

采用可编程 SoC 设计心率监控器设计

本文将概括介绍什么是心率监控器以及其在当今世界所发挥的作用。然后，本文还将讨论简单的手持式心率监控器在设计中应考虑的事项。最后，我们还将介绍如何通过单部可编程片上系统(PSoC)来实现心率监控器

什么是心率监控器？

心率监控器是一款用于监测人体心跳速率的器件。心率的单位是 bpm(每分钟心跳数)。人体的心跳速率根据其日常身体活动、睡眠和基本健康状况的不同而有所差别。

心率监控器通常用于健身设备和某些医院设备中，可诊断心动过速[1]和心律失常[2]等心血管疾病。如今，许多 OEM 厂商都开始支持基于智能手机互联型及手持/配戴型健康监测产品。

健身设备中的心率监控器需求

全世界的人民都越来越重视健康和健身。加强体育锻炼是保持健康的最常用方法之一，因为很多人发现很难通过改变饮食习惯来促进身体健康。在这种情况下，如果一个人想要坚持有规律的运动和锻炼，那就最好能够明白心率监控如此必要的原因。

在体育运动中跟踪心率能让人们确保其健身活动的安全性。一个人在休息状态下的正常心率为每分钟 60 到 100 次。但是，人体在进行体育运动时心率会增加，一个人所能承受的最大心率因年龄而异，年龄越大，最大心率就越低[3]。在运动中记录心率的另一个好处就是能够评估人们的健康改善状况。

此外，很多用户也想要知道他们一天中能消耗多少卡路里。健身房里大多数健身相关的设备都内置心率监控器以及卡路里计算器。但是，更喜欢慢跑或散步的人们不愿借助机器辅助锻炼，那么他们就需要有一款便携式手持设备来监控他们的心率。

心脏跳动过程中的血液流动行为

心肌的收缩与舒张使血液能够流进和流出心脏。在每个心动周期中，心脏中称为窦房结的一组组织会产生电脉冲扩散到整个心脏，从而引起心肌有节律地收缩和舒张。在每个心动周期中，血管也会搏动，从而实现血液在人体内各个部位的流动。

测量心率的一般位置是在胳膊肘、手腕、颈部、膝部后区(腘动脉)和胸部(通常使用听诊器)。心率监控器可用于在这些位置测量心跳。但是，很多心率监控器体积大，难以携带，如果身体有复杂的运动，就无法在这些位置监控心率。但另一方面，心跳其实也可以在指尖和耳垂底部等其它任何部位触摸到，这就为便携式心率监控器的推出提供了灵活性。

根据心率计算卡路里

锻炼中消耗的卡路里取决于整个锻炼过程中的平均心率和锻炼时长。卡路里计算中使用的其它元素为常量。因此，便携式心率监控器也能提供显示消耗卡路里的功能。

下面列出的方程式[4]详细介绍了如何根据心率计算消耗的卡路里。

男性消耗卡路里的准确计算公式(千卡):

消耗的卡路里 = $\{[\text{年龄(年)} \times 0.2017] + [\text{体重(公斤)} \times 0.1988] + (\text{每分钟心跳数} \times 0.6309) - 55.0969\} \times \text{锻炼持续时间(分)} / 4.184 - (A)$

女性消耗卡路里的准确计算公式(千卡):

消耗的卡路里 = $\{[\text{年龄(年)} \times 0.074] + [\text{体重(公斤)} \times 0.1263] + (\text{每分钟心跳数} \times 0.4472) - 20.4022\} \times \text{锻炼持续时间(分)} / 4.184 - (B)$

开始计算前应在设备中手动输入人的年龄和体重。

心率监测中的光电容积脉搏波技术

根据心跳速率，通过指尖或耳垂的血流量会有所不同。因此，我们需要某种机制来检测血流量的变化，从而确定心脏跳动的速率。

监控心率最常用的方法之一就是采用内置 IR 发射器和接收器的光学收发器。当红外线等光辐射通过手指或耳垂血管时，从手指或耳垂处接收到的信号具有周期性，并根据血液流动节律和血液的吸收性而发生变化。(在一般情况下，人体血液能轻松反射射入的红外线光波。)这种方法称为光电容积脉搏波[5]。

光电容积脉搏波有两种类型：传输法与反射法，且均采用基于光感应位置的红外波。

类型一：红外反射法

采用 IR LED 和光电二极管/光电晶体管的众多红外收发器芯片，可在市场上满足心率监控器系统的要求[3]，而光电二极管/光电晶体管的传导则根据反射到其上的光量不同而产生变化。

假定 IR LED 的激励源为常量。当红外收发器放置位置的血流量发生改变时，反射回来的光量也会发生变化。这种光学收发器的输出变化将心跳转化到电子领域中，这就需要经过信号调节过程。最后，我们还需要采用数字逻辑来计算每分钟的脉搏次数，进而得出以 bpm(每分钟心跳数)为单位的心率。

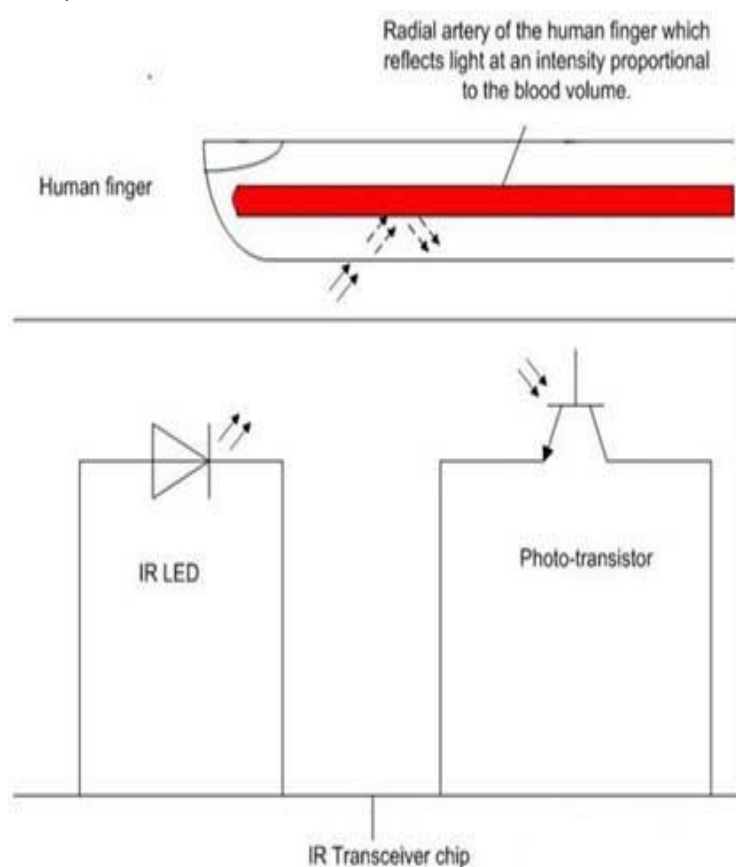


图 1：红外反射法

类型二：红外传输法

当选择手指作为心跳测量的来源时，那么红外反射法往往就是最好的选择。但是，这种方法对在耳垂位置放置类似的器件并不适合。因此，我们必须在耳垂上采用夹子类的装置将心率监控器放置在固定位置，例如放置在口袋中。在此情况下，夹子的一端连接耳垂，能持续获得 IR LED，而夹子另一端(在耳垂的另一端)则能控制光电二极管/光电晶体管。这样，当红外收发器在连接耳朵处的血流量增加时，光电晶体管接收到的光量就会减少(即，与反射法的行为相反)。

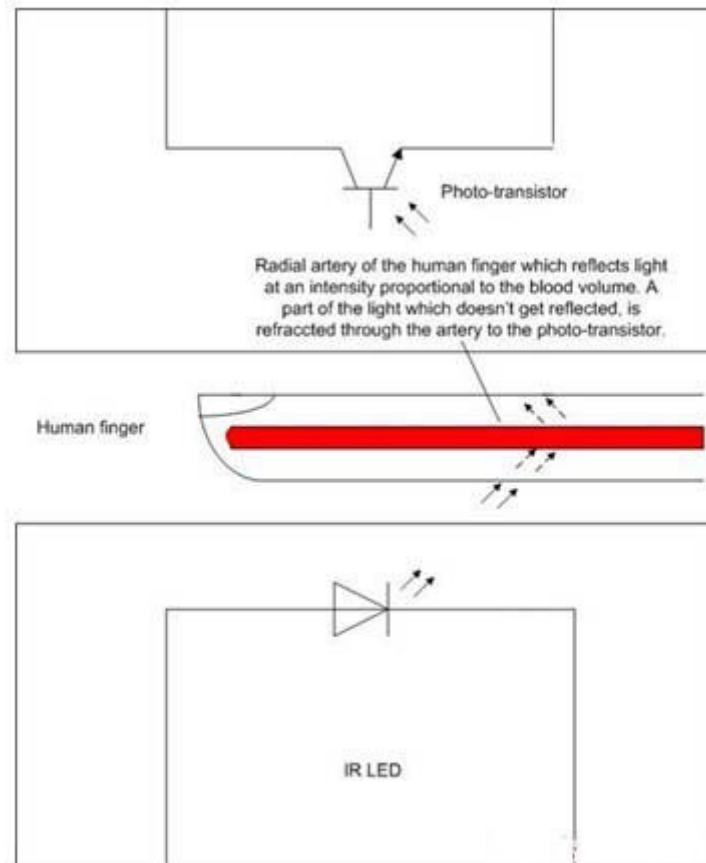


图 2：红外传输法

设计要求

1. 红外发射器包括能持续发射特定波长的红外波的 IR LED。
2. 红外接收器包含光电晶体管，其基极-发射极电压(V_{be})根据其获得的光量而发生变化。要检测 V_{be} 的变化，光电晶体管的集电极需要通过电阻将电压拉至 5V(如图 3 所示)。
[6]
3. 由于红外接收器输出的变化相对于血流量的变化而言非常小(大约介于 50-70 μ V 之间，具体取决于所用的二极管晶体管对)，因此需要放大信号，使其达到可测量的电压范围(近似 V 的水平)。所以，放大器增益必须为 50,000 的水平，才能让电压达到可测量的范围。

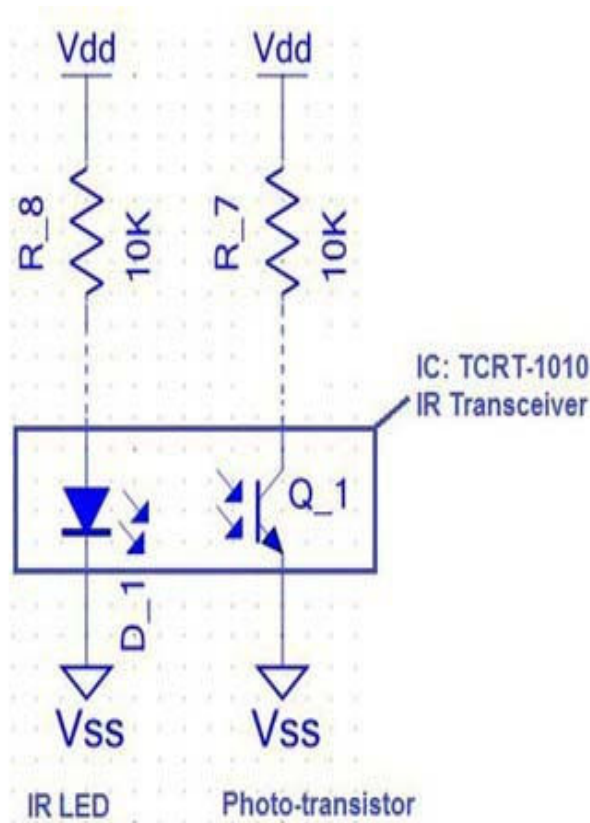


图 3: 红外发射器/接收器

4.设计这种设备时需要考虑各种可能的噪声源,包括测量(即身体接触)噪声、肌电图(EMG)噪声(肌肉收缩)和运动影响(身体运动时常见的情况)。这些高频来源的噪声必须使用一阶或二阶低通滤波器来进行消除。因此,应用需要二阶低通滤波器。考虑到放大级,我们认为需要两级放大器和二阶低通滤波器。

5.如前所述,获得 50,000 的增益需要级联两个增益分别为 250 和 200 的放大器。因此,两个运算放大器可用来设计一个二阶低通滤波器,总增益可达 50,000。

最后,要生成方波列,计算脉搏数量,我们需要将两级放大器的输出馈送给具有适当阈值的比较器。请注意,该适当阈值取决于所用的红外发射器和接收器。

现在,比较器能生成一系列与心跳相同周期的脉冲。我们要把该输出馈送至数字模块或 MCU(微控制器单元),从而计算每分钟脉搏数,并在 LCD 上显示所得到的输出。此外,MCU 还要存储身高体重等个人数据,从而能够计算消耗的卡路里。

从上面的描述中我们可以看到,我们需要:

- 1.心率传感器(红外二极管和光电晶体管对)。
- 2.3 个外部运算放大器: 2 个用于滤波和放大级,另一个用作比较器。
- 3.1 个 MCU,可计算心率和消耗的卡路里,并控制显示器单元(段式 LCD)。如果 MCU 不能直接驱动段式 LCD,那么还需要采用外部芯片。
- 4.1 个段式 LCD,用以显示心率和消耗的卡路里。

因此，我们需要一个芯片进行心率感应，3 个外部运算放大器、1 个 MCU、1 个芯片来连接带段式 LCD 的 MCU 以及一个段式 LCD。赛普拉斯推出的 PSoC 4 等单部低成本可编程片上系统可取代本应用中所需的运算放大器以及 MCU 和 LCD 接口。这种可编程片上系统设有低功耗 ARM Cortex-M0 内核，并完美结合可编程混合信号硬件 IP，能提供灵活的可扩展低功耗混合信号架构，从而充分满足这种应用类型的模拟 I/O、信号处理和实时计算要求。

图 4 显示了如何实现两种类型的心率监控器。对于可提供增益为 50,000 的两级放大器以及 LPF 而言，我们可使用专用运算放大器，每个放大器加滤波器的增益为 250 或 200。由于输入电压范围限制在 0 到 V_{dda}(模拟供电电压，如 5V)，因此负电压输入被剪切，只有正波形能通过放大和滤波级。光电晶体管的输出通过 HPF(高通滤波器)截止为 0.7 Hz，从而消除 DC 波动。现在这些模拟信号调节模块的输出电压范围介于 0 到 1.75V((35 uV) x 50000 增益=1.75V)之间。

放大级的输出必须馈送给比较器，以便生成其频率与心脏跳动速率成正比的方波信号列。可采用专用比较器模块执行此操作。将 1.024V 的高精度内电压作为 ADC(模数转换器)的参考。此相同电压源可馈送至比较器模块的负端，以便检测出血流量/心跳的变化。

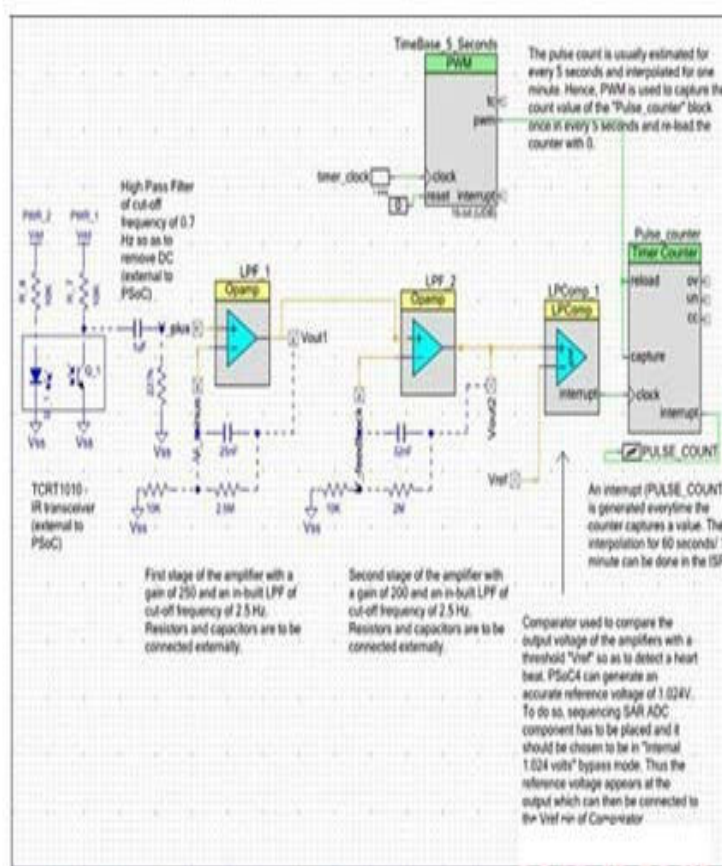


图 4：心率监控器的电路图(屏幕截图源自 PSoC Creator)

来自比较器模块的脉冲可馈送给计数器模块(PSoC 4 中专用的 TCPWM 模块)，从而计算每分钟出现的脉搏数。一旦计算出心跳，内部 ARM Cortex M0 内核就可用上述方程式 A

和 B 给出的方法计算消耗的卡路里。该系统可通过专用段式 LCD 模块灵活显示心率以及消耗的卡路里，且该段式 LCD 模块能在“数字相关模式”或正常的“PWM 模式”下工作[8]。

卡路里的计算需要输入年龄、体重等具体参数。在过去，所用设备采用机械按键，用户必须按下按键才能增减段式 LCD 上显示的年龄、体重值。而现在，大多数消费者更喜欢使用直观的电容式感应触摸按键来取代机械按键。此外，采用电容式按键，还可支持卡路里计算/心率监测的启动和停止。电容式感应(CapSense)可支持最多 35 个按键，并具备较长的接近感应和防水操作功能，可实现低功耗、高扫描速度和高信噪比(SNR)。

此外，功耗也是心率监控器的一个重要设计考虑因素。可编程片上系统必须实现低功耗可行性，并在没有执行任何操作的情况下让系统进入休眠状态。有效的功耗模式选项包括工作、休眠、深度休眠、冬眠及关机模式等，从而平衡系统响应能力和功耗效率。

由于心跳速率肯定在 72 bpm 或每秒钟 1.2 次左右，因此我们能在计算出卡路里和心率后就让系统进入休眠模式。比较器的输出可作为唤醒源，一旦设备从休眠中唤醒就能执行所有计算。计算完成后，设备可再次回到休眠状态。即使设备处于休眠或深度休眠的模式下，PSoC 4 中的段式 LCD 组件也能继续驱动段式 LCD。由于设备采用电池供电，因此这种低功耗技术的使用能帮助 OEM 厂商实现产品特色化，延长电池使用寿命。