

摘要

动力电池作为电动汽车的关键部件，对整车动力性、经济性和安全性都有重大影响。车载电池系统在实际应用中均由多节电池单体串联而成来保证电动汽车具备足够高的输出电压。然而由于生产工艺的制约，各单体电池之间不可避免地存在不一致性。在实际使用中这种不一致性将会逐渐拉大，出现恶性循环，成为严重影响动力电池性能和寿命的基本问题，必须通过电池管理系统对不一致性问题进行有效的检测和管理。

动力电池系统不一致性问题的实质在于电池系统中各单体因工作在不同环境工况下导致寿命衰减程度各不相同，对电池不一致性问题的研究，最终归结到单体电池的寿命衰减特性和机理的研究上来。同时借助电池均衡措施，避免对单体电池的滥用以及单体电池之间不一致性的无限制扩大。本文开展基于电池寿命特性的电池不一致性研究，改进和完善电池管理系统的作用，旨在控制和降低动力电池系统的不一致性，最大限度发挥动力电池的性能。

本文针对电动汽车高功率型锂离子动力电池单体及电池组，从电池系统电化学特性出发，通过开展单体电池加速寿命实验，建立起电池循环寿命的评价指标，初步获得单体电池的寿命特性，确立了基于寿命实验和模型辨识的单体电池寿命估计方案。结合电池寿命实验结论，本文分析电池组的不一致性具体表现，引入统计学概念对电池组不一致性进行定义，初步确立了电池系统不一致性量化体系；并对电池组不一致性的具体影响和控制措施进行探讨。为实现对电池系统不一致性的管理和控制，本文首先在已有的软硬件基础上改进了下层电池管理系统（LECU）方案，针对不同电池系统设计通用的单体电池电压巡检系统；其次以电池组不一致性为参考依据，重点研究各种锂离子电池均衡方案，测试比较其特性和使用范围，确立了电池均衡方案选用原则，并设计了电池管理系统的均衡策略，为不同类型电池的管理系统设计提高参考。

最后，本文对进一步的工作方向做了简要讨论。

关键词：电池管理系统 电池寿命实验 不一致性 锂离子电池 电池均衡

ABSTRACT

As an important component of electric vehicles, the power batteries have great effects on the power performance, economy and security of the whole vehicle. Power batteries applied in electric vehicles are usually in series by tens of batteries to provide enough voltage for electric vehicles. However, due to the production technology, the difference among single batteries exists inevitably. More critically, the difference of their performance will be enlarged during use. As a result, the positive feedback shows up, makes the difference larger and larger, and has a serious influence on battery performance and cycle life. Battery management system as an important component of the battery system should monitor and manage the difference of battery system.

The essential of battery difference is the difference of battery degeneration due to battery different working condition. So the research of battery consistency can be turned to the cycle life degeneration study of single battery. Furthermore, the battery balance module can be applied to avoid battery abuse and the raising difference without limit. According to Single Batteries cycle Life character, this paper studies the battery consistency, ameliorates the effect of battery management system, hoping to control and reduce the battery difference, let battery output its maximum performance.

This paper focus on high power battery cells and battery modules, analyzes the battery electrochemical performance characteristic. We organize and develop the power single battery accelerate cycle life test, establish the evaluating index of battery cycle life. Based on the experimental data, the single battery cycle life character is summarized originally. The single battery cycle life estimation algorithms are confirmed by experimental data and model identification. This paper analyzes the concrete presentations of battery consistency, determines the mathematic definition of battery consistency In statistical language, discusses its serious influence and puts forward some control measures. In order to realize the management of battery consistency, this paper improve the Local Electric Control unit (LECU) scheme based

on the existed hardware & software structure. First, a universal LECU scheme is designed for all kinds of battery systems. Then we investigate different kinds of battery balance modules particularly. According to the battery consistency, we compare the character and use scope of battery balance modules, establish their selection principle. Furthermore, the balance control strategies are drafted for the design of battery management system.

In the last part, the current problems and future study direction are briefly discussed.

Key Words: battery management system, battery accelerate cycle life test, battery inconsistency, battery lithium-ion battery, battery balance

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：
2009年3月15日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

签名：徐伟
2009年3月15日

第1章 绪论

1.1 车用动力电池的发展状况

电动汽车是 20 世纪最伟大的 20 项工程技术成就中前两项技术的融合,即“电气化”和“汽车”的融合产物。电动汽车具有低噪声、几乎零排放、综合利用能源等突出的优点,是当今解决能源、环保等问题的重要途径,无疑成为汽车工业未来的发展方向。现代电动汽车一般可分为三类:纯电动汽车(PEV)、混合动力汽车(HEV)、燃料电池电动汽车(FCEV)。它们各有自己独特的特点以及不同的应用范围,处于不同的开发阶段^[1-3]。

电动汽车作为机械、电子、能源、计算机、汽车、信息技术等多种高新技术的集成,是典型的高新技术产品,其最终目标是实现智能化、数字化和轻量化。目前,研制和开发的关键技术主要有电池、电动机、电动机控制以及能量管理技术等。其中,车用动力电池技术越来越成为电动汽车的发展瓶颈,是一直制约电动汽车发展的关键因素。与动力电池相关的技术一直是电动汽车研究的重要课题,受到广泛关注^[4-6]。

电池作为纯电动汽车的动力源泉,为电机提供能量。同时,与电池在混合动力汽车的应用类似,考虑到燃料电池发动机的工作特点以及回收制动能量,燃料电池汽车也可配备相应的动力电池作为辅助动力源。因此,电池在电动汽车中的作用还体现在^[3]:

- 1) 提供内燃机、燃料电池发动机甚至汽车起动所需的能量;
- 2) 在汽车加速或爬坡时,提供一部分辅助功率;
- 3) 回馈制动时,吸收由电机逆变而来的电能;
- 4) 由于内燃机取消了怠速,在汽车停车但未关机时,为转向、空调等系统提供能量。

在电池 100 多年的发展历史中,出现了多种多样的电池,而这其中适合于车用的并不多,主要有下面几种:铅酸电池、镍镉电池、镍氢蓄电池、锂离子电池。除了以上以电化学原理构成的电池以外,还有超级电容和飞轮电池这两种以物理方式储能的装置在电动汽车研究中受到了广泛重视^[6]。汽车工业对车用动力电池的性能有着严格的要求,主要集中在安全性、高功率充放电能力和长

寿命等方面，同时还要求化学电源不污染环境、充电操作方便、电源内阻小、自放电率低、抗震性好、对环境温度变化不敏感，易于调试和维护等。

目前，动力电池的造价和使用寿命问题是制约电动汽车推广应用的最主要因素。解决上述问题，除了依靠基础科学，材料科学和制造工艺的突破外，在当前的技术条件下，更主要的是加强对动力电池的深入研究，并在此基础上充分发挥电池管理系统的性能和作用，使电池各方面性能达到最优化，满足电动汽车实际条件下的要求^[5,7]。

1.2 车载电源管理系统的现状

随着电动汽车的发展及产业化，车载电池管理系统将具有巨大的市场需求，对化学电源学科也将提出更高的要求。用来对电池组进行安全监控及有效管理，提高电池的使用效率，以达到增加续驶里程、延长电池使用寿命、降低运行成本的目的的电池管理系统能够进一步提高电池组的可靠性。电池管理系统在电动汽车发展的同时，其技术也取得了长足的进步^[1,2]。

早期的电池管理系统一般只具有监测电池电压、温度、电流的简单功能。随着先进电池在电动汽车中应用的推广，对电池管理系统的要求越来越高，电池管理系统的功能也越来越强。电动汽车事业的蓬勃发展，给电池管理技术的发展带来强大动力。经过长时间广泛的研究和装车应用，人们对电池的认识增强，对电池的管理也日趋有效，电池管理系统的雏形已经建立，人们对其的功能已有明确的定义，其重要性也得到充分的肯定。电池管理系统已经从监控系统逐渐向管理系统转变^[2,3,8]。

历经数年的研发，研究人员对电池的荷电状态 SOC (State of Charge) 估算取得了一定的成果，并在电动汽车实际应用中得到了验证^[8]。而在动力电池另一大问题——电池使用寿命及其估计上尚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，这极大地限制了电池管理系统功能的进一步提高，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汽车事业的推广^[9]。

对电池寿命模型的研究日渐成为大家关注的课题。从整体而言，当前对电池寿命模型的研究还处于初步阶段，没有系统的理论支持，也未产生具有普遍

价值的通用电池寿命模型。但可以看到，国内外都明显加强了对这方面的研究，取得了阶段性的成果。例如：较早前提出的根据电池电化学特性，基于差分方程的精确电池模型；针对电子设备用锂电池，Baler Rakhmatov 等人提出的基于扩散理论的解析模型，可以对任意给定负载精确预测锂离子蓄电池寿命^[9]；对于我们关注的动力电池的寿命模型，在美国 Argonne 国家实验室和 Idaho 国家实验室主导下的美国能源部发起的 FREEDOMCAR 计划中，系统地给出了进行电池寿命试验的参考步骤和相应数据处理方法，对寿命实验的开展具有重要的参考价值^[10-12]。

研究发现，动力电池组的使用寿命大大低于单电池的使用寿命，其很大程度上是由于电池的不一致性造成的。动力电池的不一致性是指将相同的单电池组成电池组后，其容量、电压、内阻等参数存在一定的差别。分析电池不一致性的产生原因可知，除去制作工艺的问题，不一致性问题很大程度上是因为运行过程中的各方面差异造成的。此时，通过电池管理系统的控制，努力消除不一致性带来的影响，对解决该问题有着至关重要的意义^[13]。

目前，对于电池不一致性研究主要集中在对单电池电压不一致性研究。其优点是参数易检测，且对于蓄电池而言，电压的获得也可推得电池荷电状态 SOC。另外，介于电池本质上属于电化学系统，有研究机构开始针对单电池的阻抗不一致性开展研究。其侧重于电池的电化学特性，力图从本质上研究电池的不一致性问题。一般认为，阻抗谱特性与电池的容量，寿命有着密切关系^[9,13]。

在电动汽车上实现电池一致性的另一难点是电动汽车动力电池的均衡技术。要实现单体电池的均衡控制，均衡器是电池管理系统的核心部件，离开均衡器，管理系统即使得到了电池组测量数据，也无所作为，也就无所谓管理。随着电动汽车技术的不断发展，电池组均衡技术和均衡装置的需求已经迫在眉睫，国内外高校和相关公司已有许多研究，但技术尚未成熟^[14]。

目前在电动汽车领域，国内的单体的制作水平与国外水平相差不大，但国内电池系统的一致性水平还不够好，电池管理系统的系统建模，控制策略研究水平与国外相差较大，这些都影响着电动车的市场化进程。主要原因除了产业起步较晚，还在于管理系统的研发与电池的研发生产之间的合作、了解程度不够。在国家“十五”和“863”计划电动汽车重大专项中，将电池及其管理系统设为一个项目组，也有加强这方面合作的寓意，以此来促进电动车尽快发展^[15]。

1.3 本文的主要研究内容

在实际应用中,为使电池组有足够高的输出电压,通常的车载电池组都是由多节单体电池串联而成的,由于生产工艺的制约,各单体电池之间不可避免的会存在不一致性,电动汽车的工况又决定了动力电池将不停的在充电和放电之间转换,因此电池在长期使用过程中,它们之间的差异会更加明显,导致各单体电池之间电压,荷电状态以及容量等出现差异,这样就会导致荷电状态较高的电池容易过充,荷电状态较小的电池容易过放,使电池的使用效率降低,使用寿命缩短,致使整个电池组过早报废。事实上,电池的不一致性问题已成为严重影响电池使用寿命的基本问题之一^[5,15]。

由上述分析可知,电池系统不一致性问题的实质在于单体电池因工作在不同工况下导致寿命衰减程度各不相同,对电池不一致性问题的研究,最终还是归结到单体电池的寿命衰减特性上来。由于电池在本质是属于电化学系统,具有非线性和时变的特性,因此现阶段电池管理系统的研制和开发都是建立在电池外特性的基础上的,这对电池状态的正确描述以及电池控制策略的精确实施带来很大的难题^[4]。因此要从根本上解决电池的不一致性问题,需要建立起动力电池寿命模型,电池管理系统将以此模型作为依据,准确估计当前电池的 SOH (state of health) 状态等参数,作为电池均衡的参考依据,降低电池在使用过程中的不一致性,延长整个电池组的使用寿命,提高电动汽车的性能。

本课题以电动汽车锂离子动力电池及电池组为研究对象,从锂离子电池的电化学机理出发,通过进行单体电池加速寿命实验,建立起电池寿命的评价指标,拟合适应实际应用的单体电池的寿命数学模型,为研究电池的均衡策略、电池故障诊断以及保护策略的研究奠定基础。同时对电池组的不一致性展开量化分析,讨论和试验不同电池均衡方案在实际电池系统中的应用,设定合理的电池均衡策略,以保证电池在电动汽车上得到更好的应用。

基于电池寿命模型的电动汽车动力电池一致性的研究;是对当前采用的电池管理系统下层控制器(LECU)功能的改进和完善,为电池管理系统的均衡策略,提供了另一个参考依据,有助于更好地解决电池组的不一致性问题,给电池系统的生产和成组提供借鉴;本课题涉及了电池寿命模型的建立,其结论,可以被众多高功率动力电池应用场合所参考;其思想,也适用于各种管理系统的研究和应用。

第2章 锂离子单体动力电池寿命研究

表征车载动力蓄电池内部性能的两个主要状态量是荷电状态 SOC(State Of Charge)和寿命状态 SOH(State Of Health)。其中, SOC 的在线估计方法经多年的研究实践已形成了较为成熟的方法体系及相应的实施方案, 如: 电流积分法、放电试验法、开路电压法、负载电压法、电化学阻抗谱法、内阻法、线性模型法、神经网络法和卡尔曼滤波算法等。各种方法均有其优缺点和使用范围, 目前电动汽车上常使用的是电流积分法、开路电压法, 以及由他们结合所衍生出的算法^[9]。

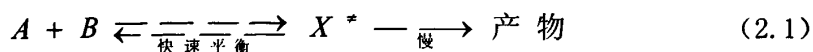
相对于 SOC 而言, SOH 反映的是电池的寿命状态。对其进行估计首先涉及电池内部老化机理的分析、寿命衰减模型的建立、外部应力因子的选择等问题。由于化学反应机理的复杂性、实车运行下的时变性以及电池本身的非线性, 因而对 SOH 的研究尚处于起步阶段, 大多是从基于机械疲劳失效中的某些经验公式出发, 从统计的角度进行预测^[16]。这对于电动汽车车载应用来说, 很难获得有效的预测结果。

2.1 单体电池寿命基本理论

2.1.1 过渡状态理论-艾林方程分析

化学动力学在引入了量子力学学说之后, 对化学反应的微观过程进行了新的论证, 形成了过渡状态理论, 从而将反应速率理论向前推进了一大步。如公式 2.1 所示, 过渡状态理论认为: 反应物分子 A 和 B 要变成产物, 总要经过足够能量的碰撞先形成高势能的活化络合物 X^* ; 活化络合物可能分解为原始反应物并迅速达到平衡, 也可能分解为产物; 活化络合物以单位时间 V 次的频率分解为产物, 此速率即为该反应的速率^[17,18]。

对于双分子反应:



以过渡状态理论为基础，经统计热力学基本公式推导，可得到该双分子反应的反应速率为：

$$\frac{dM}{dt} = \frac{KT}{hc^\ominus} e^{\Delta^\ddagger S^\ominus / R} e^{-\Delta^\ddagger H^\ominus / RT} \quad (2.2)$$

其中， M 为电池容量衰减量； t 为电池使用时间，在电池系统中可用充放电循环次数表征； $\Delta^\ddagger H^\ominus$ 为活化焓； $\Delta^\ddagger S^\ominus$ 为活化熵； K 为波尔兹曼常数； h 为普朗克常数； R 为摩尔气体常数； $c^\ominus$ 为标准浓度。

对于双分子反应来说，可以证明：

$$\Delta^\ddagger H^\ominus = E_a - 2RT \quad (2.3)$$

其中： E_a 为活化能。

另外标准浓度 $c^\ominus$ 一般可取为 1mol/kg ，从而双分子反应的反应速率为：

$$\frac{dM}{dt} = \frac{KT}{h} e^2 e^{\Delta^\ddagger S^\ominus / R} e^{-E_a / RT} \quad (2.4)$$

其中， K, h, e, E_a 为常数； T 为热力学温度； $\Delta^\ddagger S^\ominus$ 为活化熵。

公式 2.4 即为双分子反应的艾林方程热力学表达式。艾林方程对化学反应的反应速率与温度及其他应力之间的关系给出了理论依据，为动力蓄电池循环寿命模型的建立提供了可能。然而，由于艾林方程中的活化熵很难通过实验的方法测得其精确取值，同时式中的活化能虽然是由反应物自身的结构所确定，可视为常数，但也大多通过事后的拟合计算出其大致取值。因而在利用艾林方程进行蓄电池循环寿命的研究中，首先必须对电池的失效机理做出一定的分析并对艾林方程进行合理的简化^[17-19]。

2.1.2 锂离子电池失效机制分析

由于正极材料晶型结构的差异、循环工况的强随机性，因而锂离子电池性能衰减的内部机理很难有统一的解释。一般来说，影响锂离子蓄电池循环寿命因素有以下几点^[17-20]：

- 1) 正极活性材料的损失导致了可逆容量的下降。随着充放电的不断循环,活性物质的消耗不可避免,但研究表明,随着温度的升高,由于活性物质的损失所引起的容量损失会急剧升高,这也在艾林方程中加以表述。
- 2) 电解液的氧化引起可逆容量的衰减。其成因主要是由于电解液与正极材料发生反应引起正极材料和电解液的损失,同时在电极表面形成钝化膜,阻止了电子的传送,促使电化学极化加剧,引起电极电阻、电极极化的增加,导致了表观容量(即可逆容量)的衰减。
- 3) 电极的极化。无论是传质过程中的浓差极化还是电极表面得失电子过程所引起的电化学极化都会对活性物质的迁移产生阻碍,从而引起电池可逆容量的下降。从外特性分析,使电极极化加剧的主要因素是充放电电流的大小,电流越大,极化现象就越明显,电极的活性也就下降得越明显。
- 4) 晶体结构的不可逆变化导致高温下材料可逆容量的急剧衰减。在电池的循环过程中,材料结构由于离子价态的变化,会逐渐形成多态共存的内部结构,当内部结构不利于锂离子的嵌入和可逆脱出时,就会导致容量的衰减。尤其是在高温条件下,内部的结构变化明显,材料老化严重。

由上述对引起锂离子电池性能衰减的主要因素的分析可知,温度是决定电池内部反应速率、晶体结构结构突变的因子;而充放电电流的大小是决定电极极化程度的影响因子;另外,活性物质的损耗则可由电池的放电深度加以表征。

2.1.3 影响电池寿命的外部因素

研究表明,影响电池单元寿命的因素包括放电深度、放电速率、电池温度、充电策略、不同荷电状态下的间歇时间、电池维护过程、电流波纹以及过充电量和过充频度等等。现阶段考虑所有因素的影响是很不现实的。基于本文第2.1.2节对电池性能衰减机理的分析,本文以环境温度 T ,充放电速率 I ,放电深度 DOD 作为外部影响因子,以艾林方程为依据,建立锂离子电池的循环寿命模型。在加速寿命实验设计中,也是采取这三个因子作为加速因子^[11,12,17-20]。

1) 充放电深度 DOD (Depth of Discharge)

DOD 体现了电池充放电的深入程度,如20% DOD 即为电池工作在100% SOC

至 80%SOC 之间。动力蓄电池应用于新能源汽车中,除了较高的能量或功率输出之外,还承担着反馈制动,能量回流利用的任务。相同容量的蓄电池,充放电深度越大,电池释放的能量就越大,因此,考虑到车载应用时动力蓄电池系统需要提供的充放电深度较大,在电池寿命实验中需要将充放电深度作为一个重要的因素加以测试。

2) 充放电速率 I

新能源汽车中动力蓄电池的工况变化幅度较大,充放电电流会在一个很大的范围内随着整车工况的变化而剧烈变化。因此,同样也将充放电电流作为电池寿命实验需要考虑的主要因素之一。

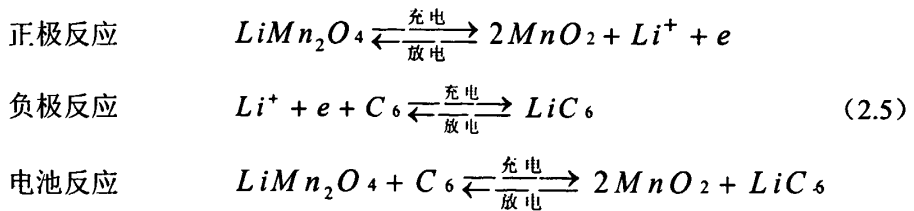
3) 环境温度 T

作为汽车的一个部件,动力蓄电池系统必然会经历一个相当大的温度范围。因此,研究者需要特别关注温度对电池寿命状态的影响。与其他两个因素相比,电池的温度,特别是内部温度很难检测;而另一方面,电池管理系统热管理的目标就是将环境温度控制在一定范围内,因此,本实验将环境温度也作为影响电池寿命状态的三个主要因素之一。

2.2 基于艾林方程的电池循环寿命模型

2.2.1 艾林方程的简化

锰酸锂动力电池化学反应方程式如下^[5,20]:



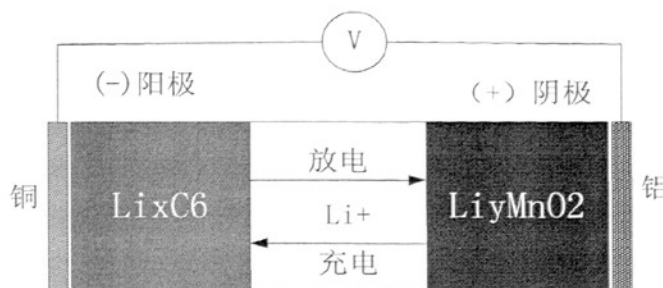


图 2.1 锂离子电池工作原理

锰酸锂离子电池是由涂有 LiMn_2O_4 活性物质的铝集电体作为正极、碳（石墨或活性碳）和溶解有 LiPF_6 的有机溶液构成的。当充电时， LiMn_2O_4 中三维框架或隧道结构里 Li 离子游向负极被碳所吸附；当放电时，碳负极材料里吸附的锂离子又回游到正极，于是正极复原成 LiMn_2O_4 隧道结构，负极也复原成碳分层结构。也就是说，该蓄电池在周而复始的充放电过程中，出现的只是锂离子而不是活泼的锂金属。因此，锂离子电池具备较好的安全性和使用寿命。锂离子电池在充电时，锂离子从正极中脱嵌，通过电解质和隔膜，嵌入到负极中；反之电池放电时，锂离子由负极中脱嵌，通过电解质和隔膜，重新嵌入到正极中，故锂离子电池也常被称为摇椅电池，意指电池工作时锂离子在正负极之间摇来摇去，而锂离子在电极之间“摇摆”受到的阻碍，即表现为电池的阻抗^[5]。

正如文章 2.1.1 节中所述，双分子反应的反应速率如公式 2.4 所述，采用以下方式解决 $\Delta^\ddagger s^\ominus$ 的求值问题：根据熵变的定义，从状态 1 到状态 2 之间的熵变为：

$$\Delta S = \int_1^2 (\delta Q_r / T) \quad (2.6)$$

其中， δQ_r 为系统与环境交换的可逆热， $\int_1^2 \delta Q_r = Q_r$ 为从特定状态 1 至特定状态 2 的可逆热。

可逆热 Q_r 体现了化学反应过程中热力学能量的交换。现阶段并无具体的可逆热求解公式，但 Q_r 的大小收到外部环境因素的影响，本文将可逆热 Q_r 表征为电池外部环境因素的函数。由于温度已在定义公式 2.6 中列出，结合文章 2.1.3 节外部影响因子的选择，可认为活化熵的形式为：

$$\Delta^\ddagger s^\ominus = \frac{f(I, D, O, D)}{T} \quad (2.7)$$

充放电电流 I 对电池循环寿命的影响主要是体现在电极的极化，电流越大，极化越明显，电池系统越偏离平衡状态，在外部特性上表现为对电池电压及对电池内阻的影响。而放电深度 DOD 对电池循环寿命的影响则是通过有效电量的消耗程度来加以体现， DOD 越大，参与反应的有效电量越多，可用活性物质的消耗也越多。从统计角度来看， DOD 体现为活性物质参与电池内部反应的程度，在外部特性上表现为对电池容量的影响^[17-19]。

由此可见，充放电速率 I 及放电深度 DOD 对电池循环寿命的影响方式相对独立，耦合程度不大（相比较环境温度 T 而言）。因而，活化熵 $\Delta^\ddagger_s^\ominus$ 中的 $f(I, DOD)$ 可以简化为 $f(I) \cdot f(DOD)$ 的形式。因此，活化熵简化为

$$\Delta^\ddagger_s^\ominus = \frac{f(I) \cdot f(DOD)}{T} \quad (2.8)$$

这样实现了充放电速率 I 、放电深度 DOD 及温度 T 这三个影响因子的解耦，从而使得电池加速寿命实验的设计得以简化，并使得利用艾林方程建立锂离子电池的循环寿命模型变得可行。

2.2.2 基于艾林方程的单体电池循环寿命模型

通过上述简化过程，锂离子电池的反应速率公式变为：

$$\frac{dM}{dt} = \frac{KT}{h} e^2 e^{\Delta^\ddagger_s^\ominus / R} e^{-E_a / RT} = \frac{KT}{h} e^2 e^{\frac{f(I) \cdot f(DOD)}{RT}} e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.9)$$

其中： K, h, R, E_a 为常数，另选取常数 A 简化公式，得到：

$$\frac{dM}{dt} = A T e^{\frac{1}{RT} (f(I) \cdot f(DOD) - E_a)} \quad (2.10)$$

并以此作为锂离子电池的容量衰减率。

定义： $C(t)$ 为电池的瞬时容量，为使用时间 t 的函数； C_0 为电池的初始容量； Γ 为电池释放出的总容量。以上单位均为安时（Ah）。设置 dt 及 Δt 为表征电池寿命的量纲，单位为循环充放次数（次），若在 Δt 时间间隔内，电池系统所处的环境温度 T 、充放电电流 I 以及 DOD 均保持不变，则 $\frac{dM}{dt} = \frac{\Delta M}{\Delta t}$ ，得公式如下：

$$\begin{aligned}\Gamma &= \int C(t)dt = \int C_0 \cdot \frac{dM}{dt} \cdot dt = \int C_0 \cdot dM = C_0 \cdot \Delta M \\ &= C_0 \cdot A T e^{\frac{1}{RT}(f(I) \cdot f(DOD) - E_a)} \cdot \Delta t\end{aligned}\quad (2.11)$$

依据 Symons 假设：电池具有有限的寿命，在整个寿命期内可以从中释放出的总有效容量是一定的^[21]。则任一实际工况(actual)下电池所释放出的有效容量相对于标准工况(R)下所释放出的有效容量，有：

$$\frac{\Gamma_{actual}}{\Gamma_R} = \frac{C_{0i}}{C_{0R}} \cdot \frac{T_{actual}}{T_R} e^{\frac{1}{R}[(\frac{f(I_{actual}) \cdot f(DOD_{actual})}{T_{actual}} - \frac{f(I_R) \cdot f(DOD_R)}{T_R}) - (\frac{E_a}{T_{actual}} - \frac{E_a}{T_R})]} \cdot \frac{\Delta t_{actual}}{\Delta t_R} \quad (2.12)$$

其中， Γ_{actual} 为实际工况下电池释放的有效容量； Γ_R 为定义的标准工况下电池所释放的有效容量。

根据 Symons 假设，在电池失效机理不发生变化，即外界工况均处于合理范围内的情况下，电池在整个寿命期内可以从中释放出的总有效容量是一定的。则：

$$\frac{\Gamma_{actual}}{\Gamma_R} = 1 \quad (2.13)$$

只需确定上式中的 $f(I), f(DOD)$ 的关系式，即可通过公式 2.12 和 2.13 预测出归一化至标准工况下的电池循环寿命。一般来说，若排除不一致性因素的影响，同一批次的电池的初始容量 C_0 可认为相同，于是可得如下所示的循环寿命预测公式：

$$L_{actual} = \frac{T_R}{T} e^{\frac{1}{R}[(\frac{E_a}{T} - \frac{E_a}{T_R}) - (\frac{f(I) \cdot f(DOD)}{T} - \frac{f(I_R) \cdot f(DOD_R)}{T_R})]} \cdot L_R \quad (2.14)$$

其中， L_{actual} 为实际工况下电池的充放电循环次数； L_R 为标准工况下电池的充放电循环次数。

2.2.3 充电电流与充放电深度关系的确定

由前述艾林方程的阐述可知， $f(I), f(DOD)$ 是反应电池内部反应的活化熵，很难导出其机理公式^[5,17]，因此本文采用查表插值的方式建立 $f(I), f(DOD)$ 与衰

减率之间的近似关系。具体处理过程如下：

由简化的艾林方程式 2.10，可以得到：

$$dM = A T e^{\frac{1}{RT}(f(I) \cdot f(DOD) - E_a)} dt \quad (2.15)$$

若设定在 Δt 时间间隔内，电池系统所处的外界环境温度 T 、充放电电流 I 以及充放电深度 DOD 均保持不变，即可转化得到：

$$\Delta M = A T e^{\frac{1}{RT}(f(I) \cdot f(DOD) - E_a)} \Delta t \quad (2.16)$$

其中： ΔM 为某一工况下的可用容量衰减率， Δt 为电池循环寿命，以循环次数来表示。

设置 $L = \Delta t$ 为电池充放电循环次数，推得：

$$L = \frac{\Delta M}{A T} e^{\frac{1}{RT}(E_a - f(I) \cdot f(DOD))} \quad (2.17)$$

首先，可先通过可靠性试验理论中的方法，并参考电化学试验中对活化能的测定，推算出具体型号锂离子电池的活化能；然后，根据单体电池寿命实验数据测得电池在达到的一定容量衰减率下（比如普遍采用的以 20% 衰减作为寿命终结标准）的循环数，即可通过拟合算得不同充放电电流 I 和充放电深度 DOD 下的 $f(I), f(DOD)$ 取值；这样就可以分别建立 $f(I), f(DOD)$ 的插值表，可在以后预测电池循环寿命时加以使用。

2.3 单体电池寿命试验

2.3.1 电池寿命实验目的

在混合动力汽车上，由于采用“电--电混合”或是“油--电混合”的方案，动力电池系统作为辅助电源，一般均工作在短时充放，变化剧烈的工况之下^[22]。以同济大学自主研制的“超越”系列燃料电池车为例，经过设定的控制策略进行能量分配，在典型 UDDS 整车工况下，电池系统的电流时间例程如图 2.2 所示（定义电流正为电池系统放电，电流负为电池系统充电）。

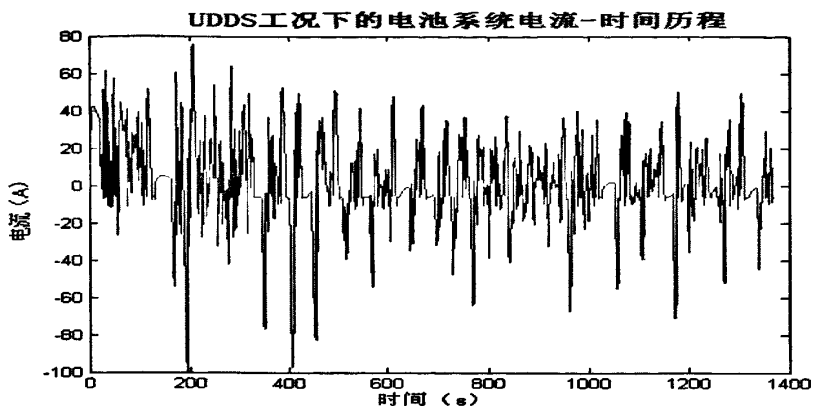


图 2.2 UDDS 工况下的电池系统的电流时间历程

针对动力电池上述特点,开展单体电池寿命试验^[11,12],试验目标为:

- 1) 得到电池的加速老化过程中容量变化与内阻变化的规律。
- 2) 得到放电深度、充放电电流及环境温度对电池寿命影响的规律。
- 3) 总结得到电池寿命衰减的经验公式。

在上述实验目标的基础上,设计合理的寿命估计算法,进而为后续的电池系统 SOH 估计,电池系统管理策略提供合理依据。

2.3.2 实验样品及设备

本文所述的电池寿命实验主要是针对 HEV 应用的车载高功率型锰酸锂电池为目标展开,力求使试验结果为 HEV 电池系统的控制、管理及优化提供参考。因此本实验采用基于同济大学“超越”系列燃料电池汽车上使用的某型号高功率型锰酸锂电池单体为实验样品,表 2.1 为实验样品的具体规格。

表 2.1 锰酸锂电池实验样品规格

额定电压	3.7V
容量	8000mAh
放电电压限制	2.7V
最高充电电压	4.2V
最大充放电电流	150A(充)/200A(放)
比容量	60wh/kg
比功率	1000w/kg

表 2.2 为应用于电池寿命实验的设备

表 2.2 电池寿命实验硬件设备

设备	生产商	数量	实验中所起的功能
电子负载	Arbin	1	电池参数的测定
电子负载	Maccor	1	电池参数的测量和实验标定
循环测试仪	金帆	8 通道	电池充放电循环的加载
温控箱	ESPEC	1	设定环境温度
温控箱	ESPEC	6	设定环境温度
便携式内阻测试仪	Alber	1	电池直流内阻的测定

2.3.3 电池寿命参数及测定

电池的寿命状态必须通过相应的电池外特性参数来加以表征。本文引入电池可用容量，电池内阻作为单体电池寿命状态的指标^[23,24]。

电池可用容量

电池可用容量体现了电池在不同寿命状态储存电量的能力，反应了电池不同时期的能量特性。一般而言，电池的充电效率与电池的放电效率并不一致，因此从应用的角度考虑，电池的可用容量可以定义为电池充满电后在标准放电方式下所能释放出的电量。该放电容量要受放电电流、电池的温度、电池充放电循环次数等诸多因素的影响，其计算方式如下所述：

- 1) 参考电池厂商给出的电池标准充电方式，在适当的环境温度下以额定充电电流将电池充满电；
- 2) 静置一定的时间，使电池内部趋于平衡；
- 3) 用额定的 1C 电流将电池放电至其截止电压（对于锰酸锂电池而言设为 3.0V）得电池可用容量：

$$C = \int_0^T I_d(t) dt \quad (2.18)$$

其中， T 为放电时间； $I_d(t)$ 为放电电流。

电池内阻

电池内阻是指电池在工作时，电流流过电池内部所受到的阻力。电池内阻大，会导致电池放电工作电压降低，放电时间缩短。内阻大小主要受电池的材料、制造工艺、电池结构等因素的影响，是衡量电池性能的一个重要参数。

对于锂离子电池而言，电池内阻分为欧姆内阻和极化内阻。欧姆内阻有电极材料、电解液、隔膜电阻及各部分零件的接触电阻组成。极化内阻是指电化学反应时由极化引起的电阻，包括电化学极化和浓差极化引起的电阻^[5]。

锂离子电池的内阻特性可以由图 2.3 所示的脉冲响应来加以说明，对电池加载电流后，电池组的电压响应首先出现一个跳跃式的压降，接着电池端电压开始缓慢下降；而在电流加载撤除之后，电压响应也是先出现一个跳跃式的电压反弹，接着电压开始缓慢升高。图中 OR 段即为欧姆内阻引起的电池压降；PR 段表示极化内阻所引起的电池压降。显然，根据欧姆定律，相应的电压降除以放电电流即是相应的电阻值。

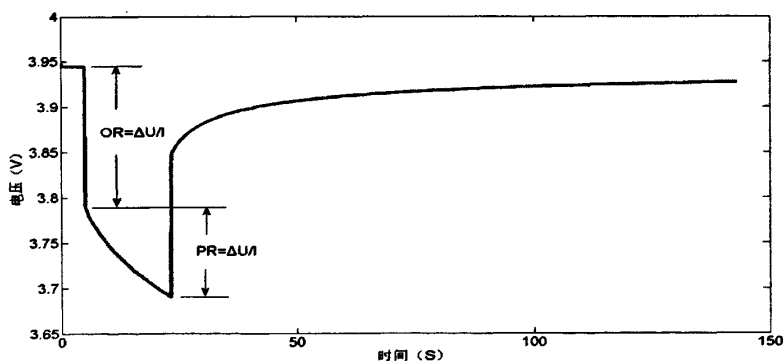


图 2.3 动力锂离子电池脉冲响应图

实验中设定电池内阻计算方式如下所示：

- 1) 通过充放电使电池保持恒定的 SOC，并静置足够的时间；
- 2) 对电池加载一定的电流（本实验中使用的是 20A），并持续一定的时间（本实验中为 18 秒）；

- 3) 记录 0.1 秒和 18 秒的电池电压响应;
- 4) 参考图 2.3 所示的电压响应, 得到响应的电池内阻:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.19)$$

其中, ΔV 为电压突变; I 为脉冲电流。

0.1 秒是实验使用的电子负载最短的电压电流采集间隔; 参考针对该电池样品进行的建模和辨识, 其电路模型中最大的时间常数在 18 秒以内, 之后电池的电压响应趋于稳定^[22]。因此实验中用 0.1 秒体现的电池阻抗表征电池的直流内阻 (OR); 用 18 秒后体现的电池阻抗减去电池直流内阻表征为电池的极化内阻 (PR)。

2.3.4 电池寿命衰减判断依据及方法

目前对于电池寿命终结的判断尚无统一标准, 实际使用中均是从应用领域出发。一般而言, 车用动力蓄电池生产厂家一般将以下两种情况中的任意一种作为电池寿命终结的判别标准^[11]:

- 1) 把蓄电池仅能释放出电池额定安时容量的 80% 的时刻定义为电池寿命的终结;
- 2) 将电池实际内阻达到其额定内阻的 150% 的时刻作为电池寿命的终结。

当电池的相应参数符合以上任一条件时, 电池的老化过程将进一步加速, 性能进一步降低, 已经不能满足实际使用的需要。电池寿命估计实验也使用该两种定义作为实验结束的依据。

2.3.5 标准工况的设定

本文所进行的电池加速寿命试验本质上是一种高加速寿命试验 (HALT)。作为普遍采用的高加速应力试验 (HAST) 的一种, 高加速寿命试验 (HALT) 最大特点是在不改变实验样品失效机理的前提下, 施加超过产品实际应用中及设计规范规定的各种应力, 快速地将产品内部缺陷或薄弱环节激发出来, 为产品设计人员提供信息^[25]。

因此, 本实验中设置 40℃ 环境温度, 以 1C 充放电速率对电池进行 100%DOD 充放电深度 (即满充满放) 的循环工况为标准工况。在该工况下电池失效机理

并未发生变化，并使电池实验样品加速衰减，缩短实验时间。设置多种不同工况使其基本涵盖动力电池车载应用的工况范围；不同工况下电池寿命衰减特性与标准工况下的比值即为电池在该工况下寿命衰减的加速因子。

2.3.6 实验流程

电池寿命实验的测试方案如图 2.4 所示，整个实验置于可设定温度的恒温箱中进行。测控装置向被测蓄电池组及管理系统发送命令，闭合蓄电池组内部接触器，使蓄电池组及管理系统处于工作状态，ARBIN 或者金帆等电子负载按照预先给定的加载方式向蓄电池组进行加载特定工况，同时记录电流和电压的值，测控装置通过 CAN 总线的方式接受从蓄电池组发来的电流、电压、温度、SOC 等参数的值，并记录保存下来，最后进行后期计算处理^[9]。

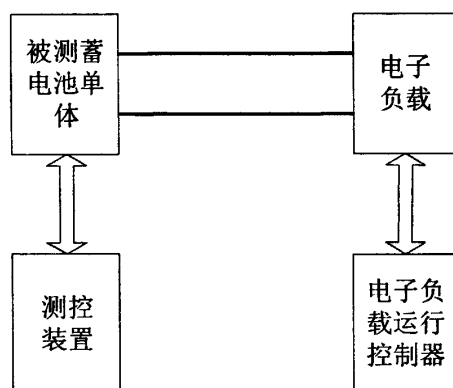


图 2.4 测试方案原理框图

根据本文 2.1.3 章节所述，电池寿命实验针对充放电电流，充放电深度以及环境温度这三个主要因素来展开。实验流程如图 2.5 所示^[11,12,26]。

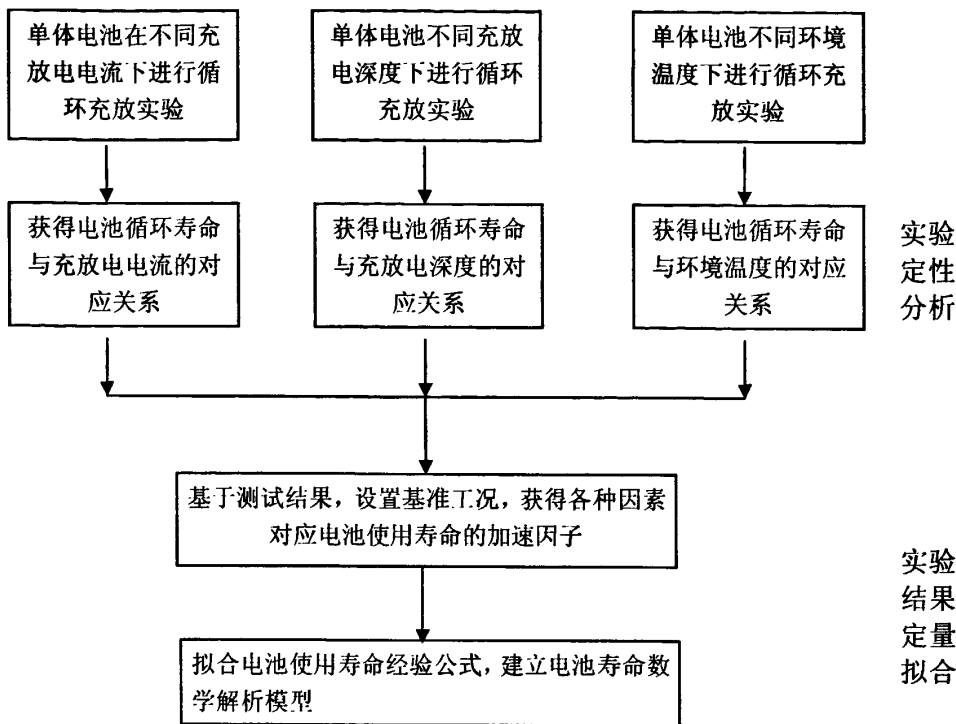


图 2.5 动力蓄电池寿命测试实验流程

2.4 试验结果分析

2.4.1 电池可用容量衰减趋势

电池循环寿命实验数据表明，随着循环次数的增加，电池内部因电化学原因，出现很多不可逆反应，导致电池可用容量不断衰减。下面着重评估不同影响因素对电池可用容量衰减速率的影响。

图 2.6 为不同充放电电流下电池可用容量的变化趋势。实验电池样品工作在 40℃ 环境温度，以不同充放电速率对电池进行 100%DOD 充放电深度（即满充满放）的循环工况下。由图可得，电池容量随着循环次数的增加而平稳衰减，考虑到实验以及测试误差，电池容量衰减具有很好的线性性。总体而言，电池单体在一定的充放电范围内，不同充放电速率对电池容量衰减的影响并不大。

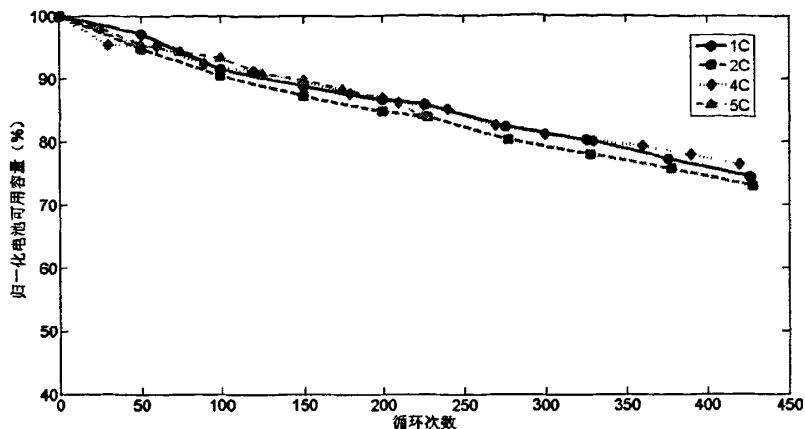


图 2.6 不同充放电电流下电池可用容量的变化趋势

同时对不同充放电电流进行比较发现，电池容量的衰减速度差别并不是很大。作进一步分析，得到如表 2.3 所示的电池容量在不同充放电电流下的衰减速率。在 1C 到 5C 电流范围内，电池容量的衰减速度变化并不明显；4C 充放电电流下的电池样品容量衰减与 2C 电流时相比变化不大，但从整体看还是体现出较明显的正相关对应关系。分析表明在一定的电流范围（也是实际工况中绝大部分时间的电流需求）内，电池容量的衰减基本与充放电电流呈正相关关系，但是增长幅度并不大。即对于 HEV 用高功率电池系统而言，除去短时的大电流脉冲以外，实际电流等级均处于 5C 以内，此时充放电电流的变化对电池容量的衰减影响较小，此结论也与国外文献中的实际结果保持一致^[5]。

表 2.3 电池容量在不同电流下衰减速率的均方根值

测试工况	电池容量衰减平均速率 (RMS) (Ah/100 循环)
1C 充放电电流	-0.4497
2C 充放电电流	-0.4612
4C 充放电电流	-0.4620
5C 充放电电流	-0.5009

图 2.7 是电池可用容量随不同的充放电深度的变化趋势。实验样品工作在 40℃ 环境温度，以 1C 充放电速率对电池进行不同充放电深度的循环工况下。由

图可得，在不同充放电深度条件下，电池容量均随着循环次数的增加而平稳衰减。在电池单体的寿命初期，不同的放电深度对电池容量衰减影响不大；随着循环次数的不断增加，放电深度对电池容量衰减的影响开始显现，放电深度越大，电池容量衰减也就越快。

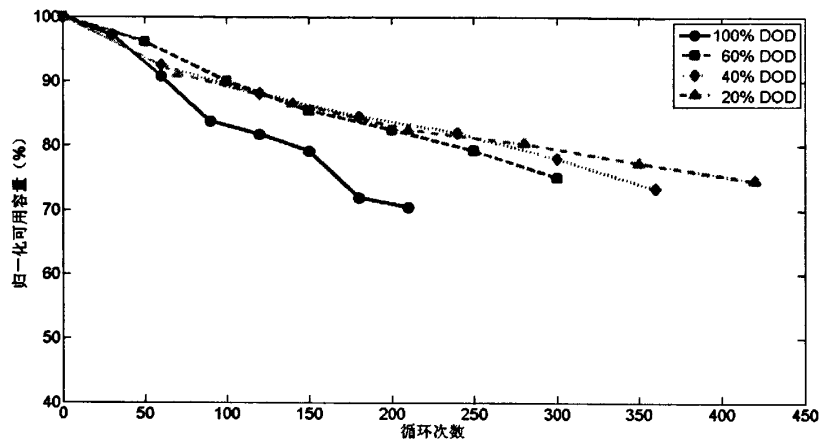


图 2.7 不同充放电深度下电池可用容量的变化趋势

通过数学处理进行定性分析来尽量降低测试误差对结果的影响。表 2.4 为电池容量在不同充放电条件下的衰减速率。可见电池容量随着充放电深度的增加而加速衰减，整体上呈现反相关的对应关系。且与不同充放电电流的加速作用相比，对于锰酸锂电池来说，不同充放电深度对电池可用容量的衰减作用显然要更为明显。

表 2.4 电池容量在不同充放电条件下衰减速率的均方根值

测试工况	电池容量衰减平均速率 (RMS) (Ah/100 循环)
100%DOD	-1.14
60% DOD	-0.65
40% DOD	-0.51
20% DOD	-0.43

图 2.8 为电池可用容量在不同环境温度下的衰减趋势。实验样品工作在不同环境温度，以 1C 充放电速率对电池进行 100%DOD 充放电深度（即满充满放）的循环工况下。由图可知，电池可用容量随着循环次数的增加而较为稳定的衰

减。环境温度越高，容量衰减越快：当环境温度在 20℃至 30℃之间时，容量衰减增速较慢，体现为电池在适当的温度范围时可用容量衰减差异并不大；而当环境温度继续升高，电池可用容量开始出现明显的加速衰减。直至环境温度到达 50℃时，电池在该状态下急剧衰减，以容量衰减至 80%为寿命终结，电池样品尚不能承受 50 次的加速循环工况，这在实际应用中已经不能满足车载电源的要求，需要尽可能避免。

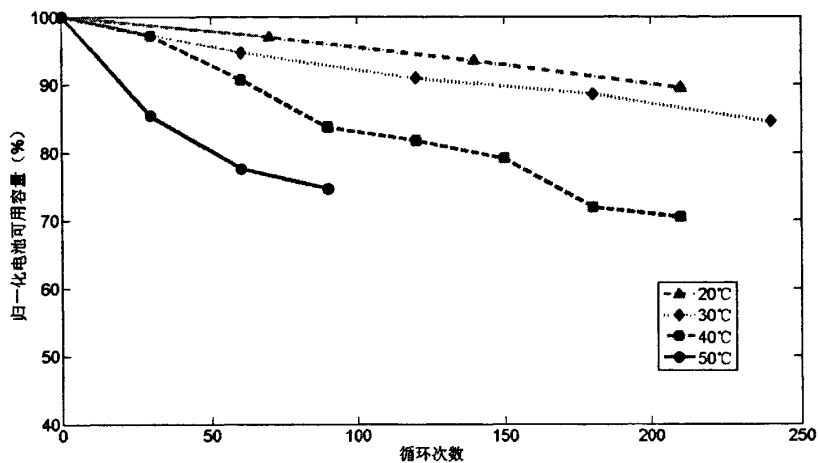


图 2.8 为电池可用容量在不同环境温度下的衰减趋势

同样对实验数据进行定量分析，得到表 2.5 所示的电池可用容量衰减速率的均值。电池可用容量衰减速率与环境温度成正相关关系，且随着环境温度的升高，电池可用容量衰减速率的增长幅度也不断增加。表现了电池作为电化学系统对温度的高度敏感性。在充放电电流，放电深度和环境温度三个影响因素中，环境温度对电池容量衰减的影响无疑是最大的。

表 2.5 电池容量在环境温度下衰减速率的均方根值

测试工况	电池容量衰减平均速率 (RMS) (Ah/100 循环)
环境温度为 20℃	-0.37
环境温度为 30℃	-0.49
环境温度为 40℃	-1.14
环境温度为 50℃	-2.08

综上所述, 电池可用容量的衰减速率整体上与电池充放电电流以及环境温度之间呈现正相关趋势, 与电池充放电深度成反相关关系。横向比较来看, 电池容量对该三种影响因素呈现出不同的敏感程度: 电池可用容量对电池所处环境温度最为敏感, 温度超过一定限制, 电池容量急剧衰减; 充放电深度的影响要小一些, 体现为浅充放有助于延长循环寿命; 与前二者相比, 充放电电流对电池容量的衰减速率影响较小, 即在一定的电流范围内, 电流对电池的能量特性衰减速率影响较小。以上结论, 对 HEV 车用电池管理系统的能量控制, 热管理等有着重要的参考价值: 该种高功率型锰酸锂电池实验样品较适于充放电电流变化剧烈的 HEV 应用中; 为确保其一定的循环寿命, 一方面需要设定合理的电池额定容量, 使电池系统处于较浅的充放电深度 (DOD) 工况下; 另一方面, 重视电池系统热管理, 既要防止电池系统环境温度过高, 又要尽可能得保持温度的一致性。

2.4.2 电池内阻增长趋势

电池内阻体现了电池在不同寿命阶段对电流的阻碍作用, 其定义和计算方法如本文 2.3.3 节所述。随着电池循环次数的增加, 电池内部对电荷的阻碍作用将不断增大, 外特性即体现为电池内阻的不断提高。

图 2.9 是采用脉冲放电法得到的同一块电池样品的欧姆内阻和极化内阻随电池衰减的变化趋势 (该电池工作于 40℃, 以 4C 的电流速率进行满充满放)。可见极化内阻值在电池不同的寿命阶段变化并不明显, 电池内阻的变化绝大部分由欧姆内阻所引起。且在其他循环工况下, 内阻衰减趋势也基本相同。因此, 在评估动力电池性能优劣时最应关注的是欧姆内阻。

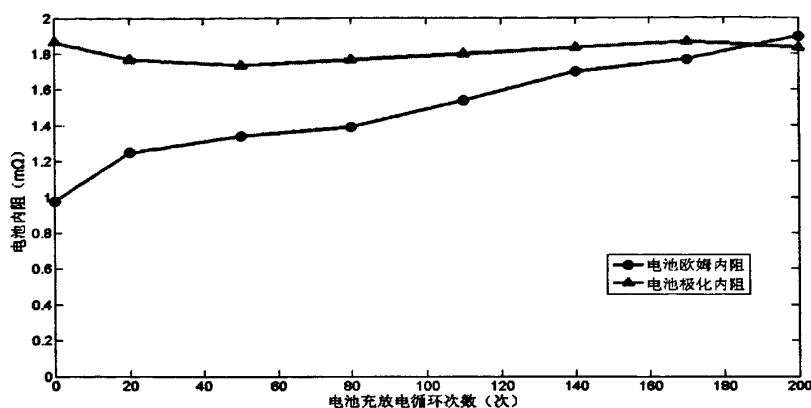


图 2.9 电池欧姆内阻和极化内阻随寿命衰减的变化趋势

另外,实验发现,电池欧姆内阻与电池荷电状态 SOC 的关系如图 2.10 所示,在锂离子电池的电压平台区 (SOC 在 30%到 80%之间) 中,电池的欧姆内阻基本上保持稳定,受当时电池的 SOC 状态影响很小;且在不同的电流激励下,锂离子电池欧姆内阻几乎没有变化,表明欧姆内阻更多的是电池自身状态的体现,在温度恒定的工作环境中,欧姆内阻受外界影响较小。因此,相同环境下电池在不同荷电状态下所表现出的欧姆内阻具有普遍的意义。

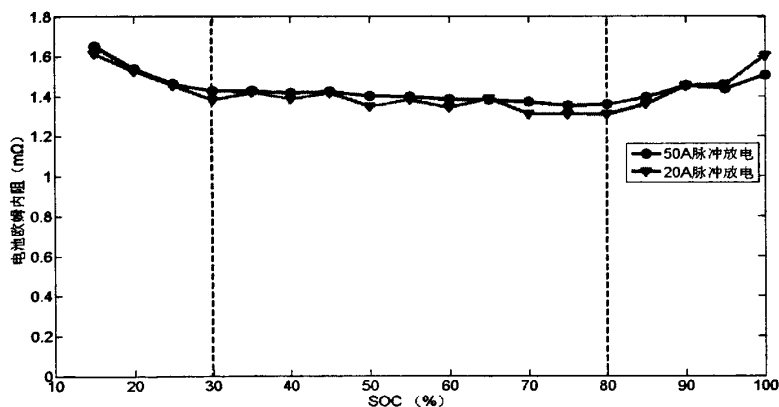


图 2.10 电池欧姆内阻与电池荷电状态 SOC 的关系图

综上,在评估动力电池性能优劣时最应关注的是欧姆内阻。本文也直接使用欧姆内阻作为电池内阻的表征量进行分析研究。

与电池容量这种一次量相比,电池内阻是二次量,对测试设备的精度提出

了更高的要求^[27]。在现阶段实验中，电池内阻的测试误差会远大于对电池可用容量的检测误差；所获取的实验数据变化趋势并不明显。因此后期数据处理时采用了指数拟合方法对数据进行处理，并使用归一化手段以便于比较。

图 2.11 为锂电池直流内阻在不同充放电电流下的增长趋势。实验样品工作在 40℃ 环境温度，以不同充放电速率对电池进行 100%DOD 充放电深度（即满充满放）的循环工况下。可见，电池内阻增速随充放电电流的增大而提高。其增幅与充放电强度存在着一定的数学关系。将不同充放电电流对电池容量和电池内阻变化的影响进行对比，发现电池内阻受充放电电流的影响更为明显。

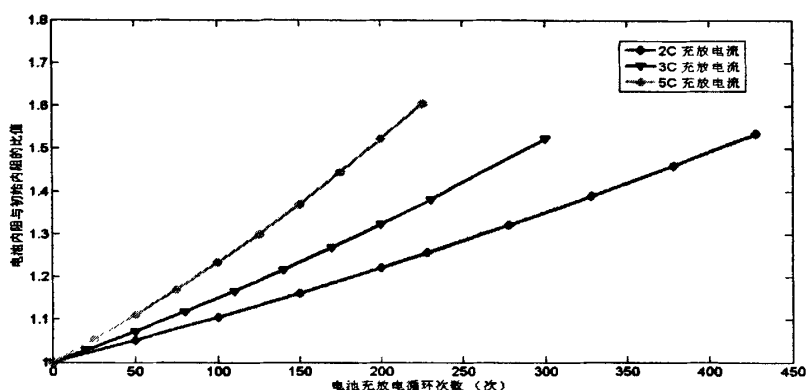


图 2.11 不同充放电电流下电池直流内阻的变化趋势

图 2.12 为锂离子电池在不同的充放电深度下电池内阻的变化趋势。实验样品工作在 40℃ 环境温度，以 1C 充放电速率对电池进行不同充放电深度的循环工况下。电池内阻随着充放电深度的提高而加速增长。经过数据处理后的变化曲线显示出等比例提高的趋势，内阻增长的幅度与充放电深度的加强成正比。与充放电电流对电池直流内阻的影响相比，电池充放电深度对电池直流内阻的增速影响较小。

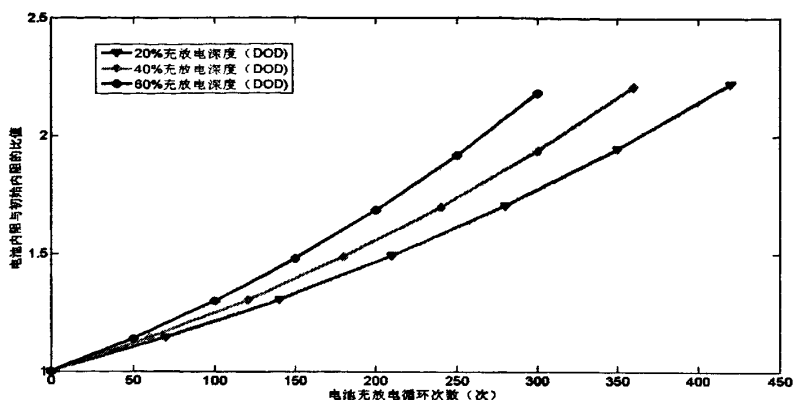


图 2.12 不同充放电深度下电池直流内阻的变化趋势

图 2.13 所示的即为不同环境温度下电池内阻的变化情况。实验样品工作在不同环境温度，以 1C 充放电速率对电池进行 100%DOD 充放电深度（即满充满放）的循环工况下。可以看到，电池内阻的增长速度随温度的提高呈现出明显的区别：当环境温度在 20℃ 时，电池寿命衰减相对较缓，表现为内阻增长缓慢；当环境温度达到 50℃ 时，电池内阻迅速增长，电池急剧衰减，加速循环寿命仅为 100 次左右；而当锂离子电池工作在 30℃ 至 40℃ 时，电池欧姆内阻的增速差别并不大，电池体现出对该段温度并不十分敏感。整体而言，电池内阻对环境温度的敏感程度很高，电池系统良好的热管理对延长电池寿命的重要作用不言而喻。

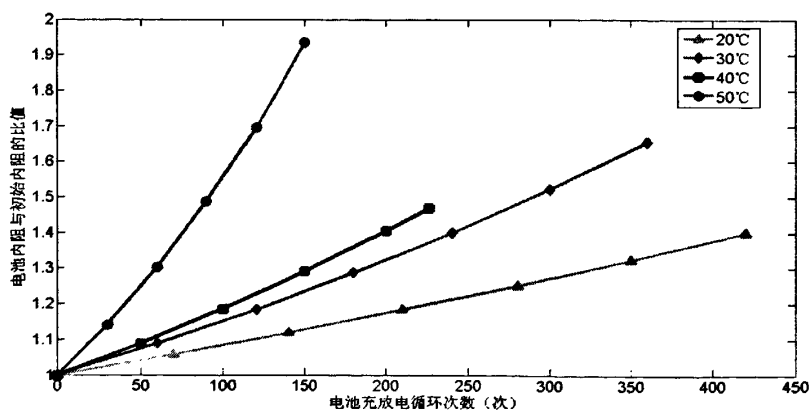


图 2.13 不同环境温度下电池直流内阻的变化趋势

相比较电池可用容量的测定, 电池欧姆内阻的测量误差比较大, 精确获得不同外界因素对锂电池直流内阻增长趋势的影响难度较大。但从整体上看, 电池的欧姆内阻随着电池循环次数的增加而不断增加, 其增速与电池充放电电流以及环境温度成正比, 与电池充放电深度成反比关系。在电流强度, 放电深度以及环境温度三个主要影响因素当中, 环境温度对电池内阻的提高影响最大; 充放电电流强度的影响次之; 而充放电深度对锂离子电池内阻增长的影响相对较小, 基本上呈现出等比例提高的趋势。

2.4.3 定性结论总结

研究表明, 电池的可用容量能够较好地体现电池的能量特性; 而电池的直流内阻又和电池的功率特性有着密切的关系。在实际应用中需要根据不同工况而有所侧重: 在纯电动汽车等应用场合, 电池持久的能量特性更为重要; 而在HEV混合动力的应用中, 对动力电池的功率特性的要求会更高^[1,28]。

因此, 对于电池管理系统的设计者而言, 一方面因根据应用场合的不同而调整控制策略: 看重能量特性的场合, 控制目标的优先级为: 温度>充放电深度>电流强度; 而在强调功率特性的应用中, 电池管理系统的控制优先级为: 温度>电流强度>充放电深度。在电池系统成本, 重量, 体积和性能之间取得较好的平衡。

另一方面, 电池管理系统需要设置一定的控制阈值来限制电池工况的无限制恶化, 保证电池系统具有足够的循环寿命; 动力蓄电池组的管理还需要引入均衡管理, 使电池系统各单体处在尽可能一致的运行工况中; 对于温度的控制, 设计者既要保证系统有足够的散热能力, 又要保证电池温度的一致性。

同时实验发现, 目前的电池单体一致性很不理想, 同一厂家的同一批次电池样品, 其初始容量, 初始内阻很难控制同一水平线上; 随着循环充放的进行, 电池单体间的不一致问题更加严重, 这使实验结果很难具备典型性和代表性。一方面, 需要电池成组前经过遴选; 另一方面, 后期的电池系统管理需要具备均衡能力, 改善或消除电池单体间的不一致性。

2.4.4 基于艾林方程的单体电池循环寿命模型拟合

如上所述, 采用公式 2.17 进行特定工况下电池寿命的预测必须首先确定特

定电池样品的活化能 E_a 。本文通过 Arrhenius 方程来确定锰酸锂电池样品的活化能 E_a 。Arrhenius 方程体现温度应力对产品失效的加速作用，在绝大多数情况下是艾林方程的一般近似。Arrhenius 方程是瑞典化学家 Arrhenius 提出的关于化学反应的速率常数与温度之间的关系式^[25]，即：

$$\ln L = A + \frac{E_a}{R T} \quad (2.20)$$

式中，L 为寿命，对于电池来说体现为循环次数；R 为摩尔气体常数； E_a 为活化能；T 为热力学温度 (K)。

单体电池寿命试验中，设置蓄电池仅能释放出电池额定安时容量的 80% 的时刻定义为电池寿命的终结。表 2.6 为环境温度对电池循环寿命的影响。

表 2.6 环境温度与电池循环寿命的影响

Parameter	L _{Ah}
20℃-100%-1C	403
30 ℃-100%-1C	309
40 ℃ -100%-1C	115
50 ℃ -100%-1C	61

由于电池样品性质确定，故其活化能 E_a 可视为一常数。本文通过 Arrhenius 方程，结合不同环境温度下电池循环寿命实验数据，确定 E_a 。

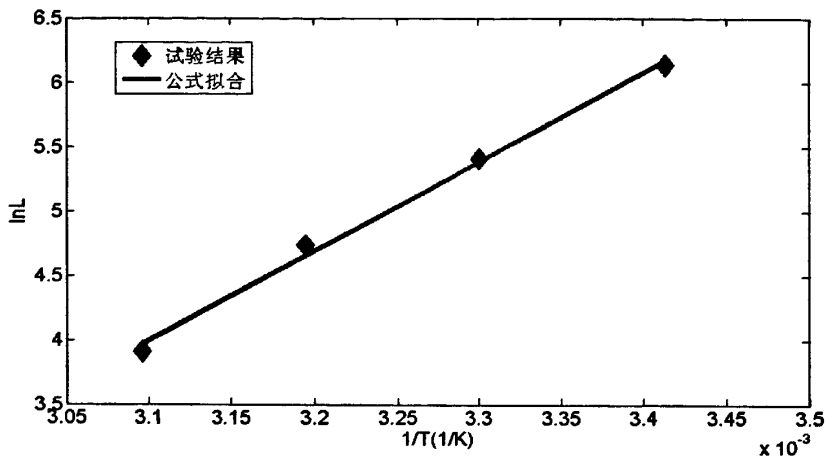


图 2.14 Arrhenius 模型概念图

上图即为 Arrhenius 模型概念图。通过 Matlab 的曲线拟合工具箱进行拟合，其拟合系数 $R\text{-square} \geq 0.95$ ，拟合的数据具备一定的精度。锰酸锂电池的活化能 E_a 数值范围在 $2 \times 10^4 \text{ J/mol}$ 至 $1.5 \times 10^5 \text{ J/mol}$ 之间。由 $E_a/R = 4892 (1/K)$ ，摩尔气体常数可取 $8.3145 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ，得活化能 E_a 为 $4.0674 \times 10^4 \text{ J/mol}$ 。

如文章 2.2.3 节所述，根据单体电池寿命实验数据测得电池在达到的 20% 容量衰减率下的循环数，即可通过拟合算得不同 I 和 DOD 下的 $f(I), f(DOD)$ 取值。表 2.7 和表 2.8 分别表示电池充放电电流，电池充放电深度 (DOD) 对电池循环寿命的影响。

表 2.7 充放电电流与电池循环寿命的影响

工况	L	$f(DOD_R I_i)$	$f(I)/f(I_R)$
40℃ -100%-1C	115	296	1
40℃ -100%-2C	100	404.17	1.365439
40℃ -100%-3C	91	412.64	1.394054
40℃ -100%-4C	70	440.57	1.488412
40℃ -100%-5C	68	445.83	1.506182

表 2.8 充放电深度与电池循环寿命的影响

工况	L	$f(\text{DOD} \div I_R)$	$f(\text{DOD})/f(\text{DOD}_R)$
40℃-100%-1C	115	296	1
40℃-80%-1C	217	185.91	0.628074
40℃-60%-1C	250	126.84	0.428514
40℃-40%-1C	300	69.77	0.235709
40℃-20%-1C	350	21.52	0.072703

综上，根据本文第 2.2.2 节推导的公式，同型号电池在某一充放电工况 (DOD, I, T) 下的电池循环寿命 L_{actual} 可表示为基于标准工况下的电池循环寿命 L_R 乘上加速系数，表达式如下所示：

$$L_{\text{actual}} = \frac{313}{T} e^{4892[(\frac{1}{T} - \frac{1}{313}) - (\frac{\text{inrepl}(\frac{f(I)}{f(I_R)}) \cdot \text{interpl}(\frac{f(\text{DOD})}{f(\text{DOD}_R)}) \cdot 296}{T} - \frac{296}{313}) \cdot \frac{1}{40674}]} \cdot L_R \quad (2.21)$$

其中， $\text{inrepl}(\frac{f(I)}{f(I_R)})$ 为对基于标准工况归一化后的充放电电流对电池循环寿命的影响 $\frac{f(I)}{f(I_R)}$ 进行一维插值运算； $\text{interpl}(\frac{f(\text{DOD})}{f(\text{DOD}_R)})$ 为对基于标准工况归一化

后的充放电深度对电池循环寿命的影响 $\frac{f(\text{DOD})}{f(\text{DOD}_R)}$ 进行一维插值运算。 L_R 为标准工况下的循环寿命，本文所开展的实验中，其值为 115，该数值可通过进一步的实验加以标定。

在实际应用中，可将同型号电池典型工况分解为多个特定工况的充放电事件，先根据公式 2.21 估计得到同型号电池在该工况下的循环寿命 L_{actual} ；同时获得在该充放电事件下的循环次数 L_i ，再结合公式 2.21，进一步获得电池的寿命状态 (SOH)^[29]：

$$S O H = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{L_{actual}} \quad (2.22)$$

2.4.5 基于内阻辨识的电池寿命估计

如上文所述，通过开展单体电池加速寿命实验，获得单体电池欧姆内阻在不同工况下的增长趋势。本文结合电池的电路仿真模型和在线辨识算法，设计基于内阻辨识的电池寿命估计方案。

在燃料电池汽车以及混合动力汽车上，由于采用“电--电混合”或是“油--电混合”的方案，动力电池作为辅助电源，一般均工作在短时充放，变化剧烈的工况之下。因此，电池的内阻模型着重于电池的瞬态响应，通过忽略一些延时环节，本文对广泛采用的 PNGV 标准电池电路模型进行简化，得到锂离子蓄电池内阻模型电路结构如图 2.15 所示^[26,30]。

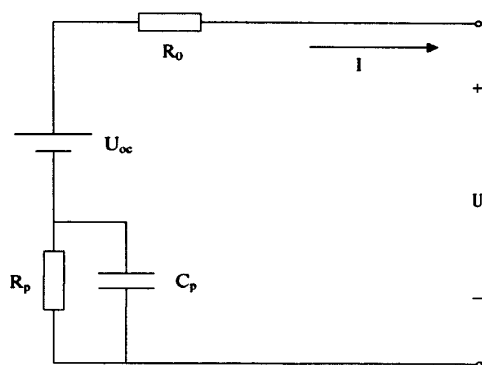


图 2.15 锂离子蓄电池简化模型电路结构

模型中理想电压源 U_{oc} 描述电池的开路电压，体现为电池内部的直流偏置；电阻 R_o 为电池欧姆内阻，电容 C_p 与电阻 R_p 并联描述电池的极化环节，蓄电池的输出电压为 U 。

计算图 2.15 所示线性化锂离子蓄电池等效电路模型的传递函数如下^[31]：

在系统正常运行时，电池的输入信号为电流 i ，取放电时电流方向为正，充电时为负，输出信号为蓄电池的输出电压 u 。根据电路模型的电压电流关系

$u = u_{R_0} + u_{oc} + u_p$ ，设系统离散化中零阶保持器的传递函数 $G_0(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}$ ，可推导出下列频域算式：

$$G(s) = G_0(s) * G_p(s) = G_1(s) * \frac{1}{s} G_p(s) = (1 - e^{-Ts}) * \left(-\frac{R_0}{s} - \frac{R_p}{s} + \frac{R_p}{s + \frac{1}{R_p C_p}} \right) \quad (2.23)$$

式中， $G(s)$ 为系统传递函数； $G_0(s)$ 为零阶保持器的传递函数； $G_p(s)$ 为系统其他连续部分的传递函数； T_s 为系统离散化过程的采样步长； R_0 表征电池欧姆内阻； R_p 和 C_p 分别表征电池极化内阻和极化电容。

经由 Z 变换，得到系统差分方程为：

$$U_k = a U_{k-1} - R_0 I_k + [a(R_0 + R_p) - R_p] I_{k-1} \quad (2.24)$$

式中， U_k 为 k 时刻的电池输出电压， U_{k-1} 为 $(k-1)$ 时刻的电池输出电压； I_k 为 k 时刻的电池加载电流， I_{k-1} 为 $(k-1)$ 时刻的电池加载电流；系数 $a = e^{-\frac{T}{R_p C_p}}$ ； T 为系统采样步长； R_0 表征电池欧姆内阻； R_p 和 C_p 分别表征电池极化内阻和极化电容。

待辨识参数为 a 、 R_0 、 R_p 和 C_p ， C_p 的值在获得 a 和 R_p 之后可由 $a = e^{-\frac{T}{R_p C_p}}$ 推出。

在模型结构确定以后，可以根据试验方法所获得的数据对系统模型中的参数进行辨识。在参数辨识领域中，最小二乘法是一种最基本的重要估计方法，许多用于系统辨识的估计算法也往往可以解释为最小二乘法。另一方面，考虑到实现自适应控制和跟踪时变参数，必须采用递推算法进行在线辨识，因此，本文采用了递推最小二乘算法作为参数辨识的算法。

递推最小二乘法的基本思想可以概括为^[31]：

$$\text{本次(新)的估计值 } \hat{\theta}(k) = \text{上次(老)的估计值 } \hat{\theta}(k-1) + \text{修正项} \quad (2.25)$$

这种递推的最小二乘法，不需要在计算机中存储和重复计算以往的全部输入、输出数据，因此，它可以大大减少计算机的数据存储量和计算工作量，特别适用于在线实时辨识计算。

以相同型号 8Ah 锰酸锂动力电池为样品，借助 MATLAB/Simulink 对本文建立的锂离子电池内阻模型进行仿真，通过递推最小二乘算法模型进行实时辨识，将辨识所得的欧姆内阻值（即 R_0 的值）与脉冲放电实测欧姆内阻值进行比较，

验证电阻简化模型对欧姆内阻辨识的适用性。

通过实时采集整车台架实验中“超越”系列燃料电池车中电池系统的实际工况，将实测的电流激励和电压响应作为算法模型的输入，图 2.16 所示为辨识结果与脉冲放电比较：

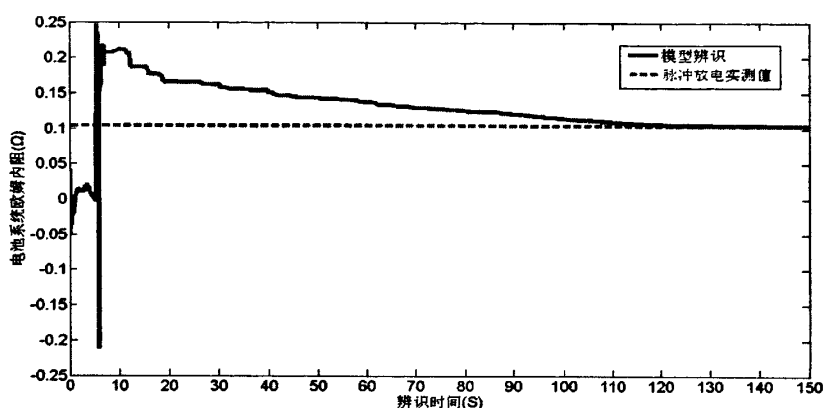


图 2.16 电池内阻等效模型辨识效果图

由上图可得，任取初始内阻值（图中采用 $1\text{m}\Omega$ 作为初始内阻值），欧姆内阻辨识值在 15 秒内迅速收敛，收敛曲线非常接近；当算法执行超过 100 秒后，所辨识的欧姆内阻几乎相同，且最终收敛的值与使用脉冲放电所得到的欧姆内阻值 0.1Ω 非常接近，其精度基本满足实际要求。

可见，简化电路模型同样能够较好地满足锂离子电池欧姆内阻辨识的要求。更为重要的是简化了，模型大大降低了参数辨识的运算量。基于模型的递推最小二乘算法由 5 阶降为 3 阶，其对硬件的依赖将大为减小，为在线地，低成本本地硬件实现欧姆内阻辨识创造了条件。

综上所述，对锂离子动力电池进行寿命评价的流程如图 2.17 所示：

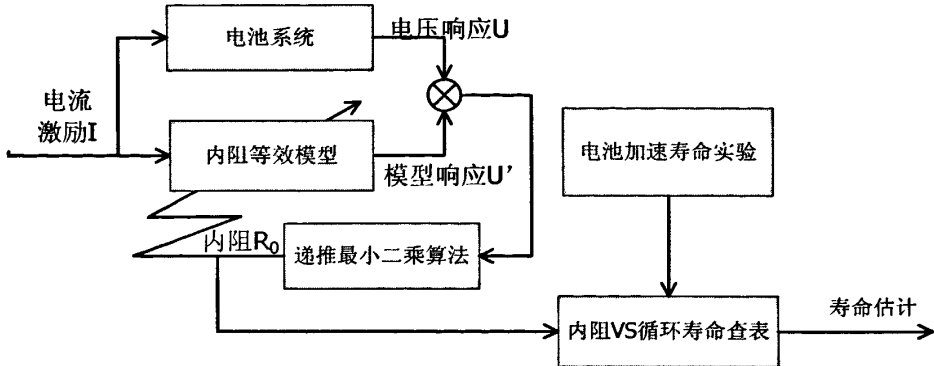


图 2.17 基于内阻辨识进行电池寿命估计流程图

通过采集车载电池系统的电流激励及电压响应，作为电池内阻等效模型的输入；借助基于递推最小二乘算法的参数辨识，获得表征电池欧姆内阻的模型参数 R_0 。参考电池加速寿命实验数据，归纳出电池欧姆内阻在不同运行工况下的变化趋势，体现为不同工况下的多维查表。并据此获得电池的寿命状态，实现对电池的寿命估计^[32]。

与电池单体可用容量的测量不同，电池欧姆内阻的测定受外界环境、测试设备精度和电池样品不一致性的影响更大^[33]。而目前的实验数据积累尚不足以定量地分析出电池欧姆内阻的变化趋势，拟合误差过大。因此若需应用上述基于内阻辨识的电池寿命估计方案，一方面要提高动力电池的一致性，使实验样品具有推广的意义；另一方面要通过更多的实验数据，逐步精确电池欧姆内阻对应电池循环寿命的多维数据表^[33]。

2.5 小结

本文旨在通过对锂离子电池老化机制的分析，选定影响电池循环寿命的外部因素，并以量子化学领域中的艾林方程为依据建立了锂离子电池的循环寿命模型，并设计了相应的电池加速寿命实验方案，分析动力电池应用中外部因素对电池寿命衰减的影响，初步探讨电池寿命估计和预测方法，为进一步研究 SOH 的在线辨识算法的研究提供了一定的依据。同时，通过单体电池实验发现现阶段电池系统单体一致性并不理想，需要借助系统管理加以纠正和改善。

第3章 锂离子电池组不一致性研究

3.1 电池组不一致性表现

对于车载应用而言,由于电池单体电压不够高,必须采用单体电池串联的方式来加以使用,这就导致了电池组不一致性问题。电池的不一致性是指同一规格、同一型号的电池,其电压、内阻、容量、自放电率等方面参数的差别。不一致性的产生有两方面的原因:一是在制造过程中,由于工艺上的问题和材质的不均匀,使得电池内部存在很微小的差别,这种电池内部结构和材质上的不完全一致性,就会使同一批次出厂的同一型号电池的容量、内阻等不可能完全一致;二是在装车使用时,由于电池组中各个电池的所处位置、温度和通风条件、充放电过程等差别的影响,在一定程度上增加了电池的电压、内阻及容量等参数的一致性^[35,36]。

3.1.1 电压不一致性

电压不一致性体现了电池组中各单体之间开路电压的差异。由于电池内部存在阻抗,电池加载工况时的瞬时电压受外界工况等因素的影响,无法确定;而电池通过静置达到内部平衡后的开路电压只和电池的内部状态有关,且是电池系统少数可以直接测量的参数,其不一致性最为直观。选取10节同型号8Ah锰酸锂动力电池单体串联成组,统一其初始开路电压($3.920\text{V} \pm 0.02\text{V}$),在室温环境及无任何均衡措施的情况下,进行3次电流循环充放电试验,每次工况加载结束后均静置5分钟(对于8Ah锰酸锂动力电池而言,可确保电池达到内部平衡)以获得电池单体开路电压。电池组各单体电压分布情况如下图所示:

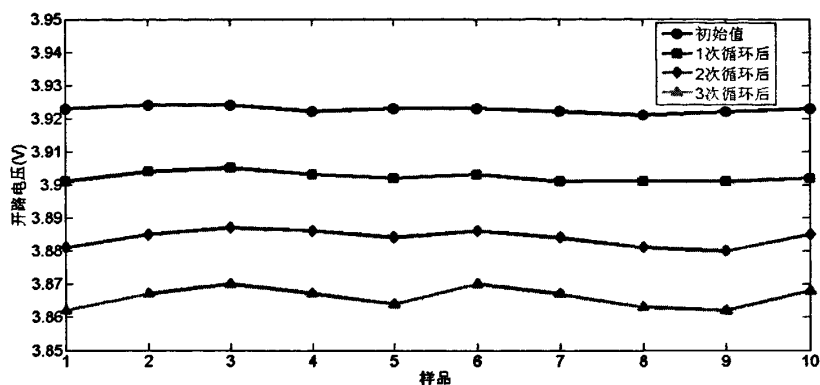


图 3.1 锂离子电池组单体电压分布情况

由上图可见，各单体电池的差异随着工况的加载而不断增大，电池组电压不一致性逐渐显现并不断加深。在这种情况下，电池组放出（充入）标称容量的电量时，就必然会出现个别单体放电截止电压过低（过高）的现象，此时，即使其它部分电池仍然能够放出（充入）一定的电量，但是从电池的安全使用和整车的安全运行角度考虑，必须认为此时电池组已经不能继续放电（充电）了。由于这种不一致性的存在，电池组实际能放出（充入）的电量始终小于其标称容量，而且不一致性越严重，电池组性能受到的影响就越大。

3.1.2 电阻不一致性

开路电压不一致性体现电池组静态条件下的电压分布情况，而电池组动态条件下的电压分布情况可由电池组电阻不一致性来加以体现。对 4 节串联某型号 8Ah 锰酸锂动力电池单体进行充放电实验，充放电电流从 1C 至 5C。加载电流后，电池组的电压响应如图 3.2 所示，图中上面三条电压响应曲线的趋势一致，即单体电池的欧姆内阻以及极化内阻大小接近。而最下方的一条电压响应曲线，由于该电池单体内阻相比其他三节要大，其电压波动比其他三节单体电池更为激烈。

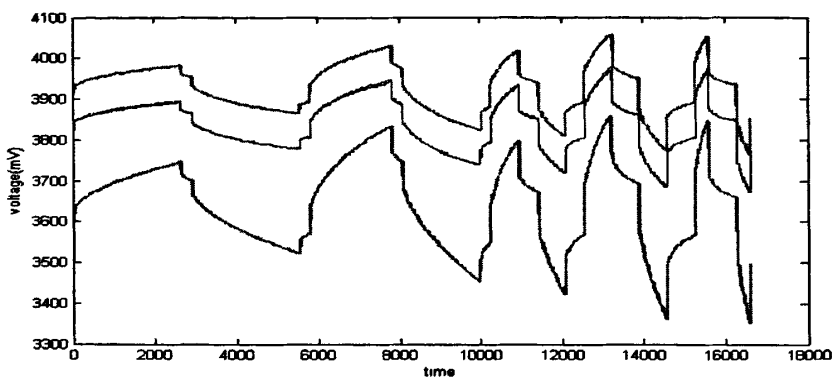


图 3.2 实际单体电池的电压响应曲线

电池单体的内阻越大，则能量损耗就越大，温升也就越快，势必造成电池间的工作环境不一致。反过来，温度越高的电池单体内阻增长速度也越快。随着循环使用次数的增加，这种不一致性将会加剧，这种差异性的累积将形成恶性循环，最终直接影响电池组的性能以及整车的性能。

3.1.3 容量不一致性

如上文所述，由于材料及工艺上的问题，即使同一批次出厂的同一型号电池的容量是不可能完全一致的。下列 6 个 8Ah 锰酸锂电池单体样品取自同一生产批次，通过标准充放电方式测算电池可用容量，其结果如下所示：

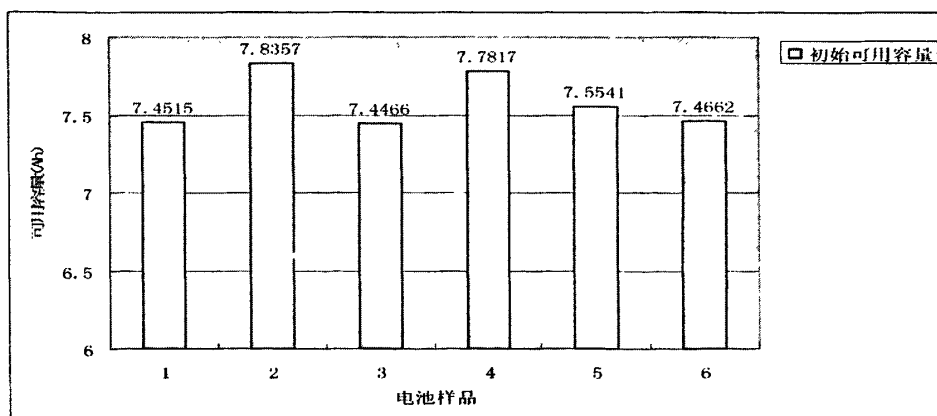


图 3.3 锂离子电池初始可用容量图

电池单体的可用容量存在差异,造成相同的充放电电量在各电池单体中的充放电深度有所不同,不同电池单体工作在不同的充放电深度之中。由本文第二章的电池寿命实验结果可知,放电深度越大,容量衰减越快;即可用容量越小的电池单体容量衰减也越快,这种差异性的累积同样将形成恶性循环,造成整个电池组,电池系统的过早失效。

3.2 锂离子电池组不一致性定义

如上节所述,在目前的技术水平和制造工艺下,从生产过程到使用过程,锂离子动力电池组内各单体电池之间的个体差异,也即不一致性,是客观存在的。因此,定量研究动力电池组的这种不一致性,并据此采取相应的均衡手段,尽量减小其不一致性,对于提高电池组的使用效率,发挥其最大功效来说,具有广泛的意义^[37,38]。

在文章第3.1节所述的电池组三种不一致性表现中,单体电池开路电压与其荷电状态有一一对应的关系,借由与蓄电池类型唯一相关的SOC-OCV曲线,电池组的电压不一致性即是电池组荷电状态不一致性的体现。由本文第二章所述,电池的欧姆内阻和可用容量与电池的寿命状态有关。现阶段电池在应用过程中不能快速测量其可用容量,而电池欧姆内阻可通过如文章第2.4.5节所述的辨识算法进行相对精确的在线实时辨识。因此定义电池欧姆内阻不一致性来体现电池组各单体寿命状态的差别情况。

3.2.1 锂离子电池组电压不一致性定义

在现有的电池组不一致性规范中,一般只规定了电压的变化范围,在统计学中称为极差,即一组数据中极大值与极小值之差。它的主要优点是便于计算。但极差仅由一组数据中的两个数据决定(即电池单体开路电压的最大值和最小值),它没有反映出其他数据的波动情况,即其他电池对蓄电池组均匀性的影响。因而极差并不是离散度的良好测度,不适用于电动汽车电池系统的不一致性定义^[38]。

本文运用现代数学的统计思想,引入统计学上的方差和变异系数的概念,基于电池荷电状态(SOC)提出了串联电池组电压不一致性的数学定义不一致度

ε 。

方差 δ^2 （其标准差即为 δ ）用来衡量一批数据的波动大小，表征其分散度或均匀度；为了对比分析不同水平的数据之间的变异程度，还必须应用变异系数 θ 消除数据平均值高低的影响，使定义指标以相对数形式表示，其值大小等于标准差除以平均值。具体定义如下：

$$\begin{cases} \overline{SOC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SOC_i \\ \delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (SOC_i - \overline{SOC})^2}{n} \\ \theta = \frac{\delta}{\overline{SOC}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{SOC_i - \overline{SOC}}{\overline{SOC}} \right)^2} \end{cases} \quad (3.1)$$

式中： δ^2 为电池组方差；

θ 为电池组变异系数；

SOC_i 为电池单体荷电状态；

$\overline{SOC}$ 为电池组平均荷电状态；

n 为电池组单体个数。

将统计学上的方差和变异系数引入作为电池系统电池组不一致性的量纲有着直观的物理意义。方差体现了电池组单体电池开路电压的分布情况，也就对应了电池荷电状态（SOC）的均匀程度。方差越大，电池组电压离散程度就越大，电压不一致性也就越差。变异系数是衡量资料样品中各观测值变异程度的另一个统计量。变异系数的引入使不同类型的电池系统，不同电压水平下的电池组不一致性可以进行横向比较。

考虑到用 θ 需要使用开方运算，运算量过大，不利于嵌入式系统硬件移植，不适于直接作为不一致性的量纲；本文使用变异系数的2次方来衡量不一致度 ε ，具体定义如下：

$$\varepsilon = \theta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{SOC_i - \overline{SOC}}{\overline{SOC}} \right)^2 \quad (3.2)$$

式中： ε 为电池组荷电状态不一致度；

θ 为电池组变异系数；

SOC_i 为电池单体荷电状态；

$\overline{SOC}$ 为电池组平均荷电状态；

n 为电池组单体个数。

该方法具备统计学原理, 计算简单, 为衡量电池组不一致性, 制定电池组的均衡策略提供了量化的指标。由公式 3.2 可以看出, 不一致度 ε 不仅是各电池单体状态的函数, 而且对该组电池中的 SOC 极差的反映也较灵敏。

但是公式 3.2 也存在明显缺陷: 即 SOC 难以精确估计。电池的荷电状态(SOC)是电池系统中最为重要的参数之一, 在实际应用中, 该参数只能间接测量获得, 其算法一般都十分复杂, 且误差较大。直接采用 SOC 值作为电池组不一致性的判断依据, 系统实现比较困难, 且精度不高。因此, 本文在电池开路电压与电池荷电状态存在非线性对应关系的基础上, 采用单体电池的开路电压作为不一致性参数, 引入补偿系数 K_i , 来近似计算电池组分散度 ε 。

综上, 电池组分散度可定义为:

$$\begin{cases} \bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \\ \varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \left(\frac{V_i - \bar{V}}{\bar{V}} \right)^2 \end{cases} \quad (3.3)$$

式中: ε 为电池组电压不一致度;

K_i 为电池单体分散加权系数;

V_i 为电池单体开路电压;

$\bar{V}$ 为电池组平均开路电压;

n 为电池单体个数。

锂离子电池的开路电压与 SOC 之间的关系是非线性的, 即电池处于不同的状态时, 其电压差别并不能完全代替电池之间的 SOC 差别。通过对 OCV-SOC 曲线进行分段线性, 在对应的近似线性区间内, 通过检测电池端电压特性来预测电池的荷电状态。且本文主要针对 HEV 的应用领域, 锂离子电池系统一般工作于 20%至 80%的电压平台区, 故以该区间作为比例基准。通过近似分段线性, 根据开路电压与电池荷电状态的对应关系, 可以确定系数 K_i 值。

下图为某型号 8Ah 锰酸锂电池的 OCV-SOC 关系曲线, 获得系数 K_i 如表 3.1 所示。

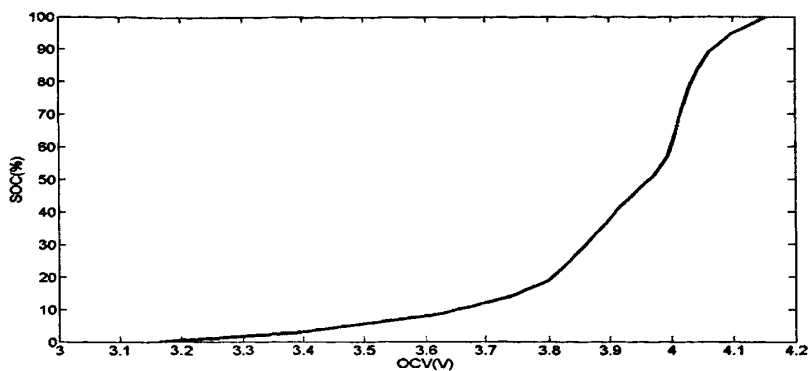


图 3.4 8Ah 锰酸锂电池 OCV-SOC 曲线图

表 3.1 补偿系数 K_i 取值表

V_i (V)	< 3.6V	3.6V ~ 3.8V	3.8V ~ 4.0V	4.0V ~ 4.1V	> 4.1V
K_i	0.060	0.271	1	1.979	0.435

另外，电池实验表明，不同的电池单体，在同一充放电循环下，其电压不一致性会因荷电状态（SOC）的不同而有所变化。以 HEV 用 8Ah 锰酸锂电池单体为实验样品，3 节串联为一组，在锰酸锂电池的电压平台区（20%SOC~80%SOC），以 80%SOC 为初始状态，进行恒流放电实验，获得三个单体的 SOC-OCV 对应曲线如下图所示：

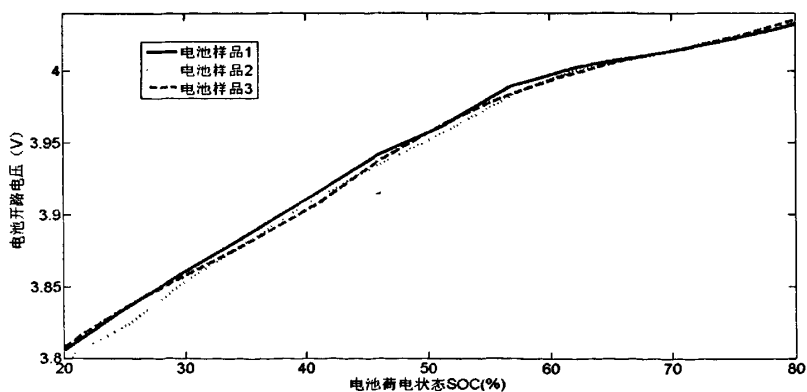


图 3.5 8Ah 锰酸锂电池组电压平台 SOC-OCV 曲线图

由上图可以看到，在 HEV 应用下的电压平台区（SOC20%~80%），电池样品在放电初期电压差异较小，电池样品的电压不一致性随着 SOC 的降低而发散，电压不一致性逐渐增大；而由于是串联放电，从 SOC 定义出发，任一时间各电池单体的 SOC 状态是相同的。因此，此时的电压不一致性增大并不能体现电池单体的不一致度有所增加。一般而言，合理的电池组不一致度定义应该是电池使用时间的函数，在同一个循环中，电池组不一致度应保持不变。而根据公式 3.3 并不能体现这一点，因此再引入补偿系数 K_g ，使电池组不一致度定义更加优化，得公式 3.4 如下：

$$\begin{cases} \bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \\ \varepsilon = \frac{1}{n} K_g \sum_{i=1}^n K_i \left(\frac{V_i - \bar{V}}{\bar{V}} \right)^2 \end{cases} \quad (3.4)$$

式中： ε 为电池组电压不一致度；
 K_g 为电池组分散补偿系数；
 K_i 为电池单体分散加权系数；
 V_i 为电池单体开路电压；
 $\bar{V}$ 为电池组平均开路电压；
 n 为电池单体个数。

补偿系数 K_g 的值可以看作电池组荷电状态（即电池组平均开路电压 $\bar{V}$ ）的函数，电池组 SOC 越低， K_g 也就越低，其值由电池系统的类型确定，需通过大量实验数据获得。本文以 8Ah 高功率锰酸锂电池为样品，通过图 3.5 所示的实验数据，分段近似加以确定，获得系数 K_g 如表 3.2 所示。

表 3.2 补偿系数 K_g 取值表

$\bar{V}$ (V)	< 3.8V	3.8V ~ 3.9V	3.9V ~ 4.0V	> 4V
K_g	0.85	0.94	1.00	1.05

公式 3.4 中，系数 K_i 和 K_g 的值必须根据电池类型来确定，必须通过大量实验数据进一步提高其精度。电池组分散度 ε 表示一个大于或等于零的数， ε 等于

零只有在理想情况下才会出现,所以 ε 的大小反映了动力电池组在不同状态下各单体电池的不一致程度。 ε 越大,电池组的不一致性就越严重。

以同济大学超越系列燃料电池车用锰酸锂电池系统为例,对锂离子电池组单体电压分布情况进行定量分析。该电池以12节8Ah电池单体为一组,在室温环境及无任何均衡措施的情况下,通过加载奇瑞混合动力车电池系统实测工况,进行电池组充放电试验,参照公式3.3,获得电池组不一致度 ε 如图3.6所示。

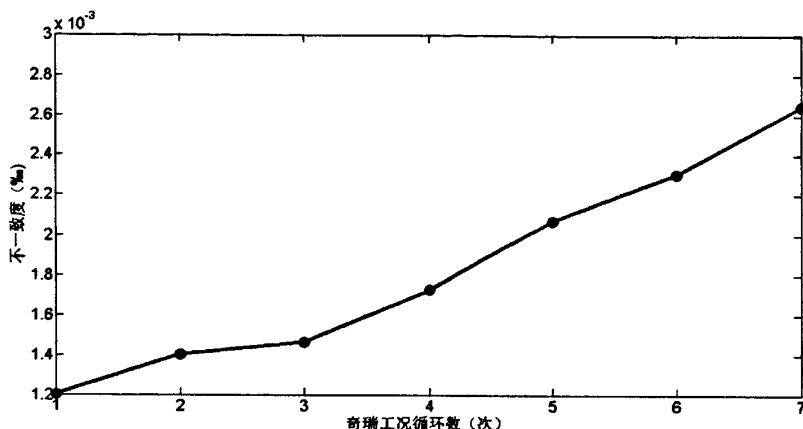


图 3.6 8Ah 锰酸锂电池组不一致度趋势图

可见,随着循环次数的增加,电池组分散度 ε 不断增加,电池组不一致性越来越严重,并有继续恶化的趋势。电池组分散度 ε 定义能够量化电池组的不一致性特性,分段近似线性比较符合 HEV 的应用工况;且计算相对简单,易于实现嵌入式移植。

3.2.2 锂离子电池组内阻不一致性定义

由本文2.4.2节可知,在评估动力电池寿命状态和性能优劣时最应关注的是欧姆内阻。因此,在定义锂离子电池欧姆内阻不一致性来表示电池组内阻不一致性。在电池单体欧姆内阻的测定上,可采用如本文公式2.19所述的脉冲放电离线测量法和如本文2.4.5节所述的在线辨识测量两种方法来实现。

参考电池组电压不一致性定义方法,引入统计学上的方差和变异系数的概念,提出了基于电池寿命状态(SOH)串联电池组内阻不一致度 ϕ 。

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{SOH} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SOH_i, \\ \delta_o^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (SOH_i - \overline{SOH})^2}{n}, \\ \theta_o = \frac{\delta_o}{\overline{SOH}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{SOH_i - \overline{SOH}}{\overline{SOH}} \right)^2} \end{array} \right. \quad (3.5)$$

式中：
 δ_o^2 为电池组寿命状态方差；
 θ_o 为电池组寿命状态变异系数；
 SOH_i 为电池单体寿命状态；
 $\overline{SOH}$ 为电池组寿命状态平均值；
 n 为电池组单体个数。

考虑到用 θ 需要使用开方运算，运算量过大，不利于嵌入式系统硬件移植，不适于直接作为不一致性的量纲；同样使用变异系数的 2 次方来衡量电池组寿命状态不一致度 ϕ 。

$$\phi = \theta_o^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{SOH_i - \overline{SOH}}{\overline{SOH}} \right)^2 \quad (3.6)$$

式中：
 ϕ 为电池组欧姆内阻不一致度；
 θ_o 为电池组寿命状态变异系数；
 SOH_i 为电池单体寿命状态；
 $\overline{SOH}$ 为电池组寿命状态平均值；
 n 为电池组单体个数。

同 SOC 类似，SOH 并不能直接测量。由本文第二章推导分析，电池单体的 SOH 与电池欧姆内阻呈一定的比例关系。因此，根据电池管理系统中通过测量或辨识电池单体欧姆内阻数值，引入补偿系数 K_o ，将电池组不一致度 ϕ 从电池寿命状态 SOH 的函数转化为电池欧姆内阻的函数。考虑到电池单体初始内阻的差异，统一采用基于初始内阻的归一化欧姆内阻以便横向比较。得到公式如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{R_o} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{oi}, \\ \phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_o \left(\frac{R_{oi} - \overline{R_o}}{\overline{R_o}} \right)^2 \end{array} \right. \quad (3.7)$$

式中: ϕ 为电池组欧姆内阻不一致度;

θ_o 为电池组寿命状态变异系数;

$\overline{R_o}$ 为电池组归一化欧姆内阻平均值;

R_{oi} 为电池单体归一化欧姆内阻;

K_o 为补偿系数;

n 为电池组单体个数。

K_o 的选定由电池特性决定, 通过电池寿命实验数据进行量化。本文选用的为 8Ah 锰酸锂电池单体, 参考公式 2.22, 电池单体的 SOH 与电池循环次数成线性反比例关系。根据本文开展的电池寿命实验数据拟合, 电池单体的内阻增大与电池循环次数之间呈指数上升的关系。综上可得电池单体归一化欧姆内阻与电池寿命状态 SOH 之间的关系如下图所示:

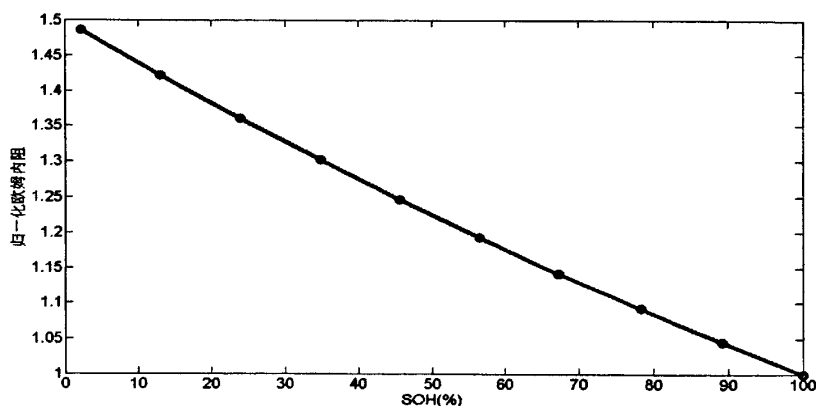


图 3.7 8Ah 锰酸锂电池单体归一化内阻与电池寿命状态关系图

随着电池组内阻不一致性的增大, 电池组电池单体之间的归一化欧姆内阻差异明显, 而电池组平均归一化欧姆内阻值保持相对稳定。因此, K_o 的取值可针对电池单体归一化内阻与电池寿命状态关系图来进行分段线性来确定。

就目前而言, 对电池系统的 SOH 研究尚处于初级阶段, 其准确的归一化内阻与电池寿命状态数值关系较难确定。 K_o 的取值需要进一步的电池寿命实验来加以确定和优化。

3.2.3 锂离子电池组不一致性表征

由本文第二章可知，在锂离子电池循环寿命周期当中，电池的欧姆内阻随寿命衰减而增大是不可逆的过程，现阶段的电池管理系统无法介入进行控制和调节；且其增速受电池单体间的内部差异性及外部工作环境所影响；同时，电池欧姆内阻在电池系统中属于二次测量值，相比开路电压而言误差较大；其与电池寿命状态的对应关系尚需大量实验数据加以支持。

相比较而言，现有的电池管理系统对电池单体电压的测量精度较高，借助一定的均衡措施可实现对电池单体电压的双向调节控制。且锂离子电池开路电压与电池荷电状态（SOC）之间存在较稳定的对应关系，控制电池组电压不一致性即实现了对电池单体荷电状态（SOC）不一致性的调节，确保电池组性能稳定和安全。

对于现阶段的电池管理系统而言，其控制目标主要还基于电池系统安全可靠性和充放电性能的优化；而定义电池组的不一致性即为电池管理系统控制算法和管理策略提供量化参考，因此电池组的不一致性着重考察电池组开路电压或荷电状态（SOC）状态，采用电池电压的不一致性进行表征。

3.3 电池组不一致性影响分析

如图 3.8 所示，当电池单体组成电池系统后，由于电池单体之间的不一致性客观存在，造成各电池单体的应用工况有所差异，随着充放电循环数的增加，其差异性永不会趋于消失，而是逐步恶化；反过来工况恶化的单体性能加速下降，造成工况的进一步恶化，形成恶性循环，大大影响整组电池的性能，降低电池组使用寿命。图 3.6 所示的实验也证实了这一结论。

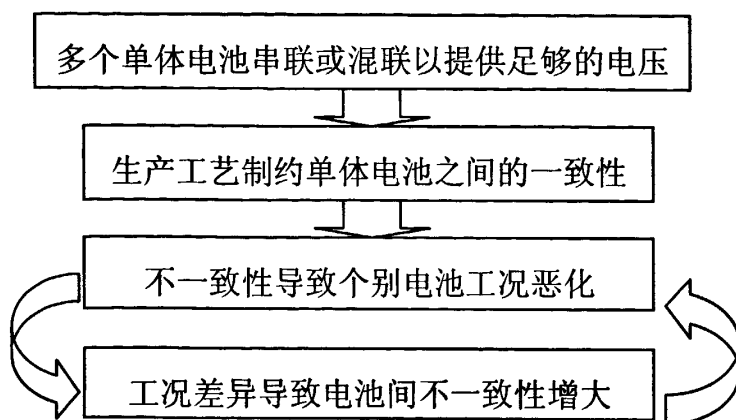


图 3.8 不一致性造成正反馈的出现

总结电池组不一致性增大后对蓄电池组使用性能的不良影响如下^[36]：

- 1) 电池组可用容量下降。电池组因为电压或者容量的不一致，充电时，个别单体很快达到充电截止电压，电池管理系统介入，电池系统停止充电防止过充。此时，其他单体电池并未充满；单体电池均充满随后放电时，个别单体先于其他电池率先达到充电截止电压，电池管理系统介入，电池系统停止放电防止过放。因此，电池组实际可用容量将有所下降。
- 2) 电池组可用功率减少。电池组中存在电阻不一致性。内阻越大的电池单体能量损耗就越大，温升也就越快，势必造成电池间的工作环境不一致。反过来，温度越高的电池单体内阻增长速度也越快。电池组对外放电时，内阻大的电池单体瞬时压降大，当放电电流达到一定程度时，个别电池单体先降到放电截止电压，电池组停止放电，输出功率无法提高；电池吸收电能时，内阻大的电池单体电压跳升也大，当充电电流达到一定程度时，个别电池单体先达到充电截止电压，电池组无法继续充电，导致输入功率下降，直接影响电池组的功率特性。
- 3) 电池组循环寿命缩短。根据木桶效应，电池组的循环寿命视其寿命最短的单体的循环寿命而定。由于不一致性的客观存在，在使用过程中又产生恶性循环，势必造成电池间的工作环境不一致，随着循环使用次数的增加，这种不一致性将会加剧，工况恶劣的电池单体加速衰减，最终影响整个电池组的循环寿命。

3.4 提高电池组一致性的措施

从以上分析可知,即使在单电池技术取得重大突破、性能显著提高的前提下,提高电动汽车性能,特别是增加续驶里程和提高电池组使用寿命的关键就是提高动力电池的成组运用技术,尽可能保证和提高动力电池的一致性。

根据动力电池应用经验和试验研究,从电池使用和成组筛选等方面可以采用 3 项措施,避免电池不一致性扩大,保证电池组寿命逐步趋于单电池的使用寿命^[39]。

- 1) 从制造角度而言,提高电池制造工艺水平,保证电池出厂质量,尤其是初始电压的一致性。同一批次电池出厂前,以电压、内阻及电池化成数据为标准进行参数相关性分析,筛选相关性良好的电池,以此来保证同批电池性能尽可能一致。在动力电池成组时,务必保证电池组采用同一类型、同一规格、同一型号的电池组成。
- 2) 从电池管理系统角度,在电池组使用过程中检测单电池参数,尤其是动、静态情况下(电动汽车停驶或行驶过程中)电压分布情况,掌握电池组中单电池不一致性发展规律,对极端参数电池进行及时调整或更换,以保证电池组参数不一致性不随使用时间而增大。避免电池过充电,尽量防止电池深放电。保证电池组良好的使用环境,尽量保证恒温,减小振动,避免水、尘土等污染电池极柱。
- 3) 对于电池系统设计者而言,最重要也是最应关注的是引入实用性电池组能量管理和均衡系统,制定合理的电池均衡策略,主动干预和降低电池的不一致性。

3.5 小结

本章分析了锂离子电池组不一致性的具体表现形式。针对车载应用和实际技术水平,提出了基于开路电压不一致性的串联锂离子电池组不一致度概念,实现对串联锂离子电池组不一致性的量化分析;该不一致度概念并不取决于电池的类型,具有电池系统普遍适用的意义。同时,本章讨论了不一致性带来的恶性循环对电池系统性能的影响,提出了提高电池组一致性的具体措施,对下层电池管理系统 LECU 提出了功能要求。

第4章 单体电池管理系统方案

4.1 单体电池管理系统结构及要求

本文所述的电池管理系统采用了分级模块化的结构,如图4.1所示,即将几个单体电池分为一组(模块化),有一个单体电池管理模块统一管理,即下层控制器 LECU (Local Electronic Control Unit), 然后几个模块的 LECU 统一由一个中央控制器 CECU (Central Electronic Control Unit) 进行管理。LECU 和 CECU 之间, CECU 和车辆控制器 VMS 之间的数据交换采用 CAN 总线形式。该结构的优势在于实现了模块化,系统的结构比较简单,便于安装与维护,整个电池管理系统中线束较少。线束的减少使其工作起来更加安全可靠,并且调试、安装以及维修都比较方便。分级化,模块化已成为一种发展趋势,为大多数电池管理系统所采用^[1,21]。

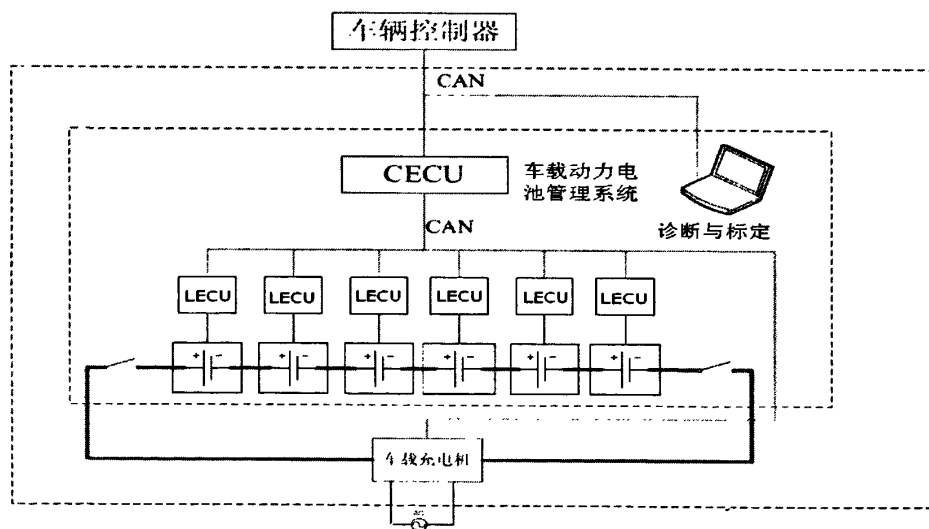


图 4.1 分布式车载动力电池管理系统

如本文第3章所述,对于锂离子电池系统而言,当前电池系统不一致性问题比较严重,其电池本身又具有明显的时变和非线性特征,电池管理的要求为“管理到单体”;而对于燃料电池而言,单片燃料电池的状态更需要实时监控,

因此单电池管理系统不可或缺。

对于所有电池而言，过充或过放都会损坏电池，因此为了保证车辆的安全和延长蓄电池的寿命，需要时刻检测单节电池的电压。对于锂离子电池而言，静置足够长的时间的开路电压（OCV）是其荷电状态（SOC）最精确的反映，电压测量的精度会直接影响其荷电状态（SOC）的计算误差。因此要求单体电池电压测量要有相当高的精度。

其次，对于锂离子电池系统而言，由于不一致性的存在，锂离子电池管理系统中引入了均衡电路来对电池系统进行主动干预，保证各单体电池之间的电压差不超过某一设定值，从而将其 SOC 之间的差异控制在一定的范围之内，降低其不一致性对电池模块性能的影响。

另外，单电池管理系统还应与上位机 CECU 保持通讯，提供电池单体的各种参数信息，作为 CECU 执行电池系统控制策略的依据；并接收 CECU 发送的指令，实现对电池模块以及电池单体的控制管理功能。

综上所述，对于锂离子电池而言，单体电池管理系统 LECU 需要完成的功能主要有^[3]：

- 1) 高精度的单体电池电压，温度测量及保护；
- 2) 通过 CAN 总线和 CECU 之间通讯交换数据；
- 3) 当电池组不一致性达到一定值时，能够对电池组进行均衡；
- 4) 电池模块故障诊断、记录及处理。

对于燃料电池系统而言，由于不需要进行均衡，因此燃料电池的单体电池管理系统需要实现的功能为：

- 1) 高精度的单体电池电压测量及保护；
- 2) 通过 CAN 总线和 CECU 之间通讯交换数据；
- 3) 电池模块故障诊断、记录及处理。

在燃料电池系统中，单体电池管理系统又称 CVM（Cell Voltage Monitor）模块。考虑到其硬件结构和功能定义与锂离子电池单体电池管理系统保持一致，因此均称为 LECU。

4.2 单电池电压巡检设计及硬件实现

单体电池电压巡检是单体电池管理系统的基本要求之一，也是 LECU 及

CECU 根据电池状态进行后续处理控制的前提。因此单体电池管理系统的设计需要首先考虑单电池电压巡检方案的设计。

单体电池管理系统主要应用于锂离子动力电池系统和燃料电池系统中，由文章 4.1 讨论可知，若是不考虑电池均衡的单电池巡检系统，其在不同应用下的功能要求基本相同。因此本文从设计伊始即考虑尽可能统一电池巡检系统的硬件方案，提高硬件系统的通用性，降低硬件开发的成本。

总体而言，单电池巡检方案包括分立元件方案和集成芯片的方案。分立元件方案原理简单，较易实现，且适用性强。在实际应用中，人们根据不同的需要结合共模、差模测量方法，提出了如直接采样法，V/F 法，隔离器件加电容器采样等分立方案。然而新能源汽车电池系统上通常有上百只单体电池组成，采用上述分立方法对单体电池电压进行测量，硬件电路将十分庞大，成本也会相应增高。而集成芯片的方案使用微处理器显著降低控制系统的硬件设计，减少分立元件数量，改善系统可靠性，降低系统硬件成本；同时数字集成电路不存在温漂和参数漂移问题，一旦调试正常就能保证长期稳定运行；另外采用微处理器可设计统一的硬件平台，适应不同控制系统，通过软件进行调适所选用的电池特性及系统的需求，从而实现更高的灵活性及精准度。目前，集成化已成为电池管理领域的主要技术趋势，包括德州仪器、瑞萨、美信、AD、凌特及凹凸科技（O₂Micro）等公司针对智能电池管理领域，设计电池系统专用芯片，对单体电池电压值进行测量。

在本文单体电池电压巡检方案中，即采用凹凸科技（O₂Micro）新研发的 OZ8940 芯片作为 LECU 单电池电压检测芯片。

4.2.1 LECU 单电池电压检测芯片选择

在电池管理系统的下层控制器 LECU 的设计中，我们使用了凹凸科技的 OZ8940 芯片作为电池系统的监测芯片。OZ890 为 6~12 串锂离子电池以及燃料电池检测及保护 IC，有如下主要特点：

- 1) 多通道的电压和温度检测 ADC: 12 个 12bits 的电压测量通道、2 个 12bits 的外部温度测量通道、1 个 12bits 的内部温度测量通道；
- 2) 内嵌的保护功能：低压、过压保护，低温、过温保护，短路、断路保护以及永久失效保护；

- 3) 可编程的 64*16Bits 的 EEPROM;
- 4) 支持片内均衡 (充电或空闲工况下);
- 5) 集成的 10V 和 3.3V 稳压输出端, 10mW 负载驱动能力;
- 6) 支持 IIC 通讯。

相对之前单体电池管理系统所采用的 OZ890 芯片, OZ8940 电压采样范围更大, 且采样周期由 1s 下降到 250ms, 更适合车载电池系统应用。

4.2.2 LECU 主控芯片的选择

LECU 主控芯片负责管理 LECU 的运行状态, 借助 IIC 总线, 接收和处理 OZ8940 芯片采样获得的数据, 并将上位机 CECU 所需的信息通过 CAN 总线传送至 CECU; 同时, 主控芯片必须保留足够的数据运算能力, 以便执行相应的数据转换, 逻辑处理和控制算法。基于运算能力和成本核算的考虑, 本文选择了 Freescale 公司的 8 位单片机 MC9S08DZ60 作为 LECU 的控制芯片。

MC9S08DZ 系列集成了低成本的 MSCAN 控制器, 内置丰富的存储器和外围组件, 适合汽车及工业应用。其主要特点为:

- 1) 支持高达 40-MHz HCS08 CPU (20-MHz 总线), HC08 指令集, 支持最多 32 个中断/复位源;
- 2) 整个工作电压和温度范围内可读取/编程/擦除的 Flash 存储器;
- 3) 多种省电模式选择;
- 4) 单线背景调试接口, 片上及在线仿真 (ICE), 带总线实时捕获功能
- 5) 24 通道 12bits ADC×1, MSCAN08 控制器 (执行 CAN2.0b 协议)×1, IIC×1, SCI×2;
- 6) 53 个通用输入/输出 (I/O) 管脚和 1 个专用输入管脚; 24 个中断管脚, 每个管脚带触发极性选择; 所有输入管脚上可配置输出斜率和驱动强度。

4.2.3 OZ8940 与 DZ60 的 IIC 通信电路

检测芯片 OZ8940 与主控芯片 DZ60 之间的通讯通过 IIC 总线完成。IIC (Inter-Integrated Circuit) 总线是一种由 PHILIPS 公司开发的两线式串行总线, 使用多主从架构, 用于连接微控制器及其外围设备。由数据线 SDA 和时钟 SCL 构成串

行总线，在 IC 之间进行双向传送，最高传送速率 100kbps。其网络结构如下图所示：

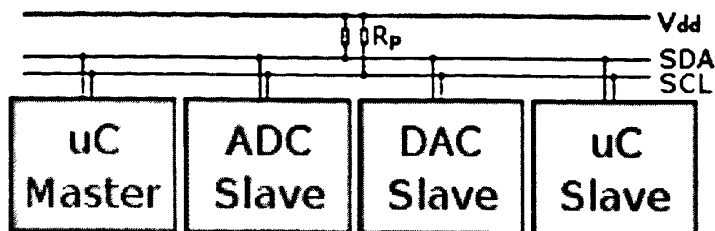


图 4.2 IIC 总线网络结构图

针对 LECU 中的应用，设置主控芯片 DZ60 为 IIC 总线主节点，检测芯片 OZ8940 为 IIC 总线从节点，并可根据需要将多个 OZ8940 挂在同一 IIC 总线上实现一主多从的数据通讯。

4.2.4 CAN 总线通讯

CAN 总线（Controller Area Network，即控制器局域网）最初出现在 80 年代末的汽车工业中，由德国 Bosch 公司最先提出。其被设计作为汽车环境中的微控制器通讯，在车载各电子控制装置 ECU 之间交换信息，形成汽车电子控制网络。CAN 是一种多主方式的串行通讯总线，基本设计规范要求有高的位速率，高抗电磁干扰性，而且能够检测出产生的任何错误。当信号传输距离达到 10Km 时，CAN 仍可提供高达 50Kbit/s 的数据传输速率。因为 CAN 总线的数据通信具有突出的可靠性、实时性和灵活性，CAN 总线已经在汽车工业等领域得到广泛应用。如图 4.1 所示，本文所述的分级模块化电池管理系统均通过 CAN 总线进行数据和信息的交换。

由于电池系统必须输出几百伏的高电压来满足新能源汽车的需求，不同电池组之间要通过串联连接。而每一个 LECU 的 PCB 板的地电位与相应的电池组的最低一节电池的负极电位相同，因此不同 LECU 之间，以及 LECU 与 CECU 之间的地电位均不相同，需要引入隔离元件来对不同的地电位进行隔离，保证 CAN 总线的正常通讯。

与此同时，由于 LECU 由 OZ8940 提供电源，其负载驱动能力有限（3.3V，10mW），对于传统的光电耦合器件无法很好地驱动。因此，本文单体电池管理

系统采用了 AD 公司的 ADuM1201 数字式隔离器芯片。该芯片内置两路数字隔离通道，单片即可实现 CAN 总线接收和发送的电平隔离。ADuM1201 支持 25Mbps 的数据通讯，相比较光耦元件而言，其电流损耗更是降低至 2mA 以下。ADuM1201 将单片机对外的输入输出隔离起来，起消减干扰和保护电路的作用，还能够进行接口电平的转换。CAN 总线收发器 PCA82C250 用于驱动 CAN 信号的接收和发送。其电路结构如图 4.3 所示：

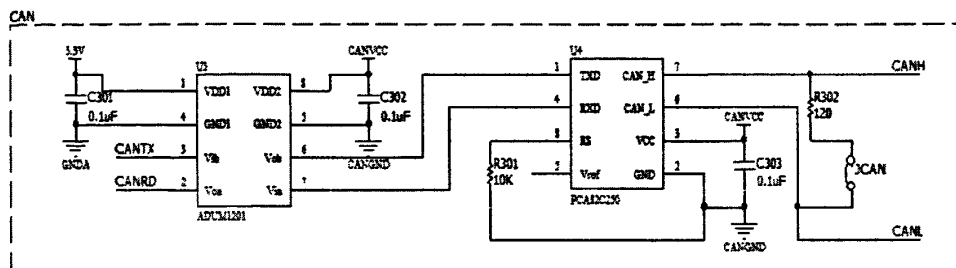


图 4.3 LECU CAN 模块电路结构图

4.2.5 LECU 供电部分设计

从电池管理系统结构出发，各电池模块独立向 LECU 供电能够简化系统设计，实现 LECU 模块化，降低硬件成本，提高电池系统整体可靠性。监测芯片 OZ8940 正常工作的供电电压范围为 9V~60V，因此使用电池模块（12 节）的总电压向 OZ890 提供电源。同时 OZ8940 具备 3.3V，10mW 的稳压输出能力，足够给主控芯片 DZ60 提供电压。该供电设计保证了 OZ8940 和 DZ60 的独立供电，同时也为后续的 LECU 低功耗设计提供了可能。

CAN 模块以及 ADuM1201 副边部分使用 5V 电源供电。考虑到 CAN 模块功耗较大，对于锂离子电池系统而言，为保证不同电池模块长期使用的电压一致性，该 5V 电源由 CECU 提供；而对于燃料电池系统来说，因额外负载而引起的电池电压降较小，对燃料电池整体性能影响可以忽略，因此该 5V 电源可统一由某一电池模块通过线性电源芯片 LM7805 提供 5V 稳压输出。其他 LECU 的 CAN 模块均使用该电源供电，确保不同 LECU 中 CAN 模块保持相同的电平。

4.2.6 LECU 结构框图

综上所述，单体电池管理系统 LECU 由单体电池监控芯片 OZ8940、主控芯

片 MCS08DZ60 以及 CAN 模块组成。实现对单体电池进行单体电池电压检测和保护, 并通过 CAN 总线与上位机 CECU 保持通讯。LECU 硬件结构图如图 4.4 所示。根据 CAN 模块供电方式的不同, 燃料电池单电池管理系统可分为主 LECU 和从 LECU, 主 LECU 为整个电池系统中各 LECU 的 CAN 模块电源。如图 4.5 所示单体电池管理系统结构图, 各 LECU 协同工作, 组成完整的电池管理系统。

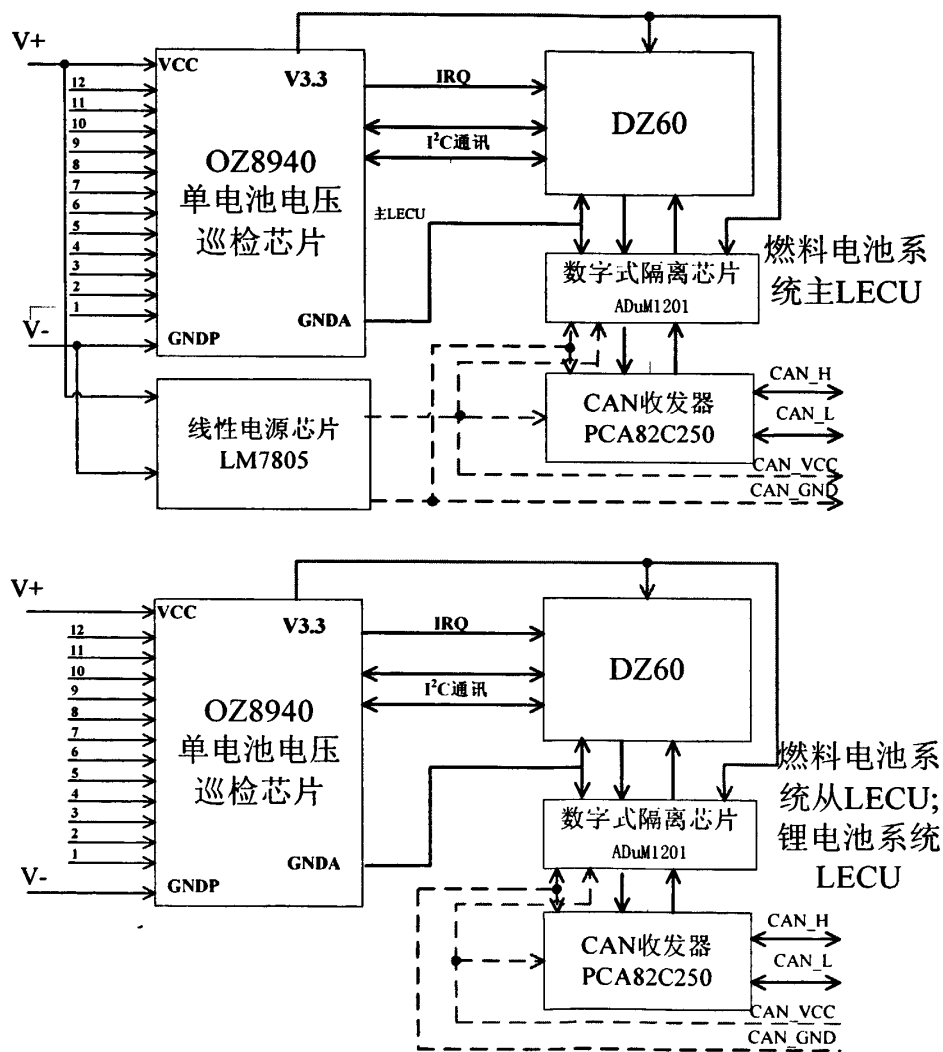


图 4.4 LECU 硬件结构图

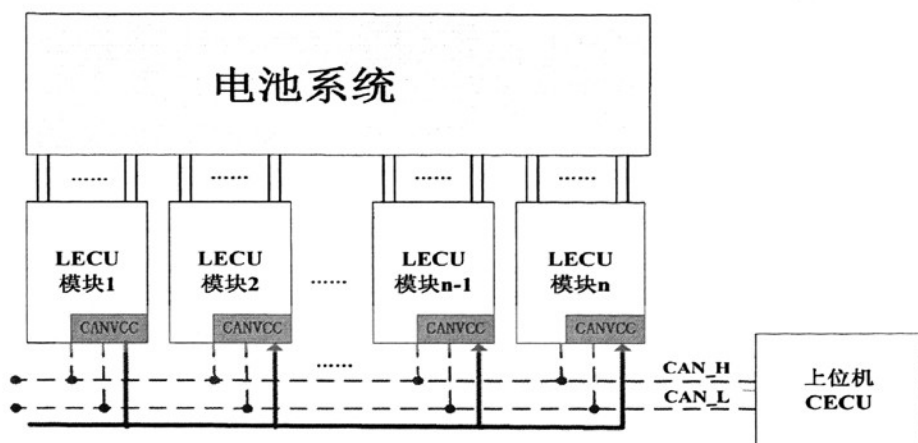


图 4.5 LECU 系统结构框图

在实验室原型系统的条件下，上述方案应用在高功率 8Ah 锂离子电池系统以及 5kW 燃料电池发动机当中，各部分功能正常，电压巡检系统的绝对精度可控制在 $\pm 15\text{mV}$ 之内，电池检测及数据通讯性能稳定。表明本文的单体电池电压巡检方案能够较好地满足实际要求，其合理性得到初步验证。

4.3 下层控制器的低功耗策略及实现

功率损耗问题是近年来人们在系统设计中普遍关注的难点和热点，低功耗设计的优势是不言而喻的：其一是减轻供电系统的压力，节约能源；另外通过实现低功耗降低系统各部分的热损失及电应力，增强系统的安全性和可靠性。

燃料电池系统在停机时管理系统无电流损耗，因此不必考虑低功耗问题。但对于利用电池系统常供电的锂离子电池管理系统 LECU 而言，整车在长时间停车时，蓄电池无任何能量补充，电池管理系统本身的功率损耗问题就显得尤为突出；同时功耗越大，对于锂离子电池系统的一致性影响也就越明显，因此需要对 LECU 进行低功耗管理，尽可能地降低 LECU 的功率损耗，减少其对蓄电池系统性能的影响^[1,15]。

4.3.1 低功耗模式实现的硬件条件

随着功耗问题为越来越多的硬件厂商所重视，低功耗模式已成为几乎所有嵌入式芯片及元件的基本功能之一。对于系统设计者而言，可通过使系统中各

组件运行于低功耗模式，实现整个系统的低功耗。由本文 4.2 章节的 LECU 结构所述，使用电池模块作为其电源的是 LECU 的 OZ8940 芯片和 MC9S08DZ60 单片机，CAN 总线收发器使用的是 CECU 的电源供电，故不列入 LECU 的低功耗设计当中去。同时也因为上述元件具备的低功耗模式特性，为整个 LECU 系统的低功耗设计提供了可能。

MC9S08 单片机的低功耗模式

考虑到低功耗的应用场合，Freescall 公司在其 MC9S08 系列单片机中设置多种低功耗模式（三种停止模式和一种等待模式），降低其工作能耗。这为在基于 MC9S08DZ60 的 LECU 中实现低功耗奠定了基础。

由于电池管理系统中 CECU 与 LECU 的通讯借由 CAN 总线完成，本方案使用了 CECU 发送命令，MCU 内部使能和 CAN 唤醒来实现 MCU 正常工作模式与低功耗模式的切换，因此在低功耗模式下，CAN 总线必须具备唤醒单片机的能力；其次，为计时需要，低功耗模式下时钟发生器需要继续运行；另外，单片机的 IRQ 中断也需要具备唤醒单片机的能力，来响应电池系统过压，欠压，过流，高温等意外事件的发生，保证电池的安全。综上，MC9S08DZ60 单片机选用其停止 3 模式作为其低功耗模式。

停止 3 模式并不是消耗最少电流的工作模式，但它保留的模块功能多，而且在所有停止模式中对系统工作影响最小。更重要的是，停止 3 通过中断退出，是不需要进行任何初始化或重新配置的。中断发生后，CPU 开始处理堆栈操作，引导其进入中断服务程序。执行中断返回（RTI）指令后，CPU 会回复到紧跟在 STOP（停止）指令后的那一条指令处，因此符合电池管理系统的需要。

OZ8940 的低功耗模式

LECU 中采用 O2Micro 公司的 OZ8940 电池监控芯片作为电池系统信号采样和 LECU 供电芯片，为节约能耗，OZ8940 芯片提供两种工作模式——Full Power 模式和 Sleep 模式，并根据系统状态实现两种工作模式的自动切换。

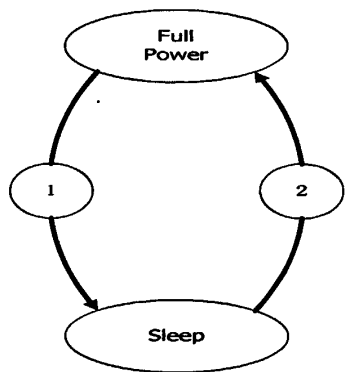


图 4.6 oz8940 芯片工作模式切换图

表 4.1 oz8940 芯片工作模式切换表

转换	初始状态	转换条件	终止状态
1	Full Power	4 个扫描周期内无电池意外事件发生； 均衡未开启； IIC 总线未激活	Sleep
2	Sleep	IIC 总线激活； 短路事件发生；	Full Power

单片机与 OZ8940 芯片之间通过 IIC 总线进行通讯。由图 4.6 及表 4.1 所示，当单片机禁用 IIC 总线后，若电池状态一切正常，且未开启均衡，OZ8940 芯片则自动从 Full Power 模式进入 Sleep 模式；当单片机激活 IIC 总线，并和 OZ8940 芯片建立 IIC 通讯后，OZ8940 芯片将自动从 Sleep 模式中恢复过来，重新进入 Full Power 模式。因此，在 LECU 的低功耗设计中，通过单片机禁用/使能 IIC 总线通讯来实现对 OZ8940 芯片工作模式的切换。

CAN 模块的低功耗处理

在锂离子电池 LECU 当中，CAN 模块包括数字式隔离器芯片 ADuM1201 和 CAN 总线收发器 PCA82C250。舍弃传统光耦隔离而使用数字式隔离器，主要就是基于功耗的考虑，LECU 使用自身 3.3V 作为 ADuM1201 原边的供电，经实测电流损耗在 800uA 左右，相比光耦，功耗大为降低。ADuM1201 的副边以及 PCA82C250 采用 CECU 进行供电，不影响 LECU 的功耗。

当然从整体电池管理系统的低功耗设计而言，CAN 总线收发器 PCA82C250 的功耗不容忽视，同样需要进行低功耗的处理。PCA82C250 提供 Standby 低功耗

耗模式，只需拉高其 RS 引脚电平，即可使其进入 Standby 模式。在 Standby 模式下，PCA82C250 关闭其差动发送部分，但仍保持其接收功能。在这种只听状态下，一旦 CAN 总线上有数据发送，PCA82C250 接收数据，传送至 MCU，令单片机产生 CAN 唤醒中断，从停止模式中恢复过来。但是若在 LECU 中导入 PCA82C250 的低功耗设计，需要使用继电器或 PhotoMos 等器件，实现对 PCA82C250 的不同模式控制。而在正常功耗仅为几十毫安的 LECU 系统中，使继电器或者 PhotoMos 等器件正常工作所带来的额外功耗过大，在此基础上进行低功耗设计得不偿失；况且在拥有众多 LECU 模块的电池系统中，因此带来硬件成本的增加也会非常明显。

综上，本文在 CAN 模块的低功耗处理上，着重于低功耗器件的选择。基于成本和整体功耗考虑，将 CAN 收发器的低功耗处理忽略或者交由 CECU 来加以完成。

4.3.2 LECU 的低功耗策略

如图 4.5 所示，在目前的两级电池管理系统架构中，CECU 和 LECU 之间通过 CAN 总线进行通讯，因此本方案中的低功耗指令也利用 CAN 总线进行传输：当整车处于预设的状态之后，CECU 通过 CAN 总线向 LECU 发送低功耗指令；LECU 接收到低功耗指令后，关闭暂时不需要的的外围模块，令 MCU 进入停止 3 模式，最终整个 LECU 系统进入低功耗状态^[40,41]。

对于电池管理系统而言，CECU 及 LECU 的低功耗策略需要配合使用。在实际应用中，根据电池管理系统控制策略的不同，LECU 低功耗策略也需要做出调整。本方案定义了两种 LECU 低功耗策略，在实际使用中可根据 CECU 特点及相关应用选择。具体设定如下：

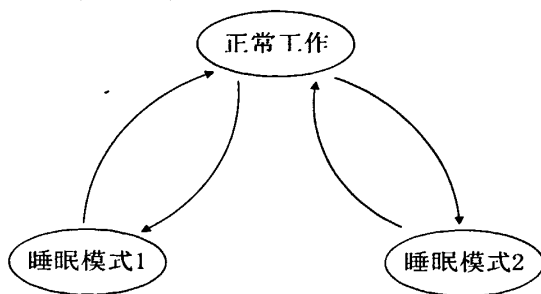


图 4.7 LECU 工作模式切换图

表 4.2 LECU 工作模式切换表

低功耗模式	进入条件	功能定义	结束条件	适用范围
睡眠模式 1	CECU 通过 CAN 总线发送给 LECU 的睡眠模式 1 指令	LECU 进入低功耗状态，定期自唤醒并进行一次单电池电压巡检，将检测结果通过 CAN 总线向 CECU 发送，再次进入低功耗状态	CECU 通过 CAN 总线发送给 LECU 的唤醒指令以及 OZ8940 事件中断的产生	CECU 进入低功耗模式需要 LECU 发送的 CAN 数据将其唤醒
睡眠模式 2	CECU 通过 CAN 总线发送给 LECU 的睡眠模式 1 指令	LECU 进入低功耗状态，直到 CECU 通过 CAN 总线发送的唤醒信号到达	CECU 通过 CAN 总线发送给 LECU 的唤醒指令以及 OZ8940 事件中断的产生	CECU 具备自唤醒功能

结合本文 4.3.1 节 LECU 低功耗硬件实现条件以及定义的低功耗策略,LECU 低功耗模式的具体实现过程如图 4.8 所示,LECU 的睡眠模式选择由 CECU 决定。

若进入睡眠模式 1，LECU 进行一系列模式切换操作，RTC 定时中断唤醒，唤醒后唤醒次数加 1，如果没有达到指定的唤醒次数，马上返回睡眠模式 1，直达到次数后，将唤醒次数清零。然后通过 CAN 总线向 CECU 发送电池电压，电流及温度等信息。发送结束后再次进入睡眠模式 1，直到 CECU 通过 CAN 发送唤醒信号，LECU 从睡眠模式 1 恢复到正常工作模式。

若进入睡眠模式 2，LECU 进行模式切换操作后，一直维持低功耗状态，直到直到 CECU 通过 CAN 发送唤醒信号，LECU 从睡眠模式 2 恢复到正常工作模式。

将 OZ8940 的 ALARTN 引脚与 LECU 的 MCU 上的 IRQ 口相连,当 OZ8940 检测到电池系统发生意外事件（电池过压、欠压、过流、短路、高温等）时，ALARTN 引脚向 DZ60 的 IRQ 口发跳变信号，接收到信号后 LECU 也将立即从

睡眠模式中恢复过来，转入正常模式工作。

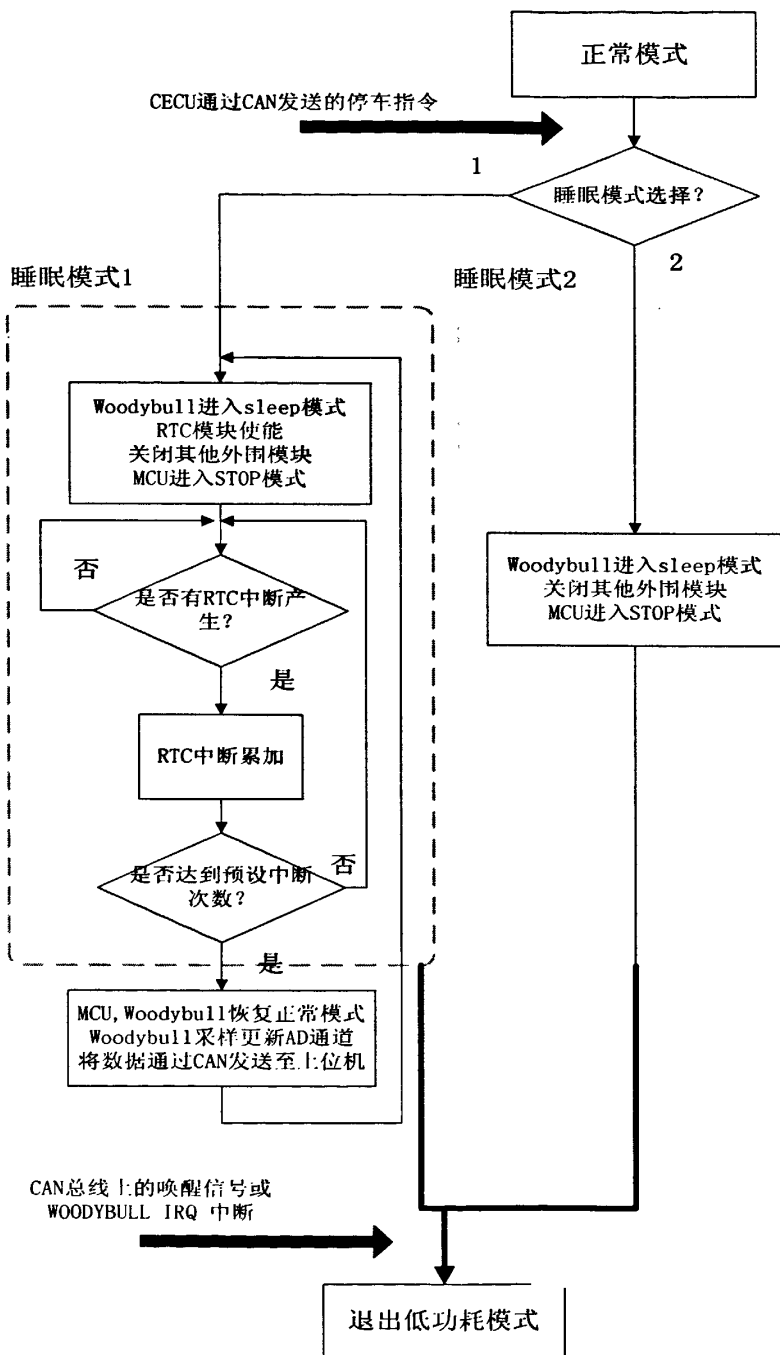


图 4.8 LECU 低功耗模式软件流程图

4.3.3 LECU 低功耗效果

如下图所示,以本文 4.2 章介绍的 LECU 电池管理系统为硬件平台,以 5.3.2 节介绍的 LECU 低功耗策略为实现方式,以 PC 模拟 CECU 控制器,以周立功 USB2CAN 作为 CAN 总线通讯工具;使用 FLUKE187 系列万用表作为 LECU 电流检测工具,建立起完整的电池管理系统平台,验证 LECU 低功耗设计的效果^[15]。

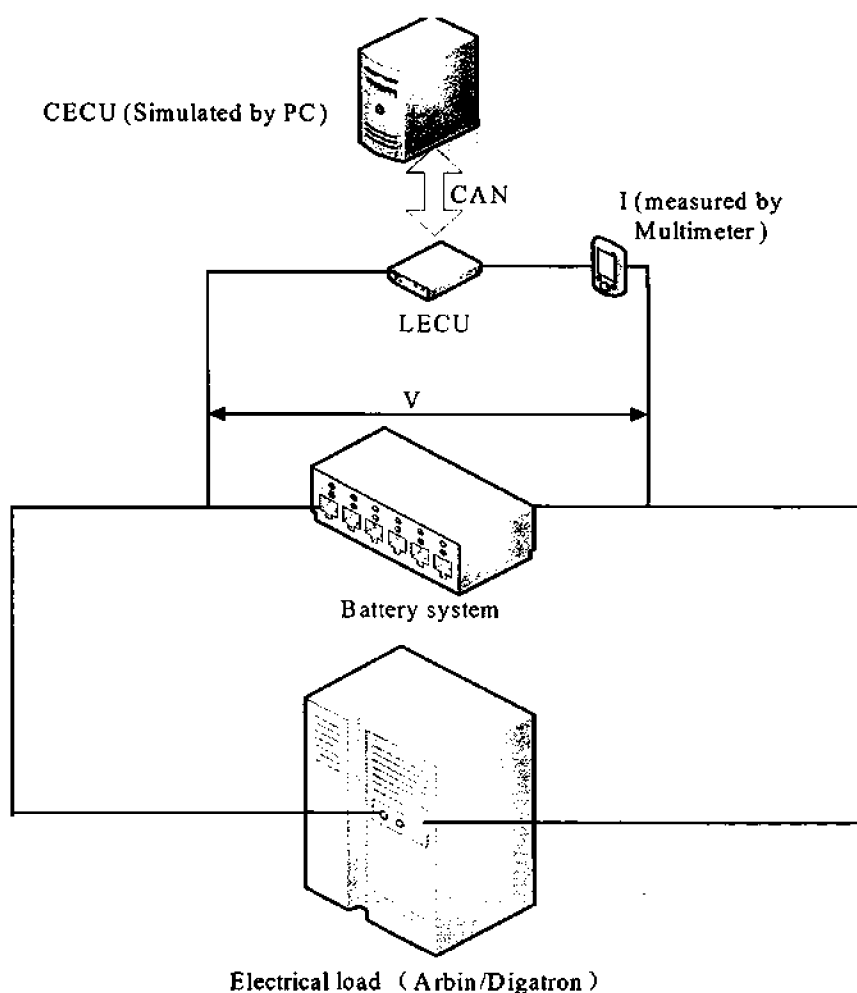


图 4.9 LECU 台架实验结构图

如图 4.4 所示的 LECU 结构图, 由于锂离子电池 LECU 电池管理系统以 12 节电池单体串联供电, 其供电电压范围保持在 36V~50V 之间; 而 OZ8940 芯片内置了一个 3.3V 的 LDO 线性电源模块为整个 LECU 系统提供电源, 因此 OZ8940 芯片供电端的电流损耗即为整个 LECU 系统的电流损耗, 且根据宽幅供电和线性电源的特性, 电流损耗在一定供电电压范围内保持不变, 故采用供电端的电流损耗来衡量整个 LECU 系统功耗。

实际系统中, 电池组端电压为 45.68V, LECU 以 125K/s 的 CAN 总线速率与 CECU 进行通讯。假定设置睡眠模式 1 中, LECU 每隔 60 秒进行一次自唤醒, 并更新一遍单电池电压, 电流及温度等数据, 处理后发送给 CECU, 最后再次进入睡眠模式。

睡眠模式 1 中, RTC 定时中断唤醒 LECU 计时, 经测算需消耗约 60us 的时间, 其额外消耗功率可忽略不计; 60s 之后, OZ8940 进行电压电流巡检, 其 ADC 时钟频率为 256KHz, 共 15 路 12 位 AD, 故采样时间为 $212 \times 15 / 256K = 238.27ms$, 另加数据处理及 CAN 发送时间, 经测量共需约 0.25s 的时间, 该段时间内 LECU 恢复为正常工作模式, 电流损耗即为正常工作时的电流消耗。综上试验结果如下表所示:

表 3 LECU 各工作模式功耗表

模式	工作元器件	电流损耗	降耗效果(以正常工作的电流损耗为基准)
正常工作	OZ8940 (Full Power 模式) MC9S08DZ60 (普通模式) ADuM1201 (正常模式) 2 个 LED 指示小灯	15.3mA	/
睡眠模式 1	OZ8940 (双模式切换) MC9S08DZ60 (双模式切换) ADuM1201 (正常工作)	$1.5mA * (60 - 0.25) / 60 + 15.3mA * 0.25 / 60$ $\approx 1.56mA$	$\approx 89.82\%$
睡眠模式 2	OZ8940 (Sleep 模式) MC9S08DZ60 (停止 3 模式) ADuM1201 (正常工作)	1.46mA	$\approx 90.45\%$

可见,经低功耗处理之后,LECU 下位机系统可在特定系统状态下大幅降低系统功耗,下降幅度达到 90%左右,降耗效果显著,将管理系统对蓄电池系统的性能和寿命的影响降到最低。

4.4 小结

本章针对锂离子电池系统以及燃料电池系统,就单体电池管理系统的设计要求进行了讨论,确立了单体电池电压巡检方案;然后详细介绍单体电池管理系统控制器的硬件实现,采用带有 CAN 模块的单片机和专用的集成芯片完成单体电池的监控,实现与上位机的数据通讯,统一了不同应用条件下的单体电池电压巡检硬件方案。同时从电池系统实际出发,在单体电池管理系统中引入了低功耗策略,取得较好的实际效果。

第5章 动力电池系统均衡方案

5.1 电池系统均衡设计

如本文第三章所述,现阶段电池系统的不一致性问题不可忽视,对于电池管理系统开发者而言,实用的办法是引入电池均衡设计来对电池系统的不一致性进行干预。单体电池管理系统即由单体电池巡检系统和电池均衡器共同组成的,离开了对电池的均衡控制,电池系统的管理就无从体现。电池电压巡检是电池管理的基础,而实施均衡,降低电池系统的不一致才是电池管理的主要目标。

单体电池管理系统的均衡设计以电池系统的不一致性为出发点和目标,根据第三章所述,在电池系统电压不一致,内阻不一致和容量不一致这三种表现形式当中,只有电池电压能够在其电压范围内进行双向调节,且测量精度也最高,因此目前的电池管理系统均衡设计均围绕电池电压不一致性展开,通过电压均衡控制,降低电池系统电压不一致性。随着电动汽车技术的不断发展,电池系统均衡日益凸显其重要性,促使国内外许多研究机构开展专题研究,包括 Delphi, Infineon 等电子公司也提出了相应的应用解决方案。但总体而言,电池均衡技术尚不成熟,均衡方案众多但实际应用仍存在不少困难^[42,43]。

在目前的技术条件下,动力电池均衡系统主要包括充电均衡、被动均衡和主动均衡三种方式,各有其优缺点和适用范围^[42]。

其中的充电均衡方式是目前最为有效且实用的均衡方案。根据应用场合的不同,充电均衡方式又可分成过充均衡和充电分流均衡两种均衡方法。过充均衡即根据铅酸蓄电池和镍氢电池能够承受一定程度的过充电的化学特性,定期对电池系统进行限定程度的过充电,使每个单体电池达到相同的满充状态,实现电压均衡的目标。由于锂离子电池不能承受过充电的工况,因此锂离子电池系统不能采用过充均衡的方案。充电旁路均衡方案如图 5.1 所示,各单体电池 B_n 两端引入分流电阻 R_n , 在电池系统充电过程中(特别是充电中后期),当个别单体电压过高,接近电池充电截止电压时,闭合相应的旁路开关 S_n , I_n 为相应的旁路电流,则该单体充电电流减小,限制单体电压升高过快;最终实现单体电池电压的一致。此方法适用于已知充电电流的各种电池充电系统中;但

分流电阻的引入也导致了充电效率的降低和系统热管理要求的提高^[44]。

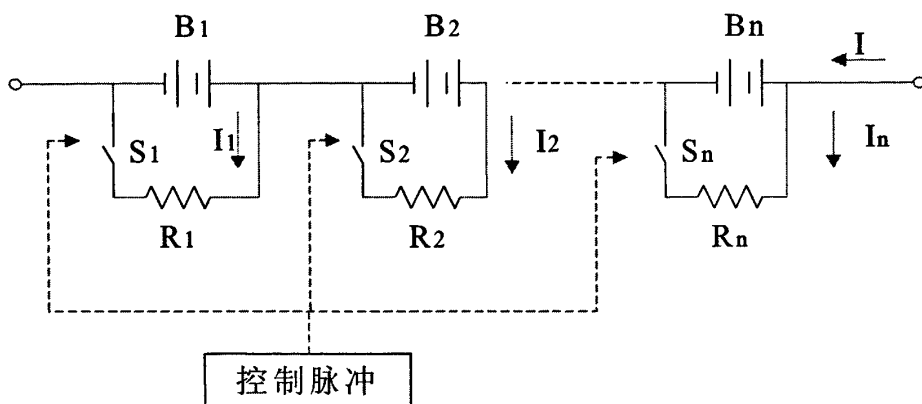


图 5.1 充电旁路均衡方案

电池管理系统使用充电均衡方式需要电池充电机的配合，适用于电池需要定期以确定的较小电流满充的应用场合。如 EV 纯电动汽车，Plug-in 混合动力汽车中的电池系统。而在本文所关注的 HEV 应用当中，电池系统作为辅助动力源，一方面为整车提供必要的动力；另一方面还需要吸收车辆制动产生的电流反馈。因此，HEV 中的锂离子电池系统总是处于一定的 SOC 荷电状态下来同时满足上述两方面要求；且锂离子电池不能进行过充电，因此充电均衡方式并不适用于锂离子电池系统的 HEV 应用。

被动均衡和主动均衡方案则没有电池属性和应用场合的限制，无需外加电源，适用于 HEV 锂离子电池系统的均衡，是本章着重讨论的主要内容。

5.2 电池系统被动均衡方案

5.2.1 被动均衡方案原理

被动均衡方案即通过分流电阻将剩余电量高的电池单体进行放电，最终将电池模块的单体电压差控制在一定的范围内。这种均衡方法的优点是简单实用，成本最低，可靠性高，为绝大多数实际应用的电池管理系统所采用^[1,5]。

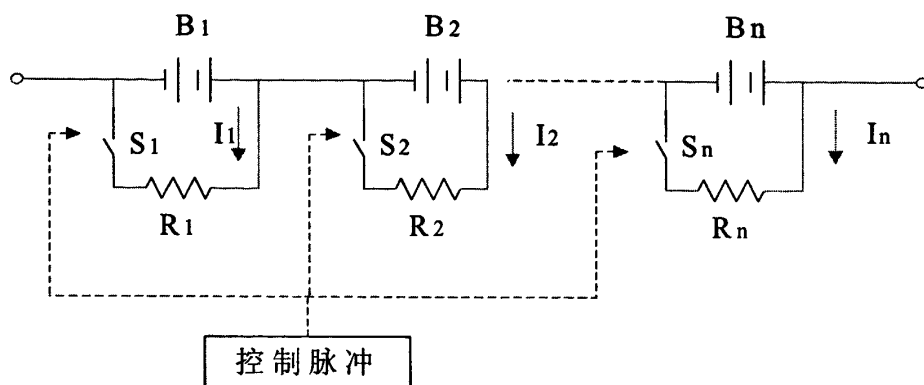


图 5.2 电池被动均衡方案结构图

电池系统被动均衡方案结构图如上图所示。电池管理系统通过单体电池电压巡检系统获取单体电池电压分布信息，通过控制脉冲闭合一个或几个旁路开关 S_n ， I_n 为相应的旁路电流，令电池单体 B_n 开始放电；均衡系统重复上述过程，直至电池模块的单体电压差控制在预定的范围内。

由锂离子电池的化学特性可知，锂离子电池的开路电压表现为撤去负载静置一定时间后（对于锰酸锂电池而言，这个时间仅为几十秒）电池的端电压，与电池的荷电状态或容量呈一定的正比例关系。同时电池在充放电过程中，单体电池电压不停的变化，无法对电池模块设定目标均衡电压，因此若想通过电压的均衡进而降低电池荷电状态的不一致性，被动均衡在锂离子电池系统处于静置状态即电动汽车停车时进行。

被动均衡方案的最大缺点为只能把电压高的单体电池放电，也就是说这种设计是向电压较低的单体电池看齐。在均衡过程中如果分流电阻选得过大，则均衡电流太小，效果甚微；如果分流电阻选得过小，则电阻功率很大，系统能量损耗大，均衡效率低，同时电池系统对热管理的要求会提高。对于高能量型锂离子电池而言，均衡效率过低；而对于 HEV 中应用的高功率型的锂离子电池来说，通过设置适当的分流电阻，在均衡效果和均衡效率之间找到平衡，还是能够符合实际应用。

5.2.2 被动均衡方案硬件实现

在单体电池管理系统 LECU 的设计中，我们先后使用了 O2Micro 公司的 OZ890 和 OZ8940 芯片作为锂离子蓄电池的监测芯片。其均衡方案也是通过 OZ890 以及 OZ8940 芯片以及外围分流电路搭建而成^[5]。

OZ890 芯片支持内部均衡放电功能（Internal Bleeding）和外部电阻放电均衡功能（External Bleeding）。鉴于热稳定性考虑，其内部均衡电流仅为 10mA~15mA，并不能满足容量较大车用锂离子电池系统的均衡需求，效率太低。因此在 LECU 均衡方案中主要考虑外部电阻放电均衡功能。如图 5.3 所示，OZ890 芯片每一路电压采样通道均设有放电（Bleeding）控制引脚为 CBn，与 MOS 管的栅极相连，放电电阻与 MOS 管的漏极相连后并联在电池的两端，当均衡开始后，由 CBn 信号控制 MOS 管的开启与关断，从而控制第 n 节电池是否进行放电。

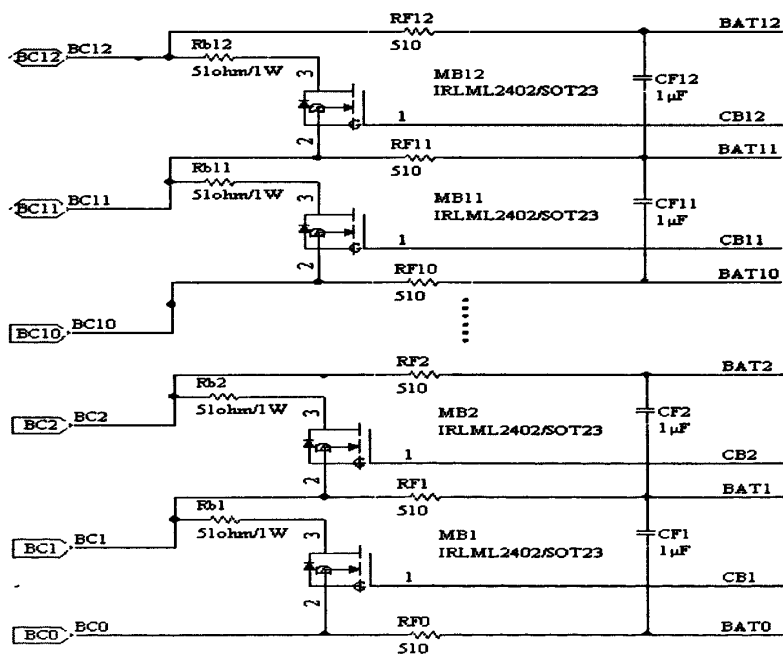


图 5.3 OZ890 外部均衡硬件结构图

在 OZ890 硬件运行模式下，满足以下条件后，OZ890 将自动按照预设的放电规则进行放电：

- 1) 电池系统处于充电状态或空闲状态（本系统中放电均衡仅在电池空闲模式下进行）；
- 2) Bleeding 功能开启，根据需要可设置 1~4 以及 12 个通道同时进行 bleeding 均衡；
- 3) 单体电池电压最大值大于起始放电值（BleedStartPoint）；
- 4) 单体电池之间的电压差值大于放电精度（BleedAccuracy）；
- 5) 没有错误故障出现，比如高温（OT），低温（UT），过压（OV），低压（UV），短路（OC），短路（SC）等。如果有故障事件发生，Bleeding 会立刻停止。

在 OZ890 软件模式下，均衡的控制可完全有 MCU 软件来加以决定。

当 OZ890 均衡功能开启时，为保证准确检测各通道电池开路电压数据，OZ890 将关闭均衡功能，进行电压巡检。巡检结束后再次开启均衡，循环交替进行（每个通道 0.1s 单体电压检测；0.9s 电池均衡）。

OZ8940 芯片仅支持内部电阻放电均衡功能，同样是出于热稳定性的考虑，其内部均衡电流为 10mA~15mA，需要通过外围元件实现内部均衡开启对外部大电流均衡电路的控制，满足车用锂离子电池系统的要求。如图 5.4 所示，当第 n 个通道内部均衡打开时， $50\ \Omega$ 的检测电阻 $RF(n-1)$ 上将有 0.5~0.8V 的电势差，足够驱动一个三极管或者低压 MOSFET QB_n 导通，从而是相应的电池通过均衡电阻 RB_n 放电，实现外部电阻放电均衡。

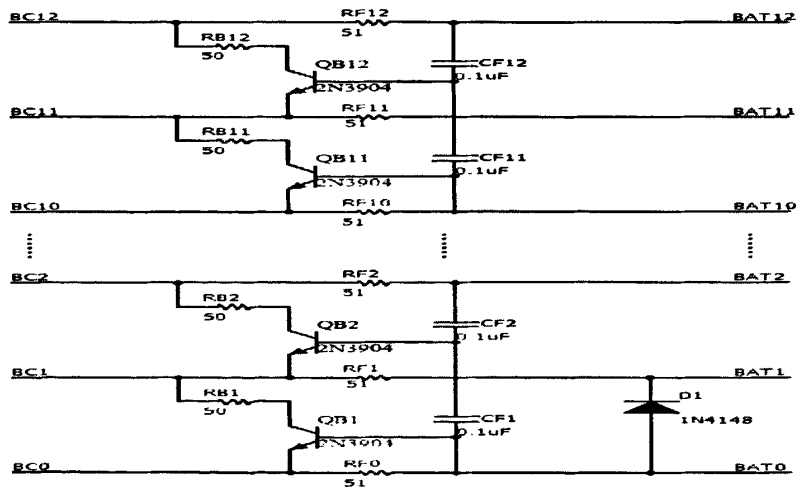


图 5.4 OZ8940 外部均衡硬件结构图

OZ8940 芯片无软硬件模式之分，满足以下条件后，OZ8940 将自动按照预设的放电规则进行放电：

- 1) 电池系统处于充电状态或空闲状态（本系统中放电均衡仅在电池空闲模式下进行）；
- 2) 单体电池电压最大值大于起始放电值（BleedStartPoint）；
- 3) 单体电池之间的电压差值大于放电精度（BleedAccuracy）；
- 4) 没有错误故障出现，比如高温（OT），低温（UT），过压（OV），低压（UV），短路（OC），短路（SC）等。如果有故障事件发生，Bleeding 会立刻停止。

当 OZ8940 芯片处于均衡状态时，其电压巡检和电池均衡同样是交替循环进行（0.25s 电压巡检；0.75s 电池均衡）。

5.2.3 被动均衡方案测试

考虑到 OZ890 芯片和 OZ8940 芯片应用外部均衡电阻放电均衡时，其外部均衡电路原理相同，功能相近，此时 OZ890 或者 OZ8940 主要起到均衡控制的功能，因此本文统一应用基于 OZ890 芯片的电池电阻均衡系统，对 HEV 车用 8Ah 锰酸锂电池组（10 节为 1 组），进行电阻放电均衡，研究其均衡实际效果。

从原理而言，电阻放电均衡效果由放电电阻阻值决定，但是阻值过小的电阻放电方案势必要求更好的系统热管理能力。综合电池系统的均衡效率以及热稳定的考虑，选取 $39\Omega/1W$ 的放电电阻。

当电池电压处于放电平台区（3.8V~4V）时，均衡电流可维持在 100mA 左右。通过基于 OZ890 的 LECU 控制板实验测算，单体电池压降为 7.7mV/Hour，其中电阻放电均衡压降为 6.0 mV/Hour；LECU 通过电池组取电，系统功耗引起的压降为 1.7 mV/Hour。

设置电池放电均衡策略如下：OZ890 芯片处于软件模式下，均衡开断完全由 MCU 决定；为加强均衡效果，设定系统热稳定性较好，可同时开启除最低电压通道外全部通道的电阻均衡；均衡开启 60 分钟，静置 5 分钟后进行电池电压巡检，确定最低电压的 4 节电池单体为下一时间段需要进行均衡，如此循环进行，直至电池组的最高电压与最低电压的极差在 10mV 以内，均衡结束。

图 5.5 所示即为电池组试验样品电阻放电均衡中在不同时间点的单体开路

电压分布情况。可以看到随着均衡时间的增加，电池组电压趋于平衡；经历 4 小时的均衡后，电池组电压极差降至 10mV 之内。

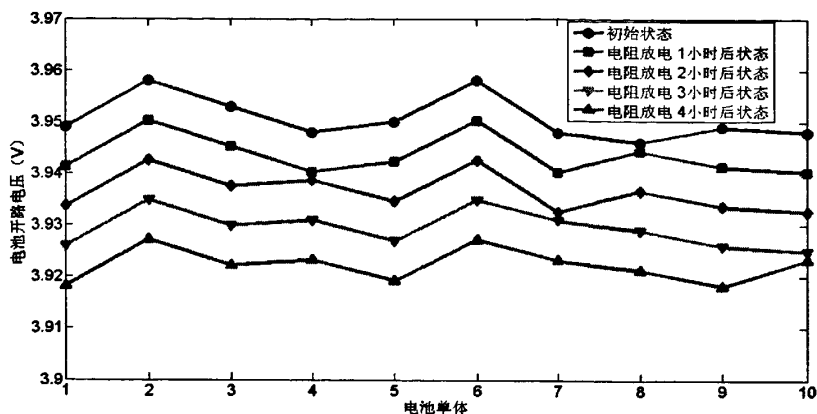


图 5.5 电阻放电被动均衡电池组开路电压分布图

根据本文第三章的不一致度定义，图 5.6 为电池组在主动均衡中不同时间点的不一致度变化情况。随着均衡的不断进行，电池组的不一致度不断减小。

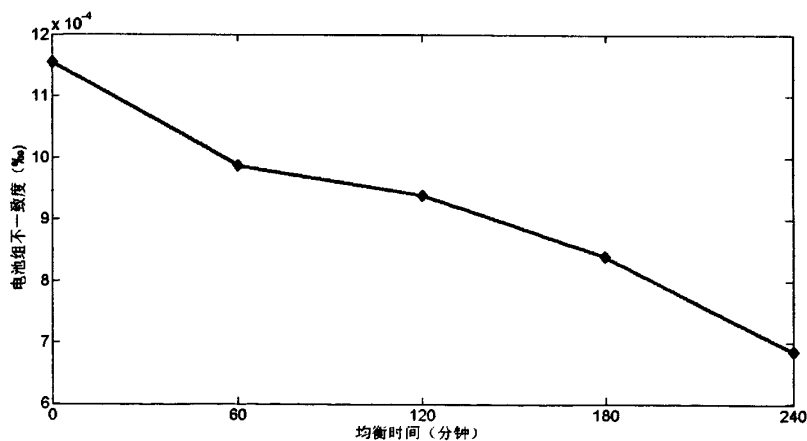


图 5.6 电阻放电被动均衡电池组不一致度变化图

由上述实验结果分析，电池放电被动均衡方案有其一定的均衡效果，但均衡效率过低，均衡力度不足，仅能够适用于小容量且初始一致性水平较高的车载锂离子电池系统在电动汽车长时间停车时的均衡措施。

同时，均衡电阻的引入加剧了 LECU 系统的温升，设计者需要特别关注均

衡系统的热稳定性，通过实验确定合理的均衡通道同时开启数。一方面，要尽可能得增大均衡电流；另一方面也要降低均衡系统和控制系统的功耗，即扩大均衡电流和系统电流损耗的比值，提高均衡效率。

5.3 电池系统主动均衡方案

5.3.1 主动均衡方案原理

电池系统主动均衡方案即电池对电感或电容等储能元件的充放电，通过开关器件实现储能元件在不均衡电池间的切换，达到电池间的能量转移的。该方案结构复杂，硬件成本高，对系统安全性和可靠性的要求也更高；但其充分利用电池能量，效率高，成为目前电池系统均衡研究的重点内容。

根据储能元件的不同，主动均衡一般可分为电容主动均衡和电感（变压器）主动均衡方案。图 5.7 为电容主动均衡结构图，其采用总线方式，通过控制将电压较高的单体电池与电容并联给电容充电，然后电容并联到电压较低的单体电池上给电池充电^[42]。

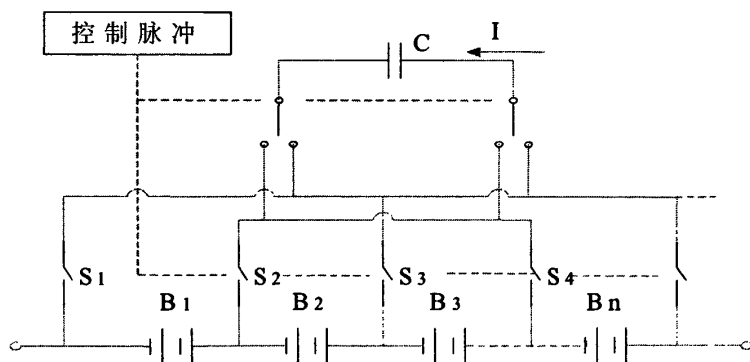


图 5.7 电容主动均衡方案结构图

相比较电感主动均衡方式，电容主动均衡一般需借助大电流多路选通开关，硬件上较难实现；且均衡电流不可控，当电池不一致性较严重时，瞬时充放电电流会很大，系统可靠性不高。因此，目前主动均衡的主要实现方式大多集中在电感（变压器）主动均衡方案。

下图即为一典型的电感（变压器）主动均衡方案结构图。该电路结构的核心即在于变压器，电池模块的电压做为变压器的原边输入， N 个副线圈共用一个原线圈，串接一个二极管和选通开关 S_n 后直接加到单体电池上。通过调整控制脉冲的频率和占空比，实现电池模块电量的传递；根据一定的均衡策略，闭合一个或多个选通开关，将电池模块电量转移单体电池，实现电池组均衡的目标。与被动均衡相同，电池系统主动均衡方案在锂离子电池系统处于静置状态即电动汽车停车时进行。

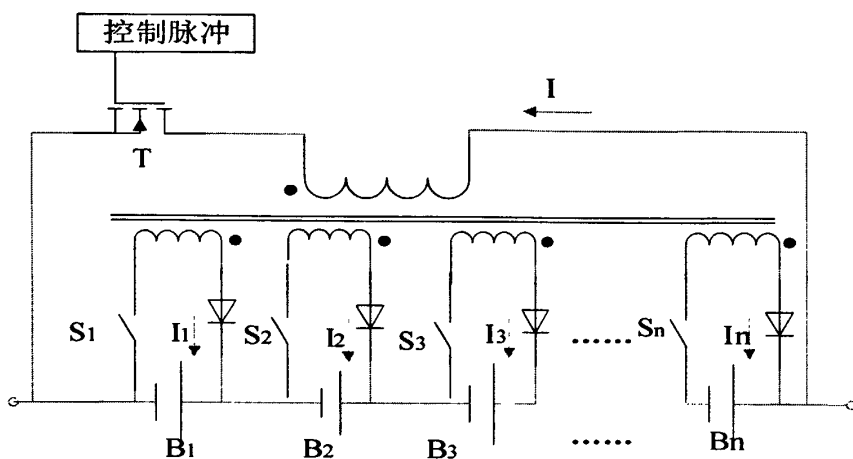


图 5.8 变压器（电感）主动均衡方案结构图

电池主动均衡方案由于能量转换效率的提高，其均衡电流可以做得远大于被动均衡方案，因此均衡效果较为明显，适用于高能量型的电池系统以及电池模块间的均衡；当电池组的不一致性较差时，电池主动均衡方案的均衡力度更大。

5.3.2 主动均衡方案硬件实现

本文确立的电池系统主动均衡方案是基于如图 5.9 所示的 flyback 单端反激式变压器电路搭建而成。

隔离变压器按照结构形式不同，一般可分为两大类：正激式和反激式。反激式指在变压器原边导通时副边截止，变压器储能。原边截止时，副边导通，能量释放到负载的工作状态。正激式指在变压器原边导通同时副边感应出对应

电压输出到负载，能量通过变压器直接传递。相比较常见的正激式变压器，反激式变压器的主要优势是成本低，电路相对简单，选用元器件少，省掉了一个和变压器体积大小差不多的电感，且容易得到多路输出。反激式拓扑对于 100W 以内的系统是实用和廉价的，因此适用于车载电池系统这样的中低功率应用场合，本文也基于该种结构变压器进行主动均衡电路的设计^[45]。

反激式变压器两侧的电路是不同的：初级线圈与整个电池组相连；次级线圈与每个电池单元相连。在此我们所说的变压器不是真正意义上的变压器，而更多的是一个能量存储装置。在变压器初级导通期间能量存储在磁芯的气隙中，其铁氧体磁芯中的气隙增大了磁阻，因此可以避免磁芯材料出现磁饱和；关断期间存储的能量被传送给输出。初次级的电流不是同时流动的。因此它更多的被认为是一个带有次级绕组的电感。其能量转换过程如下所述：

- 1) 如图 5.9 所示，当控制脉冲令 MOSFET 导通时，变压器副边上，二极管截止，副边无电流产生；此时可将变压器原边看作电感，进行能量的储存。

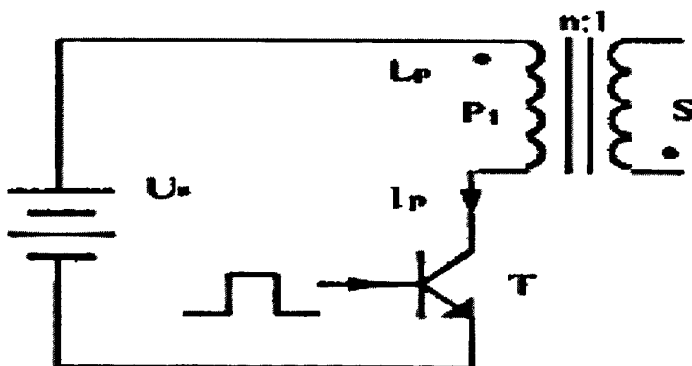


图 5.9 Flyback 变压器能量储存等效电路

- 2) 如图 5.10 所示，当 MOSFET 关断，原边电流必定为零，副边二极管导通，感应电流将出现在副边，通过负载续流，进行能量释放。

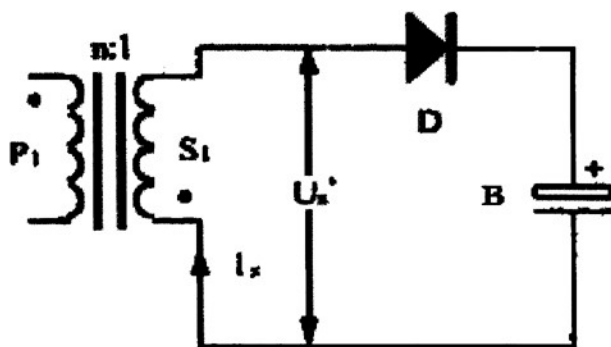


图 5.10 Flyback 变压器能量传送等效电路

综上,使用 Flyback 单端反激式变压器进行电池系统均衡的原理如下图所示:

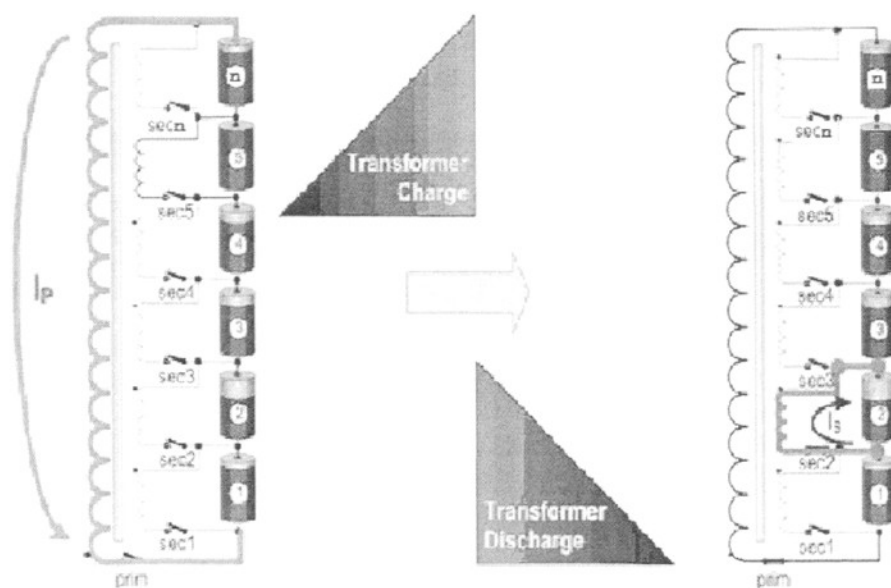


图 5.11 锂离子电池的充电均衡原理图

在对所有电池单元进行电压扫描之后,通过数据计算和均衡策略,决定需要均衡的电池单体。以上图为例,扫描发现电池单元 2 是电压最低,容量最少,必须对其进行增强。此时闭合主开关(“prim”),电池组开始对变压器充电。主开关断开后,变压器原边存储的能量就可以转移至选定的电池单体。相应的副边(“sec”)开关——在本例中是开关 sec2——闭合后,实现了整组电池能量向单体电

池的转移。

需要注意的是，由于变压器漏感的存在及其它分布参数的影响，反激式变换器在开关管关断瞬间会产生很大的尖峰电压，这个尖峰电压严重威胁着开关管的正常工作，必须采取措施对其进行抑制。在现有的办法中，RCD 钳位法以其结构简单，成本低廉的特点而得到广泛应用^[46,47]。

如图 5.12 所示，RCD 钳位电路的工作原理是：当开关管导通时，能量存储在变压器原边和 L_{lk} 中，当开关管关闭时，原边中的能量将转移到副边输出，但漏感 L_{lk} 中的能量将不会传递到副边，如果没有 RCD 钳位电路， L_{lk} 中的能量将会在开关管关断瞬间转移到开关管的漏源极间的电容和电路中其它杂散电容中，此时开关管的漏极将会承受较高的开关应力。若加上 RCD 钳位电路， L_{lk} 中的大部分能量将在开关管关断瞬间转移到钳位电路的钳位电容上，然后这部分能量被钳位电阻 R_{sn} 消耗。这样就大大减少了开关管的电压应力，确保均衡系统的稳定性^[46,47]。

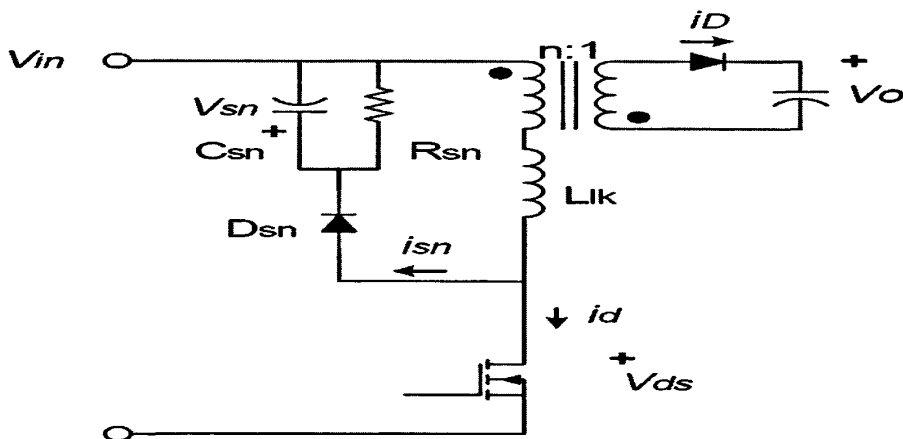


图 5.12 RCD 钳位电路原理图

5.3.3 主动均衡方案测试

基于如本章 5.3.2 节所述的 Flyback 变压器均衡调试板，对 HEV 车用 8Ah 锰酸锂电池组（12 节单体为一组）进行电阻放电均衡，研究其均衡实际效果。

根据电池容量及电压范围，将变压器功率设置为 10W 左右，控制脉冲保持在 55KHz，占空比为 15%；且任何时间均保证对一个电池单体进行充电，此时

变压器副边均衡电流可达到 1A 以上。

图 5.13 为 Flyback 变压器实际等效电路图。Llk 为变压器原副边回路的等效漏感, Coss 为 MOSFET 等效输出电容, Lm 为非理想变压器原边电感。当 MOSFET 导通时, 变压器原边与 MOSFET 以及 V_{in} 形成回路, 电流为 I_d , 故 V_{ds} 由于 Llk1 和 Coss 的 LC 回路产生振荡。当 MOSFET 关断时, 变压器原边与变压器电感形成回路, 电流为 I_m , 故 V_{ds} 由于 Lm 和 Coss 的 LC 回路产生振荡。如图 5.14 所示, 变压器正常工作时实测的 MOSFET 的 d, s 两端的电压波形图验证了上述分析^[47,48]。

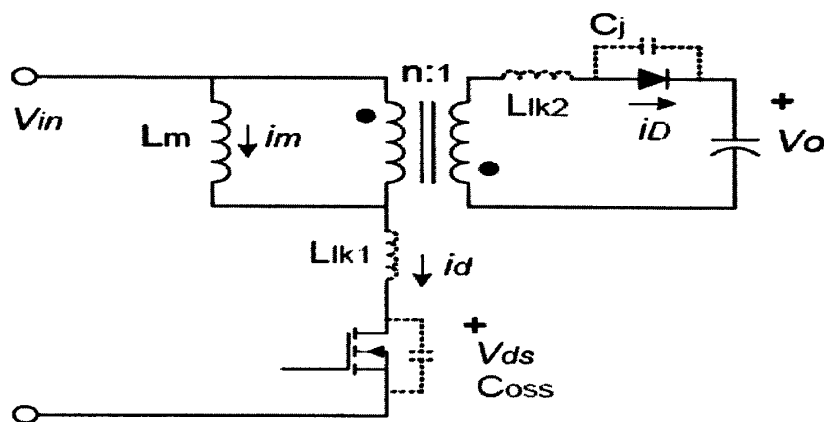


图 5.13 Flyback 变压器实际等效电路图

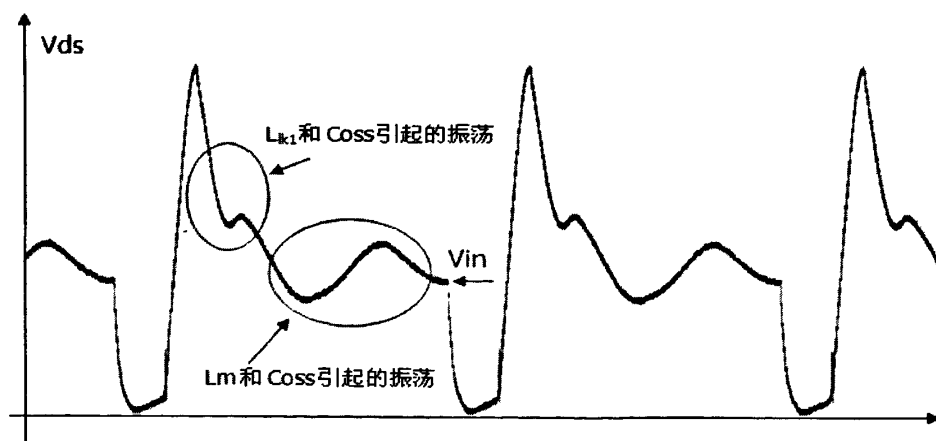


图 5.14 MOSFET V_{ds} 电压波形图

根据实际经验，设置均衡策略如下：在电池组处在空闲状态中进行均衡；任一时间段仅对电池组中电压最低的电池单体进行均衡；均衡开启 2 分钟，静置 2 分钟后进行电池电压巡检，确定最低电压的电池单体为下一时间段将要开始均衡的电池，如此循环进行，直至电池组的最高电压与最低电压的极差在 10mV 以内，此时电池组不一致性已经很小，再进行均衡意义不大，因此可设置为均衡结束的标志。

实验结果表明，实验样品电池组初始极差为 141mV，不一致度为 0.126%，通过 Flyback 变压器主动均衡调试版的均衡，基于上段所述的电池主动均衡策略，在执行均衡 187 分钟后，将电池组试验样品的极差控制在 10mV，不一致度仅为 0.003%，电池组电压基本保持一致。

图 5.15 所示即为电池组试验样品主动均衡中在不同时间点的单体开路电压分布情况。可以看到随着均衡时间的增加，电池组电压分布逐渐趋于平稳，电压极差越来越低，电压波动越来越小。

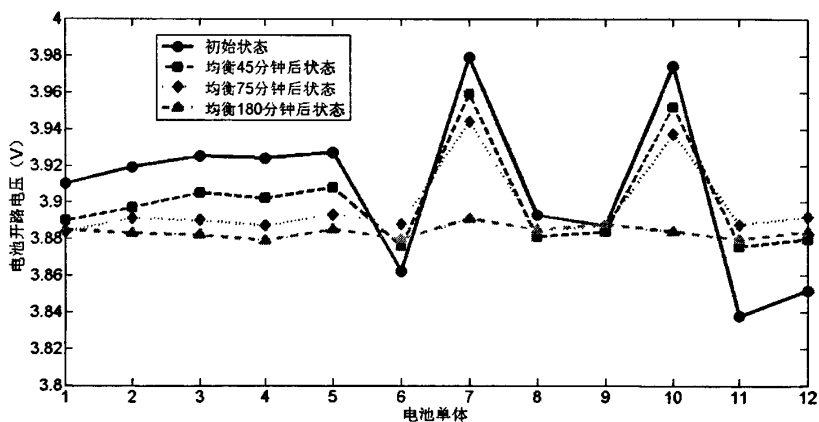


图 5.15 变压器主动均衡电池组开路电压分布图

根据本文第 3 章的不一致度定义，图 5.16 为电池组在主动均衡中不同时间点的的变化情况。随着均衡的不断进行，电池组的不一致度不断减小，且下降曲线比较平缓，从一方面也验证了电池组不一致度定义的合理性。

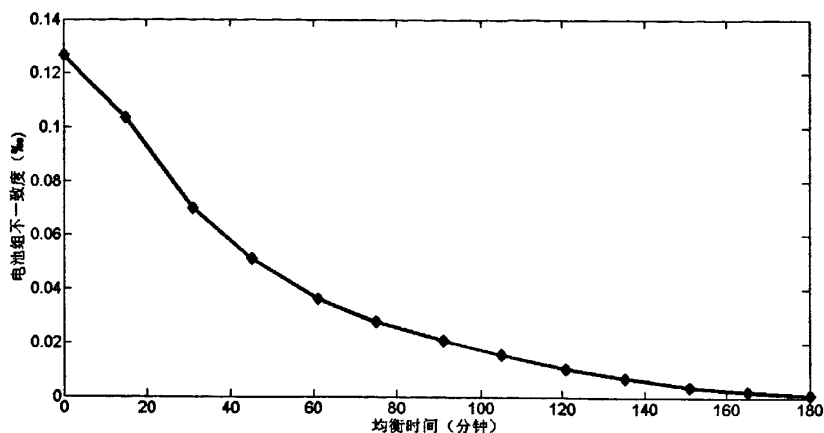


图 5.16 变压器主动均衡电池组不一致度变化图

由上述两幅图可知，相对于本文第 5.2 节所述的基于 OZ890 芯片的被动式均衡方案而言，变压器主动均衡方案均衡力度更大，均衡效果更高，特别适用于大容量电池系统和电池模块之间的均衡。在软硬件实现上，可利用 OZ890 芯片作为其电压巡检和均衡选通的控制单元，也为将来在现有 LECU 被动均衡系统基础上增加变压器均衡方式创造了硬件条件；同时变压器主动均衡并未过多增加 LECU 系统的控制难度和算法难度，均衡策略比较直观，易于实现。

但目前的变压器主动均衡方案同样存在许多问题：变压器以及附属电路体积庞大，数量众多，势必使 LECU 的硬件成本和体积要求有所增加；另外，对电池管理系统控制器的性能也提出了更高的要求。

从均衡目的来看，其中最为严重的问题即为变压器的效率问题。效率过低造成车载电池系统电量的过多损耗，且消耗的能量多以热量的方式散发，对 LECU 系统的热管理和稳定性提出了更高的要求。为此我们需针对均衡电路的特点进行优化，使变压器主动均衡这种方式更好地应用于车载电池系统中：

- 1) 反激变压器作为储能器件，由于变压器漏磁的存在，变压器存储的能量并不能全部从副边输出，造成能量损失。在本文所述的车载锂离子电池组应用中，副边个数高达 12 个，转换效率因变压器制作工艺而大大降低，因此需根据实际需要合理确定单端反激式变压器的各项参数，选择制作水平高的供应商，尽可能保持变压器副边的一致性；在电池系统体积、重量和成本允许的前提下，通过增加变压器个数来降低原副边个数比，

提高变压器转换效率。

- 2) RCD 钳位电路对于缓冲开关管关断瞬间的尖峰电压,降低开关管的电压应力起着重要的作用,在单端反激变压器电路中不可或缺。但是它的引入同时吸收了部分的转换能量。如图 5.12 所示,当电容 C_{sn} 取值过大, V_{sn} 上升过慢,变压器原边能量不能迅速传递到副边;若 R_{sn} 、 C_{sn} 值取值过小,则 C_{sn} 上的电压很快放到 $n \cdot V_o$,之后 RCD 电路成为变压器的负载之一,消耗能量,致使效率降低。因此需要对 R_{sn} 、 C_{sn} 的取值进行讨论,根据控制脉冲的频率和占空比进行相应调节^[47]。
- 3) RCD 钳位电路虽实现简单,但仍会吸收系统的一定功率。可引入包括 ZVS 软开关技术等主动钳位电路来代替 RCD 电路,进一步提高主动均衡电路的转换效率,代价是更复杂的电路和更精确的控制策略^[49]。
- 4) 在变压器原边主开关管的选择上,由于瞬间感生电压很高,因此一方面既要使其能够承受足够的电压应力,又要尽可能选择低导通内阻的器件,降低其导通损耗和开关损耗。
- 5) 变压器副边的二极管起到限制电流方向,防止电池短路的整流器作用,但因其导通压降的存在,必然会造成可观的功率损耗。若需进一步提高均衡电路的效率,常见的做法是引入同步整流技术,用导通压降低的 MOS 管来代替二极管进行整流,缺点就是需要复杂的驱动电路进行配合。

5.4 电池管理系统均衡策略

5.4.1 电池均衡方案的选择

由电池的特性可知,电池的开路电压和电池的荷电状态(SOC)存在对应关系;且电动汽车电池系统在充放电过程中,电压持续变化,均衡的目标电压无法确定^[50]。因此,本文的均衡方案在锂离子蓄电池处于静置状态即电动汽车停车时,以单体电池的开路电压为依据,对单体电池进行均衡。

在硬件实现上,电阻被动均衡方案和变压器主动均衡方案都是建立在电池电压巡检系统的基础之上,受控于 LECU;因此可将上述两方案均集成至 LECU 系统中,根据均衡对象的特点有选择性地均衡。

根据本文第 5.2 章和第 5.3 章所述, 两种典型均衡方案的特点可由表 5.1 所示。对于高功率型的锂离子电池, 电池容量相对较小, 对均衡电流的要求不高, 一般可采用电阻被动均衡方案进行均衡。而对于高能量型锂离子电池而言, 电阻放电的方法效率太低, 需采用变压器主动均衡方案对高能量型锂离子电池进行均衡^[1,3]。

表 5.1 电池系统均衡方案比较

方式	电路	均衡控制	均衡电路	均衡速度	效率	发热	结构	成本	扩展	使用范围
电阻被动均衡	简单	简单	小	慢	低	较大	简单	低	中	中低功率应用
变压器主动均衡	较简单	简单	中	快	中	中	简单	中	简单	中高功率应用

相比较被动均衡而言, 变压器主动均衡方案需要电池组每个单体电池提供能量, 由于各单体的寿命状态和性能参数不尽相同, 电压均衡的单体电池间可能因为放电事件再次造成不一致, 破坏其电压一致性。因此对于某一特定的电池模块而言, 当电池组的不一致度或电压极差比较大时, 可采用变压器主动均衡方式进行均衡, 确保尽可能快地将电池组的不一致度降低; 若电池组的不一致度或电压极差较小, 可采用电阻被动均衡方案对相关的单体进行均衡, 避免对其他电池的影响。

从整个电池系统的层面上来看, 电池管理系统采用分级模块化的结构, 一个 LECU 单元控制一个电池组, 几个模块的 LECU 统一由一个 CECU 进行管理。要实现单体电池之间的均衡功能, 不仅要对一个电池组内的若干单体电池进行均衡, 而且要在电池组间进行均衡, 以保证各个电池组处于均衡的状态。对于组内均衡而言, 可根据电池组状态采用电阻被动均衡或变压器主动均衡方案; 而对于组间均衡来说, 由于电池组整体电压较高, 容量大, 只能采用主动均衡方案来进行均衡处理, 可设计以电池系统总电压为原边电压输入, 副边对应电池系统的每个电池模块的单端反激变压器电路。

综上所述, 设计电池系统均衡控制结构图如图 5.17 所示:

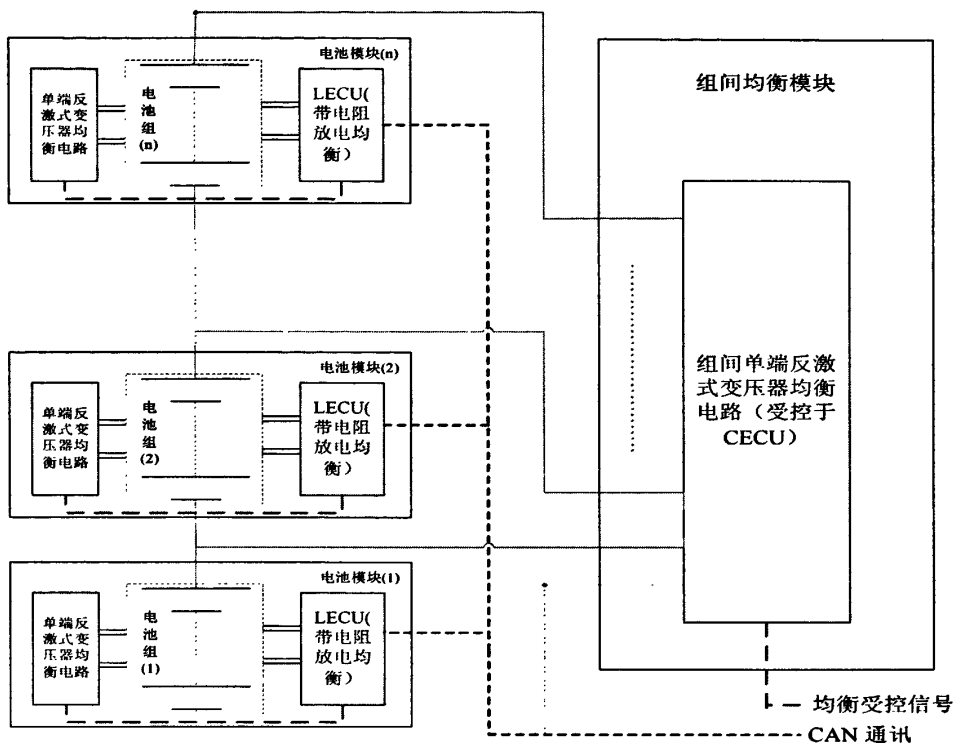


图 5.17 车载电池系统均衡模块原理图

5.4.2 电池系统均衡控制逻辑

电池系统均衡的目标在于使电池系统各单体电池的电压（荷电状态）尽可能保持一致，提高电池系统性能，延长系统寿命。从整个系统着眼，可将各电池模块看作一个大容量高电压的电池，均衡必须首先确保各电池模块的电压（荷电状态）一致性，在均衡过程中组间均衡优先于组内均衡，当组间均衡结束后，再进行组内的均衡控制。

均衡开始进行时，首先 CECU 通过 CAN 总线读取 LECU 中的模块总电压和模块平均电压值等信息，通过判断各电池模块单体电池的状态，判断是否开启组间均衡；若满足均衡条件，确定需要均衡补电的电池模块，并通过 CAN 总线通知 LECU 关闭组内均衡，CECU 控制组间均衡模块开始进行组间均衡。组间均衡同样采用均衡充放电与系统静置电压巡检交替进行的方式，LECU 实时监控

电池系统均衡过程中的开路电压，当所有模块的电压平均值在允许的精度范围以内后，停止组间均衡，开始组内均衡。

组内均衡采用轮巡的方式，首先 CECU 发标志给 LECU，允许组内均衡的进行。各电池模块内部从第一节电池开始，判断是否进行均衡，根据电池特性和所处状态，选择适当的电池均衡方式。由于各电池模块内部的均衡电路相对独立，各个电池组可以同时进行组内均衡，电池均衡的效率提高。

对于电阻被动均衡方案而言，需根据电池组的热管理性能考虑同时开启的均衡通道数。若通过试验得到该电池模块热管理条件下可同时开启 n 通道的电阻放电，则 LECU 控制首先均衡电压最高的 n 个电池单体，直至目标电压为止；随后均衡另外 $\leq n$ 通道的电池单体，依次类推，其同时均衡个数为 $n, \dots, n, n-1, \dots, 2, 1$ ，最终完成组内均衡。

对于变压器主动均衡而言，从简化控制逻辑和降低对电池影响出发，均衡中任一时间仅对电压最低的单个副边电池进行补电（组内均衡中为电池单体；组间均衡中为电池模块）；根据均衡力度和系统热管理性能，确定单次均衡开启时间；根据电池静置恢复特性确定均衡中的电池静置电压巡检时间，并根据开路电压决定下次均衡补电的目标。

5.4.3 均衡开启和结束判断

从均衡效果出发，电池系统均衡结束判断主要依据单体电压巡检精度来决定，随着均衡的不断进行，单体开路电压分布逐渐均匀，电压极差和不一致性不断减小，直至电池极差与电压巡检精度处于同一水平线上。以所搭建的电池电压巡检系统为例，其通道电压检测绝对误差为 $\pm 15\text{mV}$ ，假设电池电压处在放电平台区，当电池组电压极差 $\leq 15\text{mV}$ ，（对于组间均衡模块而言， $\leq 15 \times 12 = 180\text{mV}$ ），电池组不一致度 $\leq 0.016\%$ 时，此时电压极差对应的电池荷电状态（SOC）极差约为 3.26% ，进一步的均衡精度无法保证，此时可认为电池均衡结束^[1,15]。

本文确立的均衡方案均是基于电池系统的空闲状态均衡，原则上，当电动汽车处于停车状态时，均衡便开启。电池均衡的开启同样依据电压巡检精度，当电池的极差高于电压巡检精度，电池系统存在均衡的必要，那么均衡确认开启。

5.5 小结

本章结合电池系统电压不一致性，对车用电池均衡方案进行了研究。讨论了适用于车载电池系统的各种均衡方案。同时分别以电阻放电电路和单端反激式变压器电路作为电池主动均衡和被动均衡的典型代表，详细介绍了主被动均衡方案的硬件实现。通过实验分析，比较不同均衡方案的均衡效果，分析各自的优缺点。在此基础上，针对不同应用提供均衡选择建议，建立合理的均衡控制逻辑，为电池均衡系统开发所参考。

第6章 总结和展望

6.1 总结

综合当前各国的电动汽车研究和应用实际,可以发现动力电池是整个电动汽车研究领域的瓶颈所在,动力电池的能量密度或是功率密度、使用寿命、安全性和成本等尚不能完全满足车载需求,制约着电动汽车事业的进一步发展。与动力电池相关的技术一直是电动汽车研究的重要课题,受到广泛关注。解决动力电池的诸多问题,除了依靠基础科学,材料科学和制造工艺的突破外,在当前的技术条件下,更主要的是加强对动力电池的深入研究,并在此基础上充分发挥电池管理系统的性能和作用,使电池各方面性能达到最优化,满足电动汽车实际条件下的要求。

本文以车载锂离子动力电池单体及电池组为主要研究对象,从锂离子电池的电化学机理和电池寿命衰减特性出发,对动力电池不一致性进行深入研究,明确了电池组不一致性的统计学定义;并在现有电池管理系统基础上,分析、测试和比较各种电池均衡方案,设计电池管理系统的均衡策略。

本文主要工作内容和研究结论可总结为四个部分:

- 1) 针对高功率动力电池车载应用实际,从动力电池电化学机理出发,设计和开展锂离子电池加速寿命实验;形成了比较完整的实验方案和数据处理方法,建立起电池循环寿命的评价指标,明确各主要外界环境因素对电池循环寿命的影响,初步获得单体电池的寿命特性。同时,基于寿命实验结果和模型辨识算法建立单体电池寿命估计方案。其结论,可以被电池管理系统设计、选型和控制所参考;其思想,也适用于不同类型动力电池及电池管理系统的研究和应用。
- 2) 以电池单体寿命特性为参考,分析动力电池组不一致性的表现形式;引入统计学意义上方差和误差系数的概念,结合动力电池特性,以电池系统的两大状态量——荷电状态 SOC 和寿命状态 SOH 为目标,明确了电池组不一致性定义,为电池管理系统实施均衡控制提供量化参考;本文探讨了电池组不一致性对电池系统性能的影响,概括了提高电池组不一致性的多方面措施。

- 3) 在当前的单体电池巡检系统软硬件基础上改进系统设计,旨在建立适用于燃料电池系统和多种动力电池系统的通用电压巡检硬件平台;并针对电池系统实际,研究电池管理系统的低功耗设计和硬件实现,确立基于分布式结构的下层控制系统低功耗策略,取得明显的降耗效果。
- 4) 研究适用于锂离子电池系统的多种均衡方案,以此实现对电池组不一致性的主动管理。本文着重介绍和比较了以均衡放电为代表的被动均衡模式和以变压器转换为代表的主动均衡模式的原理、硬件实现和测试效果。明确电池均衡方案的选用原则,设计电池系统均衡控制策略。

本文创新点如下:

- 1) 引入量子力学学说中已得到证明的艾林方程对动力电池的失效机理进行分析研究,并针对动力电池应用特性,推导电池加速寿命实验方案,建立基于电化学机理的电池寿命估计算法思路。
- 2) 借鉴统计学上的方差和误差系数概念,明确电池组不一致性的统计学定义,并通过电池实验初步验证该定义的相对合理性。
- 3) 针对高能量型锂离子电池系统以及大容量锂离子电池系统,引入基于单端反激变压器的主动均衡方案,完成其硬件实现,获得相对明显的均衡效果。

6.2 展望

本质而言,动力电池具有严重的非线性特性,对电池电化学机理和寿命衰减的研究还处于初步阶段,缺乏足够的理论支持;应用于电动汽车的动力电池管理系统还存在技术上和工程上的问题,值得进一步深入研究。在本文研究的基础上,现提出以下需要进一步深入研究的关键问题:

- 1) 考虑到实际应用和客观条件限制,本文在对动力电池的失效机理论证推导过程中进行了部分简化。在后续的工作中尚需通过理论分析或物理实验等方式对电池失效机理进行进一步的细化,验证其解释推导过程的合理性。
- 2) 本文提供电池寿命估计思路,初步建立基于电化学机理的电池寿命算法,尚需要通过大量样品电池寿命实验进行进一步的验证和优化。在实际应用中,电池系统的具体加载工况变化剧烈,将实际工况转化为预设

标准工况还需大量实验数据的支持。

- 3) 针对本文提出的锂电池组不一致性统计学定义,可根据动力电池样品的特性对该定义进行进一步的标定和实验验证;通过分析实际应用情况下电池组不一致度对电池系统寿命衰减的影响关系,合理量化电池组不一致性阈值,为电池管理系统均衡控制提供参考。
- 4) 针对高功率型电池的均衡管理可采取电阻放电均衡方式,进一步优化电池管理系统的热管理;针对高能量型电池均衡管理可采取变压器主动均衡方式,采取主动钳位、软开关等硬件技术重点提高变压器均衡效率,并进一步验证该方案的车载应用可靠性。

电池系统在电动汽车中的重要性毋庸置疑,与动力电池和电池管理系统相关的技术一直是电动汽车研究的重要课题。动力电池研究和电池管理系统开发虽然存在不小的困难,但也势在必行,需要电动汽车研发人员的重视和关注。

致谢

在本文即将完成之际，首先衷心感谢我的导师魏学哲副教授！您为我们提供了足够好的科研空间，营造出一个开放的、自由的研究环境，在您的谆谆教诲和悉心指导下，逐步将我引入汽车电子的广阔领域。在两年半的研究生学习和工作中，您严谨的治学精神、渊博的知识理论、丰富的工程经验让我在学习研究中不断进步；您敏锐的分析能力、开阔的思维方式和务实的工作作风令我在科研和工作中受益良多；而您平易近人、朴实无华的人格魅力更是深深地影响着我，指引着我人生的发展。正直和善良——这是您的希望，也是我的追求。在此，请接受我对您的崇高敬意和真诚感谢！能够成为您的学生，是我一生的荣幸。

衷心感谢孙泽昌教授！您是我们汽车电子方向的领路人，我们取得的任何一点进步，都离不开您的关心和帮助！而您扎实深厚的理论知识、一丝不苟的治学精神、严谨细致的工作方法、实事求是的科研态度以及宽厚坦诚的待人态度令我十分敬仰。

衷心感谢钟再敏副教授和罗峰副教授！谢谢你们给予我专业和学术上的指导。虽然接触不多，但您们勤恳踏实的工作作风、真诚坦荡的人生态度在潜移默化中深深地影响了我。

衷心感谢课题组的戴海峰博士、冯旭云博士、王佳元博士和顾伟军博士！你们在科研和论文过程中给予了我极大帮助，我很珍惜与你们的这种亦师亦友的情谊；衷心感谢沈丹、熊力，毕路几位师兄师姐给予我的耐心指导以及在就业择业等问题上力所能及的帮助；感谢 02Micro 公司的高汉荣先生、侯晓华先生、曾晓军博士，以及工程师戴久莲、许恩兵在科研中给予我的无私帮助和配合。

实验室的伙伴们——陈金干、袁永军、董婷婷、李佳，我们朝夕相处，我们并肩作战；我们相互学习，我们共同进步。谢谢你们！多年同窗铸就的友谊是我人生的宝贵财富；感谢我的师弟——赵晓鹏、朱冰、李宇恒，本文的工作离不开你们的帮助和支持；感谢汽车学院 06 硕那些可爱的同学们，与你们相处的这段时光我会终身难忘。

特别感谢我的父母，您们对我的爱，是对我最大的支持和鼓励。我无法用言语表达我的感激，惟愿您们健康、平安、幸福。感谢我的女友，谢谢你的鼓励和陪伴，愿我们能牵手走向未知的将来。

再次感谢和祝福所有帮助我关心我的人！

参考文献

- [1] 魏学哲.燃料电池轿车锂离子动力电池管理系统研究:[博士学位论文].上海:同济大学汽车学院, 2005.1
- [2] 姜久春.电池管理系统的概况和发展趋势.新材料产业,2007(8): 40-43
- [3] 沈丹.电动汽车电池组单体电池管理系统研究:[硕士学位论文].上海:同济大学汽车学院, 2008.3
- [4] 郭炳焜,王先友.锂离子电池.长沙:中南大学出版社, 2002
- [5] David Linden,Thomas Reddy,汪继强.电池手册(第三版).北京:化学工业出版社, 2007
- [6] 孟良荣,王金良.电动车电池现状与发展趋势.电池工业.2006.6,11(3):202-206
- [7] Robert F. Nelson. Power requirements for batteries in hybrid electric vehicles. Journal of power sources ,2000(91):2~6
- [8] 麻友良,陈全世,齐占宇. 电动汽车用电池 SOC 定义与检测方法.清华大学学报(自然科学版),2001,41(11):95-97,105
- [9] 戴海峰. 动力蓄电池管理系统 SOC 估算方法研究:[博士学位论文].上海:同济大学汽车学院, 2008.5
- [10] M. Majima. Development of long life lithium in battery for power storage. Journal of Power Sources, 101(2001):53-59
- [11] United States Idaho National Engineering & Environmental Laboratory, FreedomCAR Battery Test Manual for Power-Assist Hybrid Electric Vehicles. DOE/ID-11069, 2003
- [12] INEEL. Battery Technology Life Verification Test Manual.2005
- [13] 王震坡,孙逢春,林程.不一致性对动力电池组使用寿命影响的分析.北京:北京理工大学学报, 2006,26(7):576~580
- [14] 麻友良.铅酸电池的不一致性和均衡充电的研究. 武汉:武汉科技大学学报, 2001, 24(3): 49-51
- [15] 戴海峰,孙泽吕,魏学哲. 嵌入式燃料电池车锂离子动力电池管理系统. 计算机工程与应用, 2007 (43) : 208~210
- [16] 贾颖,黎火林. 锂离子电池失效率模型的探讨. 北京:北京航空航天大学学报, 2008, 34 (8): 973~975, 985
- [17] 王正烈,周亚平,李松林,刘俊吉. 物理化学. 北京:高等教育出版社, 2002
- [18] 张祖训,王尔康. 电化学原理和方法. 北京:科学出版社, 2002
- [19] 李荻.电化学原理.北京:北京航空航天大学出版社, 2008
- [20] 黄可龙,王兆翔,刘素琴.锂离子电池原理与关键技术. 北京:化学工业出版社, 2008.2
- [21] Philip Symons. Life estimation of Lead-acid cells for utility energy storage. Proceedings of the Fifth Conference on Batteries for Utility, 1995.7
- [22] 魏学哲,孙泽吕,邹广楠. 模块化的 HEV 锂离子电池管理系统. 汽车工程, 2004 (26) :

- 629~633
- [23] Siemens-VDO. Test Specification for Li-ion Battery Systems for Hybrid Electric Vehicles. 2007
- [24] EUCAR (European Council for Automotive Research). Specification of test procedures for high voltage hybrid electric vehicle traction batteries. Traction Battery Working Group, 2004
- [25] 刘明治.可靠性试验. 北京: 电子工业出版社, 2004
- [26] United States Idaho National Engineering & Environmental Laboratory. PNGV Battery Test Manual. Revision 3, DOE/ID-10597, 2001
- [27] 张庆福. 蓄电池在线内阻监测技术及运用. 电源技术应用, 2006, 9 (6): 57-61
- [28] 邹广楠. 基于模型的蓄电池管理系统研究: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学汽车学院, 2004.3
- [29] National Renewable Energy Laboratory. A Battery Life Prediction Method for Hybrid Power Applications. 1997
- [30] Johnson V H. Battery Performance Models in ADVISOR. Journal of Power Sources, 2002, 110(8): 321-329
- [31] 王志贤. 最优状态估计与系统辨识. 陕西: 西北工业大学出版社, 2004
- [32] 钟静宏, 张承宁, 张玉璞. 电动汽车电池组管理系统研究及实现. 电源技术, 2006, 30(11): 925-928
- [33] D.P. Abraham, J.L. Knuth a, D.W. Dees et al. Performance degradation of high-power lithium-ion cells—Electrochemistry of harvested electrodes. Journal of Power Sources, 2007, 170(5): 465-475
- [34] 蒋新华. 锂离子电池组管理系统研究: [博士学位论文]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2007.3
- [35] 陈守平, 张军, 方英民等. 动力电池组特性分析与均衡管理. 电池工业, 2003, 8 (6): 265-271
- [36] 李相哲, 潘宏斌. 蓄电池一致性探讨. 电池工业, 2005, 10(5): 285-289
- [37] 田亮. 镍氢动力电池均衡充电系统的设计与试验研究: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2007.5
- [38] 王震坡, 孙逢春, 张承宁. 电动汽车动力蓄电池组不一致性统计分析. 电源技术, 2003, 27(5): 438-441
- [39] 麻友良, 陈全世. 混合动力电动汽车用蓄电池不一致的影响分析. 汽车电器, 2001(2): 5-7, 9
- [40] 张大波. 嵌入式系统低功耗设计技术. 电子产品世界, 2004(12): 93-96
- [41] Yongjun Yuan, Xuezhe Wei. Research on low power consumption of battery management system for HEV. SAE PFLC2008
- [42] Stephen W M, Peter J S.A. Review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems [A]. SAE technical paper series. Michigan: Detroit, 2001. 959
- [43] 吴友宇, 梁红. 电动汽车动力电池均衡方法研究. 汽车工程, 2004, 26(4): 382-385

- [44] Kandler Smith, Chao-Yang Wang. Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(1): 662-673
- [45] 周志敏,周纪海,纪爱华. 开关电源实用技术-设计与应用. 北京:人民邮电出版社, 2007.8
- [46] Hang-Seok Choi. Design Guidelines for Off-line Flyback Converters Using Fairchild Power Switch (FPS). Fairchild Semiconductor AN-4137, 2002
- [47] 张彬,周维维,张晓峰.反激变换器绕组钳位电路的分析与设计. *电气应用*, 2008,27(8): 83-87
- [48] Gwan-Bon Koo. Design Guidelines for RCD Snubber of Flyback Converters. Fairchild Semiconductor AN-4147, 2006
- [49] E. Adib, H. Farzanehfard. Family of zero current zero voltage transition PWM converters. *IET Electric Power Applications*, 2008, 1(2): 214-223
- [50] SAE J2289-2000. Electric Driver Battery Pack System Functional Guidelines

附录 A 电池加速寿命实验测试平台

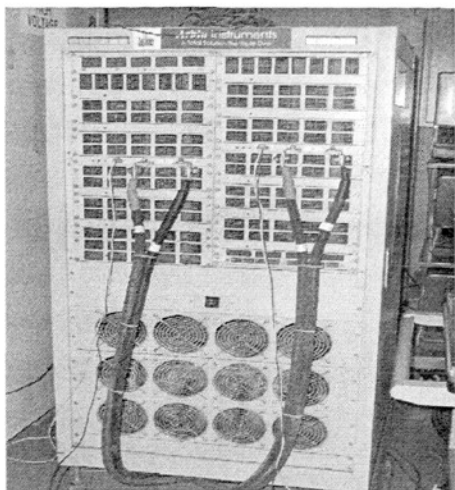


图 A.1 Arbin 电子负载

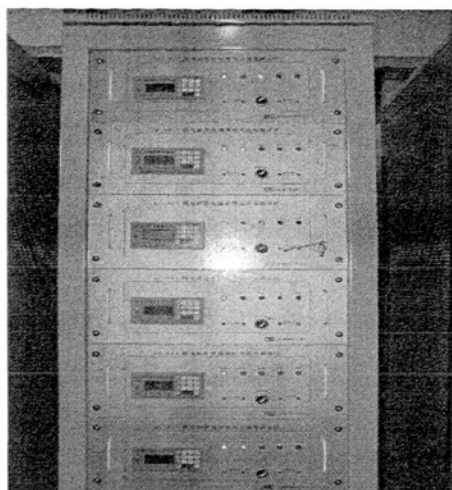


图 A.2 Jinfan 电子负载



图 A.3 Albe 便携式内阻测试仪



图 A.4 温控箱及实验中的电池样品

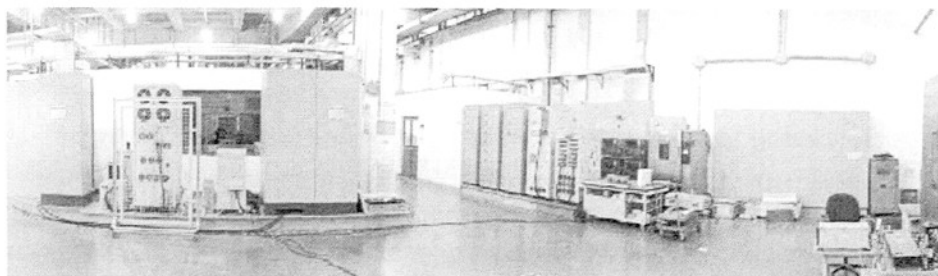


图 A.5 电池测试实验室环境

附录 B 单体电池管理系统 PCB 图

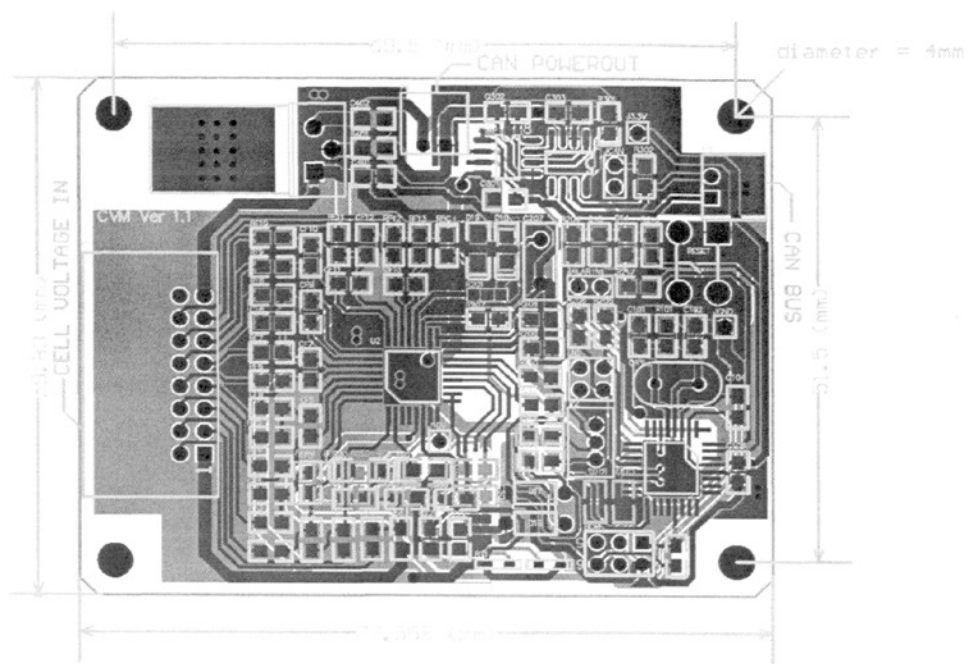


图 B.1 单体电池管理系统 LECU PCB 示意图

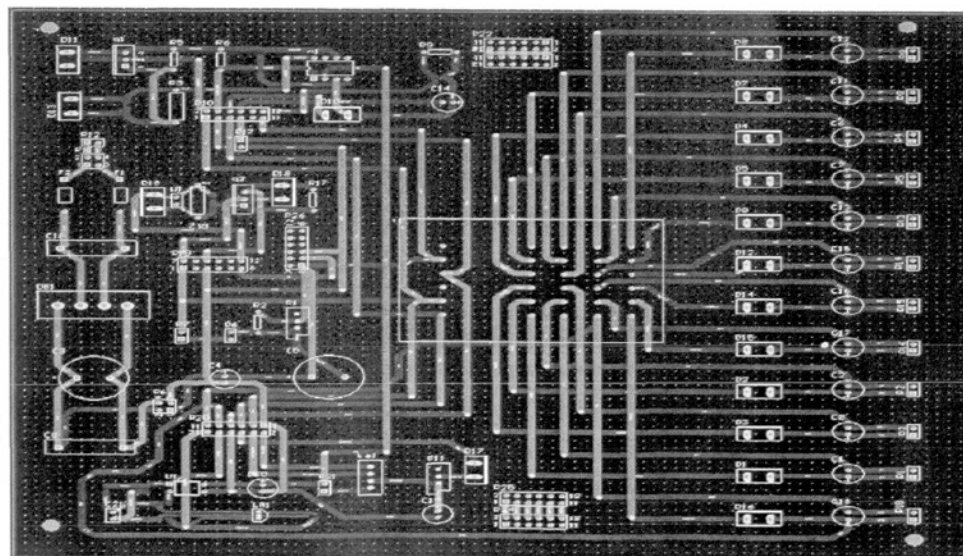


图 B.2 单端反激变压器主动均衡电路 PCB 示意图

个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

徐玮, 男, 1983 年 9 月生。

2006 年 6 月毕业于同济大学电气工程及其自动化专业, 获学士学位。

2006 年 9 月入同济大学车辆工程专业, 攻读硕士研究生。

已发表论文:

- [1] 徐玮, 魏学哲, 沈丹. 电池管理系统中信息不同步对内阻辨识影响的分析. 汽车工程, 2009 (3): 228-233, 238
- [2] 魏学哲, 徐玮, 沈丹. 锂离子电池内阻辨识及其在寿命估计中的应用. 电源技术, 2009 (3): 217-220