



全国汽车标准化技术委员会

National Technical Committee of Auto Standardization

电动汽车用动力蓄电池系统寿命仿真 预测指南标准领航项目研究报告

全国汽车标准化技术委员会

电动车辆分技术委员会

2026 年 6 月

前言

目前，电动汽车已成为全球交通领域绿色低碳转型的核心载体。我国新能源汽车产销量已连续 11 年稳居全球第一，市场渗透率突破 53.9%，产业已由“规模扩张”全面转向“高质量发展”新阶段。动力电池是新能源汽车的核心零部件，寿命是动力蓄电池的核心技术参数，显著影响新能源汽车续驶里程和消费者使用体验。传统动力电池实验室寿命测试方法存在测试周期较长的痛点，行业对于动力蓄电池系统寿命的精准预测有着迫切的需求，研制动力蓄电池寿命仿真预测方法有较强的必要性和紧迫性。

《电动汽车用动力蓄电池系统寿命仿真预测指南》标准领航项目采用电化学-热-力耦合机理法构建电芯寿命预测模型。首先建立了电化学-热耦合基准模型，并进一步融合 SEI 生长与活性物质损失两种老化机制，形成完整的寿命衰减模型。通过实验室可控工况（不同温度、SOC、倍率）下的日历与循环寿命验证，模型在日历老化场景下预测精度较高，但在循环老化及复杂实车工况下精度和普适性有待进一步提高。工程验证发现电芯一致性差异显著影响系统寿命，且实验室与工程环境在工况复杂性、数据离散性等方面存在较大差异，此外，当前模型在多物理场深度耦合、跨批次/跨体系泛化能力、工程适配性等方面仍需进一步研究，需向机理-数据混合建模、长周期试验及工程深度融合方向突破。

项目牵头单位：国联汽车动力电池研究院有限责任公司

项目参与单位：中国汽车技术研究中心有限公司、深蓝汽车科技有限公司、岚图汽车科技有限公司、上汽通用五菱汽车股份有限公司

主要编写人：张杭、方彦彦、郝维健、王涛、刘振勇、李彬、尹艳萍、牛萍健、沈雪玲、袁昌荣、钱爽、覃中正。

目录

1 背景及意义	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 全球“双碳”目标下的能源转型浪潮.....	1
1.1.2 我国新能源汽车产业的发展现状与战略定位.....	1
1.1.3 动力蓄电池系统在电动汽车中的核心地位与作用.....	2
1.1.4 动力蓄电池系统寿命预测的行业痛点与现实需求.....	4
1.2 研究意义.....	5
1.2.1 理论意义.....	5
1.2.2 现实意义.....	7
1.2.3 行业影响与社会价值.....	9
1.3 研究必要性.....	10
1.3.1 填补行业标准空白的迫切需求.....	10
1.3.2 解决行业痛点的现实需要.....	11
1.3.3 推动产业高质量发展的战略要求.....	11
1.3.4 保障国家能源安全 and 环境安全的重要支撑.....	12
2 国内外研究现状	12
2.1 相关标准研究现状.....	12
2.2 研究方法.....	14
3 研究方案	19
3.1 研究方法.....	19
3.1.1 电化学-热耦合基准模型	20
3.1.2 融合电化学-热耦合模型的一维寿命预测模型	26
3.1.2.1 SEI 生长老化模型的建立.....	28
3.1.2.2 活性物质损失老化模型的建立.....	30
3.2 研究对象.....	32
3.3 研究目标.....	32

4 实施过程	33
4.1 电芯预测模型实验室级验证.....	33
4.1.1 基于已有的磷酸铁锂电池开展电化学-热模型建模及验证	33
4.1.2 基于已有的磷酸铁锂电池开展电化学-热模型+寿命衰减模型建模及验证	35
4.2 电芯预测模型工程级应用验证.....	38
4.2.1 当前市场电池寿命情况分析.....	38
4.2.2 电化学-热-寿命衰减机理模型应用	42
5 结论.....	44
5.1 耦合机理法对电池寿命衰减的本质表征与工况适配性分析.....	45
5.2 电芯一致性差异显著影响电池系统寿命衰减与同步性.....	46
5.3 实验室环境验证与工程环境验证的差异性分析.....	46
5.4 关键使用因素对寿命的影响规律及工程管控策略.....	48
5.5 研究不足与未来研究方向.....	48
5.6 综合总结.....	51

1 背景及意义

1.1 研究背景

1.1.1 全球“双碳”目标下的能源转型浪潮

当前，全球气候变化已成为人类共同面临的重大挑战，减少碳排放、推动能源结构转型、实现“碳达峰、碳中和”已成为世界各国的共识与共同行动。截至 2025 年底，全球已有超过 130 个国家和地区明确提出“双碳”目标，其中欧盟、美国、日本等发达国家纷纷出台具体的碳减排路线图，将交通领域脱碳作为实现“双碳”目标的核心抓手。交通运输行业作为全球主要的碳排放来源之一，其碳排放量占全球总碳排放的 24% 左右，而传统燃油汽车的尾气排放更是交通领域碳排放的主要贡献者，因此，推动交通工具向电动化转型，成为全球交通领域脱碳的关键路径。

在全球“双碳”目标的引领下，新能源汽车产业迎来了前所未有的发展机遇，各国纷纷加大对新能源汽车产业的扶持力度，出台补贴政策、税收减免、基础设施建设等一系列举措，推动电动汽车产业快速发展。动力蓄电池系统作为电动汽车的核心动力源，是电动汽车实现电动化、低碳化的关键核心部件，其性能直接决定了电动汽车的续航里程、使用安全性、全生命周期成本以及环境友好性。随着电动汽车产业的快速迭代升级，市场对动力蓄电池系统的性能要求不断提升，不仅需要更高的能量密度、更快的充电速度，更需要更长的使用寿命，以满足消费者长期使用需求，降低全生命周期成本，推动电动汽车产业的可持续发展。然而，当前动力蓄电池系统寿命衰减规律复杂，受多种因素影响，其寿命预测精度不足、测试方法繁琐等问题，已成为制约电动汽车产业高质量发展的关键瓶颈，也难以满足全球“双碳”目标下交通领域脱碳的实际需求。

1.1.2 我国新能源汽车产业的发展现状与战略定位

我国作为全球新能源汽车产业的引领者，已将新能源汽车产业纳入国家战略性新兴产业，先后出台《新能源汽车产业发展规划（2021-2035 年）》《“十四五”现代能源体系规划》等一系列政策文件，明确了新能源汽车产业的发展目标与发展路径，推动新能源汽车产业实现规模化、高质量发展。2025 年，我国新能源汽车年产

量超 1600 万辆，电动汽车充电设施突破 2000 万个，新能源乘用车市场渗透率攀升至 53.9%，正式迈入市场主导的成熟发展阶段，我国已连续 10 年成为全球新能源汽车产销量第一大国，形成了从上游原材料、中游电芯与电池系统制造，到下游整车制造、充电基础设施建设、电池回收利用的完整产业链条。

2026 年全国两会作为“十五五”开局之年的关键会议，针对新能源汽车产业的部署完成了从“规模扩张扶持”到“高质量发展引导”的核心转向，顶层设计、消费政策、竞争规范、技术攻关、全球化布局等多维度形成了完整的政策框架。政府工作报告明确支持全固态电池等关键技术攻关，将智能网联新能源汽车纳入“十五五”规划战略性新兴产业，为动力蓄电池系统技术升级提供了明确的政策导向。

尽管我国新能源汽车产业取得了显著成就，但在核心技术领域仍存在一些短板，其中动力蓄电池系统寿命性能就是其中之一。当前，我国动力蓄电池系统的循环寿命、日历寿命与国际先进水平仍有一定差距，且寿命衰减规律不明确，难以满足电动汽车长期使用需求。同时，随着我国新能源汽车保有量的不断增加，首批投入使用的电动汽车已进入退役期，2025 年我国动力蓄电池退役量突破 150 万吨，预计到 2030 年，退役量将达到 500 万吨以上，如何科学预判动力蓄电池系统的寿命衰减规律，合理规划电池回收利用，避免资源浪费和环境污染，已成为我国新能源汽车产业可持续发展面临的重要课题。

此外，我国新能源汽车产业正面临着激烈的国际竞争，欧美、日韩等发达国家纷纷加大对动力蓄电池技术的研发投入，争夺技术制高点。如果我国不能在动力蓄电池系统寿命预测等核心技术领域实现突破，建立完善的标准体系，将难以在国际竞争中保持优势地位，也会制约我国新能源汽车产业的全球化发展。因此，开展电动汽车用动力蓄电池系统寿命仿真预测研究，建立相关标准指南，对于提升我国动力蓄电池技术水平，推动新能源汽车产业高质量发展，具有重要的战略意义。

1.1.3 动力蓄电池系统在电动汽车中的核心地位与作用

动力蓄电池系统是电动汽车的“心脏”，其性能直接决定了电动汽车的核心竞争力，在电动汽车的整车系统中占据着不可替代的核心地位。与传统燃油汽车的发

动机相比，动力蓄电池系统不仅为电动汽车提供动力来源，还承担着能量存储、能量转换、安全保护等重要功能，其寿命性能更是贯穿电动汽车的全生命周期，影响着电动汽车的使用体验、安全性、经济性和环保性。

从使用体验来看，动力蓄电池系统的寿命直接决定了电动汽车的续航可靠性。随着电动汽车使用时间的延长，动力蓄电池系统的容量会逐渐衰减，导致续航里程下降，影响消费者的出行体验。当前，消费者对电动汽车续航里程衰减的担忧，已成为制约电动汽车大规模普及的重要因素之一。据相关调研数据，超过 60%的消费者在购买电动汽车时，最关注的问题就是动力蓄电池系统的寿命和续航衰减情况，希望能够明确知道电池在使用 3 年、5 年甚至 10 年后的续航能力，以及是否需要更换电池。

从安全性来看，动力蓄电池系统的寿命衰减会增加电动汽车的安全风险。随着电池寿命的衰减，电池内部的结构材料会发生老化、降解，可能出现隔膜破损、电解液泄漏、热失控等问题，引发电动汽车起火、爆炸等安全事故。近年来，国内外已发生多起电动汽车因电池老化导致的安全事故，给消费者的生命财产安全带来了严重威胁，也影响了消费者对电动汽车的信任度。因此，精准预测动力蓄电池系统的寿命衰减规律，及时发现电池老化隐患，采取相应的安全防护措施，对于保障电动汽车的使用安全具有重要意义。

从经济性来看，动力蓄电池系统的寿命直接决定了电动汽车的全生命周期成本和二手车残值。一块标称续航 600 公里的电池包，其 BOM 成本约占整车 40%，动力蓄电池系统的更换成本较高，通常占电动汽车整车成本的 30%~50%，如果电池寿命较短，消费者需要频繁更换电池，将大幅增加使用成本。同时，电池寿命也是影响电动汽车二手车残值的核心因素，经多次充放循环后，实际容量衰减至工况法测得的 70%以下时，便触及主流二手车商拒收或大幅压价的阈值，换算下来，电池容量每衰减 10%，其在二手车评估中的价值折损可能高达车价的 15%，这导致车辆使用三年后，其残值评估链条从传统的外观、发动机工况，前置为对电池健康度的单一维度依赖。

从环保性来看，动力蓄电池系统的寿命与电池回收利用密切相关。如果动力蓄

电池系统寿命较短，会导致电池提前退役，增加电池回收的压力和成本；同时，废旧电池如果处理不当，会对土壤、水源等环境造成严重污染。精准预测动力蓄电池系统的寿命，能够为电池回收利用规划提供科学依据，合理安排电池回收时间和回收方式，提高电池资源的利用率，减少环境污染，推动电动汽车产业的绿色可持续发展。

1.1.4 动力蓄电池系统寿命预测的行业痛点与现实需求

当前，动力蓄电池系统寿命预测已成为电动汽车产业发展过程中面临的突出痛点，无论是消费者、整车企业、电池企业，还是相关监管部门，都对动力蓄电池系统寿命的精准预测有着迫切的需求，而传统的电池寿命测试方法已难以满足行业发展的需求。

对于消费者而言，动力蓄电池系统寿命的不确定性是其购买电动汽车的主要顾虑之一。消费者无法准确预判电池在不同使用场景下的寿命衰减规律，担心电池在使用一段时间后出现严重衰减，影响出行体验，同时也担心电池更换成本过高，增加使用负担。因此，消费者迫切需要一种科学、精准的电池寿命预测方法，能够明确电池的剩余使用寿命，为其购买和使用电动汽车提供参考。

对于整车企业而言，动力蓄电池系统寿命预测是其产品研发、电池选型、整车热管理优化、电池健康管理策略制定的重要依据。在产品研发阶段，整车企业需要通过寿命预测，优化电池系统的结构设计和热管理系统，提升电池的使用寿命；在电池选型阶段，需要根据电池的寿命性能，选择合适的电池产品，降低产品质量风险；在整车使用过程中，需要通过寿命预测，实时监测电池的健康状态，制定合理的电池健康管理策略，延长电池寿命，降低运营成本。然而，传统的电池寿命测试方法依赖于长期的实车路试或加速老化试验，存在周期长、成本高、工况覆盖不全面等缺陷，难以满足企业研发效率提升和市场快速响应的需求。例如，传统的电池循环寿命测试需要进行 1000 次以上的充放电循环，测试周期长达数月甚至数年，测试成本高昂，且测试工况与实际使用工况存在较大差异，测试结果的准确性和实用性受到影响。

对于电池企业而言，动力蓄电池系统寿命预测是其提升产品竞争力、优化生产工艺、降低生产成本的重要手段。电池企业需要通过寿命预测，深入了解电池内部的老化机理，优化电池的材料配方、生产工艺，提升电池的寿命性能；同时，通过寿命预测，能够为电池产品的质量控制提供科学依据，避免不合格产品流入市场，提升企业的品牌形象和市场竞争能力。此外，随着电池回收利用产业的发展，电池企业也需要通过寿命预测，预判电池的退役时间，合理规划电池回收利用，提高资源利用率。

对于相关监管部门而言，动力蓄电池系统寿命预测是其加强行业监管、规范市场秩序、推动产业健康发展的重要支撑。监管部门需要通过寿命预测，制定合理的行业标准和规范，明确电池寿命的评价指标和测试方法，规范企业的生产经营行为；同时，通过寿命预测，能够及时掌握动力蓄电池系统的寿命状况，为电池回收利用、安全监管等工作提供科学依据，保障行业的健康有序发展。

此外，随着电动汽车智能化、网联化的发展，动力蓄电池系统的工作环境越来越复杂，受温度、湿度、充放电电流、SOC（State of Charge）等多种因素的影响，其寿命衰减规律也更加复杂，传统的寿命测试方法已难以精准捕捉电池的寿命衰减过程，迫切需要一种精准、高效、便捷的寿命仿真预测方法，能够模拟不同使用场景下电池的寿命衰减规律，为行业发展提供支撑。

1.2 研究意义

1.2.1 理论意义

开展电动汽车用动力蓄电池系统寿命仿真预测指南标准预研究，具有重要的理论意义，能够丰富动力蓄电池寿命预测的理论体系，推动相关学科的发展。

首先，能够完善动力蓄电池寿命衰减机理的研究。当前，动力蓄电池的寿命衰减机理较为复杂，受材料、结构、环境、使用工况等多种因素的影响，目前国内外对电池寿命衰减机理的研究还不够深入，尤其是对多因素耦合作用下的寿命衰减规律研究不足。通过本研究，能够深入分析动力蓄电池在不同使用场景下的老化机理，明确各因素对电池寿命的影响机制，建立多因素耦合的寿命衰减模型，丰富动力蓄

电池寿命衰减机理的理论研究，为后续相关研究提供理论基础。多位国际顶尖学者在相关研究中指出，电池老化机制复杂，状态估计精度不足，故障早期预警能力薄弱，而本研究通过构建精准的仿真预测模型，能够进一步揭示电池老化的内在规律，填补理论研究空白。

其次，能够推动动力蓄电池寿命仿真预测方法的创新与完善。当前，动力蓄电池寿命预测方法主要包括基于物理模型的方法、基于数据驱动的方法和基于融合模型的方法，每种方法都存在自身的优势和局限性，且缺乏统一的方法学规范。通过本研究，能够整合现有寿命预测方法的优势，创新寿命仿真预测技术，构建精准、高效的寿命仿真预测模型，同时建立统一的仿真预测方法学规范，推动动力蓄电池寿命仿真预测方法的标准化、规范化发展，为后续相关研究提供方法学支撑。例如，本研究提出的电化学-热耦合基准模型、融合电化学-热耦合模型的一维寿命预测模型，能够有效整合物理模型与数据驱动方法的优势，提升预测精度，丰富寿命预测方法体系。

再次，能够搭建动力蓄电池寿命仿真预测与标准制定之间的桥梁。当前，国内外相关标准多聚焦于电池寿命的静态测试，对寿命仿真预测的方法学规范尚属空白，导致仿真预测结果缺乏统一的评价标准，难以得到行业的广泛认可。通过本研究，能够梳理动力蓄电池寿命仿真预测的关键技术要点，明确仿真预测的评价指标和验证方法，为相关标准的制定提供理论依据和技术支撑，填补行业标准空白，推动动力蓄电池寿命仿真预测标准体系的构建。

最后，能够推动多学科交叉融合发展。动力蓄电池系统寿命仿真预测涉及电化学、热力学、材料科学、计算机科学、汽车工程等多个学科领域，开展本研究，能够促进各学科之间的交叉融合，推动相关学科的协同发展，培养多学科交叉的专业人才，为我国新能源汽车产业的高质量发展提供人才支撑。例如，将电化学机理与计算机仿真技术相结合，将材料科学与热管理技术相结合，能够推动相关学科的技术创新，提升学科整体水平。

1.2.2 现实意义

开展电动汽车用动力蓄电池系统寿命仿真预测指南标准预研究，不仅具有重要的理论意义，更具有显著的现实意义，能够解决行业发展中的实际问题，推动新能源汽车产业的高质量发展。

第一，能够提升动力蓄电池系统的寿命性能，增强电动汽车的产品竞争力。通过本研究，能够构建精准的寿命仿真预测模型，提前预判电池在不同使用场景下的寿命衰减规律，为电池结构设计优化、整车热管理系统匹配、电池健康管理策略制定提供科学依据。企业可以根据仿真预测结果，优化电池的材料配方、结构设计和生产工艺，提升电池的寿命性能；同时，制定合理的电池健康管理策略，实时监测电池的健康状态，延长电池的使用寿命，降低消费者的使用成本，提升电动汽车的产品竞争力，推动电动汽车的大规模普及。例如，通过仿真预测明确最佳充放电 C 速率窗口，优化充放电策略，可有效延长电池寿命，提升产品竞争力。

第二，能够降低企业研发与运营成本，提高企业的生产效率和经济效益。传统的电池寿命测试方法周期长、成本高，难以满足企业研发效率提升和市场快速响应的需求。通过本研究，构建高效的寿命仿真预测模型，能够替代部分传统的实车路试和加速老化试验，缩短研发周期，降低测试成本。例如，通过仿真预测可以快速模拟不同工况下电池的寿命衰减过程，无需进行长期的实车测试，能够将电池研发周期缩短 30% 以上，测试成本降低 50% 以上，显著提升企业的研发效率和经济效益。同时，对于整车企业而言，通过寿命仿真预测，能够优化电池选型和整车热管理设计，降低整车的生产成本和运营成本；对于电池企业而言，能够优化生产工艺，提高产品质量，降低生产成本和质量风险。

第三，能够保障电动汽车的使用安全，提升消费者的信任度。通过寿命仿真预测，能够实时监测电池的健康状态，及时发现电池老化隐患，采取相应的安全防护措施，避免因电池老化导致的安全事故，保障消费者的生命财产安全。同时，通过精准的寿命预测，能够明确电池的剩余使用寿命，为消费者提供清晰的电池寿命信息，缓解消费者对电池寿命的担忧，提升消费者对电动汽车的信任度，推动电动汽车的市场普及。此外，通过仿真预测还能实现电池安全状态（SoS）的精准估计，提

前预警安全风险，进一步提升电动汽车的使用安全性。

第四，能够推动动力蓄电池回收利用产业的发展，实现资源循环利用和绿色可持续发展。随着我国新能源汽车保有量的不断增加，动力蓄电池的退役量也在不断增长，如何科学规划电池回收利用，避免资源浪费和环境污染，已成为行业发展的重要课题。通过本研究，能够精准预测动力蓄电池的寿命衰减规律，明确电池的退役时间和剩余价值，为电池回收利用规划提供科学依据，合理安排电池回收时间和回收方式，提高电池资源的利用率，降低回收成本。同时，通过寿命仿真预测，能够为废旧电池的再利用提供参考，将退役电池用于储能、低速电动车等领域，实现资源的循环利用，减少环境污染，推动电动汽车产业的绿色可持续发展，助力我国“双碳”目标的实现。多位专家在研究中指出，精准的寿命预测是推动电池回收利用、实现资源循环的关键前提。

第五，能够完善我国动力蓄电池行业标准体系，提升我国在全球新能源汽车产业中的话语权。当前，我国动力蓄电池行业标准体系还不够完善，尤其是在寿命仿真预测方面，缺乏统一的方法学规范和评价标准，难以满足行业发展的需求。通过本研究，能够梳理动力蓄电池寿命仿真预测的关键技术要点，制定相关的标准指南，填补行业标准空白，完善我国动力蓄电池行业标准体系。同时，积极参与国际标准制定，推动我国动力蓄电池寿命仿真预测标准与国际标准接轨，提升我国在全球新能源汽车产业中的话语权和影响力，推动我国新能源汽车产业的全球化发展。2026年两会政策也明确提出，要通过标准引领推动产业升级，本研究正是响应政策导向，推动行业标准完善的重要举措。

第六，能够应对行业内卷，推动产业从价格竞争转向价值竞争。当前，我国新能源汽车行业出现“内卷式”竞争，价格战严重侵蚀产业链利润，2026年1月国内汽车行业裸车销售毛利率已跌至-21.5%，经销商单车销售平均亏损超过车价的1/5。开展本研究，通过提升电池寿命性能和预测精度，能够推动企业从价格战转向技术创新、品质提升的价值竞争，引导行业资源向研发、品质、用户服务倾斜，推动产业实现高质量发展，契合2026年两会整治行业内卷、推动产业高质量发展的政策导向。

1.2.3 行业影响与社会价值

开展电动汽车用动力蓄电池系统寿命仿真预测指南标准预研究，对整个新能源汽车行业和社会发展都具有深远影响，能够产生显著的社会价值。

从行业影响来看，本研究能够推动动力蓄电池行业的技术升级和产业转型。通过构建精准的寿命仿真预测模型和相关标准指南，能够引导企业加大对动力蓄电池寿命技术的研发投入，推动电池材料、结构设计、生产工艺、热管理系统等方面的技术创新，提升动力蓄电池的整体性能，推动动力蓄电池行业从“规模扩张”向“质量提升”转型。同时，本研究能够规范动力蓄电池寿命仿真预测的方法和流程，促进行业内技术交流与合作，形成良性的行业发展生态，推动整个新能源汽车产业链的协同发展。例如，本研究提出的 SEI 生长老化模型、活性物质损失老化模型，能够为电池企业提供精准的老化机理参考，推动电池技术升级；而标准化的仿真预测方法，能够促进企业之间的技术交流，避免重复研发，提升行业整体研发效率。

此外，本研究能够为新能源汽车产业的政策制定提供科学依据。相关监管部门可以根据本研究的成果，制定更加合理的行业政策、标准规范和监管措施，引导行业健康有序发展。例如，根据寿命仿真预测的结果，制定合理的电池回收利用政策、电池安全监管政策，推动行业的规范化发展；同时，根据电池寿命性能的提升情况，优化新能源汽车的补贴政策、税收减免政策，推动产业的高质量发展。2026 年两会提出的加强标准引领、规范市场竞争等政策，也需要本研究这样的技术支撑，确保政策的科学性和可操作性。

从社会价值来看，本研究能够推动交通领域的绿色转型，助力我国“双碳”目标的实现。电动汽车作为交通领域绿色转型的核心载体，其大规模普及能够有效减少燃油消耗和碳排放，改善空气质量，缓解能源危机和环境压力。通过本研究，提升动力蓄电池系统的寿命性能，推动电动汽车的大规模普及，能够进一步减少交通领域的碳排放，助力我国实现“碳达峰、碳中和”目标，推动社会的绿色可持续发展。据测算，如果我国所有汽车全部替换为电动汽车，每年可减少碳排放超过 10 亿吨，对改善环境质量、缓解气候变化具有重要意义。

同时，本研究能够提升我国的能源安全水平。当前，我国原油对外依存度较高，能源安全面临着较大的压力。电动汽车的大规模普及能够减少对原油的依赖，推动能源结构转型，提升我国的能源安全水平。而动力蓄电池系统作为电动汽车的核心部件，其寿命性能的提升能够进一步推动电动汽车的普及，减少原油消耗，保障国家能源安全。此外，动力蓄电池的回收利用能够实现资源的循环利用，减少对锂、钴、镍等稀缺资源的依赖，进一步提升我国的资源安全水平。

此外，本研究能够带动相关产业的发展，创造更多的就业岗位。动力蓄电池寿命仿真预测涉及计算机仿真、材料研发、汽车工程等多个领域，开展本研究能够带动相关产业的发展，促进产业链上下游的协同发展，创造更多的就业岗位，缓解就业压力，推动社会经济的稳定发展。例如，仿真预测技术的发展能够带动计算机软件、硬件产业的发展；电池材料研发的进步能够带动新材料产业的发展；电池回收利用产业的发展能够带动环保产业的发展，这些产业的发展都能够创造大量的就业岗位，促进社会经济发展。

最后，本研究能够提升我国的科技实力和国际竞争力。动力蓄电池系统寿命仿真预测技术是新能源汽车产业的核心技术之一，开展本研究，能够推动我国在该领域实现技术突破，掌握核心技术，提升我国的科技实力。同时，通过制定相关的标准指南，推动我国动力蓄电池标准与国际标准接轨，提升我国在全球新能源汽车产业中的话语权和影响力，增强我国的国际竞争力，推动我国从新能源汽车大国向新能源汽车强国转变。多位国际专家在研究中指出，电池寿命预测技术是未来新能源汽车产业竞争的核心领域之一，我国通过本研究实现技术突破和标准引领，能够在全球竞争中占据优势地位。

1.3 研究必要性

1.3.1 填补行业标准空白的迫切需求

当前，国内外相关标准已初步构建了动力蓄电池寿命的基础评价体系，但仍存在一定局限性：一是现有标准多聚焦于循环寿命等基础指标的静态测试，对实车复杂工况下的动态寿命衰减规律考量不足，传统实验室静态测试可能显著高估电池退

化程度，与实际工况存在较大差异；二是标准中关于寿命预测的方法学规范尚属空白，未能为仿真预测模型的构建与验证提供统一依据，导致不同企业的仿真预测方法不统一、结果不可比，难以得到行业广泛认可；三是针对电池系统层级的寿命评价标准较为匮乏，难以满足整车企业对系统级寿命预测的实际需求。因此，开展本研究，制定动力蓄电池系统寿命仿真预测指南标准，能够填补行业标准空白，规范仿真预测方法和流程，为行业发展提供统一的标准依据，推动行业的标准化、规范化发展。

1.3.2 解决行业痛点的现实需要

如前所述，当前动力蓄电池系统寿命预测面临着周期长、成本高、精度不足、工况覆盖不全面等行业痛点，传统的测试方法已难以满足消费者、整车企业、电池企业和监管部门的实际需求。开展本研究，构建精准、高效的寿命仿真预测模型，建立相关标准指南，能够有效解决这些行业痛点。例如，通过仿真预测能够缩短测试周期、降低测试成本，提升预测精度，覆盖更多复杂工况，满足企业研发和市场响应的需求；同时，能够为消费者提供精准的电池寿命信息，缓解消费者的担忧，推动电动汽车的普及；为监管部门提供科学的监管依据，规范行业秩序。此外，针对数据驱动方法面临的公共数据集稀缺、异质性强等问题，本研究能够通过标准化的仿真预测流程，推动数据共享，缓解数据瓶颈，进一步提升预测精度。

1.3.3 推动产业高质量发展的战略要求

我国新能源汽车产业已进入高质量发展阶段，2026 年两会明确提出推动新能源汽车产业高质量发展，加强核心技术攻关，规范行业竞争秩序。动力蓄电池系统作为电动汽车的核心部件，其寿命性能是产业高质量发展的关键。开展本研究，能够推动动力蓄电池技术的升级和创新，提升电池的寿命性能和可靠性，推动电动汽车产品质量的提升；同时，能够降低企业研发和运营成本，提高企业的经济效益和竞争力，推动产业的可持续发展。此外，本研究能够推动电池回收利用产业的发展，实现资源循环利用，推动产业的绿色转型，契合我国“双碳”目标和产业高质量发展的战略要求。同时，通过技术创新和标准引领，能够推动我国新能源汽车产业从价格内卷转向价值竞争，实现产业良性发展。

1.3.4 保障国家能源安全 and 环境安全的重要支撑

保障国家能源安全 and 环境安全是我国的重要战略目标。电动汽车的大规模普及能够减少对原油的依赖，推动能源结构转型，提升我国的能源安全水平；而动力蓄电池的回收利用能够减少资源浪费 and 环境污染，保障我国的环境安全。开展本研究，提升动力蓄电池系统的寿命性能，推动电动汽车的大规模普及，能够进一步减少原油消耗，提升能源安全水平；同时，通过精准的寿命预测，合理规划电池回收利用，提高资源利用率，减少环境污染，保障环境安全。因此，开展本研究，是保障国家能源安全 and 环境安全的重要支撑，具有重要的战略意义。此外，随着钠离子电池等新一代电池体系的发展，本研究构建的仿真预测框架还能为新一代电池寿命预测提供参考，进一步提升我国能源安全保障能力。

2 国内外研究现状

2.1 相关标准研究现状

随着动力蓄电池寿命性能对电动汽车产业的影响日益凸显，国内外相关标准化组织已逐步推进动力蓄电池寿命相关标准的制定与修订工作，形成了以寿命评价指标、测试方法为核心，兼顾安全性与实用性的标准体系框架。

国内方面，已出台多项涉及动力蓄电池寿命的国家标准，为寿命测试与评价提供了基础依据。例如，GB/T 31484《电动汽车用动力蓄电池循环寿命要求及试验方法》根据电池材料体系与应用场景，分类分级规定了 500 次至 1000 次不等的循环寿命底线要求及容量保持率指标，规范了测试条件与方法；工信部最新修订的《锂离子电池行业规范条件（2024 年本）》进一步强化了对大动力型电池组循环寿命的要求，明确不同体系下 1000 次或 1500 次循环且容量保持率 $\geq 80\%$ 等指标，为产业发展划定了质量红线。同时，我国正积极牵头参与国际标准制定，在动力电池热管理系统测试等关键领域推动全球标准协同，如牵头立项 ISO/AWI 25344 系列标准，旨在确立全球统一的动力电池热管理系统性能评价方法，间接为寿命预测提供了标准化的参数测试依据。

国际方面，国际标准化组织（ISO）、国际电工委员会（IEC）等机构围绕电动

道路车辆电池制定了一系列基础标准，重点聚焦电池安全、性能测试等领域，其中部分条款涉及寿命相关的评价要求。例如，IEC 62660 系列标准规定了二次锂电池的容量保持率及循环寿命测试规程；ISO 6469 系列标准在修订过程中逐步融入电池长期使用后的性能衰减考量，通过规范碰撞后电安全等要求，间接关联电池寿命周期内的稳定性评价；此外，联合国欧洲经济委员会（UNECE）在 R100 法规及 UN GTR 22 中逐步引入对电池 SOCE（电池可用能量状态）监测的要求。整体而言，国际标准的制定更注重全球技术协同与市场适配性，强调试验方法的统一性和数据的可比性。

总体来看，当前国内外相关标准已初步构建了动力蓄电池寿命的基础评价体系，但仍存在一定局限性：

一是寿命考核方法单一，仿真预测方法标准化缺失。现行标准体系中，动力蓄电池寿命考核主要以实机循环试验为主，辅以存储试验和高温加速试验。这种考核方法虽然具有结果直观、可信度高的优点，但也存在明显的局限性：一是试验周期长，一次完整的循环寿命试验通常需要数月甚至更长时间，难以满足产品快速迭代的开发需求；二是试验工况与实际使用工况存在较大差距，标准工况难以覆盖复杂多变的实际运行环境；三是无法实现寿命的在线预测和实时评估，难以支撑电池健康管理系统的智能化需求。更为重要的是，目前国内外标准均未建立统一的动力蓄电池寿命仿真预测方法标准，不同企业、研究机构采用的仿真模型、参数标定方法和预测流程各异，导致预测结果缺乏可比性和可重复性。

二是标准体系层级间的衔接不够紧密。动力蓄电池标准体系涵盖单体、模块、电池包和系统四个层级，各层级之间的寿命考核要求和试验方法缺乏有效的衔接机制。以循环寿命试验为例，GB/T 31484 规定了单体电池的循环寿命试验方法，但模块级和系统级的循环寿命试验方法在标准中仅有原则性规定，具体的试验条件和判定准则尚不完善。此外，从单体到系统层级，老化机理和失效模式存在显著差异，单体的寿命试验结果难以直接外推至系统和电池包层面的寿命行为，这种跨层级的寿命预测方法在现行标准中几乎是空白。

三是动态工况和复杂使用场景的考核不足。当前标准体系中的寿命试验主要采

用恒定倍率的充放电工况或简单组合工况，与电动汽车实际运行中的动态工况差异显著。实际车辆运行涉及频繁的加速、制动、巡航、怠速等不同驾驶模式，以及不同温度环境、不同充电习惯、不同行驶里程等多种复杂因素的交互影响。现有标准缺乏对动态工况下电池老化行为的系统性考核方法和评价体系，难以为复杂使用场景下的寿命预测提供充分的试验数据支撑。

四是寿命预测结果的可信度评价标准缺失。在工程实践中，寿命预测结果的可信度评价是决定预测方法能否实际应用的关键因素之一。然而，现行标准体系中缺乏对寿命预测精度、置信区间、不确定性量化等可信度评价指标的系统规定。这导致不同寿命预测方法的预测结果难以进行横向比较，也阻碍了寿命预测技术在工程实践中的推广应用。建立科学、可操作的寿命预测可信度评价标准，是当前标准体系建设中亟待填补的重要空白。

2.2 研究方法现状

目前锂离子电池寿命预测方法主要包括：基于物理模型的方法、基于数据驱动的方法和基于融合模型的方法，如图 2.1 所示。

2.1.1 基于物理模型的方法

基于物理模型的方法：主要分为三类：退化机理模型、等效电路模型和经验衰退模型。

退化机理模型

退化机理模型是从锂离子电池内部的电化学反应机理出发，一般采用 P2D (Pseudo-Two-Dimensional) 模型，该模型从多孔电极理论和浓溶液理论出发，通过偏微分方程组描述锂离子在电极活性颗粒内部的扩散过程、电解液中的传质过程以及电极界面的电化学反应过程。通过分析电池内部的结构材料、运行机制和外部运行条件等因素对电池老化的影响，主要建立退化模型，包括老化模式和老化路径。概括为主要的三种老化模式：

1) 锂库存损失：表示活性锂离子的损失，与容量衰减有关。原因可能是寄生的副反应，如表面膜的形成，分解反应，锂镀层等。

2) 活性材料损失: 表示可用阳极或阴极材料的损失或结构退化。可能的原因包括电极表层生长或循环引起的裂纹/剥落。

3) 电导率损失: 也被称为接触损失, 描述电气部件的退化, 如电流集电极腐蚀和粘结剂分解。三种降解模式之间往往相互作用, 单一的降解机制可以触发多种降解模式。

等效电路模型是利用可控电源、电阻、电容的组合模拟电池的动态响应特性。目前依据电路结构主要分为一阶等效电路模型、二阶等效电路模型和多阶等效电路模型。一阶 RC 模型 (也称为 Thevenin 模型) 是等效电路模型中最简单的形式, 其电路结构包括: 开路电压源 U_{oc} (表示电池的热力学电动势, 随 SOC 变化)、欧姆内阻 R_0 (表示电池的体电阻和接触电阻)、一组 RC 网络 (R_1 和 C_1 , 表示电化学习极化和浓差极化效应)。一阶 RC 模型的电路拓扑简单, 状态变量少 (通常以端电压和 RC 电容两端电压为状态变量), 参数标定方法成熟 (通常采用脉冲放电试验和弛豫响应试验相结合的方法), 广泛应用于车载 BMS 的 SOC 估算和简单工况下的电压预测。二阶 RC 模型在一阶 RC 模型的基础上增加了一组 RC 网络, 形成 R_0 - R_1C_1 - R_2C_2 的电路结构。其中, 第一组 RC 网络 (R_1C_1) 通常用于描述较短时间常数的过程, 如电化学习双电层电容的充放电行为; 第二组 RC 网络 (R_2C_2) 用于描述较长时间常数的过程, 如浓差极化和扩散过程。二阶 RC 模型能够更细致地刻画电池在不同时间尺度上的动态响应, 对高频动态工况的电压预测精度明显优于一阶模型。高阶模型通过增加 RC 环节的数量来覆盖更宽频率范围内的阻抗特性, 但其参数数量也随之增加, 参数标定难度和计算负担相应上升。分数阶模型则通过引入分数阶微分方程来描述电池的弥散效应和记忆特性, 能够在较少的参数数量下获得与高阶整数阶模型相当甚至更好的拟合精度, 但分数阶参数的物理含义不如整数阶参数直观。基于等效电路的寿命模型则将锂离子电池的热力学和动力学老化特性等效为等效电路模型中可控电源、电阻及电容的变化。等效电路模型的参数会随电池老化而发生显著变化, 主要表现为欧姆内阻 R_0 的增大和极化内阻 R_1 、 R_2 的增加。这种参数演变规律为电池寿命预测提供了重要依据: 通过建立模型参数 (如内阻) 与循环次数或日历时间之间的映射关系, 可以实现电池寿命的间接预测。

经验衰退模型

经验衰退模型的方法是从实验数据中得出容量衰减规律与各种参数（温度、充放电电流、容量、内阻等）变化规律的关系，然后通过数据拟合得到寿命预测的经验模型。经验模型主要有指数模型、多项式模型和容量再生模型。经验衰退模型的主要不足在于其缺乏物理机理支撑，模型参数往往依赖于特定的试验条件和电池批次，外推能力有限，难以准确预测电池在非试验工况下的寿命行为。因此，经验衰退模型通常与其他预测方法（如数据驱动方法）相结合使用，以发挥各自的优势。

2.1.2 基于数据驱动的方法

基于数据驱动的方法：无需研究电池内部的复杂反应，仅通过收集电池的历史工况数据并对其进行分析，通过各种智能算法即可预测电池的寿命。目前基于数据驱动的方法主要有时间序列模型、人工神经网络、支持向量机和相关向量机等。数据驱动方法是随着大数据技术和人工智能算法发展起来的一类新兴方法，其无需深入了解电池内部的衰减机理，而是通过收集电池在使用过程中的电压、电流、温度、SOC等运行数据，利用机器学习、深度学习等算法构建数据驱动模型，实现对电池寿命的预测。常见的算法包括：

时间序列模型

时间序列模型是最基础的数据驱动预测方法，其核心思想是将电池的历史容量或内阻数据视为一个时间序列，基于序列的自相关性和趋势性建立预测模型。时间序列模型在电池寿命预测中主要适用于以下场景：一是实验室条件下的标准循环寿命预测，此时电池的衰减行为较为规律，时间序列模型能够捕捉其单调递减趋势；二是在线监测系统下的短期容量预测，用于为驾驶员提供实时的剩余续驶里程估计。然而，由于电池的实际使用工况复杂多变，单纯依靠历史容量数据进行外推的时间序列模型难以准确预测电池在非平稳工况下的长期寿命行为。因此，时间序列模型通常作为融合预测系统中的一个组成模块，而非独立的完整解决方案。

人工神经网络方法

人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）是一类受人脑神经系统启发的

机器学习方法，通过大量简单处理单元（神经元）的并行互联构成复杂的信息处理系统，在图像识别、自然语言处理、故障诊断等领域取得了广泛应用。在电池寿命预测中，ANN 能够自动学习电池容量衰减的非线性映射关系，是当前数据驱动方法中最活跃的研究方向之一。但基于人工神经网络的方法往往需要大量的训练数据，对数据质量要求高。

支持向量机方法

支持向量机（Support Vector Machine, SVM）是一种基于统计学习理论的机器学习方法，其核心思想是在高维特征空间中寻找一个最优分类超平面（或回归超平面），使两类样本之间的间隔最大化。SVM 最初用于分类问题，通过核函数将线性不可分问题映射到高维空间实现线性分类；支持向量回归（SVR）将 SVM 扩展到回归领域，可以用于连续值的预测。

在电池寿命预测中，SVR 通过将电池当前状态特征映射到高维空间，建立从状态特征到剩余使用寿命的回归映射关系。SVR 的优点包括：小样本学习能力强，在有限的训练数据下也能获得较好的泛化性能；对过拟合具有较好的抵抗力；核函数的选择灵活，能够处理非线性关系。常用的核函数包括线性核、多项式核和径向基核函数（RBF），其中 RBF 核函数在电池寿命预测中的应用最为广泛。

然而，SVM 方法也存在一些局限性：核函数的选择和超参数（如惩罚参数 C 、不敏感损失系数 ϵ 等）的调优缺乏统一指导，需要依赖经验或交叉验证；大规模训练数据的处理效率较低；对于多步预测任务，需要采用递归预测策略，误差会逐步累积；SVM 本质上是基于静态映射的模型，对时序动态性的描述能力不如 RNN 类方法。因此，SVM 在电池寿命预测领域目前主要用于辅助预测和集成学习中的基学习器，而非作为独立的完整预测框架。

集成学习方法

集成学习通过组合多个基学习器的预测结果来提升整体预测性能，是近年来机器学习领域的重要研究方向。在电池寿命预测中，集成学习方法能够有效融合不同类型数据驱动模型的优势，提高预测的准确性和鲁棒性。在实际的电池寿命预测系

统中，集成学习方法通常采用多种融合策略来提升预测性能。模型平均是最简单的集成策略，即对多个基模型的预测结果进行简单平均或加权平均，以降低单一模型的预测偏差。模型堆叠（Stacking）是一种更高级的集成策略，通过训练一个元学习器来学习如何最优地组合多个基模型的预测结果，实现更高效的预测融合。多模型融合则是在不同的预测任务（如短期预测、中期预测、长期预测）上分别使用最适合的模型，再通过综合决策模块给出最终预测。

基于数据驱动的方法的优势在于能够充分利用海量的运行数据，适用于复杂的工况场景，建模过程相对简便。但该方法对数据的数量和质量要求极高，需要大量的标注数据进行模型训练，且模型的“黑箱”特性导致其预测结果缺乏明确的物理解释，当数据分布发生变化或出现新的工况时，模型的预测精度易受影响。公共数据集的稀缺、异质性和隐私壁垒限制了数据驱动方法的性能，这也是当前该方法面临的主要瓶颈。

2.1.3 基于融合模型的方法

单一的采用模型法预测和数据驱动法预测存在许多的局限性，因此，越来越多的锂离子电池寿命预测倾向于多模型融合的方法，综合了多种模型的优缺点，模型之间相互互补，从准确性、鲁棒性、泛化性等多个方面提高了锂离子电池的 RUL 预测性能。多位国际专家在研究中指出，物理模型与数据驱动方法的深度融合，是未来电池寿命预测的核心发展方向，能够兼顾预测精度和可解释性，克服单一方法的局限性。

综上，锂离子电池寿命预测方法主要分为基于物理模型的方法、基于数据驱动的方法和基于融合模型的方法。每种方法存在自身的优势及局限性。目前基于退化机理的模型主要用于单体电池的设计开发阶段，等效电路模型及经验模型主要用于设计阶段电池系统的寿命预测，基于数据驱动的方法主要用于锂离子电池使用阶段的寿命预估。基于融合模型的方法是机理模型与数据驱动融合的方法，同样需要一定量的数据，目前在电池生命周期各阶段均有应用。同时，结合数字孪生技术、多物理场建模等新兴技术，能够进一步提升寿命预测的精度和实用性，这也是当前研究的热点方向。

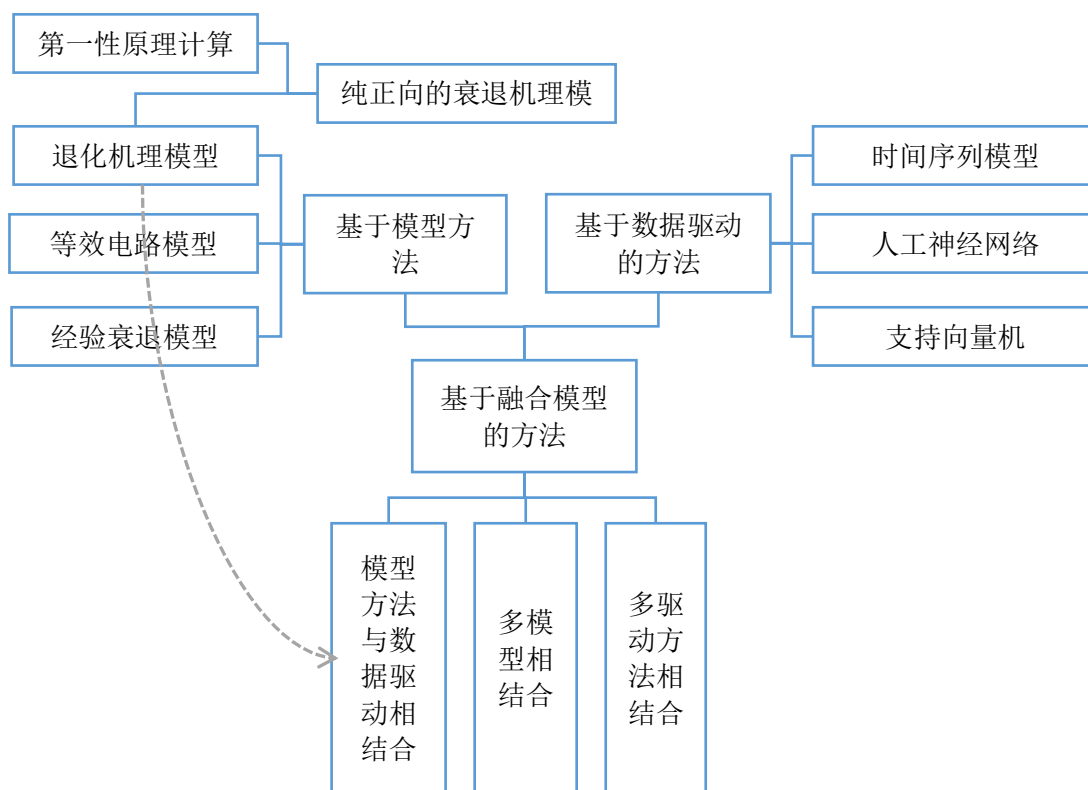


图 2.1 寿命预测研究方法

3 研究方案

3.1 研究方法

结合前文国内外研究现状分析，当前动力蓄电池寿命预测方法主要分为基于物理模型、基于数据驱动和基于融合模型三大类，各类方法均存在显著的优势与局限性。其中，基于模型的方法中，经验公式法虽具备建模简便、计算效率高的特点，但过度依赖大量试验数据进行拟合，缺乏对电池内部老化机理的深入挖掘，泛化能力较弱，难以适配不同使用工况、不同类型电芯的寿命预测需求，尤其在复杂实车工况下，预测精度易出现较大偏差。而电化学-热-力耦合寿命衰减机理法，作为基于物理模型方法中的核心技术路径，能够从电池内部电化学反应、热传导、力学应力变化等本质层面，深入挖掘电池寿命衰减的内在机制，明确各因素（温度、充放电倍率、SOC 范围等）对寿命衰减的影响路径，从根本上避免了对试验数据的过度依赖，具备更强的泛化能力，可适配不同类型、不同工况下的电池寿命预测场景。

相较于基于数据驱动的方法，电化学-热-力耦合机理法无需依赖海量的运行数据进行模型训练，规避了数据驱动方法“黑箱”特性带来的弊端，其预测结果具有明确的物理意义，能够清晰揭示电池寿命衰减的核心原因，为电池系统的结构优化、材料选型、热管理设计等提供更具针对性的指导，有效解决数据驱动方法预测结果难以解释、工况适应性差的问题。综合考量本研究的核心目标——构建精准、可推广的动力蓄电池系统寿命仿真预测模型，并为后续标准制定提供科学依据，本研究确定采用基于模型的方法中的电化学-热-力耦合寿命衰减机理法开展本次研究，通过构建多物理场耦合模型，实现对电池寿命衰减规律的精准模拟与预测，同时兼顾模型的实用性与可解释性，为行业提供标准化的仿真预测技术路径。

3.1.1 电化学-热耦合基准模型

电化学-热耦合基准模型是本次寿命仿真预测模型构建的基础，其核心思路是将电池内部的电化学反应过程与热传导过程进行双向耦合，精准模拟电池在不同工况下的电性能与热性能变化，为后续耦合老化机制、构建完整寿命预测模型奠定基础。本次研究选用 Newman 和 Doyle 开发的 P2D (Pseudo Two-Dimensional) 模型作为电化学模型的主要框架，该模型是目前锂离子电池电化学建模领域应用最广泛、最成熟的模型之一，由一系列偏微分方程和代数方程组成，能够精准描述锂离子在电池内部的传输、反应过程，其核心优势在于兼顾了模型精度与计算效率，既能够准确反映电池内部的电化学机理，又避免了三维模型过高的计算成本，适合用于工程级的寿命仿真预测。

搭建电化学模型主要包括以下核心方程组，分别从质量守恒、电荷守恒、电化学动力学三个维度，完整描述锂离子在电池内部的传输与反应过程，同时结合热模型，实现电化学与热性能的双向耦合。其中，电池工作过程中不可避免会产生热量，其热量来源主要是锂离子在正极与负极之间来回移动产生的电流效应，具体可分为可逆热和不可逆热两大类：可逆热主要受电池正负极材料的熵变影响，随充放电过程的进行呈现动态变化；不可逆热则主要包括极化热和欧姆热，其中极化热源于电池内部的极化效应，欧姆热则来自电池极化内阻与欧姆内阻的热损耗，两类热量共同影响电池的温度分布，进而反作用于电池内部的电化学反应速率，形成相互影响、

相互制约的双向耦合关系。因此，构建锂离子电池热模型，精准描述电池产热、传热过程，以及外界温度对反应动力学过程的影响，是实现电池寿命精准预测的关键前提。

(1) 液相扩散方程

锂离子在电池液相电解质中扩散过程称之为液相扩散，该过程直接影响锂离子在电极与隔膜之间的传输效率，进而影响电池的充放电性能和寿命衰减速率，其表达式如下所示：

$$\varepsilon_e \frac{\partial c_e}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 c_e}{\partial x^2} + a_s (1 - t_+) j_r \quad (3.1)$$

式中， ε_e 为电池液相的体积分数，反映电解质在电池多孔电极中的填充程度，其取值范围与电极的孔隙率相关，通常在 0.3~0.5 之间； ∂ 和 ∂x 分别为液相电解质中锂离子浓度随时间和沿 x 轴位置的变化， c_e 为液相中 Li^+ 的浓度； D_e 为液相扩散系数，反映锂离子在液相电解质中的扩散能力，其值受温度、电解质浓度等因素影响，通常随温度升高而增大； t_+ 为锂离子迁移数； j_r 为固相-液相交界面处的锂离子通量，反映锂离子在固液界面的转移速率，是连接电化学反应与锂离子传输的关键参数，其表达式如下：

$$j_r = \frac{j_f}{F} \quad (3.2)$$

j_f 为交换电流密度； F 为法拉第常数。

a_s 代表活性颗粒比表面积，与颗粒的半径 R_s 以及电极活性物质体积分数密切相关，活性颗粒半径越小、体积分数越高，比表面积越大，锂离子与活性物质的接触面积越大，电化学反应速率越快，其计算公式如下：

$$a_s = \frac{4\pi R_s^2}{4\pi R_s^3 / 3\varepsilon_s} = \frac{3\varepsilon_s}{R_s} \quad (3.3)$$

在电池的边界条件设定中，电极-集流体处的液相锂离子浓度梯度为 0，这是因为集流体为电子导体，不参与锂离子的传输与反应，锂离子在该界面处无扩散现象；电极-隔膜处的液相锂离子浓度梯度是连续的，确保锂离子能够顺利在电极与隔膜之

间传输，无浓度突变。基于上述边界条件，液相扩散的边界条件方程如下所示：

$$D_e \frac{\partial c_e}{\partial x} \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (3.4)$$

$$D_{e,n} \frac{\partial c_e}{\partial x} \Big|_{x=L_n^-} = D_{e,sep} \frac{\partial c_e}{\partial x} \Big|_{x=L_n^+} \quad (3.5)$$

$$D_{e,sep} \frac{\partial c_e}{\partial x} \Big|_{x=L_n+L_{sep}^-} = D_{e,p} \frac{\partial c_e}{\partial x} \Big|_{x=L_n+L_{sep}^+} \quad (3.6)$$

式中， x 为电极的厚度方向，下标 n 、 sep 、 p 分别代表负极、隔膜和正极， L_n 与 L_{sep} 分别为负极的厚度和隔膜的厚度， L 为负极、隔膜与正极厚度的和。

(2) 固相扩散方程

固相扩散方程描述锂离子在活性材料颗粒内部发生扩散的过程，锂离子在固体球形活性颗粒中扩散符合菲克第二定律，由于活性材料颗粒多为球形结构，本次研究采取球坐标系建立锂离子固相扩散方程，能够更精准地反映锂离子在颗粒内部的径向扩散规律，其表达式如下：

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \quad (3.7)$$

式中， c_s 为活性颗粒的固相锂离子浓度， r 为球形活性颗粒的半径方向， $\frac{\partial}{\partial t}$ 和 $\frac{\partial}{\partial r}$ 分别为固相锂离子浓度随时间和沿颗粒半径 r 位置的变化， D_s 为锂离子的固相扩散系数，反映锂离子在活性材料颗粒内部的扩散能力，其值受温度、嵌锂态等因素影响，嵌锂态越高、温度越高，固相扩散系数越大，锂离子扩散速率越快。

锂离子的固相扩散方程有两个核心边界条件：一是锂离子的浓度梯度在球形活性颗粒中心始终为 0，这是因为颗粒中心为对称点，锂离子在该点无扩散趋势；二是活性颗粒表面的锂离子浓度梯度与局部锂离子通量相关，直接影响固液界面的电化学反应速率。具体边界条件如下所示：

$$D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (3.8)$$

其中，表面固相锂离子浓度梯度与局部锂离子通量如下式所示：

$$D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big|_{r=R_s} = -j_r \quad (3.9)$$

(3) 液相欧姆定律

电池液相的电势分布采用修正的欧姆定律来描述，该定律考虑了锂离子在液相电解质中的迁移和扩散效应，能够精准反映液相电势随位置的变化规律，其公式如下所示：

$$\kappa^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} = \frac{2RT\kappa^{eff}}{F} (1-t_+) \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} - i_e \quad (3.10)$$

式中， ϕ_e 代表锂离子电池的液相电势， R 代表摩尔气体常数， T 代表温度， i_e 代表液相电流密度， κ_{eff} 代表液相有效电导率，计算公式如下：

$$\kappa^{eff} = \kappa \mathcal{E}_e^{Bruggeman} \quad (3.11)$$

其中， κ 代表液相电导率，**Bruggeman** 为修正系数，锂离子在多孔电极内迂曲传递，需采用 **Bruggman** 理论对电池传输参数进行修正。

液相电势的边界条件与液相扩散的边界条件相匹配：电极-集流体处的液相电势梯度为 0，因为集流体不参与液相离子传输，电势无变化；电极-隔膜处的电势梯度连续，确保液相电势在界面处无突变，保障锂离子的顺利传输。具体边界条件如下所示：

$$\frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (3.12)$$

$$-\kappa^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big|_{x=L_n^-} = -\kappa^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big|_{x=L_n^+} \quad (3.13)$$

$$-\kappa^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big|_{x=L_n+L_{sep}^-} = -\kappa^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big|_{x=L_n+L_{sep}^+} \quad (3.14)$$

(4) 固相欧姆定律

锂离子电池内部固相电势的分布遵循欧姆定律，固相主要包括活性材料、导电剂和集流体，是电子传输的主要通道，其电势分布直接影响电化学反应的驱动力，方程式如下：

$$\sigma^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} = -i_s \quad (3.15)$$

其中， ϕ_s 为固相电势， i_s 为固相电流密度， σ^{eff} 为固相有效电导率，固相有效电导率的计算公式如下：

$$\sigma^{eff} = \sigma \varepsilon_s^{Bruggeman} \quad (3.16)$$

式中， σ 为固相电导率， ε_s 为活性物质的固相体积分数。在电极-集流体处，电池的电流密度等于固相电势梯度乘有效电导率，在电极-隔膜处，固相电势梯度为 0，边界公式如下：

$$-\sigma^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\sigma^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big|_{x=L} = i \quad (3.17)$$

$$\sigma^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big|_{x=L_n} = \sigma^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big|_{x=L_n+L_{sep}} = 0 \quad (3.18)$$

其中， i 为电池充放电时电流密度，公式如下：

$$i = \frac{I}{A} \quad (3.19)$$

I 为电池外电流的大小， A 为电极有效面积。

(5) Butler-Volmer 动力学方程

Butler-Volmer 电化学反应方程是描述电池固液两相界面处电化学反应速率的核心方程，能够求解不同条件下的电化学反应电流密度，进而反映电池的充放电速率和老化进程，其方程表达式如下所示：

$$j_f = i_0 \left[\exp\left(\frac{a_a F}{RT} \eta\right) - \exp\left(\frac{-a_c F}{RT} \eta\right) \right] \quad (3.20)$$

$$i_0 = F k_i (c_e)^{\alpha_a} (c_{s,max} - c_{surf})^{\alpha_a} (c_{surf})^{\alpha_c} \quad (3.21)$$

式中， a_a 和 a_c 分别为正负极的电化学反应传递系数，大小为 0.5。 k_i 代表电池电化学反应速率常数， $c_{s,surf}$ 代表电极表面固相锂浓度， $c_{s,max}$ 为电极的最大理论可嵌入锂浓度。

η 为电池的表面过电势，计算方式如下：

$$\eta = \phi_s - \phi_e - IR_{film} - U_{Eq} \quad (3.22)$$

其中， U_{Eq} 为电池平衡电位，在模型中由活性颗粒表面锂离子浓度与理论最大锂

浓度的比值确定， R_{film} 为电池的膜阻。

锂离子电池正负集流体两侧固相电势的电压差为电池的端电压，即：

$$U_t = \phi_s|_{x=L} - \phi_s|_{x=0} \quad (3.23)$$

式中， U_t 为电池的端电压，与电池各个部分的过电位相关，其表达式为：

$$U_t = \phi_e|_{x=L} - \phi_e|_{x=0} + \eta|_{x=L} - \eta|_{x=0} + U_{Eq}|_{x=L} - U_{Eq}|_{x=0} + I\Delta R_{film} \quad (3.24)$$

其中， ΔR_{film} 为正负极 SEI 膜阻的差值，反映正负极 SEI 膜生长的差异对电池端电压的影响。通过 Butler-Volmer 动力学方程，可精准计算电池固液界面的电化学反应速率，为后续产热计算和老化模型耦合提供基础。

(6) 锂离子电池热模型

电池的总产热是电化学反应过程中各类热量的总和，直接影响电池的温度分布，而温度又反作用于电化学反应速率和老化进程，因此热模型的构建是实现电化学-热双向耦合的关键。电池总产热公式如下所示：

$$q_{batt} = q_r + q_{ohm} + q_p \quad (3.25)$$

q_r 为电池反应热， q_{ohm} 为电池的欧姆热， q_p 为电池的极化热， q_{batt} 为电池总产热功率，为三者的加和，单位是 W/m^3 。电池的反应热、极化热以及欧姆热分别可以由以下公式进行计算：

$$q_r = a_s j_f T \frac{dU}{dT} \quad (3.26)$$

$$q_p = a_s j_f \eta \quad (3.27)$$

$$q_{ohm} = -i_s \nabla \phi_s - i_e \nabla \phi_e \quad (3.28)$$

电池内部的导热过程采用傅里叶定律描述，反映热量在电池内部的传递规律，其公式如下所示：

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = q_{batt} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3.29)$$

其中， q_{batt} 为一维电化学模型中的总产热， ρ 为材料的密度， C_p 为电池的比热容， λ 为电池的导热系数。电池表面与空气接触，会发生热量交换，对流换热如下所示：

$$\lambda \nabla T = h(T_{amb} - T_{surf}) \quad (3.30)$$

h 为电池对流散热系数, T_{amb} 、 T_{surf} 分别为环境温度和电池表面温度。

图 2.2 是电化学-热耦合模型的原理示意图, 电化学-热耦合模型是一个双向耦合的模型, 电池工作过程中会产生热量, 主要包括电化学反应热、可逆热、焦耳热, 电化学模型产生的热量作为热源给到热模型的接口, 温度作为变量使用阿伦尼乌斯公式输入给电化学模型, 这样就使得电化学模型中的热依赖参数依据温度的输入得到动态的更新, 实现了电化学模型与热模型的双向耦合。在此, 通过相关研究, 提取 5 个与温度相关的参数, 分别是液相电导率 σ 、活度系数 $f_{\pm}$ 、液相扩散系数 D_e 、固相扩散系数 D_s 、开路电压 U 。其中与液相相关的三个传输性能参数液相电导率 σ 、活度系数 $f_{\pm}$ 、液相扩散系数 D_e 是浓度和温度的函数, 与固相相关的传输性能参数固相扩散系数 D_s 是温度和嵌锂态的函数, 开路电压 U 是温度、熵变和荷电状态的函数。

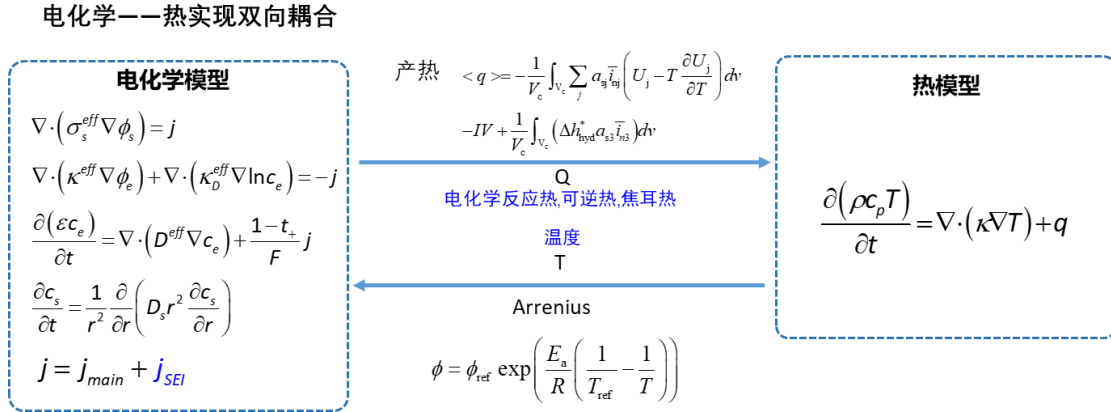


图 3.1 电化学-热耦合模型原理示意图

3.1.2 融合电化学-热耦合模型的一维寿命预测模型

锂离子电池作为新能源汽车、储能系统等领域的核心能量存储器件, 其使用寿命直接决定了整个系统的可靠性、安全性和经济性。然而, 在实际应用过程中, 电池所处的工况条件复杂多变, 不同应用场景下的温度、充放电速率、SOC (State of Charge, 荷电状态) 区间、搁置时间等关键参数存在显著差异, 导致电池的老化行为呈现出极强的工况依赖性。不同工况下电池的老化机制、老化速率以及容量衰减规律各不相同, 若要全面覆盖所有实际应用工况开展电池老化实验, 不仅需要耗费大量的时间、人力和物力成本, 还存在实验工况难以穷尽的问题, 因此, 构建精准、

通用的电池老化预测模型,成为实现不同工况下电池老化行为高效预测的核心途径。

锂离子电池的老化行为分析的核心价值在于,能够提前预判电池在全生命周期内的性能衰减规律,为电池的设计优化、使用策略制定以及退役回收提供科学依据,对锂离子电池的安全稳定应用和产业规模化发展具有重要的实际意义。本研究以电池的容量衰减作为衡量电池老化程度的核心指标,这是因为容量衰减是电池老化最直观、最易量化的表现形式,且与电池的实际可用寿命直接相关。研究将基于锂离子电池最核心的两种老化机制——SEI(Solid Electrolyte Interface, 固体电解质界面)膜生长和活性物质损失,采用实验测试、数据集分析与仿真模拟相结合的研究方法,系统研究电池在日历老化(即电池处于搁置状态下的老化)和循环老化(即电池处于充放电循环工作状态下的老化)两种典型场景下的老化行为,深入剖析两种老化机制各自对电池容量衰减的贡献及耦合作用规律,并通过构建融合两种老化机制的电化学-热耦合模型,为电池的设计优化、工况匹配及寿命延长提供理论指导和技术支撑。根据上述研究思路,本章节开展的具体研究内容如下:

(1) 以磷酸铁锂电池作为研究对象,基于经典的 P2D 建模理论与传热理论,搭建电化学模型与热模型。研究电化学模型与热模型的相互耦合机理,构建基准电化学-热耦合模型,对模型进行准确性验证与电池性能分析。

(2) 在基准电化学-热耦合模型的基础上,耦合 SEI 生长老化机制,构建耦合 SEI 生长的电化学-热耦合模型。SEI 膜生长是锂离子电池最基础、最主要的老化机制之一,其生长过程会直接导致电池容量衰减和内阻增加,因此需将其精准耦合至基准模型中。利用前期日历老化实验获取的容量衰减数据,对耦合 SEI 生长的电化学-热耦合模型进行准确性验证,通过调整模型中 SEI 生长相关的参数,使模型仿真得到的容量衰减曲线与实验数据保持一致,确保模型能够精准描述电池在不同搁置工况下的日历老化行为。同时,基于验证后的模型,深入研究温度、SOC 等工况参数对 SEI 生长速率的影响,揭示电池日历老化的衰减规律,明确 SEI 生长在日历老化过程中的主导作用。

(3) 结合活性物质损失老化机制,进一步完善模型,建立融合 SEI 生长与活性物质损失两种老化机制的电化学-热耦合模型。在循环老化过程中,电池内部除了发

生 SEI 膜生长外，锂离子的频繁嵌入与脱嵌会在电极活性颗粒内部产生机械应力，长期的应力累积会导致活性颗粒开裂、脱落，与导电剂、粘结剂分离，从而失去脱嵌锂的能力，造成活性物质损失，这也是导致电池循环老化的核心原因之一。因此，需在耦合 SEI 生长的模型基础上，添加活性物质损失老化机制，利用前期循环老化实验获取的容量衰减数据，对新构建的融合模型进行准确性验证，校准模型中与活性物质损失相关的参数，确保模型能够同时精准描述电池在循环工况下的老化行为。通过模型仿真与实验数据的对比分析，研究 SEI 生长与活性物质损失两种老化机制的耦合作用规律，明确两种机制在电池循环老化过程中的有效性。

3.1.2.1 SEI 生长老化模型的建立

锂离子电池从制造完成并投入使用开始，无论处于搁置状态（日历老化）还是充放电循环状态（循环老化），其内部都会持续发生老化过程，具体表现为电池容量逐渐衰减、内阻不断增加，而这一过程与 SEI 膜的持续生长密不可分。SEI 膜是锂离子电池首次充放电过程中，电解液（通常为碳酸酯类电解液）在负极石墨表面发生还原反应生成的一层钝化膜，其主要成分包括碳酸锂、烷基碳酸锂等，具有离子导电性但电子绝缘性，能够阻止电解液进一步分解，保护负极材料，但 SEI 膜的持续生长会消耗电解液中的锂离子和电解液本身，同时增加电池的界面阻抗，进而导致电池容量衰减和电性能下降。

SEI 膜的生长过程主要是电解液中的碳酸乙烯酯（EC）与锂离子（Li⁺）在负极表面发生还原反应，生成(CH₂OCO₂Li)₂，其化学反应方程式如式



该反应是一个持续进行的缓慢过程，其生长速率受到动力学因素和扩散因素的双重限制，SEI 生成老化副反应电流密度为：

$$j_{SEI} = -a_s F k_{0,SEI} c_{EC}^S \exp \left(-\frac{\alpha_{c,SEI} F}{RT} \left(\phi_s - \phi_e - \frac{j_{tot}}{a_s} R_{film} - U_{SEI} \right) \right) \quad (3.32)$$

$k_{0,SEI}$ 是 SEI 生长的动力学速率常数，其数值大小与温度密切相关，温度越高，动力学速率常数越大，SEI 生长速率越快； U_{SEI} 是 SEI 生长的平衡电势，一般设置为

0.4V, c_{EC}^s 为石墨表面的 EC 浓度, 是影响 SEI 生长速率的关键参数之一, 其浓度变化遵循质量守恒方程:

$$-D_{EC} \frac{c_{EC}^s - c_{EC}^0}{\delta_{film}} = -\frac{j_{SEI}}{a_s F} \quad (3.33)$$

D_{EC} 表示 EC 在固体电解质层的扩散系数, c_{EC}^0 表示过量 EC 的浓度, δ_{film} 是 SEI 膜的厚度, 随着 SEI 的持续生长, 其厚度会逐渐增加, 进而影响 EC 的扩散速率, 形成相互影响的循环关系。

除了 EC 的质量守恒, SEI 生长反应还遵循物质守恒规律 SEI 生长反应的物质守恒:

$$\frac{\partial c_{SEI}}{\partial t} = -\frac{j_{SEI}}{2F} \quad (3.34)$$

c_{SEI} 为 SEI 每单位体积的摩尔数, 反映了 SEI 膜的致密程度, 其数值越大, 说明 SEI 膜越致密, 对电池界面阻抗的影响越显著。。

为了简化模型计算, 本研究假设生成的 SEI 膜均匀分布在负极石墨球形颗粒的表面, 基于这一假设, SEI 膜的厚度可通过下式计算

$$\delta_{film} = \frac{1}{a_s} \left(\frac{c_{SEI} \cdot M_{SEI}}{\rho_{SEI}} \right) \quad (3.35)$$

M_{SEI} 为 SEI 的摩尔质量, ρ_{SEI} 为 SEI 的密度, 这两个参数均为 SEI 膜的固有物理参数, 可通过相关文献查阅或实验测试获取。SEI 膜的生长会直接导致电池界面阻抗增加, 其膜阻可由下式计算:

$$R_{film} = \omega_{SEI} \frac{\delta_{film}}{\kappa_{SEI}} \quad (3.36)$$

其中, κ_{SEI} 为 SEI 的电导率, 由于 SEI 膜具有电子绝缘性, 其电导率极低, 且随着膜厚的增加, 膜阻会显著增大, 进而导致电池内阻上升, 充放电效率下降。

SEI 膜在持续生长过程中, 会逐渐侵占电极结构的孔隙空间, 导致电极孔隙率下降, 而电极孔隙率的变化会影响锂离子在电极内部的扩散速率, 进而影响电池的

电化学性能和老化速率，电极孔隙率与 SEI 膜厚度的关系如下式：

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -a_s \frac{d\delta_{film}}{dt} \quad (3.37)$$

锂离子电池电化学模型的总电流密度 j_{tot} 是上述所有反应的电流密度之和，包含电池主反应和 SEI 生长老化副反应，如式所示。在基准电化学-热耦合模型基础上耦合 SEI 生长副反应，使模型能更加准确地去模拟电池实际状态。

$$j_{tot} = j_f + j_{SEI} \quad (3.38)$$

通过上述公式的描述，SEI 膜的持续生长会通过消耗锂离子和电解液、增加电池内阻、降低电极孔隙率等多种途径，导致电池容量减小、电性能下降；同时，温度作为关键影响因素，会通过影响 SEI 生长的动力学速率常数和 EC 扩散系数，显著影响 SEI 的生长速率，进而影响电池的容量衰减速率，这也是将电化学模型与热模型耦合的核心原因之一。

3.1.2.2 活性物质损失老化模型的建立

前文构建的耦合 SEI 生长的电化学-热耦合模型，能够高精度地预测不同工况下电池的日历老化情况，这是因为在日历搁置状态下，电池内部的老化过程主要由 SEI 膜生长主导，活性物质损失的影响相对较小。但在电池循环老化过程中，仅耦合 SEI 生长的模型其预测准确性尚未得到验证，这是因为循环工况下电池的老化机制更为复杂，除了 SEI 膜生长外，活性物质损失成为导致电池容量衰减的另一核心因素。在电池充放电循环过程中，锂离子会在正负极电极材料中频繁地嵌入和脱嵌，这一过程会导致电极活性颗粒发生体积变化，进而在颗粒内部诱发机械应力，长期的应力累积会导致活性颗粒结构疲劳、开裂，甚至脱落，与导电剂、粘结剂分离，最终失去脱嵌锂的能力，造成活性物质损失，SEI 生长与活性物质损失两种机制相互叠加，共同导致电池容量持续下降。

具体而言，锂离子电池在充放电过程中，锂离子在正负极上的嵌入与脱嵌均会使电池发生一定程度的可恢复鼓胀变形，即可逆形变，这是电池正常工作过程中的固有现象。其中，负极石墨材料为层状结构，在锂离子嵌入过程中，锂离子会插入

石墨层间，导致石墨颗粒发生体积膨胀，其最大膨胀率可达 10%，这种体积膨胀会使电池内部产生应力；而在锂离子脱嵌过程中，石墨颗粒体积收缩，应力会有所释放，但由于充放电循环的周期性，应力无法完全释放，会在电池内部逐渐累积。随着循环次数的增加，这种累积的应力会导致电极活性物质发生机械疲劳，进而引发电极开裂，活性颗粒与导电剂、粘结剂的接触面积减小甚至完全分离，导致活性颗粒无法参与锂离子的嵌入与脱嵌反应，最终造成活性物质损失，使电池的循环老化速率加快。

本研究采用基于物理机理的模型构建方法，在已耦合 SEI 生长老化机制的电化学-热耦合模型基础上，进一步添加活性物质损失老化机制，构建更为完善的老化预测模型。该模型能够精准计算锂离子传输过程中因浓度梯度差异而引起的机械应力，并量化该应力累积所造成的活性物质损伤程度。具体而言，模型首先基于颗粒层面的应力理论，计算石墨电极颗粒内部的径向应力和切向应力，这两种应力是导致活性颗粒开裂的主要原因。根据颗粒层面的应力模型，径向应力 σ_r 、切向应力 σ_t 分别如下：

$$\sigma_r = \frac{2\Omega E}{3(1-\nu)} \left(\frac{1}{R^3} \int_0^R c_s r^2 dr - \frac{1}{r^3} \int_0^r c_s \xi^2 d\xi \right) \quad (3.39)$$

$$\sigma_t = \frac{\Omega E}{3(1-\nu)} \left(\frac{2}{R^3} \int_0^R c_s r^2 dr + \frac{1}{r^3} \int_0^r c_s \xi^2 d\xi - c_s \right) \quad (3.40)$$

其中， Ω 是偏摩尔体积， E 是杨氏模量，石墨电极颗粒的杨氏模量随嵌锂态变化，单位是 GPa，对模型结果有直接的影响， ν 是泊松比， r 是颗粒的半径。

$$E = 11x + 7 \quad (3.41)$$

其中， x 为石墨电极的嵌锂态。

活性物质损失老化机制的瞬时反应方程：

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \beta \left(\frac{\sigma_h}{\sigma_c} \right)^m \quad \sigma_h > 0 \quad (3.42)$$

只有拉应力($\sigma_h > 0$)才会造成活性物质损失， β 和 m 是两个常数，可从实验中获

得。流体静应力 $\sigma_h = \frac{\sigma_r + 2\sigma_t}{3}$ ， σ_c 是临界应力。

由于活性物质损失会造成电极活性物质体积分数的减少，由公式：

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_{\text{LAM}} \quad (3.43)$$

其中 ε_0 为新电池的初始电极体积分数， $\Delta\varepsilon_{\text{LAM}}$ 是活性物质损失所造成的电极体积分数的变化量。

综上，通过上述公式和机理分析，可成功构建活性物质损失老化模型，将其与耦合 SEI 生长的电化学-热耦合模型相结合，即可得到融合 SEI 生长与活性物质损失两种老化机制的电化学-热耦合模型，也可称之为电化学-热-老化（包含 SEI 生长与活性物质损失两种老化机制）耦合模型。该模型的核心特点是能够同时考虑日历老化和循环老化两种场景，精准预测电池在搁置状态下由 SEI 生长主导的老化衰减，以及在循环工作状态下由 SEI 生长与活性物质损失共同主导的老化衰减，为电池全生命周期的寿命预测提供了可靠的模型支撑。

3.2 研究对象

本研究的研究对象限定为动力蓄电池单体电芯，摒弃多层级研究的冗余性，聚焦电芯本身的性能演化与寿命衰减规律，采用针对性的试验与建模思路开展研究工作，确保研究内容的聚焦性和专业性。以单体电芯作为整个研究的核心对象，选取与实际车用场景匹配的动力蓄电池单体，通过一系列精准的试验测试手段及逆向便是技术，系统获取电芯的核心参数，包括电化学参数（如开路电压、充放电内阻、反应动力学参数、容量衰减速率等）、热学参数（如比热容、热导率、产热速率等），基于上述多维度参数，构建能够精准描述单体电芯在复杂工况下性能演化的电化学-热-力耦合寿命衰减模型，明确单体电芯寿命衰减与各参数之间的内在关联机制，为后续电芯优化设计和健康管理提供基础支撑。

3.3 研究目标

本研究围绕动力蓄电池系统寿命仿真预测展开，结合研究对象的全层级特性，设定以下三个核心研究目标，确保研究工作具有明确的导向性和可落地性：

(1) 构建基于电化学-热-力耦合机理的动力蓄电池单体电芯寿命仿真预测模型，系统揭示电芯在不同工况下的寿命衰减机理。通过整合电芯的多维度参数与耦合机制，突破传统单一机理模型的局限性，实现对电芯电化学反应、热量传递、力学应力三者之间相互作用的精准刻画，明确不同工况（如高低温环境、不同充放电倍率）下，电芯内部各组件的性能演化规律，阐明寿命衰减的核心驱动因素（如 SEI 膜生长、锂枝晶析出、极片脱落等），为后续电芯模型优化和寿命提升提供理论依据。

(2) 实验室环境下验证。验证模型在不同温度、充放电倍率、SOC 范围等关键影响因素下的预测精度。通过设计多组对比试验，模拟不同使用场景下的关键影响因素，包括不同环境温度（如-20℃~60℃的极端温度及常温环境）、不同充放电倍率（如 0.2C~3C 的常规及快充倍率）、不同 SOC 运行范围（如 20%~80%的常规使用范围及满充满放极端范围），将试验测得的电芯寿命衰减数据与模型仿真结果进行对比分析，计算预测误差，优化模型参数，确保模型的预测精度满足工程应用需求，能够准确反映实际使用过程中电芯的寿命变化规律。

(3) 工程转化及验证。聚焦模型的工程化落地应用，通过多渠道收集不同车企的动力蓄电池单体电芯实际寿命数据，涵盖不同车企的主流车型适配电芯（如三元锂、磷酸铁锂等不同体系电芯）、不同生产批次电芯、不同地域使用场景下的电芯寿命数据，包括电芯实际服役年限、容量衰减速率、故障发生率、充放电循环次数等核心信息，建立多车企、多场景的电芯寿命数据库。开展工程化验证试验，将模型预测的电芯寿命数据与车企实际服役的电芯寿命数据进行对比，优化模型的工程化适配参数，解决模型从实验室到实际工程应用中的偏差问题，验证模型工程化应用的可行性和实用性。

4 实施过程

4.1 电芯预测模型实验室级验证

4.1.1 基于已有的磷酸铁锂电池开展电化学-热模型建模及验证

图 4.1 所示，电压对标方面：模型（灰色实线）与试验（蓝色虚线）的电压曲线在 3 次完整充放电循环中高度重合，从初始充电、高倍率充电峰值、放电平台、倍

率切换的电压阶跃，到放电末期的电压变化，所有关键特征点的数值与趋势均实现精准复现，无系统性偏差。在充放电倍率切换、充电截止/放电截止等电压突变工况下，模型能精准捕捉电压的瞬态变化，包括充电峰值的超调幅度、放电平台的斜率、倍率切换后的电压恢复特性，证明模型对电池动态电化学过程的刻画能力极强。3 次连续循环中，模型对电压平台、峰值、衰减趋势的预测均保持稳定，无累计误差，验证了模型在长周期、多循环工况下的鲁棒性与可靠性。覆盖了从低倍率到高倍率的全范围工况，模型在不同倍率下的电压预测精度无明显衰减，说明模型对不同电流密度下的极化、欧姆损失、浓差极化等电化学过程的参数化准确，适配磷酸铁锂电池的倍率特性。

温度对标方面：模型（灰色实线）与试验（绿色虚线）的温度曲线完全同步，从初始常温、充放电过程的温升、高倍率工况下的温度峰值，到循环间的温度累积，所有关键特征均高度一致，证明热耦合模型的产热、散热计算精度极高。温度曲线的波动与充放电工况完全对应，高倍率充放电阶段温度显著上升，静置 / 低倍率阶段温度回落，模型精准复现了这一规律，说明模型对电池焦耳热、极化热、反应热等各类产热项的计算符合实际物理过程。在高倍率充放电的温度峰值点，模型与试验的温度数值误差极小，且峰值出现的时间点完全同步，验证了模型对电池极限工况下热行为的预测能力。随着循环次数增加，电池的基础温度逐步升高，模型精准复现了这一热累积效应，说明模型对电池与环境的换热、热传导等散热过程的参数化准确，可用于长周期热管理仿真。

综上，电压与温度双物理场的同步高精度匹配，证明模型实现了电化学过程与热行为的双向耦合，而非单一物理场的独立拟合，可真实反映电池内部电-热相互作用的物理本质。在连续变倍率、多循环的复杂工况下，模型无明显精度衰减，可覆盖磷酸铁锂电池常温下的常规使用场景，具备应用于后期电池寿命衰减预测。

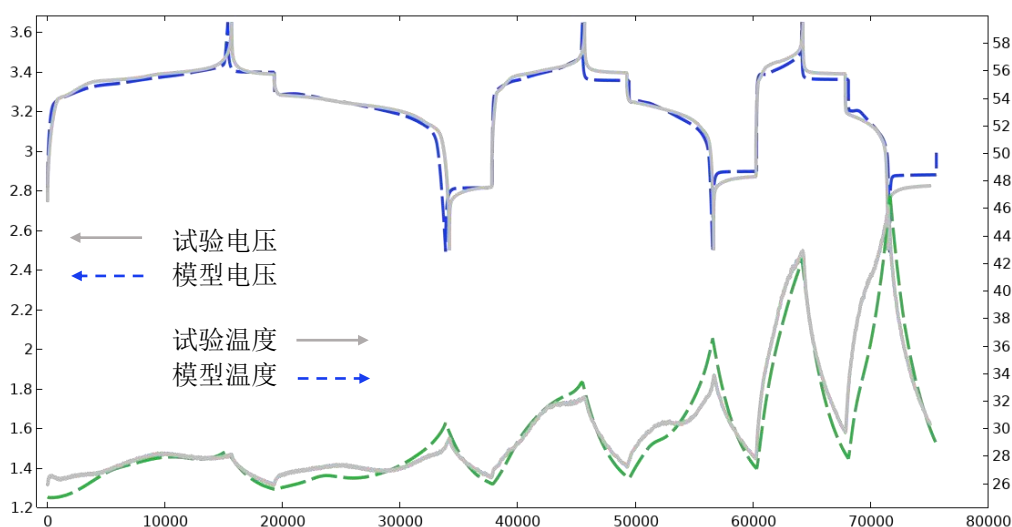


图 4.1 常温不同倍率下的电化学-热耦合模型与试验对标

4.1.2 基于已有的磷酸铁锂电池开展电化学-热模型+寿命衰减模型建模及验证

图 4.2 和图 4.3 分别对应 25℃、100%SOC 和 45℃、100%SOC 两种典型高温高荷电状态下的日历寿命（容量保持率随静置天数衰减）对比，结果表明：日历寿命衰减的整体趋势预测高度准确，仿真曲线与试验数据的衰减规律完全一致：均呈现初期快速衰减、后期缓慢衰减的非线性特征，匹配磷酸铁锂电池日历老化的典型动力学规律（SEI 膜生长、副反应主导的容量衰减机制）。45℃下的容量衰减速率显著高于 25℃，模型精准复现了温度对日历老化的加速效应，符合 Arrhenius 定律描述的副反应速率随温度升高的规律，证明模型对温度依赖的老化机理（如 SEI 膜生长速率、电解液分解速率）的建模准确。

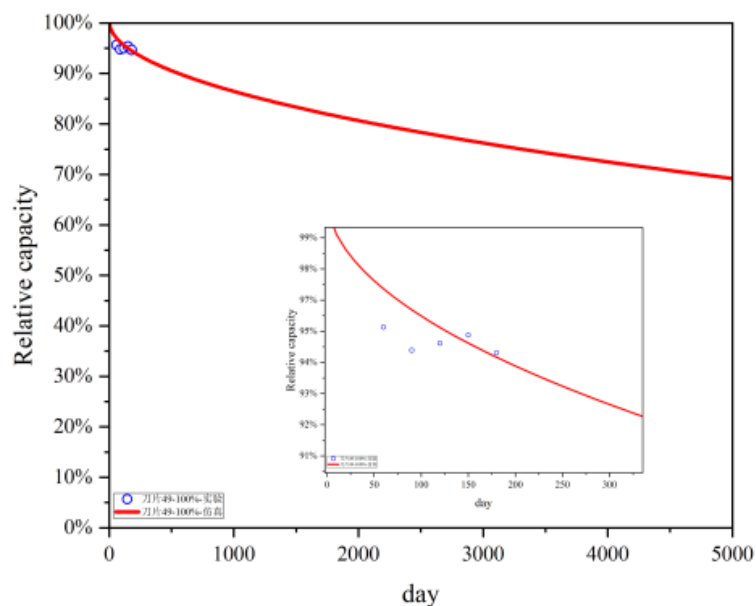


图 4.2 25°C 100%SOC 日历寿命仿真试验对比

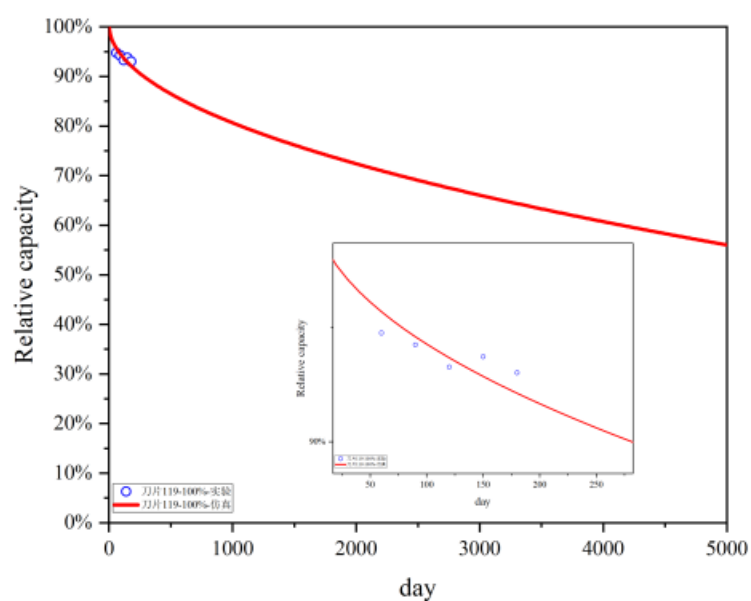


图 4.3 45°C 100%SOC 日历寿命仿真试验对比

图 4.4 为循环寿命（容量保持率随充放电循环次数衰减）的仿真-试验对比，结果表明：从初始 100%容量，到循环初期的快速衰减、中期的线性缓慢衰减，再到 4000 次循环后的 82%左右容量保持率，前期仿真曲线与试验点几乎完全重合，无任

何系统性偏差。整个循环过程中，仿真与试验的容量保持率误差始终控制在极小范围，验证了模型对循环老化全生命周期的精准预测能力。模型精准复现了磷酸铁锂电池循环老化的典型特征：初期 SEI 膜生长导致的快速容量损失，中期活性锂损耗、电极结构退化导致的线性缓慢衰减，证明模型对循环老化的核心机理（SEI 生长、活性物质损失、锂损耗）的建模符合物理本质，而非纯数据拟合。模型对循环过程中容量衰减的斜率、拐点等关键特征的预测完全准确，说明模型对循环应力（充放电倍率、极化、热效应等）与老化速率的关联建模精准。

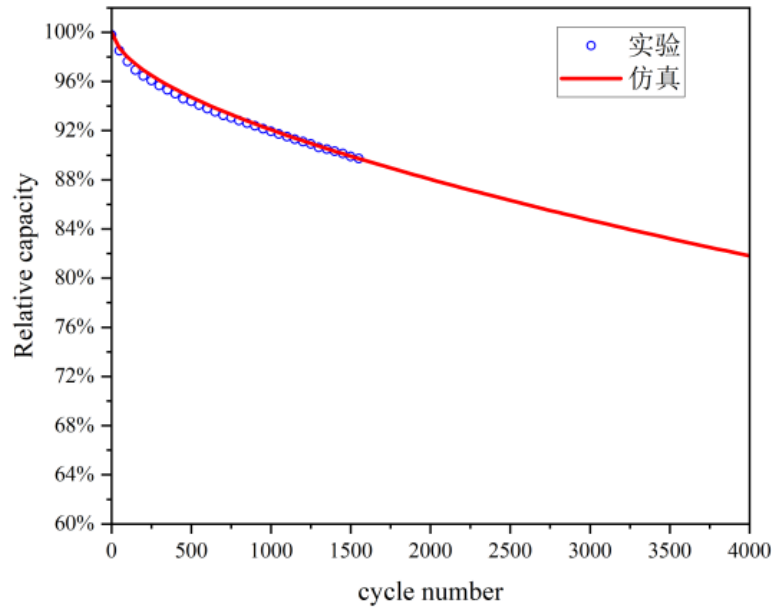


图 4.4 循环寿命仿真与试验对比

综上，实验室环境下，双老化模式同时实现了日历老化（存储工况）和循环老化（充放电工况）两大核心老化模式的高精度仿真，覆盖了动力电池全生命周期的所有老化场景，证明模型是一套完整、可靠的电池寿命预测工具。两种老化模式下的仿真精度均达到极高水平，验证了模型对不同老化机理（日历老化：副反应、SEI 生长；循环老化：锂损耗、结构退化）的统一建模能力。模型在不同温度（25℃/45℃）、不同工况（存储/循环）、不同时间尺度（短期/长期）下均保持高精度，说明模型参数具备明确的物理意义，而非针对单一工况的拟合，具备极强的泛化能力和外推性。

4.2 电芯预测模型工程级应用验证

前述基于实验室标准工况的日历寿命、循环寿命及电化学 - 热耦合多物理场仿真与试验对比, 已充分验证了所建立的磷酸铁锂电池全生命周期老化模型在理想环境下的预测精度、机理刻画能力与鲁棒性, 为模型的物理可靠性奠定了坚实基础。为进一步推动该模型从实验室研究走向工程实际应用, 需突破标准工况的局限, 在真实车用的复杂边界条件下开展工程级验证: 即面向整车运行等实际工况, 在变温、变倍率、动态充放电、非满充存储等复杂应力耦合环境中, 检验模型对电池实际老化行为、容量衰减规律与热安全特性的预测准确性, 从而验证模型在工程场景下的泛化能力、适配性与实用价值。

4.2.1 当前市场电池寿命情况分析

本次工程级验证共收集 4 家参与单位的磷酸铁锂电池日历搁置寿命试验数据, 经数据有效性校验后, 最终纳入 3 组有效样本开展对比分析, 结果如图 4.5 所示。

从整体规律来看, 在相同磷酸铁锂材料体系、相同 100% SOC 日历搁置工况下, 不同单位提供的电池样品容量保持率存在显著差异, 且容量衰减的动态趋势呈现明显分化特征, 体现了实际工程应用中电池产品性能的批次性、工艺差异性与环境适应性差异。

1#电池在常温 (25℃) 与高温 (45℃) 两种搁置工况下, 均展现出最优的容量保持能力与最缓慢的衰减速率: 常温 25℃ 工况下, 整个 360 天试验周期内, 其容量保持率始终稳定在 98.8% 以上, 衰减幅度极小, 长期存储稳定性极佳; 高温 45℃ 工况下, 容量衰减速率同样显著低于 2#、3# 样品, 且在 100 天搁置后, 容量衰减进入明显的放缓阶段, 呈现 “初期小幅衰减、后期趋于稳定” 的理想日历老化特征, 说明该批次电池的 SEI 膜成膜质量优异、界面副反应得到有效抑制, 在高荷电、高温存储场景下的长期可靠性与抗老化能力突出。

2# 与 3# 电池的容量衰减规律呈现出明显的温度依赖性差异。常温 25℃ 工况: 两者的容量保持率曲线高度重合, 衰减速率与衰减幅度基本一致, 在 360 天试验周期内, 容量保持率从初始约 97.7% 逐步衰减至 94.9% 左右, 说明在常温常规存储环境

下，两款电池的日历老化性能处于同一水平；高温 45℃ 工况：两者的衰减差异随搁置时间持续扩大：3#电池的容量衰减速率显著快于 2#，在 150 天左右的试验周期内，容量保持率已从初始约 96.7%快速衰减至 93.3%，而 2#电池同期容量保持率约为 94.1%，且 3#电池全程无明显衰减放缓趋势，高温存储稳定性远弱于 2#，充分体现了不同电池产品在高温高荷电极端存储工况下的抗老化性能差距，其核心源于电芯材料配方、工艺制程、SEI 膜稳定性等方面的差异。

本次多单位、多工况的对比分析，完整呈现了相同体系磷酸铁锂电池在实际工程应用中的性能离散性：温度对日历寿命的加速效应在所有样品中均得到验证，高温 45℃ 下的容量衰减速率显著高于常温 25℃，符合电池老化的 Arrhenius 规律；不同批次电池的抗老化性能存在显著层级差异，1#电池在全工况下的优异表现，为行业内高可靠性磷酸铁锂电池的工艺优化与性能提升提供了标杆；2#与 3#电池在常温工况下性能趋同、高温工况下性能分化的特征，也为电池产品的工程选型、存储策略制定与寿命评估提供了实测依据，验证了所建立的寿命模型在工程场景下对不同批次电池性能差异的适配性与预测价值，为后续模型的工程化落地与全生命周期管理提供了数据支撑。

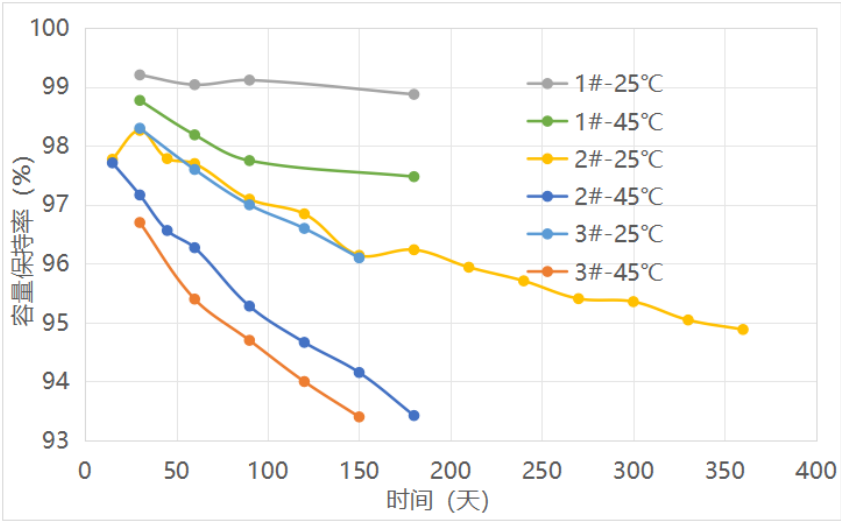


图 4.5 磷酸铁锂电池常温高温日历储存寿命

图 4.6 为不同批次磷酸铁锂电池在常温（25℃）与高温（45℃）工况下的循环

容量保持率衰减曲线，横轴为循环周数，纵轴为容量保持率，反映了不同电池在不同温度环境下的循环老化特性与性能差异。1#电池在两种温度工况下呈现出差异化的循环衰减规律：常温 25℃ 工况下，容量保持率随循环周数呈现稳定、近似线性的缓慢衰减趋势，无明显的加速衰减阶段。在近 2000 周的长循环周期内，电池容量从初始 100% 逐步衰减至约 89.5%，全程衰减速率均匀、波动极小，体现出优异的常温循环稳定性与长寿命特性，说明该批次电池在常规车用工况下具备出色的抗循环老化能力，SEI 膜结构稳定、电极副反应得到有效抑制。高温 45℃ 工况下，电池呈现“初期快速衰减、后期逐步放缓”的典型非线性衰减特征。循环初期（0~500 周）容量衰减速率显著高于常温工况，随后衰减速率持续降低，进入缓慢衰减阶段，最终在 1000 周左右容量保持率约为 89%。该规律符合磷酸铁锂电池高温循环老化的物理本质：高温加速了 SEI 膜的初始生长与界面副反应，导致初期容量快速损失；随着 SEI 膜逐渐致密稳定，副反应速率下降，衰减速率随之放缓，验证了电池在高温工况下的长期老化演化规律。然而，2#电池的循环衰减规律与 1# 电池形成鲜明对比，温度对其老化行为的影响更为显著：常温 25℃ 工况下，容量衰减趋势与 1# 电池的高温工况高度相似，呈现初期快速衰减、后期逐步趋缓的非线性特征，全程衰减速率显著快于 1# 电池的常温工况。在 1000 周循环后，容量保持率约为 90.8%，说明该批次电池在常温下的循环抗老化能力弱于 1# 电池，初始界面稳定性与 SEI 膜成膜质量存在差距。高温 45℃ 工况下，电池呈现持续加速的衰减趋势，无明显的衰减放缓阶段，衰减速率最快、老化最严重。随着循环周数增加，容量衰减斜率持续增大，在 1000 周循环后容量保持率已降至约 85.5%，远低于同工况下的 1# 电池。该现象表明，高温环境对 2# 电池的老化加速效应呈指数级放大，电池内部副反应、活性物质损耗、结构退化等老化机制随循环持续加剧，高温循环可靠性与长期稳定性存在明显短板。

综上，不同批次电池的循环性能存在显著层级差异：1# 电池在全工况下的循环寿命与稳定性均显著优于 2# 电池，尤其在高温工况下的衰减控制能力差距明显，体现了电芯材料配方、工艺制程、界面设计等核心技术对电池循环寿命的决定性影响。不同批次电池在循环寿命衰减规律上的显著差异，为电池的工程化规模化应用带来

了全新挑战与潜在风险：1#电池常温下的线性缓慢衰减特性，虽适配长周期储能电站等稳定工况，但 2#电池在高温环境下的持续加速衰减行为，直接暴露了同体系电芯在极端工况下的性能离散性与可靠性短板。

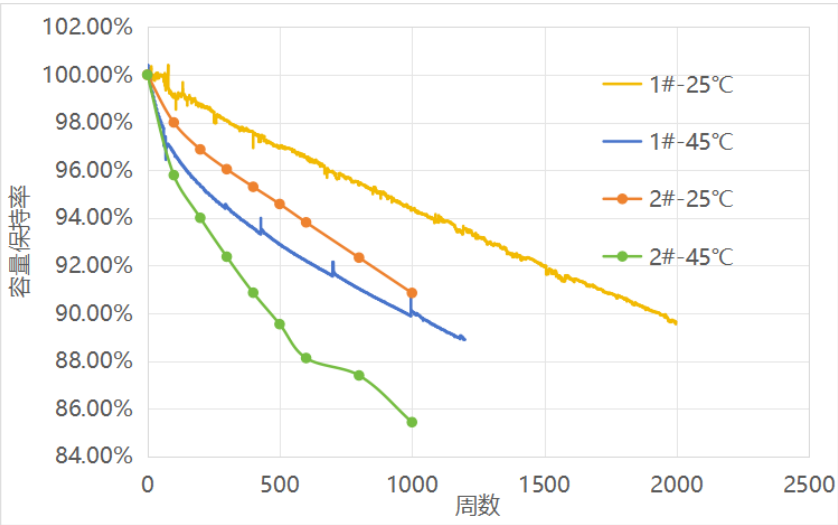


图 4.6 磷酸铁锂电池常温高温循环寿命

图 4.7 为 1# 三元电池在 25°C 常温与 45°C 高温、100% SOC 工况下的日历搁置容量保持率衰减曲线，横轴为搁置时间（天），纵轴为容量保持率，呈现了三元体系电池在存储工况下的老化特性。常温 25°C 工况下，整个 180 天试验周期内，容量保持率始终维持在 98.8% 以上，衰减幅度极小，仅从初始 100% 缓慢降至约 98.9%，衰减速率极低、曲线平缓，无明显的快速衰减阶段。其常温存储性能显著优于同工况下的 2#、3# 磷酸铁锂电池（180 天容量保持率约 94.9%），与性能最优的 1# 磷酸铁锂电池（180 天容量保持率约 98.8%）基本持平，说明该批次三元电池在常温高荷电存储场景下，界面副反应得到有效抑制，SEI 膜稳定性优异，具备与高端磷酸铁锂电池相当的常温日历寿命水平。高温 45°C 工况下，三元电池在高温搁置工况下的老化行为呈现出显著的温度敏感性，与常温工况形成鲜明对比，容量衰减速率随搁置时间持续加快，呈现明显的非线性加速衰减特征：从初始 100% 快速衰减，30 天左右容量保持率已降至 98.7%，180 天试验结束时容量保持率仅约 96.2%，全程无明显衰减放缓趋势。其高温存储性能显著劣于同工况下的 1# 磷酸铁锂电池（180 天容

量保持率约 97.5%)，充分体现了三元体系电池在高温高荷电存储场景下的固有短板：高温环境会大幅加速三元材料的界面副反应、电解液分解与过渡金属溶解，导致 SEI 膜持续生长、活性锂不可逆损耗，最终造成容量快速衰减。

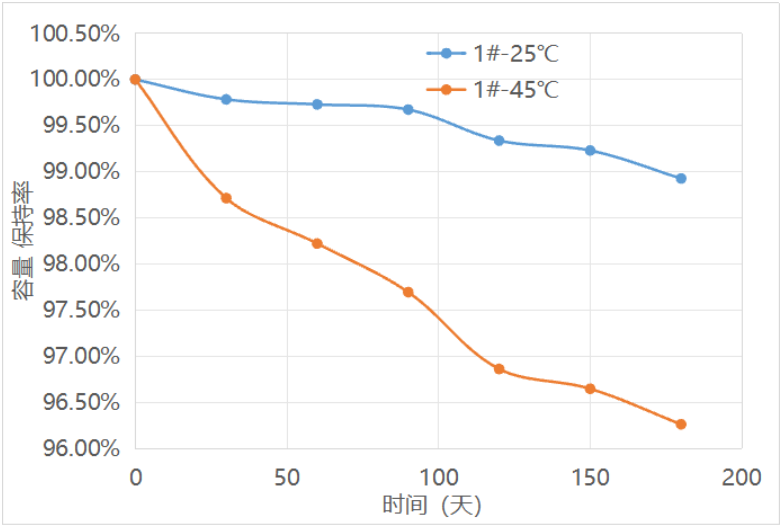


图 4.7 三元电池常温高温日历储存寿命

如图 4.8 所示，三元高温常倍率循环测试呈线性衰减趋势，快充循环测试容量保持率仍先缓慢下降再加速下降的趋势。

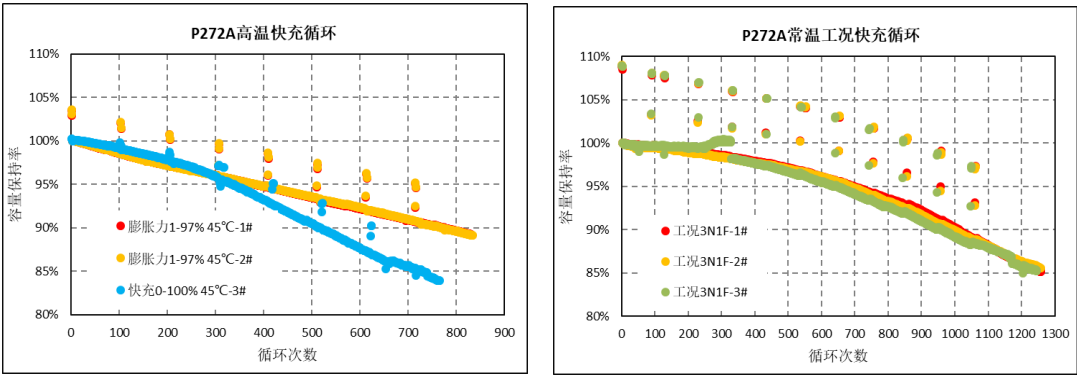


图 4.8 三元电池常温高温循环寿命

4.2.2 电化学-热-寿命衰减机理模型应用

当前磷酸铁锂电池在动力电池、储能电站等领域已实现大规模产业化应用，积

累了海量的日历存储与循环充放电寿命试验数据，为开展电化学-热-寿命耦合模型的适配性与通用性研究提供了坚实的数据基础。本研究在已建立的磷酸铁锂电池电化学-热-寿命衰减机理模型框架下，以多工况、多批次实测寿命数据为基准，通过关键电化学参数（如 SEI 膜生长速率、交换电流密度、扩散系数等）的精细化微调，开展模型的通用性验证与适配性优化，结果分别如图 4.9（日历储存寿命）、图 4.10（循环寿命）所示。

经过模型精调，模型精准复现了磷酸铁锂电池日历老化的核心规律，即容量保持率随存储时间呈非线性衰减，且衰减速率受温度、SOC 的显著调控：高温、高 SOC 工况下的衰减速率远高于常温、低 SOC 工况，完全匹配试验数据的演化趋势。在常温 25℃、高温 45℃，以及 30% SOC、100% SOC 多维度存储工况下，仿真曲线与试验数据的衰减路径高度重合。

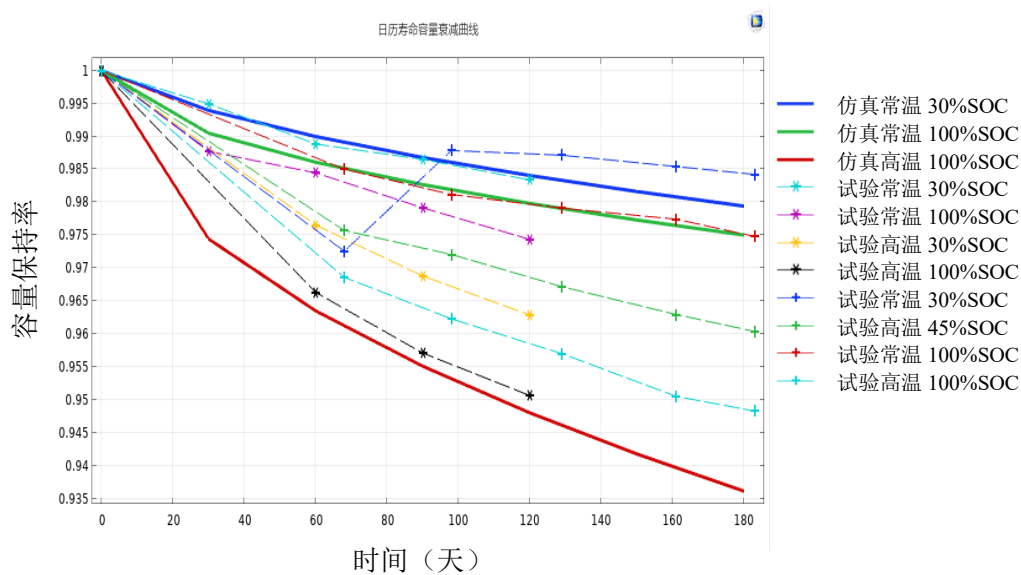


图 4.9 磷酸铁锂电池日历储存寿命模型适配性

与日历寿命的优异适配性形成鲜明对比，循环寿命场景下模型与试验数据的匹配度存在显著差异。尽管模型定性复现了“高温循环衰减速率显著高于常温循环”的基本规律，但在定量层面，仿真曲线与试验数据的衰减路径、衰减速率存在明显偏离：部分试验组的容量衰减呈现出非线性加速特征，而模型预测的衰减趋势相对

平缓，无法完全复现实际循环过程中因锂沉积、电极结构退化、SEI 膜反复破裂重构等复杂副反应导致的加速老化行为。在常温、高温等不同循环工况下，模型的预测偏差呈现出明显的工况依赖性，尤其在长循环周期、高倍率应力下，仿真与试验的差异持续扩大，说明当前模型对循环老化中多应力耦合（电流、温度、极化）的复杂老化机理刻画仍存在不足，参数微调无法完全覆盖实际电芯在循环过程中的动态演化与批次差异性。循环寿命试验数据的离散性、电芯批次间的工艺差异、实际循环中动态工况的耦合效应，以及模型对锂枝晶生长、结构疲劳等不可逆损伤的简化假设，是导致模型与试验偏差的核心原因，也凸显了循环寿命建模相较于日历寿命建模的更高复杂度。

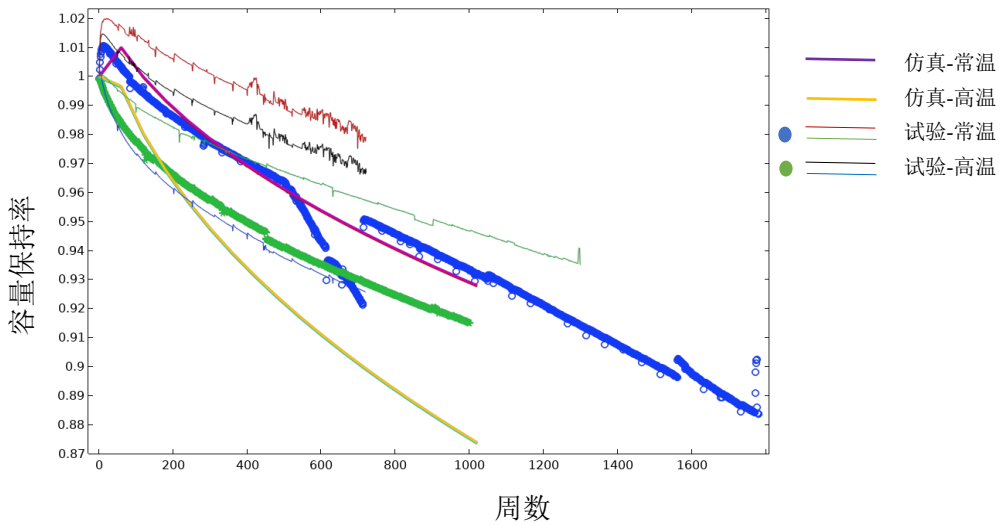


图 4.10 磷酸铁锂电池常温高温循环寿命模型适配性

5 结论

本研究紧密围绕电动汽车用动力蓄电池系统全生命周期寿命仿真预测这一核心工程需求，针对当前磷酸铁锂、三元等主流体系电池在实际运行中面临的寿命衰减机理模糊、模型精度不足、工程适配性差等关键痛点，采用电化学-热-力多物理场耦合寿命衰减机理法，构建了电芯的寿命仿真预测模型。通过实验室可控工况下的电池试验验证、工程场景数据对标以及模型参数校准，系统探究了电池在日历存储、循环充放电下的寿命演化规律，并进一步明确了模型的适用边界与技术瓶颈。基于试验数据与仿真分析的双重支撑，本研究得出以下核心结论与工程启示。

5.1 耦合机理法对电池寿命衰减的本质表征与工况适配性分析

本研究将电化学过程、热演化行为与机械力学效应进行深度耦合，构建了磷酸铁锂电池寿命衰减机理模型。该模型在揭示电池内部物理化学本质、预测特定工况寿命衰减方面展现出明确的理论合理性与一定的工程应用价值，但在不同工况、不同体系下的适用性存在显著差异。

在日历存储（静置）工况下，所构建的电化学-热-力耦合机理模型表现出较好的预测精度与工程实用性。通过对不同温度、不同 SOC 状态下磷酸铁锂电池长周期日历老化试验的对比分析可以看出，模型仿真曲线与试验数据在衰减趋势、变化规律上高度一致，数值偏差整体可控。模型能够成功复现电池日历老化“初期快速衰减、后期逐渐趋缓”的非线性特征，准确反映 SEI 膜初始生长、电解液副反应、活性锂缓慢损耗等主导机制，与电池存储老化的物理机理基本一致。同时，模型能够合理体现温度与 SOC 对老化速率的调控作用，高温、高 SOC 工况下的加速衰减趋势与试验结果吻合度较高。基于上述精度表现，该模型可在一定程度上用于动力电池寿命评估、电池存储策略优化等场景，为电池闲置、存储、周转管理提供一定的科学依据，减少部分长周期、高成本的试验依赖。

但在循环充放电工况下，模型的预测能力明显不足，与试验数据差异较大，通用性短板突出。尽管模型能够定性复现“高温循环衰减快于常温循环”的基本规律，但在定量层面，仿真与试验的衰减路径、衰减速率、拐点特征均存在明显偏差。试验中电池往往表现出明显的非线性加速衰减特征，尤其在长循环后期，容量衰减斜率显著增大，而机理模型通常呈现相对平缓的衰减趋势，难以复现实际循环中锂沉积、电极结构劣化、SEI 膜反复破裂与重构等复杂动态过程。同时，当前模型高度依赖参数微调才能适配特定电池，对不同厂家、不同批次、不同材料体系电池的泛化能力较弱，即使在相同磷酸铁锂体系内，模型也难以同时适配多组试验数据，更无法实现跨体系、多场景的统一预测。这表明现有机理模型在循环老化多应力耦合、动态工况响应、电芯工艺差异表征等方面仍存在明显局限，距离工程化通用模型仍有较大差距。

5.2 电芯一致性差异显著影响电池系统寿命衰减与同步性

电池系统寿命并非单电芯寿命的简单等效，电芯一致性是决定系统整体寿命、衰减同步性及可靠性的关键因素。本研究通过多批次、多工况老化试验与系统仿真分析证实，即使是同批次、同规格的动力电芯，其初始容量、内阻、离子扩散速率、界面特性等参数仍存在不可避免的离散性。这些微小差异在短期使用中影响有限，但在长期循环、高温搁置、变倍率充放电等实际工况下会被持续放大，最终导致模组内部电芯衰减不同步、性能分化明显。

衰减不同步会直接引发系统层面的连锁问题：部分电芯提前进入快速衰减阶段，内阻上升、发热加剧，进而形成“内阻升高-温度上升-衰减更快”的正反馈循环，使整箱电池的可用容量提前受限，系统寿命显著低于最优电芯的单体寿命。同时，一致性劣化还会加剧系统内部的电流不均、温度不均，进一步影响热管理效率与 BMS 均衡控制效果，提升热失控与早期失效风险。因此，在电池系统设计、集成、分选及寿命预测过程中，必须将电芯一致性作为核心输入条件，单纯依靠单体寿命模型直接外推系统寿命会带来明显偏差。该结论也对电芯制造、出厂分选、模组配组提出了更高要求，仅依靠初始容量与内阻分选已不足以保证长期一致性，需进一步引入老化敏感性、衰减稳定性等指标，从源头提升系统寿命可靠性。

5.3 实验室环境验证与工程环境验证的差异性分析

本研究通过实验室环境与工程实际环境的双重验证对比，明确了两者在试验条件、验证目标、数据特性及模型适配要求上的显著差异，这也是导致机理模型在实验室工况下精度较好、在工程场景下实用性不足的核心原因之一，具体差异主要体现在以下四个方面。

第一，试验工况的可控性与复杂性差异。实验室环境验证采用标准化、可控化的理想工况，通过严格控制温度、充放电倍率、SOC 范围、静置时间等参数，排除外界干扰因素，聚焦单一变量或有限变量对电池寿命的影响，如本研究中 25°C、45°C 恒定温度下的恒倍率充放电、固定 SOC 静置等工况。这种可控性能够精准捕捉单一因素的作用规律，便于模型机理的验证与参数校准，因此模型在实验室工况下能够

实现较高的预测精度。而工程环境验证面临的是动态化、复杂化的真实工况，电动汽车运行过程中，温度受环境气候、行驶工况、热管理系统动态响应影响而剧烈波动，充放电倍率随驾驶习惯、路况变化而随机变化，同时叠加路面振动、太阳辐射、电网波动等多重干扰因素，多应力耦合作用显著，与实验室理想工况存在本质区别，导致基于实验室数据校准的模型难以适配工程场景的动态变化。

第二，验证目标与核心需求的差异。实验室环境验证的核心目标是验证模型的机理合理性与单一工况下的预测精度，重点关注电池内部物理化学过程的复现，旨在明确衰减机理与影响因素的量化关系，为模型构建与优化提供理论支撑。因此，实验室验证更侧重“机理保真度”，无需考虑工程应用中的实用性、经济性与复杂性。而工程环境验证的核心目标是验证模型的工程实用性、泛化能力与可靠性，重点关注模型能否准确预测电池在真实使用场景下的全生命周期演化，能否支撑电池系统设计、运维优化、质保评估等工程需求，更侧重“实际适配性”，要求模型能够应对多批次、多体系、多工况的复杂场景，同时兼顾计算效率与可移植性。

第三，试验样本与数据特性的差异。实验室环境验证通常采用单一批次、规格统一、一致性较好的电芯样本，试验数据的离散性较小，能够有效减少干扰因素对模型验证的影响，便于模型参数的精准校准，因此模型在实验室样本上的拟合精度较高。而工程环境验证涉及多批次、多厂家、不同工艺的电芯样本，受生产制造差异、运输存储影响，电芯初始一致性较差，且在长期运行中一致性会进一步劣化，导致工程数据离散性大、波动范围广。此外，工程环境下的数据采集还可能受传感器精度、数据传输干扰等因素影响，数据质量参差不齐，这对模型的抗干扰能力与泛化能力提出了更高要求，也是现有模型在工程验证中偏差较大的重要原因。

第四，模型适配要求的差异。实验室环境验证对模型的适配要求相对单一，仅需通过参数微调，实现对特定批次、特定工况下电池寿命的精准预测即可，无需考虑跨批次、跨工况的适配性。而工程环境验证要求模型具备较强的通用性与外推能力，能够适配不同批次、不同体系的电芯，能够应对动态变工况、复杂环境的变化，同时要求模型具备一定的容错能力，能够处理工程数据中的噪声与波动。现有模型多基于实验室单一工况数据校准，参数体系缺乏普适性，无法满足工程环境下的多

场景适配要求，导致模型在工程验证中实用性不足。

综上，实验室环境验证是模型机理验证与基础精度验证的必要环节，为模型构建奠定了理论基础；而工程环境验证是模型工程化落地的核心前提，其复杂性与真实性对模型提出了更高要求。两者的差异明确了现有模型的优化方向——必须突破实验室理想工况的局限，充分考虑工程场景的复杂性、数据的离散性与多应力耦合效应，才能提升模型的工程实用性与泛化能力。

5.4 关键使用因素对寿命的影响规律及工程管控策略

温度、充放电倍率、SOC 使用区间是影响电池寿命衰减的三大核心外部因素，其影响规律具有明确的工程指导意义。试验结果表明，高温会显著加速副反应与结构劣化，使老化速率呈近似指数级提升；高倍率充放电会加剧极化、产热与锂沉积风险，使衰减进入非线性加速阶段；长期满电搁置、深度充放电等宽 SOC 运行方式，也会明显加快容量损失。与之相对，将电池控制在适宜温度区间、合理限制充放电倍率、优化 SOC 使用范围，可显著延缓老化、延长系统寿命。

在工程应用层面，可通过优化热管理系统、精细化 BMS 充放电策略、规范使用工况等方式实现寿命提升。同时必须认识到，电池系统寿命模型的性能上限，由电芯级寿命模型的精度与通用性直接决定。当前基于电化学机理的电芯模型仍无法同时满足高精度、宽适配、可移植、可工程落地的核心要求，从而制约了系统级模型的实用化进程。

5.5 当前技术不足

基于本研究的试验数据、仿真分析结果以及工程验证反馈，当前围绕电动汽车用动力蓄电池系统寿命仿真预测开展的研究仍存在诸多不足，这些不足不仅限制了所构建模型的工程实用性与泛化能力，也为后续研究指明了改进方向，具体可分为以下四个方面。

一是多物理场耦合建模的深度与精度不足。本研究构建的电化学-热-力耦合模型，仍存在“弱耦合”问题，未能实现电化学、热、力学三个物理场的深度协同刻画。在电化学层面，对 SEI 膜生长、活性锂损失、电极结构劣化等衰减机制的描述仍较

为简化，未充分考虑各衰减因子之间的协同、竞争关系，对锂沉积、电解液分解等复杂副反应的量化表征不足；在热学层面，对实车环境下的动态散热、非均匀温升、太阳辐射等外部热边界条件的刻画过于理想化，无法真实反映电池系统的实际热演化规律；在力学层面，仅在微观颗粒尺度考虑了应力损伤，未建立与宏观电芯装配压力、模组约束、车载振动等力学载荷的关联，无法量化宏观力学因素对电池老化的影响，导致模型在复杂工况下的预测精度大打折扣。

二是模型的通用性与泛化能力薄弱。当前模型主要基于单一批次、单一体系（磷酸铁锂）的电池试验数据进行参数校准，参数体系缺乏普适性，仅能通过手动微调适配特定批次、特定工况的电池，无法实现跨批次、跨材料体系（如磷酸铁锂与三元电池）、跨工况的统一预测。同时，模型对电芯工艺差异、生产制造偏差的表征不足，面对工程环境中多厂家、多批次的电芯样本，预测偏差显著增大，难以满足工程化规模化应用的需求。此外，模型参数多依赖最终容量衰减结果进行反向拟合，物理意义不够明确，导致模型在工况外推、寿命末期预测时的可靠性不足。

三是试验数据的覆盖度与精细化程度不足。本研究的试验验证主要集中在实验室可控工况下，试验样本的批次数量较少、试验周期有限，未能覆盖工程实际中多批次、长周期、复杂动态工况的场景。在试验数据采集方面，主要聚焦于容量保持率、电压、温度等宏观参数，缺乏对电池内部微观老化过程的原位表征数据，如 SEI 膜厚度演化、活性物质结构变化、锂沉积量等，导致衰减机理的量化分析缺乏足够的数据支撑，无法精准识别各衰减因子的作用权重与耦合关系。同时，工程环境下的实车工况数据积累不足，缺乏对动态变倍率、随机温度波动、振动冲击等复杂载荷下的电池老化数据采集，导致模型的工程验证不够充分，无法全面暴露模型在真实场景下的短板。

四是模型的工程适配性不足，难以满足工程化规模化应用需求。核心短板在于模型未充分考虑工程化应用中的实际场景特征，尤其是电芯生产工艺的不一致性、模组装配过程中的工艺偏差等关键工程因素，无法对这些因素进行精准表征与量化。工程化生产中，不同批次，甚至同批次电芯因生产工艺波动（如电极涂布厚度偏差、电解液注入量差异、极片压实密度不均等），会导致电芯初始性能离散性显著，而

现有模型未纳入这些工艺相关变量,无法反映工艺不一致性对电池寿命衰减的影响。同时,模型未结合工程化生产、系统集成、运维保障等实际环节的需求,无法适配不同工艺路线、不同装配标准的电池系统,难以对工程化应用中的电池寿命进行精准预判,也无法为工程化生产中的工艺优化、系统集成方案调整提供针对性支撑,导致模型与工程化实际应用脱节,工程实用价值受限。

5.6 未来研究方向

针对本研究存在的上述不足,结合当前动力电池寿命仿真预测技术的发展趋势与工程实际需求,未来可聚焦以下四个方向开展深入研究,逐步提升模型的精度、通用性与工程实用性,推动电池寿命仿真预测技术从实验室研究走向工程化落地。

一是深化多物理场深度耦合建模,提升机理表征精度。重点完善电化学-热-力耦合模型的物理架构,突破当前弱耦合的局限,建立三个物理场的协同演化方程。在电化学层面,结合原位 XRD、原位 TEM、电化学阻抗谱等先进表征技术,精准识别 SEI 膜生长、活性锂损失、锂沉积、电解液分解等衰减机制的演化规律,建立各衰减因子之间的量化耦合关系,提升对复杂副反应的表征精度;在热学层面,引入动态热边界条件,考虑实车环境下的太阳辐射、空气对流、热管理系统动态响应等因素,构建非均匀温升模型,精准反映电池系统的实际热演化过程;在力学层面,建立微观颗粒应力与宏观力学边界的关联模型,量化模组装配压力、车载振动等宏观力学载荷对电极结构、界面接触、老化速率的影响,实现力学-电化学-热的深度耦合,提升模型在复杂工况下的预测精度。

二是构建机理-数据混合建模范式,突破通用性瓶颈。摒弃单一机理建模或数据建模的局限,采用“机理驱动+数据驱动”相结合的混合建模思路,兼顾模型的物理合理性与动态适配性。以电化学-热-力机理模型为基础,明确模型的物理边界与约束条件,保证模型的理论可靠性;利用机器学习、深度学习等数据驱动方法,基于海量实验室试验数据、实车工况数据,对模型的关键参数进行自适应优化与偏差修正,弥补机理模型中简化假设带来的不足。同时,构建多体系、多批次电池的参数数据库,建立模型参数与电芯材料配方、工艺参数的关联关系,实现模型的跨批次、跨体系自适应适配,提升模型的泛化能力。此外,开发轻量化的工程化模型版本,在

保证预测精度的前提下，简化计算复杂度，适配车载 BMS 等工程设备的实时运行需求。

三是开展多维度、长周期试验研究，夯实数据支撑基础。扩大试验研究的广度与深度，构建完善的试验数据支撑体系。在试验样本方面，覆盖磷酸铁锂、三元、固态电池等不同材料体系，增加试验样本的批次数量，涵盖不同厂家、不同工艺的电芯，充分捕捉电芯的批次差异与性能离散性；在试验工况方面，不仅要开展实验室可控工况下的试验，还要搭建实车工况数据采集平台，同步采集动态变倍率、随机温度波动、振动冲击等复杂载荷下的电池老化数据，积累长周期（>5000 次循环>5 年日历存储）的老化试验数据，捕捉电池在寿命末期的衰减规律与失效机制；在数据采集方面，结合原位表征技术与宏观参数监测，同时获取微观老化数据与宏观性能数据，建立微观机理与宏观性能的关联，为模型的机理优化与参数校准提供坚实的数据支撑，减少模型对局部试验数据的过拟合。

四是推动模型与工程实践深度融合，全面提升工程化应用价值。针对工程化应用中产品多样性以及“工艺不一致、装配偏差、生产波动、多体系适配”等核心痛点，未来研究应从工程实际需求出发，重新设计模型架构与应用模式，确保模型能够真实反映量产、装配、系统集成等全流程中的工程特征。

5.7 综合总结

综上，本研究基于电化学-热-力耦合方法构建的电池寿命模型，在日历寿命等相对简单工况下具备一定预测能力与参考价值，但在循环寿命、多批次差异、实车复杂工况下精度不足、通用性有限，尚未达到工程化广泛应用的要求，也暂不具备形成统一行业标准的技术基础。电芯一致性、多物理场动态耦合、衰减机理量化、力学-电化学耦合等仍是制约模型性能的关键瓶颈。

未来，电池寿命仿真预测技术的成熟，必须依托更深层次的老化机理研究、更系统的长期老化试验、更先进的多尺度多物理场建模方法以及机理与数据融合的新范式。相关标准制定应遵循技术发展规律，在模型精度、通用性、可靠性实现稳定突破后再逐步推进，以确保标准的科学性、适用性与工程指导性。