

当每一 μA 都发挥其作用！

Jan-Hein Broeders
ADI公司

测量多个参数，读数准确，电池寿命长，—这些对于可穿戴健康设备而言最重要。

自从10年前第一台计步器上市以来，已发生很大变化。最初，测量仅关注计步功能。十年来的研究表明，每天走路10000步，即可保持卡路里摄入和消耗平衡。同时，可穿戴设备增加了其他功能和特性，例如测量心率、心率变化、体温和皮肤电导率。可穿戴设备最初是为体育和健康目的而设计，但现在正慢慢进入医疗市场。随着这种转变，我们必须更加依赖测量的准确性和电池的寿命的长短。一块电池能够维持设备运转的时间越长，越容易为用户所用。

本文介绍一款新一代可穿戴设备产品，包括如何提高您的系统可靠性和能效的技巧和提示。

用于心率测量的PPG

说到身体健康，我们身体中最重要的器官就是心脏。可以将它视为人体系统的发动机。没有运行良好的心脏，我们将会面临严重的健康问题。为此原因监测心脏功能是重中之重。当每分钟心脏跳动数超出正常值时，我们有充分的理由检查我们的心率。除此之外，我们可以通过心脏的活动频率获取大量的心脏行为信息。当身体需要进行更多活动时，心率加快，为细胞带来更多的营养和含氧血。持续高心率和心率快速变化不是好事，这可能表示存在房颤等心脏疾病。

除了监测心脏频率，还有另外一个参数，称为心率变异性(HRV)。当人们放松时，他们的每分钟心跳数并非固定不变，心跳频率会略有变化，在每分钟 ± 3 次范围内。这种变化表明处于放松状态。当人们紧张或受惊吓时，体内的肾上腺素水平上升，心脏开始以无变化频率跳动。因此监测HRV参数很重要。

获取心脏信号的经典方法是生物电测量心电图(ECG)。但是，要将其集成于可穿戴设备中并不容易。

测量心率的趋势，除了利用生物电，还可利用光学原理。这项技术已经存在了很长时间，称为光电血管容积图(PPG)。PPG技术主要应用于测量血液中的血氧饱和度(SPO2)的系统中。SPO2测量，则是通过身体特定部位(通常是手指或耳垂)发射两种不同波长的光，测量氧合血红蛋白百分比和血红蛋白总量。由于这项

技术也可以测量心率，所以在可穿戴设备中应用广泛，例如小型腕戴式设备，与生物电测量不同，它可使用单点测量拾取心率。ADI公司的ADPD174是一种用于支持这些应用的光学子系统(参见图1)。

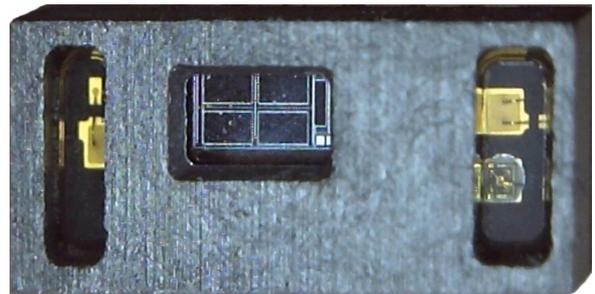


图1. ADPD174，采用单封装的6.5 mm x 2.8 mm光学系统。

反射和透射

很多人都熟悉SPO2测量，这可以通过线夹固定在手指或耳垂上来实现。光是通过身体的某一部分发送，并在另一端用光电二极管测量接收到的信号。我们利用这种传输技术测量接收到的或不吸收的光量。这项工作原理在信号性能和功耗方面为同类最佳。但是，在可穿戴系统中集成透射测量也并非易事，因为对于可穿戴系统，舒适非常关键。因此，反射测量更为常用。在反射光学系统中，光被发送至组织的表面，一部分被红细胞吸收，其余的光反射回组织表面，由光传感器测量。在反射系统中，接收信号最高不超过60 dB，所以我们需要多加注意发送和接收信号链的电气和光学方面。

电子和机械挑战

心脏跳动期间，血流量发生变化，导致接收到的反射光发生散射。用来测量PPG信号的光的波长会随各种因素而有所不同，一首先是测量类型。在本文中，我们将测量限制在心率及其变化范围内。对于该测量，所需的波长不仅取决于所测量的身体位置，还取决于相关血流灌注水平、组织温度和组织的色调。一般对于腕戴式设备，动脉不位于手腕顶端，您需要从皮肤表层下的静脉和毛细血管来检测脉动分量。在这些应用中使用绿光使我们能够更好地接收。在血流充足的地方，如上臂、太阳穴、或耳道，红光或红外会更加有效，它可以更深地穿透组织，一尤其是对于电池电量和尺寸总是个难题的可穿戴式应

用, 红光或IR LED带来了额外的优势, 它们只需要较低的正向电压。对于使用纽扣式电池的应用, 这些LED可直接由电池电压驱动。

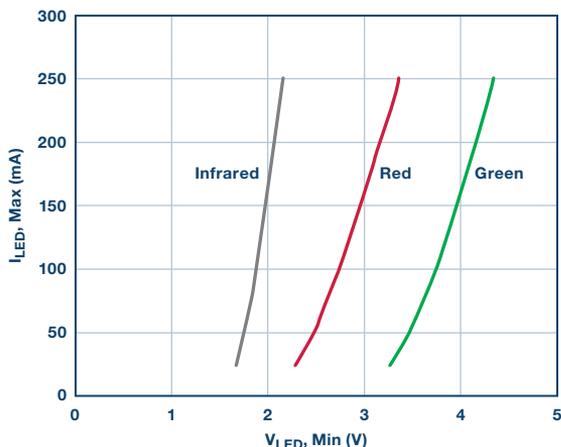


图2. 所需LED正向电压与LED电流。

遗憾的是, 绿色LED需要更高的正向电压, 所以需要额外的升压转换器, 这将对您系统的总功耗带来不利影响。图2显示了不同颜色LED所需的正向电压与电流的函数关系。如果仍需绿色LED, ADP2503降压/升压转换器可以帮助支持更高的LED正向电压, 通过输入电压可以达到最高5.5V, 也可低至2.3V。

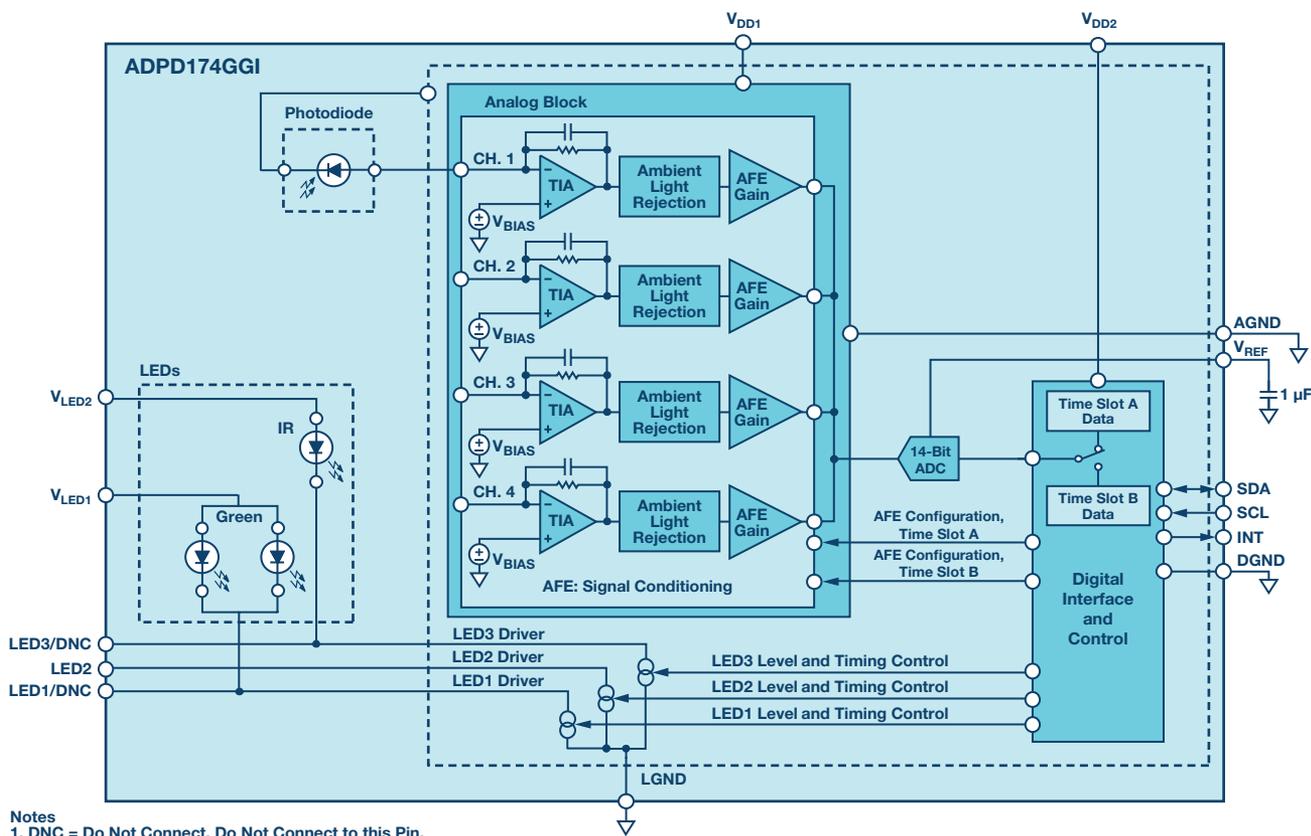
在权衡考虑时, 如传感器位置和LED颜色, 下一步是选择最合适的光学解决方案。关于模拟前端有很多选择, 分立式或全集成

式, 也提供大量光传感器和LED可供选择。为最大程度减轻设计工作量并缩短上市时间, ADI构建了全集成式光学子系统, 用于反射光学测量。即ADPD174, 内含进行光学测量所需的全部器件。图3为ADPD174子系统框图。该模块尺寸为 $6.5\text{ mm} \times 2.8\text{ mm}$, 对于可穿戴系统极具吸引力。

该模块采用一个大型光电二极管、两个绿色LED和一个IR LED。板载混合信号ASIC包括模拟信号处理模块、SAR型ADC、数字信号处理模块、I²C通信接口和三个可编程LED电流源。

系统驱动LED并使用其 1.2 mm^2 光电二极管测量相应的光学返回信号。利用可穿戴设备测量PPG面临的巨大挑战就是克服环境光和运动产生伪像的干扰。环境光会对测量结果产生极大的影响。阳光并不是很难抑制, 但是来自荧光灯和节能灯的特殊光包含交流分量, 较难消除。ADPD174光学模块具有两级环境光照抑制功能。在光传感器和输入放大器级之后, 集成带通滤波器, 后接同步解调器, 可提供一流的抑制环境光和最高100 kHz直流电干扰功能。ADC具有14位分辨率和最高255的脉冲值, 共可获得20位测量分辨率。累加多个样本则可实现最高27位的分辨率。

例如, ADPD174以两个独立时隙运行, 以测量两个不同的波长并可按顺序执行结果。在每个时隙期间, 执行完整的信号路径, 从LED激励开始, 然后捕获光信号和处理数据。



Notes

1. DNC = Do Not Connect. Do Not Connect to this Pin.

图3. ADPD174光学子系统框图。

每个电流源能够驱动电流高达250 mA的LED。创新的LED脉冲控制方式保持较低的平均功耗，在很大程度上有助于节省系统的功耗和电池寿命。

这种LED驱动电路的优点是，它是动态可扩展的。很多因素都会影响接收光学信号的信噪比(SNR)，如肤色或传感器与皮肤间的毛发，这些都会影响接收端的灵敏度。因此，激励LED配置非常方便，可用于构建自适应系统。所有时序和同步都由模拟前端处理，因此不会增加系统微处理器的任何开销。正常情况下，您可以使用ADPD174以约一毫瓦功率电平执行可靠的心率监测。为了找到这个工作点，我们可以调谐跨阻放大器(TIA)的增益，并结合设置最大LED峰值电流。优化LED电流和TIA增益后，我们可以增加LED脉冲的数量来获取更多信号。请注意，增加LED峰值电流即按比例增加SNR，而增加n倍脉冲数量，仅会导致n平方根(\sqrt{n})的SNR改善。

找到心率设备的最佳设置在很大程度上也依赖于用户。用户的肤色以及设备位置、温度和血液流动都会影响信号强度。计算功耗时，光学前端可以看做两个独立的功率因素，IADPD和ILED。IADPD是输入放大器级、ADC和数字状态机消耗的电流。这些功率值在很大程度上依赖ADC的采样率。LED电流ILED将随人体肤色和传感器在身体上位置而变化。对于深肤色，则需要更多的LED电流，当传感器位于身体血液流动少的位置时也需要更多LED电流。平均LED电流随LED驱动脉冲宽度、脉冲数量和ADC采样时间变化。平均LED电流是最大LED电流乘以脉冲宽度和脉冲的数量。可将这视为一个时隙，每当获得新样本时重复一次。脉冲宽度可窄至1 μ s。

若要在手腕上实现良好的心率测量，当使用两个宽度为1 μ s的脉冲时，LED峰值电流需要达到125 mA。对于100 Hz采样频率，平均LED驱动需要25 μ A。当我们增加250 μ A平均AFE电流时，光学前端消耗275 μ A (@ 3 V = 825 μ W)。

其他机械挑战

我们讨论了进行光学系统设计面对的其中一项挑战：环境光干扰。另一个大难题是在反射模式光学系统中解决内部光污染问题。在一个设计完美的系统中，LED发出的所有光都被发送至组织，且仅能看到反射光并由光传感器进行测量。但在现实中，LED灯光会被外壳上的透明窗反射，并在未穿透标绿的光路径组织的情况下直接送回光传感器(参见图4)。

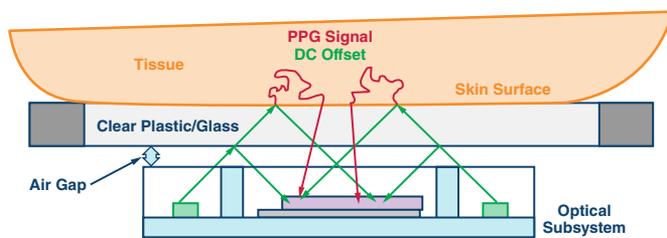


图4. 内部光污染说明。

这种ILP效应导致直流失调，并将限制信号的交流分量，也称为调制指数(MI)。实际上，MI是我们唯一感兴趣的信号。ILP可通过分离窗口解决，一但是，实现批量生产非常困难和昂贵。ADPD174可以解决这个问题。它具有特殊设计的外壳，无需分离外壳上的透明窗，即可减少ILP行为。图5中显示ADPD174与其前代产品相比，ILP减少和LED电流函数关系的改进情况。这是与市场上其他分立式或集成式设备相比的另一优势。

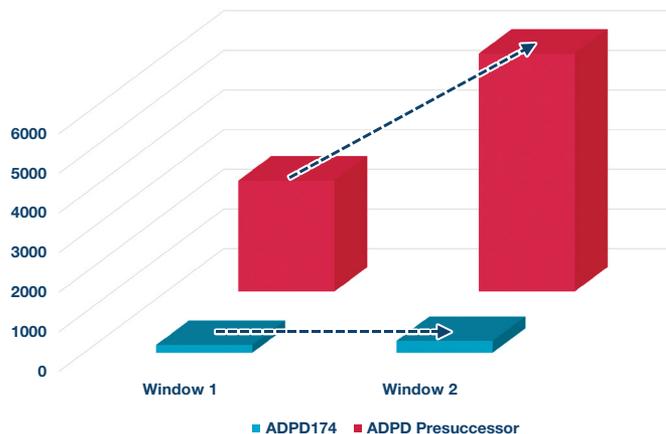


图5. ADPD174 ILP影响与其前代产品。

您的系统总功耗

在光学系统中，除了光照干扰，还需要消除运动造成的干扰。运动会影响可穿戴系统的总体性能，由于运动，机械连接或与组织的接触状态会改变，造成光学读数误差。因此，测量设备的运动并弥补干扰造成的影响是很重要的。ADI超低功耗3轴ADXL362 MEM传感器完全支持这些需求。传感器测量所有三轴并集成12位SAR ADC，使灵敏度达到每个LSB只有1 mg，并能够通过数字SPI接口进行通信。功耗与ADC采样率成比例，每轴数据输出速率为100 Hz，传感器功耗仅为1.8 μ A。它可采用3 mm \times 3 mm封装。一继ADXL362，新一代产品仍在开发中，仅使用ADXL362 PCB面积的四分之一。

缺了“粘合剂”！

到目前为止，我们已经讨论了构建监测心率和心率变化的可穿戴健康设备所需的各种传感器。还缺的是系统的核心，将所有这些传感器连接在一起，运行所需软件算法并存储、可视化或传输结果的部分。ADI公司最新推出的ADuCM3027/ADuCM3029 Cortex[®]-M3处理器，能够支持所有这些需求。它是一款超低功耗、混合信号微控制器，处理功能的功耗< 38 μ A/MHz。该处理器具有最大26 MHz的时钟频率，能够在四种不同的功率模式下运行，参见表1。

表1. 功率模式ADuCM3027/29

ADuCM3027/29功率模式
有效模式 < 38 μ A/MHz (所有模拟和数字工作)
活模式 < 11.5 μ A/MHz (模拟有效，内核通过时钟选通，MCU关闭)
休眠模式 < 900 nA (RTC运行，唤醒中断有效，SRAM保留)
关断模式 < 60 nA (模拟/数字深度休眠，仅唤醒中断有效)

混合信号前端包括12位SAR型ADC、基准电压缓冲和温度传感器。电路板上含有128 kB或256 kB的板载闪存，4 kB高速缓存和64 kB的SRAM。在防止未经授权用户通过外部接口读取设备内容方面已经做出了极大努力。这对于设备制造商保护其代码和算法具有巨大的价值。最后，ADuCM302x可在1.8 V到3.6 V间的单操作电压下运行，1.2 V的内核电压可由板载LDO或其更高效的开关电容降压转换器生成。

要将测量结果无线上传至主机处理器，需要消耗系统大量电能。预处理测量结果将有助于减少需要传输的数据量。这能够节省更多电能。

让您的健康设备自学

在前面的段落中，您已经了解到ADI高度重视传感器和混合信号解决方案，重点关注高性能和低功耗。利用这些芯片和子系统可以针对健康以及运动和保健市场需求创建相关设备，这些设备仅凭单颗纽扣电池供电，即可运行很长时间。面对的挑战始终是构建的系统要具有足够高的性能，同时功耗尽可能低。自适应算法有助于提高整体性能并找到最有效的系统低功耗位置。每次使用设备时，可以小幅更改设置，以达到最佳SNR性能和功耗量的相关HRM精度。

更多信息，请访问www.analog.com/cn。

作者简介

Jan-Hein Broeders是ADI公司负责欧洲、中东和非洲业务的医疗保健业务开发经理。他与医疗保健行业密切合作，将他们现在和将来的需求转化为各种解决方案，这些方案基于ADI公司市场领先的线性和转换器技术和数字信号处理与电源产品。Jan-Hein 20年前开始投身半导体行业，担任Burr-Brown模拟现场应用工程师，负责Benelux和Scandinavia。在德州仪器收购Burr-Brown五年后，他加入了ADI公司，担任飞利浦全球现场应用工程师(FAE)。自2008年起，他开始从事目前的医疗保健业务开发工作。他拥有荷兰斯海尔托亨博斯大学的电气工程学士学位。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区，
中文技术论坛
与ADI技术专家互动。提

出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问 ezchina.analog.com

全球总部
One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部
上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路2290号展想广场5楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司
深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司
北京市海淀区
西小口路66号
中关村东升科技园
B-6号楼A座一层
邮编: 100191
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司
湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路889号光谷国际广场
写字楼B座2403-2405室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA14590sc-0-10/16

analog.com/cn

