

新型磷酸铁锂动力电池

北航空航天大学 方佩敏

自锂离子电池问世以来，围绕它的研究、开发工作一直不断地进行着，上世纪90年代末又开发出锂聚合物电池，2002年后则推出磷酸铁锂动力电池。

锂离子电池内部主要由正极、负极、电解质及隔膜组成。正、负极及电解质材料不同及工艺上的差异使电池有不同的性能，并且有不同的名称。目前市场上的锂离子电池正极材料主要是氧化钴锂 (LiCoO_2)，另外还有少数采用氧化锰锂 (LiMn_2O_4) 及氧化镍锂 (LiNiO_2) 作正极材料的锂离子电池，一般将后两种正极材料的锂离子电池称为“锂锰电池”及“锂镍电池”。新开发的磷酸铁锂动力电池是用磷酸铁锂 (LiFePO_4) 材料作电池正极的锂离子电池，它是锂离子电池家族的新成员。

一般锂离子电池的电解质是液体的，后来开发出固态及凝胶型聚合物电解质，则称这种锂离子电池为锂聚合物电池，其性能优于液体电解质的锂离子电池。

磷酸铁锂电池的全名应是磷酸铁锂锂离子电池，这名字太长，简称为磷酸铁锂电池。由于它的性能特别适于作动力方面的应用，则在名称中加入“动力”两字，即磷酸铁锂动力电池。也有人把它称为“锂铁 (LiFe) 动力电池”。

采用 LiFePO_4 材料作正极的意义

目前用作锂离子电池的正极材料主要有： LiCoO_2 、 LiMn_2O_4 、 LiNiO_2 及 LiFePO_4 。这些组成电池正极材料的金属元素中，钴 (Co) 最贵，并且存储量不多，镍 (Ni)、锰 (Mn) 较便宜，而铁 (Fe) 最便宜。正极材料的价格也与这些金属的价格行情一致。因此，采用 LiFePO_4 正极材料做成的锂离子电池应是最便宜的。它的另一个特点是对环境无污染。

作为可充电电池的要求是：容量高、输出电压高、良好的充放电循环性能、输出电压稳定、能大电流充放电、电化学稳定性能、使用中安全（不会因过充电、过放电及短路等操作不当而引起燃烧或爆炸）、工作温度范围宽、无毒或少毒、对环境无污染。采用 LiFePO_4 作正极的磷酸铁锂电池在这些性能要求上都不错，特别在大放电率放电 (5~10C 放电)、放电电压平稳上、安全上（不燃烧、不爆炸）、寿命上（循环次数）、对环境无污染上，它是最好的，是目前最好的大电流输出动力电池。

LiFePO_4 电池的结构与工作原理

LiFePO_4 电池的内部结构如图1所示。左边是橄榄石结构的 LiFePO_4 作为

电池的正极，由铝箔与电池正极连接，中间是聚合物的隔膜，它把正极与负极隔开，但锂离子 Li^+ 可以通过而电子 e^- 不能通过，右边是由碳 (石墨) 组成的电池负极，由铜箔与电池的负极连接。电池的上下端之间是电池的电解质，电池由金属外壳密封封装。

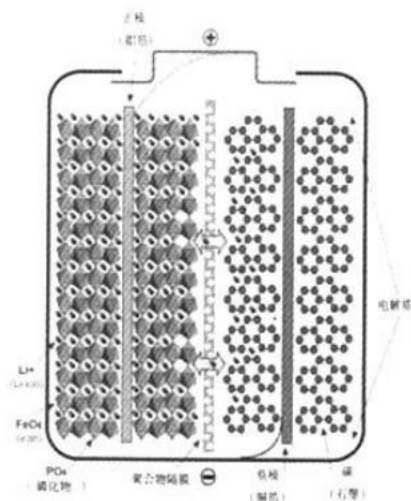


图1 LiFePO_4 电池内部结构

LiFePO_4 电池在充电时，正极中的锂离子 Li^+ 通过聚合物隔膜向负极迁移，在放电过程中，负极中的锂离子 Li^+ 通过隔膜向正极迁移。锂离子电池就是因锂离子在充放电时来回迁移而命名的。

LiFePO_4 电池主要性能

LiFePO_4 电池的标称电压是3.2 V、终止充电电压是3.6 V、终止放电电压是

表1 磷酸铁锂动力电池性能及与其他电池性能的比较

	一般锂离子电池	锂离子动力电池	磷酸铁锂动力电池	镍氢电池	单位或测试条件
标准电压	3.6或3.7	3.6或3.7	3.2	1.2	V
工作电压范围	3.0~4.2	3.0~4.2	3.0~3.3	1.0~1.4	V
单位质量容量	180	130	130	80	mAh/g
单位重量能量	90~110	60~75	60~75	50~60	Wh/kg
单位体积能量	280~300	220~240	220~240	200~220	Wh/l
最佳充电率	0.2~0.5	0.5~1.0	0.5~1.5	0.2~0.5	C
工作放电率	1	2	2	0.5	CmA
最大放电率	1.5	5	10	2	CmA
瞬间大电流脉冲	2	10	20	3	CmA(10s)
循环寿命	60%	85%	>95%	<50%	1 CmA 充电 2 CmA 放电
	100次	300次	500次	50次	
大电流放电时		60%	>80%	<50%	1 CmA 充电 5 CmA 放电
循环寿命		300次	300次	10次	
安全	有可能大燃烧、爆炸	有可能燃烧、爆炸	不燃烧 不爆炸	有可能燃烧	-
零电压储存30天	泄漏、损伤	泄漏、损伤	无损伤	泄漏、损伤	-

2.0V。由于各个生产厂家采用的正、负极材料、电解质材料的质量及工艺不同，其性能上会有些差异。例如同一种型号（同一种封装的标准电池），其电池的容量有较大差别（10%~20%）。

磷酸铁锂动力电池主要性能列于表1。为了与其他可充电电池的相比较，也在表中列出其他种类可充电电池性能。这里要说明的是，不同工厂生产的磷酸铁锂动力电池在各项性能参数上会有一些差别；另外，有一些电池性能未列入，如电池内阻、自放电率、

充放电温度等。

磷酸铁锂动力电池的容量有较大差别，可以分成三类：小型的零点几到几毫安时、中型的几十毫安时、大型的几百毫安时。不同类型电池的同类参数也有一些差异。这里再介绍一种目前应用较广的小型标准圆柱形封装的磷酸铁锂动力电池的参数。其外形尺寸：直径为18mm、高650mm（型号为18650），其参数性能如表2所示。

典型的放电特性及寿命

一种型号为STL18650的磷酸铁锂

动力电池（容量为1100mAh）在不同的放电率时其放电特性如图2所示。最小的放电率为0.5C，最大的放电率为10C，五种不同的放电率形成一组放电曲线。由图2中可看出，不管哪一种放电率，其放电过程中电压是很平坦的（即放电电压平稳，基本保持不变），只有快到终止放电电压时，曲线才向下弯曲（即放电电压达到800mAh以后才出现向下弯曲）。在0.5~10C的放电率范围内，输出电压大部分在2.7~3.2V范围内变化。这说明该电池有很好的放电特性。

容量为1000mAh的STL18650在不

表2 小型标准圆柱形封装磷酸铁锂动力电池的参数

项目	性能
典型容量	1000~1400mAh
标称电压	3.2V
终止充电电压	3.6±0.05V
终止放电电压	2.0V
内阻	30~80mΩ
最大充电电流	1~1.5C
一般充电电流	0.2~0.5C
最大放电电流	5~10C
一般放电电流	0.5~1C
工作温度范围	充电：0~45℃ 放电：-20~60℃

注：*有的厂家为0~65℃

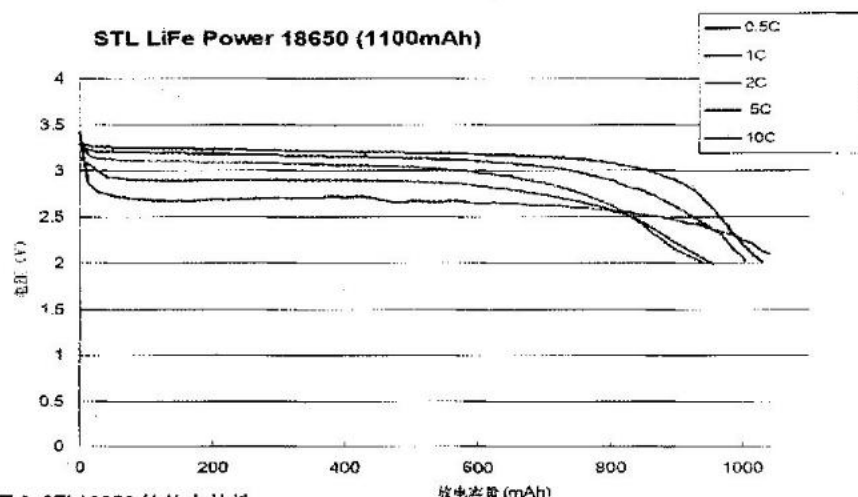


图2 STL18650的放电特性

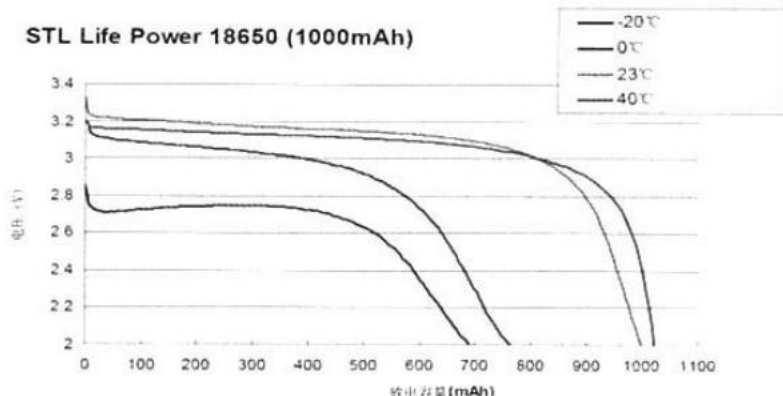


图3 STL18650 在多温度条件下的放电曲线

同的温度条件下(从-20~+40℃)的放电曲线如图3所示。如果在23℃时放电容量为100%，则在0℃时的放电容量降为78%，而在-20℃时降到65%，在+40℃放电时其放电容量略大于100%。

从图3中可看出，STL18650磷酸铁锂电池可以在-20℃下工作，但输出能量要降低35%左右。

STL18650的充放电循环寿命曲线如图4所示。其充放电循环的条件是：以1C充电率充电，以2C放电率放电，历经570次充放电循环。从图4的特性曲线可看出，在经过570次充放电循环，其放电容量未变，说明该电池有很高的寿命。

过放电到零电压试验

采用STL18650 (1100mAh) 的磷酸铁锂动力电池做过放电到零电压试验。试验条件：用0.5C充电率将1100mAh的STL18650电池充满，然后用1.0C放电率放电到电池电压为0V。再将放到0V的电池分两组：一组存放7天，另一组存放30天；存放到期后再用0.5C充电率充满，然后用1.0C放电。最后比较两种零电压存放期不同的差别。

试验的结果是，零电压存放7天后

电池无泄漏，性能良好，容量为100%；存放30天后，无泄漏、性能良好，容量为98%；存放30天后的电池再做3次充放电循环，容量又恢复到100%。

这试验说明该电池即使出现过放电(甚至到0V)，并存放一定时间，电池也不泄漏、损坏。这是其他种类锂离子电池不具有的特性。

磷酸铁锂电池的特点

通过上述介绍，LiFePO₄ 电池可归纳下述特点。

1 高效率输出：标准放电为2~5C，连续高电流放电可达10C，瞬间脉冲放电(10S)可达20C；

2 高温时性能良好：外部温度65℃

时内部温度则高达95℃，电池放电结束时温度可达160℃，电池的结构安全、完好；

3 即使电池内部或外部受到伤害，电池不燃烧、不爆炸、安全性最好；

4 极好的循环寿命，经500次循环，其放电容量仍大于95%；

5 过放电到零伏也无损坏；

6 可快速充电；

7 低成本；

8 对环境无污染。

磷酸铁锂动力电池的应用

由于磷酸铁锂动力电池具有上述特点，并且生产出各种不同容量的电池，很快得到广泛地应用。它主要应用领域有：

1 大型电动车辆：公交车、电动汽车、景点游览车及混合动力车等；

2 轻型电动车：电动自行车、高尔夫球车、小型平板电瓶车、铲车、清洁车、电动轮椅等；

3 电动工具：电钻、电锯、割草机等；

4 遥控汽车、船、飞机等玩具；

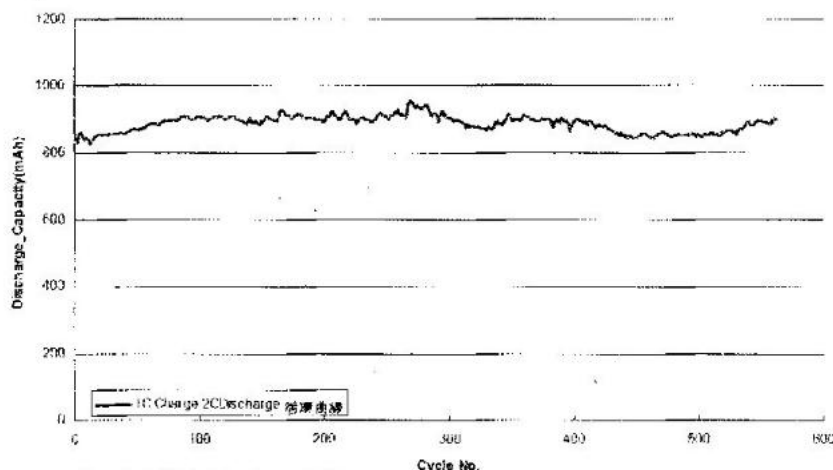


图4 STL18650的充放电循环寿命曲线

- 5 太阳能及风力发电的储能设备；
- 6 UPS 及应急灯、警示灯及矿灯（安全性最好）；
- 7 替代照相机中 3V 的一次性锂电池及 9V 的镍镉或镍氢可充电电池（尺寸完全相同）；
- 8 小型医疗仪器设备及便携式仪器等。

这里举一个用磷酸铁锂动力电池替代铅酸电池的应用实例。采用 36V / 10Ah (360Wh) 的铅酸电池，其重量 12kg，充一次电可行走约 50km，充电次数约 100 次，使用时间约 1 年。若采用磷酸铁锂动力电池，采用同样的 360Wh 能量（12 个 10Ah 电池串联组

成），其重量约 4kg，充电一次可行走 80km 左右，充电次数可达 1000 次，使用寿命可达 3~5 年。虽然说磷酸铁锂动力电池的价格较铅酸电池高得多，但总的经济效果还是采用磷酸铁锂动力电池更好，并且在使用上更轻便。

小型磷酸铁锂动力电池

小型磷酸铁锂动力电池是标准的，有圆柱形及长方形。如圆柱型的型号有 18650、26650 等。型号中前两位是表示直径，后两位或三位表示高度（单位为 mm），即 18650 的尺寸的直径为 18，高度为 65。长方形的型号有 103450R、183665R 等。其前两位是电池的厚度、中

间两位是电池的宽度，后两位是电池的长度（单位为 mm）。电池生产工厂往往在型号前加三个英文字母作厂标，例如型号为 × × × 18650。

结语

磷酸铁锂动力电池是一种新型动力电池，由于其性能优良，受到各方面的重视。我国现在已有一些工厂生产磷酸铁锂电池正极材料及生产各种不同容量的磷酸铁锂动力电池。由于生产时间不长，规模还不小，造成供不应求的情况。不过，这种情况可望在 2~3 年内得到改变，磷酸铁锂动力电池将更便宜，并且其应用将更普遍。

EPC

（上接第 94 页）

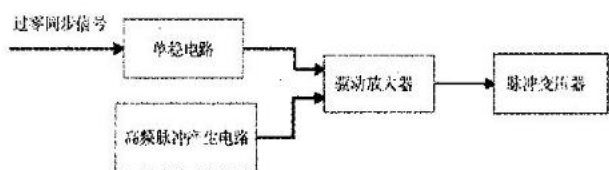


图5 触发电路结构框图

触发的时候提供大约 1ms 左右的驱动；而且，在驱动结束后，驱动电路就关断，等待下一次触发。这样可以大大降低脉冲变压器和脉冲放大器的功耗，并提供足够的驱动能力，其触发信号如图 4 所示。

触发电路的结构如图 5 所示。

在实际工作现场，由于环境比较复杂，所以电源中的干扰比较多，存在着过零同步信号错误检测的状况。为了能够得到稳定可靠的同步脉冲，要在同步信号采集电路中增加中心频率为 50Hz 的带通滤波器。该电路工作原理是：交流电压经降压电阻降压后输入有源带通

滤波器的输入端，通过公式计算选择好各元件参数，就可只允许 50Hz 左右的工频信号通过，其他频率的信号则迅速衰减，

有效地抑制了电网中各种谐波对触发板的干扰，其电路如图 6 所示。

● 人机接口

为了便于操作者进行参数的设置和工作状态的设定，在设计中采用了 240 × 128 的点阵图形液晶，并设计了良好的菜单式界面。

● 远程控制接口

为了便于对设备进行远程的检测和控制，在设计中还提供了 RS232 接口，可以配合 GSM 通信监控板进行远程状态监测、远程参数设定、远程工作控制。同时，还提供了 RS485 接口，便于多设备系统同时监测和控制。

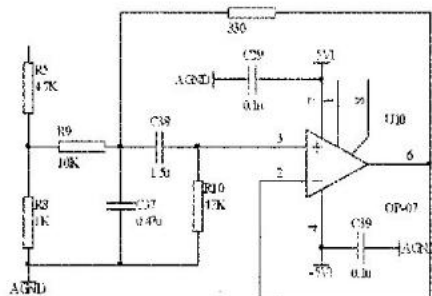


图6 增加带通滤波器的同步信号采集电路

软件设计

软件界面是良好的菜单式界面，使用 C 语言编制完成。自 ATMEL 的 AVR 系列单片机诞生以来，有很多第三方厂商为其开发了用于程序开发的 C 语言工具，常用的有 IAR 的 IAR C、ImageCraft 的 ICCAVR、CodeVision AVR 和 SPJ 的 AVRC。在实际的开发过程中，选择了 CodeVisionAVR + Atmel 官方提供的免费调试工具 AVRStudio 进行的方式，快速有效地完成了整个系统的软件编制调试。

EPC