

Jacob Rook

摘要

选择要在设计中使用的电池时，磷酸铁锂 (LiFePO4) 电池是众多可供选择的电池之一。LiFePO4 电池具有良好的热性能、良好的抗热失控性和较长的续航时间，因此能够在众多电池选项中脱颖而出。但是，LiFePO4 电池有一些特别注意事项，本文档讨论了这些注意事项，并将该电池与更传统的锂离子 (Li-ion) 电池进行了比较。

内容

1 引言.....	2
2 充电曲线以及 SOC 与 OCV 间的关系.....	2
3 热失控和温度特性.....	4
4 应用.....	5
5 总结.....	7
6 参考文献.....	7

插图清单

图 2-1. 标准 CC/CV 充电曲线.....	3
图 2-2. 锂离子电池 SOC 与 OCV 曲线.....	3
图 2-3. LiFePO4 电池 SOC 与 OCV 曲线.....	3

表格清单

表 1-1. 典型低功耗多化合物电池之间的权衡 (1).....	2
表 2-1. 充电电压精度与电池容量损失间的关系 (充电至 100% SOC 时, TI 设计与其他设计相比).....	4
表 2-2. 充电电压精度与电池容量损失间的关系 (充电至 80% SOC 时, TI 设计与其他设计相比).....	4
表 4-1. 充电设计.....	6

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

选择电池时，需要考虑许多权衡因素：成本、尺寸、重量、能量密度、续航时间、稳定性等。一般来说，相比更传统的锂离子 (Li-ion) 电池，磷酸铁锂 (LiFePO₄) 电池更受青睐，因为它们具有良好的热稳定性、低热失控风险、长续航时间和高放电电流。

但是，LiFePO₄ 电池的能量密度和充电电压均较低，因此与锂离子电池相比，它们通常必须占用更多空间。此外，由于充电电压较低，LiFePO₄ 电池可能需要升压转换器，而锂离子电池则不需要。表 1-1 显示了典型的低功耗多化合物充电设计之间的一般比较情况。

后续部分将重点介绍 LiFePO₄ 电池与锂离子电池的充电曲线和热性能之间的差异，以及这些差异产生的设计影响。然后，我们将提供适合 LiFePO₄ 电池的潜在充电器设计。

表 1-1. 典型低功耗多化合物电池之间的权衡 (1)

	锂离子	LiFePO ₄	镍氢电池	SuperCap
能量密度	高 150Wh/kg 至 180Wh/kg	中 90Wh/kg 至 120Wh/kg	低 60Wh/kg 至 120Wh/kg	低 4.5Wh/kg
V(nom)/节	3.6V	3.2V	1.2V	2.7V
V(charging)	3.9V 至 4.2V	3.5V 至 3.65V	1.4V 至 1.6V	2.7V
面积	低	中	高	高
价格	高	中	低	中
优势	<ul style="list-style-type: none"> 高能量密度 每节电池具有 3.6V 高电压，一节电池即可满足需求，从而节省空间 500 个周期的长续航时间 	<ul style="list-style-type: none"> 3°C 时具有高额定电流 2000 个周期的长续航时间 良好的热稳定性 更安全的锂离子电池：增强了 滥用时的安全性/耐受性 可耐受满电状态 	<ul style="list-style-type: none"> 可靠耐用 安全：过充和放电不会产生高温 更具有成本效益 	<ul style="list-style-type: none"> 安全：不含挥发性化学物质，过充和放电不会产生高温 续航时间长，无磨损机制 50 万次循环
限制	<ul style="list-style-type: none"> 脆弱：需要保护电路才能安全运行 充电期间峰值电压受限 需要监测温度 	<ul style="list-style-type: none"> 3.2V/节的较低电压 较高自放电，随着时间的流逝，会引起均衡问题 	<ul style="list-style-type: none"> 快速自放电，需要更频繁地充电 1.2V/节的较低电压需要多芯电池包，设计尺寸更大 	<ul style="list-style-type: none"> 电压会随着放电和 SOC 而发生较大变化。 低电池电压可能需要串联电池和可能的平衡电路。
充电温度	0°C 至 45°C	0°C 至 45°C	0°C 至 40°C	-40°C 至 65°C
放电温度	-20°C 至 60°C	-20°C 至 60°C	0°C 至 50°C -20°C 至 +85°C (可能)	-40°C 至 65°C

2 充电曲线以及 SOC 与 OCV 间的关系

LiFePO₄ 电池和锂离子电池的充电曲线相同，如图 2-1 所示。该充电曲线是标准的预充电、CC 和 CV 充电曲线，但由于 LiFePO₄ 电池和锂离子电池具有不同的电压曲线，因此充电曲线中的这些阶段在不同的电压下发生。对于锂离子电池， $V_{OREG} \approx 3.9V$ 至 $4.2V$ ， $V_{Precharge} \approx 3.0V$ ， $V_{Short} \approx 2.0V$ 。对于 LiFePO₄ 电池， $V_{OREG} \approx 3.5V$ 至 $3.65V$ ， $V_{Precharge} \approx 2.0V$ ， $V_{Short} \approx 1.2V$ 。

此外，LiFePO₄ 电池和锂离子电池的充电率相似，但锂离子电池的放电率通常为 1C，而 LiFePO₄ 电池的放电率则为 3C。这使得 LiFePO₄ 非常适合更高电流的应用。

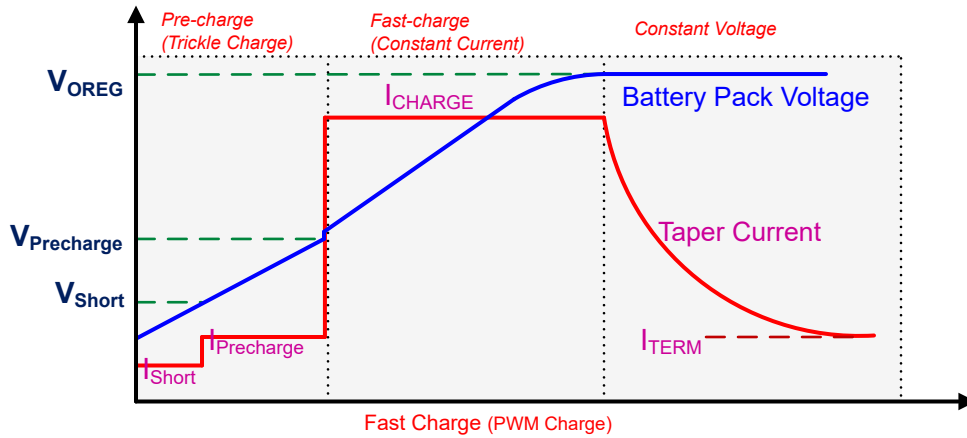


图 2-1. 标准 CC/CV 充电曲线

LiFePO4 电池和锂离子电池的另一个主要区别是它们的 SOC (充电状态) 与 OCV (开路电压) 曲线。如图 2-2 所示，锂离子电池的 SOC 与 OCV 曲线具有相当高的线性度，而 LiFePO4 电池在大约 85% 至 100% 的 SOC 范围内具有相当高的线性度，但在大约 10% 至大约 85% 的 SOC 范围内，斜率会出现突变。当选择一项设计中所需的充电电压精度和电池将要充电到的 SOC 时，这一点显得尤为重要 [1]。

[1] 设计人员可以选择以较低 SOC 为电池充电，以减少因阳极上石墨分解而导致的容量降额。

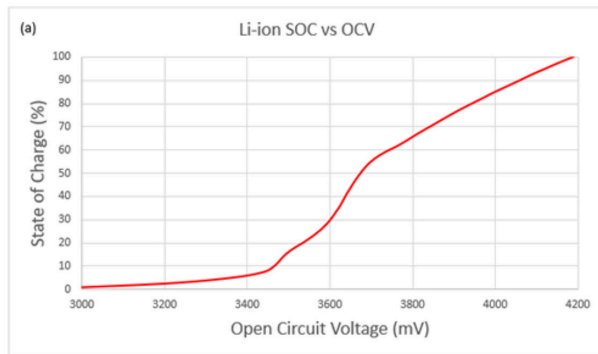


图 2-2. 锂离子电池 SOC 与 OCV 曲线

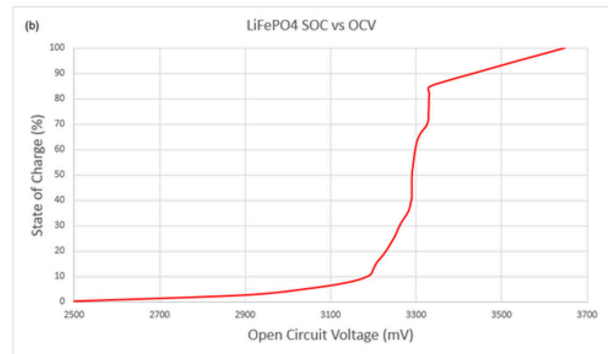


图 2-3. LiFePO4 电池 SOC 与 OCV 曲线

充电电压的微小误差可能会导致很大一部分电池容量闲置，当设计人员决定尝试通过将电池充电至低于 100% 的 SOC 来保持电池续航时间时尤其如此。表 2-1 和表 2-2 显示了锂离子电池和 LiFePO4 电池由于充电电压误差而可能损失的电池容量，从而很好地说明了这一点。表 2-1 说明了充电至 100% SOC 时的情况，而表 2-2 说明了充电至 80% SOC 时的情况。

为了说明如何得出表 2-1 和表 2-2 的结果，我们以表 2-1 为例进行说明。当设计人员使用充电电压调节精度为 $\pm 2\%$ 的充电设计为锂离子电池充电时，如果设计目标是不让电池电压超过充电电压的 100%，那么考虑到 $+2\%$ 的容差，需要将充电电压设置为 98%。因此，考虑到负端充电电压精度，最小 V_{bat} 可以是最大充电电压的 96%。这样一来，在充电电压精度为 $\pm 2\%$ 的情况下，电池充电电压可能会低于最大充电电压的 4%，这会导致高达 13.2% 的电池容量闲置。

如表 2-1 所示，即使充电电压精度为 $\pm 0.5\%$ ，也会导致电池容量损失 3%。这只会随着充电电压精度的降低而成倍增加。通过对比 LiFePO4 电池与锂离子电池可以发现，LiFePO4 电池在充电至 100% SOC 时性能更好，因为与锂离子电池相比，LiFePO4 电池的 SOC 与 OCV 曲线在 SOC 较高时的斜率更小。

然而如表 2-2 所示，将 LiFePO4 电池充电至 80% SOC 以保持电池续航时间的做法基本不切实际。即使充电电压精度为 $\pm 0.5\%$ ，也会损失高达 41.4% 的电池可用容量。如果您决定将电池充电至 80% SOC，那么除了 20% 的电池寿命损失外，还会再损失 21.4% 的电池寿命。

表 2-1. 充电电压精度与电池容量损失间的关系 (充电至 100% SOC 时, TI 设计与其他设计相比)

充电器设计	充电电压精度	电池	最小 V_{bat} (mV) ⁽¹⁾	V_{bat} 时的容量	最大容量损失	与 TI 设计相比的容量损失
德州仪器 (TI)	±0.5%	锂离子电池	4147	97.0%	3.0%	-
		LiFePO4	3612	98.3%	1.7%	-
竞争器件	±1%	锂离子电池	4342	93.6%	6.4 %	3.4 %
		LiFePO4	3576	96.6%	3.4 %	1.7%
分立式	±2%	锂离子电池	4298	86.8%	13.2%	10.2%
		LiFePO4	3503	93.2%	6.8 %	5.1%
分立式	±3.5%	锂离子电池	4232	75.5%	24.5%	21.5%
		LiFePO4	3393	87.9%	12.1 %	10.4%

(1) 最小 V_{bat} 是指考虑到负端充电电压百分比时的最小充电电压。使用以下公式可以计算该值：最小 $V_{bat} = V_{SOC(100\%)} * (1 - 2 * CVA)$ ，其中 $V_{SOC(100\%)}$ 是与 100% SOC 相关的电压，CVA 是充电电压精度。

表 2-2. 充电电压精度与电池容量损失间的关系 (充电至 80% SOC 时, TI 设计与其他设计相比)

充电器设计	充电电压精度	电池	最小 V_{bat} (mV) ⁽¹⁾	V_{bat} 时的容量	最大容量损失	与 TI 设计相比的容量损失
德州仪器 (TI)	±0.5%	锂离子电池	4111	75.8%	24.2%	-
		LiFePO4	3297	58.6%	41.4%	-
竞争器件	±1%	锂离子电池	4091	71.8%	28.2%	4.0%
		LiFePO4	3263	30.6%	69.4%	28 %
分立式	±2%	锂离子电池	4049	63.6%	26.4%	12.2 %
		LiFePO4	3197	12.5%	87.5 %	46.1%
分立式	±3.5%	锂离子电池	3987	47.2%	52.8%	28.6%
		LiFePO4	3096	6.7 %	93.3%	51.9%

(1) 最小 V_{bat} 是指考虑到负端充电电压百分比时的最小充电电压。使用以下公式可以计算该值：最小 $V_{bat} = V_{SOC(80\%)} * (1 - 2 * CVA)$ ，其中 $V_{SOC(80\%)}$ 是与 80% SOC 相关的电压，CVA 是充电电压精度。

考虑到与其他电池化学物质相比，LiFePO4 电池已经具有较长的续航时间，由于该电池能量密度较低，大多数设计人员会将该电池充电至 100% SOC。而锂离子电池在充电至 80% SOC 时不会有明显的容量损失，因此对于设计人员来说，尝试将电池充电至 80% SOC 来保持锂离子电池续航时间是可行的。

然而，如果电池有任何闲置容量，则意味着设计人员必须购买更大的电池来满足其需求。这意味着，如果您的设计确实需要 10Whr 的电池来满足应用需求，并且您的设计由于充电电压不准确和/或为了保持电池续航时间而没有利用 15% 至 30% 的电池，则需要购买容量增加 15% 至 30% 的电池。而且，由于电池通常是系统中最昂贵的器件之一，因此，为了在电池充电器上节省几毛钱和/或延长电池续航时间而做出的权衡通常不会超过购买更大容量电池而产生的额外成本。此外，当考虑电池充电器设计可提供的附加功能时，一款好的充电器设计所带来的好处要大于所付出的成本。

3 热失控和温度特性

热失控是电池的灾难性故障，可能会损坏电池并导致剧烈爆炸。热失控可能是由电池穿透、过充、过流和过度热滥用引起。锂离子电池尤其令人担忧，因为它们不像其他电池那样稳定，这也是它们有如此多运输限制的原因。因此，需要使用保护电路来防止过流、过压、欠压等情况。

LiFePO4 电池具有稳定的化学成分，不易发生热失控。LiFePO4 电池的热失控温度远高于锂离子电池，很难进入这种失效模式。因此，LiFePO4 电池在较高环境温度的应用中表现良好，通常可以处理较高的放电电流。此外，可以添加保护电路来提供额外的安全层，但不一定需要保护电路。

除了热失控之外，较高温度还会降低电池容量。但由于 LiFePO4 电池的特性，与锂离子电池相比，它们在较高温度下的容量降低程度通常较低。

4 应用

如前所述，LiFePO₄ 的主要优点是具有热稳定性、热失控几率低、续航时间更长并且放电电流更高。但由于能量密度低，与锂离子电池相比，LiFePO₄ 电池通常会占用更多空间。这使得 LiFePO₄ 电池非常适合需要良好热性能且允许占用更多空间的应用。它们也非常适合需要较高放电电流和/或需要较长续航时间的应用。

由于 LiFePO₄ 具有安全特性，因此是个人设备的不错选择。设计人员将不那么担心热失控可能会伤害消费者。由于具有较高的放电电流，LiFePO₄ 电池也是启动电路的不错选择。此外，在任何主要关注续航时间的应用中，LiFePO₄ 都是比锂离子电池更好的选择。

表 4-1 显示了与锂离子和 LiFePO₄ 电池兼容的各种 TI 充电设计。这些设计可满足各种应用要求，提供的示例涵盖独立设计、降压/升压、降压和线性设计以及各种电池配置。所有这些设计都具有非常高的充电电压精度，并具有热调节功能。

这些设计大多都具有电源路径管理功能，可自动将电源路径从适配器切换到电池，反之亦然。此外，所有这些设计都提供动态电源管理 (DPM)，其中大多数设计允许电池在系统负载对于适配器来说过重时补充系统负载。所有这些设计也都提供过流和过压保护。

表 4-1. 充电设计

	BQ25798	BQ25730	BQ25620	BQ25300	BQ24630	BQ25180	BQ25170
V_{IN} 最大额定值	30V	32 V	26V	28 V	33V	25V	30V
V_{IN} 工作范围	3.6-24V	3.5V 至 26V	3.9V 至 18V	4V 至 17V	5V 至 28V	3.0V 至 5.9V	3.0V 至 6.65V
电池配置	锂离子电池、LiFePO4 电池	锂离子电池、LiFePO4 电池、镍氢电池、超级电容器	锂离子电池、LiFePO4 电池	锂离子电池	锂离子电池、LiFePO4 电池	锂离子电池、LiFePO4 电池	锂离子电池、LiFePO4 电池
电池配置	1s 至 4s	1s 至 5s	1s	1s	1s 至 7s	1s	1s
拓扑	降压升压	降压升压	降压	降压	降压	线性	线性
充电电压	3 至 18.8 V	1.024 至 23 V	3.5 至 4.8 V	4.1 至 4.4 V	1.8 至 26 V	3.5 V 至 4.65 V	3.5 V 至 4.4 V
充电电压精度 (在温度范围内)	-0.25% 至 +0.65%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
Max Charge Current	5A	16.2 A	3.5A	3A	10A	1A	0.8 A
控制接口	I2C	I2C	I2C	独立	独立	I2C	独立
电源路径管理	是	是	是	否	是	是	否
快速充电计时器	可编程	可编程	可编程	固定	可编程	可编程	固定
封装	4.0mm x 4.0mm QFN-29	4.0mm x 4.0mm WQFN-32	2.5mm x 3.0mm WQFN-18	3.0mm x 3.0mm RTE WQFN	4.0mm x 4.0mm VQFN-24	1.6mm x 1.1mm WCSP-8	2.0mm x 2.0mm QFN-8
其他市场应用	可视门铃、智能家居控制、扫地机器人	平板电脑、无线扬声器、呼吸机、扫地机器人	平板电脑、计算机配件、IP 摄像头、EPOS	无线扬声器、条形码扫描仪、无绳电动工具	电动工具、上网本、医疗设备	TWS、可穿戴设备、医疗、楼宇和零售自动化	TWS、可穿戴设备、ePOS、摄像头

5 总结

与更传统的锂离子电池相比，LiFePO₄ 电池具有许多优势。这些优势包括更长的续航时间、更好的热性能、良好的抗热失控性和更高的放电电流。这使得 LiFePO₄ 电池非常适合需要较长续航时间、更高安全要求或更高放电电流的应用。但由于存在电压差且能量密度较低，LiFePO₄ 不应将电池充电至 80% SOC 以保持其续航时间，因为它不会利用大部分容量。由于 LiFePO₄ 电池具有较长续航时间，因此可以充电至 100% SOC，此时续航时间仍比锂离子电池的续航时间显著更长。

6 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [低电池功率应用中的多化合物充电器](#) 应用手册。
2. 德州仪器 (TI), [使用电池充电器 IC 缩小扫地机器人设计](#)。

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司