低压差稳压器ADP1720产生的IOVDD = 3.3 V供电。或者，IOVDD也可以通过链路选项由PMD连接器VCC提供。

2.5 V基准电压由AD7175-2 ADC的内部2.5 V基准源提供。

电路性能测量

为了验证系统的噪声性能，应在禁用所有LED的情况下获取数据。同步检波器依然在LED时钟频率，但不会检测到任何与该时钟同步的光信号，因此，它会消除所有直流和交流信号。表1所示为无噪声位性能。

表1. 无噪声位性能¹

增益	ADC输出		最终滤波输出	
	参考通道ADC	样本通道ADC	参考通道输出	样本通道输出
1 MΩ	12.46	12.85	15.91	15.50
33 kΩ	15.58	15.59	18.77	18.85

¹ 采样速率 = 25 kSPS，激励频率 = 1020 Hz，输出滤波器带宽 = 100 Hz。

常见变化

改变光电二极管放大器上反馈电阻的值即可改变放大器增益，这是一种自定义电路的简单方法，可用于不同光照水平的特定应用。然而，补偿电容也必须改变，以保持带宽不变，并保证放大器的稳定性。

对于极低水平光照测量系统而言，同步检波器的输出低通滤波器的截止频率可设为低得多的频率值，以便具有最佳性能，但代价是测量周期较长。

由于LED的光输出随温度变化而改变，系统以样本和参考通道的比例进行测量。光电二极管的增益容差最大值为±11%；因此，由于LED输出随时间和温度的变化而改变，比例的变动在一定程度上存在漂移。增加光反馈网络来控制LED光输出可降低其随温度的变化，使精确的单端测量成为可能。

可以不使用方波来调制LED，而用FPGA中的DDS或PWM来产生正弦波调制。正弦波调制可减少信号的谐波成分，使滤波更简单，并降低噪声。

电路评估与测试

EVAL-CN0363-PMDZ板的完整文档，包括原理图、布局图、Gerber文件和物料清单，可在CN-0363设计支持包中找到，网址：www.analog.com/CN0363-DesignSupport。

CN-0363评估软件与FPGA开发板通信，以从EVAL-CN0363-PMDZ电路板捕捉数据并进行分析。

设备要求

- EVAL-CN0363-PMDZ电路评估板
- 6 V至12 V、500 mA直流电源或壁式电源适配器
- FPGA开发板(如ZedBoard)和12 V电源
- 8 GB SD卡，随同EVAL-CN0363-PMDZ提供
- USB键盘和鼠标组合
- HDMI监视器(仅HD)
- CN-0363评估软件(参见CN-0363用户指南)
- 蒸馏水和测试液体样本

开始使用

有关评估硬件和软件的操作详情，请参阅CN-0363用户指南。

HDL软件和驱动在软件链接中提供，支持各种FPGA开发板，例如Avnet ZedBoard。

开发平台需要一个SD开，其已随同CN-0363硬件提供。SD卡已经过适当分区，但必须用最新镜像予以更新。程序参见CN-0363用户指南。

功能框图

图5所示为测试设置的功能框图。

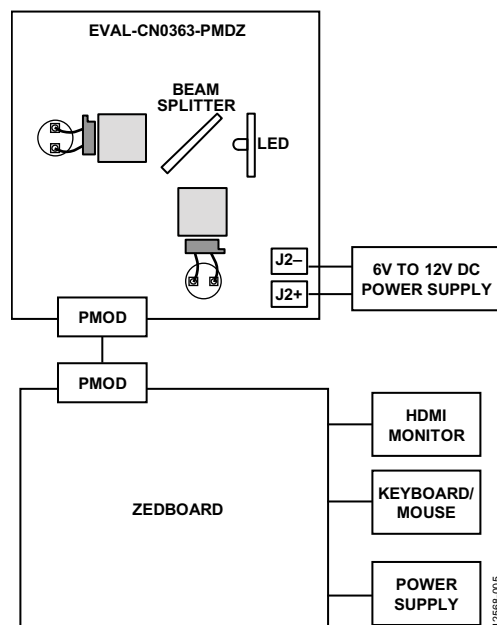


图5. 评估系统功能框图

设置

按照如下方式设置系统：

1. 用PMOD电缆连接EVAL-CN0363-PMDZ和ZedBoard，并将一个6 V至12 V直流电源连接到J2电源连接器。此时不要接通电源。
2. 将USB键盘/鼠标、HDMI监视器和电源连接到ZedBoard。此时不要接通电源。

测试

按照如下方式初始化系统：

1. 接通EVAL-CN0363-PMDZ板的电源。
2. 接通ZedBoard的电源。
3. 让系统开始引导。
4. 若需要，输入CN-0363用户指南所述的适当键盘命令。

校准

系统需进行一次初始校准，以便补偿波束分离器与光电二极管之间的对齐误差，以及补偿光电二极管的所有响应失配。若要校准系统，以蒸馏水填充两个容器，然后插入PCB的方孔中。在校准过程中，建议将光电二极管屏蔽起来，防止环境光线照射。

在软件中启动自动校准程序：从Menu(菜单)栏打开Calibration(校准)对话框，然后单击Calibrate(校准)。完成全部校准程序需要几秒钟时间，进度条会指示当前步骤。校准完成时，校准值会更新。校准会消除零点失调，并设置各通道的正确增益。校准数据还包括一个乘法系数K，其表示满量程激励下参考通道值和样本通道值的相对关系。

针对每种LED颜色，软件都会计算系数K，因此有：

$$\frac{V_{REFERENCE_CHANNEL}}{V_{SAMPLE_CHANNEL}} K = 1$$

其中，K表示经计算得出的校准常数。

完成校准后，软件在后续测量中均使用这些校准常数。

在光谱技术上，吸光度定义为到达被测介质的光与通过介质传递的光的对数之比。根据比尔-朗伯特定律，通过介质传递的光量随通道长度和浓度的增加而以指数规律递减。通过将吸光度定义为对数，可使得它与介质的浓度直接成比例(假设通道长度不变)。

$$Absorbance = \log_{10} \left(\frac{V_{REFERENCE}}{V_{SAMPLE}} K \right)$$

无需使用有害化学物质即可验证该理论的简单方法，是测量食用色素的染料浓度。图6显示采用EVAL-CN0363-PMDZ进行测量时，黄色5号染料不同浓度的实验结果。

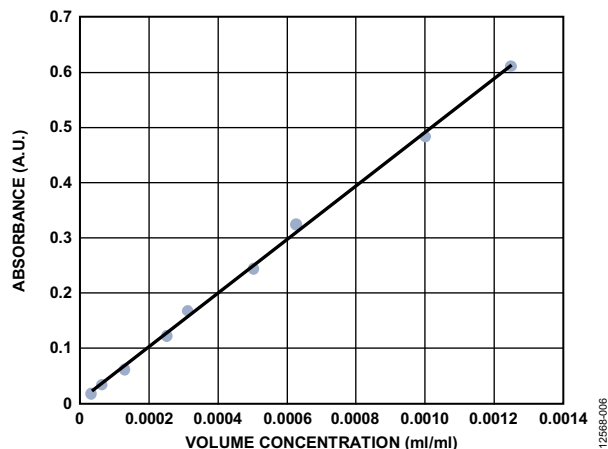


图6. 465 nm(主波长)光下黄色5号染料的吸光度直线

黄色溶液可强烈吸收蓝光；因此，测量采用蓝光(465 nm主波长)LED作为光源。x轴表示体积浓度(每毫升水中染料的毫升数，因此x轴没有单位)，y轴表示吸光度。根据比尔朗伯特定律的预测，吸光度随浓度呈线性变化。

分析样本

单击Automated Data Collection(自动收集数据)选项卡中的Analyze Sample(分析样本)按钮(参见图7)以自动分析样本，循环处理所有三种颜色，并计算每种颜色的吸光度。完成分析需要几秒钟时间，进度条会更新以指示当前步骤。分析完成时会显示吸光度值。然后便可将该样本与样本库中的现有样本进行比对，或将其保存到样本库中供将来使用。

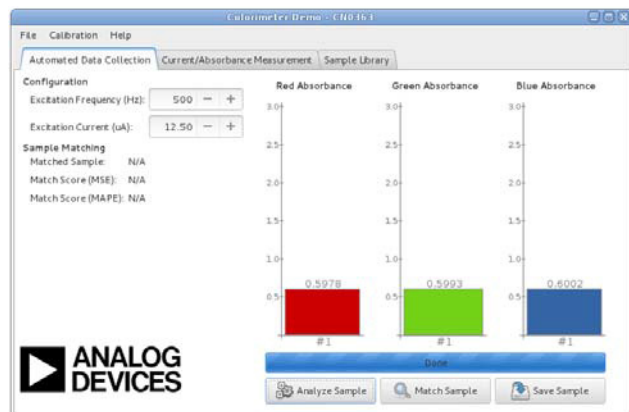


图7. Automated Data Collection(自动收集数据)选项卡视图

电流/吸光度测量和手动设置

通过Current/Absorbance Measurement(电流/吸光度测量)选项卡, 用户可以直接手动控制LED和增益, 以及查看原始数据(参见图8)。下列参数可供设置: Excitation Frequency(激励频率)、Excitation Current(激励电流)、LED(红光、绿光或蓝光)、Reference Channel Gain(参考通道增益)和Sample Channel Gain(样本通道增益)。

更改这些值后, 运行自动校准程序可以恢复初始默认值。



图8. Current/Absorbance Measurement(电流/吸光度测量)选项卡视图

样本库

利用Sample Library(样本库)选项卡(参见图9), 用户可以管理和比较以前保存的样本数据。左侧是所有样本的列表。右侧是当前所选样本的吸光度值。

按住CTRL键可以选择多个样本。利用此功能可以直接比较

多个样本的吸光度。选择样本, 然后单击Remove(删除), 可以将样本从库中删除。从库中删除的样本无法恢复。

EVAL-CN0363-PMDZ板的照片如图10所示。

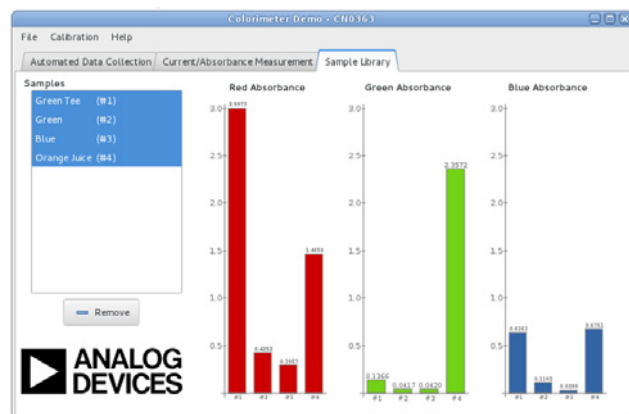


图9. Sample Library(样本库)选项卡视图

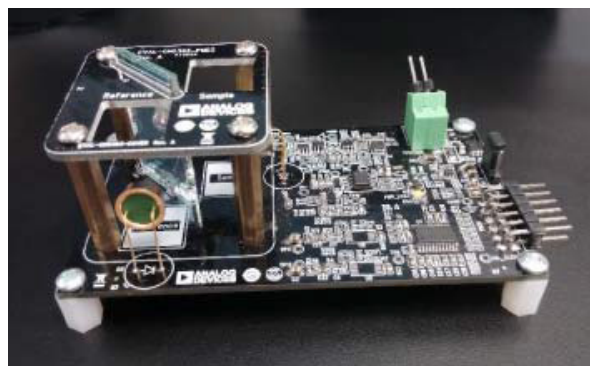


图10. EVAL-CN0363-PMDZ照片

了解详情

CN-0363设计支持包:

www.analog.com/CN0363-DesignSupport

Luis Orozco。“同步检波器助力精密低电平测量”。Analog Dialogue 48-11, 2014年11月。

Luis Orozco。“可编程增益跨阻放大器使光谱系统的动态范围达到最大”。Analog Dialogue 47-05, 2013年5月。

Walt Kester、Scott Wurcer和Chuck Kitchin。高阻抗传感器，传感器信号调理实用设计技术，第5部分。1999年。

Douglas A. Skoog、Holler F. James和Stanley R. Crouch。“光谱测定方法入门”。Instrumental Analysis。美国：Brooks/Cole, Cengage Learning, 2007年。

数据手册和评估板

[AD7175-2数据手册](#)

[ADA4528-1数据手册](#)

[AD8615数据手册](#)

[AD5201数据手册](#)

[ADA4805-1数据手册](#)

[ADG633数据手册](#)

[ADG733数据手册](#)

[ADG704数据手册](#)

[ADG819数据手册](#)

修订历史

2015年5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.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.
CN12568sc-0-5/15(0)

