

如何设计低功耗、高精度自行车功率计

Andrew Brierley-Green, 首席工程师

摘要

本技术文章主要探讨信号链、电源管理和微控制器IC在一种实用的力检测产品——自行车功率计——中的应用。将说明自行车功率计运行的物理原理和电子设计。本文介绍的解决方案功耗非常低,能够精确放大低频小信号,并且成本低、体积小。

简介

自行车功率计是一种测量健身自行车骑行者功率输出(以瓦为单位)的仪器。此类功率计作为训练辅助工具,可向骑行者提供有关其运动量的反馈信息。例如,骑行者可以设定在上坡期间保持至少200 W功率输出的目标。如果功率低于此值,骑行者可以通过加快踏板速度或换至更高档位来增加功率。功率通常显示在自行车车把上安装的主控单元上。功率计与计算和显示功率的设备之间必须有无线连接。为了测量功率,有必要测量施加到自行车传动系统某部分的机械应变。惠斯通电桥电路中连接的应变片可用于测量机械应变。惠斯通电桥产生的信号通常非常小,频率非常低。因此,需要通过具有零漂移输入失调电压的高精度放大器将信号放大。此外,功率计始终由电池供电,因此功率计的总电流消耗必须尽可能低。

MAX41400是一款低功耗、高精度仪表放大器,工作电源电压范围为1.7V至3.6V。此外,该器件具有轨到轨输入和输出。它提供8个输入可选的固定增益设置。对于低频信号应用而言,由于其典型1μV的零漂移输入失调电压,成功消除了通常在CMOS输入放大器中存在的高1/f噪声。典型电流消耗为65 μA,关断模式下电源电流降至0.1 μA。MAX41400采用1.26 mm × 1.23 mm、9引脚WLP封装或2.5 mm × 2 mm、10引脚TDFN封装。小封装尺寸非常适合通常尺寸要求严苛的自行车功率计。

自行车功率计中的另一个关键IC是MAX32666微控制器单元(MCU)。这是一款基于Arm® Cortex®-M4的MCU,集成了蓝牙®低功耗(BLE)无线电。来自仪表放大器的信号由MAX11108逐次逼近寄存器(SAR)模数转换器(ADC)进行采样,数字样本无线传输到运行应用程序的Android设备,以计算功率并绘制功率图形。

工作原理

本文讨论的自行车功率计测量自行车曲柄臂的弯曲应变。曲柄臂是一根杆,一端连接踏板,另一端连接底部支架。当骑行者踩踏板时,曲柄臂受力,并以一定的角速度旋转。参见图1。下面讨论功率计运行所依据的物理原理。

功是通过力传递的能量。力作用于物体,使物体移动一定的距离,这就是做功。所做的功W与物体移动的距离d和所作用的力F的关系由公式1给出。只有力矢量在位移方向上的分量做功。

$$W = F \times d \quad (1)$$

使用国际单位制(SI)时,力的单位为牛顿,距离的单位为米,因此功的单位为牛顿米或焦耳。1焦耳等于1牛顿的力在1米的距离上所做的功。

功率定义为做功的速率。它由公式2定义。

$$P = \frac{W}{t} \quad (2)$$

P为功率,以瓦为单位;W为功,以焦耳为单位;t为时间,以秒为单位。

考虑扭矩和功率之间的关系,如果知道转速(也称为角速度),就可以计算功率。功率 = (力 × 距离) / 时间。考虑自行车曲柄臂在t秒内转一整圈。假设在整个旋转过程中作用力是恒定的。力的作用距离就是半径为r的圆的周长,其中r是曲柄从枢轴点到力的作用点的长度。

$$P = \frac{F \times 2\pi r}{t} \quad (3)$$

$F \times r$ 为扭矩，记为 τ ；一个完整的圆有 2π 弧度，因此 $2\pi/t$ 为角速度，记为 ω 。公式3可以改写为公式4。

$$P = \tau\omega \quad (4)$$

因此，为了计算功率，我们需要两个量：扭矩和角速度。扭矩就是力与曲柄臂长度的乘积，是一个常数，因此我们需要测量作用力和角速度。请注意，只有力矢量的切向分量对功率有贡献，因为它是力矢量中唯一做功的分量。

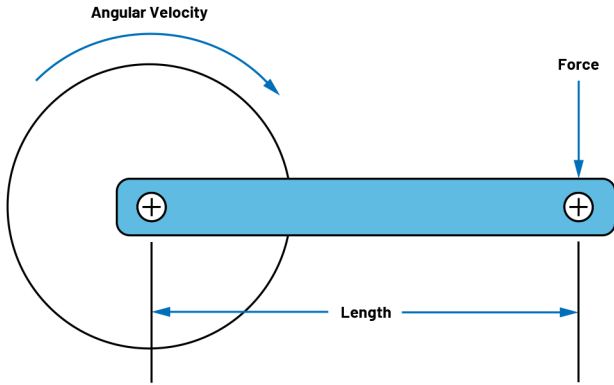


图1. 功率计算

推导中做了一个简化，即在曲柄臂的旋转过程中，作用力是恒定的。但是，实际情况并非如此。例如，当曲柄臂垂直时（如果把曲柄臂看作时钟的分针的话，就是6点钟或12点钟位置），力的切向分量将为零。此时力的径向分量最大，但径向分量不做功。当曲柄处于水平位置时（即3点钟或9点钟位置），力的切向分量最大。这意味着在整个旋转过程中，扭矩会连续变化，因此我们需要在旋转期间多次对力进行采样。

本文讨论的自行车功率计安装在左侧曲柄臂上。我们仅测量一条腿消耗的功率，并假设另一条腿消耗的功率平均值与前者相同。我们将从功率计获得的功率读数乘以2，以计算骑行者的总功率输出。更复杂（且昂贵）的功率计可单独测量每条腿的功率。

力通过应变片来测量，角速度通过惯性测量单元(IMU)陀螺仪来测量。然而，为了节省功耗和成本，本文稍后将讨论一种替代技术，即通过处理应变片信号来推导角速度。

力的测量

载荷力导致曲柄臂发生机械变形，在本例中为弯曲。传动系统的其他部件（例如穿过底部支架的主轴）将发生扭转应变，某些型号的自行车功率计会利用这种应变。

测量应变的标准方法是使用一种称为应变片的传感器。应变片是嵌入柔性材料中的非常细的长金属丝。将应变片贴在我们想要测量应变的物体的表面。应变片的方向取决于我们希望测量的应变类型。当物体变形时，应变片中的金属丝会被拉伸或压缩。金属丝被拉伸的话，会变得更长更细。金属丝的电阻与横

截面积成反比，与长度成正比，因此金属丝的这些变形都会导致电阻变大。金属丝被压缩的话，会变得更短更粗，从而导致电阻变小。未变形的应变片具有一定的标称电阻，标准值为120 Ω、350 Ω和1 kΩ。当应变片被压缩或拉伸时，电阻会在其标称值附近略微波动变化。本文中的自行车功率计使用1 kΩ应变片，以便尽量减小流经惠斯通电桥的电流。

为了测量如此小的电阻变化，通常会使用一种称为惠斯通电桥的电路。参见图2。

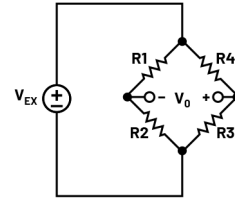


图2. 惠斯通电桥

该电桥由两个并联的分压器组成。电桥的顶部和底部之间施加一定的激励电压 V_{EX} 。输出电压为图中所示的 V_o 。输出电压的计算公式如下所示。

$$V_o = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \times V_{EX} \quad (5)$$

如果电桥是平衡的，即 $R_4/R_3 = R_1/R_2$ ，则 $V_o = 0$ V。在所谓的四分之一电桥配置中，四个电阻中的一个被应变片取代。假设 R_4 被 R_q 取代。当 R_4 值改变时，电桥变得不平衡，差分电压 V_o 变成非零值。

本文讨论的功率计使用半桥配置，其中 R_4 和 R_3 是应变片， R_1 和 R_2 是虚拟1 kΩ电阻。使用两个应变片而不是一个，可以使电桥输出的信号幅度加倍。此外还能提供温度补偿。温度也会导致应变片的金属丝膨胀或收缩，从而影响电阻，这种变化与机械应变无法区分。然而，由于两个应变片非常靠近且温度相同，因此与温度相关的电阻变化会相互抵消。

系统描述

完整系统包括：安装在左曲柄臂上的小型窄体PCB，贴在曲柄臂上的应变片，以及Android设备，例如智能手机或平板电脑。Android设备通过BLE从PCB接收原始数据，然后计算并显示功率。

图3显示了PCB的框图。

整个PCB由一枚CR2032纽扣电池供电。在电池的使用寿命期间，电池的标称3 V电压会发生变化；随着电池电量逐渐耗尽，此电压会逐渐降低。ADC和仪表放大器的基准电压以及电桥的激励电压都需要稳定、精确受控的电压，因此我们使用MAX17227升压转换器将原始电池电压升压至3.8 V。电桥的3 V激励电压和ADC基准电压由MAX6029基准电压源利用3.8 V电源产生。所有IC的3.0 V电源电压均由MAX1725 LDO稳压器产生。

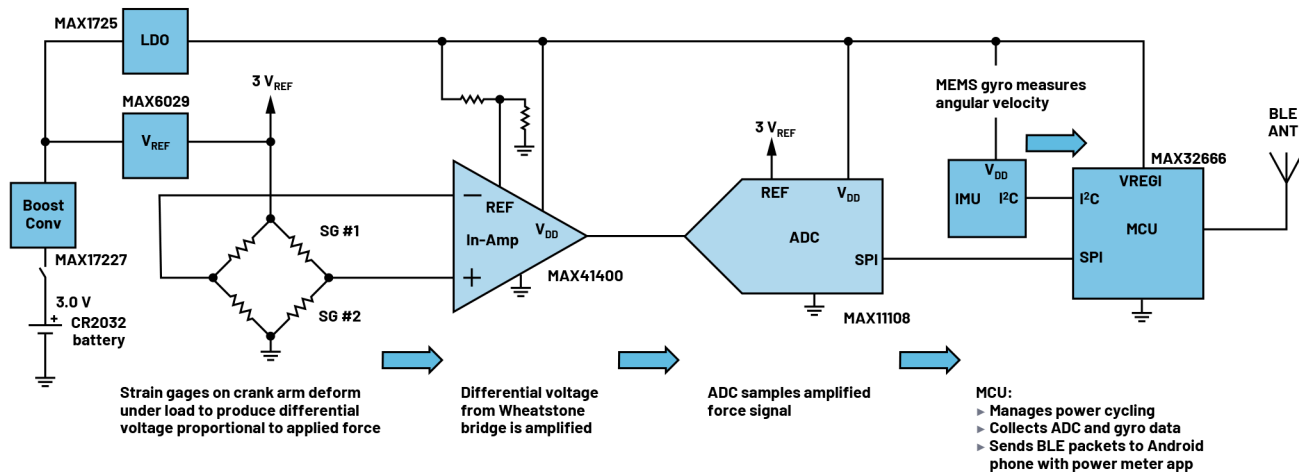


图3. 功率计信号链框图

MAX41400仪表放大器将电桥输出的差分电压放大并转换为单端电压。连接到仪表放大器REF输入的分压器提供1.5 V基准电压。放大后的应变片信号由MAX1108 ADC进行采样。这是一款带串行外设接口(SPI)的12位SAR ADC。角速度由微机电系统(MEMS) IMU中的陀螺仪测量。IMU由MCU通过I²C接口控制。

MAX32666 MCU运行的固件控制电路的周期供电，然后采集ADC和IMU样本，并将这些数据放入BLE数据包中进行周期性传输。

尽可能降低功耗

PCB上的整个电路/芯片的运行和休眠以一定占空比进行，以充分降低平均功耗。用于检测力的采样速率为25 Hz。MCU每40 ms从深度睡眠模式（该模式下大部分内部电路处于关断或低功耗状态）唤醒一次。然后，固件将各种模拟器件从低功耗状态唤醒。例如，有一个MOSFET晶体管与应变片电桥的激励电压串联，充当开关。当电桥不使用时，该晶体管会切断流过电桥的DC电流。电桥相当于3 V和GND之间的1 kΩ电阻，因此当开关闭合时，将有3 mA的DC电流流经电桥。此电流若一直存在，会大大增加总平均功耗。仪表放大器有一个关断输入引脚，该引脚通过MCU的通用输入/输出(GPIO)进行控制。除了对力信号进行采样的短暂时间外，仪表放大器处于关断状态。类似地，在对力信号进行采样并读出值之前和之后的时间里，ADC一直保持低功耗状态。为使ADC在低功耗和活动状态之间转换，需要写入SPI命令。最后是尽量降低IMU电流消耗。由于仅使用陀螺仪而不使用加速度计，因此加速度计始终保持低功耗模式。陀螺仪仅在捕捉和读取样本所需的极短时间内处于活动状态，其余时间处于低功耗状态。此外，角速度仅以1.6 Hz的速率进行采样。本文稍后将展示IMU可以完全省去，从而节省更多功耗。在完成对力和可能的角速度的采样并存储样本后，MCU就会返回深度睡眠模式。累积了一定数量的样本后，MCU将其打包成BLE数据包并进行传

输。当电路板不使用时，与电池串联的滑动开关会将电池与其余电路断开。

当使用IMU且电路板运行时，3 V电源下测得的平均电流消耗为760 μA，因此平均功耗为2.3 mW。这是包括惠斯通电桥在内的整个系统的功耗。CR2032电池的典型电量为225 mAh，因此其工作寿命约为296小时。如果移除IMU，则3 V电源下的电流消耗降至640 μA，平均功耗为1.9 mW，CR2032电池的工作寿命将是352小时。

角速度估算

图4显示了转一整圈所测得的作用于自行车曲柄臂的力的切向分量（以牛顿为单位）。当曲柄臂旋转时，作用力的切向分量周期性变化。

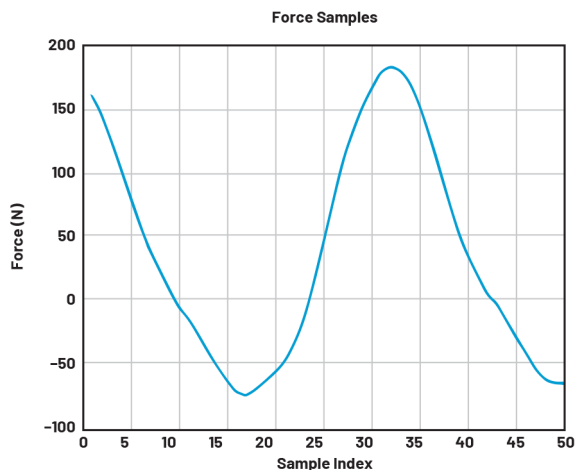


图4. 曲柄臂上的力与时间的关系（40 ms采样间隔）

原则上，可以通过对力信号进行信号处理来计算角速度。信号处理算法利用MATLAB®进行编程。基本方法是取一个由连续的力样本组成的向量，然后用公式6所示的正弦函数来拟合。

$$y = A \sin(\omega x + \phi) + B$$

A是幅度， ω 是角速度， ϕ 是相位，B是偏移量。

优化成本函数由公式7给出。这是最小二乘成本函数，其中 $\hat{y}$ 是实测数据点的向量， y 是公式6的输出。

$$C = \sum (\hat{y} - y)^2 \quad (7)$$

为使公式7中的C值最小，我们利用MATLAB最小搜索非线性规划求解器来求得A、 ω 、 ϕ 和B的值。我们只使用求得的 ω 值，而不使用其他值。估算当前样本向量的 ω 之后，采集下一组连续样本并重复该过程。在极少数情况下，最小化搜索无法收敛，并且成本远高于正常水平。在这种情况下，丢弃计算出的 ω 值，而使用先前的值。

为了验证这一概念，我们使用BLE嗅探器捕捉自行车运行期间传输的一系列数据包。数据包中包含角速度和力的样本。利用MATLAB脚本提取数据包的内容并进行后处理。图5中绘制了每分钟的估计踏频（以转数为单位），并将其与陀螺仪指示的踏频进行了比较。

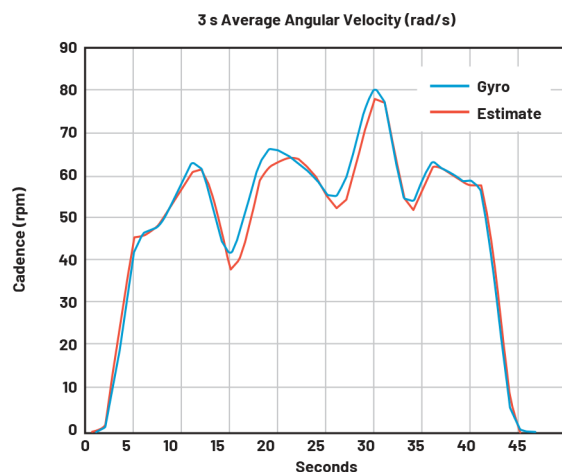


图5. 角速度估算

(6) 能量测量

骑行者所做的机械功就是功率对时间的积分，因此存在足够的数据来计算骑行者消耗的能量。应用软件对功率随时间的变化进行数值积分，得出以焦耳为单位的机械功。所得值乘以转换系数，便可将焦耳转换为千卡。假设为了做一焦耳的功，骑行者需要消耗四焦耳的化学能，那么将机械功乘以比例因子4，就能估算出骑行者消耗的千卡能量。

演示视频

本文介绍的解决方案是在固定式健身自行车上实现的，如[自行车功率计视频](#)所示。两个应变片贴在自行车的左曲柄臂上，包含电子元器件的小型PCB安装在曲柄臂上并连接到应变片。

结论

本文介绍了低功耗、高精度MAX41400仪表放大器的力检测应用，具体而言是自行车功率计。将低功耗MAX32666 MCU与几个ADI电源管理IC组合使用，构成的解决方案的平均功耗仅为2.3 mW。

作者简介

Andrew Brierley-Green是工业多市场事业部工业自动化部门定时和传感器接口产品线的一名首席工程师。他的工作地点在美国加利福尼亚州圣何塞。2021年ADI公司收购Maxim Integrated，他由此成为ADI公司的一员。在Maxim，他负责各种RF/无线产品的应用和系统工程以及产品定义。Andrew在半导体行业拥有30多年的系统工程师工作经验。他拥有不列颠哥伦比亚大学电子工程应用科学学士学位和斯坦福大学电子工程硕士学位。

