

## 中文摘要

**摘要：**出于能源和环境的考虑，电动汽车在各国政府和汽车制造商的共同推动下取得了快速的发展。纯电动汽车因能真正的实现“零排放”而成为电动汽车的重要发展方向之一。锂离子电池以其能量密度大、电压平台高等优良的性能成为纯电动汽车的理想动力源。然而，锂离子电池的抗滥用能力较差。锂离子电池，特别是成组锂离子电池的安全性和长寿命成为锂离子电池使用管理中急需解决的问题。

针对目前锂电池管理中存在的问题，本论文以北京奥运用纯电动大巴为应用背景，对纯电动汽车用锂电池管理系统的开发进行了研究。

论文首先研究了锂离子电池的基本工作原理，从锂离子电池内部机理的角度分析了影响锂离子电池性能利用和安全性的几个方面因素，并对电池的一些特性进行了测试。在此基础上，围绕锂离子电池安全和有效利用的目标，从车用锂电池的使用环节和工作环境进行分析，提出了锂电池 SOC 估算、热管理、电池组的绝缘检测和锂电池组的充电模式等四个方面的管理策略。最后，设计了锂电池管理系统的硬件电路，并将电池使用的管理策略提炼成软件算法嵌入到电池管理系统中应用。

奥运会期间，共计有 50 辆装有这套电池管理系统的纯电动大巴投入到电动公交运营，并实现了“零故障”稳定运行。

**关键词：**纯电动汽车、锂电池管理系统、充电模式、锂电池安全性、SOC 估算

**分类号：**U463.63

## ABSTRACT

**ABSTRACT:** For the considerations of energy and environmental issues, the electric car has been developed fast under the joint efforts of governments and vehicle manufacturers. In all kinds of electric cars, EV has become one of the most important development directions, due to the realization of the true "zero emission". For its energy density and excellent high voltage performance platform, Li-ion battery has become the ideal power source in EV. However, the anti-abuse capacity of Li-ion battery is poor. The safety and long-life of Li-ion battery, especially Li-ion battery pack has become urgent problems in the management of Li-ion battery use.

For the current problems in Li-ion battery management, the paper studied the Li-ion battery management system in EV which was used in bus services for the Peking Olympics.

The paper studied the basic working principles of the Li-ion battery at first. From the perspective of the Li-ion internal mechanism, we analyzed the factors which effect Li-ion battery performance and safety. At the same time, we did some tests about the Li-ion battery characteristics. On this basis, to the objectives of safe and effective use, Analyzed the use in vehicle and working environment for Li-ion battery, put forward the management strategies in four areas, as battery SOC estimation, thermal management, insulation detection and charge mode for Li-ion battery pack. Finally, we designed the hardware and software of the Li-ion battery management system, implemented the battery management strategies through the use of software algorithms in the battery management system.

During the Peking Olympic Games, a total of 50 electric buses equipped with the BMS have operated and achieved a "zero failure" stable operation.

**KEYWORDS:** Electric Vehicle、Li-ion Battery Management System、Charge Mode、Li-ion Battery Safety、SOC Estimation.

**CLASSNO:** U463.63

# 1 绪论

## 1.1 纯电动汽车的发展

随着工业发展和社会需求的增加，汽车在社会进步和经济发展中扮演着重要的角色。汽车工业的迅速发展，推动了机械、能源、橡胶、钢铁等重要产业的发展，但同时也日益面临着环境污染、能源短缺的严重问题。

能源短缺目前已成为全球性的问题。由于传统汽车消耗的能源几乎完全依赖于石油的制成品，全球汽车保有量的逐年上涨使能源问题成为制约汽车可持续发展的重要因素。根据目前已探明的世界石油总储量估计，全世界的石油资源仅能供人类充分使用 40 年左右。在我国，石油短缺的形势则更为严峻，自 1993 年开始，我国已成为石油净进口国，而且进口数量在逐年增加，对国际市场原油依存度与日俱增。过分依赖进口将严重危及国家的能源安全。据统计，2000 年我国机动车所消耗的石油为 6560 万吨，约占全国石油消费的三分之一，到 2010 年和 2020 年，我国机动车的燃油需求将分别达到 1.38 亿吨和 2.56 亿吨，占到当年全国石油总需求的 43% 和 57%。有限的石油资源逐步成为我国汽车工业可持续发展的瓶颈，甚至进一步影响到国民经济的整体发展。

同时，汽车的排放污染也不容忽视。随着我国汽车保有量的增加，汽车污染物排放总量日趋上升。我国的环境监测数据表明，汽车尾气的排放量是城市大气污染的主要来源之一。以北京地区为例，机动车尾气排放对大气污染物中 CO、HC、NO 的分担率分别是 63.4%，73.5% 和 46%。上海则更为严重，分别为 86%，96% 和 56%。科学分析表明，汽车尾气中含有上百种不同的化合物，其中污染物有固体悬浮微粒、一氧化碳、二氧化碳、碳氢化合物、氮氧化合物、铅、硫化合物等。其中，氮氧化合物对人的呼吸系统有较大的刺激作用，并且也是构成光化学烟雾的主要成分；碳氢化合物主要由多环芳烃等剧毒物质构成，其中多环芳烃中的苯是致癌物质。尾气在直接危害人体健康的同时，还影响着人类的生活环境：硫化物具有强烈的刺激气味，达到一定浓度时容易导致“酸雨”的发生，造成土壤和水源酸化，影响农作物和森林的生长；二氧化碳则是引起地球变暖的罪魁祸首。

以纯电动汽车代表的电动汽车是解决汽车工业可持续发展问题的主要途径<sup>[1]</sup>。当前普遍使用的燃油发动机汽车存在种种弊病，统计表明在占 80% 以上的道路条件下，一辆普通轿车仅利用了动力潜能的 40%，在市区还会跌至 25%，更为严重的是排放废气污染环境。电动汽车是以电为动力的汽车，与传统汽车相比，电动

汽车对环境的污染小、能量利用率高、噪音低。而且，纯电动车的电池可在夜间利用电网的廉价“谷电”进行充电，可以平抑电网的峰谷差。

出于对上述两个关系到国计民生的问题的考虑，自上个世纪 90 年代以来，各国政府和各大汽车制造商一起持续地大力推动电动汽车的发展。20 世纪 90 年代中期，美国政府制订了发展电动车的“新一代汽车伙伴(PNGV)计划”，集中研究电池驱动的纯电动汽车。美国国家实验室也在对纯电动汽车先进驱动系统、先进电池及其管理系统等进行深入研究。在欧洲，“城市电动车”协会至今在欧共体组织内已有 60 座城市参与，帮助各城市进行电动汽车可行性的研究和安装必要的设备，并指导城市的电动汽车运营。法国政府出台了許多鼓励研发和生产产业化的优惠、支持、补贴和扶持政策来推动电动汽车的发展。法国政府、电力公司、标致-雪铁龙和雷诺汽车公司合资组建了电动汽车的电池公司—萨夫特(SAFT)公司，承担电动汽车的高能电池的研究和开发，以及电池的租赁和维修等工作，共同承担开发和推广电动汽车。日本从 70 年代开始开发电动车，许多汽车企业都陆续进行了一些产品发布与销售运行，丰田、本田、日产等陆续进行了一些产品发布与销售。

我国政府对电动汽车的研究和发展也相当重视。2001 年，我国确立“十五”国家高新技术研究发展计划(863 计划)电动汽车重大专项项目，提出“三横三纵”研发布局。2006 年开始实施的国家中长期科技规划对电动汽车研发战略也大体相同。特别的是，与传统车相比，我国在电动汽车行业的发展接近世界水平，具有较好的发展机遇。

到目前为止，电动车主要形成纯电动汽车(PEV)、混合动力汽车(HEV)、燃料电池电动汽车(FCEV)等几种形式。其中纯电动汽车因能真正的实现“零排放”而倍受青睐，是电动汽车的主要发展方向之一。在此基础上，纯电动汽车获得了长足的发展和很大的技术突破。在电池系统、驱动系统和整车控制等方面都取得了很大的进步。目前的纯电动技术现状，初步满足了产业化的要求。

## 1.2 车用电池的发展

### 1.2.1 车用电池的概述

在电动汽车上，电池系统是一项关键核心的部件。特别是在纯电动汽车上，蓄电池作为惟一的动力源而尤为重要。出于实际运行的需要，电动汽车对电池性能提出了一定的要求<sup>[1]</sup>，主要包括：

(1) 能量密度高，以提高运行效率和续航里程；

- (2) 输出功率密度高, 以满足驾驶性能要求;
- (3) 工作温度范围宽广, 以满足夏季高温和冬季低温的运行需要 ( $-40^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ );
- (4) 循环寿命长, 保证电池的使用年限和行驶总里程;
- (5) 无记忆效应, 以满足车辆在使用的时候常处于非完全放电状态下充电需要;
- (6) 自放电率小, 满足车辆较长时间的搁置需求;

此外, 还要求电池安全性好、可靠性高以及可循环利用等。

当前, 电动车辆可选用的二次动力电池主要包括铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池和锂离子电池, 它们之间的主要性能对比参见表 1-1<sup>[2][3]</sup>。

表 1-1 常用蓄电池主要性能比较

Table 1-1 Comparison of several batteries in EV

项目	铅酸电池	镍镉电池	镍氢电池	锂离子电池
工作电压(V)	2	1.2	1.2	3.6
质量比能( $Wh/kg$ )	35-40	40-60	60-80	90-160
体积比能量( $Wh/L$ )	70	150	200	270
充放电寿命(次)	300-500	500-1000	500-1000	600-1200
自放电率(%/月)	5	25-30	30-50	6-9
记忆效应	无	有	无	无
环境污染	污染	严重污染	无污染	无污染
成本(美元/ $kWh$ )	75-150	100-200	230-500	120-200

其中, 铅酸电池以其工艺成熟、大电流放电性能良好、安全性能较好、价格低廉以及材料资源丰富等优点在电动自行车、电动摩托车上广泛应用。但由于其质量比能量和体积比能量值都较小, 使得电动汽车的一次性充电行驶里程和运行效率都不能较好地满足实际运行需要, 严重制约其在电动汽车领域的应用; 特别是主要原材料铅有污染, 目前正面临逐步淘汰。镍镉电池具有很好的充放电倍率特性, 但是由于其具有记忆效应、含重金属存在环境污染问题而没有被推广使用。镍氢电池虽然具有充放电倍率大、无环境污染隐患、无记忆效应等优点, 但是镍氢不宜并联使用、工作电压低 (1.2V), 为了达到一定的功率和电压等级需要大量地串联电池, 随之带来的一致性问题使其在大容量 (如纯电动汽车等) 场合的应用受到限制。而锂电池具有工作电压高、比能量和比体积大、自放电率低、无记忆效应、充放电效率高、循环寿命长和无污染性等优点。锂电池的能量密度 (体积能和质量能) 几乎是镍镉电池的 1.5~3 倍; 单体电池的平均电压为 3.6V, 相当于 3 只镍镉或镍氢电池串联起来的电压值, 因此能减少电池组中串联单体的数量, 从而可使因单体电池参数差异所造成的电池故障概率减小, 大大延长了电池组的寿

命。自推出以后，锂电池便以其优良的性能得到人们的广泛认可、技术上也获得较大的发展，被认为是新一代电动汽车理想的动力源。

## 1.2.2 车用锂电池的发展现状

自上世纪 90 年代推出以来，锂电池便以其优越的性能得到了广泛的应用和迅猛的发展，成为手机、笔记本以及 DC 和 DV 等便携式设备用电池的首选。据日本矢野经济研究所统计分析，便携设备用锂电池在 2007 年的全球产量已达 24.5 亿只，在 2012 年有望达到 37.7 亿只。

随着锂电池的安全性、性价比的逐渐提升以及成组技术的不断突破，锂电池逐渐进入大功率应用场合，如电动汽车动力源、通信系统备用电源、铁路辅助电源以及电力系统备用电源等。有专家预测，锂电池在电动车应用领域将会逐步取代铅酸电池、镍电池等电池。

在技术上，锂电池仍不断取得新的突破。通过在正负极材料<sup>[4]</sup>、添加剂<sup>[5]</sup>、粘结剂<sup>[6]</sup>、掺杂和包覆<sup>[7]</sup>、电解液配方<sup>[8]</sup>以及工艺等方面的持续研究，单体锂离子电池在能量密度、功率特性、安全性、寿命等方面的性能得到显著的提高，电池的温度适用范围也得到了拓展<sup>[9]</sup>。尤其是正极材料的技术不断取得突飞猛进的进展，先后出现了钴酸锂、三元材料、锰酸锂和磷酸铁锂等多种类型的锂离子电池。其中钴酸锂材料具有工艺成熟、材料的加工性能好、密度高、比容量相对较高，材料的电压平台较高且比较稳定等优点，广泛用于小型移动电源产品上。但是它含有贵金属成本较高，抗滥用能力差，安全性能较差，不适合于大型动力电池领域推广应用。三元材料也是一种高容量的正极材料，电压平台与钴酸锂一致，循环性能优异，安全性能相对较好，可大电流放电，适合于中型高档电子产品或要求大电流工作的场所，如便携式电动工具、笔记本电脑和摄录机等，但该材料价格昂贵，也不适宜大型动力电池上使用。锰酸锂材料具有较高的电压平台，良好的安全性能、丰富的资源和低廉的价格。经过多年的研究，锰酸锂材料的性能得到较大的改善，现在的锰酸锂具有良好的常温循环（300 次 90%以上）和高温循环（55℃300 次 80%以上）性能，是目前动力电池领域广泛采用的正极材料。北京奥运会用纯电动大巴车，就是采用 MGL 公司锰酸锂电池。但该材料克容量较低，常与其它高容量正极材料混用。磷酸铁锂材料是最近几年快速发展起来的一种新的正极材料，其具有较高的克容量（130mAh/g~140mAh/g），稳定的充放电平台，良好的安全性能，较好的低温性能以及良好的循环寿命，在动力电池和备用电源领域具有广阔的应用前景。其缺点是电压平台较低，振实密度（比重）低，制成的电池比能量较低。另外，生产过程对工艺要求十分严格，不同批次产品的一致性

控制难度较大。

总的来说，锰酸锂和磷酸铁锂电池在大容量动力应用领域具有较好的前景，并且技术研究上一直在进展。目前，在先进的纯电动汽车上主要采用这两种正极材料的锂电池作为动力源。

## 1.3 锂电池管理系统的现状

### 1.3.1 车载锂电池使用中面临的一些问题

与便携式设备或者固定设备相比，电动汽车用电池的工作环境更为恶劣：

(1) 串联使用。为了达到相应的功率和能量等级，电动汽车用电池需要大量地串联使用。以奥运用纯电动大巴为例，电池配置为锰酸锂材料锂电池，4 并 104 串，电池组容量 360Ah。这样对电池的一致性提出了更高的要求；同时电池的容量更大，安全性要求更高，与单只电池的使用和管理不同，需要更加完善的成组管理和使用技术。

(2) 空间狭小。这样，一方面使得电池的摆放相对集中，电池系统的安装、散热和通风处理更难。电池长时间在高温下运行，电池的性能衰退加快，甚至会出现热失控而有安全隐患；另一方面，由于空间狭小，加之大容量电池需要的均衡设备容量、体积等都较大，所以并不具备在线均衡器的安装条件，使得电池的一致性更加突出，也给电池的使用带来更加严格的考验。

(3) 工作电流大、变化快。图 1-1 为电动大巴车辆启动电流、平均电压和车速曲

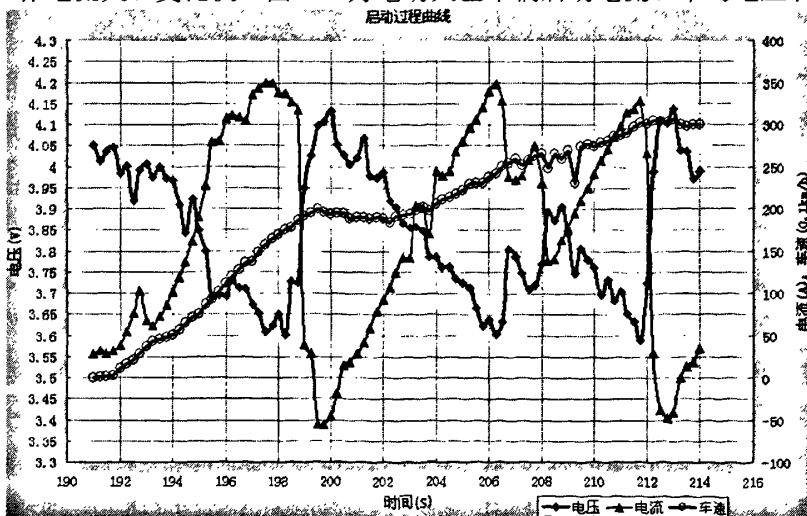


图 1-1 车辆加速电压电流变化曲线

Fig 1-1 Voltage and current changes during vehicle speeded up

线,可见电池在加速的时候电流变化很快,从 300A 到 0A 的转换时间小于 0.5s;工作电流也较大,最大值超过 350A。

(4)环境恶劣。车辆运行颠簸,这对电池的抗冲击和震动等性能提出了更高的指标要求;同时灰尘、雨水以及线路磨损可能导致电池出现爬电、短路、搭铁等绝缘问题。

电动汽车对车用电池的高性能要求和恶劣的工作环境,对电池的安全性和循环寿命以及电池能量的有效使用提出了很大的挑战。特别是锂电池的成本较高,抗滥用能力较差。电池的滥用(包括过充电、过放电、过热和过电流等)可能导致电池的寿命严重衰减,甚至出现电池着火或者爆炸等安全事故。在成组锂电池中由于电池的一致性差异,问题表现得更为突出。所以锂离子电池,特别是成组锂离子电池的安全性和长寿命成为锂电池使用、管理方面急需解决的问题。

电池性能安全、合理以及充分的利用需要从生产和使用两个方面共同解决。一方面,需要通过研发提高电池本身的性能;另一方面,与电池的使用和管理技术也密切相关。科学的管理技术能够实现监控电池参数、估算电池状态、保障电池的使用安全以及避免循环寿命过快衰减,使得电池在实际使用的过程中真正实现安全、方便、高效和长寿命。

### 1.3.2 目前的锂电池管理技术

电池管理系统是电池系统的重要组成部分,通过对电池外特性的在线测量和估算,实时地掌握电池的工作状态,在不出现滥用和不合理使用的情况下,实现电池能量的充分和高效利用,提高运行效率。

目前,为了满足电动汽车的实际运行需求,电池管理系统在功能、可靠稳定性和实用性等方面都做出了重要努力。检测方面,提高了电压、温度及电流的测量精度,基本满足车辆运行和电池使用的要求。数据通讯方面,配备了齐全的通信接口,可以将电池的信息发送给整车控制器,显示界面以及充电机等。可靠性方面,结合现代大规模集成电路技术,提高系统运行的抗干扰能力。数据库管理方面,由于电池和电动车都处于试验和日益完善的阶段,电池管理系统多配备了电池运行和充电数据的数据库管理系统,便于对电池性能的进行评价,对车用电池的优化设计提供数据支持。

虽然电池管理在系统的检测精度、可靠性和耐久性等方面取得了一定的进步,但是对电池的认识还是不够深入;虽然具备完善丰富的电路功能,但是在对电池状态的估算、电池性能的影响因素和有效利用、成组电池的充电方法、电池的热管理等方面缺少系统的测试和研究。



电池 SOC 估算方面,在最初全充全放的基础上又出现了开路电压、安时累积、等多种方法,并都得到一定的应用。但是开路电压需要长时间的静止,并不能满足实现在线检测的需要;安时积分存在累积误差,需要定期的修正;电化学测试并不满足在线测量需要、Coup de Fouet 只适用于铅酸电池;神经网络<sup>[10] [11]</sup>也需要大量数据的训练;阻抗受到温度的影响严重;卡尔曼滤波需要较高的数据处理能力,稳定的电池模型。其中,电池模型方面,进行了长时间的研究,已建立了电化学机理模型、电池一阶等效电路模型、Thevenin 模型、四阶动力学模型、模糊控制模型、人工神经网络模型,并且都能取得一定的效果。但是模型和模型参数多是在出厂前或者试验平台上离线测试的结果,真正使用的时候,模型的阶次与电池的极化深度有关,模型参数随着电池的温度以及老化程度变化而变化,所以随着电池使用环境的改变,采用电池模型的方法对电池的状态进行估算的时候也会造成很大的误差。电池的 SOC 估算等还不能满足车辆和电池实际需求是电池管理系统最大的缺陷,这极大的限制了电池容量有效发挥,降低了电池均衡效果,使得电池过充电和过放电控制缺乏充足的依据,电池使用的安全性和可靠性随之降低。这直接影响到电池的性能和电池寿命以及电动汽车的驾驶性能和电动车事业的推广。

电池充电方面,出现了恒压、恒流、恒压恒流、去极化脉冲充电以及多段恒流等充电方法。当锂离子电池串联成组使用后,也通常将电池组看作是个“大电池”,通过对电池组端的电压控制来实现充电,而没有考虑到电池之间必然存在的一致性问题。由于锂离子电池的抗过充电能力较差,这样电池的过充电和过放电就不可避免出现,电池充电过程的安全性就不能保证。另外,电池的性能会随着电池的工作环境等变化,所以电池的充电电流应随之改变,才能真正实现优化充电,保障电池的使用寿命。

在电池安全合理使用方面,由于长期以来较大规模应用的蓄电池主要为铅酸电池,而其制造工艺成熟、抗滥用能力强以及价格相对便宜,这方面的管理主要侧重于简单实用。而随着锂电池的推广应用,这方面需要更多的关注和研究发展。

## 1.4 课题来源和研究内容

### 1.4.1 课题来源

本论文是 863 项目“车用动力蓄电池管理系统核心关键技术及可靠性研究”(项目编号:2007AA11A103)的一个子课题,以北京奥运用纯电动汽车为应用背景。

### 1.4.2 主要研究工作

本论文的研究工作主要包括以下几个方面：

- (1) 从锂电池工作原理着手分析，研究了锂电池安全和性能方面的影响影响因素，为锂电池的使用和策略提供定性的理论支持。
- (2) 充电控制方面。本论文以电池的外特性检测为基础，通过采用合理的运行(充电)模式，将电池的状态(电压、电流、温度以及 SOC 等)用于电池的充放电控制，防止电池的滥用，保障电池充电的安全性。
- (3) SOC 估算方面。分析目前的各种 SOC 估算方法的优缺点，并结合纯电动锂离子电池的应用场合，提出安时积分和开路电压修正的综合方案。
- (4) 保障安全方面。研究了电池组绝缘检测的方案并在电池管理系统上进行了实用验证。论文还综合分析了锂电池的各种故障及对应的使用策略。
- (5) 电池管理系统设计。将所研究的电池使用的管理策略形成算法嵌入电池管理中并现场装车考核。

本论文虽然重点介绍纯电动汽车用锂离子电池的性能研究及使用和管理策略，但是研究的方法也适用于其它电池，所形成的结论对于其他电池类型以及电池在其它场合的应用也具有很好的借鉴和参考意义。

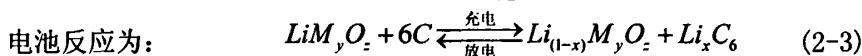
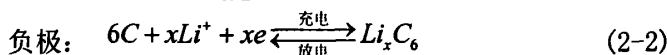
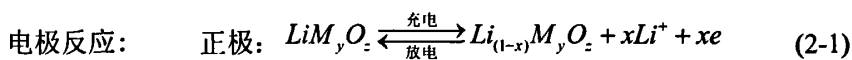
## 2 锂电池的原理特性分析

要管好锂电池、用好锂电池，解决锂电池使用中的安全和性能利用问题，必须先充分了解锂电池的基本原理，对锂电池的性能特性进行研究和分析。本章对锂电池的工作原理及特性进行深入地研究，从外因和内因两方面分析了影响电池性能发挥、安全性方面的各种因素。另外，本章也对锂电池在不同状况下的 OCV—SOC 特性进行了测试。为指导电池的使用和管理提供依据和数据支持。

### 2.1 锂离子电池的基本原理

#### 2.1.1 锂离子电池的工作原理

锂离子电池是指以锂离子嵌入化合物为正极材料的电池的总称。锂离子电池充放电过程的基本的电化学反应为：



其中  $M$  为  $Co, Ni, Mn, Fe$  等。从化学反应式可以看出，锂离子电池充电的过程中，在电池的正极反应中产生了电子和锂离子。在外电路上，电子从电池的正极迁移到负极，形成电子流，表现为一定幅值的充电电流，其大小为： $I = nesv$ 。式中的  $n$  表示单位体积内的自由电荷数， $e$  是电子的电量， $s$  为导体横截面积， $v$  为自由电子定向移动的速率。所以电流的大小与单位时间内反应产生的电荷数量的多少直接相关。物理上一般规定电流的方向为正电荷的流动方向或者负电荷流动的反方向。所以，充电时，在外电路电流的方向为从电池的负极流向正极。同时，在电池的内部，锂离子(正电荷)从电池的正极迁移到电池的负极，形成正电荷流，且离子数量及电荷量和外电路的完全一样，流动的方向从电池的正极流到电池的负极，并在电池的负极与负极材料碳和外电路过来的电子结合生成  $Li_xC_6$ ，形成与外电路同样大小的电流，构成闭合的电流回路，放电过程则相反。在电池整个充放电过程中，锂元素始终以离子态的形式存在，在电池的正负极之间嵌入和脱出，因此锂离子电池也被形象的称为“摇椅电池”。

#### 2.1.2 锂离子电池的结构

锂离子电池主要由正极集流体(铝箔)、正极材料、电解液、隔膜、负极材料和负极集流体(铜箔)构成。另外,在最初几次循环时,电池的负极和电解液之间会形成 SEI 膜。电池的内部结构参见图 2-1,下面介绍各部分的功能和原理。

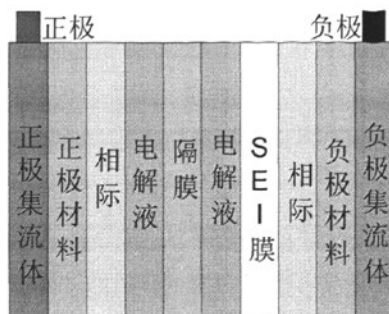


图 2-1 电池内部结构

Fig 2-1 Internal structure of Li-ion battery

### 1 集流体

电池的集流体既是与外电路的连接部分,也是正负极材料的载体。它本身是金属,电特性满足欧姆定律,可等效为一定阻值的纯电阻。

### 2 正负极材料

电池的正负极材料是参与电化学反应的物质,决定了电池的电压、容量、能量密度等特性。

### 3 电解液

电解液是电池的重要组成部分,承担着在电池内部的正负极之间传输离子的作用,它对电池的容量、工作温度范围、循环性能及安全性等都有重要的影响。传统电池中通常采用水作为溶剂的电解液体系,但是由于水的理论分解电压为 1.23V,即便考虑到氢或者氧的过电压,电池的最高电压也只有 2V 左右(如铅酸电池)。而锂离子电池的工作电压一般都高达 3V~4V,因此水溶剂不适用于锂离子电池。在锂离子电池中采用的是具有更高分解电压的溶剂—有机溶剂和电解质盐。

### 4 隔膜

隔膜的主要作用是将电池的正负极隔开,使得电子不能通过电池的内电路,但不会阻碍离子在其中通过。由于隔膜自身对电子和离子是绝缘的,因此不可避免的会降低正负极之间的离子电导,表现为一定的电阻。当电池内部出现过热等情况的时候,隔膜能自动的闭孔,将电池的正负极断开,起到保护作用。

### 5 SEI 膜

锂离子电池在首次(或前几次)充电过程中不可避免地都要在碳负极与电解液的相界面上发生反应,形成覆盖在碳电极表面的钝化薄层,人们称之为固体电解

质相界面或称 SEI 膜，膜的形成消耗了电池内的锂离子，也增加了电极和电解液界面之间的电阻，使用时会出现一定的电压降。但是优良的 SEI 膜具有有机溶剂不溶性，允许锂离子比较自由地进出电极而溶剂分子却无法穿越，从而阻止了溶剂分子共插对电极的破坏，大大提高了电极循环寿命。当电池的 SEI 膜遭到破坏的时候，需要消耗新的锂离子，重新修复，当电池经过多次循环后，电池的 SEI 膜有变厚的趋势，相应的内阻增加。

### 6 相际

正负极材料和电解液构成电极体系，由于是不同状态的两个相，相接触的过渡部分被成为相际，这里的浓度和性质与电解液内部存在不同，属于过渡部分，带电粒子或者偶极子在相界面中的非均匀分布使得它们之间出现电位差，这是电化学反应的地方，也会产生一定的电压降。其最重要的特征是双电层结构。

## 2.1.3 电池的主要技术参数

### 1 电压

电压是电池实际可以直接测量的最基本的物理量之一，是电池性能评价和使用的重要指标。电池实际可以在线测量到的电压是电池的两个极柱上的电位差，又称为电池的端电压或外电压( $U_o$ )。电池的端电压等于电池内部所有部分的电压和，即：

$$U_o = U_{\text{正极集流体}} \pm U_{\text{正极标准电位}} \pm U_{\text{正极过电压}} \pm U_{\text{电解液}} \pm U_{\text{隔膜}} \pm U_{\text{SEI}} + U_{\text{负极过电压}} \pm U_{\text{负极标准电位}} \pm U_{\text{负极集流体}}$$

式中，“+”表示充电时刻，“-”表示放电时刻。其中，正负极集流体、电解液、隔膜、SEI 膜等呈现纯阻性，所以这部分可以合并在一起，称为欧姆压降  $U_r$ 。正负极标准电位合并到一起称为电池的电动势  $U_{ocv}$ ，与电池内部的反应状态有关系，反应了电池的荷电状态。电池的正负极过电压合并到一起称为电池的极化电压  $U_p$ ，

即  $U_o = U_{ocv} \pm U_r \pm U_p$  (充电时为“+”，放电时为“-”)，如图 2-2 所示。

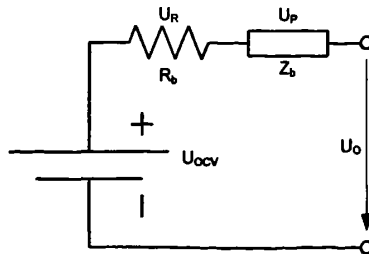


图 2-2 电池的模型

Fig 2-2 Simple battery model

## 2 容量

电池的容量是指一定的放电条件下，可以从电池获得的电量。分为理论容量、实际容量和额定容量。其中，活性物质的理论容量  $C_0$  为：

$$C_0 = 26.8n \frac{m_0}{M} \quad (2-4)$$

其中  $n$  为成流反应的得失电子数； $m_0$  为活性物质完全反应的质量； $M$  为活性物质的摩尔质量。实际容量  $C$  为在一定的放电条件下，电池实际能放出的电量，计算公式为：

$$C = \int idt \quad (2-5)$$

当采用恒流放电的时候， $C = It$ 。额定容量  $C_{\text{额}}$  是指设计和制造电池的时候，规定和保证电池在一定放电条件下，所能放出的最低限度的电量。

## 3 荷电状态 (SOC)

荷电状态 SOC(State-Of-Charge)是用来描述电池的剩余电量的参数，是指电池的剩余电量  $Q_{\text{rem}}$  和最大可用电量  $Q_{\text{max}}$  之比，即：

$$SOC = \frac{Q_{\text{rem}}}{Q_{\text{max}}} \quad (2-6)$$

当电池充满电的时候， $SOC = 1$ ，电池放完电的时候， $SOC = 0$ 。

当电池从初始荷电状态为  $SOC_0$  开始放(充)电，且放(充)电容量为  $\Delta Q$ ，则电池的荷电状态变为：

$$SOC = SOC_0 \mp \frac{\Delta Q}{Q_{\text{max}}} \quad (\text{充电时取“+”，放电时取“-”}) \quad (2-7)$$

如果初始荷电状态为充满(放完)电，即  $SOC_0 = 1$  ( $SOC_0 = 0$ )，则放出(充入)电量  $\Delta Q$  后，电池的荷电状态变为：

$$SOC = 1 \mp \frac{\Delta Q}{Q_{\text{max}}} \quad (\text{充电时取“+”，放电时取“-”}) \quad (2-8)$$

## 4 OCV—SOC 曲线

电池的内电压 (OCV) 和它的荷电状态 (SOC) 具有一定的对应关系，通常把这一特性称为电池的 OCV—SOC 曲线，OCV—SOC 曲线对了解电池的性能，以及对电池的状态估算有一定的作用。在本章的下一小节将专门对锂离子电池的 OCV—SOC 特性进行测试。

### 2.1.4 锂离子电池的 OCV—SOC 特性测试

对于电池而言，OCV—SOC 具有一定的对应关系，如果能定量地得出这种关系，那么将对电池的 SOC 估算将有很大的帮助。因此，论文对锂离子的这一特

性进行测试。

### 1 测试硬件平台

该测试平台主要由高低温箱、被测试电池、充放电设备及监控 PC 机组成。其中高低温箱为被试电池提供所需要的测试温度环境，监控 PC 机通过数据总线与充放电设备进行连接，控制充放电设备按照编程指令输出电流，并记录时间、电池的电压、电流、AH 等过程数据。

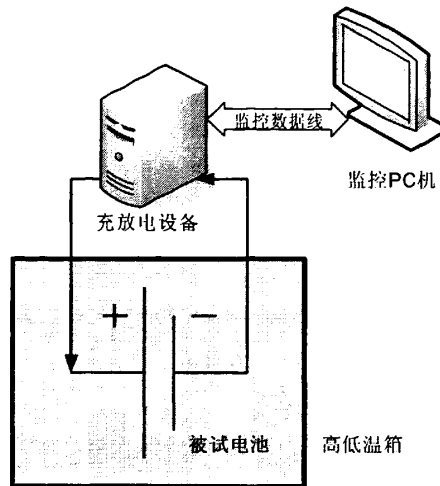


图 2-3 单体电池测试平台  
Fig 2-3 Testing platform for monomer battery

### 2 试验内容及方法

测试对象：以奥运电动大巴所用锂电池为对象，具体型号如下：

电池类型： 锰酸锂离子  
 电池容量： 90Ah  
 额定电压： 3.7V  
 封装类型： 铝塑膜

测试内容：对锂电池在不同温度、不同倍率、不同老化程度、充放电状态等条件下的 OCV—SOC 曲线将进行测试。

测试步骤：

- (1) 将电池按照 0.3C 放电后，再以 10A 放电至 3.3V，实现电池的完全放电，之后静止 30min；
- (2) 0.3C+单体限制电压恒定到 4.23V，充电 5%SOC，如果电流小于 10A，跳转到(4)，否则到(3)；
- (3) 静止 2hour；
- (4) 实验结束，利用总充电容量作为电池的最大可充电容量，并据此校正和计算 SOC。

### 3 测试结果及分析

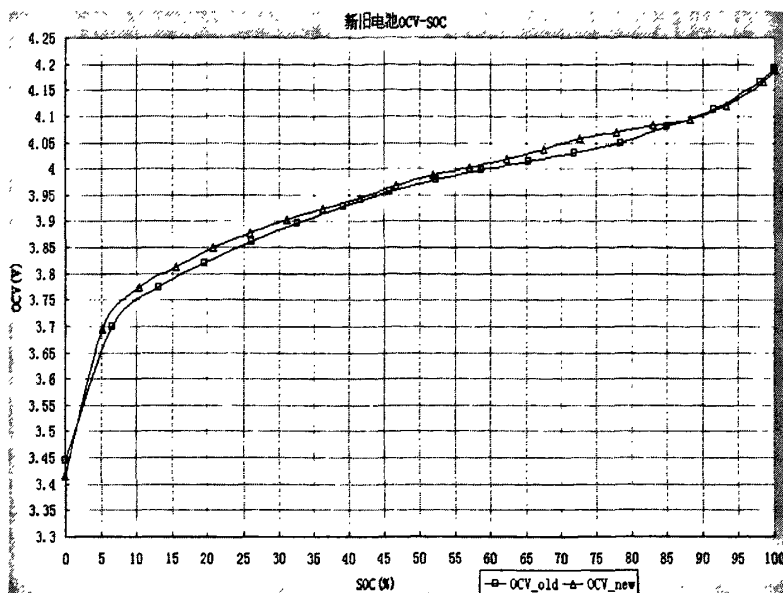


图 2-4 不同老化程度锂电池的 OCV—SOC 对比

Fig 2-4 SOC-OCV curves during different decays

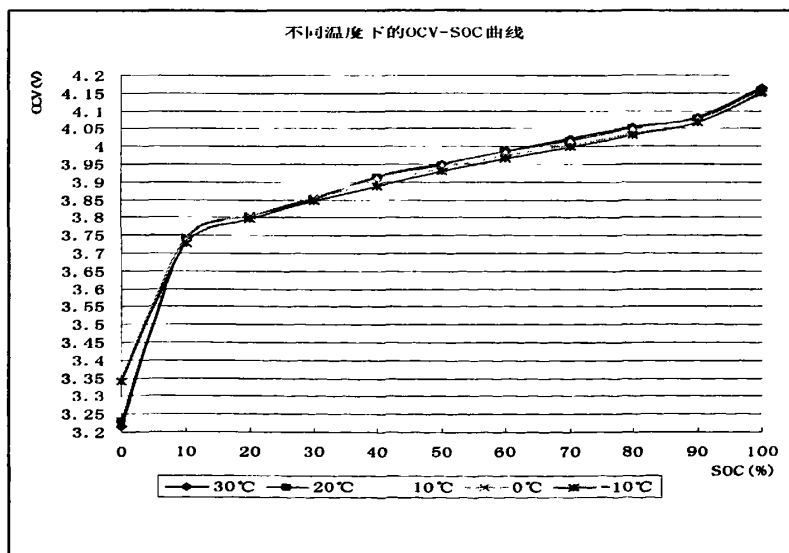


图 2-5 不同温度下锂电池的 OCV—SOC 对比

Fig 2-5 SOC-OCV curves during different temperatures



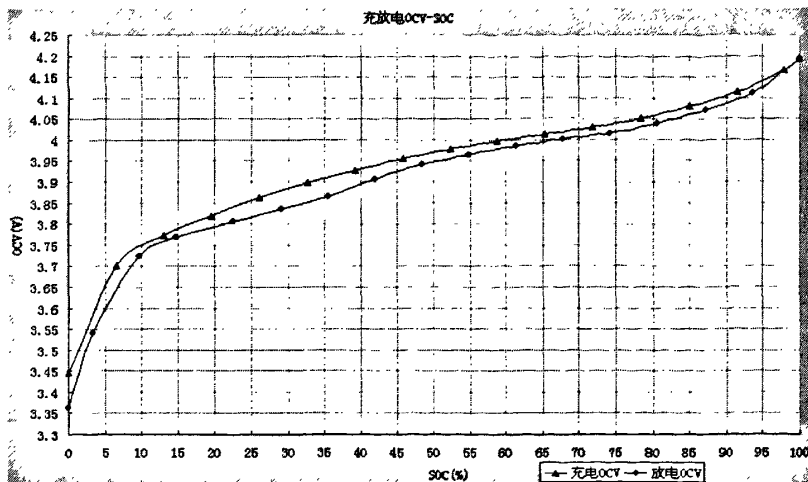


图 2-6 充放电状态下锂电池的 OCV-SOC 对比

Fig 2-6 OCV-SOC curves during charge and discharge

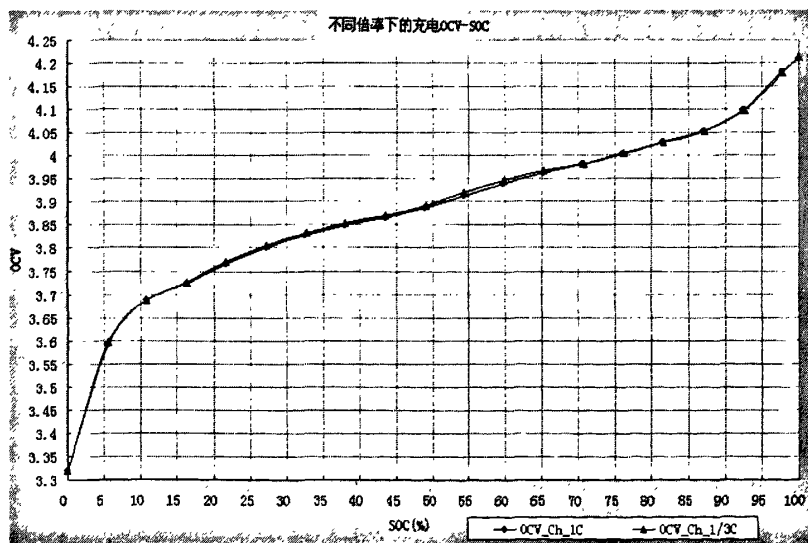


图 2-7 不同倍率下锂电池的 OCV-SOC 对比

Fig 2-7 SOC-OCV curves during different C-rates

通过对图 2-4 至图 2-7 中曲线的分析,可以知道,OCV 和 SOC 之间具有单调、稳定的对应关系。

对于不同温度、不同电流(同一容量的电池,即不同电流)及不同老化程度,锂离子电池的 OCV-SOC 特性几乎不受影响。在充、放电状态下锂电池 OCV-SOC 曲线对比中,OCV-SOC 略有差异,在同一 OCV 点的 SOC 最大相差不到 5%,所以也可以大致认为是吻合的。这样,对于电池的 SOC 估算或修正就提供了一条很好的途径和方法。

## 2.2 锂离子电池性能影响的主要因素

### 1 温度

电池的温度对电池性能的发挥具有重要的影响。电池的温度高使得电池的活性增加,能量能得到更加有效的发挥,包括电池的充放电平台、效率、可用容量等,但是电池长时间工作在高温环境下电池的寿命会明显的缩短;电池的温度低的时候电池的活性明显降低,电池的内阻、极化电压增加,实际可用容量减少,电池的放电能力下降,放电平台低、电池更加容易达到放电截至电压,表现为电池的可用容量减小,电池的能量利用效率下降。

有文章对电池的高低温下性能变化的内因进行了具体研究得到如下主要结论:

(1) 低温下充电容易出现金属锂的沉积而发生安全事故。低温环境下,锂的嵌入和脱出的能力下降,特别是嵌入能力下降得更厉害,所以低温下充电比放电更难。这时候对锂离子充电就可能由于锂离子的沉积速度大于嵌入速度而致使大量的金属锂沉积在电极的表面,发生安全隐患。

(2) 低温下,锂离子在石墨负极中的扩散速度慢。锂离子在石墨中较低的扩散速度是致使锂离子电池低温性能差的主要原因。充电时,由于锂离子在石墨中的扩散速率较慢,嵌入至表面的锂离子来不及向石墨本体扩散,石墨微粒表面锂离子浓度较高,产生极高的浓度极化,使电池电压快速上升至截止电压。

(3) 高温环境下,由于正极晶格结构的稳定性变差,电池的安全性降低。这时候充电上限电压需要适当的降低。

### 2 电压

锂离子电池在使用的过程中,需要对电池的上限电压进行监控,当电池电压高于电池的限制电压的时候,电池内部将发生副反应并产生大量的热,使得电池热稳定性下降,容易发生热失控。当电池的充电电压超过电池的最大允许充电电压时,锂离子将过量的从电池的正极脱出,造成正极晶格结构被破坏,容易发生释氧,同时大量的锂离子嵌入电池的负极,不能嵌入的锂离子沉积在电池负极表面,这增加了电池内部短路并出现热失控的可能性。所以电池在使用的过程中,电池的电压超过电池的上限电压是绝对禁止的。在电动汽车等成组电池使用的时候,必须保证所有单体电池的电压不超过上限电压。同样锂离子电池也存在下限电压。在使用的过程中,当电池的电压低于下限电压时,电池负极的金属集流体就会开始溶解,再次充电的时候会在附近沉积,当达到正极的时候,就造成了电池的内部短路或者漏液,所以当电池出现严重过放电的时候,电池的充电是被禁止的。

### 3 电流

电池都存在一定的内阻,当电池的工作电流太大时,电池内部的发热明显增加,电池的温度升高,从而导致电池的热稳定性下降,并形成正反馈。另外锂离子电池的正负极的脱嵌锂离子的能力是有限的,对应的就是电池的最大允许充放电电流,当电池的充放电电流大于电池的脱嵌能力的时候,势必导致电池的极化电压明显增加,电池提前达到充放电截止电压,电池的实际容量减小,电池的能量利用效率下降,严重的时候还会导致锂离子的沉积,从而影响电池的安全性。

## 2.3 车用锂离子电池的安全性

锂离子电池的电解液采用有机溶剂,这给锂离子电池带来了更低的熔点(使得电池能适用于温度更低的情况)和更高的电压平台的同时,也使其沸点低、闪点低、具有可燃性、电池电压接近分解电压、有机溶液粘稠以及导电性能差等问题,其中有机溶剂的闪点低、具有可燃性是锂离子电池出现安全事故的根源。电池的滥用会导致电池内部的热效应(主要包括SEI膜的分解、嵌锂负极与电解液的反应、电解液的分解、正极活性物质的分解、过充电锂离子与电解液的反应、欧姆热效应及短路等)加剧,这是锂离子电池出现安全性问题的起因,并最终表现为热失控。导致热失控的外因主要有严重过充电和过放电、电池过流和过温。

### 1 过充电

当电池充满电(放完电)的时候,如果继续充电(放电),这部分能量就会完全的转变成副反应,导致电池的容量下降甚至安全事故。锂离子电池并不像铅酸电池或者镍氢电池那样具有内部的氧循环机制,所以充满电(放完电)后,电池不能继续充电(放电)。对于成组使用的锂离子电池,也不能采用涓流充电的方式进行均衡。

有文章对锂离子电池的过充电进行了深入的研究分析,过充电的基本原理为:当锂离子电池过充电时,在电池的正极,由于锂离子从正极材料脱出的难度增加,电池的正极极化电压升高。当达到溶剂的分解电压(约4.5V)的时候,电解液开始分解,产生惰性物质( $Co_3O_4$ 或 $Mn_2O_3$ 等),释放出热量,这使得正极材料减少,并且产生的惰性物质会阻碍以后锂离子的脱出和嵌入,造成电池的极化和内阻增加,电池正负极之间的容量失衡。同时,锂离子将过量的从电池的正极脱出,造成正极晶格结构破坏,导致释氧等副反应,并产生大量的热,使得电池热稳定性下降,电池发生热失控的几率增加。在电池的负极,从正极过量脱出的锂由于不能与碳反应而以金属态的形式沉积在电池的负极,使得可用的锂减少。同时,由于锂的化学活性强,会消耗电解液,反应的产物会堵塞毛孔,使得电池的容量丢失,放

电倍率下降；锂沉积在电池的负极使得电池内部出现短路并最终导致热失控的可能性大大增加。

对于纯电动汽车而言，电池的容量(安时数)都较大，以奥运电动大巴为例，动力电池定额容量达到 360Ah，充电时候的电流一般在 100A~150A，即充电的倍率约为 0.28C~0.42C，锂离子电池在 0.5C 倍率下充电电流大大低于电池测试的时候的充电电流(1C 甚至更高)，那么电池的充电过程中的过电流会出现吗？答案是肯定的，以下几种情况可能导致电池出现过充电：

(1) 电池在快要充满电的时候电池内部离子的浓度增加，扩散性能下降，浓差极化增加，电流接受能力下降，电池出现过充电。对于车用电池而言，但是由于车辆在运行过程中需要进行大电流能量回馈，此时可能造成电池的过充电；

(2) 电池的大量串联。电池之间的一致性问题加之不合理的充电管理模式(如从铅酸电池继承而来的基于电池组端电压的充电模式)，会导致部分电池先于其他电池充满电，然而基于电池组端电压不能及时地检测到单体电池的状态，所以仍旧按照比较大的电流充电，导致电池严重过充电，造成电池电压超高、副反应产生、严重发热、锂离子沉积、内部短路并最终出现热失控。

可见，电池出现过充电首先会表现在电池的电压超高，所以通过对所有电池的电压进行实时的监控，并将其纳入充电控制就能有效的防止电池出现过充电。

## 2 过放电

电池的过放电过程如下：当电池出现过放电的时候，当电池负极的锂离子完全脱出以后，为了维持电流，电池负极表面电极电位低的物质继续被氧化，也有可能正极的  $LiPF_6$  中的锂离子在正极发生还原反应。在电池负极的锂离子减少，脱出能力下降，极化电压增加，当电池的放电电压达到金属集流体(铜)的溶解电压的时候，金属集流体(铜)会发生氧化和溶解，这使得电池的负极活性物质脱落。再次充电的时候溶解的金属会在附近沉积，当达到正极的时候，就造成了电池的内部短路或者漏液。

电池的放电过程和充电过程比较类似，出现过放电的原因主要在于：

(1) 电池在快要放完电的时候提供大电流的能力下降，电池出现过放电。当电池的剩余电量不足的时候可能由于加速的需要而出现电池的大电流放电，使得电池出现过放电；

(2) 电池的大量串联。当串联电池组电池之间的一致性问题会导致部分电池的会先于其他电池放完电，然而基于电池组端电压不能及时地检测到单体电池的状态，所以仍旧按照比较大的电流放电，导致电池严重过放电。

可见，电池出现过放电首先会表现在电池的电压超低，所以通过对所有电池的电压进行实时的监控，并将其纳入放电控制就能有效的防止电池出现过放电。

### 3 过电流

电池出现过电流主要有以下几种情况：

(1) 低温环境下的充放电，由于电池的导电性和扩散性下降，特别是电池的碳负极的锂离子嵌入和脱出能力下降，表现为电池的欧姆内阻和极化电压增加，电池的可接受电流的能力下降，导致电池出现过电流；

(2) 电池老化后，电池的性能下降(包括容量降低、内阻增加、倍率特性下降以及电池的内部结构钝化)后仍然按照新电池的充电电流进行充电；

(3) 电池大量的并联。由于单体电池之间的容量和内阻等差异导致部分电池的充电电流可能远远大于平均电流；

(4) 电池内外部短路造成电池过电流。

可见防止电池出现过电流主要从电池的低温充放电管理、电池的 SOH 评价、电池的筛选、电池之间的一致性判定来进行控制。对于电池的外部短路需要在电池回路上安装快熔或者相应的开关元件，及时的切断电池回路，防止电池出现持续的大电流放电而导致热失控。电池的内短路出现的原因较多，从电池内部的杂质到电池的机械损坏以及电池的滥用还有电池老化都可能导致电池的内部短路。从电池使用的角度而言，电池的内部短路主要由于电池的低温充放电以及电池的过放电造成，所以有效的低温充放电电流限制(特别是充电电流)和过放电管理对于提高电池的使用安全性有重要作用，另外电池老化后，当电池的容量降低到电池的限制容量的时候，应建议进行更换，停止使用。

### 4 过温

除了上述所提到的电池出现过充电、过放电、过电流等情况以外，在以下几个情况下会导致电池出现过温：

(1) 电池的热管理措施失效；

(2) 工作环境温度高；

(3) 锂离子电池的放电本身就是放热的过程，所以电池在使用的时候，电池的温度会持续的增加，如果没有合适的热管理，电池的产生的热量不能有效及时的散去，电池的温度会持续的增加。当电池严重过放电的时候，会导致电池的电压明显下降以及金属溶解等现象，并最终导致内部短路和热失控。

所以提高温度检测电路的可靠性、建立必要的反馈机制、对电池箱内部风机容量的选择、改进风道布局、箱内温度场测试以及应急控制电路能有效的提高电池的过温控制性能。

### 5 绝缘检测

电动汽车用电池一般需要串联成组，电压等级一般远高于人体可忍受的安全电压。以奥运电动大巴车为例，电池为 104 只锂离子电池串联而成，电池的电压

超过 400V。加之由于车用电池的震动性、湿热、灰尘等原因都会导致动力电池和车辆底盘之间的绝缘出现问题。出于对司售人员以及乘客的安全考虑，进行绝缘的检测是十分必要的。

## 3 锂电池的管理策略研究

对锂电池基本特性掌握的目的是为了研究出锂电池的管理策略,更好地保障电池使用的安全、更充分地发挥电池的性能。本章将从锂电池 SOC 的估算、锂电池的热管理、锂电池组绝缘检测和锂电池组充电模式等四个方面来研究电池的使用管理。

### 3.1 锂电池 SOC 的估算

#### 3.1.1 SOC 估算的意义

对于电动汽车, SOC 数据是防止电池过充和过放的主要依据,只有准确估算电池组的 SOC 才能有效提高电池的利用效率、保证电池组的使用寿命、优化驾驶。

在纯电动汽车,准确估算蓄电池 SOC 的作用包括以下几点:

(1) 保护蓄电池。对于蓄电池而言,过充电和过放电都可能对蓄电池造成永久的损害,严重减少电池的使用寿命。如果可以提供准确的 SOC 值,整车控制策略可以将 SOC 控制在一定的范围之内(如 20%~80%),起到了防止对电池过充电或过放电的作用,从而保证电池的正常使用,延长电池的使用寿命。

(2) 提高整车性能。在没有提供准确的 SOC 值的情况下,为了保证电池的安全使用,整车控制策略需要保守的使用电池,防止电池出现过充电和过放电的情况。这样不能充分发挥电池的性能,因而降低了整车的性能。

(3) 降低对动力蓄电池的要求。在准确估算 SOC 的前提下,电池的性能可以被充分使用。选用电池时,针对电池性能设计的余量可以大大减小。例如,在准确估算 SOC 的前提下,只需要使用容量为 40Ah 的动力蓄电池组。如果不能提供准确的 SOC 值,为了保证整车的性能和可靠性,可能需要选择 60Ah 甚至 80Ah 的动力蓄电池组。

(4) 提高经济性。选择较低容量的动力蓄电池组可以降低整车的制造成本。同时,由于提高了系统的可靠性,后期的维护成本也大大降低。

#### 3.1.2 现有的 SOC 估算方法

目前应用的各种 SOC 实时在线估算方法都存在或多或少的缺陷,不能很好地

满足实际使用的要求。这主要是因为电池的 SOC 和很多因素相关（如温度、前一时刻充放电状态、极化效应、电池寿命等），而且具有很强的非线性，给 SOC 实时在线估算带来很大的困难。

### 1 测量电池电解液有效质量

通过测量电池电解液的有效质量计算 SOC 值。该方法对于可直接测量电解液质量的铅酸电池比较适合，理论上可以精确测量 SOC。但目前纯电动及混合动力应用场合主要使用镍氢电池和锂电池，均为封闭结构，没有有效的手段能在线精确测量出电池电解液的有效质量，不存在实际应用价值。

### 2 安时积分<sup>[12]</sup>

这是测量 SOC 的基本方法，计算公式为：

$$SOC_k = SOC_{k-1} + \int_{k-1}^k \eta \times i(t) dt \quad (3-1)$$

通过精确测量在  $k-1$  至  $k$  时刻流经电池组的电流 ( $i(t)$ )，可以计算该时间段内电流积分值 ( $\int_{k-1}^k i(t) dt$ )，加上充电效率或放电倍率 ( $\eta$ ) 的修正，与电池组初始状态相加（假定充电电流方向为正，放电电流方向为负），即得到电池组当前的 SOC 值。

在实际应用场合，由于存在安时积分的累计误差，并且随着使用时间的增加误差会逐渐增加，属于“开环”的估算方法，缺少必要的反馈修正机制，所以单独采用该方法对电池的 SOC 进行估算并不能取得很好的效果。

### 3 测量交流阻抗<sup>[13]</sup>

通过在电池组两端叠加一个交流信号，测量电池组的电压变化，计算电池组的交流阻抗  $r$ ，以此作为计算 SOC 的标准。

这种方法存在以下几个方面的问题：

- (1) 电池组的交流阻抗只是在电池 SOC 很低或很高的时候变化率比较大，在 SOC 处于中间段时变化率很小，如果测量不够精确，计算误差会比较大。
- (2) 电池的交流阻抗受很多非线性因素的影响，如温度、前一时刻充放电状态、是否充分静置等，在相同的 SOC 下可能存在不同的交流阻抗值，或相同的交流阻抗值下可能存在不同的 SOC 值，不能找到确定的一一对应关系。
- (3) 电池组的交流阻抗值不仅由电池的化学特性决定，不同的极板结构、电解液配方的电池会表现出不同的交流阻抗值，同时电池的制作工艺也起到很重要的作用，即便同一生产工艺的不同批次电池之间交流阻抗与 SOC 之间的对应关系也存在差异。
- (4) 在不同的电流频率下计算出来的交流阻抗可能存在比较大的差异。在纯电动和混合动力场合，基本不可能使用某一固定频率的交流电流对电池进行充放电，因此实际应用意义不大。



经过上述分析，单纯通过测量交流阻抗来计算 SOC 值并不能得到很准确的结果，同时也不便于车载电池管理系统的嵌入式应用。

#### 4 开路电压

通过建立 OCV-SOC 之间的关系（一般通过试验测定），在测量电池的开路电压之后，计算 SOC。

该方法对 OCV-SOC 之间的关系测量较严格。OCV-SOC 之间存在单调、稳定的关系，但是，由于开路电压法的基本原理是将电池充分静置，使电池端电压恢复至开路电压，静置时间一般在 1 小时以上，不适合电动汽车的实时在线检测。

#### 5 零负载电压

该方法是在开路电压法的基础上，为实时检测需要作修改得来。通过建立电池模型和测定开路电压，在电池充放电过程中，测量电池端电压和电流，计算开路电压，从而得到 SOC。

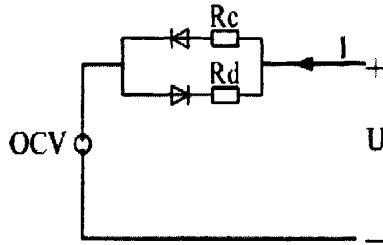


图 3-1 电池零负载电压模型

Fig 3-1 Battery model of zero-load

通过建立电池模型，可以在有电流的情况下计算零负载电压，并认为这个电压即为电池的开路电压。这种方法弥补了“开路电压法”不能实时在线测量的缺陷，但存在以下缺点，不能够达到准确计算 SOC 的目的：

- (1) 需要准确测得 OCV-SOC 曲线。
- (2) 要求准确地建立电池模型。
- (3) 要求准确计算电池模型中的各阻抗参数。通常这些参数受温度、电流、充放电状态等非线性因素的影响，很难计算精确，而这些参数的微小变化会对 OCV 的计算造成较大的误差，从而影响到 SOC 的估算精度。

#### 6 在线辨识电池的准确模型

利用人工智能、模糊控制、神经网络等方法辨识电池的准确模型，将影响 SOC 的各种因素综合到电池模型中，提高 SOC 的估算精度<sup>[14]</sup>。目前国内外绝大多数成果停留在计算机仿真结果阶段，离具体实际应用还有距离，例如神经网络方法存在以下主要问题：

- (1) 局部极小问题，造成网络的局部收敛，影响系统的控制精度。

- (2) 学习速度慢，训练时间长，限制了神经网络在实时控制中的应用。
- (3) 理想的训练样本提取困难，影响了网络的训练速度和训练质量。
- (4) 网络结构不易优化，特别是隐层节点数目的选取常常带有盲目性。
- (5) 尚未从理论上完全解决神经网络学习算法的收敛性和神经网络控制系统的稳定性问题。

### 3.1.3 锂电池组 SOC 估算方案

由上一节可知，单独使用任何一种算法估算 SOC 都存在不可避免的缺陷，很难单独应用在实时在线测量环境，因此需要综合考虑各个方面的因素，得出一种优化的能够实际应用的方法。本文采用安时积分和初始 SOC 值修正的综合方案，利用安时积分计算动态过程中 SOC 的变化量，结合 SOC 初始值的标定修正安时积分造成的累计误差。由于在纯电动汽车上，电池实际充放电使用中可以做到满充满放，即 SOC 的工作范围为[0,100%]，这样可以为 SOC 初始值修正点的选择创造很好的条件。另外，对于锂离子电池而言，由于其很高的充放电容量效率(>99%)，所以电池的充放电变化容量的计算可以忽略电池的效率的影响。从理论上，该方法对于纯电动汽车锂电池管理而言可以取得比较好的效果。SOC 的估测过程如下：

- (1) 充放电变化容量 ( $\Delta Q$ ) 的计算，

$$\Delta Q = \int_{t_1}^{t_2} i \times dt \quad (3-2)$$

在电池充放电使用的大部分过程中，通过安时积分来实时计算 SOC 值。由于已有专门的安时累积集成芯片，电池电量变化的累积并不困难，且能实现在线计算。

- (2) 初始荷电状态  $SOC_{ini}$  的估算

当单纯的采用安时积分对电池的 SOC 进行累积的时候，由于存在累积误差、自放电等问题，随着时间的推移，电池的 SOC 的估算误差会逐渐的增大。所以，需要定期的修正初始荷电状态，这样才能保证 SOC 估算的准确和精度。对于电池而言，能够直接在线获得的参数主要包括电压、电流和温度，其中电池的电流和温度与电池的荷电状态并无直接对应关系。只有电池的电压，特别是电池的开路电压和电池的 SOC 之间存在单调、稳定的对应关系，所以可以定期得到电池的 OCV 并依据 OCV-SOC 函数表获知对应的 SOC 值，对电池的 SOC 初始值进行修正。其余的时刻利用安时积分对电池的 SOC 进行计算。但是电池在使用的时候，可以直接测量到的只是电池的外电压，在未取得内电动势平衡的情况下和内电压存在一定的差异。因此，需要通过一种方案来测量电池的 OCV 进行 SOC 初始值修正。

### (3) 电池 OCV 值的获取

由公式  $U_o = U_{ocv} \pm U_r \pm U_p$  可知, 外电压  $U_o$  由内电压  $U_{ocv}$ 、欧姆压降  $U_r$  和极化电压  $U_p$  组成。其中, 外电压  $U_o$  可以通过直接测量。另外, 由于电池直流内阻的纯阻性, 当电流为零时欧姆压降  $U_r$  消失。这样, 也可以消除欧姆压降  $U_r$  的对 OCV 值估测的不利影响。但是, 对于极化电压而言, 它的情况要复杂的多。它与电池的内部电化学反应速度和离子扩散速度有关, 需要一段时间才能达到新的稳定和平衡状态, 因而当电流流过电池(电流从电池上撤离)后, 电池的极化电压有一个逐渐消退的过程, 呈现明显的滞后性。

为了消除极化电压的影响, 可以有两种方法:

1. 充分静置。即当电池电流为零后, 通过对电池的充分静置自然去极化。它的效果很好, 能够完全消除极化对内电压测量的影响, 但是时间较长, 一般需要 1-2 小时。
2. 反向去极化, 快速消除极化电压, 缩短静置的时间。但是由于电池的极化电压受车辆实际运行工况、温度、电流、荷电状态、充放电状态及深度等多方面因素的影响, 极化深度、极化电压的大小不能准确获知, 因此反向去极化的电量不能很好的把握。另外, 控制复杂、效果比较差。

结合纯电动汽车的运行模式, 本文采用自然去极化的方案。由于开路电压对安时积分的修正并不需要实时进行。另外, 车辆运行完毕后, 特别是夜间停驶的过程中, 电池处于静置状态, 且静止时间相对较长, 电池的外电压能达到充分的恢复(搁置时间大于 2 小时可认为电池充分静止)。这样, 就保证了电池内电压的估测精度, 提高了 SOC 初始值的修正精度。

当车辆再次上电的时候, 通过计算车辆停驶的时间(BMS 系统内设计了实时时钟)可以决定是否采用开路电压进行 SOC 的校正。另外, 电池由于静置时间内的自放电导致的剩余容量的下降最终也会反映到电池的开路电压下降上, 所以此时采用开路电压对电池的初始 SOC 进行修正能同时排除电池自放电的影响, 提高电池的 SOC 估算精度。

### (4) SOC 初始值修正点的选择

图 3-2 为锂电池的 OCV-SOC 曲线, 从图中可以看到在电池的曲线大致分为三部分, 曲线的低端和高端都比较陡峭, 而曲线的中间部分较平缓。也就是说在 SOC 的 [30%, 70%] 范围内, 电压的变化率较小, 在 SOC 的 [0, 30%] 和 [70%, 100%] 区间里, 开路电压的变化率很大。这样就涉及到用于修正的开路电压测量精度问题, 它将影响到 SOC 初始值的修正精度。

在电池达到内电动势平衡时, 通过电池外电压的测量可以获知电池的内电压。但是在实际中电压测量是有一定精度的, 目前电池管理系统电压测量的精度可以

到5%，对于锂电池电压而言，最大测量误差约为20mV。如果进一步提高电压的测量精度，成本将会上升很多。所以，这不是一个很好的解决方案。通过分析第2

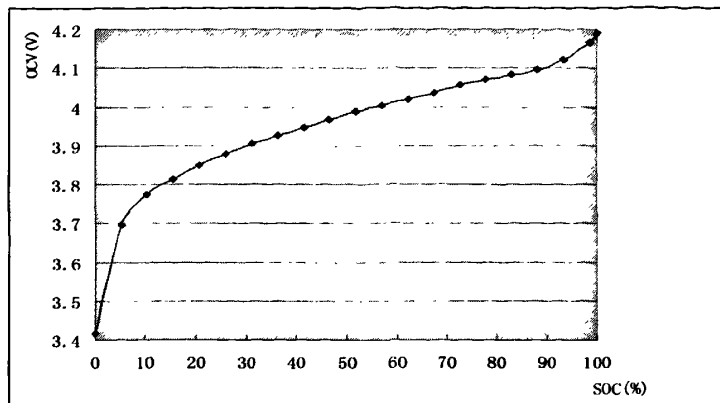


图 3-2 锂离子电池的 OCV—SOC 曲线

Fig 3-2 OCV—SOC curve of Li-ion battery

章测试所得到的 OCV—SOC 曲线图 2-4 至图 2-7 可以发现，在 OCV 的 [10%,90%] 的区间，电压相差 20mV 时，SOC 相差可达 10%。在 OCV 的 [0, 10%] 和 [90%,100%] 区域，20mV 的电压变化对应的 SOC 差异约为 1%~2%。

因此，为了取得较好的修正精度，选择将电池 SOC 开路电压的修正点设在 OCV—SOC 曲线的低端或高端。也就是说，在 OCV 随 SOC 变化平缓的时候不进行修正，开路电压较低或较高时候才进行修正。不同正极材料的锂离子电池的 OCV—SOC 曲线不同，在选择修正用的开路电压具体范围因此也不同，应根据测试得到的 OCV—SOC 数据具体确定。

对于锰酸锂电池，可以将修正的开路电压范围设在 [3.30V,3.73V] 和 [4.10V,4.21V] 这两个区域。

## 3.2 锂电池的热管理

### 3.2.1 热管理的必要性

由上一章可知，电池性能的发挥与电池的温度有密切的关系。电池的温度高使得电池的活性增加，能量可得到更加有效的发挥以及电池的容量利用得更充分。但是电池长时间工作在高温环境下寿命会明显的缩短，应避免这一情况。电池在低温时，活性明显降低，电池的欧姆内阻和极化内阻增加，放电能力下降，放电平台变低以及电池更容易达到放电截至电压，使得电池的实际可用容量减小、能量利用效率下降。特别地，在低温下充电时，由于电池的活性差，特别是电池负

极石墨的嵌入能力下降，正极反应放出的锂离子可能在电负极沉积下来，造成锂枝晶的形成，使得可用的锂离子减少，严重的时候造成电池内部的短路。

因此，当电池的工作温度或者温度的上升率达到预先设置的值后，电池需要进行散热处理，包括风冷和水冷等措施，以保证电池的温度和温升控制在一定的范围内；当电池的温度管理失效以后，电池的温度达到最高允许值时，应有可靠的手段断开电路，停止对电池的使用操作，以保证电池的使用安全。

### 3.2.2 热管理的方案

在温度过低或过高的情况下，电池的性能不能得到很好的利用，甚至有可能出现安全事故和加速电池的衰退。因此，需要创造条件，对电池的工作温度进行主动式管理，使得电池工作在最佳温度范围内。

对于锂电池而言，工作的温度范围为，充电： $-10^{\circ}\text{C}\sim+45^{\circ}\text{C}$ ；放电： $-30^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ 。所以，通过一定的措施，保证锂电池在充放电使用的大部分时间内温度在这一范围。

对于防止电池温度过高的问题，本文提出进行强制风冷的策略。通过电池管理系统的实时监测，得到电池组中各单体电池的温度信息。当锂电池温度达到开风机阈值，电池管理启动风机对电池进行降温，直到温度降到关风机阈值时停机。电池管理系统通过对风机的滞环控制，实现对电池的冷却。这一结构图如图 3-3 所示。当电池温度达到故障值时，电池管理发出控制和报警信息，停止对电池的充放电使用，以保证锂电池的安全。

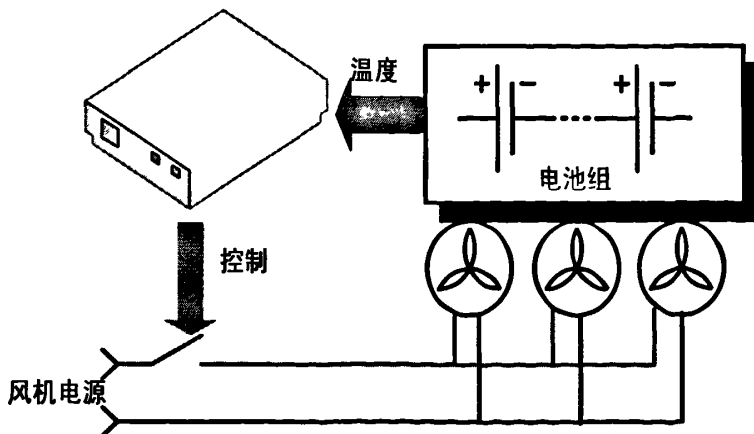


图 3-3 风机控制结构图

Fig 3-3 Structure of fan control

在低温时，由于电池的活性差，电池负极石墨的嵌入能力下降，这时候大电流充电很可能出现电池热失控甚至于安全事故。为了避免这一问题，当电池管理

系统监测到电池温度过低时会发出控制信息，充电机根据电池管理发送的温度信息，进行小电流充电。另外，由于低温环境( $<-10^{\circ}\text{C}$ )下，电池的内阻随着温度的下降会增加。在充电过程中，电池的欧姆压降损失的能量增加，这部分能量转化为热量，使得电池的温度逐渐升高。这样在进行一定时间的小电流充电后，当电池管理监测到温度正常后，即可通知充电机恢复至正常电流模式充电。

由第 2 章所述，对于锂电池而言，低温下电池负极石墨的嵌入能力下降。因此，低温主要是对锂电池的充电有负面影响，对电池的放电则影响不大。特别地，电池放电过程属于放热反应，再加上低温下增大的内阻上产生的热量，电池的工作温度会很快上升到适宜温度，呈现负反馈的机制。因此，这一过程不需要主动地去管理。

综合以上的策略，锂电池的热管理控制流程图参见图 3-4。

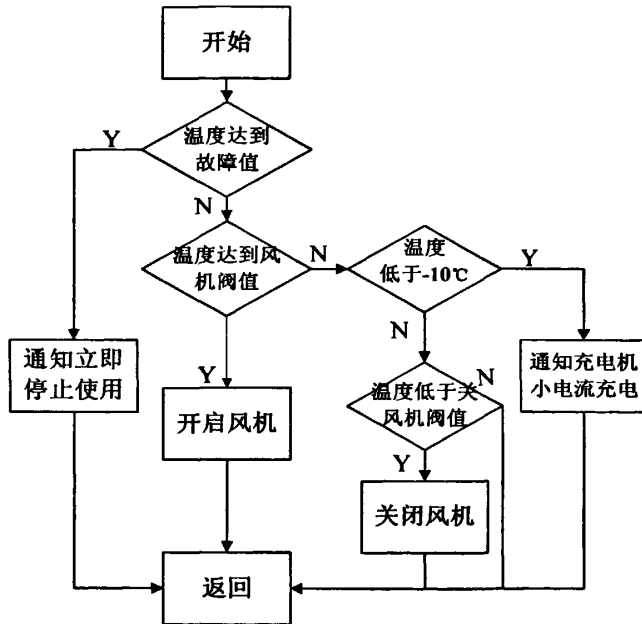


图 3-4 锂电池热管理控制流程图

Fig 3-4 Flow chart of thermal management for Li-ion battery

### 3.3 锂电池组的绝缘检测

#### 3.3.1 绝缘检测的意义

在电动汽车上，动力蓄电池组电压一般在 200V 以上，采用较高的电压规范，减小了电动汽车电气设备的工作电流、降低了电气设备和整车的重量。但是，较

高的工作电压对车载高电压系统（包括蓄电池组以及与之直接连接的高电压电气设备如电源变换器、电动机等）与车辆底盘之间的绝缘性能提出了更高的要求。高压电缆绝缘介质老化或受潮湿环境影响等因素都会导致高电压电路和车辆底盘之间的绝缘性能下降，蓄电池组正、负极引线将通过绝缘层和底盘构成漏电流回路，使底盘电位上升，不仅会危及乘客的人身安全，而且将影响低压电气和车辆控制器的正常工作<sup>[15]</sup>。因此，实时、定量地检测蓄电池组相对车辆底盘的电气绝缘性能，对保证乘客的安全、电池组和电气设备的正常安全工作、车辆的安全运行具有重要意义。

### 3.3.2 绝缘检测的方案选择

对于封闭回路的高压直流电气系统，其绝缘性能通常用电气系统中电源对地漏电流的大小来表征，现在普遍使用两种漏电流检测的方法：辅助电源法和电流传感法<sup>[16]</sup>。在国内一些电力机车采用的漏电检测装置中，使用一个直流 110V 的检测用辅助蓄电池，辅助电池正极与待测高压直流电源的负极相连，辅助电池负极与机车机壳实现一点连接。在待测系统绝缘性能良好的情况下，电池没有电流回路，漏电流为零；在电源电缆绝缘层老化或环境潮湿等情况下，电池通过电缆绝缘层形成闭合回路，产生漏电流，检测装置根据漏电流的大小报警，并关断待测系统的电源。这种检测方法不仅需要直流 110V 的辅助电源，增加了系统结构的复杂程度，而且难以区分绝缘故障源是来自电源正极引线电缆还是负极引线电缆。采用霍尔式电流传感器是对高压直流系统进行漏电检测的另一种方法，将待测系统中电源的正极和负极一起同方向穿过电流传感器，当没有漏电流时，从电源正极流出的电流等于返回到电源负极的电流，因此，穿过电流传感器的总电流为零，电流传感器输出电压为零。当发生漏电现象时，电流传感器输出电压不为零。根据该电压的正负可以进一步判断产生漏电流的来源是来自电源正极引线电缆还是电源负极引线电缆。但是，应用这种检测方法的前提是待测电源必须处于工作状态，要有工作电流的流出和流入，它无法在电源空载状态下评价系统的对地绝缘性能。对于电动汽车，必须要求在车辆行驶之前、动力蓄电池电源空载条件下，能够检测电源对车辆底盘的绝缘性能，而且还要求能够分别定量地检测电源正极引线电缆和负极引线电缆对底盘的绝缘性能。因此，上述检测方法不适用于电动汽车场合。

绝缘体是相对导体而言的，在直流电源系统中，定量描述一种介质绝缘性能和导电性能的物理量是电阻。导体的电阻小、绝缘体的电阻大，绝缘体电阻的大小表征了介质的绝缘性能，电阻越大，绝缘性能越好，反之亦然，称该电阻为

绝缘电阻。在电动汽车的高压电气系统中，利用蓄电池组的正极引线电缆和负极引线电缆对底盘的绝缘电阻来反映电气系统的绝缘性能。

目前，在有些电动汽车上，采用一种变阻抗网络的方法来测量电池组对底盘的绝缘电阻<sup>[17]</sup>。假设蓄电池组的总电压为 $U_0$ ，待测的正负母线与电底盘之间的绝缘电阻分别为 $R_p$ 、 $R_n$ ，正、负母线与电底盘之间的电压分别为 $U_p$ 、 $U_n$ ，待测蓄电池系统的等效模型如图 3-9 的虚线框内所示。测量原理如图 3-4 所示。图中 $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$ 为测量用的已知阻值的标准电阻。

当开关 $S_1$ 、 $S_2$ 全部断开时，测量正、负母线与电底盘之间的电压分别 $U_{p1}$ 、 $U_{n1}$ ，由电路定律得到，

$$\frac{U_{p1}}{R_p} = \frac{U_{n1}}{R_n} \quad (3-3)$$

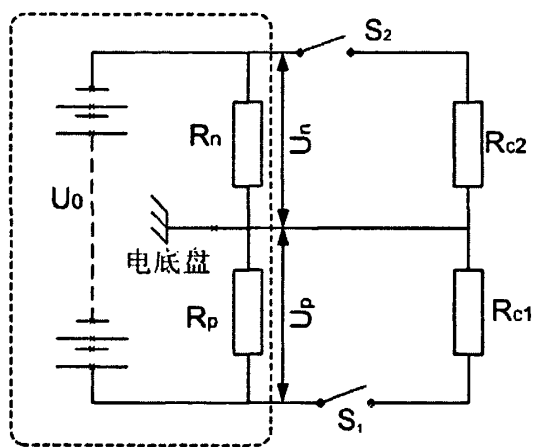


图 3-4 蓄电池组绝缘检测原理图

Fig 3-4 Scheme of insulation measurement

当开关 $S_1$ 闭合、 $S_2$ 断开时，则在正母线与电底盘之间接入了标准偏置电阻 $R_{c1}$ ，测量正、负母线与电底盘之间的电压分别为 $U_{p2}$ 、 $U_{n2}$ ，同样可得，

$$\frac{U_{p2}}{R_p} + \frac{U_{p2}}{R_{c1}} = \frac{U_{n2}}{R_n} \quad (3-4)$$

由式(3-3)和(3-4)联合求解，可以得到，

$$R_p = R_{c1} \left( \frac{U_{p1} * U_{n2}}{U_{n1} * U_{p2}} - 1 \right) \quad (3-5)$$

$$R_n = R_{c1} \frac{U_{p1} * U_{n2} - U_{n1} * U_{p2}}{U_{p1} * U_{p2}} \quad (3-6)$$

同样，绝缘电阻在以下两种情况也可以得到：

- (1)  $S_1$ ， $S_2$ 全部断开和 $S_1$ 断开、 $S_2$ 闭合；
- (2)  $S_1$ 闭合、 $S_2$ 断开和 $S_1$ 断开、 $S_2$ 闭合。



这种方案能够满足电动汽车上蓄电池组的绝缘测量要求，但缺点也很明显，检测芯片及其隔离电路的庞杂造成整个检测装置体积过大，不利于电动汽车上仪表盘的安装。因此，本文在这种方案上作一些改进，由双边切换电阻改为单边切换固定电阻，原理图如图 3-5 所示。工作原理如下：

当  $S_1$  断开的时候，测量正、负母线与电底盘之间的电压分别为  $U_{p1}$ 、 $U_{n1}$ ，

$$\frac{U_{n1}}{R_p} + \frac{U_{n1}}{2R} = \frac{U_{p1}}{R_n} + \frac{U_{p1}}{2R} \quad (3-7)$$

$S_1$  闭合，测量正、负母线与电底盘之间的电压分别为  $U_{p2}$ 、 $U_{n2}$ ，

$$\frac{U_{n2}}{R_p} + \frac{U_{n2}}{2R} = \frac{U_{p2}}{R_n} + \frac{U_{p2}}{R} \quad (3-8)$$

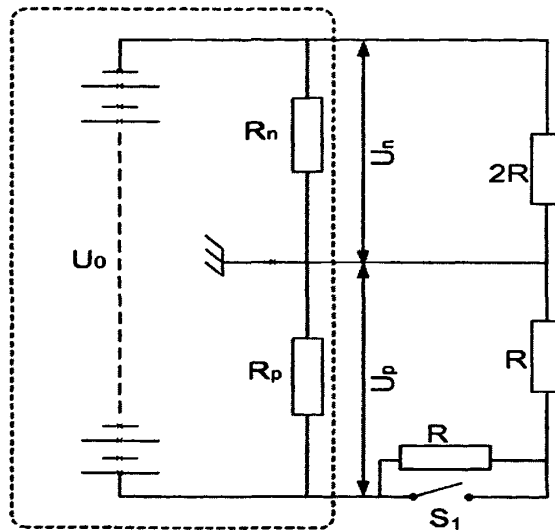


图 3-5 单边切换固定电阻方案原理图

Fig 3-5 Circuit of insulation measurement with single switch

联立以上两式可见，未知量只有两个， $R_p$  和  $R_n$ 。求解得到，

$$R_n = \frac{2R(U_{n2} * U_{p1} - U_{n1} * U_{p2})}{2U_{n1} * U_{p2} - U_{n2} * U_{p1}} \quad (3-9)$$

$$R_p = \frac{2R(U_{n2} * U_{p1} - U_{n1} * U_{p2})}{U_{n2} * U_{p1} - U_{n1} * U_{p2} + U_{p1} * U_{p2}} \quad (3-10)$$

这种方案只有一个开关管，在检测过程中减少了开关切换的次数，增加了检测的可靠性，同时也减少了成本。

### 3.3.3 绝缘检测电路的参数选取

方案采用 CS5460A 作为电压信号检测芯片。CS5460A 电压电流输入通道的电

压输入范围是 $\pm 250\text{mV}$ ，而电池组总电压范围在 $400\text{V}\sim 500\text{V}$ ，所以必须配置相应的分压电路，将高压信号转变为 CS5460A 芯片的电流检测通道所能检测的毫伏级的电压模拟信号。如图 3-6 所示。电压检测的分压电路选用阻值为  $R_1\sim R_4$  的大电阻和阻值为  $R$ 、 $R_L$  的小电阻构成，总的电阻  $R_\Sigma = R_1 + R_2 + R$  或  $R_\Sigma = R_3 + R_4 + R_L$  ( $R_\Sigma$  即为检测电路的输入阻抗)，对于电流检测通道取一定的裕量为  $200\text{mV}$ ，分压电路分压系数为：

$$R_L / R_\Sigma = V_{in} / V_b = 200 / 1000000 = 1 / 2500 \quad (3-11)$$

$$\text{即, } R_L / R_H = 1 / 2500 \quad (3-12)$$

在分压电阻的选取上必须考虑到以下几点因素：

- (1) 尽量不影响整车绝缘；
- (2) 尽量减少电阻损耗；
- (3) 尽量提高检测精度。

分析这三点因素可以看出(1)、(2)和(3)存在制约，要尽量保持原车的绝缘和减少检测电阻损耗发热，检测电阻的选择标准就必须尽可能的大，但检测电阻越大，寄生电容的影响就会越大，要提高电压的检测精度，检测电阻的选择标准就必须尽可能的小。权衡国标中对电压检测仪器阻抗的要求和 CS5460A 正常可靠工作的要求，选取  $R_H = 1\text{M}\Omega$ 、 $R_L = 200\Omega$ 。

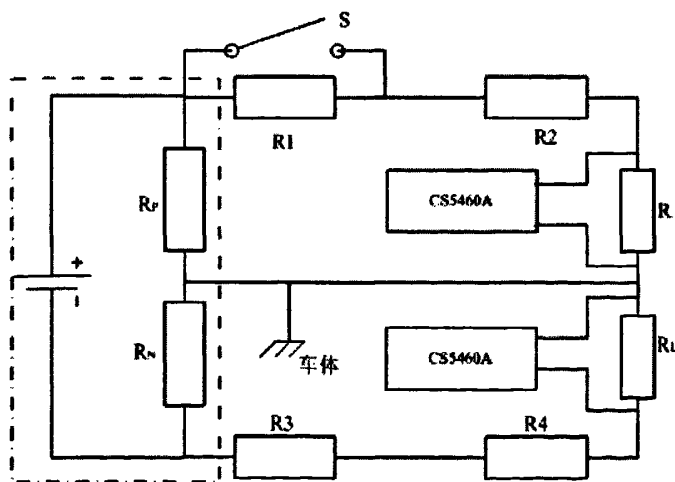


图 3-6 绝缘检测电路原理图

Fig 3-6 Circuit of insulation measurement

对于大电阻  $R_H$ ，考虑到实际电阻规格，分压电路的电阻匹配应考虑电阻功率和耐压两方面的问题，一般不能满额使用，必须选择好其额定值降额使用。一般电阻使用时，实际负载功率要低于额定功率的 30%，典型应用中通常取额定值的 50%。从功率方面考虑，每个电阻的功率不应大于其额定功率，由上面分析可知，

与  $R_H$  相比,  $R_L$  阻值很小, 可以忽略。根据功率计算公式:

$$P=U^2 / R \quad (3-13)$$

得到  $R_H$  上的功率为,

$$P_H=500V \times 500V / 1M\Omega=0.25W \quad (3-14)$$

因此  $R_H$  的功率等级很容易满足, 综合这些功率因素, 可以看出满足耐压要求, 且留有一倍的裕量。 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  选择阻值为  $510k\Omega$ 、功率为  $2W$  的功率电阻。对于小电阻  $R$ 、 $R_L$ , 选取阻值为  $200\Omega$ 、精度为  $5\%$ 、低温  $25ppm$  的精密电阻。

绝缘检测模块的检测芯片 CS5460A 与 MCU 之间采用光耦隔离, 需要占用 MCU 的 7 个 I/O 口, 主要包括时钟信号、数据的串行输入和输出、片选、MOS 管的控制脚等等, MOS 开关管采用耐压  $900V$  的美国仙童公司的 SSH8N90。根据检测原理, 电池正负母线都引入电池管理系统的主控板, 这样必须对绝缘检测模块进行有效的电气隔离。

根据检测芯片 CS5460A 测得的开关管 S 通断时刻的正负母线对车体的电压值可以计算出正对地、负对地的绝缘电阻  $R_p$ 、 $R_n$ 。由国际电动汽车标准中规定绝缘电阻应大于  $100\Omega/V$  (按动力蓄电池的标称电压计算), 将绝缘等级分为三等: 低于  $100\Omega/V$  表示绝缘等级差, 介于  $100\Omega/V$  和  $500\Omega/V$  之间表示良, 大于  $500\Omega/V$  表示绝缘等级优。从而, 可以得出蓄电池组的绝缘状况等级。

### 3.4 锂电池组的充电模式

对于蓄电池而言, 充电过程是实现电池能量补给的过程, 在电池使用过程中起着重要的作用。电池充电模式和方法的优劣对电池容量的有效利用和安全性有着重要影响。科学、合理的充电模式和能保障电池充电过程的安全, 提高电池能量利用效率、减缓电池性能的下降速率。在这里提出一种电池管理和充电机配合的充电模式能够保障电池充电的安全性, 充分利用电池的当前状态信息实现充电过程的控制。

#### 3.4.1 基于电池组端电压的充电模式

##### 1 基于电池组端电压的充电模式的工作原理

目前充电方法主要有恒压、恒流、恒压恒流、快速充电以及智能充电等几种。这些方法都是以充电机的输出电压为反馈信号来实现充电过程的阶段转换和电压、电流闭环控制。以最为常见的恒压恒流充电方法为例, 其基本的充电控制原理是: 当充电机的输出电压低于限制电压的时候, 采用恒定电流模式对电池组进

行充电，在这个过程中，充电机的输出电压逐渐的上升；当其达到设定的限制电压的时候，转为恒电压控制阶段，为了保证充电机的输出电压维持在限制电压，于是充电电流逐渐的降低，当充电电流达到停止电流的时候，认为电池组已经充满，充电过程结束。

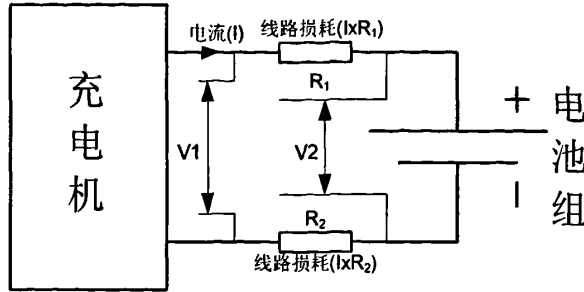


图 3-7 基于端电压的充电系统结构

Fig 3-7 Charge mode based on terminal voltage

这种模式充电的结构参见图 3-7，在电池组实际充电的过程中，由于充电线路的长短不确定，当以大小为  $I$  的电流进行充电的时候，线路的阻抗  $R_1 + R_2$  会对应的线路压降为  $I \times (R_1 + R_2)$ 。所以电池组的实际电压  $V_2$  和充电机的输出电压  $V_1$  之间存在如下关系：

$$V_1 = V_2 + I \times (R_1 + R_2) \quad (3-15)$$

所以，采用  $V_1$  作为反馈量进行充电电流控制的话，由于  $V_1 > V_2$ ，电池的充电过程会在  $V_2$  达到充电截止电压之前进入恒压，使得充电电流减小，充电时间延长。由于充电结束之前，电池的充电电流很小，所以线路压降减小，电池的充电容量并不会受到很大的影响。

在此基础上的一种改进方法就是引出 2 根检测线，直接连接于电池组的正负极。这两根导线虽然也可能较长，但是流过的电流很小，线路损耗明显减小，从而得到电池组的实际端电压  $V_2$  并将其作为反馈控制量，真正实现恒电池组端电压充电，解决了以上的问题。

## 2 基于电池组端电压的充电模式的主要问题

可以看出，充电机和充电控制的设计只是从电力电子的角度进行了考虑，而没有考虑到电池的特性。当这样的充电控制方法应用于单体电池的时候，由于单体电池的电压就是被控参数，能防止单体电池的过充电和过放电，保障充电的安全。当电池串联成组使用后，理想情况下，电池组内所有电池的特性完全一样，通过检测电池组的总电压再除以电池串联数量，就能得到单只电池的电压。但是，由于电池生产和使用过程中的差异，电池之间的一致性是相对的，不一致是绝对的。因而在电池组使用和充电过程中，必然会出现单体电池电压不一致的情况。

所以总会出现一部分电池先于其他电池充满电或者到达单体电压上限，由于电池组端电压对应的是所有单体电池的平均电压，因此某些单体的过充并不能从电池组的端电压上反应出来，也不会被充电器检测到。其结果是充电器仍会按照原来的模式充电，致使这部分电池出现明显的过充电而损坏电池组的性能，乃至有可能导致安全事故的发生。

特别地，与铅酸电池等蓄电池相比，锂离子电池的抗滥用能力较差。从电化学角度来看，是由于铅酸电池内部存在所谓的“氧气循环”机理，而锂离子电池的充电是锂离子在正负极之间的嵌入和脱出。当锂离子电池出现过充电的时候，过量的锂离子从电池的正极脱出，并最终原子态的形式沉积在电池的负极表面，轻则造成可循环的锂离子数量减少，电池的性能下降；严重的时候，沉积的锂离子可能刺破电池内部的隔膜，造成电池内部短路，出现热失控并最终导致安全事故。值得提出的是，即便是铅酸电池，长时间的过充电也会导致电池内部大量发热，使得电池性能下降速度加快，并最终导致电池的寿命缩短。

所以，全面地监控电池组中所有单体电池的电压状态，并将其作为充电控制依据，才能有效的保证充电过程的安全和减轻电池性能的下降。

### 3.4.2 电池管理和充电器配合的充电模式

基于电池组端电压的充电模式由于不能充分的得到电池组内所有单体电池的信息，并且忽略了电池的温度对电池充电性能的影响，所以并不能有效的保障电池使用的安全性。如第 2 章所述，有效的保障所有电池的电压和温度在安全范围之内，并纳入电池的充放电管理就能有效的保障电池使用的安全性。但是如果要求充电器直接测量电池组内所有单体电池的电压和温度并纳入充电控制的做法在实际中可行性很小，因为这会受到连线繁琐、安全性降低、单体电池数量不确定以及通用性差等一系列问题的制约。相对而言，作为电池系统重要组成部分，肩负着实时监控电池状态、有效利用电池能量以及保障电池使用安全的电池管理系统 BMS (Battery Management Systems) 是对电池状态和性能最为了解的设备，能有效的得到所有电池的电压和温度数据，所以只需要将 BMS 与充电器系统之间建立通讯链路，实现数据共享，就能有效的解决以上问题。基于此，提出了 BMS 和充电器系统配合的充电模式，其基本系统结构参见图 3-8。

BMS 的作用是实现对电池状态的在线监测(电池的温度、单体电池电压、工作电流、电池和电池箱(架)之间的绝缘)、SOC 估算、状态分析(SOC 是否过高、电池温度是否过高/低、单体电池电压是否超高/低、电池的温升是否过快、绝缘是否故障、是否过电流、电池的一致性分析、电池组是否存在故障以及是否通讯故障等)以及

实施必要的热管理。充电机的主要任务电源变换、输出电压和电流的闭环控制、必要的保护以及与 BMS 通讯，实现电池状态的全面了解和输出电流的动态调节。当电池组需要充电的时候，除了充电机的输出总正和总负动力线需要与电池组相连以外，BMS 和充电机之间还增加了用于实现数据共享的通讯线。

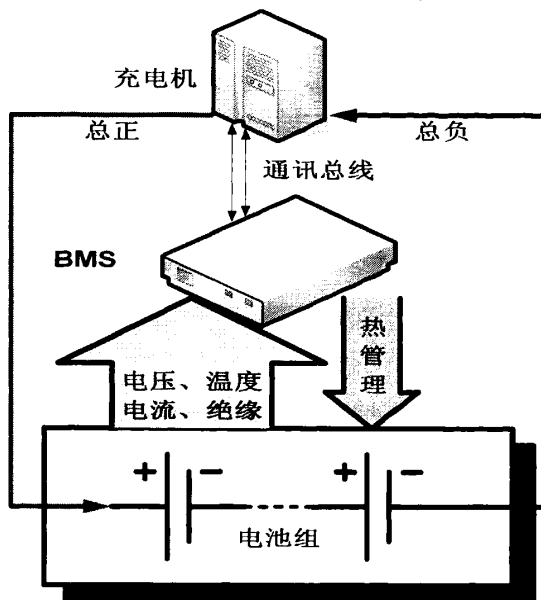


图 3-8 充电系统结构示意图

Fig 3-8 Structure of charge system

该充电模式通过电池管理系统和充电机系统之间建立的通讯链路，实现了数据共享，使得在整个充电过程中电池的电压、温度以及绝缘性能等安全性相关的参数都能参与电池的充电控制和管理，使得充电机能充分的了解电池的状态和信息，并据此改变充电电流，有效的防止了电池组中所有电池发生过充电和过温，大大的提高了串联成组电池充电的安全性。另外，该充电模式既完善了 BMS 的管理和控制功能；提高了充电的安全性和智能化水平，还简化了充电工作人员设置充电参数等繁琐的工作，使得充电机具有了更好的适应性，充电机不需要区分电池的类型，只需要得到 BMS 提供的电流指令就能实现安全的充电。

## 4 锂电池管理系统的实现

在电动车上，电池管理系统对整车的安全运行、整车控制策略选择、充电模式的选择以及运营成本都有很大的影响。无论在车辆运行过程中还是在充电过程中，电池管理系统都要完成电池状态的实时监控和故障诊断，并通过总线的方式告知车辆集成控制器或充电机等，以便采取相应的控制策略，达到有效利用电池性能且保障使用安全的目的。可以把电池管理系统的主要任务归纳总结为：保证电池使用安全；保障电池的使用寿命；为用户和提供电池的各种状态信息作为决策依据。

根据电动汽车实际运行和电池安全有效使用的需要，电池管理系统必须实现以下基本功能：

- (1) 单体电池电压的检测；
- (2) 电池温度的检测；
- (3) 电池组工作电流的检测；
- (4) 绝缘电阻的检测；
- (5) 冷却风机的控制；
- (6) 电池组 SOC 的估测；
- (7) 电池故障分析和在线报警；
- (8) 与车载控制器通讯，为整车控制提供必要的电池状态信息；
- (9) 与车载显示设备通讯，告知司驾人员相关的电池状态和故障信息；
- (10) 与充电机通讯，实现电池组的安全充电。

### 4.1 系统的硬件电路

电池管理系统的硬件设计直接关系到电池使用管理的策略能否实现，并影响到控制算法的性能。因此，能够实现精确测量、具有良好的可靠稳定性的电池管理系统是实现电池管理和控制策略的必要前提。

#### 4.1.1 整体设计

考虑到纯电动汽车上电池数量较多，且以箱为单位分布在车上，较为分散，为了避免箱体之间出现高压连接导线，采用了集散式系统设计（图 4-1 所示），由一个中央控制模块（见图 4-2）和多个测控模块（见图 4-3）组成，每个电池箱配

备 1 个电池测控模块。测控模块的硬件设计主要实现电压测量、温度测量及热管理和通讯等电路；主控模块则包括电流测量、绝缘检测和通讯接口部分。主控和测控模块通过 RS485 总线进行电池管理系统内部的通信。在主控模块上，设计两

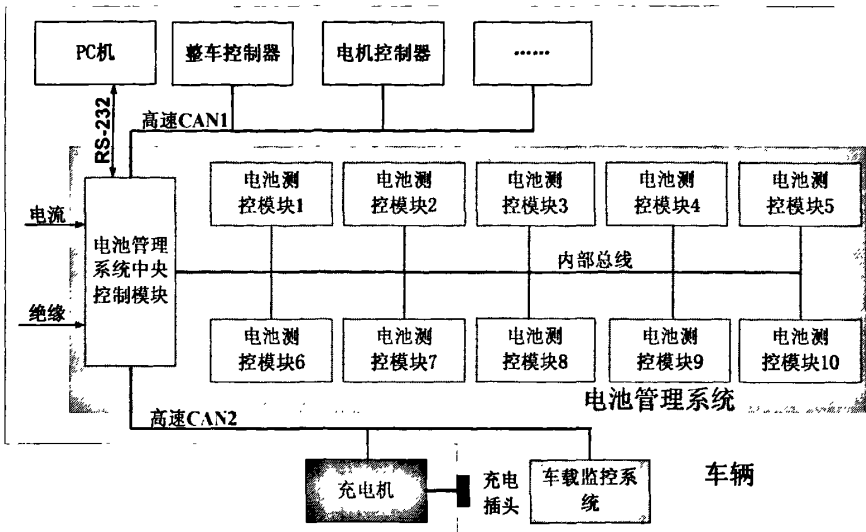


图 4-1 电池管理系统结构图

Fig 4-1 Structure of BMS

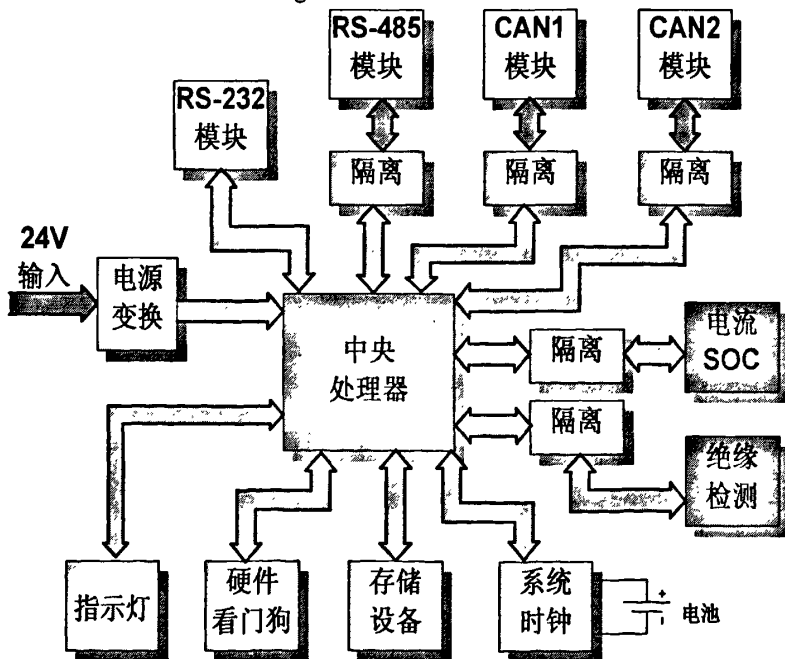


图 4-2 主控模块硬件原理图

Fig 4-2 Hardware design of main control module

路 CAN 接口，CAN0 实现车辆行驶时与整车控制器、电机控制器的通信，CAN1



则保证主控模块与车载监控显示系统以及充电过程中充电机的通信联络。另外，为了实现 PC 机监控和参数修正、程序下载等功能，主控模块上还设计了 RS232 接口。在测控模块上，除了设计有和主控模块通信的 485 接口，还增设了一路 CAN，以便和手动检测设备进行通信。

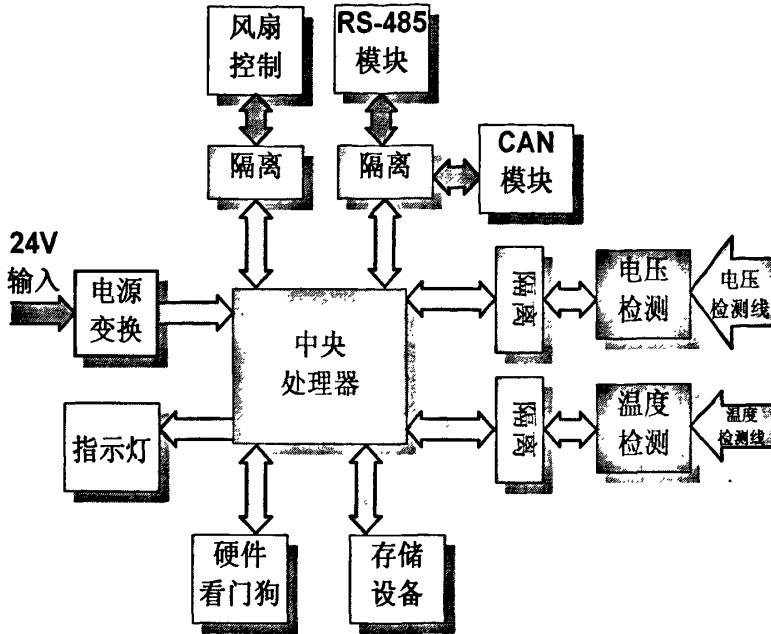


图 4-3 测控模块硬件原理框图

Fig 4-3 Hardware design of detection module

图中，电压测量、温度测量、电流测量和绝缘检测等部分直接与电池组相连接，属于高压系统；串口通讯、CAN 通讯和供电电源属于低压系统。为了确保人身安全和系统的可靠稳定运行，需要将高压系统和低压系统进行电气隔离。

### 4.1.2 主控模块硬件电路

#### 1 CPU

处理器采用 Freescale 公司 MC9S12DT128 型号 MCU (microcontroller unit)。该型号 MCU 为 16 位系统，具有低功耗、良好兼容性、运算速度提高、强有力的索引寻址、支持背景调试模式和硬件断点等特点，其内部总线为哈佛结构，内部集成了 128KB FLASH EEPROM、4K 字节的 RAM，并扩展有丰富的外围资源，包括一个串行外设接口 (serial peripheral interface)，一个 8 通道的 IC/OC 增强捕捉定时器 (IC/OC Enhanced capture timer)，两个 8 通道 10 位分辨率的模数转换器 (ADC)，一个 8 通道的脉宽调制器 (pulse-width modulator)，CAN 2.0 A、B 软件兼容模块。

芯片采用 112 管脚的封装。

在主控模块的设计中，CPU 采用 24MHz 的外部有源晶振，总线频率达到 12MHz。由于采用 5V 供电和外部有源晶振，系统具有较高的抗干扰能力。电动汽车的实际应用环境比较复杂，电磁干扰强烈，为了防止 CPU 在高于干扰情况下死机或工作异常，采用外部复位芯片来监控 CPU 的工作，保证 CPU 在异常情况下能够可靠复位，尽快恢复状态。复位芯片采用 MAX706，在 CPU 正常工作时，每 1.6s 之内给 MAX706 输入一个信号，表明 CPU 的工作状态。当 MAX706 在 1.6s 内没有收到信号，会将 CPU 的 RESET 管脚拉低，使 CPU 复位，回到正常工作状态。

## 2 电流测量

精确测量电流是准确估算电池荷电状态 SOC 的必不可少的条件。由于霍尔型的电流传感器在测量范围的低端线性度很难保证，在电池管理系统的设计中采用分流器来测量电流，在整个量程内都可以保持比较好的线性度。

国内标准的 FL-2 型分流器的满量程信号为 75mV，测量比较困难。但如果在前端加入放大电路，可能会影响信号的线性度，因此采用 CS5460A 芯片直接测量。该芯片具有 24 位的分辨率，信号输入范围 0~250mV，可以满足要求。

作为一款电表专用的测量芯片，CS5460A 芯片还可以测量能量和功率。通过软件设置之后，CS5460A 可以在每秒钟内对电压、电流信号采样 4000 次，并计算出瞬时功率。通过这 4000 次功率的累计，芯片可自行计算出这一秒钟内的能量值。在电池管理系统的设计中，将 CS5460A 的电压测量通道测量恒压源信号，电流测量通道测量分流器信号，这样测得的能量为电流与时间的积分，即电池电量的计量单位“安时 (Ah)”，可直接用于 SOC 的计算。图 4-4，为 CS5460A 的管脚配置。

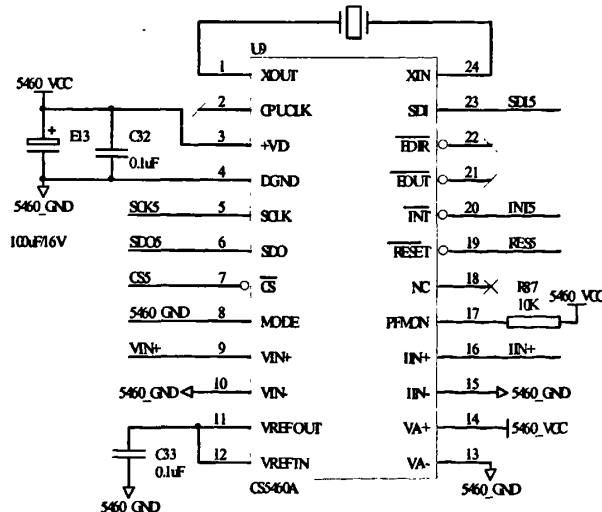


图 4-4 CS5460A 管脚配置

Fig 4-4 Pins of CS5460A

由于分流器直接将高压信号引入电池管理系统，需要将电流信号与低压系统进行隔离。为了不影响测量的线性度，设计中没有对分流器输入的电流信号进行隔离，而是将 CS5460A 与 CPU 之间的通讯进行了隔离，数字信号的隔离对测量没有影响。这样的优点是保证了测量的精确度，但降低了 CPU 与 CS5460A 之间的通讯速率。由于 CS5460A 采用 SPI 接口，需要对每根信号线进行光耦隔离，增加了系统的成本和复杂度。

### 3 绝缘检测

绝缘检测的原理和参数设计在第 3 章有详细的分析。图 4-5 为检测的主要电路。图中，电压信号测量采用 CS5460A 芯片，R98、R99、R100、R101 选择阻值为 510kΩ、功率为 2W 的功率电阻。小电阻 R102、R103，选取阻值为 200Ω、精度为 5%、低温 25ppm 的精密电阻。切换开关选用仙童公司型号为 SSH8N90 的 MOS 管， $V_{DSS}$  为 900V。另外，绝缘检测模块与 CPU 之间的各路信号都要进行隔离。

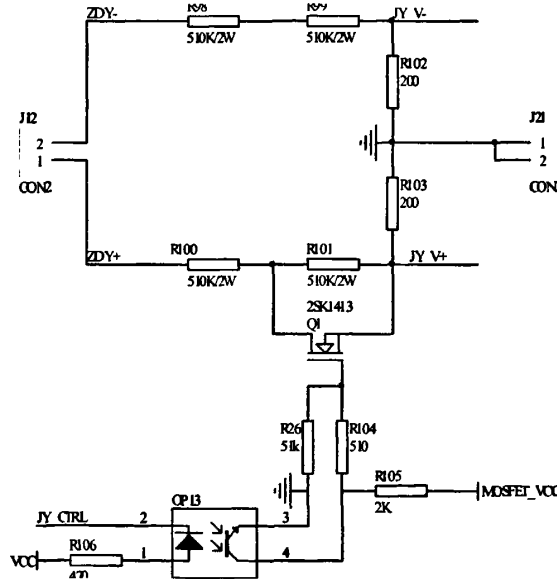


图 4-5 绝缘检测电路原理图

Fig 4-5 Circuit of insulation measurement

### 4 其他外围电路

#### (1) 电源

电池管理系统利用车载的 24V 低压电源供电，通过多路输出反激变换器得到 3 路隔离电源，输出电压均为 5V，但有功率和耐压的区别，所以不能混用。其中第一路输出的功率最大，用于 CPU 供电；第二路供 RS485 使用；第三路输出供电流检测使用。其余隔离电源采用 DC-DC 隔离模块，其中两路 CAN 均使用 B0505D\_1W；绝缘检测使用 F0515D\_1W。对于绝缘（耐压）的要求，按照电动汽车的行业标准进行设计，如图 4-6 所示。

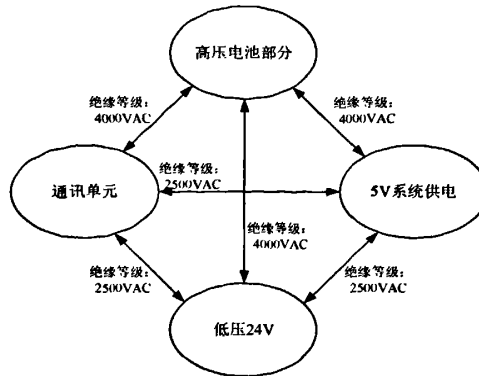


图 4-6 各电气单元间的绝缘设计

Fig 4-6 Isolation design between electric units

另外，由于车辆运行过程中会在低压电源的电压上造成尖峰，为了保证管理系统的稳定运行，需要在电源输入端加入滤波电路。

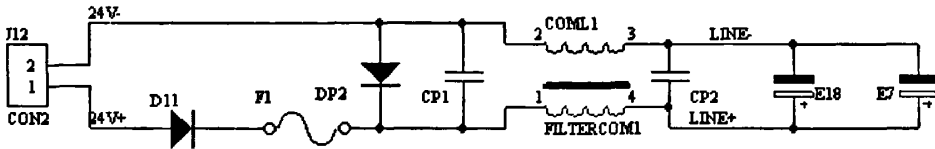


图 4-7 电源输入接口电路

Fig 4-7 Interface of input power

图 4-7 为电源输入接口电路。为了防止现场装配时反接电源线对电池管理系统造成损害，在电源处加入防反接二极管  $D_{11}$ ；保险  $F1$  在电池管理系统电源短路的情况下使管理系统脱离整车电源，不影响整车低压电源供电；为了防止高压继电器闭合及断开瞬间在电源上产生的电压尖峰，在电源输入线路前端加入 TVS 管  $D_{p2}$  吸收尖峰，加入共模扼流圈抑制共模电压。

(2) 为了记录电池的运行数据发生所对应的时间，特别是出现故障情况的时刻，系统中设计有时钟电路，采用时钟芯片  $RX-8025A$ 。 $RX-8025A$  芯片外部采用  $I^2C$  接口进行通讯。工作电压范围宽 ( $1.7V \sim 5.5V$ )，正常工作温度为  $-40^{\circ}C \sim +85^{\circ}C$ 。

为了使时钟芯片在车辆断电后仍能继续工作，保证时间的正常累计，电路选用了一支标称  $3V$  的可充电电池作为备用电源。通过两个对接的二极管  $1N4148$  控制，备用电池在  $5V$  电源断电后开始供电，而平时由  $5V$  电源供电。

(3) 数据存储。在主控模块上需要存储的数据有主控模块自身工作的系统参数以及电池运行的历史日志和故障数据记录。其中，系统参数在电池管理工作时必须准确赋值，因此采用性能好的存储芯片  $FM24C16$ ，存储空间为  $2K$  字节，可擦写次数达到  $10^{10}$  次。

对于电池运行数据的记录，选用  $ATMEL$  公司的  $AT45DB041$  芯片作为存储器。

该芯片为 FLASH 存储芯片，存储空间为 528K 字节，可擦写次数 100 万次，满足电池运行数据记录的要求。

(4) 主控模块的通信模块包括与整车控制器、电动机通信的 CAN0 接口、与车载显示系统和充电机通信的 CAN1 接口、与上位机通信的 RS232 接口以及与测控模块通信的 485 接口。

由于 MCU 内置 CAN 模块与 RS232 模块，只需要在外围电路中加入电平转换电路即可满足设计要求。CAN 通信采用的电平转换芯片为 82C250，RS232 采用的电平转换芯片为 MAX202。由于 CAN 通信线路与整车低压电源共地，为了防止整车电源上的干扰信号通过 CAN 通讯线路串入 CPU 电源影响系统正常工作，将 CAN 通信模块与 CPU 之间进行光耦隔离。RS232 为共模信号，在现场容易受干扰工作异常，因此在现场安装时采用屏蔽线，并将屏蔽层可靠接地，加强抗干扰能力。

RS485 是一种半双工结构通信总线，适用于一对多点的主从应答式通信，因此选为电池管理系统内部主控、测控模块之间的通信连接方式。采用的是 MAX485 芯片，同时为了防止线路上的干扰，对 485 通信模块和 CPU 之间进行隔离。

### 4.1.3 测控模块硬件电路

#### 1 CPU

测控模块选用的 CPU 和主控模块是同一个系列 MC9S12 的 MCU，考虑到测控模块上需使用的 I/O 数量和通信模块的要求以及成本的因素，测控模块的 CPU 选用 MC9S12C32 型号，芯片采用 52 管脚的封装。

#### 2 电压测量

对锂电池而言，单节电池电压正常工作范围大约为 3.0V~4.3V，很多场合需要串联使用。而准确估算 SOC 的重要条件之一是精确的电压测量，因此测量串联电池组单节电池的电压成为必要而又关键的技术。

测量串联电池组各节电池电压的两种结构是共模测量和差模测量。共模测量是相对同一参考点，用精密电阻等比例衰减测量各点电压，然后依次相减得到各节电池电压。这种测量方法电路简单，但是测量精度也等比例降低，累计误差较大，只适合串联电池数较少或者对测量精度要求不高的场合，对纯电动场合不适用。

而差模测量是通过继电器依次选通单节电池进行直接测量。当串联电池数较多而且对测量精度要求较高时，只能采用差模测量。由于两个测量端存在较高的共模电压，所以不能采用模拟开关选通，也不能直接测量。工业上广泛采用机械继电器实现多路电压选通，但是存在很多缺点，例如，动作速度慢，存

在明显的噪音和开关寿命的限制，需要驱动电路，重量和体积偏大。通过选用光控继电器选通各节电池电压，能够实现串联电池数较多时各电池电压的实时高精度测量，而且抗干扰能力很好。

对于多只电池串联，在测量电压需要解决的问题中，最主要问题是电压的共地问题。由于串联电池组的正负极依次相连，因此在测量时，各组电池电压存在不共地问题，对于该问题有如下的解决办法：

(1) 电阻分压

该方案为共模测量，通过电阻分压将串联电池组的单体电压转换成共地电压信号，原理如图 4-8 所示。

采用该种方案，将  $B_1$  的电压转换为  $U_1$ ，将  $B_1+B_2$  的电压转换为  $U_2$ ，将  $B_1+B_2+B_3$  的电压转换为  $U_3$ ，依此类推。因此，该方法产生的  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  等为共地信号，因此测量较为方便，只要通过多路转换开关，就可以分别采样  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  等。

假设每一路电压测量的相对误差为  $\lambda$ ，实际值为  $U_n$ ，测量值为  $U'_n$ ，电池电压为  $V_{Bn}$ ，则测量值与实际值之间存在以下关系，

$$U'_n = U_n(1 \pm \lambda) \quad (4-1)$$

$$V_{Bn} = U_n - U_{n-1} \quad (4-2)$$

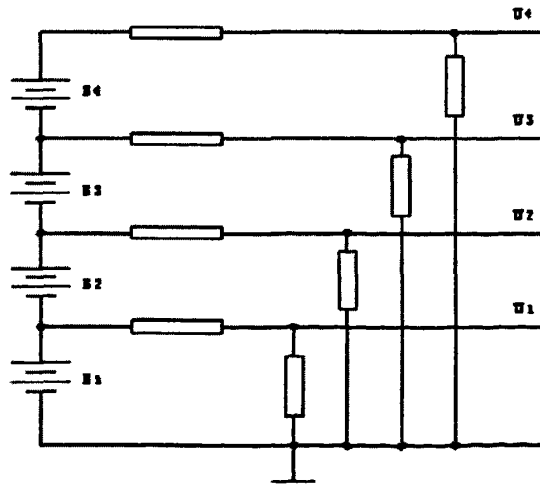


图 4-8 电阻分压方案

Fig 4-8 Voltage measurement using resistor

通过计算，得到测量的电池电压，

$$V'_{Bn} = U'_n - U'_{n-1} = (U_n - U_{n-1}) + \lambda(U_n \pm U_{n-1}) = V_{Bn} + \lambda(U_n \pm U_{n-1}) \quad (4-3)$$

当电池串联数量较多时， $U_n$  的绝对值很大，相对的误差  $\lambda(U_n \pm U_{n-1})$  也会很大，造成测量精度降低。

(2) 继电器切换

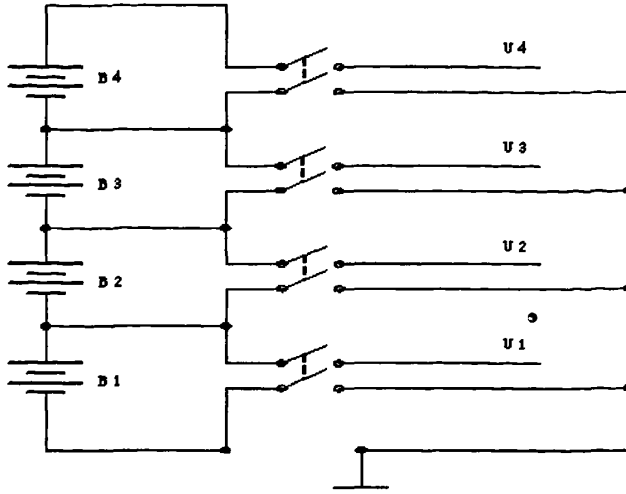


图 4-9 继电器切换电压原理

Fig 4-9 Voltage measurement using relay

采用该种方案，将  $B_1$  的电压转换为  $U_1$ ，将  $B_2$  的电压转换为  $U_2$ ，将  $B_3$  的电压转换为  $U_3$ ，依此类推。可以看出，该方法产生的  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  等尽管是非共地信号，但由于在同一时刻只有一个继电器接通，因此可将上面获得的电压作为共地信号处理，测量较为方便。该方案的原理如图 4-9 所示。目前，由于有了光控 MOS 继电器，因此实现上述电路较为简单，并且由于继电器采用了无触点开关，寿命也得到了延长。

(3) 集散式测控系统

该方案的原理如图 4-10 所示。

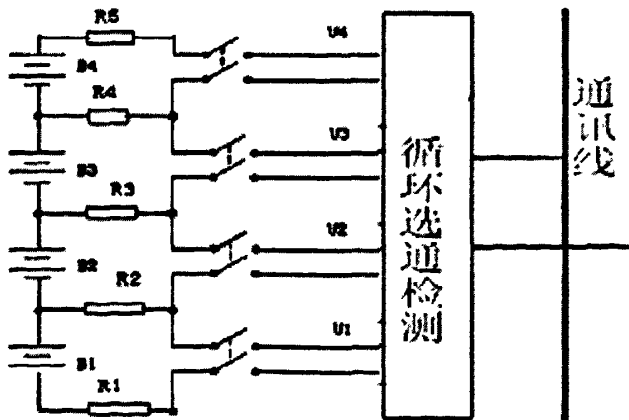


图 4-10 集散式测控系统

Fig 4-10 Voltage measurement using master-slave system

图中给出了一个测量模块的结构示意。采用该种方案时，几个电池共用一个测量模块，通过微控制器进行单体电池的依次选通，并对选通电池的电压进行测量，因此不存在共地问题。各组检测模块之间通过通讯总线相连，将测量数据传送到主机。各个测量模块与主控模块之间通过通讯线连接。由于通讯线上传输的信号为数字信号（通常为 485 或 CAN 通讯），抗干扰能力较强。由于测量模块可以安装在电池附近，模拟信号的连线可以较短，抗干扰能力有一定的提高。

上述几种方法各有优缺点，需要根据实际选择合适的方案。表 4-1 比较了三种方案的优缺点。

表 4-1 三种电压测量方案的比较

Table 4-1 Comparison of three kinds of voltage measurement

	安装	检修	累积误差	安全性	寿命	价格	电磁兼容
电阻分压	复杂	困难	大	低	长	低	一般
继电器	复杂	困难	没有	低	中等	中等	一般
集中式	简单	容易	没有	较高	长	中	高

概括来说，电阻分压和继电器切换两种方案最主要的缺点是电池的所有连线都要汇集到主机，连线较多，并且由于各个连线之间需要考虑绝缘及短路问题，因此存在布线上的困难。考虑到电动车的实际应用场合，选用了集中式的方案。

实际测量的电池每箱最多由 18 节单体电池串联而成。本系统在对电压的测量进行硬件电路设计的时候，利用 CPU 的 5 个 I/O 口选通 CPLD 芯片 XC9536 编程实现的译码器译出 32 种状态，再经过 XC9536 驱动光控 MOS 继电器 AQW214S，依次对电池进行选通测量。

由于电池的电压在 3.3V~4.2V 之间，在一般的 A/D 芯片测量范围之外。所以在测量之前，必须进行电阻分压处理。另外，为了防止电压有波动，在测量电压两端加入一个 0.1 $\mu$  的电容进行滤波。由于进行电阻分压之后降低了电压测量的精度，系统设计时选用了 MAXIM 公司的 MAX111AEWE。MAX111 使用 5V 供电，双通道模拟输入，线性度达 0.05%，其采样结果包括 14 位 AD 值，一位溢出标记位和一个符号标记位，由于单体电池的工作电压范围在 2V~6V 区间内，使用 2k $\Omega$ 、2k $\Omega$  和 1k $\Omega$  的电阻分压。在设计中使用 4.096MHz 的晶振，测量结果转换周期大约 100ms，图 4-11 给出了 MAX111 的管脚图。



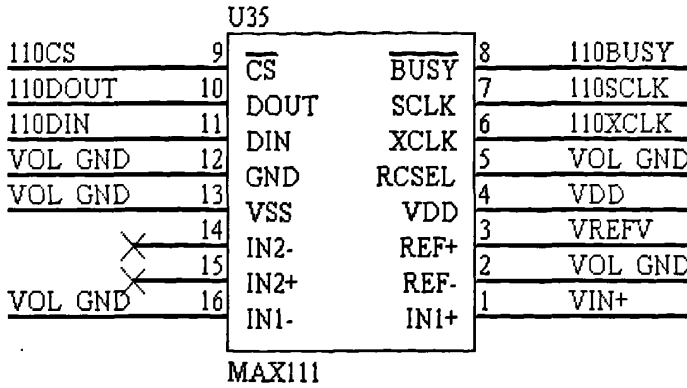


图 4-11 MAX111 的管脚图  
Fig 4-11 Pins of MAX111

3 温度测量及风机控制

电池管理系统的温度测量使用的是 DS18B20。DS18B20 的测量范围为 -50℃~125℃，精度可达 0.1℃。该温度传感器不需要额外的 A/D 转换电路，直接将温度值转换成数字量输出至 CPU。DS18B20 的转换时间与设定的分辨率有关，当设定为 9 位时，最大转换时间为 93.75ms；10 位时，为 187.5ms；11 位时，为 375ms；12 位时，为 750ms。由于电池管理系统设计指标对温度的精度要求并不是非常严格，选择 9 位的分辨率，温度测量精度为 0.5℃，转换周期 93.75ms。

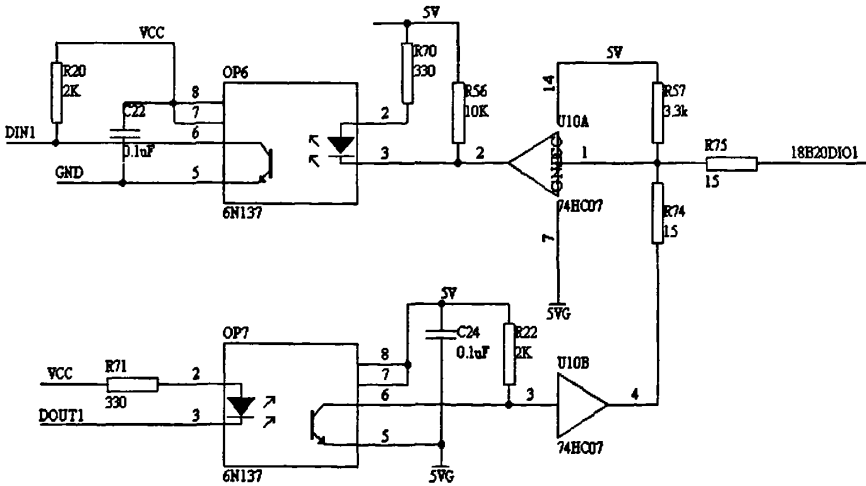


图 4-12 DS18B20 驱动电路  
Fig 4-12 Driving circuit of DS18B20

由于极柱导热性能远好于电池外壳，因此极柱温度比外壳温度更能反应电池内部的热量散发情况。为了更好的测量电池温度，在安装时将温度传感器直接连接在电池极柱上。但这样就将温度测量回路与高压系统直接连接在一起，需要对温度测量部分进行隔离。在测控模块的设计中，需要连接 6 个温度传感器，单纯

使用 6N137 隔离不能满足驱动电流的要求，因此在隔离之后采用一片 7407 进行驱动。

由于 DS18B20 与 CPU 之间的通讯采用单总线结构，只需要一个信号线就可以连接多个 18B20 传感器。这样可以节省 CPU 的 I/O 口，同时也给现场安装布线带来很大的方便。但另一方面，如果某一个温度传感器出现故障，有可能影响整个总线的通讯功能，造成总线上所有的温度传感器不能正常工作；同时，由于所有的温度传感器都连接在同一个总线上，可能会造成总线上杂散电容过大，影响通讯的时序，将信号的上升沿或者下降沿拉平。而 DS18B20 对通讯时序要求严格，信号的读取要求在 15us 内完成，如果信号的上升沿或者下降沿变得过于平缓，存在通讯错误的可能。

针对这种情况，需要适当的加大对 DS18B20 的驱动电流，尽量减小温度传感器的布线长度，并采用性能优秀的接插件以减小总线上的杂散电容。软件方面，采用 C 语言和汇编语言混编的形式，通过汇编语言来精确控制总线通讯的时序。

针对电池的散热问题，电池管理测控模块还设计有风机控制电路，通过对测量到的电池温度值的判断，控制器决定风机的开启和关闭。比如，电池温度过高时，CPU 发出开风机信号。图 4-13 中，此时 FAN 为低电平，晶体管 9014 不导通，

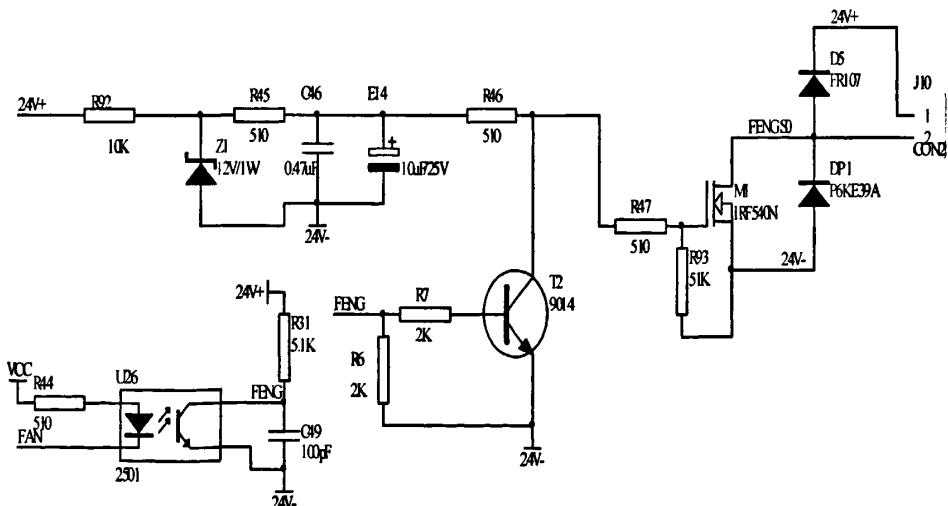


图 4-13 风机控制电路

Fig 4-13 Circuit of fan control

这样加在 MOS 管 IRF540N 栅-源极的电压的  $V_{GS}$  (2.0V~4.0V) 使得 IRF540N 导通，风机在 24V 电压电源的供电下开始工作。电路中，MOS 管 IRF540N 的  $V_{DSS} = 100V$ ， $I_D$  为 33A。

#### 4 其他外围电路

(1) 和主控模块一样，测控模块上采用铁电存储器 FM24C16 记录模块的系统参数。

(2) 和主控模块采取同样的电源设计。

(3) 测控模块的通信包括与主控模块的 RS485 接口以及与手动检测装置通信的 CAN 接口。

## 4.2 系统的软件设计

### 4.2.1 主控模块部分

#### 1 主控模块主程序

主控模块的主程序流程图如图 4-14 所示。系统上电后，主程序开始运行。首先进行系统的初始化，之后进入主循环，完成电流测量和 SOC 估算，绝缘检测，

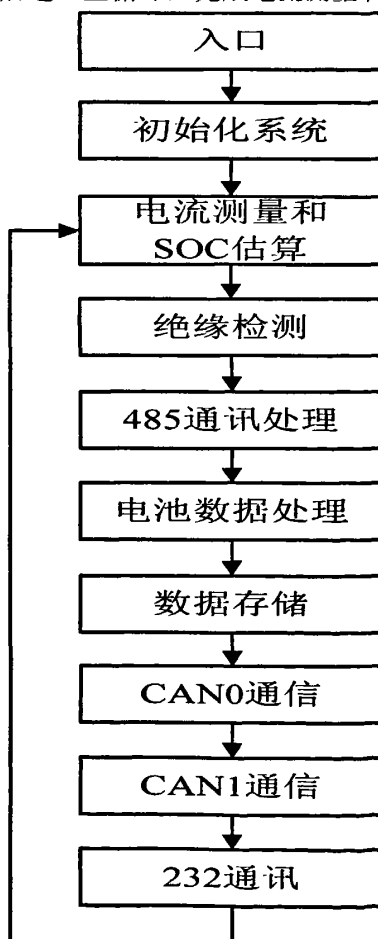


图 4-14 主控模块主程序流程图

Fig 4-14 Flow chart for main program in control module

485 通讯, 电池数据处理, 数据的存储, CAN0、CAN1 通讯和 232 通讯等功能。其中,

(1) 485 通讯是和测控模块进行的通信。在主控模块侧, 主要是发送一些命令, 并接受测控板回复的数据, 主要包括单体电池电压、电池温度等数据。另外, 还实现了通过 485 主控模块对测控模块进行参数设定和校正的功能。

(2) 在电池数据的处理部分, 主控板对从测控板接收到的电压、温度数据和自身测量的电流、SOC 等数据进行分析, 得出电池组总电压、各参数的最大最小值等, 并判断出电池的故障情况, 包括电压过高、电压过低、SOC 过高、SOC 过低、过流、过温、电池不均衡、不匹配等方面。

(3) 数据存储, 对电池运行的历史数据, 特别是故障数据进行记录。其中, 对历史数据是每 5 分钟记录一次。对故障的数据, 当发生新的故障时, 立即记录本组数据; 其他情况下每 3 分钟记录一次。

(4) CAN0 通讯, 主控模块通过高速 CAN2 和车辆的整车控制器、电动机等通信, 将电池的关键信息发送给控制器等作为控制的依据。

(5) CAN1 通讯, 主控模块通过 CAN1 将电池的全面信息提供给车载显示设备和充电机等。

(6) 232 通讯, 在 232 通讯部分, 程序上实现了对主控板进行程序下载、参数设置等功能。另外, 也可将存储的电池数据上传到 PC 机上, 以建立电池的详细数据库。

## 2 绝缘检测

对于绝缘检测, 采取出现绝缘问题时持续检测、无绝缘问题间歇检测(5 分钟)的方式。这样不仅能够及时检测绝缘状况, 还可以延续开关管的使用寿命, 也减轻 MCU 信息处理量。

通过将测量时间计数器的默认值设为 55000, 在电池管理系统上电的时候, 系统自动地进行一次检测, 若测量到绝缘数值问题, 会持续地进行检测。当绝缘问题连续达 3 次, 认为电池组有绝缘故障, 分等级给出报警信息。当没有绝缘问题时, 每 5 分钟定期检测一次。

每次测量时, 第一组数据为 MOSFET 断开时的测量值, 第二组数据为 MOSFET 导通时测得的数据。转换后, 通过判断 MOSFET 的是否为导通状态, 决定是否开始绝缘计算。

为了避免 MOS 管切换时带来的电压波动, 每次切换后, 舍弃前两次数值, 读取第 3 次测量值作为计算用值, 以提高检测的准确性。

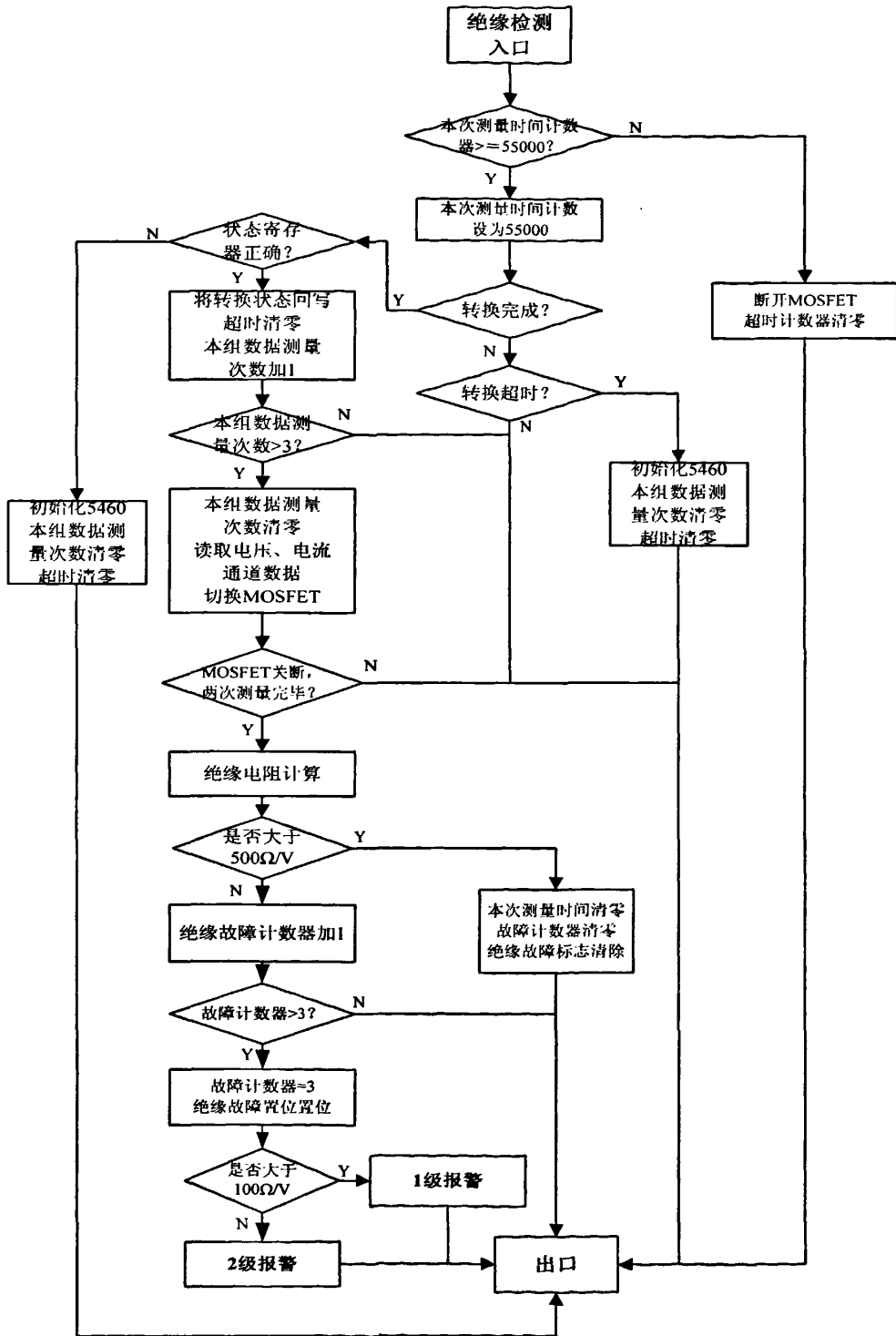


图 4-15 绝缘检测流程图

Fig 4-15 Flow chart for insulation detection

3 SOC 估算

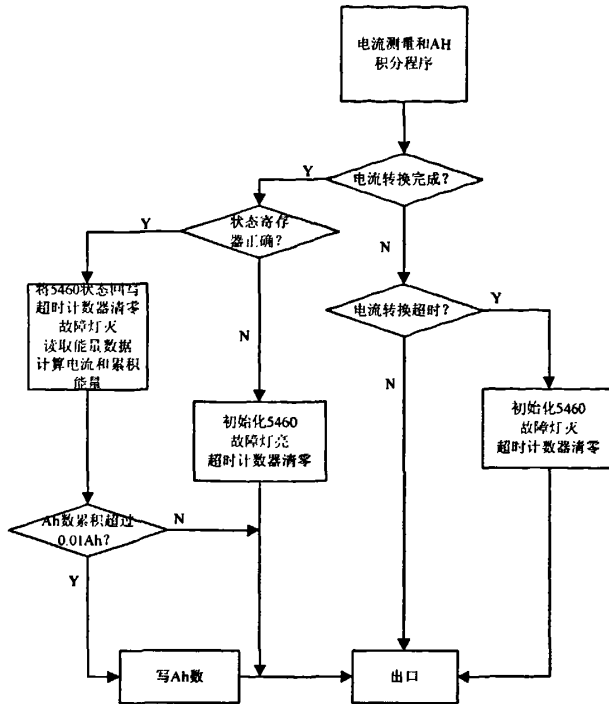


图 4-16 安时积分流程图

Fig 4-16 Flow chart for AH integral

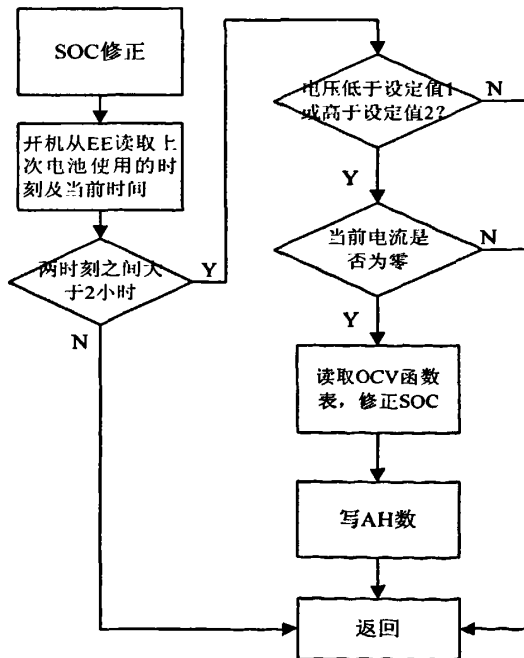


图 4-17 开路电压修正流程图

Fig 4-17 Flow chart for OCV modification

SOC 估算的程序流程图如图 4-16、图 4-17 所示。

在电池管理系统运行的大部分过程中，通过安时积分来实现 SOC 的估算。在判定 CS5460A 转换正常后，读取能量数据，当  $\Delta Q$  超过 0.01Ah，累计到 AH 数中。

另外，通过定期修正来消除安时积分的累积误差。通过判断上次电池使用时间是是否大于 2 小时，来消除电池极化电压的负面影响。通过判断当前电池工作电流是否为零消除欧姆压降的干扰。从而能得到较准确的电池内电压。当电压值处于 OCV-SOC 曲线的低端和高端时，调用子程序 OCV-SOC 函数对 SOC 进行修正。

#### 4 充电控制

充电过程控制流程图如图 4-18 所示。充电开始之前，充电机首先向 BMS 提出充电请求，BMS 依据电池的当前状态和故障信息对能否充电进行判断，确认可

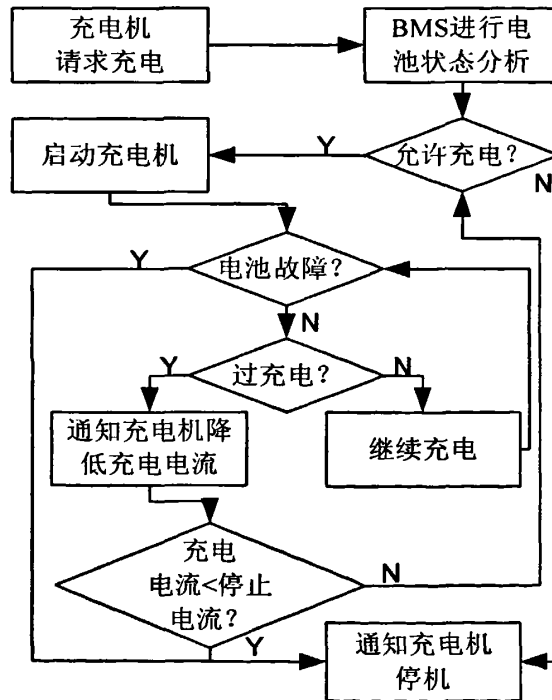


图 4-18 充电过程控制流程图

Fig 4-18 Flow chart for charge control

以充电后，返回允许充电信息，充电开始。充电过程中，BMS 实时地将电池的当前状态和分析结果传送到充电机，当 BMS 检测到电池出现过充电的时候，即会通知充电机降低充电电流。当充电电流低于设置的停止电流的时候，充电结束，保证所有电池不出现过充电现象，保障了电池充电的安全和使用寿命。当 BMS 检测到故障(电池过电压、绝缘故障和过温等)的时候，会立即通知充电机紧急停机，防

止电池在故障情况下持续充电而导致安全隐患。同时为了保证充电的安全性，如果 BMS 和充电机系统之间出现通讯失败持续时间超时(如 10s), 为了保证充电的安全，充电机自动停机。

## 4.2.2 测控模块部分

### 1 测控模块主程序

测控模块的主程序流程图如 4-19 所示。在系统上电，完成初始化后，如果检测到校准板，进入电压校准程序。在一般时候，循环地进行电压检测、温度测量和风机控制。当有 CAN 或 485 中断时，进行 CAN 通信或 485 通信处理。

其中，通过 485 通信，测控模块响应主控模块的命令，并将本箱电池的电压、温度数据发送给主控板。另外，还可以实现测控板自身系统参数的设定和电压的校准。通过 CAN0，测控板可以将电池的温度、电压数据发送给手动检测装置上，为现场装配和维护提供了便利。同时，作为扩展功能，在程序上也实现了通过手动检测装置对测控板进行参数设置和单通道电压校准。

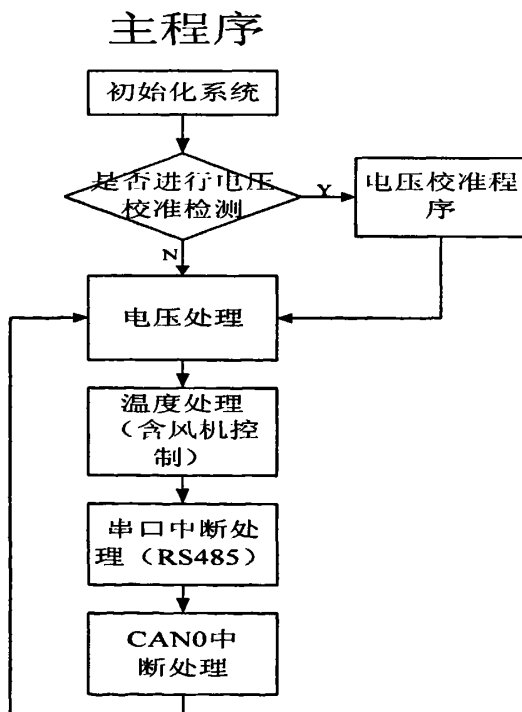


图 4-19 测控模块主程序流程图

Fig 4-19 Flow chart for main program in detection module

### 2 电压测量



电压测量部分主要包括光控 MOS 继电器选通、切换和 MAX111 的驱动程序。

由于从 MAX111 读出的仅仅是 AD 转换值，并不能直接表示成电压，需要做一定的换算：

$$\text{实际值1} * 10000 * 100 = \text{Gain} * \text{测量值1} + \text{Offset}$$

$$\text{实际值2} * 10000 * 100 = \text{Gain} * \text{测量值2} + \text{Offset}$$

其中测量值为未经处理的 15 位 A/D 转换结果，实际值用万用表测量，精确到 0.01V。Gain 和 Offset 由上位机初始化时计算，Gain 用两个字节的无符号数表示，因为 Offset 有可能出现正负，用 4 字节补码表示。

该部分程序是用来读出 MAX111 测得的各节电池的电压值。将数据存入相应数组之前，进行数据的判断。在正常工作情况下，如果 A/D 转换值大于 65000 或者小于 1024，很大可能由于测量线路悬空或芯片工作异常，即没有测量到实际电压值，将 0 赋给相应数组。

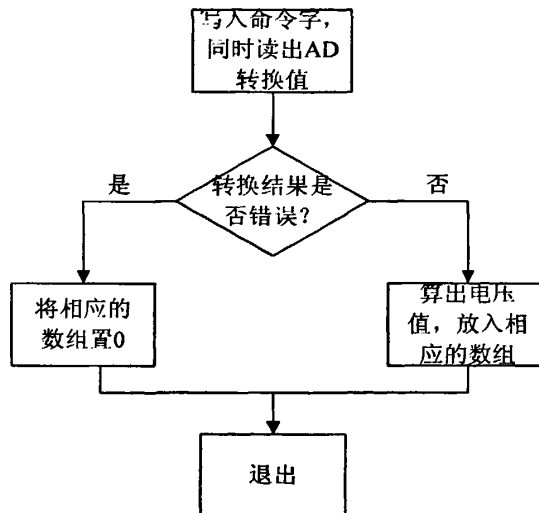


图 4-20 电压测量框图

Fig 4-20 diagram for voltage measurement

### 3 温度测量和风机控制

温度测量和风机控制的流程图如图 4-21 所示。当程序进入温度测量入口时，首先判断转换时间是否达到 100ms。当设定为 9 位分辨率，DS18B20 的转换完成时间为 93.75ms。如果已经转换完成，则发出读温度数据命令。为了保证读取的准确性，最多读取 5 次。在读到返回的温度数据之后，对 DS18B20 传感器进行故障判断，并通过温度状态灯对故障情况进行显示。当所有传感器返回的数据异常时，状态灯全灭；部分时，状态灯常亮。只有所有的 DS18B20 返回正常数值，状态灯才正常的闪烁显示。

程序还对温度值进行了处理，得到最高温度。如果连续 3 次测得最高温度超

过温度上限时，并将温度故障字和开风机状态标志置位。

对于传感器的故障情况——传感器丢失和传感器故障，程序分别置不同的故障标志并置开风机标志位。同时，当温度超过开风机阈值时，开风机标志位也置 1。

在监测到风机标志为 1 时，程序启动风机对电池强制风冷。直到电池温度降至关风机阈值以下，风机才关闭。

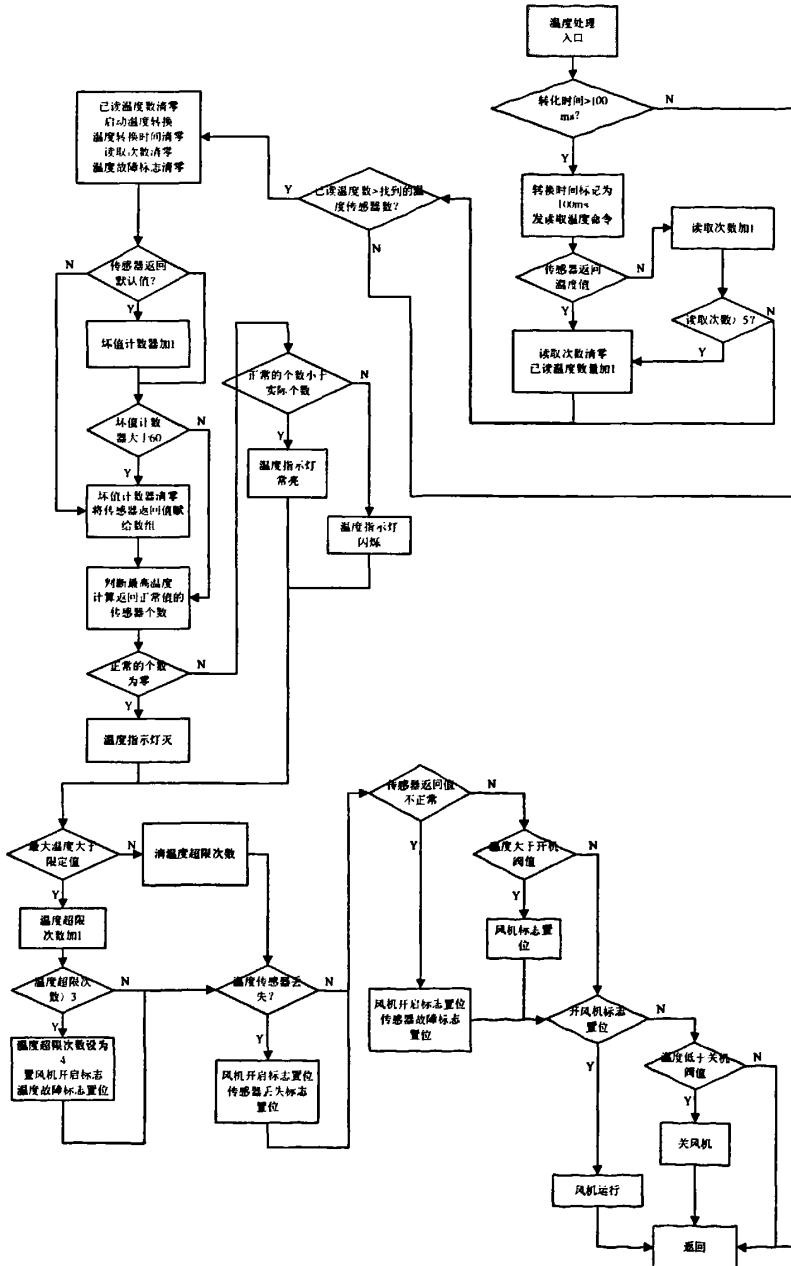


图 4-21 电池温度管理流程图

Fig 4-21 Flow chart for battery temperature management

## 5 管理系统的现场运行试验

### 5.1 现场运行情况

将锂电池使用的管理策略嵌入到锂电池管理系统中，并装在奥运纯电动大巴车上进行实际考核。在 08 年奥运会期间，共有 50 辆装有这套电池管理系统的纯电动大巴车投入到电动公交的试运营，反应良好。

(1) 在整个奥运会运营期间，50 辆纯电动公交车的锂电池系统实现“零故障”安全运行，为电动车的可靠、稳定运营提供了有力的支持。从锂电池合理安全利用角度出发而开发的锂电池管理策略初见成效。

(2) 在奥运期间高温的环境下，锂电池系统运行正常，电池的温度基本上都在允许的范围之内，电池管理系统的热管理发挥了一定的作用。

### 5.2 试验验证分析

#### 5.2.1 电池充电数据分析

为了具体验证 BMS 和充电机配合充电模式的效果以及检验 SOC 估算的准确性，随机抽样了一辆纯电动大巴车作为分析对象，分析它的充电过程控制。

电动车编号：8101 号；数据来源：公交充电站监控室

对电池组充电的数据进行分析作图，得到电压、电流和 SOC 对时间的曲线如图 5-1 所示。从图 5-1 中可以清楚地看出，在充电过程中，由于电池组各单体电池不完全一致，某只电池与电池组中其它电池之间的电压差异之间拉大，对应着图中最高电压所代表的曲线。当电池的充电容量达到约 300Ah 的时候，该只电池的电压达到最大允许充电电压(4.23V)。如果采用基于电池组端电压的充电控制模式，则电池组的充电电流并不会减小，因为此时电池组的电压还未达到最大允许值，对应的平均电压刚达 4.10V，所以电池组还会保持恒流充电，那么已达到最高允许充电电压的单体电池就很有可能会出现严重过电压、过充电现象，从而加速了电池的性能下降，并且使得充电过程的安全性大大降低乃至出现安全事故。而采用了本文提出的 BMS 和充电机配合的充电模式后，即便串联电池组出现了一致性问题，也能有效的保证组内所有电池在充电过程中不出现过电压的情况。在图中，由于 BMS 及时有效地检测到了该支电池的电压达到最大允许充电电压，并将该信息传送到充电机，通知充电机降低充电电流，从而保证了该支电池的电压始终保持在限制电压之内，有效地防止其出现过电压的情况，保证了电池充电过程

的安全。

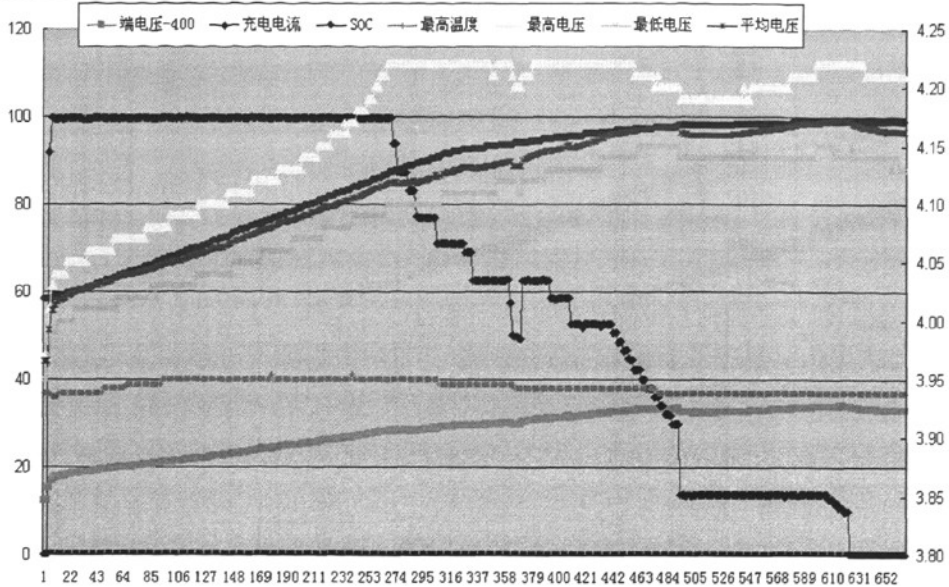


图 5-1 BMS 和充电机配合充电模式下，串联电池组的充电曲线

Fig 5-1 Charge curves on the cooperative mode

另外，从图中也可看出，在充电的过程中电池的电量逐步增加，SOC 也随之上升。并且在恒流充电阶段，上升的速度比恒压阶段快，这是因为恒压阶段的电流逐渐减小，单位时间内充入电池的电量自然会减少。在充电结束的时刻，电池充满了电，充电机的充电电流递减到零并停机。而这时的 SOC 刚好累积到 100%，即显示电池充满了电，从而也证明了 SOC 估算的准确性。

### 5.2.2 绝缘检测的验证

验证的方法：奥运纯电动汽车实际工作电压在 500V 左右，因此在绝缘检测模块的正负母线间接入 500V 电压进行试验。通过在模块运行过程中人为地向正负母线间分别并入一系列的标准电阻检查绝缘检测模块能否正确地进行故障报警，从而验证绝缘检测的实际效果。

根据国际电动汽车绝缘标准，将绝缘等级分为三级：2 级——绝缘电阻小于  $100\Omega/V$ ；1 级——绝缘电阻在  $100\Omega/V$  与  $500\Omega/V$  之间；0 级——绝缘电阻大于  $500\Omega/V$ 。接入电压为 500V，可以算出对应的绝缘报警电阻值界限点分别为  $50k\Omega$ 、 $250k\Omega$ ，因此可在小于  $50k\Omega$ 、 $50k\Omega\sim 250k\Omega$ 、大于  $250k\Omega$  的范围各取几个典型阻值进行试验，检查绝缘检测系统能否准确地分故障等级报警。下表是试验中的一组测试数据。

表 5-1 绝缘检测试验数据

Table 5-1 Data of insulation measurement

正 母 线	并入电阻(k $\Omega$ )	444	304	204	100	82	67	41
	测量电阻(k $\Omega$ )	441	303	203.5	101	83	68.5	43
	误差(%)	0.7	0.3	0.24	1	1.2	2.24	4.9
	应报故障(级)	0	0	1	1	1	1	2
	实报故障(级)	0	1	1	1	1	1	2
负 母 线	并入电阻(k $\Omega$ )	438	306	204	99	82	67	41
	测量电阻(k $\Omega$ )	437	308	206	101	84	68.8	43
	误差(%)	0.2	0.65	0.98	2.02	2.44	2.7	4.9
	应报故障(级)	0	0	1	1	1	1	2
	实报故障(级)	0	0	1	1	1	1	2

试验结果表明, 绝缘检测系统实现了对蓄电池组和车辆底盘之间绝缘电阻的检测, 并且能够检测的范围比较宽。虽然在检测精度上有些误差, 但能够正确判断电动车辆的绝缘等级, 从而满足电动汽车电气绝缘性能检测的要求。

## 6 结论

本课题隶属于 863 项目“车用动力蓄电池管理系统核心关键技术及可靠性研究”(项目编号: 2007AA11A103), 以奥运纯电动大巴为应用背景, 研究开发锂电池管理系统。

### 6.1 总结

本文主要完成了以下的研究工作:

(1)研究了锂离子电池的基本工作原理, 并定性地分析了影响锂电池性能利用和安全性的几个方面的因素, 试着从内部机理去解释相关的现象。通过对电池内部特性的理解, 为锂电池的管理策略奠定了基础。

(2)论文在研究锂离子电池特性时, 重点测试了电池在不同情况下的 OCV 曲线, 通过充电与放电状态下、不同温度下、不同新旧程度的锂离子电池 OCV-SOC 特性的对比测试, 验证了结论——电池的 OCV 与荷电状态保持单调、稳定的关系, 基本上不受其它因素影响, 这样就为电池的 SOC 计算提供了一种方案。

(3)在对电池的内部原理初步了解之后, 基于电池实际使用中的一些问题, 从锂电池 SOC 估算、热管理、电池组绝缘检测和锂电池组充电模式 4 个方面提出优化电池的管理策略。

SOC 的估算, 在比较、分析目前的估算方案优缺点后, 考虑到纯电动汽车锂离子的应用环境, 采用了安时积分和开路电压修正的综合方案。对于开路电压的获取, 采用了充分静置的方法来消除极化电压的影响, 而对于欧姆压降, 只要电流为零, 就可以除去。另外, 为了取得较好的修正效果, 论文提出在对应于 OCV-SOC 曲线上电压变化率大的位置进行修正, 避免 OCV 的误差带来较大的 SOC 修正误差。

热管理, 论文在分析温度对电池性能和安全性的影响基础上, 提出高温下强制制冷和低温下充电先进行小电流预充电的策略。

电池组绝缘检测, 为了避免动力电源漏电对车上人员和低压设备的不良影响, 系统设计了绝缘检测, 使得能够实时了解电池组的绝缘状况, 及时进行维护。方案是在原有方案的基础上的进一步改进, 由双边电阻切换改为单边固定电阻切换。在减小检测装置体积、降低成本的同时, 保证了满足电动汽车绝缘检测的性能要求。

在电池管理和充电机配合充电方面, 分析了目前基于电池组端电压的充电模

式的弊端，由于锂电池的抗滥用能力差，表现得尤为明显，很容易造成过充电而对电池的性能和寿命造成损伤。在这基础上，提出了 BMS 和充电机配合的充电模式。BMS 可以实现电池参数的测量和状态的判断、通过对电池数据的处理，电池管理可以获得当前电池故障情况，这对电池的使用是很重要的。如果不知晓或忽视了电池的异常情况而按原来的方式使用电池，势必会造成电池的损伤乃至发生安全事故。通过电池管理和充电机的配合，电池管理将电池的关键数据和故障信息发送给充电机作为充电控制的依据，从而实现电池的安全充电。

(4)进行了锂电池管理系统的软硬件设计，由于在纯电动汽车上电池布局比较分散，电池管理系统采用集散式系统设计，测控模块布在电池箱附近，实现该箱电池单体电压测量、温度测量以及实施必要的热管理。主控模块上完成电流检测、绝缘检测。主控、测控模块之间通过 RS485 来传递数据。另外，在主控、测控模块上分别设计有丰富的通信接口。整个电池管理系统实现了测量、估算、预警和通信等四大功能。

(5)将上述的 4 个方面的策略嵌入到电池管理系统中进行实际装车考核，在奥运会期间，实现“零故障”运行。另外，文章还给出了电池组充电模式、电池组绝缘检测的数据验证分析。

## 6.2 对今后工作的思考

由于各方面的原因，电池的管理仍需要进一步地改进和完善，主要有以下几个方面：

(1)在锂电池组的管理中，本文首先是侧重于电池的安全使用。在保障了电池使用安全的同时，也存在着电池容量、能量未能充分利用的不足。解决这一问题的途径是，精确估算电池的状态，对电池的健康状态 SOH 进行更科学的评估。当对电池性能有了更科学的在线评价，就可以将电池的使用控制精准地控制在某一范围内，即充分发挥了电池的效能，有保障了电池的使用安全。

(2)对于充电模式而言，本文提出的 BMS 和充电机配合的充电模式还只是一次有效的尝试。对于电池而言，充电的目标是安全、高效、快速和保障电池寿命。其中，高效主要指的是充分利用电池的容量，提高电池的能量利用率。快速则在安全和寿命的前提下，尽量缩短充电时间，降低运营成本。对于这两点，需要对电池进行更全面的测试研究、建立合理的电池模型，特别是模型参数的准确识别。在这基础之上，研究电池的最优充电电流算法，实现电池管理系统计算出电池的最佳充电电流并将电流指令发送给充电机，控制充电机的充电。

## 参考文献

- [1]雷惊雷等. 电动车、电动车用电源及其发展战略. 电源技术. 2001.2 Vol.25 No.1. P40
- [2]胡信国. 动力电池进展. 电池工业. 2007.4. Vol.2. P113
- [3]Gang Ning, Ralph E. White, Branko N. Popov. A generalized cycle life model of rechargeable Li-ion batteries. *Electrochimica Acta*[J]. 2006. 51. P2012–2022
- [4]Gi-Heon Kima, Ahmad Pesaran, Robert Spotnitz. A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*[J]. 2007. 170. P476–489
- [5]R. Spotnitz, J. Franklin. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*[J]. 2003.113.P81–100
- [6]W.B. Gu, C.Y. Wang. Thermal–electrochemical modeling of battery systems. *J. Electrochem. Soc*[J].2000.147(8).P2910–2922
- [7]A. Kawamura, T. Yanagihara. State of charge estimation of sealed lead-acid batteries used for electric vehicles. *Proceedings of the 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*[C].Fukuoka, Japan. 17–22 May 1998. P583–587
- [8]S. Bhatikar, R. Mahajan, K. Kipke, V. Johnson. Neural network based battery modeling for hybrid electric vehicles. *Proceedings of the 2000 Future Car Congress*[C]. Arlington. VA,2–6 April 2000
- [9]H. Chan, D. Sutanto. A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicle power systems. *Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. Singapore. 23–27 January 2000. P470–475
- [10]I Hsum Li, Wei Yen Wang, Shun Feng Su, and Yuang-Shung Lee. A Merged Fuzzy Neural Network and Its Applications in Battery State-of-Charge Estimation. *IEEE Transactions On Energy Conversion*[J]. 2007. VOL. 22. NO. 3. P697-708
- [11]K.T. Chau, K.C. Wu, C.C. Chan. A new battery capacity indicator for lithium-ion battery powered electric vehicles using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Energy Conversion and Management*[J]. 2004. 45. P1681–1692.
- [12]Sabine Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen, *Methods for State-of-Charge determination and their applications. Journal of Power Source*. 96(2000). P113
- [13]Shalini Rodrigues, N. Munichandraiah, A.K. Shukla, A review of state-of-charge indication of batteries by means of a.c.impedance measurements, *Journal of Power Sources* 87(2000), P12 - 20
- [14]Cheng-Hui Cai, Dong Du, Zhi-Yu Liu, Hua Zhang. Modeling and identification of Ni-MH battery using dynamic neural network. *proceeding of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Beijing, 2002, P1594
- [15]潘磊, 姜久春, 李景新, 等. 电动汽车智能无源接地检测装置的研制. *电气传动自动化*. 2003. 25(4). P47-50
- [16]黄勇, 陈全世, 陈伏虎. 电动汽车电气绝缘检测方法的研究. *仪器仪表与检测*. 2005. 4. P93-95
- [17]王锦忠. 电动汽车绝缘性能检测装置的研制[学位论文]. 北京. 北京交通大学. 2006. p56