

摘要

许多电子产品必须与用户或操作员进行交互才能进行通信。在过去 40 年里，电子产品的主要通信方式是听觉和视觉反馈，它们的主要通信语言是声音和光线。今天，触觉反馈已成为电子产品与使用触觉的人类沟通的另一种方式。触觉反馈可用于消费类、工业类和汽车类应用，如智能电话、平板电脑、鼠标、ATM 机和汽车信息娱乐系统。

智能电话、智能手表和健身追踪器都是可以使用触觉反馈的电池供电便携系统。许多工程师可能会担心电池关键型应用中触觉反馈的能耗问题。DRV260x、DRV262x ERM/LRA 驱动器系列和 DRV2667 压电式驱动器不仅可以增强用户的触觉体验，同时还能尽可能地降低能耗。

本文档介绍了三种传动器技术和测量能耗的方法，并对每种传动器进行了比较。

内容

1 引言.....	2
1.1 偏心旋转质量.....	2
1.2 线性共振传动器.....	2
1.3 压电式传动器.....	3
2 如何测量能量.....	5
2.1 电流消耗.....	5
2.2 能耗.....	6
2.3 电流和加速度.....	6
3 ERM、LRA 和压电式传动器的能耗比较.....	7
4 DRV260x 和 DRV262x 驱动器的能耗优势.....	9
5 附录 A 传动器能耗.....	11
6 附录 B. 测试设置图片.....	12
7 附录 C. 智能手机场景的能耗计算.....	13
8 修订历史记录.....	13

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

触觉通过使用振动模拟特定活动、表面和效果提供机械反馈。它可以通过改变振动的频率、幅度、时长和方向来模拟不同的表面和效果。

图 1-1 展示了三种类型的传动器，偏心旋转质量 (ERM)、线性共振传动器 (LRA) 和压电式传动器。

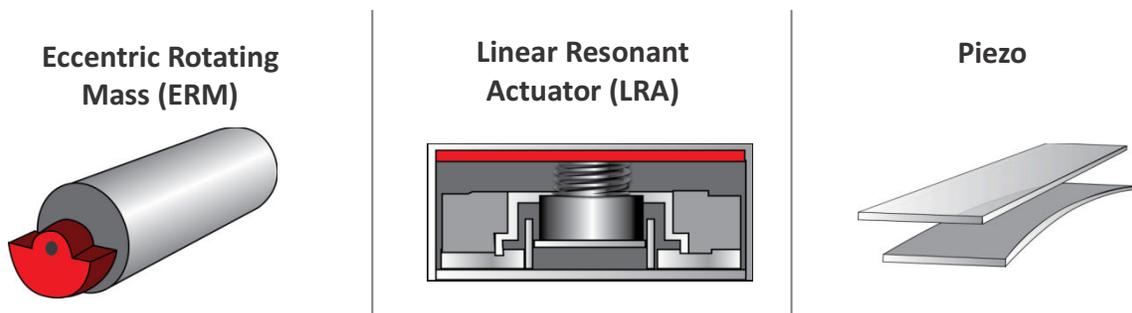


图 1-1. 三种类型的传动器

1.1 偏心旋转质量

ERM 是一种存在偏心质量的直流电机，通过旋转产生振动。当 ERM 旋转时，偏心质量会产生向心力；这种向心力会使电机产生位移。人们将这种位移视为振动。ERM 由于旋转力而产生振动，所以会在两个轴 (X、Y 或 Z 轴) 上存在加速度。这在某些应用中会在意外的轴上形成损耗。

优势：

- 易于驱动
- 低成本
- 形状灵活 (柱状或硬币)

劣势：

- 响应慢
- 加速度与角频率相关 (ERM)
- 高能耗

1.2 线性共振传动器

LRA 是一种以线性运动方式振动的弹簧质量块系统。在内部，有一个弹簧悬挂的线圈，当施加电压时，线圈会产生磁场。线圈与磁铁和质量块互动，当磁场随着施加的驱动信号而变化时，磁铁和质量块会上下移动，产生力量。这种运动被称为振动。

因为弹簧常数，明显的振动只会发生在共振频率时。线性传动器必须在共振频率周围的窄带宽 ($\pm 2\text{Hz}$) 内驱动，否则会导致加速度掉落 (参阅图 1-2)。因为制造误差、元件老化、温度和机械装配，LRA 的确切共振频率不定。具有自动共振功能的 DRV260x 和 DRV262x 驱动程序可以检测共振频率，帮助提高加速性能。

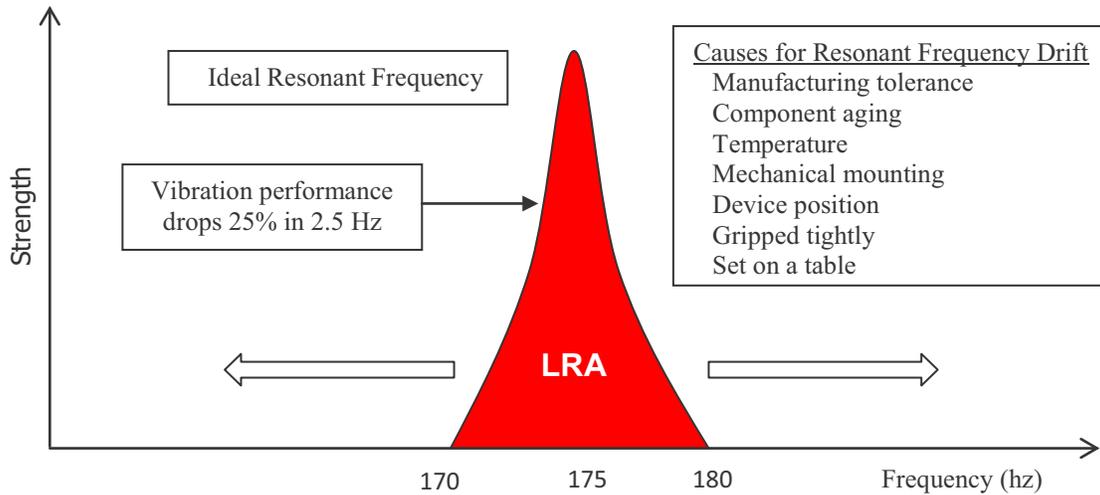


图 1-2. LRA 共振频率漂移

LRA 加速发生在一个轴上，因为它以上下运动的方式振动。LRA 的这种优势可以产生更大的振动强度，节约更多能量。

优势:

- 比 ERM 响应时间更短
- 加速度更大
- 效率更高

劣势:

- 共振频率漂移会降低加速度
- 难以驱动

1.3 压电式传动器

压电材料是一种在施加电压后会发生变形（动）的材料。压电式触觉传动器能够精确驱动高清触觉，与 ERM 和 LRA 相比，启动时间更短、驱动电压带宽更宽、可闻噪声更低且振动更强。

压电式传动器有两种类型：单层和多层。由于压电式传动器是容性负载，所以单层压电式传动器在移动同样距离时需要更高的电压。多层压电传动器所需的电压较低，但需要较高的电流。DRV2667 可以将压电式传动器驱动到高达 200Vpp。

压电式传动器在施加了电压后会进行振动，导致压电材料发生变形。材料变形会产生灵活移动，导致在某个方向的加速。总的来说，压电式传动器具备更大的加速度、更快的响应时间以及更低的功耗。

优势:

- 响应时间快
- 宽频带宽
- 加速度更大
- 效率更高
- 可闻噪声更低
- 有多种形状和尺寸可选。
- 灵活的安装选项

劣势:

- 需要更高电压驱动
- 与 LRA 和 ERM 相比更昂贵

表 1-1 展示了 ERM、LRA 和压电式传动器的对比。

表 1-1. 致动器对比

属性	ERM	LRA	低层数压电式	多层数压电式
性能	良好	更好	最好	最好
加速度 (g)	~1	约 1-2	约 3-5	约 3-5
可闻噪声	噪声很大	中等噪声	无噪声	无噪声
响应时间	约 50ms	约 30ms	0.5ms	0.5ms
能耗	高	低	较低	较低
高清触觉	无	无	有	有
成本	\$	\$\$	\$\$	\$\$\$

2 如何测量能量

在本文档中，我们评估了 AAC 1036C LRA、Sanyo NRS2574I ERM 和 SEMCO PHAT423535XX 压电式模块。所有图片都取自 DRV2604EVM-CT 和 DRV2667EVM-CT。在 DRV260x 和 DRV262x 驱动器系列之间，产生的能耗没有显著的差别。以下是示波器通道的图例：

- C1 : OUT+ 波
- C2 : OUT - 波
- 数学 : C1-C2 波
- C3 : 加速度
- C4 : 平均电流

能耗对于便携应用非常重要，尤其是对于智能手表、手环和健身追踪器等可穿戴产品。本节说明了每种传动器能耗的测量方法，并对它们的能量优势进行了比较。

可以通过三种方法来测量触觉能量：

- 电流消耗
- 能耗
- 电流和加速度

以下各节将分别介绍这些不同的方法：

2.1 电流消耗

本节比较 ERM、LRA 和压电式传动器的平均电流消耗。在比较每个传动器的异步电流消耗时，这是很有用的。它也可以显示电池供电产品的最大点击次数。

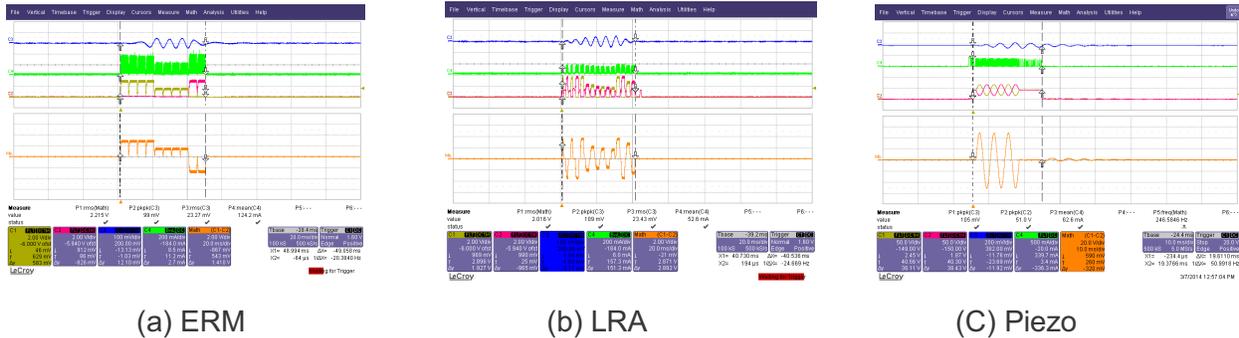


图 2-1. 点击电流消耗测量数据

图 2-1 显示 ERM、LRA 和压电式传动器的点击波形。波形的平均电流测量数据显示了每种传动器的能耗。将峰值加速度常数保持在 0.9g，ERM 耗用了 124mA，LRA 耗用了 51.3mA，而压电式传动器耗用了 62.6mA。

对于 1200mAh 电池，我们可以使用电流耗用来计算最大点击次数。使用表 2-1 中的 ERM 值来计算一个示例：

表 2-1. 点击电流耗用数据

点击	平均电流 (mA/点击)	时间窗口 (ms)	最大加速度 (g)	最大点击次数 (1200mAh 电池)
ERM	124	50	0.868	696774
LRA	52.6	40	0.956	2053232
压电式	62.6	19.61	0.921	3570076

结论

- 比较 ERM 与 LRA 时发现，LRA 在同样的加速度下消耗的电流是 ERM 的一半。
- 压电式点击的电流消耗与 LRA 点击接近，但低于 ERM 点击的消耗。

- 对于压电式，最大点击数比 ERM 多 5 次。至于 LRA，最大点击数比 ERM 多 3 倍。

2.2 能耗

本节介绍每个触觉活动的能耗。点击、蜂鸣和提醒的能耗可以用 μA -小时和 mA -小时为单位来衡量。

对于图 2-1 中的 ERM，点击持续时间是 50ms。ERM 点击的能耗可以使用以下等式计算：

使用之前的等式，LRA 点击的能耗是 $0.57\mu\text{Ah}$ ，而对于压电式，能耗为 $0.34\mu\text{Ah}$ 。

表 2-2. 点击能耗数据

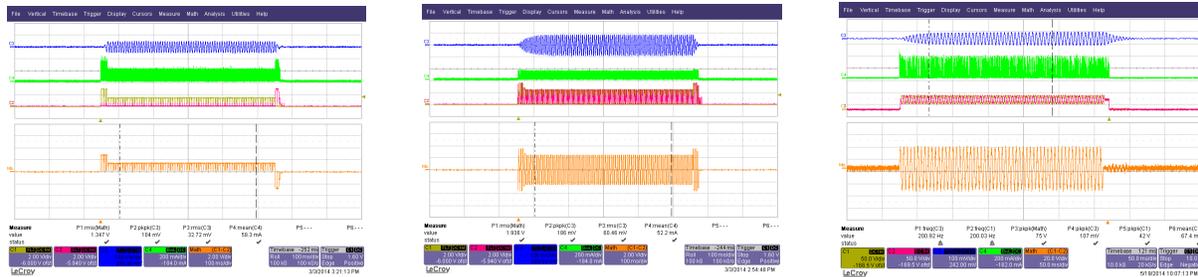
单击	VDD (V)	平均电流 (mA)	时间窗口 (ms)	能量 ($\mu\text{Ah}/\text{点击}$)
ERM	5	124	50	1.72
LRA	5	52.6	40	0.58
压电式	5	62.6	19.61	0.34

结论

- 与 ERM 相比，LRA 每次点击可节约 67% 的能量。LRA 具有更佳效率，且在电池寿命方面对应用程序更好。
- 压电式响应时间短，可创建较短的效果。压电式点击的短持续时间和短响应时间可帮助节约能量。

2.3 电流和加速度

这是另一个参数，测量的是电流与加速度的比率。它显示哪种传动器可以提供更佳加速度但消耗更少的电流。此方法用于一种连续且稳定的加速效果。



(a) ERM

(b) LRA

(c) Piezo

图 2-2. 蜂鸣能耗测量

图 2-2 展示蜂鸣效果期间 ERM、LRA 和压电式传动器的能耗。蜂鸣波形是一种具有持续加速的连续波形。通过“ mA/g ”这种新的能量指标，即每加速单位的电流，比较这些传动器的不同加速力。此指标标准化了每加速单位的电流。

表 2-3. 蜂鸣能耗数据

蜂鸣	平均电流 (mA)	加速度 (g)	能量 (mA/g)
ERM	58.3	0.91	62.1
LRA	52.2	1.63	32.0
压电式	67.4	0.93	72.4

结论

- LRA 每 g 耗用的电流最少，这意味它是持续时间长的效果的更佳传动器。
- ERM 和压电式传动器在长时效果中每 g 耗用的电流相同。

请参阅节 5，了解更多种传动器上测试出的点击能耗。数据是在 DRV2603EVM-CT 上评估所得。但是，在 DRV2604EVM-CT 上测试时，并没有显著差别，因此仍然能够同时代表 DRV260x 和 DRV262x 驱动器系列。

3 ERM、LRA 和压电式传动器的能耗比较

在本节中，我们汇总了采用不同类型触觉效果的 ERM、LRA 和压电式传动器的更多能耗数据。

表 3-1. 能耗比较数据

效果	压电式			LRA			ERM		
	时长 (ms)	能耗 (μAh)	加速度 (g)	时长 (ms)	能耗 (μAh)	加速度 (g)	时长 (ms)	能耗 (μAh)	加速度 (g)
碰撞	13.3	0.31	0.96	40	0.30	0.93	39	1.14	0.89
点击	19.61	0.34	0.921	51.3	0.57	0.903	50	1.72	0.90
脉冲	48	0.90	0.91	91	0.68	0.95	94	1.72	0.92
通知	60	1.18	0.92	75	0.47	0.91	78.70	2.00	0.96
蜂鸣	609	11.4	0.90	752	3.38	1.00	609	11.41	0.93

图 3-1 将此数据转换为一个柱状图：

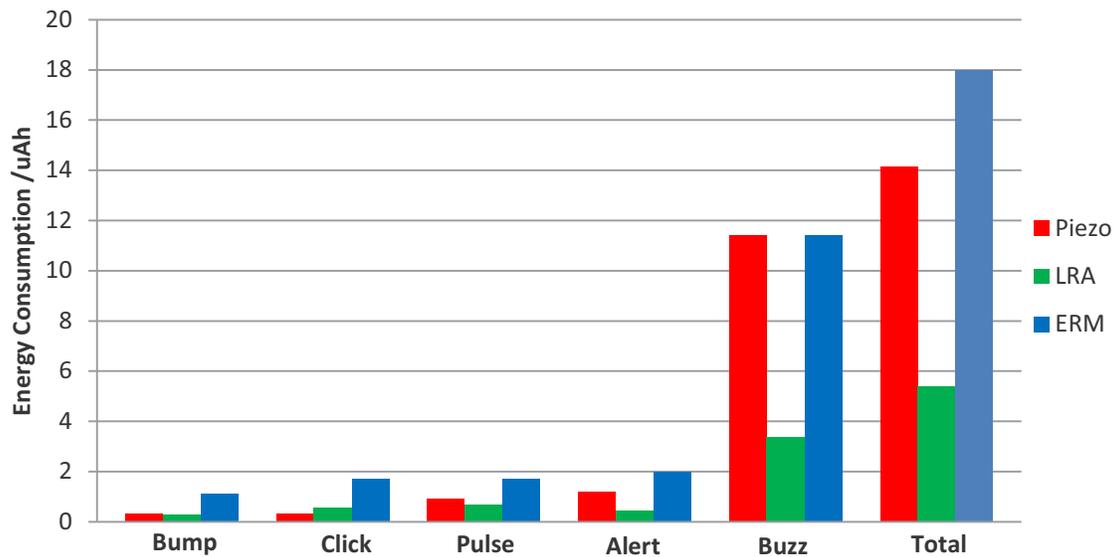


图 3-1. 压电式、LRA 和 ERM 传动器的能耗

表 3-1 和图 3-1 展示了以下结论：

- 与其他传动器相比，压电式传动器在短时效果上耗用的能量最少
- 在播放持续加速的更长效果时，压电式耗用的能量与 ERM 等量
- 与 ERM 相比，LRA 可以节省 60%-80% 的能量

该传动器加载了一个 100g 的金属质量块来模拟智能手机。节 6 附录 B 展示了测试条件，附录 C 展示了如何使用表 3-2 中的效果数据，来为智能手机计算每种场景的结果。

表 3-2. 电话场景

用量	能耗 (uAh)		
	压电式	LRA	ERM
手机拨打 (1 次)	140.2	46.31	154.22
15 次	2103	694.62	2313.54
短信 (1 次)	72.74	115.87	352.40
15 次	1091.04	1737.96	5286
回复电子邮件	106.74	172.86	524.6
5 次	533.68	864.32	2623
提醒 (1 次)	125.84	38.5	134.18
10 次	1258.4	385	1341.8

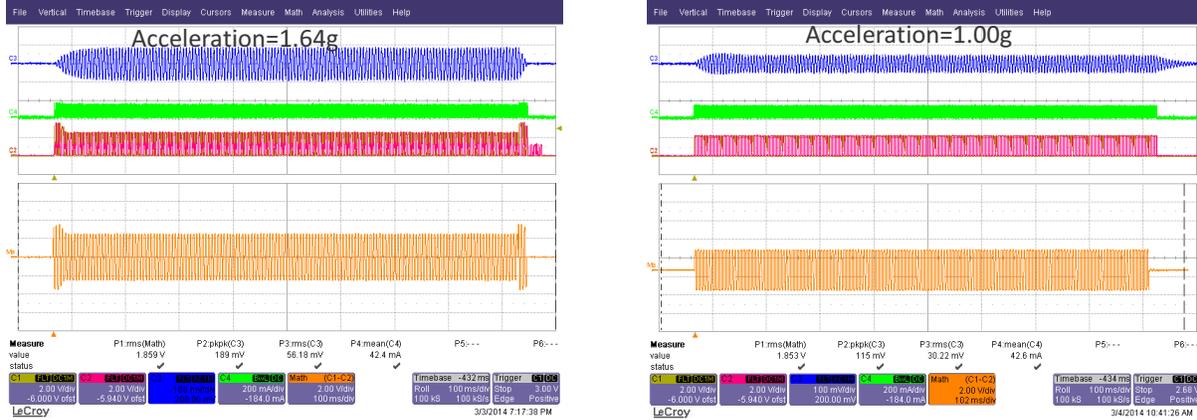
表 3-2. 电话场景 (continued)

用量	能耗 (uAh)		
	压电式	LRA	ERM
游戏 - 60 分钟	2628	2235.40	6979.30
社交媒体 60 分钟	2624.69	2242.46	7087.40
待机	240	45.6	45.6
总计	15204.41	11744.05	36760.8
总量/1200 mAh 电池 (%)	1.267	0.979	3.06

很明显，LRA 和压电式对于便携式应用具有更大的能量优势。对于智能手机应用程序，ERM 耗用的能量几乎比 LRA 和压电式多两倍。智能手表的电池通常更小，所以触觉的总能耗比例更大。在本例中，TI 触觉解决方案的能源节省更加显著。

4 DRV260x 和 DRV262x 驱动器的能耗优势

DRV260x 和 DRV262x 驱动器是一系列适用于 ERM 和 LRA 传动器的触觉驱动器。它们包含许多功能，可帮助减少 LRA 传动器的能耗。一个重要的功能就是自动共振跟踪引擎。自动共振会实时跟踪 LRA 的共振频率。如果共振频率出于任何原因从波形中间偏移，引擎会逐周期地跟踪该频率，以尽可能提高传动器加速度。通过在共振频率下振动，驱动器每“g”加速度需要的能量更少，可实现即时节能。



(a) Auto Resonant on

(b) Auto Resonant off

图 4-1. 自动共振打开/关闭时的蜂鸣波形

表 4-1. 自动共振打开和关闭数据

	加速度 (g)	启动时间 (ms)	停止时间 (ms)	f (Hz)	能量 (mA/g)
共振打开	1.64	56.0	14.5	175	28.4
共振关闭	1.00	51.7	71.6	185	51.8

表 4-1 显示在自动共振开启时，加速度更大且功耗更低。自动共振打开时，DRV2605 随着不断变化的 LRA 共振频率 (以 175Hz 为中心) 进行调整。但是，在自动共振关闭时，驱动器不再跟踪频率。所以在自动共振打开时，可以实现更大的加速度。所有 DRV260x 和 DRV262x 器件具有同样的结果。

自动共振还能提高传动器的启动速度和停止速度。

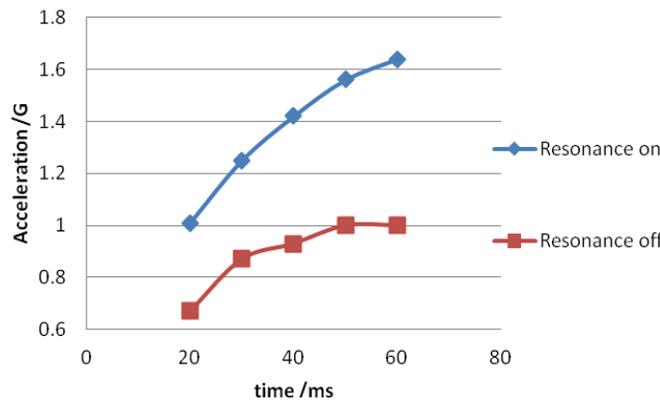


图 4-2. 启动速度

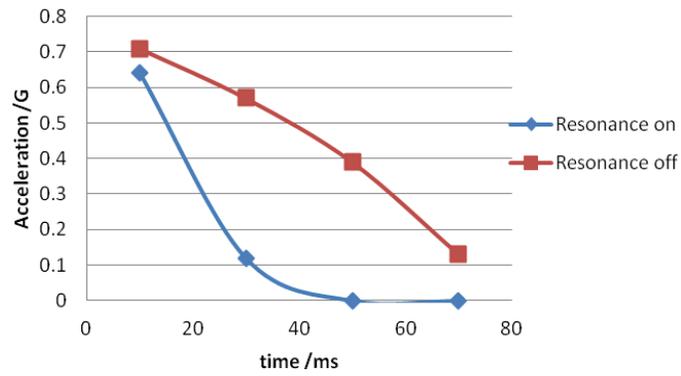


图 4-3. 停止速度

表 4-1 显示自动共振打开时启动时间更长；但这是因为自动共振而产生更高加速度的结果。自动共振引擎可帮助传动器更快地启动和停止，在更少的时间实现同样的加速度，正如图 4-2 和图 4-3 所示。在表 4-1 中，当自动共振打开时，传动器只需要多一点时间就可以产生更大的加速力。

5 附录 A 传动器能耗

表 5-1 显示了 AAC、SEMCO、Copal、AWA 和 Sanyo 等不同制造商生产的多种传动器的能耗。

表 5-1. 传动器能耗数据

传动器	时长 (ms)	加速度 (g)	满量程点击 (μAh/点击)
LRA - AAC ELV1411	50	0.941	0.680
LRA - Partron (矩形)	50	0.466	0.531
LRA - Partron (圆形)	50	0.557	0.458
LRA - LG Innotek	50	1.32	0.412
LRA - AAC ELV1036A	50	0.914	0.541
LRA - SEMCO 1030	50	0.846	0.521
LRA - SEMCO 1036	50	0.795	0.414
LRA - Copal AA7	45	0.631	0.633
ERM - Sanyo NRS2574I	45	1.103	1.819
ERM - Sanyo BMR3565	45	0.541	1.284
ERM - AWA GS-2717	45	0.580	0.718
ERM - Sanyo BNK3266	45	0.550	1.342
压电式 - SEMCO	16.5	0.904	0.782
压电式 - AAC	16.5	0.543	0.680

6 附录 B. 测试设置图片

图 6-1 展示了一个触觉能耗测试设置。

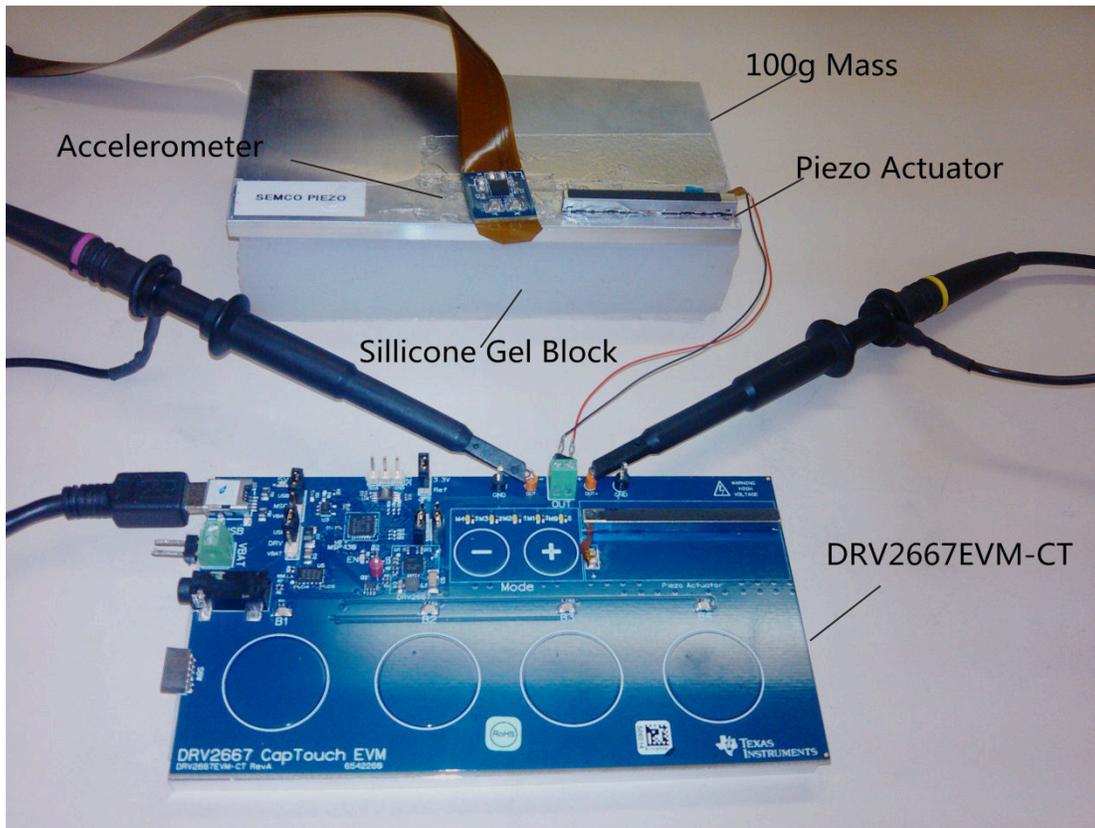


图 6-1. 测试设置图示

7 附录 C. 智能手机场景的能耗计算

本节展示如何使用图 3-1 的数据计算智能手机场景的能耗。

1. 每天打出 15 次电话
 - 拨打电话号码：假定用户每次打电话拨 10 个数字。共有 150 次点击。
 - 接听电话：假定接听的每通电话有 12 次蜂鸣，每 2 次蜂鸣伴随一次响铃。共有 180 次蜂鸣效果。
2. 每天发出 15 条短信
 - 编写一条短信：假定每条短信 40 个字，每个字包含 5 个字符。共有 3000 次点击。
 - 接收短信：假定每次收到短信时收到 4 声通知。共有 60 次通知。
3. 一天发 5 次电子邮件
 - 回复电子邮件：假定每封电子邮件 60 个字，每个字包括 5 个字符。共有 1500 次点击。
 - 接收电子邮件：假定每次收到文本邮件有 4 声通知。共有 20 声提醒。
4. 每天提醒 10 次
假定每次提醒由 10 次通知和 10 次蜂鸣组成。
5. 每天打游戏 60 分钟
不同的游戏具有不同的效果，所以假定它们在 10 分钟内都包括以下效果，并且每天玩一小时。
 - 碰撞：100 次
 - 点击：500 次
 - 脉冲：200 次
 - 通知：150 次
 - 蜂鸣：20 次
6. 每天使用社交媒体 60 分钟
假定在 10 分钟内有以下效果，然后插入数据 60 分钟。
 - 碰撞：70 次
 - 点击：400 次
 - 脉冲：80 次
 - 通知：60 次
 - 蜂鸣：12 次
7. 每天另有 60 分钟，包括搜索、上网、新闻、时钟
假定有以下效果，且用户在这些活动上一共耗用了一小时时间。
 - 碰撞：720 次
 - 点击：2400 次
 - 脉冲：360 次
 - 通知：312 次
 - 蜂鸣：78 次

待机能耗

DRV260x 驱动器的典型待机电流为 1.9 μ A，而 DRV262x 驱动器的典型值为 1.55 μ A，DRV2667 (压电式驱动器) 待机电流为 10 μ A。对于 DRV260x 或 DRV262x，ERM 和 LRA 驱动器一天的能耗分别是 45.6 μ Ah 或 37.2 μ Ah，而压电式驱动器是 240 μ Ah。

8 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (May 2014) to Revision A (January 2022)	Page
• 更新了“触觉驱动器”的引用。.....	1
• 更新了对“DRV260x 和 DRV262x”通用器件的引用。.....	1
• 更新了待机电流值。.....	13

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司