

# 电动汽车应用中锂离子电池的最新技术和能源管理系统：问题和建议

MAHAMMAD A. HANNAN, MD. MURSHADUL HOQUE, AINI HUSSAIN, YUSHAIZAD YUSOF, PIN JERN KER

马来西亚国民大学

**摘要：**现在世界市场上有各种可充电电池可供电动汽车（EV）供电。锂离子（Li-ion）电池因其卓越的特性和性能而被认为是所有电池类型和电池中最好的。锂电池的积极环境影响和回收潜力已经影响了改进锂离子电池技术的新研究的发展。然而，降低成本、安全运行和减轻负面生态影响现在是进步的共同关注点。

本文对锂离子电池的最新技术进行了全面的研究，包括不同类型锂电池的基本原理、结构和整体性能评估。介绍了EV应用中锂离子电池存储电池管理系统的研究，包括电池状态监测，充电和放电控制，状态估计，保护和均衡，温度控制和热管理，电池故障诊断，以及旨在提高系统整体绩效的评估。

据观察，锂离子电池由于价格降低和轻量化以及高功率密度而在车辆应用中变得非常流行。然而，充电和放电过程的管理，二氧化碳和温室气体排放，健康影响以及回收和翻新过程仍未得到令人满意的解决。因此，本文重点关注许多因素，挑战和问题，并为未来电动汽车的可持续电池制造提供建议。业界有望在经济性、寿命、特定功率、能量密度、安全性和车辆应用性能方面加大对先进锂离子电池的开发力度。

**关键词：**锂离子电池，最先进的锂离子电池，能源管理系统，电动汽车

## 1 摘要

目前，绿色环境和环境污染风险是研究人员最关心的问题。基于内燃机（ICE）的车辆、工厂和工业由于大量的碳气体排放而导致环境污染和全球变暖。环境研究人员一直在关注开发电动汽车（EV）越来越受到环境研究人员的关注，因为电动汽车利用电能来有效地运行电动机。图 1 中示出了基本的电池供电的电动车辆系统，其中结合了变速器、机械传动系统、电动机、电力转换器、电池管理系统（BMS）和电池组。EV 技术在运行和制动时表现出双向能量流。

通常，电动车辆可以根据电源如下分类：混合动力电动车辆（HEV）、电池供电电动车辆（BEV）、插电式混合动力电动车辆（PHEV）、光伏电动车辆（PEV）和燃

料电池汽车（FCVs）。

与其他电池相比，锂离子电池在各种应用中具有潜在的市场潜力，因为它们具有优越的特性和先进的技术，能量密度最高，记忆效应可忽略不计，自放电率低。锂离子电池通常作为电动汽车和其他系统的主要或次要能源。但是，它需要在充电和放电期间进行保护。由于上述属性，包括低价格，锂离子电池将面临航空航天和汽车应用的大量未来需求。由于超过电流、电压或功率限制，EV 系统可能会遇到麻烦，因为电池可能会进入热失控状态。

目前，锂离子电池已成为动力电池研发及在电动汽车中的应用中的一个更为重要的课题。更重要的是，由于使用石墨作为阳极，存在许多可用作锂离子电池阴极的各种材料；因此，业界有着详尽的根据阴极材料研究和评估

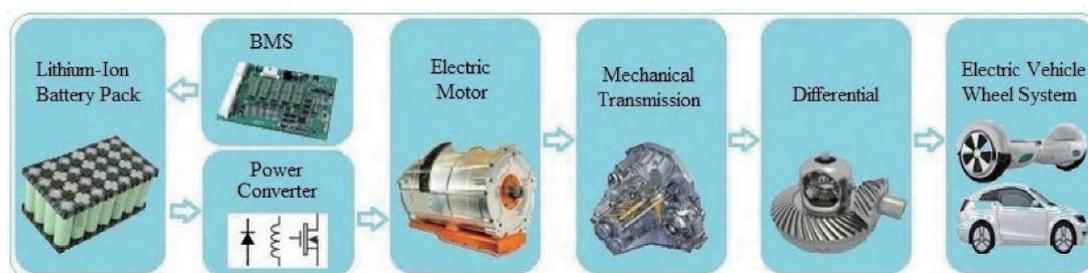


图 1 电动车辆的结构

各种锂离子电池类型。

全世界的大多数研究人员现在都在集中精力开发和修改锂离子化学，以便在考虑成本和其他物理效应的情况下获得更好的性能。在 SOC 的理想工作范围内管理电池充电和放电的挑战已成为先进研究和技术的更重要的主题。现在，锂离子电池生产和应用的进步正在超出预期。图 2 显示了过去十年来 Web of Science 数据库中关于锂离子电池技术和应用出版物的数量，特别是在工程和物理研究领域。该研究在全世界范围内取得了巨大进展，但仅限于日本，韩国和中国等少数亚洲国家。此外，这些研究出版物预测，锂离子电池的重要性多年来一直在增加，如图 2 (b) 所示。

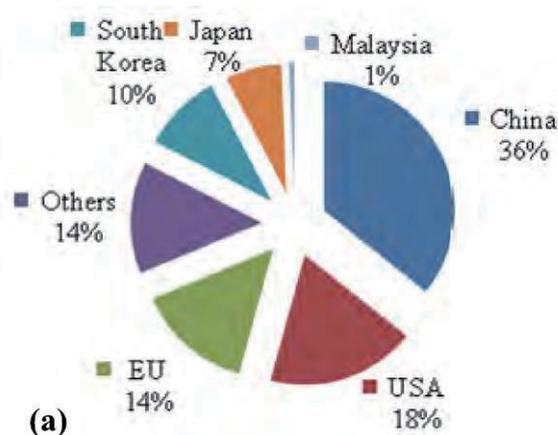


图 2 关于锂离子电池技术和应用的研究出版物的数量：(a) 国家，(b) 全球每年

相反，如图 3 所示，由于必要的高技术支持、原始资源管理和预算限制，用于车辆应用的锂离子电池的制造并不常见。然而，经济最发达国家的政府正集中精力投资安装电池行业，因为它现在可以在不对生态系统造成损害的情况下为便携式车辆提供动力。本文回顾了最常用电池模型的优缺点。此外，还介绍了车辆应用的比较研究以及锂离子电池生产和行动管理的当前挑战和问题以及一些建议。

本文通过回顾 EV 系统中锂离子电池的最新技术，并讨论锂离子电池的概况、特性、形式、类型、性能和应用，为文献做出了贡献。本文包括锂离子电池的评估以及锂离子电池与其他普通电池的比较。解释了锂离子电池管理系统的特性和功能，以及可持续电动汽车储能技术的未来发展预期。该研究还讨论并强调了锂离子电池的生产、保护、

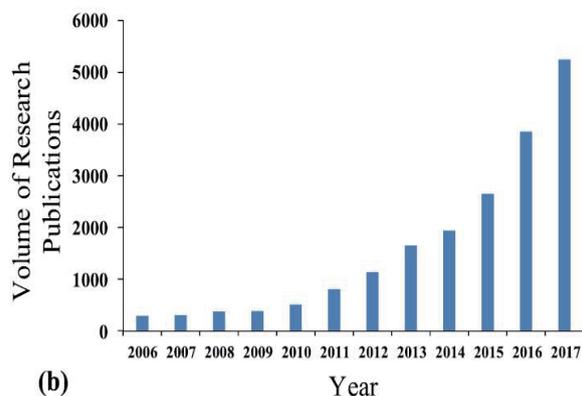


图 3 车辆应用的锂离子电池的制造和市场份额

回收和翻新的当前问题和挑战，并对未来的发展提出了重要的建议。

## 2 锂离子电池概述

在 20 世纪末，电池是唯一的电源，因为发电机和电网电源尚未发明。随着该技术的不断发展，已经开发出许多不同类型的电池。“湿电池”非常常见，在开放式容器中含有液体电解质和金属电极。通过替换材料来重复使用这种类型的电池。由于它们不便携，早期的 EV 采用半密封湿电池。

在电池技术的早期阶段，电流是作为组合电池产生的；然而，当有源元件耗尽时，该电池不能电充电。当铅酸蓄电池发明可充电类型可以为电能充电时，取得了显著的突破。它可以反复储存能量并延长其使用寿命。相反，锂离子一次性电池由于其高能量密度和长寿命而在可再充电电池市场中变得越来越流行，尽管每单位价格高。电池体积和电池能量密度之间的方法和关系在公式 (1) 中给出。

$$\text{Volume of Battery} = \frac{(\text{Regulated Average Power}) (\text{Device Longevity})}{\text{Energy Density of Battery}} \quad (1)$$

### 电池容量

锂离子电池由两个电极作为阳极和阴极组成，它们通过隔板与电解质隔开，其中锂离子在充电期间从阴极移动到阳极，并且在放电期间它们向后移动，如图 4 所示。与含有金属锂的非可充电电池相比，锂离子电池使用复合锂电极材料。它们现在主要用于全球的消费电子产品。

锂离子电池代替具有重铅板和酸性电解质的铅酸电池，已经变得更常用作便携式可充电电池，因为它们具有

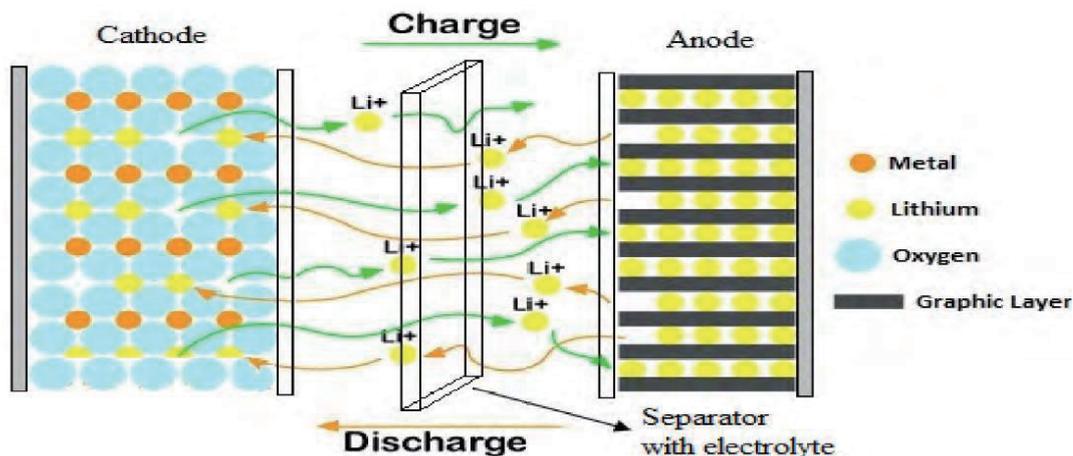


图 4 锂离子电池的充电和放电现象

高能量密度并且在 EV 应用中重量轻，而其驱动系统没有任何改变。尽管锂离子电池具有最佳性能，但由于可燃电解质的存在，它们在制造和使用过程中需要高测试条件和保护，以避免事故和故障。

### 锂离子电池特性

锂离子电池的重要特性包括它们的尺寸（物理和能量密度）、寿命（容量和寿命周期）、充放电特性、成本、在更宽的温度范围内的性能、自放电和泄漏、放气和毒性影响。通常，锂离子电池具有正面和负面特性。积极的特性包括其高比能量（230Wh/kg）和功率密度（12kW/kg）、良好的能量密度、优异的循环寿命和长寿命，以及良好的充电和放电效率。成本方面，充电和放电期间强制要求的电子保护系统以及制造和处置过程中的温室气体排放是常见的负面因素。

锂离子电池具有良好的充电和放电电气特性，如图 5 所示。充电时，充电容量随着充电电压保持恒定电流而逐渐增加。当电压达到最大值时，电流呈指数下降。另一方面，容量放电保持几乎恒定的电压和电流到负载，尽管电压和电流值分别小幅下降和增加，直到电池容量达到最小可接受水平，这个由制造商作为充电终止电压。

### 锂离子组分

锂离子电池由四个主要组分组成，包括阴极、阳极、电解质和隔膜，如图 4 所示。阴极是锂 - 金属 - 氧化物粉末。当电池放电时锂离子进入阴极，当电池充电时锂离子离开。以下反应显示了以摩尔计的化学功能。阴极的化学反应如下所示：

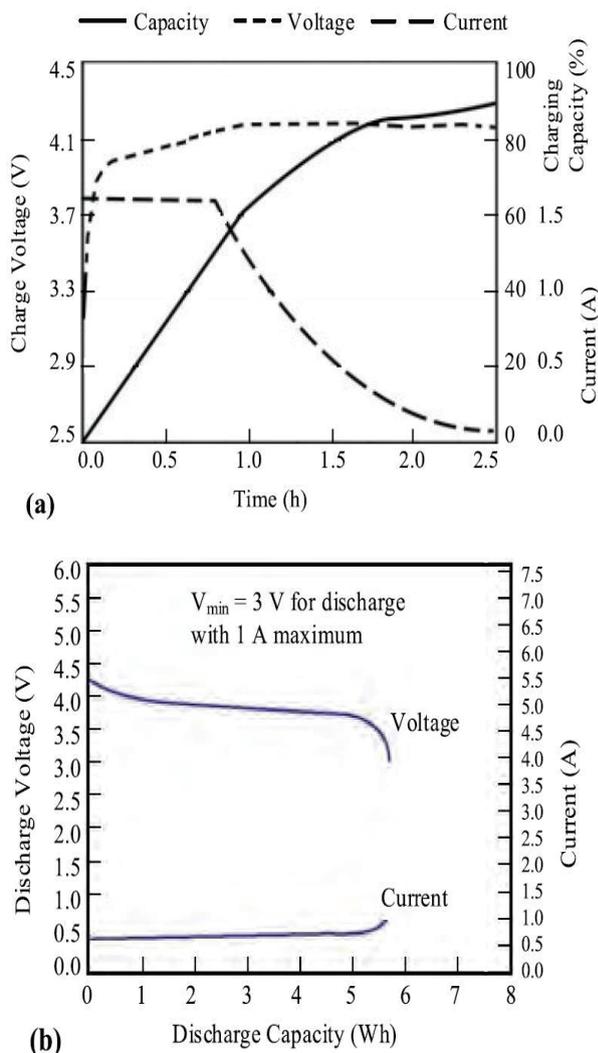
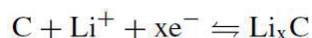


图 5 锂离子电池的典型特性 (a) 充电, (b) 放电

阳极是石墨碳粉末。当电池放电时锂离子离开阳极，当电池充电时锂离子进入阳极。阴极反应见如下：



在锂离子电池中，阴极和阳极材料由锂金属氧化物和锂化石墨制成，其中两种结构分别在铝和铜集电器上分层组织。

电解质由锂盐和有机溶剂组成；电解质允许锂离子在阴极和阳极之间而不是电子中传输。隔膜是微孔膜，用于排除阴极和阳极之间的短路，并且仅允许锂离子穿过孔。锂电池的总体反应如下：



### 锂离子电池组

锂离子电池可以构造和包装在两个主要构造中，这些构造是圆柱形或棱柱形的金属罐或层叠薄膜（堆叠的电池），其被熟知的是锂离子聚合物电池。锂离子电池可以成形为具有电解质的金属罐中的轧制和抹灰层的圆柱形结构。在堆叠形式中，三层被层压在层压薄膜中，并且它们的边缘是热密封的铝化塑料。通常使用凝胶或聚合物来防止电解质在该包装中泄漏。对于 EV 中的能源，锂离子电池必须组装成模块，然后进一步组成串并联电池的电池组，以达到精确的能量需求。

## 3 锂离子电池的类型

通常，电池中活性锂离子的主要来源是正电极材料或阴极。因此，为了实现高容量，该材料中包含大量的锂。此外，阴极材料遵循可逆过程，以轻微的结构改变锂的性质进行交换；在电解质中，材料由价格合理的高锂离子制备，具有扩散性、良好的导电性和高效率。这些类型的阴极材料包括锂钴氧化物 (LiCoO<sub>2</sub>)、锂锰氧化物 (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)、磷酸铁锂 (LiFePO<sub>4</sub>)、锂镍锰 - 钴氧化物 (LiNiMnCoO<sub>2</sub>)、锂镍钴铝氧化物 (LiNiCoAlO<sub>2</sub>) 和钛酸锂 (Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)。

### 氧化钴 (LiCoO<sub>2</sub>)

锂钴氧化物是索尼在 1991 年创造的，水岛改进了材料。其高特异性能量使这种类型的电池成为平板电脑、笔记本电脑和相机的通常电池选择。然而，钴的可获得性受到限制，这使得成本高，因此需要更换阴极材料以增加其应用，例如，在 EV 中，电池由氧化钴阴极和石墨碳阳极组成，其为层状结构，在充电和放电期间释放锂离子以在它们之间行进。它具有短寿命和有限的负载能力，并且不

能在超出其范围的电流下充电和放电。它需要在快速充电时防止过热和过度应力，并且充电和放电速率需要限制在大约 1C 的安全水平。

图 6 概述了锂钴的特定能量或容量，特定功率或传输高电流、能量和功率密度的能力，安全性，在不同温度下的性能，寿命和成本方面的性能。具有高能量密度的锂钴具有高特定能量，但具有适中的特定功率、中等安全性、高价格和长寿命。

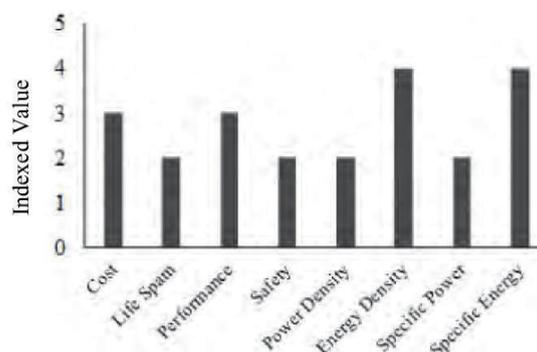


图 6 锂钴电池性能

### 锂锰氧化物 (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)

1983 年材料研究公报首次介绍了锂锰氧化物。1994 年，Bellcore 实验室建造了锂锰氧化物电池。它的 3D 尖晶石结构被组织成钻石形状，允许颗粒在电极上蒸汽，从而增强电流处理并降低内部电阻以快速充电并以高电流放电。由于其尖晶石结构，它具有高热稳定性和安全性的积极影响；但是，它限制了寿命。LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 具有比钴更多的特定能量。

与锂钴相比，锂锰的容量低约 33%。然而，这种类型的电池比镍基电池多大约 50% 的能量。设计合规性使得专家能够提高电池的使用寿命和高电流处理能力。Think EV 使用了 EnerDel 制造的锂离子电池组，而日产 leaf EV 则使用了 NEC 制造的锂离子电池组。由于在升高的温度下电解质中大量的锰崩解，锂锰氧化物具有下限 100 至 120mAh/g，并且在充电或再充电循环时具有较高的容量损失。在一般性能方面，除了功率密度之外，锂锰的电流轮廓提供了特定功率、能量密度、健康度和寿命的增强，如图 7 所示。

### 磷酸铁锂 (LiFePO<sub>4</sub>)

德克萨斯大学在 1996 年发现磷酸盐可以用作锂电池的阴极材料。这种阴极在过充电状态下是稳定的，可以承

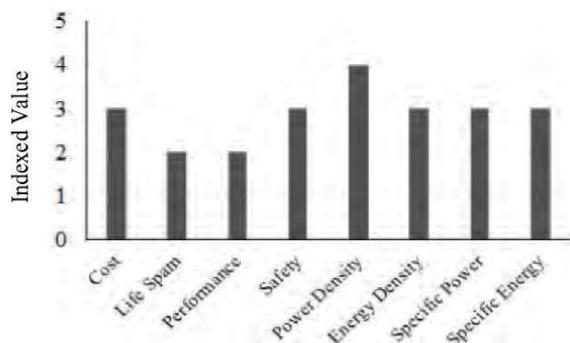


图 7 锂锰电池性能

受高温而不会破坏；磷酸铁锂电池中的阴极材料更可靠，比其他阴极材料更安全，例如  $\text{LiCoO}_2$  或  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  电池。磷酸盐的电池工作温度范围为  $30^\circ\text{C}$  至  $60^\circ\text{C}$ ，电池包装温度范围为  $50^\circ\text{C}$  至  $60^\circ\text{C}$ ，这会降低热失控并防止烧坏。

磷酸铁锂电池由纳米级磷酸盐材料制成，具有低电阻、长寿命、高负载处理能力、更高的安全性，热稠度、无毒副作用、费用低等，如图 8 所示。它对过充和充电不足的生命周期的影响较小，尽管特定的能量略有减少，但低于  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  中的能量。由于温度，它具有一些负面性能和使用寿命特性。磷酸锂电池能够分别提供约  $160\text{mAh/g}$  和  $3.40\text{V}$  的特定能量和标称电压。这些属性使电池性能升级变得简单。

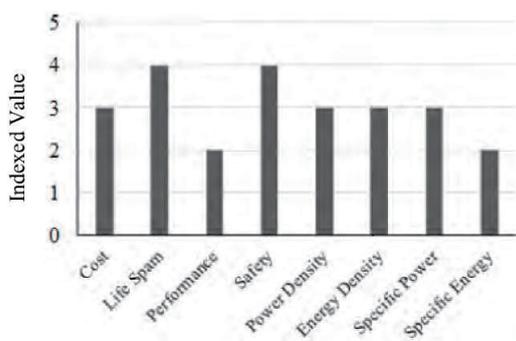


图 8 提供了磷酸锂的特征的细节

锂镍锰氧化物 ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ )

目前，电池公司专注于镍-锰-钴 (NMC) 的阴极混合物。这些阴极材料定向为建立高特定能量或高密度功率。对于硅基阳极，容量和生命周期相互影响。镍和锰的结合表现出良好的综合性能，虽然镍稳定性低，锰提供低的特定能量，但可以带来镍的高比能量和锰的低内阻效应。

33%镍、33%锰和 34%钴的阴极混合物提供了一种新型混合物，由于钴含量降低，因此原料成本降低。为了完美的组合，制造商保护他们的特定配方。目前，由于其特定的能量和最小的自加热速率，EV 应用对这种电池的需求很大。图 9 示出了 NMC 的属性。

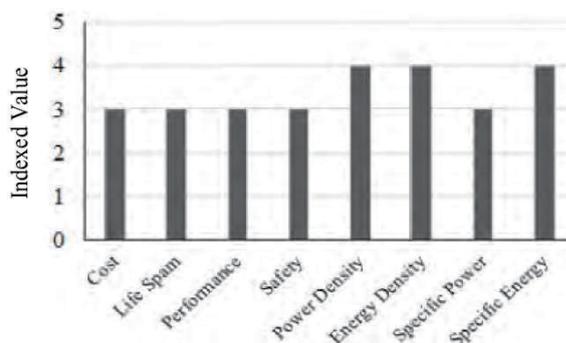


图 9 NMC 电池性能

锂镍钴氧化铝 ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ )

锂镍钴铝氧化物电池 (NCA) 具有少量的世界市场份额。现在汽车行业正在强调 NCA 电池的生产，因为它具有很高的性能，即具有高的特定能量和功率密度以及考虑成本和安全性的高寿命。图 10 显示了 NCA 的性质和进一步推进的区域。

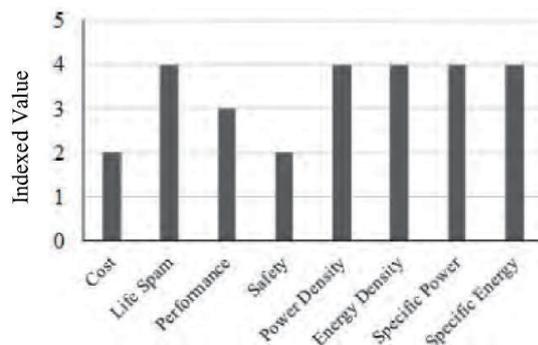


图 10 NCA 电池性能

钛酸锂 ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ )

自 20 世纪 80 年代以来，钛酸锂阳极一直被用于电池。它具有尖晶石结构，可替代锂离子电池的石墨阳极。它通常为  $2.40\text{V}$ ，与典型的锂离子电池相比，具有高容量、高充放电率和高寿命。此外， $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  电池可以安全操作，并且在低温下具有非凡的特性。由于其特定能量不高，与

其他锂离子不同，开发和研究的重点是提高特定能源并降低价格。图 11 表示钛酸锂电池的属性。

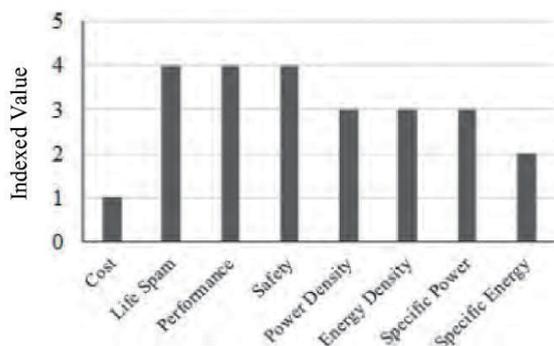


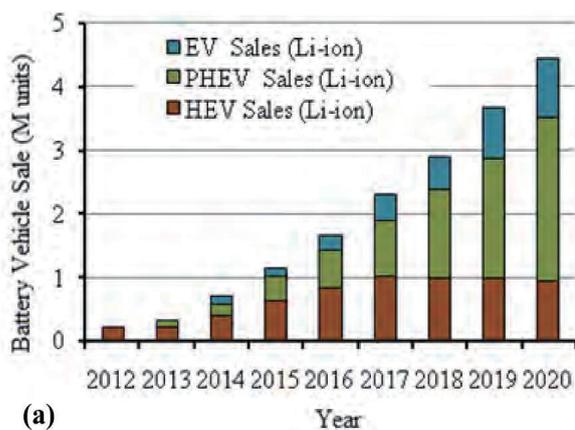
图 11 钛酸锂电池性能

#### 4 锂离子电池应用

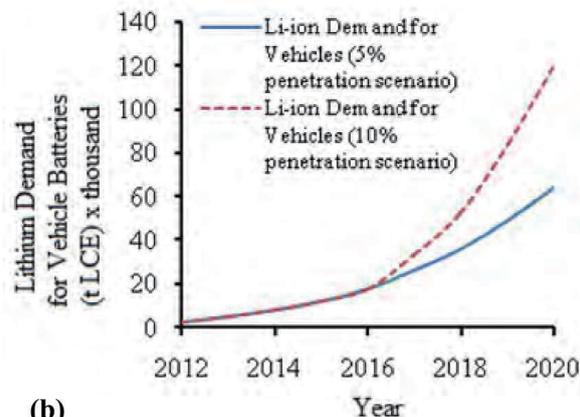
从上面的讨论可以清楚地看出，锂离子电池具有高能量密度并且重量轻。因此，锂离子电池是下一代航空航天、生物医学应用和新型汽车应用的重要且合适的应用，尤其是新一代电动汽车和混合动力汽车。更高效和有效地将多个电池组串联或并联安排为电池组，用于为重型电气和电子设备（例如，EV、HEV、飞行器、自动和远程控制系统以及其他电源工具和机器），而不是连接大容量电池。

图 12 描绘了锂离子电池车（EV、PHEV、HEV）产量和电动车辆电池锂需求预测的真实情景，即 2012 年至 2020 年全球锂离子电池需求情况。在这里，可以看出电动汽车销售逐渐增加，并且由于公众对传统车辆替代品的需求，未来的产量增长将继续。为电动汽车提供动力，随着电动汽车销量的增加，电池的锂电池供应也在增加。

除了在汽车中的应用之外，锂离子电池还占据了电信领域的大量电源。通过适当的处理，这些电池可用于整个电信网络领域中的电气和电子负载的安全备用电源。在大



(a)



(b)

图 12 (a) 锂离子电池汽车销量, (b) 汽车电池的锂需求

多数情况下，二级非水锂离子电池应用于这些领域。在锂离子电池的一些大尺寸应用中，建议应通过提供准确的说明和信息材料来维持监管要求，以应对爆炸风险并挽救生命和环境。

#### 5 锂离子电池性能比较

如前几节所述，锂离子电池是用于实现可持续全球发展的公平有效运输的最可行的电池。很快，它将统治汽车和航空航天工业和市场。因此，所有电池的性能比较讨论如下。

有不同类型的传统电池，如铅酸电池、镍镉 (Ni-Cd) 电池和镍氢 (Ni-MH) 电池。表 1 显示了锂离子电池与其他类型电池的比较。锂离子电池在高能效和功率密度方面具有优势，这使得它们设计得更轻、尺寸更小。此外，锂离子电池的其他优点包括宽温度范围的操作，快速充电能力，相对长的循环寿命，低自放电率和电荷，能量和电压效率。对于这些有利可图的特性，锂离子电池将主导商业电池市场，为生物植入设备、医疗仪器和便携式设备提供动力。

图 13 描述了市售可充电电池电源的典型放电特性，即锂离子 (Li-ion)、铅酸、镍锌 (Ni-Zn)、镍镉 (Ni-Cd)、镍金属氢化物 (Ni-MH) 和锌 - 锰氧化物 (Zn-MnO<sub>2</sub>)。几乎所有这些电池电源都具有平滑和放电特性，具有自己特定的能量和功率水平；但是，锂离子电池具有轻微的线性放电特性。而且，在图 14 中，关于它们的尺寸和重量，揭示了它们之间的可理解的差异。

##### 锂离子电池类型的性能比较

尽管锂离子电池具有优异的特性，但如第 2 节所述，

表 1. 锂离子电池与其他类型电池的比较

Battery Type	Lead-acid [71]	Ni-Cd [72]	Ni-MH [73]	Zn-Br [76]	Fe-Cr [75]	Li-ion [78]
Energy Density(Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	35-54	20-35	110-160
Power Density	180	150	250-1000	-	70-100	1800
Nominal Voltage	2V	1.25V	1.25V	1.67V	1.18V	3.6V
Operating Temperature	-20-60°C	-40-60°C	-20-60°C	-20-60°C	-40-60°C	-20-60°C
Cycle Live	200-300	1500	300-500	>2000	-	500-1000
Charge Efficiency %	79	-	-	-	-	100
Energy Efficiency %	70	60-90	75	80	66	80
Voltage Efficiency %	-	-	-	-	82	-
Overcharge Tolerance	High	Moderate	Low	High	Moderate	Very low
Self-discharge	Low	Moderate	High	Low	High	Very low
Thermal Stability	Least Stable	Least Stable	Least Stable	Least Stable	Stable	Most Stable

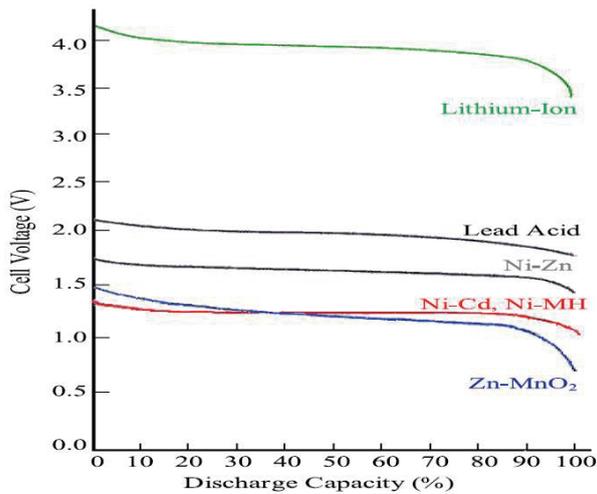


图 13 锂离子、铅酸、Ni-Zn、NiCd、NiMH 和 Zn-MnO<sub>2</sub> 电池的典型放电特性

锂离子电池类型的基本差异在于用作电池中的电极的材料。这里，所有锂电极材料的工作电压特性如图 15 所示。

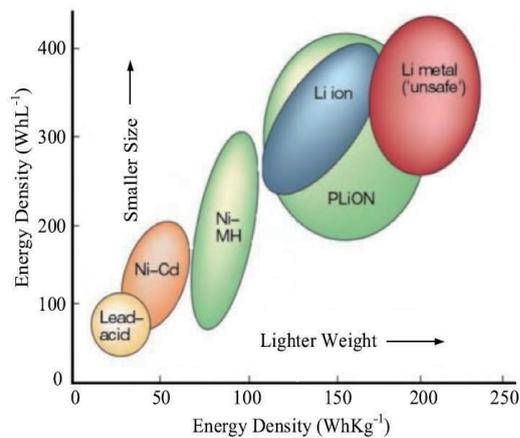


图 14 各种电池类型的重量和体积能量密度

作为正极，LiCoO<sub>2</sub> 具有良好的性能，但仍然具有高成本。Co 是有限的资源，容量低。LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.15</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>2</sub> (LCA) 和 LiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> (NMC) 具有高容量和高电压，性能优异，价格高。Ni 和 Co 资源有限；NMC 比 LCA

更安全。由于 Mn 的可用性、高电压、平均安全性和出色的性能,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  变体低价格, 但循环寿命有限且容量差。 $\text{LiFePO}_4$  具有良好的安全性, 循环性和性能, 铁质, 低价格和低毒性, 低电压, 低容量, 高能量。作为负极, 石墨具有较长的寿命周期, 较大但相对较低的能量密度, 并且由于固体电解质界面形成而效率低下;  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  是一种“零应变”材料, 具有良好的循环和效率, 尽管电压并且容量很低。

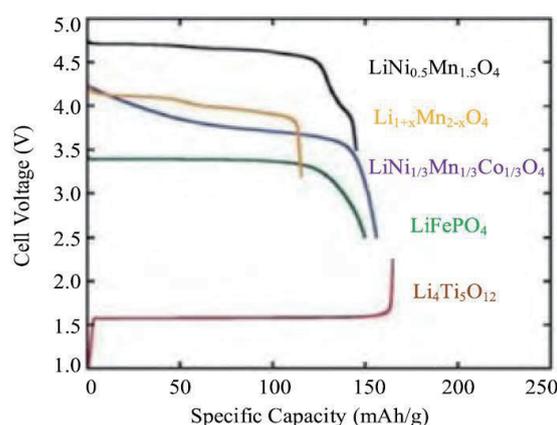


图 15 所有锂电材料的工作电压曲线

表 2 列出了锂离子电池类型的性能比较, 包括优点、缺点和应用。图 16 比较了具体的能量、特定功率、能量密度、功率密度、成本、安全问题、整体性能和各种锂电池类型的生命周期。从表面上看, 可以得出结论, 钛酸锂在安全性、性能、生命周期和经济性方面是最好的, 但在容量和功率类别方面仍然很差。锂镍锰 / 钴具有中等性能, 其他是平均的。考虑到锂离子电池在电动汽车中的应用, 生命周期和安全特性应该比容量更重要。

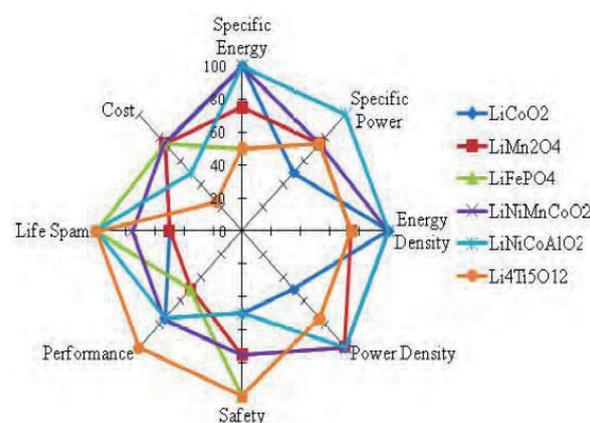


图 16 锂离子电池类型索引值的比较

表 2. 锂离子电池类型之间的性能比较和应用

Types of Li-ion Batteries	Advantage	Disadvantage	Applications
$\text{LiCoO}_2$ [41]	High specific energy	Short life span and limited load capacity, and safety.	Cell phones; laptops and digital cameras
$\text{LiMn}_2\text{O}_4$ [49]	Specific power, safety and life span	Moderate in overall performance.	EVs, HEVs, medical.
$\text{LiFePO}_4$ [52]	Good thermal stability, tolerant to abuse, high current rating, excellent safety and long life span;	Moderate specific energy; lower voltage than other lithium-based batteries; cold temperature reduces performance	EVs; power tools and portable devices.
$\text{LiNiMnCoO}_2$ [55]	Good overall performance and excels on specific energy	High Cost	Power tools, electric vehicles and energy storages.
$\text{LiNiCoAlO}_2$ [57]	High energy and power densities, good life span	High cost and marginal safety	Electric vehicles and power trains.
$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ [60]	Temperature range (-30-55°C) and recharge efficiency 98%, life cycles: > 3000-7000 cycles, high safety and stability, quicker to charge, charged at rate > 10°C.	Small voltage (2.4V/cell), low energy density, difficult to manufacture	Advanced nano-technology applications.

## 6 锂离子电池管理系统

锂离子电池驱动的电动汽车正变得非常有效，并且可以作为全世界的清洁运输替代品。HEV 和 BEV 系统可以对全球经济和环境产生积极影响。为了提高其服务长度的性能，需要安全地维护 EV 系统，包括在车辆中安全操作 ESS，这对于 EV 技术至关重要。电池管理系统 (BMS) 管理有关 EV 系统中的能量存储和传输的所有控制和管理设施，例如充电和放电控制，电池组电压监控和平衡，电池电量均衡，输入 / 输出电流和电压监控，温度控制，电池保护，故障诊断和评估等。BMS 功能概述如图 17 所示。BMS 根据电池属性和电池充电状态来控制电池充电。它根据负载需求和电池系统中可用的电量来控制电池放电。所以需要由 BMS 测量电池组电压电平，以估计电池组的充电状态，并保护电池免于过度充电和充电不足。通过电荷均衡技术进行电池组平衡应由 BMS 实施，以提高电池的整体性能和寿命。

BMS 将操作温度控制在一定水平以执行能量转换并管理热量以便安全操作。电压 / 电流应力、过压、短路、过流、滞后等保护，是通过在 EV 系统的 BMS 中集成传感器、继电器和断路器来实现的。BMS 诊断并评估 EV

系统中通常发生的与能量存储和电力输送的整个过程有关的故障。细节描述如下：

### 电池监测

电动汽车使用一系列封装锂离子电池。电池组在运行期间可能表现不同。因此，需要连续的电池监测来研究细胞的状态。电池组监控结果可能通过管理、保护、均衡和控制操作来帮助系统性能。它表明了充放电控制的必要性，过充电和充电不足的电池条件的保护，温度和热量的控制，数据采集的通信和接口，以及故障诊断和评估等。

### 输入 / 输出电流和电压监测

锂离子电池需要恒流充电以在操作期间保持恒定电压。电池电流和电压值的异常变化可能导致系统故障或系统烧毁。因此，监控电池组的电流和电压水平，对于保护电池免受过电流 / 电压和欠电流 / 电压操作至关重要。此外，电流和电压值的记录表示能量存储系统的状态，以便 EV 可以做出进一步行动的决定。

### 充电和放电控制

锂离子电池的性能和耐用性主要取决于其充电和放电。锂离子电池的优化和优质充电和放电，提高了电池存储系统的效率和寿命周期。高效的充电和放电控制可消除

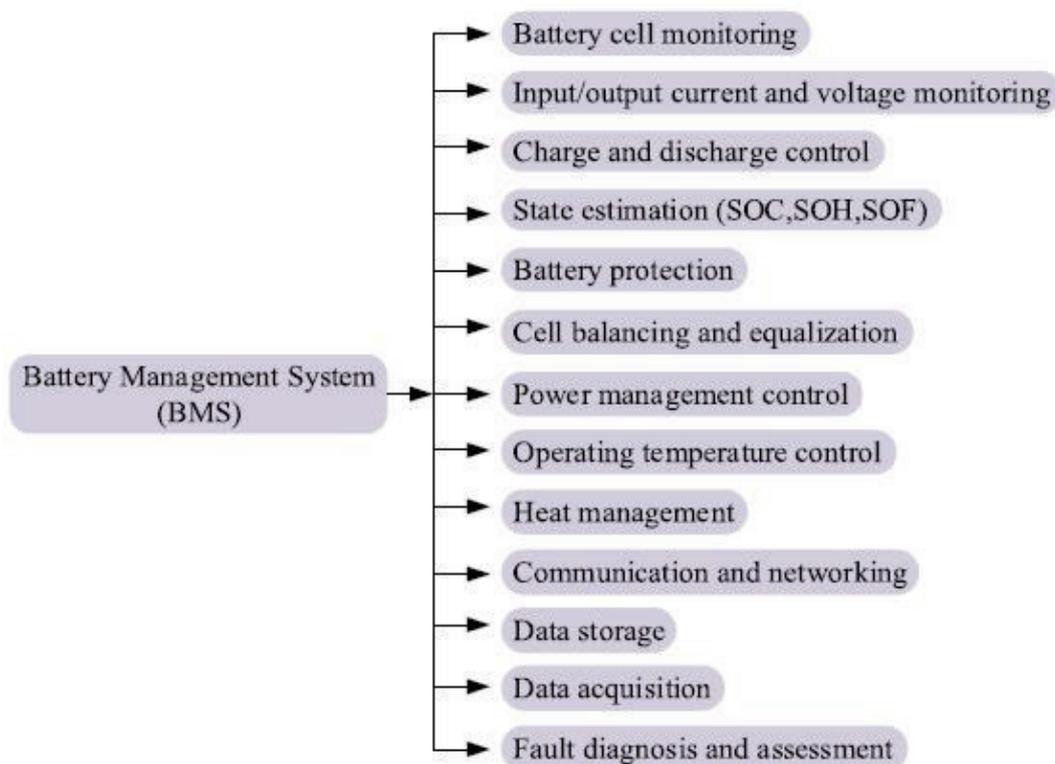


图 17 电池管理系统概述

记忆效应并延长电池的放电时间。建议通过 CC-CV (恒定电流 - 恒定电压) 充电优化 PI (比例积分) 控制器为锂离子电池充电, 并通过 DCM (不连续电流模式) 放电控制对锂离子电池放电。

### 预估

电池状态包括充电状态 (SOC)、健康状态 (SOH) 和功能状态 (SOF)。SOC 定义锂离子电池的充电状态和放电深度。取决于电池组的电流、电压和温度值, 估计 SOC 可通过放电测试法、库仑计法、开路电压法、滑模观测法、电池模型法、神经网络模型法、模糊逻辑法、阻抗法、内阻等算法来。SOH 定义了电池理想状态的现状, 这取决于电池的内部阻抗、容量、功率密度和自放电率。SOH 表示电池被滥用的程度以及电池的性能是否已降低。

SOH 通过基于耐久性模型的开环方法估算, 该方法通过观察锂离子损失机制、副反应、容量衰减和内阻增量以及基于电池模型的参数识别来执行。SOF 定义了电池性能的实际情况, 以实现 EV 系统的需求, 作为剩余能量与电池最大能量的比率。SOF 可以用 SOC 和 SOH 的估计值, 充电 / 放电曲线和工作温度来确定。电池状态值可以可视化和预测 EV 中的锂离子电池存储系统的整体状况和性能, 从而可以相应地采取必要的动作。

### 电池保护

锂离子电池适用于 EV 中的能量存储系统, 其中包含多个串联连接的电池组。EV 电池可以从外部电源充电并放电, 以运行 EV 驱动电机和系统。由于其物理特性的变化, 连续的充电 - 放电循环可能导致电池组之间的电压和电荷不平衡。这种不平衡是由于制造、温度和电池老化问题而发生的。不平衡的电压和电荷分布可能会降低储能系统的整体性能和耐用性。图 18 显示了电池组之间的电荷不平衡。

过度充电可能会导致电池爆炸, 而充电不足可能会损坏电池的化学性质并缩短电池寿命。电池不平衡情况如图 19 所示。当 BMS 超出工作范围时, BMS 可以终止电池的充电和放电。因此, 电池组可能会失去操作所需的额定电荷水平。因此, 串联电池组的电荷均衡控制器对于保护电池组和保持存储容量和操作等级至关重要。

### 电池平衡和均衡

具有单独电池监测和电荷均衡的 BMS 可以节省电池组免于由过充电和欠充电引起的异常, 并且增强能量存储系统的整体性能以有效地为 EV 供电。CEC 持续监控电池组的电压、电流和温度, 并通过估计电池组的充电状态 (SOC) 来检测不平衡电池。通过将过量电荷从过充电电池转移到另一个电池 / 模块 / 电池组, 或通过将所需电荷从其他相邻电池 / 模块 / 电池组转移到充电不足电池来执

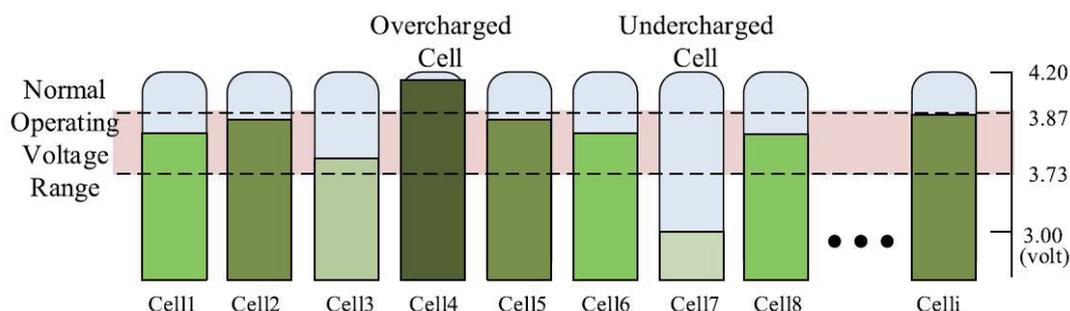


图 18 电池组之间的电荷不平衡



图 19 锂离子电池的安全问题

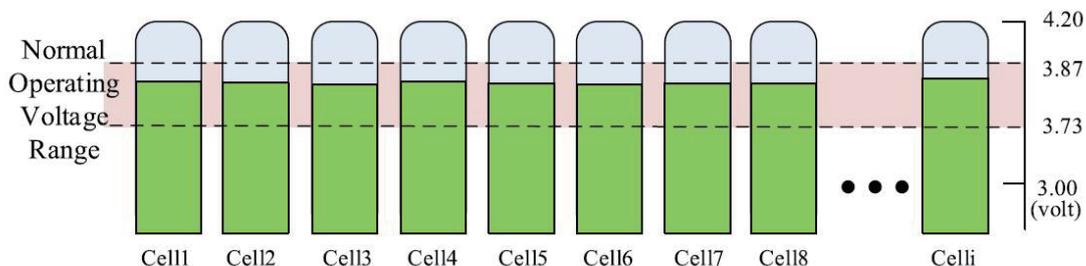


图 20 保护、监控和充电均衡

行均衡过程，使得电池变为均衡充电或电压在操作范围内的水平。图 20 示出了锂离子电池组的 N 电池的电荷均衡。均衡控制可以保护电池免受损坏，并提高电池组的效率和寿命。然而，EV 在串联电池组中使用 90 个或更多个电池组，并且由于设计和控制的复杂性、尺寸和成本，个别监控和均衡管理是困难的。因此，BMS 的发展对于采用有效的电池监测和电荷均衡以及简单的设计和控制是必要的。

### 电力管理控制

最小化电力滥用和损耗是目前研究中对电力均衡和有效分配和利用的研究挑战。在不管理驱动系统和其他负载的能力的情况下，整体系统性能降低。此外，由于不正常的操作和不稳定的电源，电气和电子机械，工具和设备变得不那么高效。电源管理系统和控制是管理稳定配电和有效智能地控制 EV 负载系统的解决方案。要考虑控制和管理 EV 负载系统供电的 SOC、SOH 和老化的所有因素和挑战，最佳电源管理和控制对于提高系统性能、耐用性、安全性和电能质量以及减少和运营维护费用损失至关重要。目前，EV 系统正在实施具有最佳电源管理的自动化系统控制和管理。

### 操作温度控制

EV 中的锂离子电池存储系统需要在一定温度下运行。温度控制系统监控电池存储系统的温度状况。它确保锂离子电池存储在工作温度范围内运行。否则，温度控制方案向热管理和冷却系统提供反馈。EV 中电池存储系统的温度连续监视和控制可保持存储系统的高效运行并保护电池组免发生爆炸。

### 热管理

锂离子电池组在 EV 运行期间需要相等的温度分布。基于 EV 电池存储系统中 BMS 的温度控制操作，热管理决定操作冷却或加热系统，以调节电源的功率。对系统进

行冷却或加热，并提供电池存储系统的异常情况，可进行极端维护。

### 通信与网络

EV 系统需要与车辆子系统和互联网系统进行通信。有必要优化 EV 中的性能并完成在线监控、程序下载和更新以及控制 BMS 的修改。此外，通过 GPS（全球定位系统）和 CAN（控制器区域网络）通过电池存储系统的在线 SOC 和 SOH 估计来完成最佳 EV 充电站识别和驱动范围预测。

### 数据存储

BMS 需要存储来自 EV 电池存储系统的数据，例如每个锂离子电池的电压和 SOC 值，温度传感器的记录，充放电条件，控制程序等。BMS 通过 BMS 控制器处理存储的数据，用于均衡电池组、热管理、故障诊断和其他功能部件的控制。BMS 控制器与 EV 的主控制器连接，EV 控制器监控 BMS 动作并产生决定性输出。

### 数据获取

BMS 通过数据采集系统提取锂离子电池存储系统的当前特征。数据采集系统由传感器、测量硬件、处理器和软件组成。它累积并存储来自电池存储系统的数据，例如电压、电流和温度。通过一些功能和控制算法处理 BMS 中存储的数据。

### 故障诊断和评估

锂离子电池存储系统遇到一些问题，例如不平衡、欠充电、过充电、过电流和过低或过高的温度。此外，BMS 还会遇到数据采集故障，电气连接错误，通信和网络故障，编程错误，隔离问题等。BMS 需要使用诊断技术评估和诊断故障，并采取相应的必要措施。故障诊断技术由系统数据库和记录，智能控制程序，通信网络和其他技术措施组成。锂离子电池的故障诊断和评估是在分析模型，知识和信号处理方法的基础上进行的。对故障诊断进

行的研究正在迅速推进，以促进锂离子电池在 EV 存储应用中的安全性和发展。

目前，BMS 已经成为维护和管理 EV 中的电池存储系统的重要问题。整体而言，BMS 的功能是根据从电池和输入 / 输出系统获取的数据以及传感器执行所有目的，以便它可以与存储，负载，用户界面和显示警报通信系统完善管理。因此，随着先进锂离子电池开发技术的不断发展，BMS 在电动汽车应用中的性能提升对于延长电池寿命，确保电池的可靠性和效率以及对电池的准确评估至关重要。锂离子电池状态到能源管理系统。

## 7 问题和挑战

锂离子电池有许多积极方面：高电位和密度 (Wt/kg)，最小尺寸，无记忆效应，快速充电和高负载处理，更宽的工作温度范围，无需空气条件，高寿命周期和更长的服务和更换时间表。但是，这种电池仍然存在一些问题。为了替代其他电池，应该指出问题并找到相应的合适解决方案。这些问题包括保护电路，定制和成本，锂离子安全性的兴奋性，部分多次连续充放电循环的记忆效应，环境影响和回收。第 2 节概述了每种类型所面临的当前挑战，每种锂电池的性能情况，以及表 2 中锂离子电池的性能比较和应用。重要挑战的摘要如下：

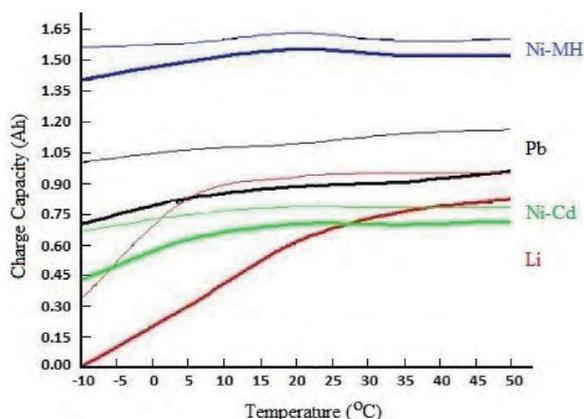


图 21 锂离子电池和其他普通电池的容量随温度的变化

### 温度

由化学反应产生的温度是所有电池的常见问题。不寻常的温度会损坏化学性质并杀死电池。更重要的是，二次锂电池必须采用温度控制机制。通常，电池可以在低温和高温下操作。对于低温效应，电池的充电和放电电流以及功率处理能力是活性化学物质相对于温度的转变。另一

方面，电池中较高的温度会产生一些困难的情况，这些情况会导致化学品的异常行为，并导致电池爆炸。虽然通过 Arrhenius 效应刺激反应可以减少一些功率，但是由于温度的正反馈，更多电流会产生更高的温度，并导致热跑道。因此必须采取必要措施以防止电池中的热失控过程。图 21 表示在电流馈送和释放期间一些可充电电池的充电容量随温度的变化情况。锂离子电池与其他普通电池的容量随着温度的升高而增加，从而牺牲了电池的寿命。这将在下一节“生命周期”中解释。

### 安全

锂离子电池的安全运行是科学家和工程师们非常关注的问题。锂离子电池组通常采用高功率需求和一些安全措施；此外，与 NiCd 电池不同，单个锂离子电池从未被用于其爆炸特性。在其运行期间，锂离子电池需要额外的元件和电路来监督电池状况和操作并保护故障。因此，锂离子电池组的开发比构建和布置电池更困难。图 22 显示了超过 SOC 标准水平的电池的过充和充电不足状况期间的风险因素。可充电电池组在充电状态 (SOC) 的理想工作范围内的安全操作 (充电和放电)，即 20% -90%，可以通过使用电池管理系统 (BMS) 来完成。

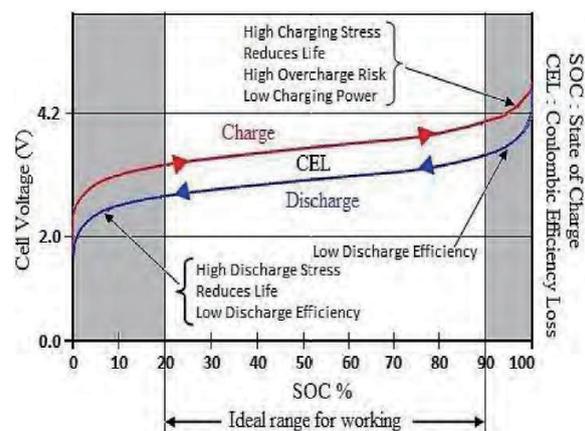


图 22 用于电池组保护的 SOC 的评估

### 生命周期

已经讨论了由于电压和热效应引起的电池功能损失；然而，这种损失对电池的循环寿命具有负面影响。值得一提的是，如果电池组在其标准工作范围之外工作，则会发生不可逆转的容量损失。这种像差会导致累积效应并缩短电池的使用寿命，甚至可能造成完全和永久性的使用损失。实际寿命取决于电池化学成分和在温度上限和下限所花费的时间百分比，如图 23 所示。由于阳极电镀，生命周期

在低温（低于 10°C）下缓慢下降，但是，由于化学分解，它在高温（60°C 以上）急剧下降。因此，理想的工作温度范围既不应该太宽也不应该太窄，因为分别会降低生命周期和产生浪费热管理。

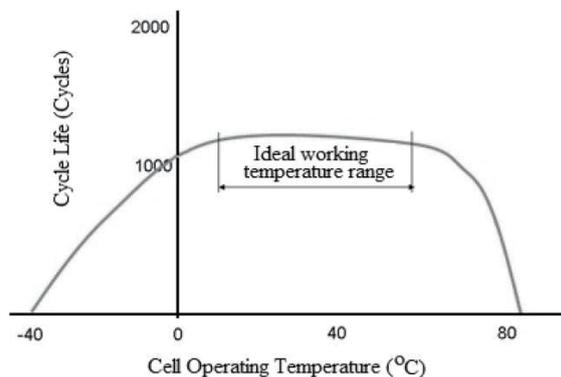


图 23 生命周期和温度

### 记忆效应

记忆效应是保持电池较少记忆的效应。该效应是由于在正常操作中以不规则方式部分放电或许多充电放电循环后重复再充电而产生的。在电动汽车中，当发动机在发电机模式下运行并且随后部分放电以加速发动机时，电池在制动操作期间部分地再充电时会发生这种情况。这种部分连续的充电 - 放电循环导致 EV 电池具有记忆效应。可以通过锂离子电池的电压曲线观察到，由于没有保持其完全充电，电池似乎非常匆忙地耗尽，从而电压下降或偏差。这种现象可能在串联电池组中产生电池电压不平衡。通过使用最佳充电和放电控制技术对单个电池进行深度充电 - 放电循环过程可以克服记忆效应。

### 成本

十年前锂的价格非常高。然而，由于目前应用、需求和生产的增加，其价格变得更具可协商性。锂离子电池组的价格是电动汽车价格的 25% - 30%。如图 24 所示，锂离子电池的市场价格在过去五年中一直在下降，因此过去三年的价格每年都下降了近 15%。到 2020 年，它可能会下降超过 25%。Boomberg New Energy Finance 预测，如图 24 所示，到 2030 年，锂离子电池组的价格将降至当今价格的四分之一，并且其产量将随着生产成本的降低而增长。锂的供应及其成本将主要取决于市场对消费者公用事业的需求、电动汽车技术及其使用的进步、回收的增长、地缘政治问题、预算分配和环境影响等。

### 环境影响

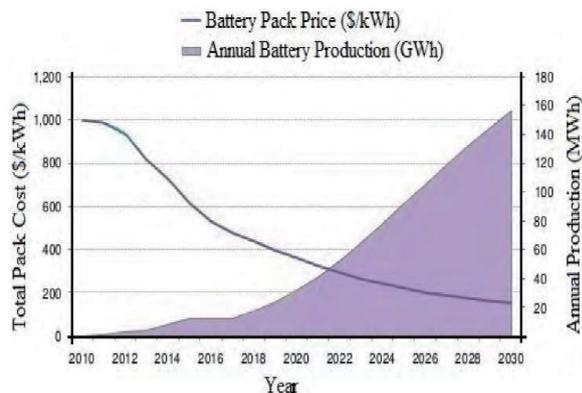


图 24 锂离子电池组的成本和产量

提高油价和可持续交通对巨大能源的需求已引起汽车电气化的趋势，如电动汽车、混合动力汽车和插电式混合动力汽车。据丰田公司估计，到 2020 年，世界上超过 7% 的电动汽车将通过电动汽车运输。尽管通过减少石油车辆的数量对生态环境产生了巨大影响，但锂离子电池在生产 and 处置过程中也会排放二氧化碳和温室气体。美国环保署在一项研究中检查了锂离子电池在使用镍基和钴基阴极以及溶剂型电极处理方面的情况，并发现了高环境影响，如资源减少、全球变暖、生态毒性和人类健康影响等。根据这项研究，参与钴和镍金属化合物生产、加工和使用的人可能会受到不良呼吸、肺和神经疾病的影响。通过采用锂离子电池回收工艺来节省原始资源材料并减少镍和钴材料的使用，可以消除这种风险。

### 回收

目前，未来运输和其他应用对锂离子电池的需求更大。正如前一小节所讨论的那样，它对环境产生了负面影响。回收是减少二氧化碳和温室气体排放以减少环境污染的重要途径。回收过程通过回收丰富了锂、镍和其他材料的预留，从而改善了电池的生命周期，并提高了电池的产量。有三种基本的回收技术：湿法冶金回收、火法冶金回收和直接回收。直接回收可以回收更高百分比的电池材料，而高温冶金回收过程在高温下工作。在未来的生命周期结束时对电池进行翻新或使用新的电解质使其恢复活力将是可能的。

## 8 结论和建议

锂离子电池现在越来越受欢迎，可以作为替代能源用