航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
May 25 2020 Vol. 31 No.05 1-10

# 锂离子电池在电动无人机中的应用研究

李开省*
航空工业中航机载系统有限公司，北京 100028

**摘　要：**电池是新能源电动飞机技术发展的关键部件。锂离子电池能量密度高、寿命长、经济性和安全性好，是电动技术发展方向，已经在电动汽车等电动交通运输领域得到了大量应用，在电动飞机技术发展中也有非常好的应用前景。本文介绍了锂离子电池的原理以及电芯能量密度和系统能量密度的概念，研究了锂离子电池应用情况，分析锂离子电池与电动无人机设计原理，提出动力电池系统设计方案，为电动飞机核心动力系统设计提供借鉴。

**关键词：**电动无人机；锂离子电池；电池电芯；电池质量能量密度；电池体积能量密度；系统能量密度；能量消耗率

**中图分类号：**V272　　**文献标识码：**A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2020.05.001

对于电动和混动飞机来说，电池技术非常关键，电池的能量密度大小决定电动和混动飞机的未来发展。电池实际上就是发电器，按照能量来源品种分为利用化学能的化学电池和利于太阳辐射能的太阳能电池。化学电池利于电池的自身所具有化学反应物质（活性物质）通过化学反应放电。电池按照使用特点来分：使用后废弃的电池为一次电池；可重复充放电的电池为二次电池；电池本身不具备活性物质而由外部提供的电池称燃料电池。在电动飞机中经常使用的是二次电池、燃料电池和太阳能电池。其中化学电池和燃料电池的发电原理是相同的。在电动无人机中，锂离子电池是电动无人机飞行动力，决定着电动无人机能否飞行和飞行时间的长短。对锂离子电池的特性、能量密度和锂离子电池系统结构优化设计进行研究，对电动无人机以及整个电动航空发展都非常重要，决定电动无人机未来能否快速发展。因此，本文通过对锂离子电池技术原理、电池特性、能量密度和电池系统的结构设计等进行分析研究，并以实例对锂离子电池系统在电动无人机的应用进行初步设计计算，为未来锂离子电池在电动航空的大量应用奠定基础。

## 1 锂离子电池技术原理

电动飞机经常使用的锂离子电池是化学电池的一种，图1以电动汽车的锂离子电池为例分析化学电池的基本原理[1]和锂离子电池的电力产生基本构成方程式。

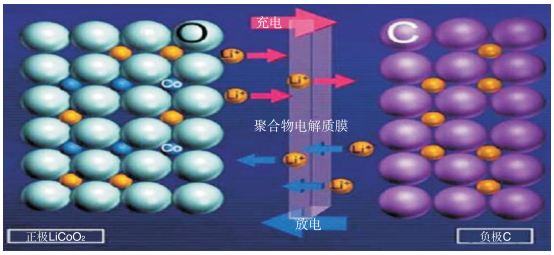


图1　锂离子电池的基本原理图

Fig.1　Basic principle chart of lithium ion battery

首先考虑两电极相互独立的情况。此时，各电极与电解液产生化学反应，进而产生电能。$LiFePO_4$的化学反应方程式如下：

充电：$LiFePO_4 - xLi^+ - xe^- \; xFePO_4 + (1-x)LiFePO_4$

放电：$FePO_4 + xLi^+ + xe^- \; xLiFePO_4 + (1-x)LiFePO_4$

从锂离子电池原理可以看出，锂离子电池发电产生大量化学能，其能量密度在逐年不断提高。最近，有报道称其能量密度最大的已经接近500W·h/kg，但大部分市面上的锂离子电池的能量密度在350W·h/kg左右。锂离子电池已经在电动汽车和电动飞机中得到大量使用。

## 2 锂离子电池的能量密度

锂离子电池能量密度[2]是电动汽车和电动航空的关键指标，它决定汽车充一次电能跑多少距离和飞机能飞多长时

收稿日期：2020-02-18；退修日期：2020-03-03；录用日期：2020-04-08
*通信作者. Tel.：010-58354928　　E-mail：yhdylks@163.com
*引用格式：Li Kaisheng. Research on the application of lithium-ion batteries in electric unmanned aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(05): 1-10. 李开省. 锂离子电池在电动无人机中的应用研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(05): 1-10.*

间。那是什么限制锂离子电池能量密度的提高？根据木桶原理，限制锂离子电池能量密度的核心是正极材料。最近，国内外有许多公司在不断攻关，采用各种新型材料和结构来提高锂离子电池功率密度。如日本松下公司通过增大电芯尺子和结构工艺、宁德时代公司通过改变锂离子电池正负极材料和结构工艺、比亚迪公司通过改进电芯架构设计提出刀片电池新构架等都提升锂离子电池功率密度，这些公司锂离子电池功能密度提高，已经为其赢得了美国特斯拉电动汽车、北汽电动汽车和比亚迪电动汽车的多数市场订单。

电动汽车的续驶里程是电动汽车重要指标，它主要取决于动力电池能量和整车能量消耗：

续驶里程=可用动力电池能量/能量消耗 （1）

在相同能量消耗不变、电池系统体积和重量（质量）不变的情况下，从式（1）可以看出，电动汽车的续航里程主要取决于电池能量密度。对于电动飞机来说，其基本原理一样。主要是飞机续航持续时间：

续航时间=可用动力电池能量/单位时间能量消耗 （2）

如果我们把汽车和飞机的续驶与续航统一起来，如式（3）所示：

续航能力=可用动力电池能量/能耗 （3）

在相同能耗不变、电池体积和重量不变情况下，汽车或飞机续驶或续航能力主要取决于电池能量密度。为了对电池能量密度做进一步分析，本文主要介绍电池能量密度、单体能量密度和系统能量密度。

### 2.1 电池能量密度

电池能量密度是指在单位一定的空间或质量物质中储存能量的大小。电池的能量密度也就是电池平均单位体积或质量所释放的电能。电池能量密度一般分质量能量密度和体积能量密度两个维度。电池质量能量密度=电池容量×放电平台/质量，单位为W·h/kg；电池体积能量密度=电池容量×放电平台/体积，单位为W·h/L。

电池的能量密度越大，单位重量或体积储存的能量(电量)越多。通常我们说的电池能量密度多指电池质量能量密度。

### 2.2 单体能量密度（电芯能量密度）

电池能量密度常常指向两个不同概念，一个是单体电芯的能量密度，一个是电池系统的能量密度。

电芯是一个电池系统的最小单元。一般汽车或飞机上动力电池由$M$个电芯组成一个模组，$N$个模组组成一个电池包，即动力电池系统，也就是汽车飞机动力电池基本结构。

电芯能量密度在国家《中国制造2025》动力电池发展规划中明确目标是：2020年，电池能量密度达到300W·h/kg；2025年，电池能量密度达到400W·h/kg；2030年，电池能量密度达到500W·h/kg。

这里指的就是电芯级别的能量密度，根据国际国内的有关报道，有许多目标已经提前实现。

### 2.3 系统能量密度

系统能量密度是指单体组合成一个电池系统包后的整个电池系统能量比整个电池系统质量或体积。因为电池系统内部包含电池管理系统、热管理系统、高低压回路等占据了电池系统部分重量和内部空间，因此电池系统的能量密度都比电芯能量密度低。系统能量密度=电池系统能量（电量）/电池系统质量或电池系统体积。

可以从以下两点，提高电池系统能量密度。

（1）提高电芯的能量密度

从上面锂离子电池原理中可以看出，电池电芯主要由4个关键部分组成：正极、负极、电解液和隔膜。正极和负极是发生化学反应地方，因此，对电池能量密度非常关键。

电池电芯厂家攻关主要集中在下面两个方向：增大电池电芯尺寸和化学体系变革。增大电池电芯尺寸（如松下新的电池型号21700；电池容量增加35%以上）。化学体系的变革主要是对电芯的正极材料和负极材料进行改变，以提高电芯的能量密度。

（2）提高系统的能量密度

电池系统的组成是工程师们对单体电芯和模块优化布局能力的考验，需要在安全可靠的前提下，最大限度地利用好每一块尺寸和重量。电池系统的工作主要有优化拓扑结构、排布结构、散热设计、材料选择和整体一体化设计等。

## 3 典型的锂离子电芯特性和应用

目前国际国内电动汽车上最普遍使用的是三元锂锂离子电池和磷酸铁锂锂离子电池，三元锂锂离子电池能量密度要比磷酸铁锂锂离子电池高，从电池安全性维度出发，磷酸铁锂锂离子电池要好一些。对于三元锂锂离子电池，日本松下公司的产品能量密度高、一致性好、安全可靠，在电动汽车上大量应用，如美国特斯拉公司、北汽新能源公司等。磷酸铁锂锂离子电池能量密度最近也有大幅度提升，如比亚迪公司新发布的刀片电池就是一种安全和能量密度提升的新型电池，也可用于比亚迪电动汽车上。下面就以特斯拉公司在电动汽车上大量使用松下公司18650锂离子电池进行分析介绍。

18650锂离子电池（常见类型：锂离子电池、磷酸铁锂电池；电压平台：3.6V和3.2V。电池充满电压：4.2V；常见容量：2000mA·h、2600mA·h、3000mA·h、3500mA·h、4000mA·h）

是日本SONY公司为节约成本而生产的一种标准型的锂电池型号，其中18表示电池直径18mm，65表示电池长度为65mm，0表示电池是圆柱形。

锂离子电池具有重量轻、容量大、无记忆效应等优点，已经广泛地作为动力电池应用到电动汽车和电动航空等领域。

松下公司为美国特斯拉公司研制的电动汽车动力电池也是18650型号的电池，其电压平台为3.6V，容量达到3500mA·h左右，重量在47g左右。初步计算其电芯参数：质量能量密度为262W·h/kg,体积能量密度为761.8W·h/L。

### 3.1 特斯拉电动汽车上的应用方案分析

特斯拉电动汽车动力电池系统的数据如下：额定容量：85kW·h；额定电压：400V直流电压。简单地说，美国特斯拉汽车充一次电池可以装85kW·h电量，可以供普通家庭使用一个月左右。从特斯拉车总容量可以推算出单节电芯的容量，即85000/7104=12W·h，所以，单节电芯容量大约为12W·h。

特斯拉汽车动力电池由7104节松下18650电池组成，分成16个组，每一组电池为444节，每一组的74节电池并联，再6组串联，共444节串联。每组电压考虑电池充满电的电压计算，电压达到直流25.2V，然后16组电池再串联，使动力电池系统的直流电压达到403.2V，电池容量达到85kW·h（每节电芯容量3.6V×3.3A=12W·h）。最终形成完整特斯拉动力电池系统，为电动汽车提供动力。特斯拉电池组单元的电池包，电池组及动力电池系统组成结构图如图2~图4所示。

特斯拉动力电池组成有以下几个方面的特点：(1)采用16组电池串联结构，每组电池电压25.2V，汽车高压的地方少，有利于提高汽车安全性；(2)每组内74节电池并联，然后再6排串联，使电池达到444节，而且每一节电池上都通过保险丝连接到回路，如果某一节电池出现短路或过热，保险丝能够及时熔断，使这节电池断开，确保了整个电池系统的安全性；(3)由于是74节电芯并联，某一节损坏对整个系统容量影响很小，确保了整个动力电池系统容错性和可靠性。从而提升特斯拉整个汽车质量。

特斯拉汽车动力电池系统在保护膜和电池组间直接增加了防火板，并用大量的黏合剂密封，保证电池系统防火特性。同时设置了电池系统总保险（额定工作电流630A，额定电压为690V，额定分段电流700A~200kA，电阻值0.1324Ω），确保动力电池系统故障后的安全。实际上特斯拉动力电池系统最高电压为403.2V，最大工作电流为259A左右。因而保险丝有合理的余度和安全值，确保电池系统误动作消除。在电池系统输出端和一个控制接触器相连，以实现对整个汽车动力电池输出控制。连接导线是能承受600V电压，温度范围在-70℃~150℃的电动车专用电缆。以保证汽车在全工况下可靠工作。

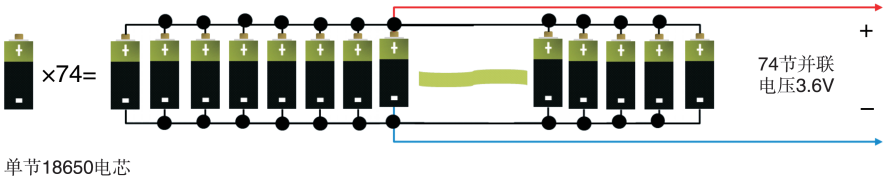


图2 由单节电池电芯并联组成单体电池包示意图

Fig.2 A diagram of a single battery package consisting of a single battery cell in parallel

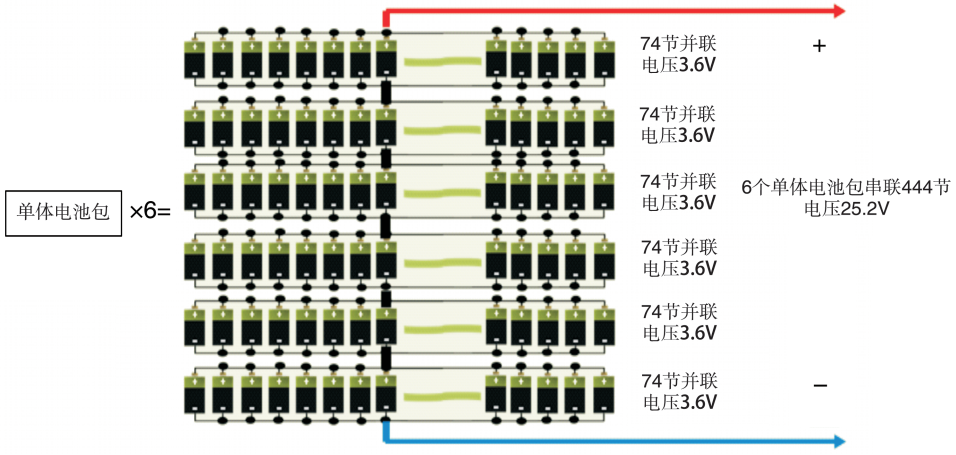


图3 由单体电池包构成电池组的电气结构示意图

Fig.3 A diagram of the electrical structure of a battery pack consisting of a single battery pack

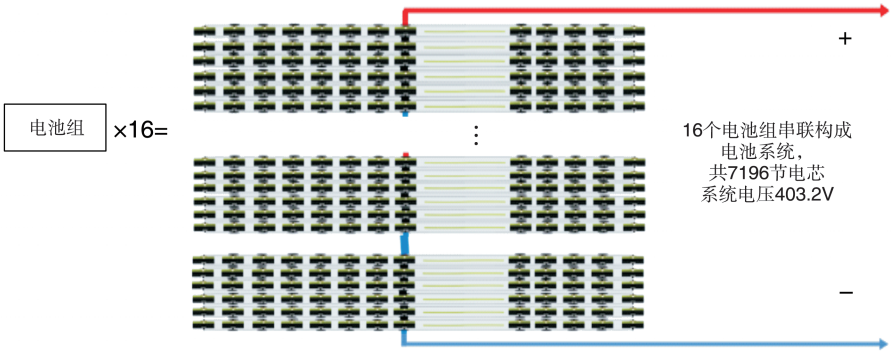


图4 由电池组构成的动力电池系统电气结构示意图

Fig.4 A diagram of the electrical structure of the power battery system consisting of a battery pack

特斯拉每组电池用金属隔板分开，同时又与冷却液体管路相接触，起到散热和撞击的保护作用。每节18650电池电芯都有导热管路，并且管路采用绝缘带包裹，防止电池与外壳发生短路。电池两侧布满冷却液管路，每组电池内部都需要一定量的冷却液。通过铝管路在电池组内流动。保证电池温度的均匀性。虽然没有主动的循环系统，但冷却液还是可以适当流动的。冷却液主要材料成分为50%水和50%的乙二醇混合而成，混合乙二醇可以防止低温结冰。冷却液配合铝管路使用主要是为了保持温度的均衡，防止电池局部温度过高，导致电池性能下降。温度能够控制在±2℃的范围内。控制好温度可以大大延长电池使用寿命。

特斯拉每组电池都有其独立电池管理系统（BMS），在电池组侧面固定，整个电池系统同样在输出端由整个系统电池管理系统。电池管理系统主要作用是电池系统的数据采集、状态计算、能量管理、热管理、安全管理、均衡控制和通信功能等。该系统有电池充放电的精确处理算法，能自行处理电池充放电以及电池发热等问题。

特斯拉动力电池系统总重量900kg左右，其中电芯重量为7104×0.047=334kg。其实特斯拉动力电池系统能量密度为：85000/900=95W·h。

特斯拉动力电池系统的能量密度并不高，它主要是在电池系统管理、安全、可靠、热均匀、防止外界撞击和防火等部分采取非常严格措施。而增加动力电池系统重量，使动力电池系统能量密度减少。

总之，特斯拉汽车动力电池系统内部结构设计紧凑合理，电池管理系统可靠细致，考虑电池系统使用寿命、安全性、经济性和可靠性全面充分，是一个非常优秀的动力电池系统。

### 3.2 北汽某型号电动汽车上应用方案考虑[4]

北汽某型号电动汽车动力系统的数据如下：额定电池能量41.4kW；额定电压标称电压330V；动力电池容量：42A·h；冷却液4.2L；整车装备质量1583kg；最大设计质量2023kg；最大载荷440kg；能量消耗率（kW·h/100km）：19；续驶里程260km。

假设北汽电动汽车采用和特斯拉相同能量密度电芯，大约需要电芯数量（总容量除以单个电芯容量可以得出需要电池数量）为42000/12=3500。考虑电池串并联问题，选取北汽动力电池3520节18650号电池。为了满足汽车电压，并保证汽车容量，动力电池系统可以考虑如下设计方案：北汽汽车动力电池由3520节松下18650电池组成，分成8组，每一组电池共444节，每一组的44节电池并联，再10组串联，每组电压考虑电池充满电电压计算，电压达到直流42V，然后共8组电池再串联，使动力电池系统的直流电压达到336V，电池容量达到42.2kW·h（每节电芯容量3.6V×3.3A等于12W·h）。最终形成完整动力电池系统，为电动汽车提供动力。北汽电动汽车的电池组单元的电池包、电池组及动力电池系统组成电气结构图如图5~图7所示。

和特斯拉电动汽车一样，北汽电动汽车也对电池采用液体

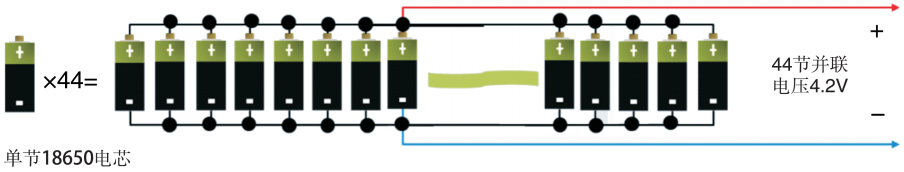


图5 由单节电池电芯并联组成单体电池包示意图

Fig.5 A diagram of a single battery package consisting of a single battery cell in parallel

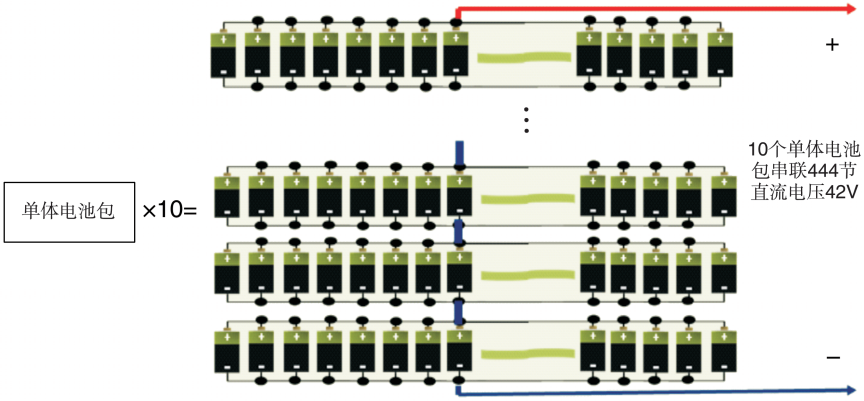


图6　由单体电池包构成电池组的电气结构示意图

Fig.6　A diagram of the electrical structure of a battery pack consisting of a single battery pack

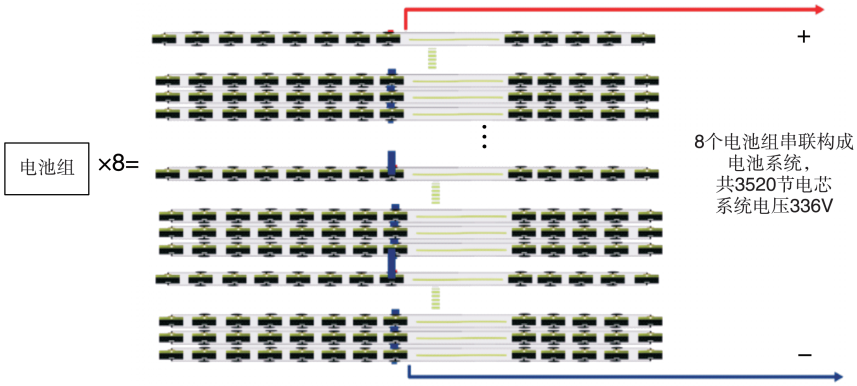


图7　由电池组构成的动力电池系统电气结构示意图

Fig.7　A diagram of the electrical structure of the power battery system consisting of a battery pack

散热，以保证电池温度均匀性，从而确保电池的长寿命工作。

由于采用18650锂离子电池，它对电池的一致性要求非常严格，松下公司的18650电池一致性就非常好，而且其稳定性和能量密度也非常好，因此，特斯拉等公司在电动汽车上大量采用这种电池。

### 3.3　18650锂离子电芯组成的动力电池系统的充放电功能

锂离子电池能够提供稳定、长寿命、安全可靠的工作，是电动汽车和飞机成功的关键因素，所以锂离子电池的充放电技术就显得格外重要。一般认为将锂离子电池的空载电压放电到3.0V左右时，就认为电池电用完了（具体值有差异，需要看电池保护板的门限值设计，有的低到2.8V，有的是3.2V）。大部分锂离子电池不能将空载电压放电到3.0V以下，否则过度放电会损坏电池。4.2V是电池充电的最高限制电压，一般认为将锂离子电池的空载电压充电到4.2V就认为电充满了，电池充电过程中，电池电压逐渐升高到4.2V，锂离子电池不能将空载电压充电到4.2V以上，否则也会损坏电池，这是锂离子电池所特有的地方。

#### 3.3.1　充放电原理

锂离子电池的工作原理就是其充放电原理。当对电池充电时候，电池正极上有锂离子生成，生成的锂离子经过电解液运动到负极。而作为负极的碳呈层状结构，它有很多微孔，到达负极的锂离子就嵌入到碳层的微孔中，嵌入的锂离子越多，充电容量就越大。因此，电池的正极和负极是锂离子电池容量大小的关键。

同样的道理，当对电池进行放电的时候（实际使用电池过程），嵌入负极碳层中的锂离子脱出，通过电解液又运动到正极。回到正极锂离子越多，放电容量越大。也就是电池容量大，或者能量密度高。

从上面原理可以看出，锂离子电池的充放电过程中，就是锂离子从正极—负极—正极的运动过程，锂离子在电池内处于运动状态。这就形成了电动汽车和飞机的运动过程。

#### 3.3.2　充放电过程

根据锂离子电池的原理和特性，锂离子电池充放电对锂离子电池非常关键，锂离子电池充放电控制分为两个阶

段。第一阶段是恒流充电阶段，电池电压低于4.2V时候，充电器会以恒定电流充电方式为电池充电。当电池电压达到4.2V时会自动转入第二阶段。第二阶段是恒压充电阶段，当锂离子电池电压达到4.2V时，由于锂离子电池特性，如果电压再高，就会损坏电池，因此，此时充电器会将电压固定在4.2V，恒定电压对电池充电，充电电流逐渐减少，当电流减少到一定值时候（一般设置1/10设置电流时），断开充电电路，充电完成。表示电池已经充满电量。

锂离子电池的过度充放电会对其正负极造成永久的损坏。过度放电会造成负极碳层结构出现塌陷，而塌陷会造成充电过程锂离子无法嵌入；过度充电会使过多的锂离子嵌入碳结构，而造成其中部分锂离子再也无法释放出来。这两种情况都会造成锂离子电池损坏，因此，充放电管理和充电器选择就非常重要。

3.3.3 电池充放电管理和充电器选择[3]

对于电池系统来说，锂离子电池充放电管理和方案选取是其核心关键技术，如果充放电管理在控制精度上不够严格，容易造成电池系统充放电异常，甚至损坏电池系统。而如果充放电管理精度高，充电器功能齐全，就可以使电池使用寿命大大延长，从而使汽车和飞机寿命大大延长。

选择电池的充电器的时候，充电器应该拥有5种保护功能：过充电保护、过放电保护、短路保护、过流保护、过压保护和电池接反保护等。

（1）过充电保护当充电器对锂离子电池过充电时候，为防止因温度上升所导致的内电压上升，需要终止充电状态。为此，充电器需要有电池数据采集的功能，监控电池电压，当其达到电池的过充电压时，激活过冲保护功能，终止充电过程。汽车或飞机上的蓄电池系统应该具有电池管理功能，其中应该具有过放电保护等能力。

（2）过放电保护为了防止锂离子电池进入过放电状态，当锂离子电池低于其过放电电压检测点时，激活过放电保护，终止电池系统放电，并将电池系统保持在低静态电流待机模式。

（3）过流及短路保护当锂离子电池系统检测到放电电流过大或发生短路的时候，激活过流和短路保护，使电池终止放电。同时告警，找到过流和短路的原因，再重新工作。

电池管理系统和充电系统是锂离子电池系统的重要组成部分，好的电池管理系统能够实现对每一节电池的健康状态进行监控，及时终止损坏的电池工作并断开电池，而不影响系统正常工作。这就需要锂离子电池系统具有数据采集（电芯充放电电压和电流、电池组和系统的充放电电压和电流等）、热管理、安全管理、电芯及电池组之间均衡控制、状态计算、系统能量管理和数据通信等功能。该系统还应该包含电池充放电的精确处理算法，能自动处理电池充放电以及电池发热等问题。因此，锂离子电池的电池管理是未来电动汽车和电动飞机的关键技术之一，需要花大力气来研究解决。

## 4 锂离子电池在电动无人机上应用研究

通过对锂离子电池的不断研究，目前，我们已经把锂离子电池推广应用到电动飞机上。本文将一个350kg级左右的燃油无人机改为电动无人机为例，研究电动无人机上锂离子电池系统设计。

燃油无人机改成电动无人机后，飞机的飞行噪声大大降低，故障率大幅下降，改善了无人机的飞行状态。使无人机在执行任务有随时启停、无声滑翔、安静巡航的能力，大大提高无人机的任务性能。

### 4.1 无人机的系统

无人机的起飞重量350kg；发动机重量22kg；燃油重量60kg；任务设备重量30kg；总重量112kg。飞机改成电动飞机后分配给电池的重量控制在90kg,考虑到整个飞机的配重问题，电池的重量应该限制在80kg以内。

### 4.2 空间布局考虑

原飞机的燃油储存在三个油箱中，因此，80kg的电池系统也应该考虑存放固定在原来三个油箱中。并考虑电缆和充电接口等部件。航空煤油的密度0.78g/cm$^3$；锂离子电池的密度2.78g/cm$^3$。

从上面的数据比较可以看出，锂离子电池的密度远远大于航空煤油，因此在飞机动力电池系统的设计中只考虑锂离子电池的质量能量密度，飞机空间里存放电池系统空间足够，不需要考虑体积能量密度。

由于有三个油箱，考虑分三组电池组构成飞机的动力电池系统，每一组电池重量控制在25kg左右，重量共75kg。这样留出5kg来安排电池充放电管理接口、电池绝热和保温等部件。

### 4.3 系统参数

巡航功率18kW；直流电压270V；巡航高度1000m；采用火箭助推。

### 4.4 动力电池系统的设计

4.4.1 考虑采用松下18650锂离子电池方案设计

考虑采用锂离子电池18650作为电动无人机动力电池系统电芯，由于系统电压为270V直流，考虑18650电芯电压为4.2V，计算出需要65节18650电池相串联才能达到需要电压。考虑锂离子电池18650电芯的重量为46g左右，而电池总重量75kg，计算得出大约需要1630节电池。

考虑分三组电池，相互串联应用，选取1584节18650锂离子电池组成无人动力电池系统。三组电池采用串联方式布局，每组电池数量为528节，采用24节电池并联组成一个电池组单元包，然后再将22单元包串联，形成一个由528节18650锂离子、电压为92.4V组成的电池组。然后三组电池串联形成直流电压为277.2V的动力电池系统，来满足飞机系统的需求。电动无人机的电池组单元的电池包、电池组及动力电池系统电气结构组成图如图8~图10所示。

从电动无人机动力电池系统的初步设计可以得出，动力电池系统的总容量计算如下：单节电芯能量密度×系统的总电

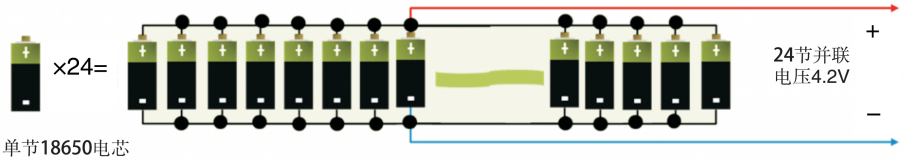


图8 由单节电池电芯并联组成单体电池包示意图

Fig.8 A diagram of a single battery package consisting of a single battery cell in parallel

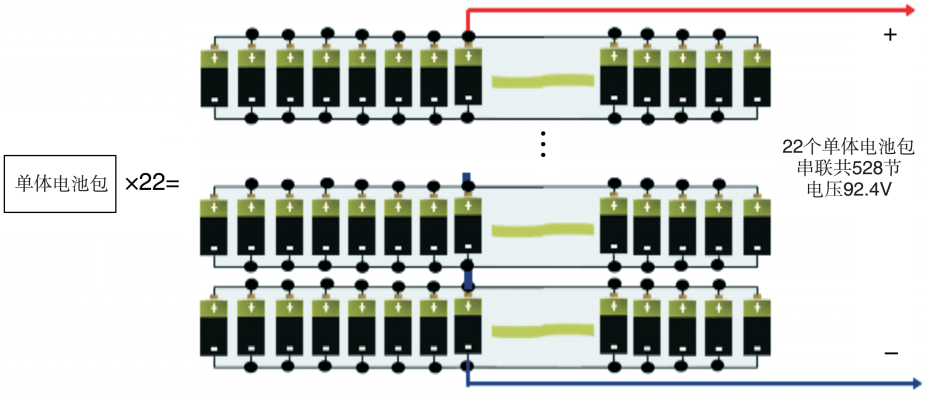


图9 由单体电池包构成电池组的电气结构示意图

Fig.9 A diagram of the electrical structure of a battery pack consisting of a single battery pack

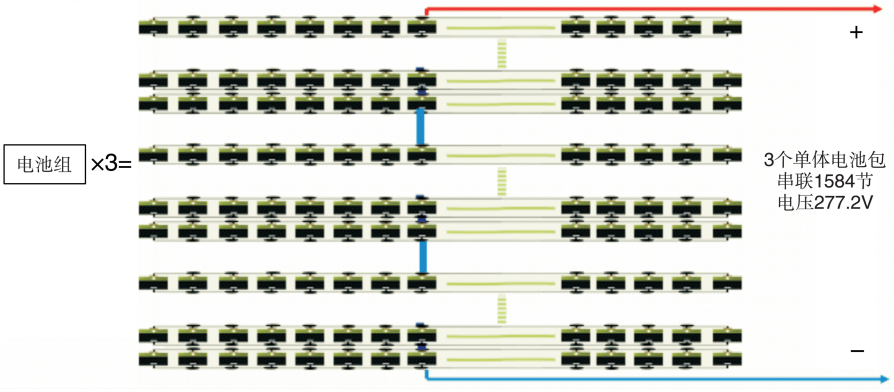


图10 由电池组构成的动力电池系统电气结构示意图

Fig.10 A diagram of the electrical structure of the power battery system consisting of a battery pack

芯数量=系统总的能量密度，即3.6×3.3×1584=18818，所以，电动飞机动力电池系统容量为18.818kW·h。

考虑巡航功率大约为18kW，初步估计电动无人机的飞行时间$T$：飞行时间=动力电池系统总容量/巡航消耗功率，即$T$=18.818/18=1.045，所以，初步计算无人机大约可以飞行1.045h。

总电芯重量是1584×0.047=74.4，动力电池系统重量控制在80kg以内。同时应该包含电池管理、充放电系统、温度控制和均衡管理等相关部件重量。

4.4.2 采用松下21700锂离子电池的方案

考虑采用锂离子电池21700作为电动无人机动力电池系统的电芯，以提高动力电池系统能量密度，进而提升无人机飞行时间。由于系统电压为270V直流，考虑21700电芯电压为4.2V，计算出需要65节21700电池相串联才能达到需要电压。考虑锂离子电池21700电芯的重量为66g左右，

而电池总重量75kg，计算得出大约需要1136节电池。

考虑分三组电池，相互串联应用，最终选取1122节21700锂离子电池组成无人动力电池系统。三组电池采用串联方式布局，每组电池数量为374节，采用17节电池并联组成一个电池组单元包，然后再将22单元包串联，形成一个由374节21700锂离子、电压为92.4V组成的电池组。然后三组电池串联形成直流电压为277.2V的动力电池系统，来满足飞机系统的需求。电动无人机的电池组单元的电池包、电池组及动力电池系统电气结构组成图如图11~图13所示。

从电动无人机动力电池系统的初步设计可以得出，动力电

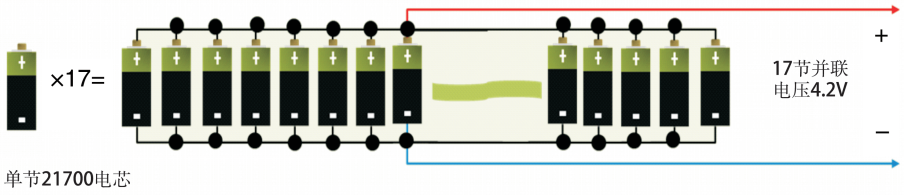


图11 由单节电池电芯并联组成单体电池包示意图

Fig.11 A diagram of a single battery package consisting of a single battery cell and a parallel

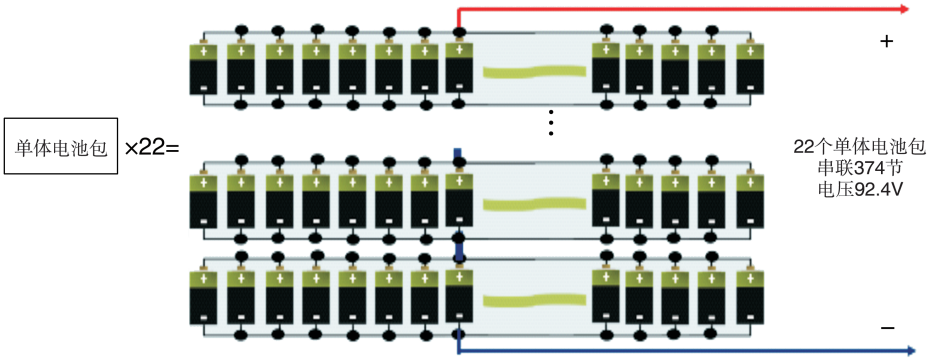


图12 由单体电池包构成电池组的电气结构示意图

Fig.12 A diagram of the electrical structure of a battery pack consisting of a single battery pack

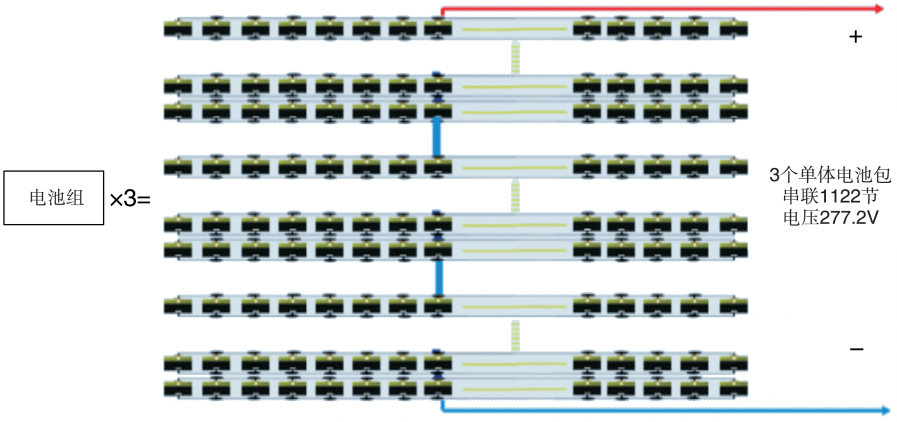


图13 由电池组构成的动力电池系统电气结构示意图

Fig.13 A diagram of the electrical structure of the power battery system consisting of a battery pack

池系统的总容量计算如下：单节电芯能量密度×系统的总电芯数量=系统总的能量密度，即3.6×5×1122=20196。电动飞机动力电池系统容量为20.196kW·h，也就是总能量为20kW·h电量。

考虑巡航功率大约为18kW，初步估计电动无人机的飞行时间$T$如下：飞行时间=动力电池系统总容量/巡航消耗功率，即$T$=20.196/18=1.122h，所以，初步计算无人机大约可以飞行1.122h。总电芯重量是1122×0.066=74.052g，动力电池系统重量控制在80kg以内。同时应该包含电池管理、充放电系统、温度控制和均衡管理等相关部件重量。

从上面两个方案可以看出，采用21700锂离子电池要比

18650锂离子电池储存的能量要大一些，无人机飞行时间要长一些，但差别不大，要综合考虑价格等因素，决定采取哪一种电池才是最佳的方案之一，但目前21700电芯是最新推出新型锂离子电池，其能量密度要比18650电芯高20%左右，其成本也要比18650电芯低，因此21700电芯锂离子电池是一个最优考虑。当然18650电芯更为成熟一些。

## 5 结论

锂离子动力电池是电动航空技术的发展核心和关键，它决定着电动航空能否在更大范围推广应用。锂离子动力电池系统能量密度的提升，取决于电池电芯能量密度提高、电芯组成电池系统拓扑设计、网络结构设计、充放电设计、电池热设计及安全性设计等。同时，锂离子电池的电池管理系统也非常关键，是保证电池长期可靠工作基础。锂离子动力电池系统能量储存的多少，关系到电动汽车续驶里程和电动飞机的飞行里程，是二者能否取得成功的关键，它也决定电动飞机的未来。人类社会能否生活在少污染或无污染的时代，就取决于高能量密度电池技术的进步，取决于电动航空技术的未来发展。

## 参考文献


[1] 李开省.电动飞机技术发展研究[J].航空科学技术，2019(1):1-7.
Li Kaisheng. Research on the development of electric aircraft technoloyy [J]. Aeronautical Science & Technology,2019(1):1-7.(in Chinese)

[2] 李开省.电动飞机核心技术研究综述[J].航空科学技术，2019(11):8-17.
Li Kaisheng. Summary of the research on core technology of electric aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019(11):8-17.(in Chinese)

[3] 吉永淳.电机电器[M].北京：科学出版社,2001.
Ji Yongchun. Electric motors and appliances[M]. Beijing: Science Press,2001.(in Chinese)

[4] 北京新能源汽车有限公司.EU系列纯电动汽车用户手册[R].北京新能源汽车有限公司,2015.
Beijing New Energy Vehicle Co., Ltd.. EU series pure electric vehicle user manual[Z]. Beijing New Energy Vehicle CO., Ltd., 2015.(in Chinese)


（责任编辑 王为）


**作者简介**

李开省(1961– )男，硕士，研究员。主要研究方向：航空机载机电系统技术，多电、全电及电动飞机技术、能量优化系统技术等。

Tel：010-58354928 E-mail：yhdylks@163.com


# Research on the Application of Lithium-Ion Batteries in Electric Unmanned Aircraft


Li Kaisheng*

*AVIC Aerospace System Co.,Ltd.,Beijing 100028,China*



**Abstract:** Battery is a key component in development of new energy electric aircraft technology. Lithium-ion battery has high energy density, long life, good economy and safety. As the direction of electric technology development, it has been widely in electric vehicles and other electric transportation fields. It also has a good prospect in the development of electric aircraft technology. This paper introduces the principle of lithium-ion battery and the concept of energy density and system energy density of electric cell, studies the application of lithium-ion battery, analyzes the design of lithium-ion battery and electric drone, puts forward the design of power battery system, and provides reference for the design of the core power system of electric aircraft.



**Key Words:** electric unmanned aircraft; lithium-ion battery; battery cells; battery mass energy density; battery volume energy density; system energy density; energy consumption

**Received:** 2020-02-18； **Revised:** 2020-03-03； **Accepted:** 2020-04-08



***Corresponding author.Tel.**：010-58354928 **E-mail**：yhdylks@163.com