

分类号: TH166

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110145



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 新能源汽车电池包多层负泊松比
防撞散热系统优化研究

论 文 作 者 饶志

校 内 导 师 唐铃凤 教授

校 外 导 师 吴亮发 高级工程师

专业学位类别 机 械

研究方向(领域) 智能制造系统

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

饶志

日期：2025 年 5 月 20 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

饶志

指导教师签名：

唐银凤

日期： 2025 年 5 月 20 日

日期： 2025 年 5 月 20 日

新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热系统优化研究

摘 要

随着新能源汽车行业的蓬勃发展，其不仅推动能源结构的优化转型，引领交通出行方式的深刻变革，还催生出一系列相关产业的协同发展，创造无限的经济机遇与社会效益。然而新能源汽车在迈向可持续交通未来的进程中，新能源汽车电池包碰撞与散热的安全问题犹如潜藏的暗礁，时刻威胁着这一新兴产业的平稳发展，新能源汽车电池包碰撞与散热过程失控不仅会扩大安全风险范围，同时也会给救援和后续处理带来极大困难。本文以新能源汽车电池包防撞散热装置为研究对象，设计了一种新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热装置，对其结构参数进行设计，同时进行了边长 A、B，角度 C，厚度 D、E 五个维度上的结构优化，通过模拟和仿真得到最优参数组合，使得多层负泊松比结构更加符合实际工程应用。论文的主要研究工作如下：

(1) 基于传统内凹六边形负泊松比结构，利用 Solidworks 设计了一种多层负泊松比结构。阐述了多层负泊松比结构的防撞原理并验证其力学特性，利用其良好的防撞特性和能量吸收特性，将其作为新能源汽车电池包的防撞结构，对多层负泊松比结构的独特力学性能，如受拉伸时的横向膨胀等特性进行理论分析，阐述其在增强电池包防撞能力方面的潜在优势。

(2) 设计了一种电池包多层负泊松比防撞散热装置。分别利用 LS-DYNA 和 ANSYS-Fluent 建立电池包碰撞有限元模型和电池包散热有限元模型，明确多层负泊松比结构对电池包关键部件的保护效应，其不仅能有效降低碰撞工况下电池包的变形与损伤风险，还可降低电池包工作过程中的热失控风险。

(3) 验证了电池包多层负泊松比防撞散热系统模型的防撞散热效果。通过建立电池包碰撞有限元模型和电池包散热有限元模型，对比常规结构与多层负泊松比结构在相同工况下的防撞效果和散热效率。利用正交试验设计法选取样本，根据仿真结果对多层负泊松比结构的设计参数与目标参数进行影响力分析，为后续多目标优化奠定基础。

(4) 利用 BP 神经网络和浣熊优化算法对防撞散热装置结构参数进行优化。利用 MATLAB 建立了多层负泊松比结构的最大侵入量和散热量与结构参数之间的神经网络模型，借助正交试验设计法获取样本点并训练，构建拟合精度较高的近似模型。采用浣熊算法对多层负泊松比结构进行优化，得到最优结构参数解集。利用标准边界交叉法从解集中确定多层负泊松比防撞散热装置最优设计参数，并结合仿真试验予以验证。

(5) 对多层负泊松比结构的散热性能进行了模拟实验。论述了实验思路、实验步骤及实验目的，设置三组对照组，得到相应的试验结果，对多层负泊松比结构的散热性能试验结果进行分析，验证了该结构优化设计的正确性及其在实际应用中的有效性。

关键词：新能源汽车防撞散热装置，负泊松比，正交试验，浣熊优化算法，多目标优化

Optimization Research on Multi-layer Negative Poisson's Ratio Collision and Heat Dissipation System for New Energy Vehicle Battery Packs

ABSTRACT

With the vigorous development of the new energy vehicle (NEV) industry, it has not only propelled the optimization and transformation of the energy structure and led the profound changes in transportation modes, but also given rise to the collaborative development of a series of related industries, creating unlimited economic opportunities and social benefits. However, in the process of new energy vehicles moving towards a sustainable transportation future, the safety issues of battery pack collision and heat dissipation in NEVs are like hidden reefs, constantly threatening the stable development of this emerging industry. The loss of control in the collision and heat dissipation process of NEV battery packs will not only expand the scope of safety risks but also bring great difficulties to rescue and subsequent handling. This paper takes the collision and heat dissipation device for NEV battery packs as the research object and designs a multi-layer negative Poisson's ratio collision and heat dissipation device for NEV battery packs. The structural parameters of the device are designed, and structural

optimization is carried out in five dimensions: side lengths A and B, angle C, and thicknesses D and E. The optimal parameter combination is obtained through simulation and modeling, making the multi-layer negative Poisson's ratio structure more in line with practical engineering applications. The main research work of this thesis is as follows:

(1) Based on the traditional negative Poisson's ratio structure, a multi-layer negative Poisson's ratio structure was designed using Solidworks. The collision-resistant principle of the multi-layer negative Poisson's ratio structure was elaborated, and its mechanical properties were verified. Leveraging its excellent collision-resistant and energy absorption characteristics, the structure was employed as a collision-resistant structure for new energy vehicle battery packs. The unique mechanical properties of the multi-layer negative Poisson's ratio structure, such as the lateral expansion when subjected to tension, were theoretically analyzed, and its potential advantages in enhancing the collision resistance of battery packs were discussed.

(2) A multi-layer negative Poisson's ratio collision and heat dissipation device for battery packs was designed. Finite element models for battery pack collision and heat dissipation were established using LS-DYNA and ANSYS-Fluent, respectively. The protective effect of the multi-layer negative Poisson's ratio structure on the key components of the battery pack was clarified. It can not only effectively reduce the

deformation and damage risks of the battery pack under collision conditions but also lower the risk of thermal runaway during the operation of the battery pack.

(3) The collision and heat dissipation effects of the battery pack multi-layer negative Poisson's ratio collision and heat dissipation system model were verified. By establishing finite element models for battery pack collision and heat dissipation, the collision resistance effects and heat dissipation efficiencies of the conventional structure and the multi-layer negative Poisson's ratio structure under the same working conditions were compared. The orthogonal experimental design method was employed to select samples, and based on the simulation results, an influence analysis was conducted on the design parameters and target parameters of the multi-layer negative Poisson's ratio structure. This analysis laid the foundation for the subsequent multi-objective optimization.

(4) The structural parameters of the collision and heat dissipation device were optimized using the BP neural network and the Raccoon Optimization Algorithm. A neural network model was established using MATLAB to correlate the intrusion volume and heat dissipation of the multi-layer negative Poisson's ratio structure with its structural parameters. Sample points were obtained through orthogonal experimental design and used to train the model, resulting in a highly

accurate approximate model. The multi-layer negative Poisson's ratio structure was optimized using the Raccoon Optimization Algorithm to obtain the optimal set of structural parameters. The optimal design parameters for the multi-layer negative Poisson's ratio collision and heat dissipation device were determined from the solution set using the standard boundary crossover method and were verified through simulation experiments.

(5) Simulation experiments on the heat dissipation performance of the multi-layer negative Poisson's ratio structure were conducted. The experimental ideas, steps, and objectives were elaborated. Three control groups were set up, and the corresponding experimental results were obtained. The experimental results of the heat dissipation performance of the multi-layer negative Poisson's ratio structure were analyzed, and the correctness of the structural optimization design and its effectiveness in practical applications were verified.

KEY WORDS: new energy vehicle collision and heat dissipation device, auxetic structure, orthogonal experimental design, raccoon optimization algorithm, multi-objective optimization

目录

摘 要	I
ABSTRACT	IV
目录	VIII
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 本文研究内容	8
第 2 章 多层负泊松比结构设计及其力学分析	10
2.1 负泊松比结构概念及其研究	10
2.2 负泊松比结构的种类及应用	11
2.3 多层负泊松比结构几何模型	13
2.4 多层负泊松比结构力学特性验证	14
2.4.1 多层负泊松比结构相对密度分析	14
2.4.2 多层负泊松比结构弹性常数分析	16
2.4.3 多层负泊松比结构能量吸收特性分析	21
2.5 本章小结	22
第 3 章 电池包多层负泊松比防撞散热系统设计与建模	23
3.1 新能源汽车电池包系统设计	23
3.2 新能源汽车电池包碰撞系统建模	24
3.3 新能源汽车电池包散热系统建模	26
3.3.1 三元锂电池生热机理	27
3.3.2 散热器模型	29
3.3.3 水冷板模型	31
3.4 碰撞系统模型验证	31
3.5 散热系统模型验证	32
3.6 本章小结	34
第 4 章 电池包负泊松比防撞散热系统性能研究	36

4.1 试验设计	36
4.1.1 全因子试验设计	36
4.1.2 拉丁方试验设计	37
4.1.3 正交试验设计	37
4.2 多层负泊松比结构防撞性能分析	39
4.3 多层负泊松比结构散热性能分析	42
4.4 本章小结	47
第 5 章 电池包防撞散热系统多目标优化研究	48
5.1 近似模型的建立	48
5.1.1 多项式响应面模型	48
5.1.2 BP 神经网络模型	51
5.1.3 近似模型对比	56
5.2 多层负泊松比防撞散热系统多目标优化设计	57
5.2.1 多层负泊松比防撞散热系统优化模型	57
5.2.2 浣熊优化算法	58
5.2.3 ROA-BP 神经网络的搭建	60
5.3 多目标优化结果	62
5.3.1 标准边界交叉法	62
5.3.2 多目标优化结果分析	64
5.4 本章小结	67
第 6 章 多层负泊松比散热装置模拟实验	68
6.1 实验系统原理	68
6.2 实验装置设计	68
6.2.1 模拟发热装置	69
6.2.2 多层负泊松比散热装置	69
6.2.3 温度控制装置	70
6.3 实验步骤	72
6.4 实验结果分析	72
6.5 本章小结	73

第 7 章 总结与展望	74
7.1 总结	74
7.2 展望	75
参考文献	77
攻读硕士期间发表的学术成果	85
致谢	86

第1章 绪论

现代社会，新能源汽车逐渐成为出行代步工具和重要运输工具。随着技术提升，消费者对其安全性能要求渐高，其中电池包的防撞散热性能作为衡量安全性能的关键指标，备受关注。防撞散热系统的稳定性对整车安全影响重大，因此各大车企积极研发更优的防撞散热系统，期望借此提升安全性能，实现效益增长。目前，负泊松比结构因独特优势，在汽车电池包防撞散热领域广泛应用。本章从新能源汽车电池包防撞散热系统和负泊松比结构的研究背景和意义出发，介绍了国内外相关研究状况。

1.1 研究背景和意义

新能源汽车是现代社会发展绿色化、低碳化的重要分支，在政府政策推动与车企技术创新的双重作用下，新能源汽车性价比持续提高^[1]。2021-2023 年新能源汽车产销增长量如图 1-1 所示，2021 年我国新能源汽车产销量分别达 354.5 万辆和 352.1 万辆，2022 年分别为 705.8 万辆和 688.7 万辆，2023 年则分别达到 958.7 万辆和 949.5 万辆^[2]。目前，新能源汽车产业正在迅速发展，企业数量持续增长。特别是在过去三年中，新成立企业的占比接近 20%，这预示着该产业未来具有巨大的成长空间。

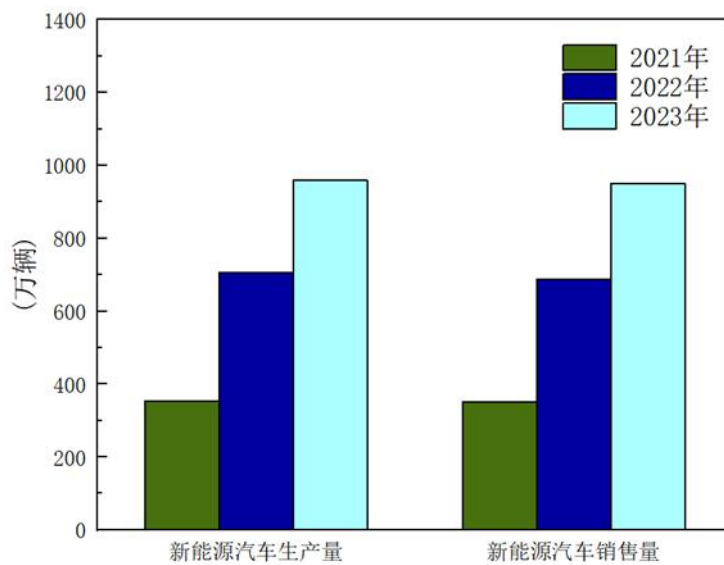


图 1-1 2021-2023 年新能源汽车产销增长量

现阶段新能源汽车存在若干问题，其中电池包的“热失控”现象尤为突出。

电池包的“热失控”现象是指电池在正常使用过程中，因温度过高引发内部异常热量积累，最终导致电池起火或爆炸的现象^[3]。目前新能源汽车仍需配备庞大且密集的电池组，这使得车辆在遭遇意外碰撞时，电池组极易受损，可能致使电池系统高压及绝缘失效，进而间接引发人员遭受电击、电池系统起火、冲击波伤害和爆炸碎片伤害等情况，如图 1-2 所示。电池包性能对温度极为敏感，高温或低温均会干扰其正常运行，导致新能源汽车性能与寿命下降，更为严重的将引发安全隐患，导致热失控事故的发生。例如 2020 年 6 月 16 日，在南昌某品牌新能源汽车在行驶中自动加速导致车辆失去控制，最终撞车起火。2021 年 11 月 11 日，在高速公路上两辆新能源汽车发生追尾事故后起火，两车在撞击后均不同程度受损，其中一辆汽车车头燃起大火，火势呈现出蔓延状态。2023 年 6 月 5 日，某品牌电动 SUV 高速碰撞收费站，导致车辆解体，车体碎片飞溅，车辆迅速燃起熊熊大火，但火势猛烈未能解决成功。



图 1-2 新能源汽车碰撞起火

随着新能源汽车使用率的不断提高，其质量问题也日益凸显。为应对这一挑战，国家工业和信息化部（工信部）对新能源汽车安全体系的建设进行了规范要求，以保证新能源汽车的安全性。报告指出，新能源汽车电池包制造商需切实承担起产品安全质量的首要责任，保障研发、制造、测试、维护等全过程的风险管理。因此，深入研究新能源汽车的安全问题具有重大意义。

在新能源汽车领域，防撞与热管理对车辆的安全性能起着关键作用。目前，针对新能源汽车电池包，已分别开发出了相应的防撞与散热方案^[4]。防撞方面，设计了覆盖在电池包外围的保护结构，常见的有空心或蜂窝状样式，此类结构为实现有效吸能形变，往往需要较大尺寸来获取足够空间。而热管理的核心一

一散热系统，其关键部件散热器，必须具备充足的迎风面积，才能确保良好的散热效果^[5]。然而，现有防撞保护结构与散热系统都存在一个显著问题，即它们体积庞大。该设计不仅显著增加了电动汽车的整体质量，还大量侵占了电池、乘员舱及车内设备的可用空间，从而对车辆性能产生不利影响，并降低了用户体验的满意度。若能通过创新设计将防撞结构与散热系统进行一体化整合，实现系统集成度的显著提升，则将有效优化车内空间利用率，并产生一系列积极效应。

1.2 国内外研究现状

随着人们对新能源汽车性能的日益关注，确保新能源汽车电池包的安全性已成为研究的重点。相较于传统燃油汽车，新能源汽车在防撞和散热方面面临更为严格的要求。国内外有越来越多的学者对防撞散热结构进行研究，对其进行结构的设计与优化，从而提升防撞散热效果。

（1）新能源汽车电池包防撞性能研究现状

新能源汽车因配备高压驱动系统，在传统燃油车安全技术的基础上，对安全性能提出了更高的要求^[6]。随着技术的持续发展，新型防撞结构显著增强了安全性能。Fadel Z A 等^[7]使用低碳钢设计了一种新型的后部底盘保护装置，通过仿真分析，该装置在汽车受到剧烈碰撞时可以很大程度的减缓汽车加速度，同时保证汽车乘客舱入侵量为零，有效的保证汽车的安全性能。Renren I 等^[8]在双管结构的基础上，研制出一种不同设计的新型泡沫填充碰撞结构，增强碰撞结构的能量吸收能力，降低泡沫的使用量，新型碰撞结构应用在汽车的防撞结构上，可增加汽车车身结构的耐撞性，有力地保证汽车在碰撞时的安全性能。S K Vignesh 等^[9]采用一种新的能量吸收材料设计了一种可以承受低冲击碰撞的汽车保险杠横梁，同时研究了材料性能、几何参数和结构布置对碰撞性能的协同作用，优化之后的设计显示出卓越的耐撞性指标。赵曦等^[10]研究了一种梯度强度汽车薄壁结构的碰撞性能，探讨了板厚、碰撞端强度和梯度强度分布指数对结构碰撞性能的影响，并进行了优化。结果表明，该结构在乘员舱减速度、前围侵入量和比吸能等指标上均优于传统设计，同时有效降低了车身重量。马芳武等^[11]根据仿生学原理设计了一种混合梯度负泊松比结构，并制作了测试样

品进行轴向压缩测试,以确认有限元模型的精确度。试验结果显示,与均匀梯度结构相比,该结构的综合能量吸收和吸收稳定性均有显著提升,该结构应用在车辆上可满足车辆实际碰撞要求,提高汽车吸能部件的耐撞性。Tao M^[12]设计了一种完全保护电池组侧面的二维大尺寸管状负泊松比防护结构并对其力学性能进行了计算,通过 CAE 仿真分析了电池组在侧面冲击下的有限元模型,发现该结构能显著提高动力电池组的耐撞性,提高了电动汽车的被动安全性。Wang W^[13]设计了一种具有三维星形辅助结构的新型动力电池组,同时考虑动力电池组设计过程的偏差和不确定性,进行不确定性底盘冲击优化,进一步提高了动力电池组的综合耐撞性。Liu Ruiyao^[14]提出了一种新的结构件装配设计方法,通过组装蜂窝状结构、泊松结构和手性结构形成了新型的重入结构,并通过试验、数值和理论方法综合分析了结构装配对力学性能的影响,最后以电动汽车的电池组抗冲击模型和热传导模型为例,验证了这种新型仿生可重入结构在新能源汽车工程中的潜在应用前景。Congcheng M^[15]利用有限元模型优化了新能源汽车动力电池箱体结构,并通过刚性立柱方法分析了电动汽车的侧面碰撞性能。在此基础上,应用泡沫铝材料对电池箱体的关键部件进行了优化,不仅有效降低了整车重量,还提升了车辆的安全性。董其娟^[16]利用铝合金的轻量化特性优化新能源汽车电池包箱体的设计,通过材料选择和有限元分析方法,对铝制电池包箱体的结构强度与弯曲刚度进行了评估。分析结果验证了电池包箱体在结构强度和弯曲刚度方面符合设计规范,为后续电池包结构的设计及开发工作提供了科学依据。

综上所述,新能源汽车电池包防撞的举措涵盖多个方面。例如设置汽车纵梁位于电池包上方,其高强度特性为电池包构建起坚实的保护伞。通过设置具有吸收碰撞动能特性的防撞梁与保险杠,有效缓解甚至消除碰撞过程中对电池包的冲击^[17]。此外,电池托盘在保护电池组方面也起到关键作用,其不仅能够减少或消除作用于电池组的碰撞力,还可有效降低振动与颠簸对电池组的影响,进而显著增强电池的安全性能,降低事故发生的风险。目前,新能源汽车电池包防撞安全性能的研究,大多以防撞结构最大侵入量作为关键指标,对电池包防撞结构以及车身结构的耐撞性展开多目标优化。因此,通过对电池包防撞结构的设计及其优化,实现新能源汽车电池包防撞性能的提升,对新能源汽车的

发展有着重要的意义。

(2) 新能源汽车电池包散热性能研究现状

电池包作为新能源汽车的核心组件，其散热管理的重要性不言而喻。目前，散热技术正向多样化发展，包括传统的空气冷却、高效的液体冷却、利用相变材料的热管理以及热管技术等。

空气冷却技术主要基于对流换热原理，由于空气的物理性质相对稳定且易于控制，其在多个领域都有广泛的应用。Yu S 等^[18]设计了一种 LiFePO_4 长方体电池模块的电池热管理系统，在典型的 U 型冷却系统中增加了不同的附加气流输出，以优化温度均匀性，结果表明与原始设计相比，最高温度降低了 6.22K，而温差降低了 40.36%。何闯^[19]基于常见新能源汽车结构设计了一种车载式风冷型锂电池包，利用有限元仿真对风冷型锂电池热管理系统进行模拟计算，结果发现入口空气流速与电池包冷却性能呈正相关，控制入口空气流速大于 4m/s 时可以使电池在最优放电效率下运行。白晓辉^[20]提出了一种多通道风冷技术，通过使用挡板将单一风道划分为多个风道，构建了一套多通道动力电池热管理方案。研究结果表明，三通道 U 型热管理系统在散热性能上超越了其他系统，能够有效控制电池组温差在适宜范围内。Yu D 等^[21]用有限元法模拟由锂离子电池单元组成的电池组，电池组中心有装流动液体的冷却管，层流纳米流体进入冷却管，空气进入通道。研究发现增加气流可降低电池组平均和最高温度，用层流纳米流体比水冷却效果更好。

液冷热管理技术在新能源汽车领域的应用至关重要，新能源电池包在充放电过程中会产生大量热量。液冷技术通过在电池模组或单体间引入循环冷却液，利用液体流动带走热量，维持电池温度在适宜范围内。

液冷技术是利用液体作为冷却介质来吸收并带走热量的一种冷却方式，冷却液携带热量流动到散热器后，会与外界环境进行热交换。可以对水冷系统的结构和参数进行多方面的优化，提高其冷却效率。李岳峰^[22]设计了一种创新的直接浸没冷却系统用于电池包，该技术通过将电池包完全浸入冷却液中进行冷却。实验结果显示，这一系统显著提高了整体冷却效率，并成功解决了传统冷却板冷却系统中顶部区域温差较大的问题。魏小平^[23]提出了钢制多通道电池包的液冷系统仿真模型，研究了液冷板通道数量和冷却液温度及进出口压差对电池

包温度的影响。结果表明将冷却液的进口温度控制在 25℃是较为适宜的选择。冯帅等^[24]通过仿真和实验研究了新型浸没式液冷技术在交换机散热中的应用。研究发现模型修正方法能提高温度预测精度，与传统风冷方式相比，浸没式液冷可将交换机元件温度降低约 20℃，且其单位体积的极限功率是风冷的 3.2 倍。Vishal B K 等^[25]为锂离子电池组选择合适的冷却技术考虑了三种不同类型的电池冷却策略：空气冷却、水冷、纳米流体冷却，结果表明电池组内部的温度分布会受到冷却剂类型的显著影响，与空气相比，液体冷却剂影响冷却的速度要快 10-15 倍。Hassan F M 等^[26]提出了一种带有迷你通道冷板的水冷系统和带有加长翅片的空气冷却系统混合冷却模型，在不同的冷却水流速和环境温度下评估了热管理系统的性能，研究发现混合冷却系统在 1C、2C、3C 放电速率下，最大温差为 0.7℃、2.2℃、4.3℃，该系统能控温差在 5℃ 内。Yang Y 等^[27]将通过喷水蒸发实现的空气预冷应用于电池组热管理，研究了水流速、水滴大小和风速对电池性能的影响，结果表明与干式冷却相比，喷水冷却可大幅降低最高温度。张威^[28]对电池模组冷却参数进行组合探究，以冷却液温度（T）、流速（V）、冷管宽度（W）和高度（H）为优化边界，分析各因素对电池模组的影响，结果表明冷却液温度和流速对模组最高温度和最大温差的影响最大。

综上所述，液冷技术在现代热管理领域扮演着越来越重要的角色，其也在不断演进，微通道液冷、喷雾式液冷等新型液冷技术不断涌现，进一步拓宽了应用范围，并提高了冷却效率和环保性，这预示着液冷热管理技术在未来将更加高效、可靠，并在更多领域得到广泛应用。

相变冷却技术是一种基于物质相变过程中吸收或释放大潜热特性的冷却方法，其散热效率显著高于传统的空气冷却和液冷技术。刘仲康^[29]制备了一种新型复合相变材料，利用实验和模拟方法研究了其在不同环境温度下的温升特性，对比 6mm 和 10mm 相变材料厚度对相变冷却的影响，结果发现二者冷却下电池最高温度较之前分别下降 20.28℃和 28.26℃。郑玲玲^[30]制备了一种水合盐相变材料，相比空气冷却，相变冷却在高倍率放电时能显著提高电池组的温度均匀性，并可将其维持在适宜的温度范围内。Weng J^[31]设计了一种结合各种翅片的优化相变材料模块，并对其热性能进行了测试，在较低的电池最高温度和更小的环境温度范围下，获得了更大的吸热和散热平衡。Miaari A A 等^[32]使

用了六个装满易于组装和拆卸的相变材料的小容器，从而改善冷却过程并提高光伏系统全天的效率，结果表明使用适当的相变材料可以使光伏组件的平均温度降低 10°C ，并将功率提高 5.23%。陈慧敏^[33]提出了一种高效率的相变冷却技术，专门用于大功率充电连接器。利用数值模拟评估了相变冷却的效果，并考察了冷却液类型、流量及套管厚度等因素对冷却性能的作用。结果表明增加冷却液流量能够降低连接器的温度，而增加套管厚度则会使温度升高，其中套管厚度对温度的影响尤为明显。姜鑫鑫^[34]设计了一种将相变材料和冷却板结合使用的电池热管理系统，并通过数值模拟来测试其性能。结果表明在高温和高放电率条件下，加入液冷系统能够显著缓解因相变材料完全融化而引起的电池温度上升。

综上所述，相变冷却技术具有显著优点，其在物质相变过程中释放大热量来实现高效冷却，能在较小温度变化范围内吸收大量热量，冷却效率高，可使系统快速降温并保持相对稳定的温度，对于对温度波动敏感的设备至关重要。但是，相变冷却技术也存在一些缺点，部分相变材料存在稳定性问题，在多次相变循环后性能会下降，影响冷却效果和使用寿命。而且，相变材料的导热性能普遍较差，导致热量传递速度慢，限制了冷却系统的响应速度，在一些需要快速散热的场合难以满足需求。

（3）负泊松比结构研究现状

负泊松比结构（Negative Poisson's Ratio Structures）也被称为拉胀结构，其在受拉伸时在横向发生膨胀，受压缩时在横向发生收缩，与普通材料相反。杨延新^[35]设计了一种内凹型负泊松比结构，采用有限元法和压缩实验对泊松比和静载刚度进行分析，结果表明相比于内六角结构，内凹型结构的静载刚度提升 5.52%，在低于 50Hz 的频域中内凹型结构具有更高的加速度振级落差和更低的力传递系数。吴东伟^[36]设计了内凹负泊松比单胞及三种增强型单胞结构，对其进行平压试验及有限元数值模拟，并对多种构型的受力及吸能特性开展对比分析。结果表明泡沫填充增强构型具有较高的能量吸收效率，相同变形条件下填充增强构型的比吸能率提高约 65%。沈佳兴^[37]设计了一种点阵负泊松比材料的吸能结构，采用仿真分析方法研究了圆形截面、矩形截面的直边内凹星形胞体和内凹六边形胞体的比吸能性能和单位质量支撑力性能，研究发现矩形截面阶

梯边内凹星形胞体的综合性能最佳。刘卫东^[38]提出了一种易变形、延展性好的新型手性结构，通过能量法理论推导了梁结构力学性能的数值解，并用有限元方法进行了数值验证，结果表明该负泊松比结构具有优异的力学表现。Li LongLong 等^[39]提出了一种结合拓扑优化与有限元分析的新方法设计负泊松比结构，并用光固化技术制造结构。结果表明所造结构具有负泊松比与出色拉伸性能。Chen Y 等^[40]对以 PLA 为基材，具有负泊松比特性的内凹六边形结构进行了准静态压缩试验和仿真分析并优化，结果表明优化后的内凹六边形结构在能量冲击变形下的最大位移降低了 21.76%，吸能率提高了 3.29%，优化后的结构具有更好的形状恢复性能。

新能源汽车电池包负泊松比防撞散热系统优势显著，其负泊松比结构受撞击时横向膨胀，能增加接触面积、分散能量，更好地抵抗变形，降低冲击力对电池包影响，保护电池安全。负泊松比结构的特殊几何形状可优化冷却液流动通道，增强热交换效率，使热量均匀分布，避免局部过热^[41]。还能实现轻量化，节省空间，适应复杂工况，提高车辆续航与可靠性。

1.3 本文研究内容

本文论述了设计新能源汽车电池包防撞散热系统的相关理论，分析了负泊松比结构在新能源汽车电池包防撞散热系统中的应用，在传统内凹六边形负泊松比结构的基础上设计了一种多层负泊松比结构并应用于新能源汽车电池包防撞散热系统。具体内容如下：

(1) 基于传统内凹六边形负泊松比结构，设计了一种多层负泊松比结构。将多层负泊松比结构作为研究对象，确定了其五个主要结构参数，顶部长度 A、斜边长度 B、顶部与斜边的夹角 C、底部厚度 D 和斜边厚度 E，计算得到多层负泊松比结构的相对密度，验证了多层负泊松比结构的弹性模量、泊松比和剪切模量，分析了多层负泊松比结构的能量吸收特性，在此基础上，利用其良好的防撞特性和能量吸收特性，将其作为新能源汽车电池包的防撞结构。

(2) 建立了新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热系统模型。选用三元材料锂电池作为电池包的主要材料，并采用多层负泊松比结构进行排列组合，构建一个能够完整覆盖电池包表面的防撞结构。依据 GB/T 44131-2024 和 GB

20071 标准，对碰撞系统进行建模。通过整合水冷板等部件，构建完整的水冷回路，在不额外增加散热装置的情况下，使多层负泊松比结构同时具备散热功能，实现碰撞防护和散热双重作用。

（3）验证了新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热系统的防撞散热效果。利用 LS-DYNA 和 ANSYS-Fluent 分别建立碰撞和散热有限元模型，对比分析多层负泊松比结构与传统结构在相同工况下的性能表现。结果表明，多层负泊松比结构在防撞和散热方面均展现出较优的性能。此外，采用正交试验设计法选取样本点，对结构参数与性能指标间的关系进行深入分析，为多层负泊松比结构的优化研究提供了理论依据。

（4）利用 BP 神经网络和浣熊优化算法优化结构参数。在正交试验设计的基础上，通过多项式响应面模型和 BP 神经网络建立多层负泊松比结构的防撞散热系统模型，并根据预测精度选择最佳模型。根据优化数学模型，利用 BP 神经网络和浣熊优化算法进行多目标优化，得到最佳设计参数，增强系统的防撞和散热能力。

（5）对多层负泊松比结构的散热性能进行实验验证。通过对比分析，验证了多层负泊松比结构在散热效率方面的优化效果及其在实际应用中的可行性。试验设立三组对照组以确保结果的可靠性和有效性。对获得的实验数据进行分析，证实了多层负泊松比结构设计正确性，并展示了其在提高散热性能方面的优势。

第 2 章 多层负泊松比结构设计及其力学分析

负泊松比结构因其独特的力学特性，在众多领域展现出显著的优势和广泛的应用潜力。近几十年来，研究人员也对其进行了大量的科学研究，提出了许多新颖的负泊松比结构，不断地提高其耐撞性和吸能特性。本文在传统内凹六边形负泊松比结构的基础上设计了一种多层负泊松比结构并对其进行力学分析。

2.1 负泊松比结构概念及其研究

法国力学家泊松提出“泊松比”这一概念，这是一种弹性常数，用来反映材料的横向变形，常用符号 μ 表示。泊松比定义为横向正应变与单向受拉或受压时轴向正应变的比值，又称横向变形系数，反映材料的横向变形^[42]，表达式为式(2-1)。

$$\mu = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (2-1)$$

式中： ε_j —横向收缩应变；

ε_i —纵向伸长应变；

i, j —两相互垂直的坐标轴。

对于大多数常见材料和结构而言，泊松比的数值通常为正值，这一特性在材料的拉伸与压缩过程中表现得尤为明显。当材料和结构受到拉伸时，其宽度（垂直于受力方向的尺寸）会减小直至断裂；当材料和结构受到压缩时，其宽度会增大，表现出被压扁的趋势（如图 2-1 所示）。然而，某些材料和结构通过微观分子排列或宏观几何形状的设计，表现出相反的特性，材料和结构在拉伸时宽度增加，呈现向外膨胀的趋势；在压缩时宽度减小，材料和结构越压越密实。该种材料和结构被称为负泊松比材料或负泊松比结构^[43]。

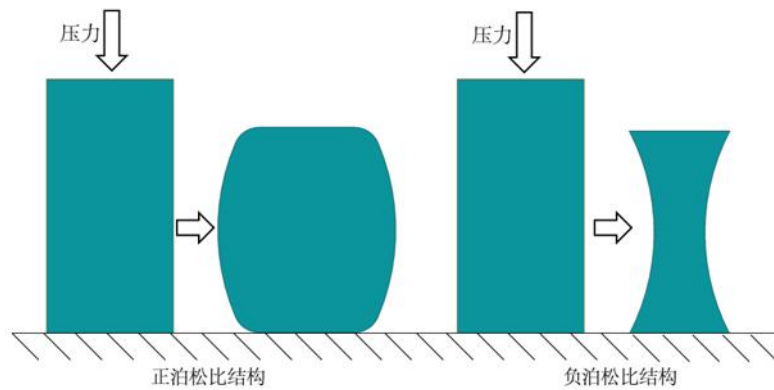


图 2-1 两种结构受压特性

在受到撞击时，负泊松比结构会向内部塌陷压缩，从而使其刚度持续增加。这种特性不仅避免了结构的突然压溃失效，还能充分发挥结构的吸能潜力，同时有效减少应力集中现象^[44]。

2.2 负泊松比结构的种类及应用

近几十年来，负泊松比结构研究进展显著，常见的负泊松比结构设计类型包括内凹蜂窝结构（Re-entrant Honeycomb）、手性结构（Chiral Structures）、旋转多边形结构（Rotating Polygons）、折叠结构（Origami/Kirigami-Inspired Structures）和多级复合结构（Hierarchical Auxetics）等。

内凹蜂窝结构（Re-entrant Honeycomb）设计灵感源自传统正六边形蜂窝，通过将蜂窝单元直壁改为内凹多边形（如箭头形或星形），形成独特的“内凹角”^[45]。在外力作用下，内凹壁面通过屈曲或旋转向外展开，使材料在拉伸方向延展且横向膨胀。Roderic Lakes 于 1987 年改造的聚氨酯泡沫内凹蜂窝结构，泊松比可达-0.7，显著优于传统材料。该结构在抗冲击领域表现出色，因其在压缩过程中通过渐进式塌陷高效吸收能量，已用于防弹衣和汽车吸能部件。但其制造工艺复杂，各向异性显著，需优化参数（如内凹角度、壁厚比）以平衡性能与可加工性。

手性结构（Chiral Structures）的特点是具有非对称的螺旋几何特征^[46]。这类结构由中心节点和呈放射状分布的螺旋形连接臂构成，外力作用下，连接臂的旋转运动驱动整体结构横向扩展。根据中心节点连接的臂数不同，可分为三手性（Tri-Chiral）和四手性（Tetrachiral）结构。三手性结构通常由三个呈 120°

对称分布的螺旋臂组成，其泊松比可低至-1.2，而四手性结构因更高的对称性展现出更优的各向同性。手性结构的优势在于低密度和高韧性，例如在柔性传感器中，其螺旋构型可适应复杂形变而不破裂，同时通过调节臂长与螺旋角可精确调控力学响应。

旋转多边形结构（Rotating Polygons）则通过刚性单元间的铰链式连接实现负泊松比效应^[47]。此类结构通常由三角形、正方形等规则多边形通过角点铰接而成，当受到拉伸载荷时，刚性单元绕铰链旋转，导致整体结构横向扩展。以旋转正方形结构为例，其泊松比可达到-1，且在拉伸过程中孔隙率呈现多级变化，这一特性使其在医用支架领域备受关注，旋转多边形支架植入血管后，可通过轴向拉伸调节径向支撑力，避免造成额外的血管损伤。此外，旋转三角形结构因更高的面内剪切刚度，适用于需要抗扭转变形的场景，如可变形机器人关节。不过，这类结构对制造精度要求极高，微米级的铰链间隙偏差即可能引发力学性能的显著退化。

折叠结构（Origami/Kirigami-Inspired Structures）为负泊松比设计提供了新的思路^[48]。经典的 Miura 折叠构型通过特定角度的折痕设计，在面内拉伸时触发折叠面的展开，从而产生横向膨胀。通过调整折痕角度，此类结构可实现从各向异性到各向同性的泊松比调控，其应变能力可达 200%以上，远超多数拉胀材料。

多级复合结构（Hierarchical Auxetics）通过嵌套或组合不同尺度的拉胀单元，实现了力学特性的协同增强^[49]。例如，将宏观尺度的内凹蜂窝作为一级结构，微观尺度的手性单元作为二级结构，形成双层级体系。这种设计不仅可扩展泊松比范围（如达到-2 以下），还能在能量吸收效率、断裂韧性等指标上实现突破。实验表明，多级复合泡沫材料在高速冲击下的能量耗散能力比单级结构提升近 40%，在防爆装甲和航空航天缓冲部件中具有重要价值。此外，通过引入功能梯度设计，可进一步实现泊松比的空间连续调控，满足复杂工况下的性能需求

负泊松比结构在多个领域均有应用，涵盖机械工程、消防安全、疤痕恢复等^[50]。

（1）机械工程领域。负泊松比材料在机械工程领域中可以用于制作新型的

减震器和振动控制器等设备，以提高其性能和效率。美国密歇根大学马正东团队针对乘用车开创性地将负泊松比结构应用于汽车吸能盒、缓冲块以及非充气轮胎，相比于传统结构具有更卓越的力学表现。

(2) 消防安全领域。负泊松比结构也被应用于防火、防雷和防爆结构，展示了其在提高结构安全性能方面的潜力。

(3) 疤痕恢复领域。3D 打印负泊松比结构用于疤痕恢复，通过稳定关节屈伸时给予疤痕的压力水平，有效减低压力过大带来的副作用和避免压力不足以致影响疗效。这种设计可以加速改善疤痕外观和厚度。

综上所述，负泊松比结构的应用不仅限于传统的工程领域，还扩展到了医疗、消防安全和个人健康护理等多个方面，展示了其广泛的应用潜力和价值。

2.3 多层负泊松比结构几何模型

多层负泊松比结构是一种利用负泊松比特性与多层化构建的创新设计。其由多个负泊松比单层堆叠而成，受力时表现出独特变形，拉伸时垂直方向膨胀，压缩时收缩，与传统材料相反^[51]。多层设计优化了这一特性，通过调整各层厚度和参数，可精确调控力学响应，各层协同作用使其在复杂载荷下性能优异。

本文以传统内凹六边形负泊松比结构为母体结构，开展多层级结构设计，得到一种新型多层负泊松比结构。如图 2-2 所示，该多层负泊松比结构由三层负泊松比结构构成，最外层总体框架为一层负泊松比结构，内部包含两层上下对称的负泊松比结构。

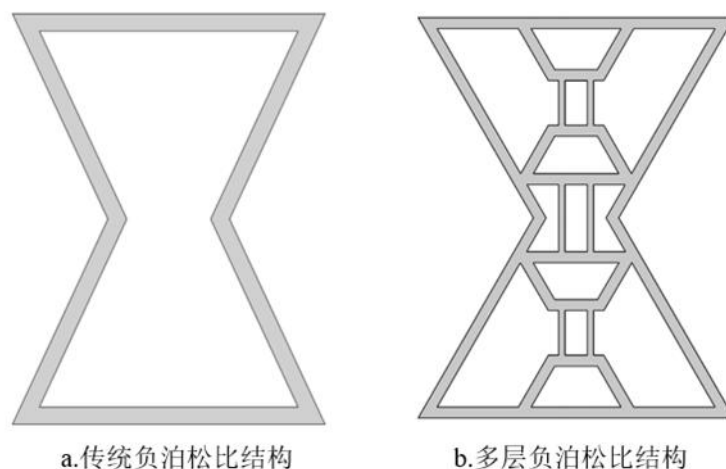


图 2-2 负泊松比结构示意图

所设计的多层负泊松比结构的几何尺寸主要由五个参数决定：顶部长度 A ，

斜边长度 B ，顶部与斜边的夹角 C ，底部厚度 D 和斜边厚度 E ，对其进行拉伸变换组合得到完整多层负泊松比结构，拉伸后多层负泊松比结构长度为 L ，如图 2-3 所示。

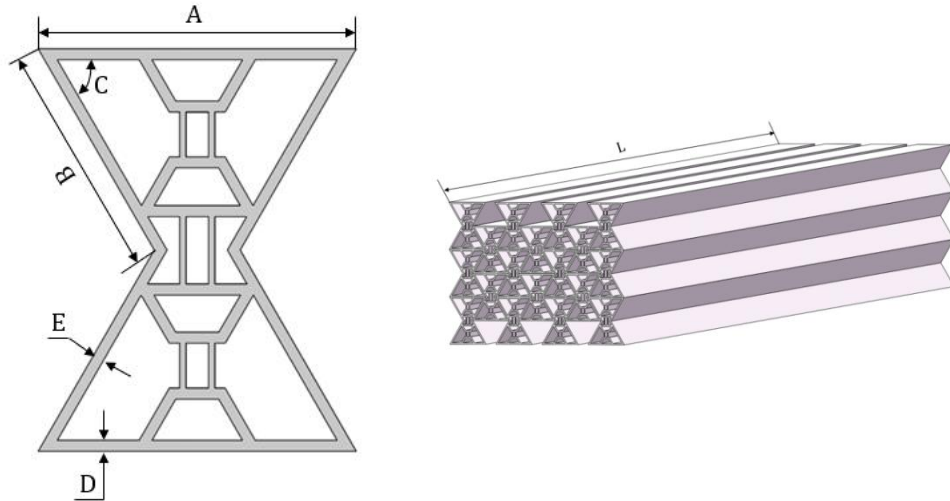


图 2-3 多层负泊松比结构参数图

结构内部所包含的上下对称的负泊松比结构与外部负泊松比结构具有相似关系，即内部尺寸随着上述五个几何尺寸的变化而有规律的变化。多层负泊松比结构初始具体参数如表 2-1 所示。

表 2-1 磁路初始结构尺寸表

参数	A(mm)	B(mm)	C(°)	D(mm)	E(mm)	L(mm)
初始值	28	18	60	2	2	1000

2.4 多层负泊松比结构力学特性验证

负泊松比多层级结构的设计与基体材料共同决定其力学性能，设计完成后，需进行理论分析，以验证其负泊松比特性并为有限元分析提供依据。

2.4.1 多层负泊松比结构相对密度分析

在探讨负泊松比多层级结构时，一般将该结构的密度与基体材料密度之比定义为相对密度^[53]。根据相对密度计算公式，其取值范围为 0 到 1。对于负泊松比结构而言，当单胞间隙增大、排列趋于疏松时，相对密度趋近于 0；而当单胞间隙减小、排列趋于紧密时，相对密度趋近于 1。对于多层负泊松比结构而言，其单胞尺寸并不直接影响相对密度，相对密度更多地取决于设计空间中单胞内部基体材料的比例。利用传统内凹六边形结构的相对密度公式，能够计

算出多层负泊松比结构的相对密度^[54]。传统内凹六边形结构的总面积 $S_{\text{总}1}$ 如式 (2-2)。

$$S_{\text{总}1} = \sqrt{3}L(2H - L) \quad (2-2)$$

式中, H —内凹六边形顶部长度, mm

L —内凹六边形斜边长度, mm

其中基体材料所占面积 $S_{\text{基}1}$ 如式 (2-3)。

$$S_{\text{基}1} = t(2H + 4L) \quad (2-3)$$

式中, t —内凹六边形结构厚度, mm

传统内凹六边形结构的相对密度 $\bar{\rho}_1$ 如式 (2-4)。

$$\bar{\rho}_1 = \frac{S_{\text{总}1}}{S_{\text{基}1}} = \frac{\sqrt{3}L(2H - L)}{t(2H + 4L)} \quad (2-4)$$

对于多层负泊松比结构来讲, 由于内部上下对称的负泊松比结构与外部负泊松比结构相似, 为了便于计算, 设定一个相似 ε 因子用以表达内部结构的面积, 多层负泊松比结构的总面积 $S_{\text{总}2}$ 如式 (2-5)。

$$S_{\text{总}2} = \sqrt{3}B(2A - B) \quad (2-5)$$

内部负泊松比结构的面积 $S_{\text{内}}$ 如式 (2-6)。

$$S_{\text{内}} = \sqrt{3}B(2A - B)\varepsilon \quad (2-6)$$

多层负泊松比结构中基体材料所占的面积 $S_{\text{基}2}$ 如式 (2-7)。

$$S_{\text{基}2} = \sqrt{3}\varepsilon B(2A - B) + 4EL + 2AD \quad (2-7)$$

多层负泊松比结构的相对密度 $\bar{\rho}_2$ 如式 (2-8)。

$$\bar{\rho}_2 = \frac{S_{\text{总}2}}{S_{\text{基}2}} = \frac{\sqrt{3}B(2A - B)}{\sqrt{3}\varepsilon B(2A - B) + 4EL + 2AD} \quad (2-8)$$

取相似因子 ε 为 0.5, 由式 (2-8) 可得多层负泊松比结构的相对密度约为 0.13, 当多层负泊松比结构相对密度较小时, 其内部孔隙较多, 结构排列较为疏松, 在受到冲击载荷时, 这些孔隙可以提供更多的变形空间, 使结构能够通过更大的变形来吸收能量。此外, 较小的相对密度意味着结构更轻, 能有效减

少整体重量，也更符合当下汽车轻量化的设计理念。

2.4.2 多层负泊松比结构弹性常数分析

本文所设多层负泊松比结构为管状，分析其横截面可将三维问题转为二维问题。该结构横截面由单体负泊松比结构组成，分析其中单个负泊松比结构即可反映整体力学特性。Gibson 等基于正泊松比六边形蜂窝结构给出的力学性能公式及推导适用于负泊松比结构，但其仅考虑了单胞弯曲形变^[52]。本文将在此基础上考虑拉伸和压缩形变，提高公式精确度。

假设多层负泊松比结构由均匀且各向同性的材料构成，以下给出该结构单胞的弹性模量、泊松比和剪切模量的公式及其推导过程。

(1) x 方向上的弹性模量和泊松比

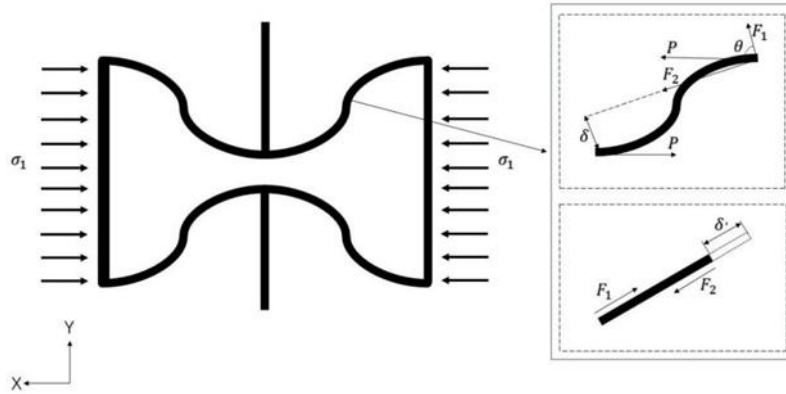


图 2-4 单个负泊松比结构在 x 方向上受压

如图 2-4 所示，设多层负泊松比结构整体受到 x 方向上的均匀压力，压强为 σ_1 ，此时长度为 A 的部分不发生变形，长度为 B 的部分承受的压力大小为 F ，发生弯曲和收缩。

将 F 分解为垂直于板 B 的力 F_1 和沿板 B 的力 F_2 ，如式 (2-9) 所示。

$$\begin{cases} F = \sigma_1 (A + B \cos \theta) L \\ F_1 = F \cos \theta \\ F_2 = F \sin \theta \end{cases} \quad (2-9)$$

板 B 的弯曲形变量如式 (2-10) 所示。

$$\delta = \frac{2F_1 \left(\frac{B}{2} \right)^3}{3eI} = \frac{F_1 B^3}{12eI} = \frac{\sigma_1 (A + B \cos \theta) L \cdot \cos \theta \cdot B^3}{12eI} \quad (2-10)$$

板 B 在弯曲方向上的惯性矩 I 如式 (2-11) 所示。

$$I = \frac{LE^3}{12} \quad (2-11)$$

由式 (2-10), (2-11) 得, 板 B 的弯曲形变量表达式如式 (2-12) 所示。

$$\delta = \frac{\sigma_1 (A + B \cos \theta) \cos^2 \theta \cdot B^2}{eE^3 \cdot \sin \theta} \quad (2-12)$$

板 B 的压缩形变量如式 (2-13) 所示。

$$\delta' = \frac{F \sin \theta}{EeL} B = \frac{B\sigma_1 (A + B \cos \theta) \sin \theta}{Ee} \quad (2-13)$$

板 B 在 x 方向上的应变如式 (2-14) 所示。

$$\varepsilon_x = \frac{\delta \cos \theta + \delta' \sin \theta}{B \sin \theta} = \frac{\sigma_1 (A + B \cos \theta) (B^2 \cos^2 \theta + E^2 \sin^2 \theta)}{eE^3 \sin \theta} \quad (2-14)$$

整个多层负泊松比结构在 x 方向上的弹性模量如式 (2-15) 所示。

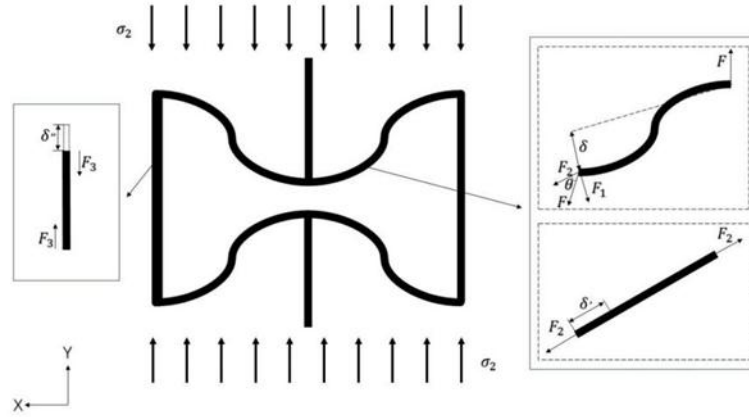
$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{eE^3 \sin \theta}{(A + B \cos \theta) (B^2 \cos^2 \theta + E^2 \sin^2 \theta)} \quad (2-15)$$

在此状态下, 板 B 在 y 方向上的应变如式 (2-16) 所示。

$$\begin{aligned} \varepsilon_y &= \frac{\delta_2}{A - B \cos \theta} \\ &= \frac{\frac{\sigma_1 (A + B \cos \theta) L \cos \theta \cdot B^3}{12eI} \sin \theta - \frac{B\sigma_1 (A + B \cos \theta) \sin \theta}{Ee} \cos \theta}{A - B \cos \theta} \\ &= -\frac{\sigma_1 B (A + B \cos \theta) \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot (B^2 - E^2)}{eE^3 (A - B \cos \theta)} \end{aligned} \quad (2-16)$$

由 (2-14) ~ (2-16) 可知, 整个多层负泊松比结构在 x 方向上的泊松比如式 (2-17) 所示。

$$\nu_x = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{-B \cos \theta (B^2 - E^2)}{(A - B \cos \theta) (B^2 \cot^2 \theta + E^2)} \quad (2-17)$$

(2) y 方向上的弹性模量和泊松比

 图 2-5 单个负泊松比结构在 y 方向上受压

如图 2-5 所示，设多层负泊松比结构整体承受沿 y 方向上的均布载荷，压强为 σ_2 ，此时长度为 B 的部分承受的压力大小为 F ，发生弯曲和拉伸形变，长度为 A 的部分承受大小为 F_3 的压力产生收缩形变。

将 F 分解为垂直于板 B 的力 F_1 和沿板 B 的力 F_2 ，如式 (2-18) 所示。

$$\begin{cases} F = \sigma_2 B L \sin \theta \\ F_1 = F \sin \theta \\ F_2 = F \cos \theta \end{cases} \quad (2-18)$$

板 B 的弯曲形变量如式 (2-19) 所示。

$$\delta = \frac{2F_1 \left(\frac{B}{2} \right)^3}{3eI} = \frac{F_1 B^3}{12eI} = \frac{\sigma_2 B^4 \sin^2 \theta}{eE^3} \quad (2-19)$$

板 B 的拉伸形变量如式 (2-20) 所示。

$$\delta' = \frac{F_2}{EL} B = \frac{B^2 \sigma_2 \sin \theta \cdot \cos \theta}{Ee} \quad (2-20)$$

板 A 的压缩形变量如式 (2-21) 所示。

$$\delta'' = \frac{2 \cdot \frac{F}{DL} \cdot \frac{A}{2}}{e} = \frac{AB \sigma_2 \sin \theta}{De} \quad (2-21)$$

板 A 和板 B 在 x 方向上的应变如式 (2-22) 所示。

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{\delta \sin \theta + \delta' \cos \theta + \delta''}{A - B \cos \theta} \\ &= \frac{\sigma_2 B \sin \theta (DB^3 \sin^2 \theta + De^2 B \cos^2 \theta + Ae^3)}{DeE^3 (A - B \cos \theta)}\end{aligned}\quad (2-22)$$

整个多层负泊松比结构在 y 方向上的弹性模量如式 (2-23) 所示。

$$E_y = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = \frac{DeE^3 (A - B \cos \theta)}{B \sin \theta (DB^3 \sin^2 \theta + DE^2 B \cos^2 \theta + AeE^3)} \quad (2-23)$$

在此状态下，板 B 在 x 方向上的应变如式 (2-24) 所示。

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\frac{\sigma_2 B^2 \sin^2 \theta \cos \theta}{Ee} - \frac{\sigma_2 B^4 \sin^2 \theta \cos \theta}{eE^3}}{B \sin \theta} \\ &= \frac{\sigma_2 B (E^2 - B^2) \sin \theta \cos \theta}{Ee}\end{aligned}\quad (2-24)$$

故多层负泊松比结构在 y 方向上的泊松比如式 (2-25) 所示。

$$\nu_y = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = \frac{DE^2 \cos \theta (e^2 - B^2) (A - B \cos \theta)}{DB^3 \sin^2 \theta + DE^2 B \cos^2 \theta + AE^3} \quad (2-25)$$

(3) 剪切模量

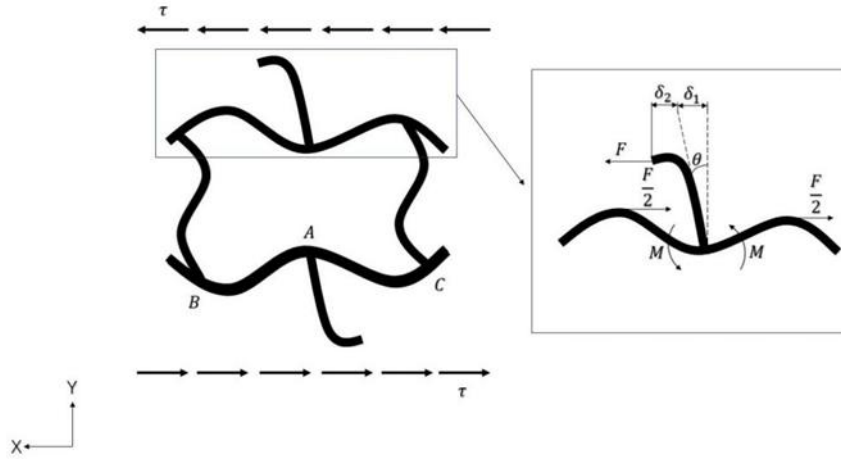


图 2-6 单个负泊松比结构在 x 方向上受压

如图 2-6 所示，设蜂窝结构整体受到 x 方向上的均匀剪切，剪应力为 τ 。此时，A、B、C 三点不发生相对运动，板 B 仅发生扭转变形，A 点处的扭矩为 M 。板 A 承受的剪切力大小为 F ，发生弯曲，同时跟随板 B 绕 A 点旋转^[52]。

板 A 和板 B 在弯曲方向上的惯性矩如式 (2-26) 所示。

$$\begin{cases} I_A = \frac{LD^3}{12} \\ I_B = \frac{LE^3}{12} \end{cases} \quad (2-26)$$

A 点的扭矩大小如式 (2-27) 所示。

$$M = F \cdot \frac{A}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{FA}{4} \quad (2-27)$$

板 A 绕 A 点扭转的角度如式 (2-28) 所示。

$$\begin{aligned} \phi &= \left| \frac{(B^2 - 3B^2)M}{6eI_B B} + \frac{B^2 M}{6eI_B B} \right| \\ &= \frac{MB}{6eI_B} = \frac{FAB}{2eLE^3} \end{aligned} \quad (2-28)$$

板 A 旋转造成的形变量如式 (2-29) 所示。

$$\delta_1 = \frac{A}{2} \tan \phi \approx \frac{A}{2} \phi = \frac{FA^2 B}{4eLE^3} \quad (2-29)$$

板 A 弯曲造成的形变量如式 (2-30) 所示。

$$\delta_2 = \frac{F}{3eI_A} \left(\frac{A}{2} \right)^3 = \frac{FA^3}{2eLD^3} \quad (2-30)$$

板 A 的总形变量如式 (2-31) 所示。

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{A^2 F (BD^3 + 2AE^3)}{4eLE^3 D^3} \quad (2-31)$$

板 A 的剪应变如式 (2-32) 所示。

$$\gamma = \frac{2\delta}{A - B \cos \theta} = \frac{A^2 F (BD^3 + 2AE^3)}{2eLE^3 D^3 (A - B \cos \theta)} \quad (2-32)$$

整个多层负泊松比结构的切应力如式 (2-33) 所示。

$$\tau = \frac{F}{2BL \sin \theta} \quad (2-33)$$

故整个多层负泊松比结构的剪切模量如式 (2-34) 所示。

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{eE^3 D^3 (A - B \cos \theta)}{A^2 B \cos \theta (BD^3 + 2AE^3)} \quad (2-34)$$

由式 (2-17) ~ (2-25) 可以看出, 多层负泊松比结构具有负泊松比特性,

由式 (2-18) ~ (2-34) 可以看出, 多层负泊松比结构力学特性与顶部长度 A , 斜边长度 B , 顶部与斜边的夹角 C , 底部厚度 D 和斜边厚度 E 等参数相关, 因此, 后文将分析这些参数对结构性能的影响。

2.4.3 多层负泊松比结构能量吸收特性分析

多层负泊松比结构作为一种特殊的负泊松比多胞结构, 具有优异的抗冲击特性和能量吸收能力。在承受外部载荷时, 其变形过程可分为三个阶段: 弹性区域、平台区域和密实化区域, 如图 2-7 所示^[56]。

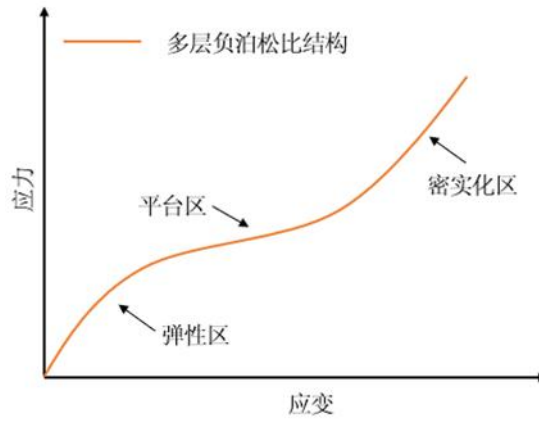


图 2-7 多层负泊松比结构应力曲线

多层负泊松比结构在弹性区发生弹性弯曲变形, 应力随应变增加而上升, 刚度增强。进入平台区后, 元胞出现塑性坍塌、屈曲和断裂, 应力稳定且波动小, 平台应力由元胞塌陷应力决定。密实化区时, 元胞完全塌陷堆叠, 应力迅速上升, 弹性模量趋近基体材料。弹性区应力上升但持续时间短、能量吸收少, 平台区应力稳定、持续时间长, 对能量吸收起关键作用。多层负泊松比结构的负泊松比特性导致高平台应力, 多层设计延长平台区持续期, 提升能量吸收性能^[57]。

在外部载荷作用下, 多层负泊松比结构单位体积通过塑性变形耗散的总能量由应力-应变曲线与应变坐标轴围成的面积表示为 W_1 , 其是衡量结构材料能量吸收特性的参数之一, 表达式如式 (2-35)。

$$W_1 = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2-35)$$

式中, W_1 —结构能量吸收率;

ε_d —进入密实化区的应变值。

鉴于致密阶段后吸收的能量较少，在式（2-35）中予以忽略，仅考虑弹性区与平台区耗散的能量^[54]。单位质量的能量吸收效率 W_2 是衡量材料结构能量耗散效率的另一指标，表达式如式（2-36）：

$$W_2 = \frac{W_1}{\bar{\rho}\rho_s} \quad (2-36)$$

式中， $\bar{\rho}$ —结构的相对密度，

ρ_s —基体材料密度。

对于同一材料结构，其相对密度对吸能效率有显著影响。当多层负泊松比结构的相对密度较低时，内部空隙增大，结构变形空间变大，从而扩大平台区范围^[58]。在设计多层负泊松比结构时，需要综合考虑相对密度和结构强度之间的平衡，以充分发挥其吸能优势并提升整体性能。

2.5 本章小结

本章详细介绍了多层负泊松比结构的设计和力学特性分析。分别从多层负泊松比结构的相对密度、弹性常数和能量吸收特性等方面分析了多层负泊松比结构的力学特性。

第3章 电池包多层负泊松比防撞散热系统设计与建模

为增强新能源汽车电池包的抗冲击能力并改善其散热效果，本章设计了一种基于多层负泊松比结构的防撞散热系统。将多层负泊松比结构排列组合覆盖电池包表面，再增加水冷板形成水冷回路，使结构兼具防撞与散热功能且无需额外散热装置。根据 GB/T44131-2024 建立电池包碰撞模型和水冷系统散热模型，最后对模型进行有限元仿真验证可靠性。

3.1 新能源汽车电池包系统设计

近年来，国内外电动汽车技术发展迅猛，新能源汽车在汽车市场中的占比日益提高。但是新能源汽车仍存在一些安全性问题。特别是电池的安全性能，具体体现在充电过程存在安全风险、车辆遭遇碰撞挤压时电池不安全以及冷却系统安全隐患等方面，这些问题都极有可能给驾驶员带来严重的安全威胁^[59]。

锂离子电池（图 3-1）凭借其充电高效、比能量高、密度小等优点，成为目前市场使用较多的电池能源之一^[55]。新能源汽车使用的锂电池主要分为三种类型：锰酸锂电池、三元材料锂电池和磷酸铁锂电池。评估这些锂电池性能时，安全性、稳定性和高低温耐受性等特性是关键的评价标准。锰酸锂电池存在高温性能、循环性能和储存性能不佳的问题。三元材料锂电池在高低温适应性、循环性、安全性、存储以及各项电性能方面表现较为均衡，并且其电芯可根据镍钴锰的比例进行多种调整提升电池的能量密度^[60]。磷酸铁锂电池虽然安全性能良好，但存在电导率低、体积比能量低、材料成本高以及低温性能差的问题，无法满足电动车在冬季的使用需求。鉴于三元材料锂电池具备较优的性能，本文选择其作为电池包搭载的单体。



图 3-1 三元材料锂电池

电池组是构成新能源汽车动力系统的基本单元，其设计质量直接关系到电池的承载能力、温度控制等安全特性。此外，电池组的设计还会对电池包的尺寸、形态以及安装方式产生影响，进而可能影响到整个车辆的重心分布。电池组的设计遵循四个基本原则分别为：高能量密度原则、轻量化设计原则、安全化设计原则、热管理设计原则^[61]。

电池包均匀分布排列 20 个单体方形电池，如图 3-2 所示。每块单体电池由阳极、阴极和隔膜的大块薄片组成，通过卷起并压入金属或硬塑料外壳中形成立方体，电极通过层层堆叠方式组装，该单体电池需要外壳材料较少，功率密度更高，保护性能优于软包电池。

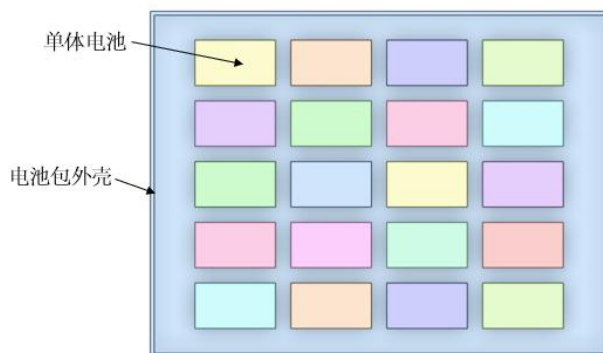


图 3-2 电池包示意图

3.2 新能源汽车电池包碰撞系统建模

多层负泊松比防撞结构旨在为汽车碰撞事故中为电池包提供保护，以国家最新颁布的《燃料电池电动汽车碰撞后安全要求》GB/T44131-2024 和 GB20071 为标准对碰撞系统进行建模^[62]。根据国家标准要求，进行碰撞测试时，移动变形壁障的纵向中垂面轨迹必须垂直于被撞车辆的纵向中垂面，以确保试验条件的一致性^[63]。碰撞速度被设定为 $50\text{km/h} \pm 1\text{km/h}$ ，确保被测车辆与刚性柱以 90 度垂直状态进行碰撞。在实验过程中，被测车辆在台架上被加速至 50km/h ，随后与直径为 254mm、固定在墙上的刚性圆柱发生碰撞，如图 3-3 所示。这一测试要求确保了测试的标准化，便于对不同车辆的安全性能进行准确评估。

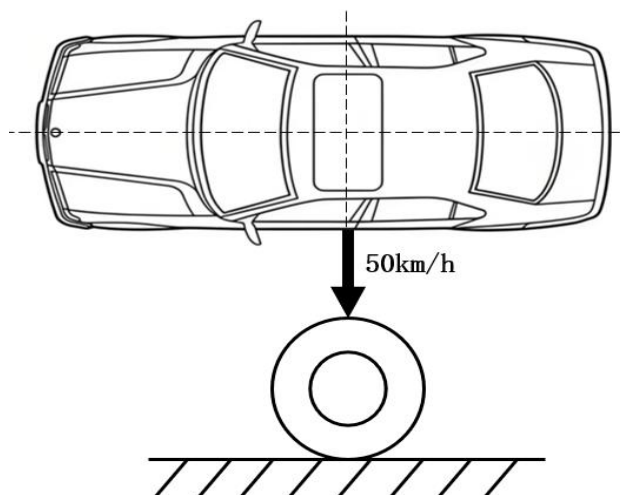


图 3-3 汽车侧面碰撞试验条件

在上述的实验要求中，参与碰撞吸能的是整车的防撞结构，被测对象为整车车辆，如图 3-4 所示。在本文中探究的是多层负泊松比结构的吸能表现和对新能源汽车电池包的防护能力，所以在仿真环境中只设置新能源汽车电池包、刚性柱和多层负泊松比结构三个部分。



图 3-4 整车可变形壁障台车侧面碰撞试验

根据上述试验条件建立了如图 3-5 所示的碰撞有限元模型。该模型包含一个固定的刚性壁柱、一组用于防撞的多层负泊松比结构，以及一个新能源汽车电池包。

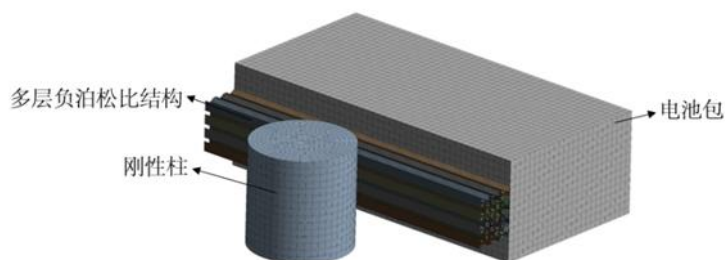


图 3-5 碰撞有限元模型图

在 LS-DYNA 中，刚性柱材料选取为结构钢，在碰撞过程中不发生形变，多层负泊松比防撞结构和电池包材料选取为铝合金材料，材料参数如表 3-1 所示，电池包在碰撞过程中不参与形变即设计为一个整体，由于多层负泊松比结构在碰撞过程中会发生形变，因此多层负泊松比结构自身的连接、多层负泊松比结构与电池包的连接均为绑定连接，即在碰撞过程总不发生脱落。

表 3-1 铝合金物理特性参数

密度(g/cm ³)	熔点范围(°C)	热导率 (W/(m·°C))	比热容 J/(kg·°C)	弹性模量(GPa)
2.81	475-635	130	875	71.7

在新能源汽车的设计中，为了提高在碰撞时的能量吸收能力，经常在车辆的易撞击区域使用通过冲压和焊接工艺制造的中空结构部件，例如吸能盒和门槛梁等。这些常规的中空结构一般呈矩形，主要通过其外层结构的压缩和形变来吸收冲击力。同时，具有正泊松比的构造也被应用于增强车辆的抗冲击和能量吸收的能力。

为验证多层负泊松比结构是否具有较好的防撞性能，设置两个现有结构作为对照组。利用Solidworks 和 Hypermesh 同时建立了如图 3-6 所示的传统空心长方形结构和正泊松比结构的电池包碰撞模型，为保证对照组的真实性，两种结构发生碰撞的仿真条件与多层负泊松比结构碰撞仿真条件相同。

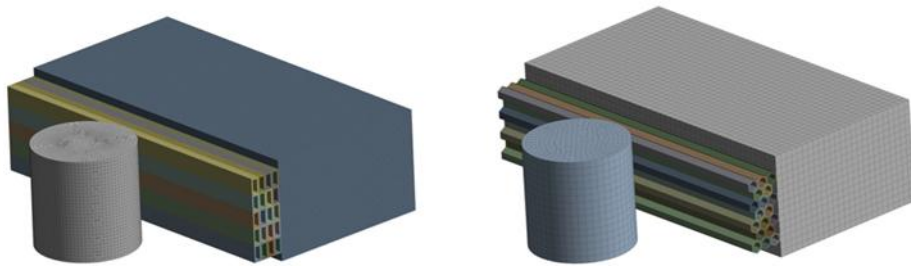


图 3-6 碰撞对比有限元模型图

3.3 新能源汽车电池包散热系统建模

水冷散热系统一般包括泵、水冷板、冷却液、散热装置和管路等组件。系统工作时，冷却液在水冷板与散热器间不断流动。通过泵、传感器和控制器的合作，调节冷却温度，使之与动力电池组的温度相匹配，实现温度平衡^[64]。

电池包液冷散热系统的设计首先需要确保所设计的多层负泊松比结构应尽量满足电池包安全可靠的要求。其次需要确保冷却液的温升情况，确保冷却液

能够对电池包起到降温作用，始终保证电池包在允许温度下正常工作。最后适当考虑经济成本问题，降低制造成本和使用成本，确定各个部件的选取原则。

图 3-7 为电池包液冷散热系统示意图。

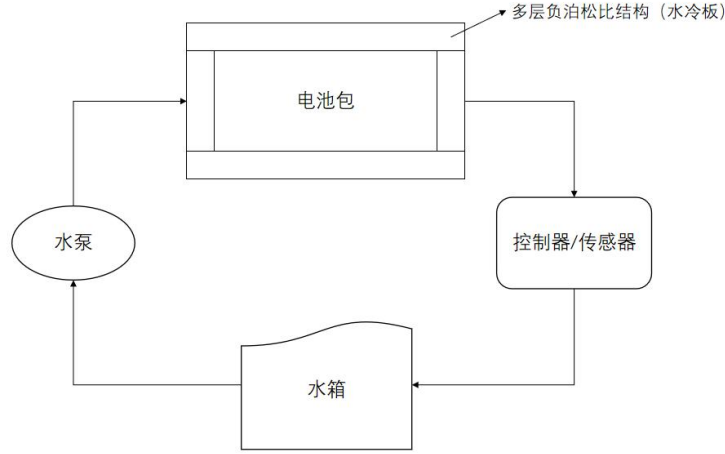


图 3-7 电池包液冷散热系统示意图

在仿真实验中，引入过多的零部件会对仿真结果造成影响也会加大仿真实验的计算量，因此本文仿真实验中不涉及到水泵、水箱、控制器和传感器^[65]，分别构建新能源汽车电池包和水冷板的散热模型，将相同的输入边界条件分别导入两个模型中进行计算，分别获得各自的输出结果。两组模型的输出边界条件分别为电池包温差和水冷板进出口温差。图 3-8 为散热模型原理图。



图 3-8 散热模型原理图

3.3.1 三元锂电池生热机理

三元锂电池在运行过程中会释放大量热量，主要由四个部分构成，分别为反应热 Q_r 、极化热 Q_j 、焦耳热 Q_Ω 和副反应热 Q_s 。在电池正常运行时，副反应的发生概率极低，因此，副反应产生的热量可以忽略。三元锂电池正常工作时所产生的总热量 Q_t 如式（3-1）所示。

$$Q_t = Q_r + Q_j + Q_\Omega \quad (3-1)$$

电池充电过程中，反应热 Q_r 为负值，而放电过程中则为正值，表达式如式（3-2）所示。

$$Q_r = \frac{nmQI}{MF} \quad (3-2)$$

式中， n —电池单体数量；

m —正负电极质量，kg；

Q —正负极电化学反应生成热之和，kJ；

I —充放电电流大小，A；

M —摩尔质量，kg/mol；

F —法拉第常数。

电池放电过程中由于电化学反应和浓差极化产生能量损失，该部分能量损失转化为热量即极化热。极化热 Q_j 的表达式如式（3-3）所示^[66]。

$$Q_j = I^2 R_j \quad (3-3)$$

式中， R_j —等效极化电阻， Ω 。

电流流经锂电池的欧姆内阻 R_Ω 产生的热量即为焦耳热。焦耳热 Q_Ω 的表达式如式（3-4）所示^[67]。

$$Q_\Omega = I^2 R_\Omega \quad (3-4)$$

三元锂电池发生热失控现象的原因主要有三种：热触发、电触发和机械触发。在这三种触发方式中，热触发是最关键的因素。热触发是指在特定条件下，电池单体或电池组内部发生放热连锁反应。这种反应会使电池的温度急剧上升，同时导致内部压力不断增加。当温度和压力达到一定程度时，电池可能会出现起火、爆炸等极其危险的情况。此外，电触发和机械触发也可能间接导致热触发的发生。电触发通常是由于电池内部的短路、过充或过放等情况引起的，这些情况会增加电池内部的热量产生，从而可能引发热失控。机械触发则是由于外部的机械冲击、挤压或穿刺等因素，导致电池结构受损，进而引发内部的热失控反应。这三种触发方式之间存在着复杂的相互关系，图 3-9 详细展示了它们之间的相互作用和影响路径。

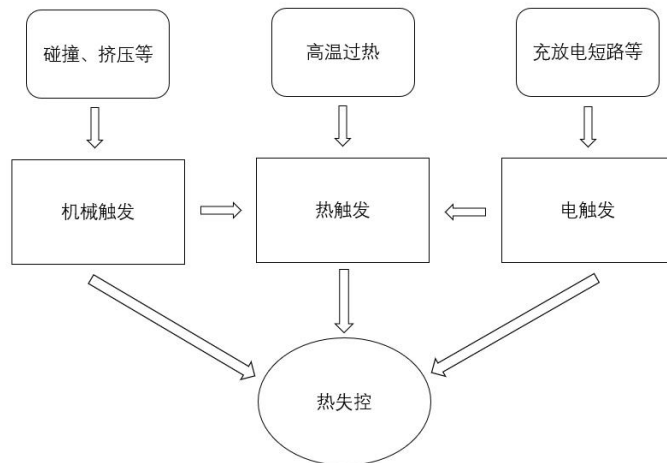


图 3-9 热失控原因

3.3.2 散热器模型

排列组合的多层负泊松比结构中，最外侧的单个多层负泊松比结构被充入冷却液，用作水冷系统的散热器。

针对所建立的散热器模型作出部分假设，假设散热器材料物理性质恒定，忽略表面粗糙度对流动的影响，视冷却液为不可压缩的理想流体，无泄漏和额外热交换，且外表面充分冷却。

利用 Solidworks 和 Hypermesh 设计了适用于 Fluent 的有限元仿真模型。由于多层负泊松比结构中仅最外层具有散热功能，因此将模型简化为仅包含最外层的等效散热器模型。

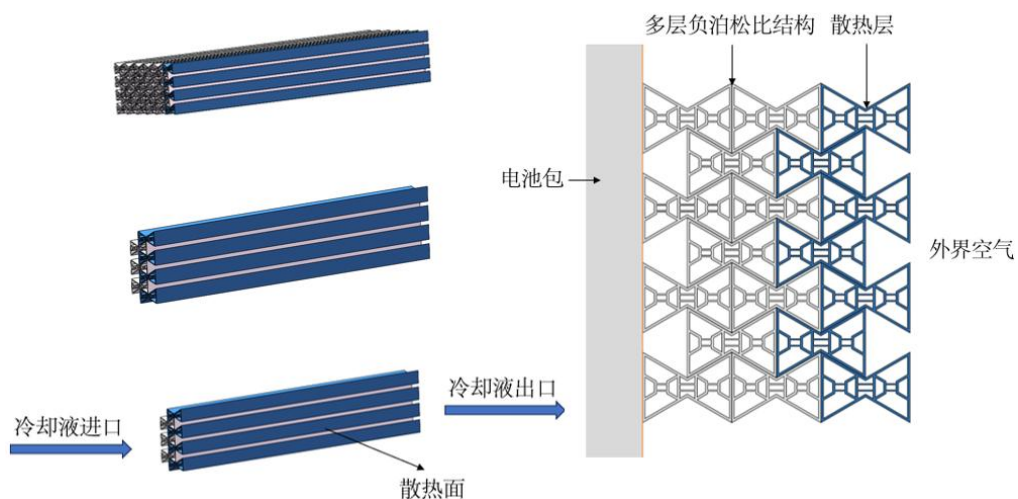


图 3-10 散热器模型

图 3-10 为等效散热器模型的初始模型，将其导入 Fluent 进行仿真，对其进行网格划分，单元大小为 1mm，如图 3-11。

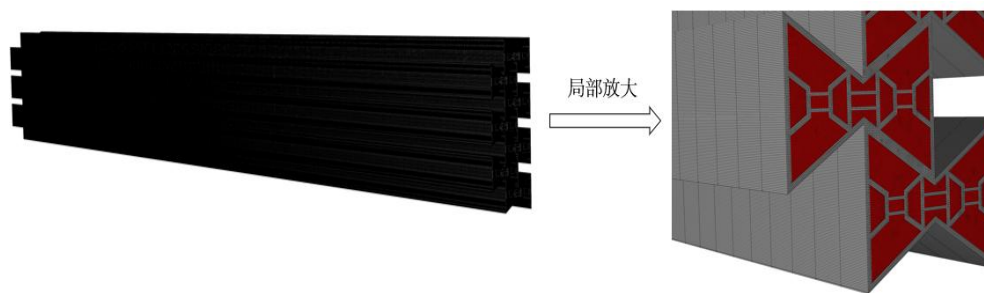


图 3-11 网格划分效果

冷却液选用乙二醇（Ethylene Glycol），其物理参数见表 3-2。散热器入口温度设置为 45℃，散热器材料选用 Fluent 材料库中的铝合金（Aluminum Alloy），其物理参数见表 3-1。在散热器模型中，蓝色区域承担散热功能，冷却液中的热量仅能通过这一表面释放。散热器外管其他部分，进行隔热处理，避免热量流失。

表 3-2 乙二醇冷却液参数

材料	密度 (g/cm ³)	比热容 (kJ/(kg·°C))	导热系数 (W/(m·K))	PH 值
乙二醇	1.034-1.113	3.5-4.2	0.5-0.6	7.5-11

湍流模型的选择与雷诺数 R_e 有关， R_e 高于该值则认为管道中流体的流动状态为湍流，低于该值则为层流^[68]。雷诺数如式(3-5)所示。

$$R_e = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (3-5)$$

式中， ρ —流体密度，kg/m³；

v —流体的特征速度（来流速度），m/s；

μ —流体的动力粘度，Pa·s；

L —流体的特征长度，m。

非圆管道中的 L 如式（3-6）所示。

$$L = \frac{4S}{l} \quad (3-6)$$

式中， S —流通面积，m²；

l —湿周长，m。

经计算初始设计的散热器中水流的 $R_e \approx 348$ ，远低于 $R_{ek} = 2000 \sim 2300$ ，故湍流模型设置为层流模型^[69]。

3.3.3 水冷板模型

水冷板采用铝制扁管，壁厚为 2mm，它与散热器相连，管内流动着乙二醇冷却液。水冷板与电池包单体紧密贴合，能够把电池包单体产生的热量传递给乙二醇冷却液。乙二醇冷却液吸收热量后温度升高，随后流出水冷板，通过管路流入散热器。在散热器中，冷却液将热量释放到外界，温度随之降低，之后再经管路流回水冷板，如此循环往复，实现对电池的降温。

水冷板安放方案分别为横向贯穿安放和底部安放（如图 3-12）。需通过仿真试验才能确定二者中导热效果更好的方案。

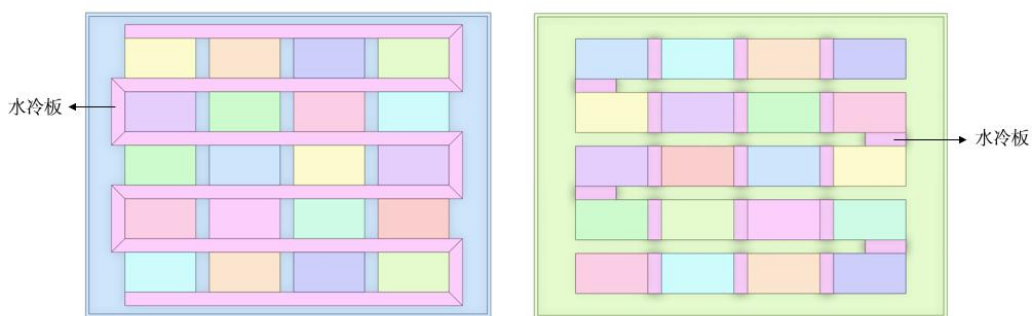


图 3-12 水冷板安放方案

3.4 碰撞系统模型验证

利用 LS-DYNA 对第 3.2 节构建的碰撞模型进行仿真分析，完成后的模型变形情况如图 3-13 所示。碰撞后多层负泊松比结构出现了明显的变形，成功地吸收了大量碰撞能量。同时，该结构在与碰撞方向垂直的方向上显示出向内凹陷的特性，这一现象也证实了其负泊松比的特性。

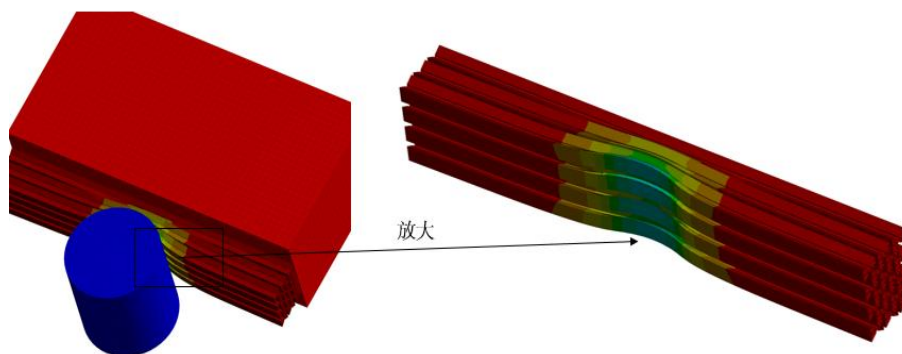


图 3-13 碰撞仿真

在进行仿真研究的过程中，为了确保仿真模型能够精准地反映现实情况，必须对模型中的能量转换过程进行严格的查验，以保证能量守恒定律得到满足。

在显式动力学仿真领域，能量的准确计算尤为重要。显式动力学仿真是一种用于模拟物体在动态载荷作用下的运动和变形过程的数值方法。在这一过程中，模型的总能量包括动能、势能以及由于数值计算方法引入的沙漏能等多种形式的能量。沙漏能是由于数值计算方法的近似性而产生的虚假能量，它可能会对仿真结果的准确性产生影响。通常会将沙漏能的占比作为一个重要的指标来评估仿真模型的可靠性。一般而言，若模型总能量中沙漏能的占比低于 5%，则可以认为模型是可信的。根据图 3-14 的数据显示，本研究中的碰撞模型沙漏能占比低于总能量的 5%，这证实了仿真结果的可靠性。

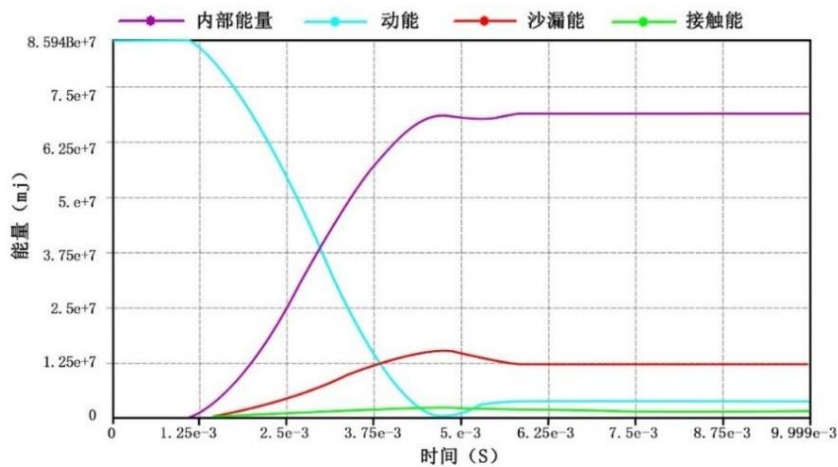


图 3-14 碰撞仿真能量概要

3.5 散热系统模型验证

散热系统模型验证分为三个模块进行验证，分别为网格无关性验证、水冷板安放方案验证和多层负泊松比结构散热性能验证。

(1) 网格无关性验证

在第 3.3.2 节里，对散热器的单元网格进行了设定，尺寸为 1mm。为了检验散热器模型网格尺寸设置的适当性，额外构建了两种不同网格尺寸，分别为 0.85mm 和 1.15mm 的散热器模型，并在一致的边界条件下进行仿真实验。三种不同网格尺寸模型的计算结果见表 3-3。

表 3-3 三种网格尺寸的散热器模型仿真结果

网格尺寸(mm)	0.85	1	1.15
水冷板入口温度(℃)	45.38	45.16	44.92
出口流量(kg/s)	0.2585	0.2594	0.2564
水冷板入口温度偏差	0.84%	0.36%	0.17%
出口流量偏差	3.4%	3.7%	2.6%

由表 3-3 可知，三种网格尺寸的水冷板入口温度分别为 45.38°C 、 45.16°C 和 44.92°C ，与目标温度 45°C 相比，偏差分别为 0.84%、0.36% 和 0.17%，偏差较小。三种网格尺寸的水冷板出口流量分别为 0.2585 kg/s 、 0.2594 kg/s 和 0.2564 kg/s ，与目标流量 0.25 kg/s 相比，偏差分别为 3.4%、3.7% 和 2.6%，偏差较小。网格尺寸对水冷板入口温度和出口流量没有显著影响，三种尺寸的网格计算结果相差不大，网格无关性得到验证。

(2) 水冷板安放方案对比

对水冷板的两种不同安放方案进行比较，采用 Fluent 进行仿真分析，以电池包模型中电池温度作为评价标准，对比两种流动方式的性能优劣，从而确定哪种方案在散热效率方面表现更佳。水冷板与电池包网格划分效果如图 3-15。

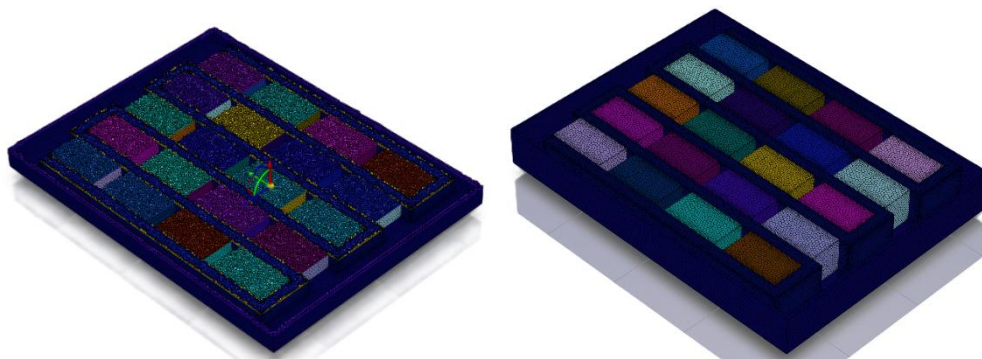
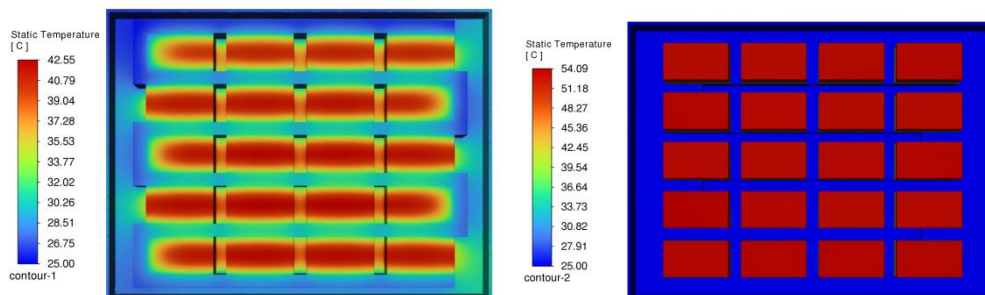


图 3-15 水冷板与电池包网格划分

图 3-16(a)，3-16(b)分别为电池单体横向贯穿安放水冷板和底部安放水冷板的温度分布云图，结果表明横向贯穿安放水冷板电池单体最高温度 42.55°C ，水冷板最高温度 34.06°C ；底部安放水冷板电池单体最高温度 54.09°C ，水冷板最高温度 34.45°C 。显然，当采用横向贯穿安放水冷板的方式时，电池单体的等效模型温度更低，这表明其散热效果更佳。所以，散热系统的水冷板选用横向贯穿安放方案。



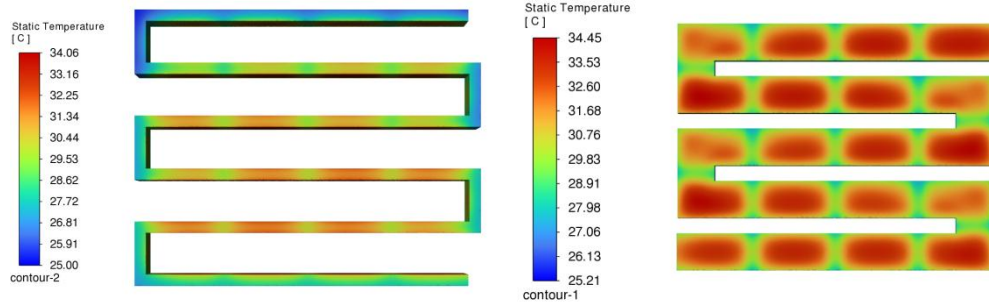


图 3-16(a)横向贯穿散热效果

3-16(b)底部安放散热效果

(3) 多层负泊松比结构散热性能验证

由图 3-16 可知，采用水冷板横向贯穿安放方案的电池单体温度为 42.55°C ，三元锂电池最佳工作温度为 $35\sim 45^{\circ}\text{C}$ ，为更贴近实际试验环境，设定多层负泊松比结构散热模型进口温度为 45°C ，根据 3.3.2 中的仿真条件进行仿真实验。结果表明多层负泊松比散热结构出口温度降低至 26.66°C ，最大温差 T_d 为 18.34°C 。图 3-17 为多层负泊松比结构散热器模型的温度分布云图。

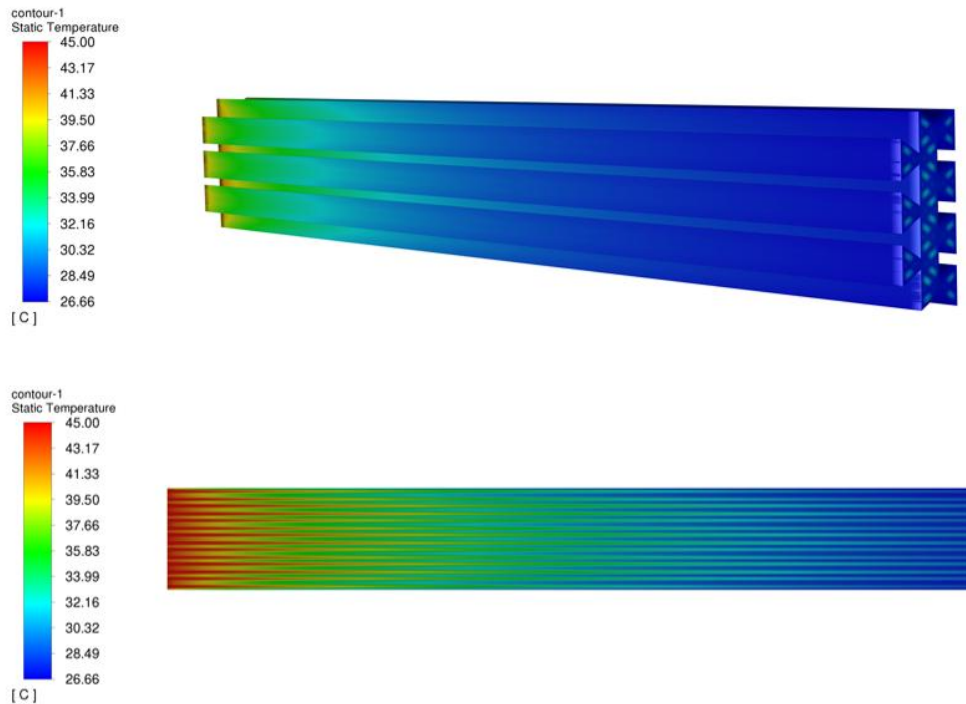


图 3-17 温度分布云图

3.6 本章小结

本章提出了一种新型的多层负泊松比防撞散热系统，以增强新能源汽车电池包在碰撞时的安全性以及提升其冷却效率。通过将多个单一的多层负泊松比结构进行有序组合，创建了一个能够全面包裹电池包侧面的综合结构，并集成

水冷板等关键组件，构建起一套完整的冷却循环系统，搭建了新能源汽车电池包的碰撞模型以及在固定条件下水冷系统的散热模型。通过有限元分析对其进行验证，证实它们的准确性，为后续对系统性能进行深入分析和优化奠定基础。

第4章 电池包负泊松比防撞散热系统性能研究

为探究多层负泊松比结构在防撞和散热方面的表现，本章建立了评价体系，并深入分析了结构尺寸参数对这些性能的具体影响。以第3章设计的系统模型为基础，运用试验设计方法对性能进行了评估。通过正交试验设计选取了50个样本点，确立了设计参数的变化区间以及评价防撞和散热性能的具体指标，对每个样本点的模型进行仿真实验，收集在不同参数设置下的性能数据，应用帕累托分析法绘制出影响力图表，从而深入理解设计参数与性能指标之间的相互关系。

4.1 试验设计

在开展针对多层负泊松比结构的抗冲击及散热效能分析与优化研究过程中，需优先解决两项核心问题：第一，必须明确不同尺寸参数对系统性能影响的异质性，包括影响的幅度与趋势；第二，系统性能的最优化过程必须基于一个能够精确刻画参数变动与性能响应之间关联性的数学模型。为此，需在一定范围内变动各尺寸参数，形成试验空间，并从中选取若干样本点进行试验，以归纳出尺寸参数与性能之间的数学关系。

通过试验设计法，可获取目标参数对设计参数变化的响应，进而识别重点设计参数并构建数学模型，为优化工作提供基础。试验设计法要求样本点均匀分布于设计空间，以全面表征试验空间。常见的样本点选择方法有全因子试验设计、正交实验设计、拉丁方试验设计等^[70]。

4.1.1 全因子试验设计

全因子试验设计是一种全面考虑多因素不同水平组合的试验方法，可系统研究各因素对试验指标的影响及交互作用^[71]。全因子试验设计虽在探究多因素影响方面具有系统性，但存在显著缺点。随着研究因素数量增多以及各因素水平数的增加，试验次数会呈现指数级的迅猛增长^[72]。在数据处理阶段，对海量试验数据进行诸如方差分析等统计处理时，计算量极其庞大。复杂的计算过程不仅耗时久，甚至可能超出普通计算设备的负荷，还容易引入计算误差。当涉及的因素较多时，因素之间交互作用的数量急剧增加，且相互关系错综复杂。

这使得准确解读和分析这些交互作用对试验指标的影响变得异常艰难，往往难以精准把握各因素真正的作用机制。

4.1.2 拉丁方试验设计

拉丁方试验设计是一种多因素试验设计方法，它将试验因素按行和列进行排列，使每个因素的每个水平在每行和每列中都仅出现一次。这种设计方式巧妙地利用了拉丁方的特性，有效控制了两个非处理因素对试验结果的影响，从而提高试验的精度和效率^[73]。从设计原理来看，拉丁方是一个 $N \times N$ 的方阵，如图 4-1 所示，其中 N 代表因素的水平数。在这个方阵中，每个元素都是 1 到 N 的整数，且每行、每列的元素都不重复。在实际试验中，对于三个因素 A、B、C（每个因素三个水平），可通过拉丁方设计安排试验：因素 A 对应行，因素 B 对应列，因素 C 对应元素。这样可在较少试验次数下全面考察三个因素及其交互作用对试验指标的影响。

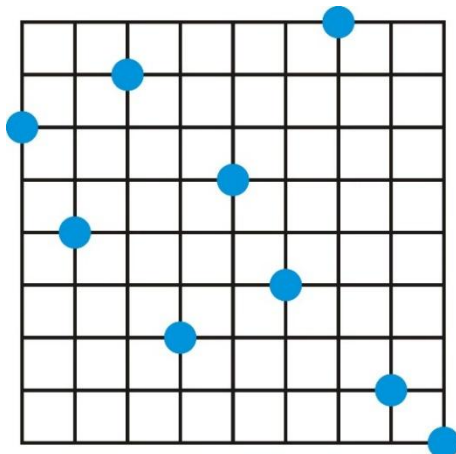


图 4-1 拉丁方试验设计

拉丁方试验设计每行和每列都包含了所有因素的所有水平，可以有效消除行和列方向上可能存在的系统误差，提高试验结果的准确性。然而，拉丁方试验设计存在一定局限性。它要求因素的水平数必须相等，这在实际应用中可能会受到限制。当因素的水平数不一致时，就无法直接使用拉丁方试验设计。此外，拉丁方试验设计主要适用于研究三个因素及其交互作用的情况，对于更多因素的研究，其效果可能不如其他专门针对多因素设计的方法，如正交试验设计等。

4.1.3 正交试验设计

正交试验是一种科学高效的试验设计方法，在众多领域都有着广泛的应用，

其以较少的试验次数获取丰富的信息，从而找到最优的试验条件或因素组合^[74]。

正交试验的理论基础是正交性原理，其核心在于通过精心设计，使试验因素的各水平之间达到均衡搭配^[75]。构建正交表时，遵循两列各水平组合均等出现的原则，使试验点在试验范围内均匀分散且整齐可比。

正交表具有以下特性：一是每列中各数字出现频次相同；二是任意两列形成的有序数对频次也相同。图 4-2 展示了三因子三水平正交试验设计的样本点选取策略。由图 4-2 可见，正交试验设计在样本点的选取上实现了均匀且合理的分布。这种设计方法不仅确保了每个因子的各个水平至少被一个样本点所覆盖，而且还有效地减少了所需进行的试验次数。通过这种优化的样本点选取方式，可以提高试验设计的效率。

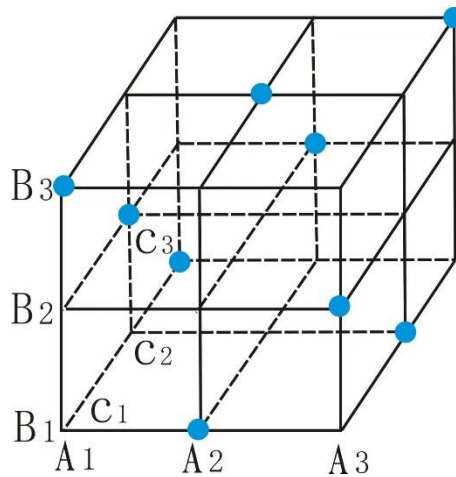


图 4-2 正交试验设计

在多因素试验场景中，因素之间往往存在着复杂的交互作用，即一个因素的水平变化对试验指标产生的影响程度会因其他因素的水平不同而有所差异。正交试验设计凭借其独特的设计方法，能够巧妙地对试验进行合理安排，从而可以深入分析因素之间的这种交互作用，助力全方位、深层次地洞察各因素对试验结果的影响机制，避免因忽略交互作用而导致对试验结果的片面理解^[76]。

与拉丁方试验设计相比，正交试验设计在因素水平数的要求上更为灵活，不局限于因素水平数相等的情况，能适应更复杂多变的实际问题。而且，正交试验设计可容纳的因素数量较多，对于多因素的研究更为适用。因此，本文选择正交试验设计法为本文的试验方法。

4.2 多层负泊松比结构防撞性能分析

本文提出的多层负泊松比防撞结构，旨在为新能源汽车电池包在遭受碰撞时提供有效的防护。确定并量化评价指标对于评估该结构对电池包的保护效能至关重要。在受到冲击时，多层负泊松比结构通过其特有的形变机制来吸收和分散碰撞能量，其中形变程度的量化指标定义为最大侵入量。最大侵入量作为一项关键参数，能够直观反映负泊松比结构的变形状态和能量吸收能力^[77]。若最大侵入量超出预设阈值，这可能表明该结构的能量吸收性能不足，可能导致电池包发生形变，进而对电池单体造成挤压损伤^[52]；相反，若最大侵入量低于预期值，则可能意味着结构的缓冲能力不足，无法有效减轻电池包所承受的冲击力。因此，本文选择电池包多层负泊松比结构最大侵入量（Def）作为评价多层负泊松比结构对电池包保护效果的标准。

图 4-3（a）和图 4-3（b）展示了三种防撞结构在碰撞结束后的最大侵入量和等效应力。从图中能够清晰看到，正方形空心结构以及正泊松比蜂窝结构在遭受碰撞后，形态均发生显著变化，整体呈现出更宽且更扁的状态，这正是典型的正泊松比效应体现。反观多层负泊松比结构，碰撞后表现出截然不同的特性，它呈现出向内收缩的趋势，结构变得更窄且更为密实，这是负泊松比效应的有力印证，多层负泊松比结构的性能得以充分施展。

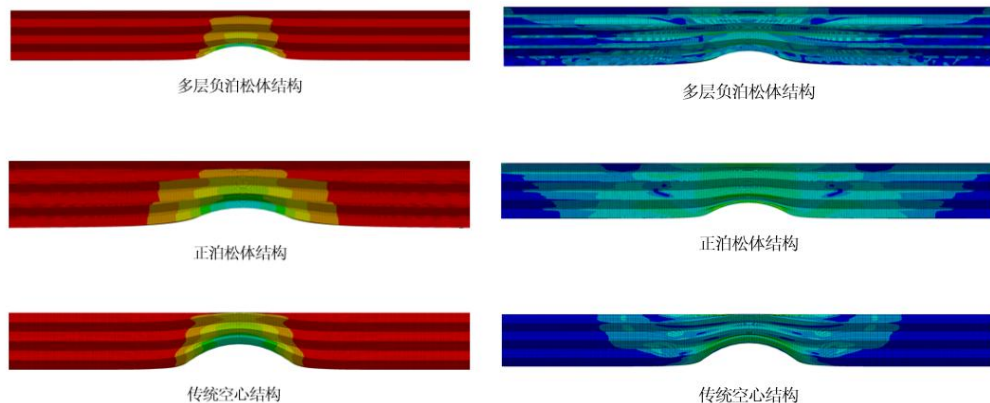


图 4-3(a) 三种结构碰撞最大侵入量云图

图 4-3(b) 三种结构碰撞应力云图

三种防撞结构在相同碰撞条件下的最大侵入量如表 4-1。多层负泊松比结构的最大侵入量为 71.786mm，显著低于正方形空心结构的 85.265mm 和正泊松比结构的 78.694mm，这表明多层负泊松比结构在减少最大侵入量方面更为有效。

综上所述，多层负泊松比结构在防撞性能上明显优于其他两种结构，特别

是在减少最大侵入量和提高能量吸收效率方面，这使其成为在需要高防撞性能的应用中的首选结构设计。

表 4-1 碰撞仿真结果

目标参数	正方形空心结构	正泊松比结构	多层负泊松比结构
最大侵入量 Def(mm)	85.265	78.694	71.786

在确定多层负泊松比结构的防撞性能优于正方形空心结构和正泊松比结构后，为了分析五个结构参数对防撞性能的影响程度，选取 50 个样本点分别进行碰撞仿真，得到仿真结果分析五个结构参数的影响程度。

初始设计结构参数范围如表 4-2。基于正交试验设计，选取 50 组设计参数，并按照第 3 章的方法建立 50 个碰撞试验模型。

表 4-2 初始设计结构参数

设计参数	A(mm)	B(mm)	C(°)	D(mm)	E(mm)
最小值	25	15	55	1	1
最大值	30	20	65	3	3
初始值	28	18	60	2	2

表 4-3 为 50 组碰撞试验模型的仿真结果。

表 4-3 碰撞仿真结果

编号	设计参数					目标参数
	A(mm)	B(mm)	C(°)	D(mm)	E(mm)	Def(mm)
01	25.000	15.000	55.00	1.000	1.000	69.548
02	25.125	15.420	55.69	1.251	1.685	69.682
03	25.278	15.956	55.35	1.254	1.125	69.687
04	24.395	15.698	55.98	1.302	1.365	69.947
05	24.478	15.362	55.48	1.024	1.287	69.874
06	25.569	16.325	56.00	1.402	1.896	70.584
07	25.689	16.598	56.39	1.047	1.765	71.258
08	24.799	15.996	56.78	1.350	1.325	70.358
09	24.898	16.320	56.30	1.560	1.652	71.298
10	25.930	16.257	56.98	1.874	1.204	72.841
11	26.789	15.987	59.34	1.587	1.402	74.626
12	26.321	15.458	57.89	1.985	1.504	68.325
13	26.548	16.254	58.36	1.364	1.023	69.874
14	27.203	15.963	57.63	1.478	1.305	69.354

15	26.985	16.365	58.23	1.652	1.369	68.657
16	27.389	15.247	57.64	1.745	1.354	69.325
17	27.653	15.985	57.62	1.542	1.457	68.741
18	27.587	16.358	58.41	1.745	1.247	72.031
19	26.985	17.258	58.32	1.365	1.352	72.014
20	26.485	17.895	59.41	1.250	1.052	68.392
21	27.935	17.654	59.62	1.682	1.986	67.241
22	27.369	17.985	59.30	1.325	1.875	68.354
23	27.989	17.358	61.20	1.968	1.635	70.241
24	27.548	16.992	62.38	1.957	1.475	69.587
25	28.000	18.000	60.00	2.000	2.000	71.786
26	28.369	18.956	62.30	1.369	1.988	72.354
27	28.365	18.325	61.25	2.687	1.365	73.201
28	28.548	19.365	58.36	2.674	2.354	69.587
29	28.694	19.658	57.20	2.985	2.158	70.012
30	28.987	19.203	59.47	2.417	2.362	68.241
31	29.365	19.308	59.74	2.698	2.412	74.547
32	29.659	18.658	59.36	2.354	2.102	73.241
33	29.958	17.896	60.38	2.102	2.301	69.354
34	29.368	17.365	61.25	2.032	2.411	68.798
35	26.358	18.693	61.35	2.475	2.562	67.526
36	27.958	17.258	62.20	2.639	2.635	68.968
37	27.652	15.968	62.78	2.785	2.985	68.578
38	26.359	15.365	62.87	2.872	2.784	67.985
39	25.265	16.985	62.35	2.514	2.564	70.215
40	28.365	17.257	64.85	2.361	1.985	69.875
41	29.365	17.263	63.47	2.015	2.741	68.948
42	29.547	18.936	63.57	2.965	2.587	69.541
43	29.658	17.895	64.74	2.856	2.325	71.265
44	28.365	16.358	64.38	2.547	2.784	72.564

45	27.685	19.326	64.98	2.148	2.478	70.358
46	27.698	19.357	63.69	2.354	2.847	69.587
47	28.365	19.418	63.37	2.368	2.087	68.584
48	29.658	19.367	63.98	2.874	2.982	69.683
49	29.985	19.699	63.36	2.654	2.876	70.584
50	30.000	20.000	65.00	3.000	3.000	70.258

帕累托原理（即 80/20 法则）指出，在大型系统中，约 20%的关键因子通常会产生 80%的结果，少数关键变量即可掌控全局^[78]。通过绘制影响力图，帕累托分析法能够识别出对目标参数影响最大的设计参数及其影响方向^[52]，这对于确定关键设计参数、开展性能改进与优化工作具有重要意义。

对表 4-3 中的 50 组样本进行计算，并绘制设计参数对多层负泊松比结构的防撞性能指标（最大侵入量 Def）的影响力图，如图 4-4 所示。图 4-4 中展示了五个设计参数（A、B、C、D、E）对防撞性能指标的影响力百分比。设计参数 B 和 E 均显示出较高的影响力，分别超过 30%和 20%，表明这两个参数对性能指标具有显著的影响。设计参数 C 和 D 的影响力也较为重要，均超过了 15%，同样是影响该性能指标的关键因素。设计参数 A 的影响力相对较小，约为 14%，尽管影响力较小，但对性能指标仍有一定的贡献。

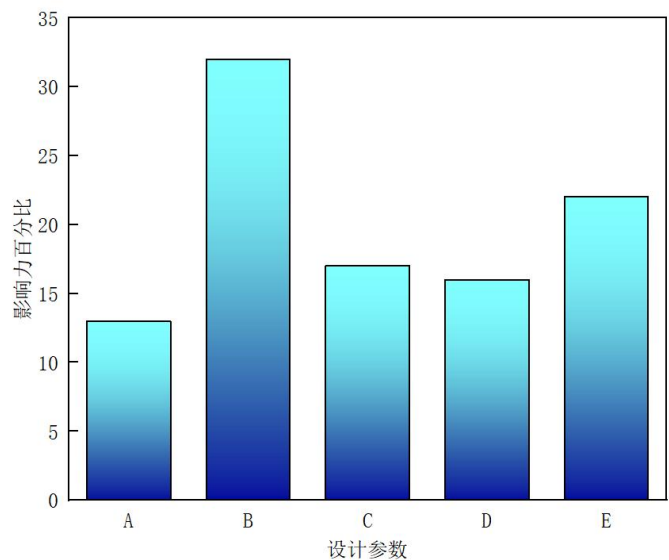


图 4-4 最大侵入量 Def 影响力图

4.3 多层负泊松比结构散热性能分析

散热系统在新能源汽车中扮演着关键角色，其性能优劣直接关乎新能源汽

车的运行稳定性、可靠性与使用寿命。为验证多层负泊松比结构散热系统的有效性，将多层负泊松比结构进出口的温差 T_d 作为判断散热系统性能的指标。

依据相同的设计参数和仿真条件，分别建立了传统空心结构散热器模型及正泊松比结构散热器模型（如图 4-5）。这些模型的建立旨在系统地评估不同结构设计对散热性能的影响，为后续多层负泊松比散热系统优化提供理论依据和实验参照。

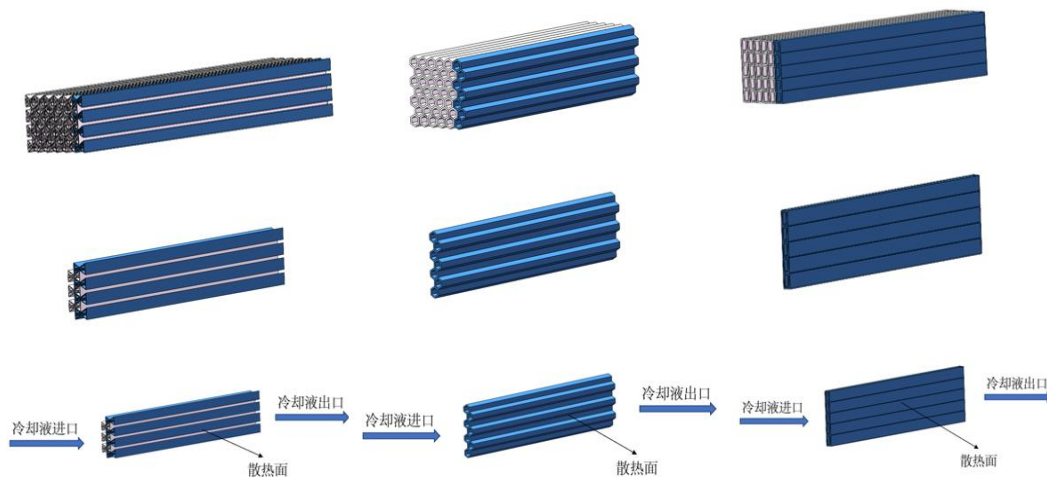
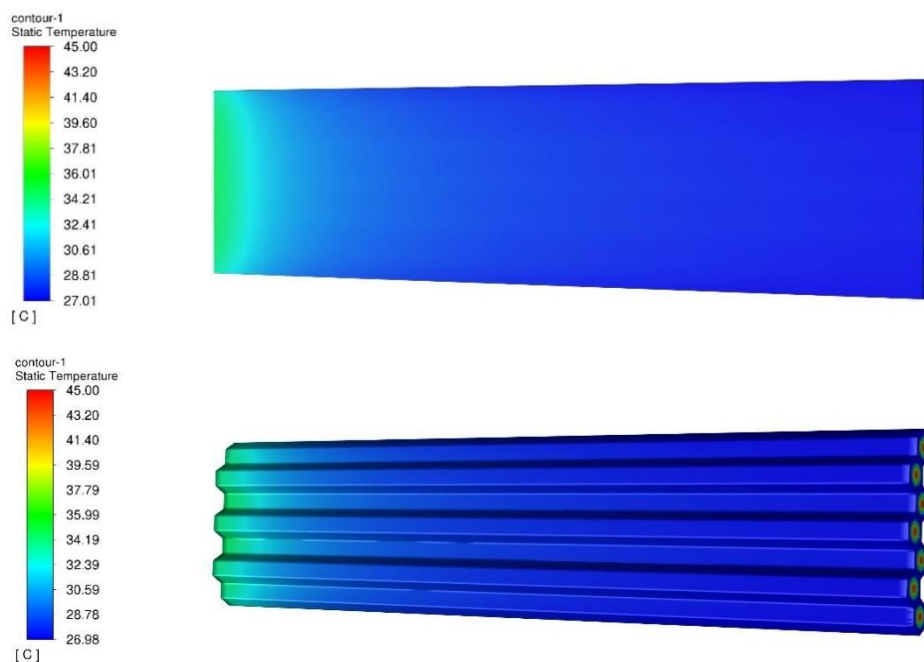


图 4-5 散热器模型

将散热器模型导入 ANSYS Fluent 中进行仿真计算，计算结束后可得到散热器出口的温度分布云图（如图 4-6）。



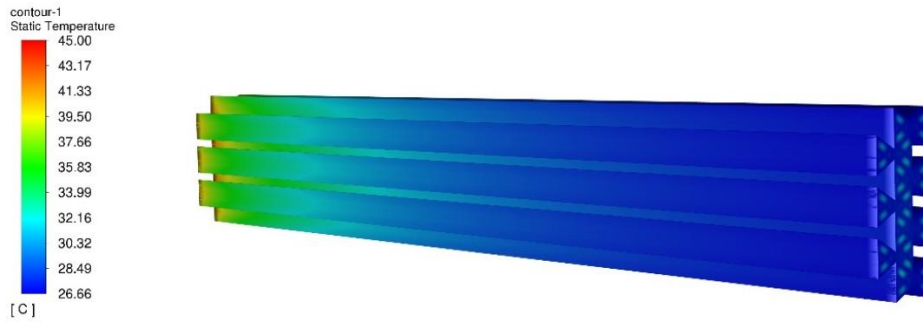


图 4-6 散热效果云图

图 4-6 为传统空心结构散热器模型、正泊松比蜂窝结构散热器模型和多层负泊松比结构散热器模型散热效果图。传统空心结构温度梯度较小，温度较低，温度范围 27.01℃至 45.00℃，边缘区域温度略有升高，但整体温度分布相对均匀。与传统空心结构相比，正泊松比结构的温度分布显示出更明显的梯度变化，温度范围从 26.98℃至 45.00℃，结构内部的温度分层较为明显，这表明热量在正泊松比结构内部的分布不均，可能导致局部过热现象。多层负泊松比结构在温度控制方面表现最佳，温度范围从 26.66℃至 45.00℃，尽管存在一定的温度梯度，但多层负泊松比结构热量分布更为合理，局部过热现象得到有效控制。

综上所述，多层负泊松比结构在热管理方面表现最佳。正泊松比结构和传统空心结构在某些方面也展现出一定的优势，但多层负泊松比结构在温度分布的均匀性和热扩散效率方面均优于其他两种结构。

在确定多层负泊松比结构散热器模型的散热性能优于传统空心结构和正泊松比结构后，为了分析五个结构参数对散热性能的影响程度，选取 50 个样本点分别进行散热仿真，得到仿真结果分析五个结构参数的影响程度。利用正交试验设计方法，以这 50 组设计参数，建立 50 个不同的散热仿真试验模型。表 4-4 为 50 组散热模型的仿真结果。

表 4-4 散热仿真结果

编号	设计参数					目标参数
	A(mm)	B(mm)	C(°)	D(mm)	E(mm)	Td(℃)
01	25.000	15.000	55.00	1.000	1.000	14.63
02	25.125	15.420	55.69	1.251	1.685	15.36
03	25.278	15.956	55.35	1.254	1.125	16.35
04	24.395	15.698	55.98	1.302	1.365	14.85
05	24.478	15.362	55.48	1.024	1.287	14.98

06	25.569	16.325	56.00	1.402	1.896	14.65
07	25.689	16.598	56.39	1.047	1.765	15.89
08	24.799	15.996	56.78	1.350	1.325	16.98
09	24.898	16.320	56.30	1.560	1.652	15.87
10	25.930	16.257	56.98	1.874	1.204	15.36
11	26.789	15.987	59.34	1.587	1.402	15.87
12	26.321	15.458	57.89	1.985	1.504	16.52
13	26.548	16.254	58.36	1.364	1.023	16.39
14	27.203	15.963	57.63	1.478	1.305	15.36
15	26.985	16.365	58.23	1.652	1.369	16.87
16	27.389	15.247	57.64	1.745	1.354	17.25
17	27.653	15.985	57.62	1.542	1.457	18.63
18	27.587	16.358	58.41	1.745	1.247	13.52
19	26.985	17.258	58.32	1.365	1.352	13.65
20	26.485	17.895	59.41	1.250	1.052	14.02
21	27.935	17.654	59.62	1.682	1.986	14.65
22	27.369	17.985	59.30	1.325	1.875	16.25
23	27.989	17.358	61.20	1.968	1.635	17.25
24	27.548	16.992	62.38	1.957	1.475	14.65
25	28.000	18.000	60.00	2.000	2.000	18.34
26	28.369	18.956	62.30	1.369	1.988	17.69
27	28.365	18.325	61.25	2.687	1.365	14.36
28	28.548	19.365	58.36	2.674	2.354	15.63
29	28.694	19.658	57.20	2.985	2.158	16.35
30	28.987	19.203	59.47	2.417	2.362	18.02
31	29.365	19.308	59.74	2.698	2.412	13.96
32	29.659	18.658	59.36	2.354	2.102	14.65
33	29.958	17.896	60.38	2.102	2.301	15.62
34	29.368	17.365	61.25	2.032	2.411	15.30
35	26.358	18.693	61.35	2.475	2.562	16.21

36	27.958	17.258	62.20	2.639	2.635	17.62
37	27.652	15.968	62.78	2.785	2.985	17.21
38	26.359	15.365	62.87	2.872	2.784	14.32
39	25.265	16.985	62.35	2.514	2.564	15.36
40	28.365	17.257	64.85	2.361	1.985	16.32
41	29.365	17.263	63.47	2.015	2.741	14.32
42	29.547	18.936	63.57	2.965	2.587	17.96
43	29.658	17.895	64.74	2.856	2.325	18.92
44	28.365	16.358	64.38	2.547	2.784	14.32
45	27.685	19.326	64.98	2.148	2.478	13.58
46	27.698	19.357	63.69	2.354	2.847	17.36
47	28.365	19.418	63.37	2.368	2.087	14.25
48	29.658	19.367	63.98	2.874	2.982	14.87
49	29.985	19.699	63.36	2.654	2.876	15.36
50	30.000	20.000	65.00	3.000	3.000	16.12

根据表 4-4 绘制设计参数对温差 T_d 这一散热性能指标的影响图，其结果如图 4-7 所示。

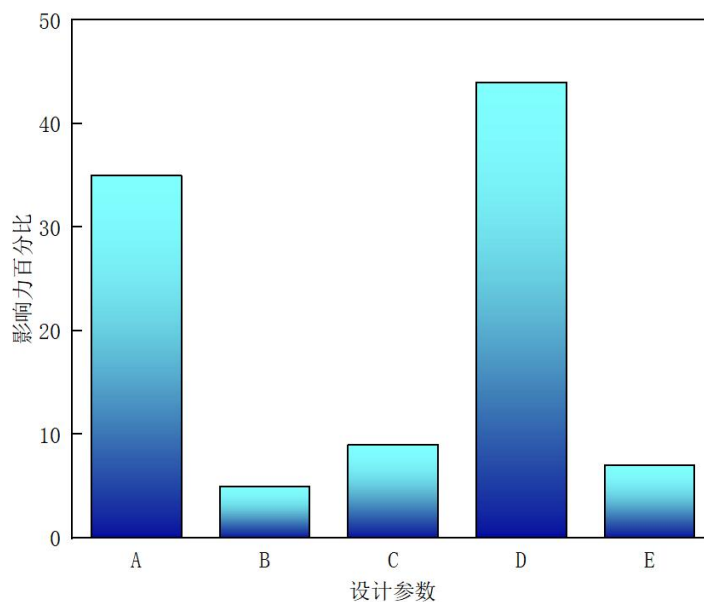


图 4-7 温差 T_d 影响力图

从图 4-7 中可以看出，设计参数 D 的影响力最大，接近 45%，其次是设计参数 A，其影响力约为 35%。设计参数 C 的影响力约为 10%，而设计参数 B 和

E 的影响力相对较小，均在 5%左右。这表明在该性能指标中，设计参数 D 和 A 是最为关键的因素，而 B、C、E 虽然影响较小，但其变化仍会对多层负泊松比结构的散热性能产生一定的影响。

4.4 本章小结

本章对多层负泊松比结构的防撞及散热系统进行性能分析。采用正交试验设计法，分析了各设计参数对系统性能的具体影响，并据此搭建相应的数学模型。通过分析系统的防撞性能和散热性能，确定了对系统性能具有决定性影响的关键设计参数，并量化评估了这些参数对整体系统性能的具体影响。

第5章 电池包防撞散热系统多目标优化研究

多层负泊松比防撞散热系统的性能受多个设计参数的共同影响，在对某一目标参数进行优化时，可能会对其他目标参数的性能产生不利影响。为了在设计空间中识别出在各方面性能均达到最优且平衡的设计方案，采用多目标优化算法求解，以获得一组在多个目标函数之间取得最佳权衡的解。

5.1 近似模型的建立

在多数情形下，变量与响应间的非线性关系较为复杂，这使得针对相关问题开展优化工作颇具难度。建立近似模型能够在较短的时间内提供一个接近最优解的结果，近似模型通常比原始的复杂模型具有更简单的结构和形式，可以更直观地理解问题的本质和关键因素^[79]。在碰撞仿真过程中，若直接把优化算法与复杂的有限元仿真相结合，会产生极高的计算成本。而近似模型通过在数学模型里对响应及设计变量进行逼近，能够显著降低计算量，为解决此类计算难题提供了有效途径。近似模型创建过程如图 5-1 所示。

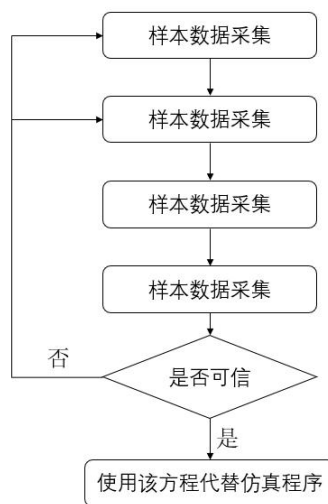


图 5-1 近似模型建立流程

5.1.1 多项式响应面模型

响应面法（Response Surface Methodology, RSM）是一种统计技术，用于研究多个自变量对一个或多个响应变量的影响^[80]。在本文中，采用多项式函数对隐式极限状态函数进行逼近，探究输入变量与响应变量之间的关系，输入变量

和响应变量的关系如式（5-1）。

$$y(x) = \tilde{y}(x) + \alpha \quad (5-1)$$

式中， $y(x)$ —响应实际值；

$\tilde{y}(x)$ —响应近似值；

α —近似值与实际值之间的误差。

近似模型中的 $\tilde{y}(x)$ 可以是一阶、二阶、三阶及四阶多项式。各阶响应面模型表达式如表 5-1 所示^[81]。

表 5-1 响应面模型表达式

阶数	所需最少样本数	公式
一阶	M+1	$\tilde{y}(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_M x_M$
二阶	(M+1)(M+2)/2	$\begin{aligned} \tilde{y}(x) = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \\ & + \cdots + \beta_M x_M + \beta_{M+1} x_1^2 + \beta_{M+2} x_2^2 \\ & + \cdots + \beta_{2M} x_{2M}^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \end{aligned}$
三阶	(M+1)(M+2)/2+M	$\begin{aligned} \tilde{y}(x) = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \\ & + \cdots + \beta_M x_M + \beta_{M+1} x_1^2 + \beta_{M+2} x_2^2 \\ & + \cdots + \beta_{2M} x_{2M}^2 + \beta_{2M+1} x_1^3 + \beta_{2M+2} x_2^3 \\ & + \cdots + \beta_{3M} x_{3M}^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \end{aligned}$
四阶	(M+1)(M+2)/2+2M	$\begin{aligned} \tilde{y}(x) = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \\ & + \cdots + \beta_M x_M + \beta_{M+1} x_1^2 + \beta_{M+2} x_2^2 \\ & + \cdots + \beta_{2M} x_{2M}^2 + \beta_{2M+1} x_1^3 + \beta_{2M+2} x_2^3 \\ & + \cdots + \beta_{3M} x_{3M}^2 + \beta_{3M+1} x_1^4 + \beta_{3M+2} x_2^4 \\ & + \cdots + \beta_{4M} x_{4M}^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \end{aligned}$

根据表中各阶多项式所需的最少样本点数，在正交试验中的空间取值范围内抽取的样本点数为 50，用三阶多项式建立近似模型是最恰当的。近似模型表达式如式 5-2 所示。

$$\tilde{y}(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_M x_M \quad (5-2)$$

$$\begin{aligned}
 & +\beta_{M+1}x_1^2+\beta_{M+2}x_2^2+\cdots\beta_{2M}x_{2M}^2 \\
 & +\beta_{2M+1}x_1^3+\beta_{2M+2}x_2^3+\cdots+\beta_{3M}x_{3M}^2+\sum_{i\neq j}\beta_{ij}x_ix_j
 \end{aligned}$$

对于电动汽车碰撞耐撞性研究，基于 50 个样本点及其仿真结果，采用响应面法建立电池包最大侵入量（Def）和温差（Td）两个目标参数的响应面模型。

电池包最大侵入量 Def 的响应面模型为三阶，如下：

$$\begin{aligned}
 \text{Def} = & -12924.887075 + 18.485538A + 119.301478B + 543.128108C - 4111.169636D + 6266.87279 \\
 & 6E - 11.209552A^2 + 60.176399AB - 5.398950AC - 118.163476AD - 64.996321AE - 55.738167B^2 + 5.414 \\
 & 774BC + 54.321504BD - 150.767147BE - 7.781214C^2 + 161.509398CD - 182.790616CE + 248.106589 \\
 & D^2 - 78.039697DE + 760.119445E^2 + 0.450113A^3 - 1.427725A^2B + 0.026073A^2C - 0.384395A^2D - 0.3626 \\
 & 53A^2E - 1.193034AB^2 + 0.698795ABC + 5.520553ABD + 2.682592ABE - 0.068045AC^2 + 0.066424AC \\
 & D + 1.640610ACE + 4.861003AD^2 + 12.603176ADE - 24.990238AE^2 + 1.531126B^3 + 0.609637B^2C - 4.26 \\
 & 2431B^2D - 7.401663B^2E - 0.488671BC^2 - 1.152331BCD + 5.929050BCE - 8.037374BD^2 + 21.085513BD \\
 & E - 16.321854BE^2 + 0.100285C^3 - 0.852319C^2D + 0.485419C^2E - 4.304672CD^2 - 12.917965CDE + 2.0604 \\
 & 81CE^2 + 14.809980D^3 - 44.557410D^2E + 86.959062DE^2 - 16.039670E^3
 \end{aligned}$$

电池包温差 Td 的响应面模型为三阶，如下：

$$\begin{aligned}
 \text{Td} = & 8846.309075 - 405.657143A - 2180.072792B + 428.427184C - 6729.192418D + 4700.565254 \\
 & E + 6.259734A^2 + 48.991456AB - 13.711215AC + 23.669930AD + 288.747980AE + 62.179187B^2 + 35.5 \\
 & 92759BC + 75.457322BD - 675.817033BE - 12.552672C^2 + 254.917722CD - 83.754813CE - 909.51149 \\
 & 3D^2 + 31.504562DE - 261.563734E^2 - 0.281831A^3 + 0.091001A^2B + 0.259644A^2C + 7.197126A^2D - 7.69 \\
 & 2003A^2E - 0.840978AB^2 - 0.605927ABC - 18.707839ABD + 22.437395ABE + 0.183332AC^2 - 2.790061 \\
 & ACD - 3.948146ACE + 36.275441AD^2 - 46.935886ADE + 26.411011AE^2 - 0.568680B^3 - 0.525798B^2C + \\
 & 5.525060B^2D + 4.345684B^2E - 0.068920BC^2 + 4.454515BCD + 0.069200BCE + 21.598946BD^2 - 47.851 \\
 & 008BDE + 0.112697BE^2 + 0.068994C^3 - 2.719999C^2D + 1.184551C^2E - 1.257599CD^2 + 39.903374CDE - \\
 & 9.294393CE^2 - 71.853155D^3 + 36.245146D^2E - 121.113593DE^2 + 53.962839E^3
 \end{aligned}$$

建立近似模型后，需验证其准确性。均方根误差（Root Mean Square Error，简称 RMSE）是衡量预测模型或估计方法准确性的常用指标之一。该指标的数值越趋近于零，表明模型的预测误差越小。均方根误差的计算方法为式(5-3)^[82]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_n - f_n')^2}{N - p - 1}} \quad (5-3)$$

式中，N—样本点的数量；

p—多项式的项；

n—样本点的序号；

f_n —第 n 个样本点的仿真试验结果；

f_n' —第 n 个样本点处的响应面预测结果。

相关系数 R^2 的取值范围介于 0 至 1 之间，该系数是衡量近似模型预测精度

的重要统计指标，反映了模型拟合数据的能力。 R^2 值越接近 1，表明模型的预测误差越小，模型具有较高的可信度。在模型评估过程中， R^2 值是评价模型有效性的一个关键参数，对于确保模型可靠性和预测准确性具有重要意义。相关系数 R^2 的计算方法为式(5-4)。

$$R^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2 - \sum_{n=1}^N (f_n - f_n')^2}{\sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2} \quad (5-4)$$

式中， $\bar{f}$ —所有样本点的仿真试验结果的平均值。

普遍认为当决定系数 (R^2) 的值超过 0.9 时，所构建的近似模型具有较高的可信度。本文采用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和相关系数法对两种响应面模型的预测误差进行分析，结果见表 5-2。结果表明多项式响应面模型在 R^2 和 RMSE 两个关键评价指标上均满足了预定的精度标准，该模型能够以较高准确度拟合实验数据。

表 5-2 误差分析结果

目标参数	RMSE	R^2
Def	0.10182	0.91254
Td	0.08524	0.90105

5.1.2 BP 神经网络模型

BP 神经网络 (Backpropagation Neural Network) 是一种基于误差反向传播算法的多层前馈神经网络，通过输入层、一个或多个隐含层和输出层的结构来实现对输入数据的处理和学习^[83]。其核心思想是通过前向传播计算网络的输出误差，然后通过反向传播调整网络的权重，以最小化误差。

(1) BP 神经网络的搭建及训练

本文依据第 4 章内容搭建一个三层 BP 神经网络用以描述多层负泊松比结构参数与最大侵入量和进出口温差之间的关系，模型输入层为边长 A、B，角度 C，厚度 D、E 等四个参数，输出层为多层负泊松比结构侵入量和温差，如图 5-2 所示。

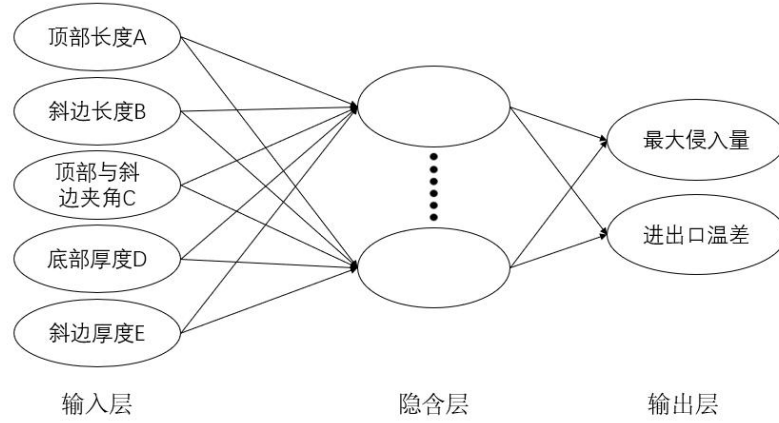


图 5-2 BP 神经网络结构

将 4.2 节和 4.3 节中 50 组仿真数据进行归一化处理并导入到 MATLAB 中，将多层负泊松比结构参数项设置为 X，将碰撞侵入量 Y 作为目标量，X 作为输入量搭建神经网络。将 50 组数据按 70%、15%、15%划分为训练集、验证集和测试集^[84]。训练集用于优化网络权重和偏差，验证集用于检验泛化能力、避免过拟合，测试集用于评估整体性能，作为性能衡量的最终依据^[85]。

在本文中，输入层有 5 个节点，输出层有 2 个节点。为了确保网络的逼近和泛化能力，从而提高预测精度，根据公式（5-5）计算隐含层的节点数。

$$m = \sqrt{n + l} + \alpha \quad (5-5)$$

式中，m—隐含层节点数；

n—输入层节点数；

l—输出层节点数；

α —1-10 之间的常数。

由式 5-5 得，BP 神经网络模型的隐含层约为 14 层，但此时模拟精度不足，无法准确映射函数关系。针对该问题，本文通过增加隐含层节点来提升网络拟合能力。经过多次测试，最终确定隐含层层数为 20 时效果最佳，并据此建立了模型，如图 5-3 所示。

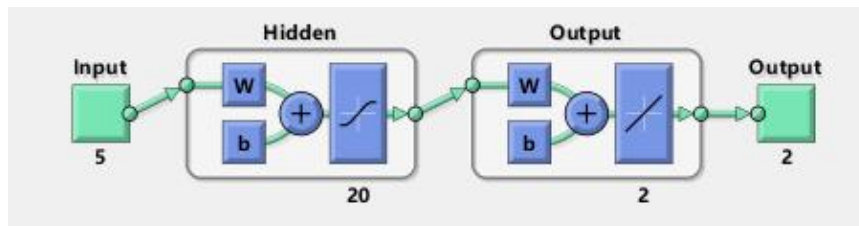


图 5-3 BP 神经网络模型

对于 BP 神经网络，隐含层输出需配备激活函数。本文选择 ReLU 函数作为激活函数（如图 5-4 所示）。ReLU 通过单侧抑制确保输出非负，既缩短计算时间，又提升预测精度。

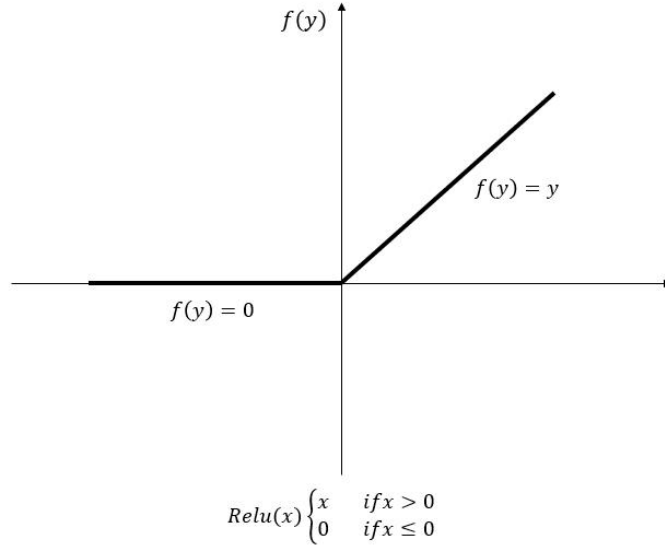


图 5-4 ReLU 激活函数形式

共轭梯度算法（Scaled Conjugate Gradient）具有占用内存小、收敛快且稳定性强等优点，被广泛用于解决复杂线性方程组及非线性函数优化问题，本文选取共轭梯度算法作为训练算法，其迭代公式见式（5-6）^[86]：

$$X_{k+1} = X_k + \alpha_k d_k, d_k = \begin{cases} -g_k, k=1 \\ -g_k + \beta_k d_{k-1}, k \geq 2 \end{cases} \quad (5-6)$$

式中， $g_k = \frac{\partial f(x_k)}{\partial x_k}$ ，

d_k —函数迭代所搜方向，

α_k —学习步长，

β_k —根据不同的共轭梯度进行选取的参数。

BP 神经网络的数据拟合训练效果如图 5-5 所示，可以看出训练了 21 次之后网络训练完成。

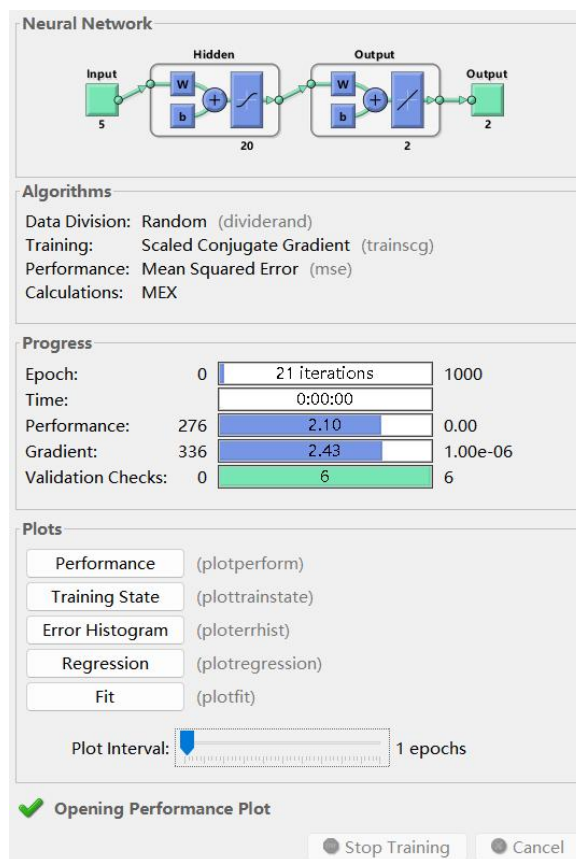


图 5-5 BP 神经网络训练图

从图 5-6 中可以看出，迭代过程进行到第 20 次时，神经网络验证集的均方误差降至 3.5267，表明训练效果良好。迭代进行到第 21 次到第 26 次时，训练集上的均方误差持续降低并开始稳定下来，这表明网络的学习过程逐渐成熟，训练效果趋于稳定。这说明 BP 神经网络已经被训练完毕，没有发生“早熟”和“过拟合”现象。

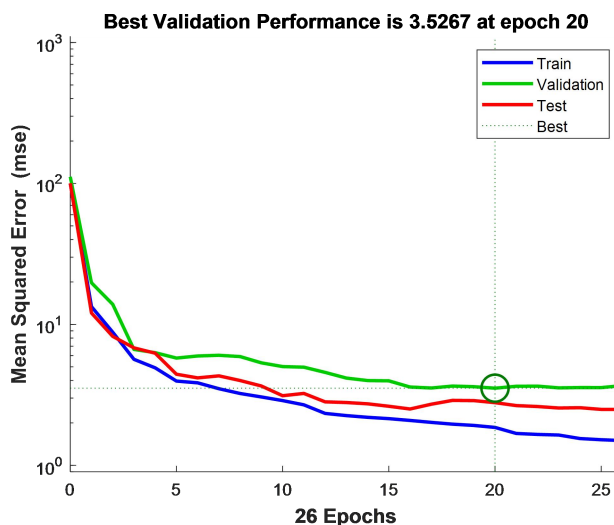


图 5-6 BP 神经网络训练曲线

图 5-7 为 BP 神经网络拟合度曲线图，由图 5-7 可知训练集的拟合回归 R 值为 0.91015，验证集的 R 值为 0.41669，测试集的 R 值为 0.68388，综合拟合回归 R 值为 0.78506，拟合效果较好。

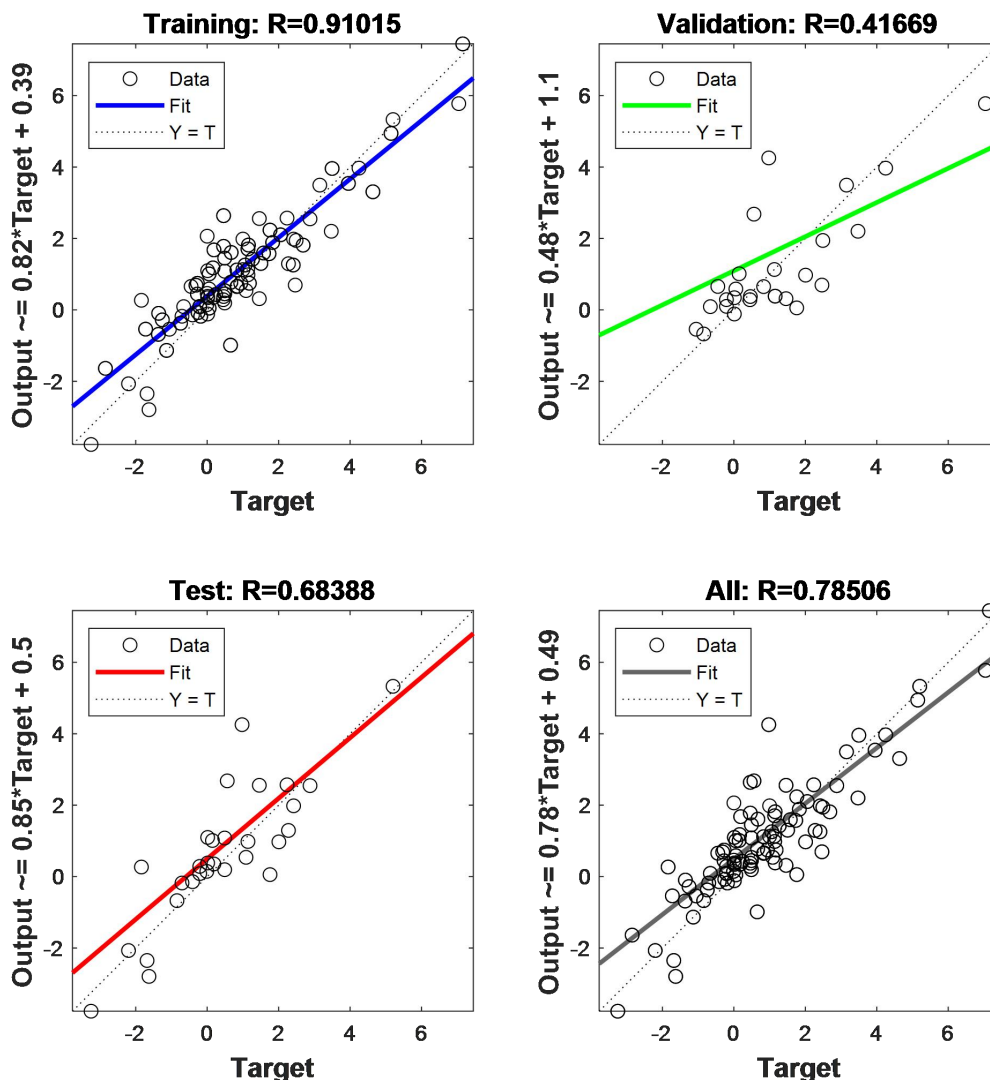


图 5-7 BP 神经网络拟合度曲线

(2) BP 神经网络的验证

图 5-8 为 BP 神经网络的误差直方图，由图 5-8 可知神经网络模型的整体误差在 $[-0.1079 \sim 0.1477]$ ，从误差范围的数值来看，虽然存在一定的误差波动，但整体的预测误差仍然处于可以接受的范围内，这表明 BP 神经网络模型在训练和预测过程中表现出了较好的拟合能力和稳定性。

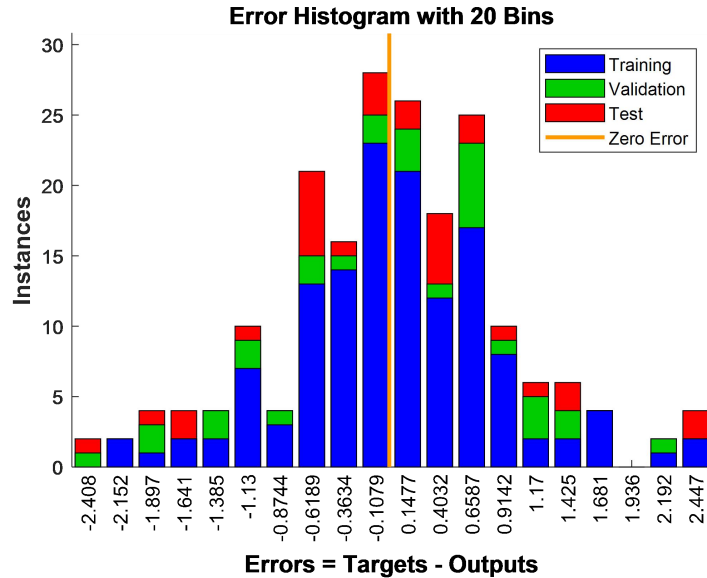


图 5-8 BP 神经网络误差直方图

通过以上数据分析可知，该 BP 神经网络已经经过充分的训练，并且在数据拟合方面表现出色，能够有效地捕捉数据中的复杂模式和关系，在预测任务中展现出高度的准确性。

5.1.3 近似模型对比

在多目标优化中，近似模型的精度是关键，直接关系到预测结果的可信度。因此，本文以测试集的预测精度为依据，从多项式响应面模型和 BP 神经网络模型中选择预测最准确的模型作为多目标优化的近似模型。

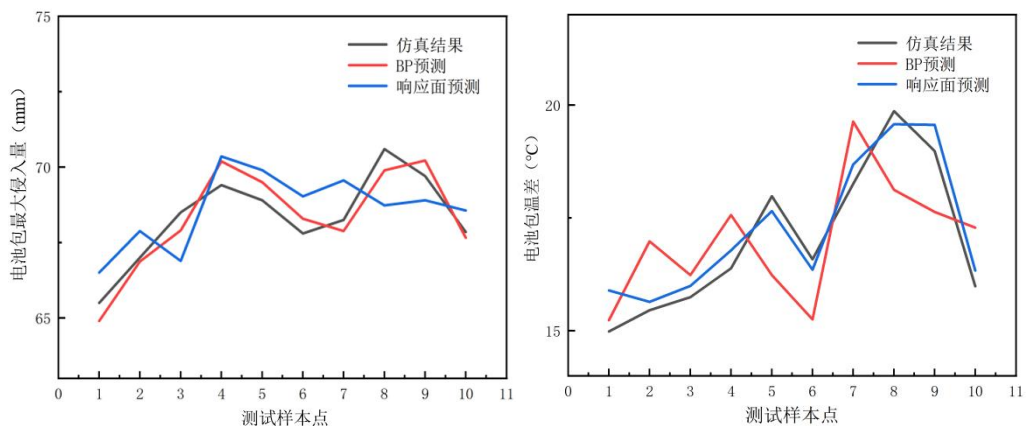


图 5-9 不同模型对 Def 和 Td 的预测结果

从表 4-3 和表 4-4 所示的样本点中随机选取 10 个作为测试集，分别利用多项式响应面模型和 BP 神经网络模型对目标参数进行预测，预测结果如图 5-9。结果表明，多项式响应面模型与实际值（仿真结果）偏差较大，而 BP 神经网络模型的预测结果较为准确，误差较小。因此，本文选择 BP 神经网络模型作

为优化设计的近似模型。

5.2 多层负泊松比防撞散热系统多目标优化设计

确立多层负泊松比结构设计参数与目标参数之间的数学模型后，应用优化算法进行多目标优化分析。鉴于目标参数的多维性，优化过程产生的结果往往表现为一组解集，而非单一最优解，本文选用浣熊优化算法（Raccoon Optimization Algorithm, ROA）解决该问题。该算法以其在处理复杂多目标优化问题时的高效性和鲁棒性而被选中，旨在实现设计参数的最优配置，从而提升系统整体性能。

5.2.1 多层负泊松比防撞散热系统优化模型

在对多层负泊松比防撞散热系统进行优化时，需要综合考虑系统的防撞性能和散热性能，以确保其在复杂工况下能够同时满足安全防护和高效散热的需求。我们主要关注两个核心性能评价指标，即防撞性能指标（Def）和散热性能指标（Td）。防撞性能指标 Def 反映了系统在受到外部冲击时的缓冲能力和能量吸收效率，数值越小表示系统的防撞性能越好，散热性能指标 Td 则衡量系统在运行过程中对热量的传递和散发能力，数值越大表示散热效果越显著。

在构建系统的优化模型时，首先需要明确优化的目标方向以及相应的约束条件。优化的目标是使防撞性能指标 Def 尽可能趋近于最小值，同时使散热性能指标 Td 尽可能趋近于最大值。由于在优化模型中直接最大化 Td 较为复杂，因此我们采用其倒数 $1/T_d$ 作为优化目标的一部分，从而将问题转化为最小化 Def 和 $1/T_d$ 的组合。

基于上述优化目标的设定，我们进一步建立了多层负泊松比防撞散热系统的优化数学模型，如式（5-7）所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min}(Def, 1/T_d) \\ 25\text{mm} < A < 30\text{mm} \\ 15\text{mm} < B < 20\text{mm} \\ 55^\circ < C < 65^\circ \\ 1\text{mm} < D < 3\text{mm} \\ 1\text{mm} < E < 3\text{mm} \end{array} \right. \quad (5-7)$$

5.2.2 浣熊优化算法

浣熊优化算法（Raccoon Optimization Algorithm, ROA）是一种受浣熊觅食、生存等行为启发而提出的新型元启发式优化算法^[87]。浣熊优化算法由勘探阶段和开发阶段组成。初始阶段会随机生成一组浣熊个体，每个个体代表问题的一个潜在解，这些个体在解空间中随机分布，根据问题的目标函数，计算每个浣熊个体的适应度值，适应度值反映了个体所代表的解的质量，值越优表示解越接近最优解。

勘探阶段：在搜索空间中，长鼻浣熊种群的更新机制是基于其捕食鬣蜥的自然行为模式进行建模的。具体而言，种群中的部分个体通过攀爬树木以接近鬣蜥，并通过干扰将其驱赶下树，与此同时，其余个体则在树下保持静候状态，待鬣蜥落地后迅速发起攻击并完成猎杀^[88]。这一行为策略使得长鼻浣熊种群能够在搜索空间内实现位置的动态调整，从而有效覆盖不同的搜索区域，进而显著提升了算法的全局搜索能力。

在 ROA 设计中，当前种群中的最佳个体的位置 x_{best}^t 假定为鬣蜥的位置，假设长鼻浣熊的一半会爬上树，另一半则会等待鬣蜥落到地上^[89]。因此，用式（5-8）数学模拟长鼻浣熊在树上的位置。

$$x_i^{t+1}(j) = x_i^t(j) + r \cdot (x_{best}^t(j) - I \cdot x_i^t(j)), i = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} \quad (5-8)$$

在鬣蜥落到地面后，它被放置在搜索空间中的随机位置。基于这一随机位置，地面上的长鼻浣熊在搜索空间中移动，并利用式（5-9）更新位置。

$$Iguana_{ground}^t(j) = lb_j + r \cdot (ub_j - lb_j) \quad (5-9)$$

$$x_i^{t+1}(j) = \begin{cases} x_i^t(j) + r \cdot (Iguana_{ground}^t(j) - I \cdot x_i^t(j)), & \text{fitness}(Iguana_{ground}^t) < \text{fitness}(x_i^t) \\ x_i^t(j) + r \cdot (x_i^t(j) - Iguana_{ground}^t(j)), & \text{else} \end{cases}$$

式中，N—种群规模，

t—当前迭代次数，

lb_j —第 j 维变量的下界，

ub_j —第 j 维变量的上届，

fitness—计算适宜度。

r—[0,1] 中间的随机数，

i —随机数，来自整数集合 $\{1,2\}$ 。

$Iguana_{ground}^t$ —鬣蜥落到地面后的新位置，

$x_i^t(j)$ —第 i 个个体的第 j 维变量值。

对于长鼻浣熊个体而言，若通过计算得到的新位置能够导致目标函数值的优化，则该新位置将被采纳，反之，若新位置未能实现目标函数值的改善，则个体将保留于其先前所处的位置^[90]。这一策略旨在确保算法在搜索过程中能够持续向目标函数的最优解方向进展，同时避免陷入局部最优。即执行一次贪婪选择，如式（5-10）所示。

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^{t+1}, & fitness(x_i^{t+1}) < fitness(x_i^t) \\ x_i^t, & else \end{cases} \quad (5-10)$$

开发阶段：在搜索空间中，长鼻浣熊的位置更新机制是基于其逃避捕食者行为的数学建模。当面临捕食者的攻击时，长鼻浣熊会迅速逃离当前位置，并移动到一个相对安全的邻近区域。这一行为模式使得种群能够在搜索空间中实现局部位置的调整，从而有效增强算法在局部搜索中的开发能力。为了模拟这种行为，算法在每个长鼻浣熊的位置附近随机生成一个新位置，如式（5-11）和式（5-12）所示。

$$lb_j^{local} = \frac{lb_j}{t}, ub_j^{local} = \frac{ub_j}{t}, t = 1, 2, \dots, T \quad (5-11)$$

$$x_i^{t+1}(j) = x_i^t(j) - (1 - 2r) \cdot (lb_j^{local} + r \cdot (ub_j^{local} - lb_j^{local})) \quad (5-12)$$

式中， r — $[0,1]$ 中间的随机数，

T —最大迭代数。

lb_j^{local} ， ub_j^{local} —第 J 维变量随着迭代次数而更新的上下界。

如果新计算的位置改善了目标函数的值，则该位置是可接受的，使用式（5-10）进行模拟，即再执行一次贪婪选择。图 5-10 为浣熊优化算法的流程图。

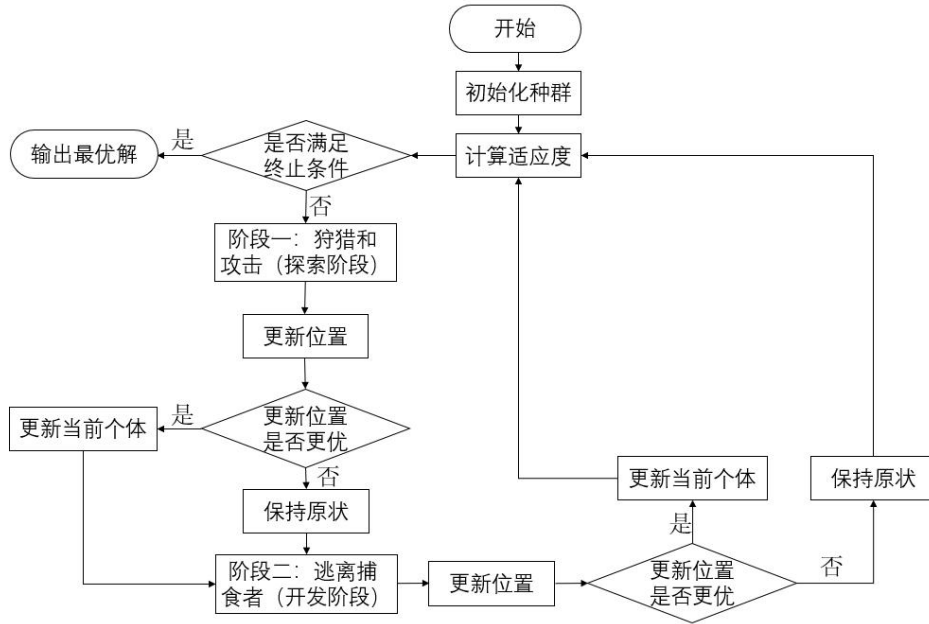


图 5-10 浣熊优化算法流程图

5.2.3 ROA-BP 神经网络的搭建

图 5-11 是浣熊优化算法优化神经网络的迭代演化历程曲线，经过 50 代的演化，在第 17 代时逐渐趋于稳定，没有发生“早熟”和“过拟合”现象，适应值也是最优的。

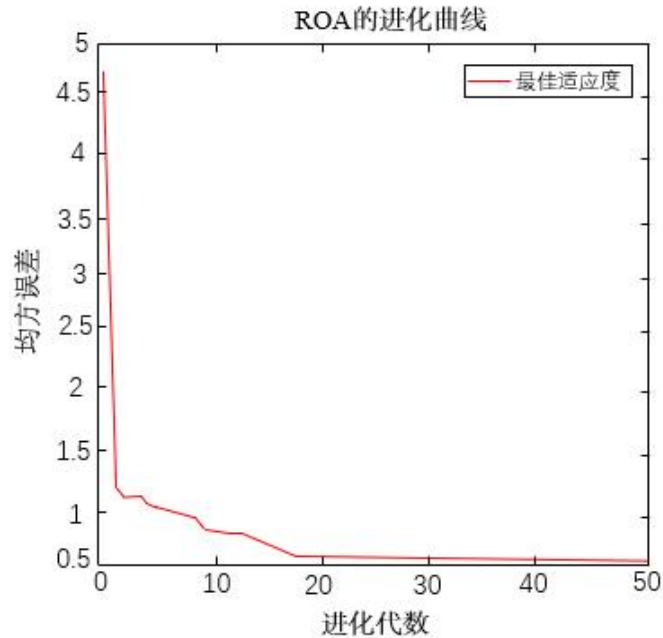


图 5-11 ROA-BP 神经网络迭代过程曲线

采用 ROA 方法对 BP 神经网络进行了改进，使整个系统的性能有了很大的提高，迭代了 18 次即完成了神经网络的训练，效率得到显著提升。均方误差由 3.5267 降低至 0.6852，综合回归 R 值从 0.78506 提升至 0.92997，优化效果明显，

其拟合度曲线如图 5-12 所示。

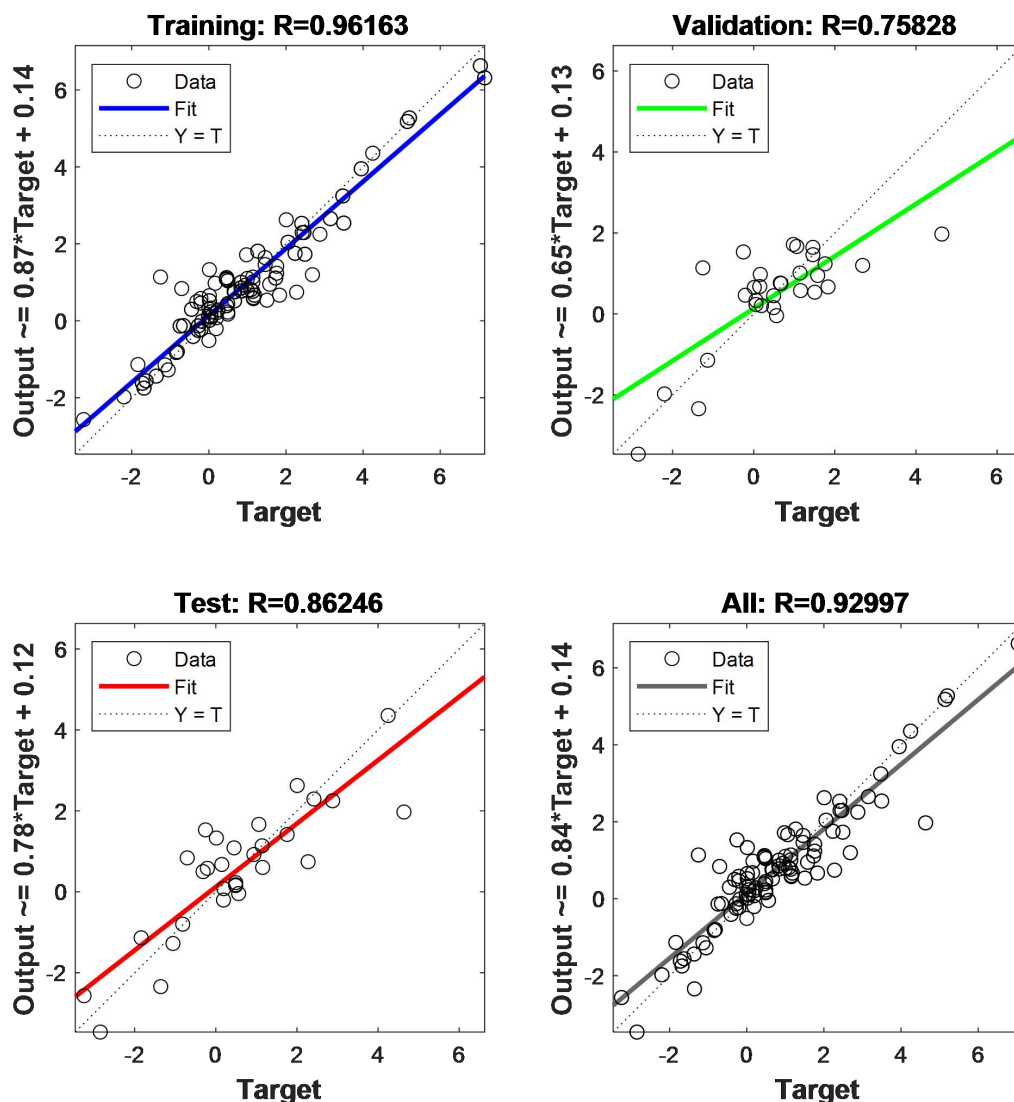


图 5-12 ROA-BP 神经网络拟合度曲线

从图中可以看到，与 BP 神经网络相比 ROA-BP 的拟合效果得到了明显的提高，优化前后拟合回归系数值对比如表 5-3 所示。

表 5-3 优化前后神经网络 R 值对比表

网络模型	训练集	验证集	测试集	综合
BP 神经网络	0.91015	0.41669	0.68388	0.78506
ROA-BP 神经网络	0.96163	0.75828	0.86246	0.92997

图 5-13 为 ROA 优化 BP 神经网络前后预测值与真实值的比较曲线，由图 5-13 可知，ROA-BP 预测偏差与真实值之间的吻合度较高，表明 ROA-BP 模型的预测精度更高。相比之下，BP 模型的预测偏差与实际值的偏差较大，显示出预测精度不足。

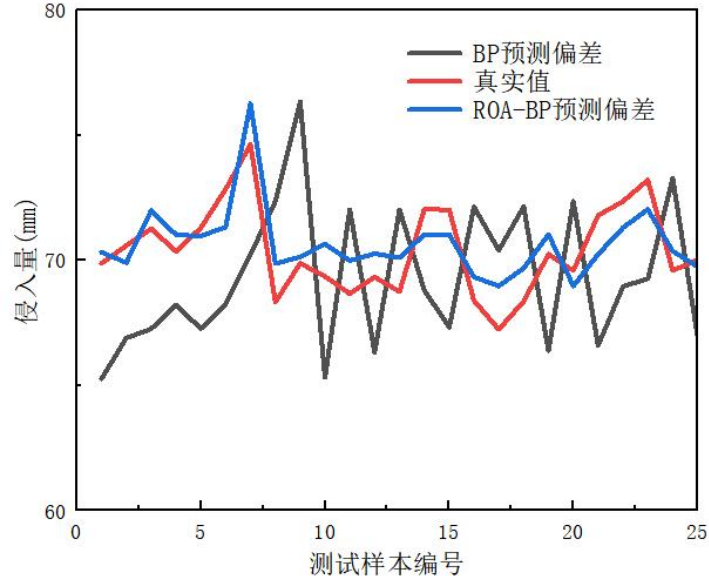


图 5-13 ROA-BP 神经网络预测对比图

5.3 多目标优化结果

利用浣熊优化算法所获结果为整个种群中全部个体构成的 Pareto 前沿解集。鉴于 Pareto 前沿解集中的每个个体均属于最优解，个体之间不存在相互支配的关系，故而需运用标准边界交叉技术，从该解集中筛选出最接近理想解且性能最为均衡的个体，将其作为最终的优化成果。对比原始设计与优化后的结果，能够清晰地发现，经优化处理后，防撞散热性能得到了显著提升。

5.3.1 标准边界交叉法

在多目标优化问题中，多个相互冲突的目标函数需要同时优化，而 Pareto 前沿体现了这些目标间的最优权衡关系。标准边界交叉法（Normal Boundary Intersection, NBI）^[91]是生成 Pareto 前沿近似的重要方法之一，其可以系统地探索并确定这些权衡点。

假设多目标优化问题有 m 个目标函数 $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$ ，其中 x 是决策变量向量， $x \in \Omega$ ， Ω 为可行域。

首先，要确定各个目标函数的理想点 z^* ，即每个目标函数在不考虑其他目标时能达到的最优值，这些最优值组成的点就是理想点 z^* 。理想点 z^* 计算公式如式 5-13。

$$z^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_m^*) \quad (5-13)$$

式中, $z_i^* = \min_{x \in \Omega} f_i(x)$;

$i = 1, 2, \dots, m$ 。

这一步是为了确定每个目标函数单独优化时能达到的最优值, 这些最优值组成理想点。然后构建一个与目标空间相关的超平面, 该超平面的构建通常基于理想点以及各目标函数在可行域边界上的取值所确定的边界点。假设理想点 $z^* = (z_1^*, z_2^*)$, 边界点为 (z_1^+, z_2^+) 和 (z_1^-, z_2^-) , 超平面 (此时为直线) 方程可以表示为参数方程形式, 如式 5-14 所示^[92]。

$$\begin{cases} z_1 = z_1^* + \alpha_1 (z_1^+ - z_1^*) + \beta_1 (z_1^- - z_1^*) \\ z_2 = z_2^* + \alpha_2 (z_2^+ - z_2^*) + \beta_2 (z_2^- - z_2^*) \end{cases} \quad (5-14)$$

式中 α_i 和 β_i 是参数, 且满足一定的约束条件 ($\alpha_1 + \beta_1 = 1, \alpha_2 + \beta_2 = 1$), 通过调整这些参数在超平面上取点。

在构建好的超平面上均匀地选取一系列点, 这些点对应着不同的目标权重组合, 通过一定的数学变换可将这些点转化为权重向量, 每个权重向量代表了一种对各个目标的重视程度的权衡。权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, 假设在超平面上取到的点为 $z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$, 权重向量 w_i 计算式如式 5-15 所示。

$$w_i = \frac{z_i - z_i^*}{\sum_{j=1}^m (z_j - z_j^*)} \quad (5-15)$$

基于这些权重向量, 构造标量化函数, 将多目标问题转化为单目标优化问题, 常见的标量化函数形式有加权和函数等。标量化表达式如式 5-16 所示。

$$g(x, w) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(x) \quad (5-16)$$

将多目标问题转化为以 $g(x, w)$ 为目标函数的单目标优化问题。

最后利用优化算法求解 $\min_{x \in \Omega} g(x, w)$, 得到的最优解就是在相应权重向量下 Pareto 前沿上的近似解。通过在超平面上选取足够多的点, 生成足够丰富的权重向量 w , 并重复上述求解过程, 就能得到一系列的 Pareto 前沿近似解, 这些解共同构成了对 Pareto 前沿的近似表示, 提供了在多目标之间进行权衡的有效

信息，有利选择合适的最优解。

根据式（5-13）~（5-16），可得到多层负泊松比防撞散热系统最优设计的参数组合。最优设计参数如表 5-4。

表 5-4 最优设计参数表

参数	A(mm)	B(mm)	C(°)	D(mm)	E(mm)	Def(mm)	Td(°C)
值	28.645	18.794	62.68	2.862	2.262	66.246	19.864

5.3.2 结果分析

依据表 5-3 中的最优设计参数，构建多层负泊松比防撞散热系统的最优设计方案模型，并对该模型进行仿真分析。模型预测的仿真结果如表 5-5。

表 5-5 模型预测结果

参数	初始设计	最优设计 (仿真)	最优设计 (预测)	预测误差
设计参数	A(mm)	28.000	28.645	
	B(mm)	18.000	18.794	
	C(°)	60.00	62.68	/
	D(mm)	2.000	2.862	
	E(mm)	2.000	2.262	
目标参数	Def(mm)	71.786	66.026	66.246
	Td(°C)	18.34	19.66	20.12

由表 5-4 可以看出，目标参数的仿真结果和预测结果的差距不大，侵入量 Def 预测误差为 0.33%，温差 Td 预测误差为 2.34%。这表明 ROA-BP 模型能够准确反映多层负泊松比防撞散热系统的性能。从初始设计与优化设计的模拟结果对比来看，相对于初始设计，优化设计的防碰撞散热性能提升明显。电池包防撞结构侵入量从 71.786mm 下降到 66.026mm，降低了 8.02%，电池包散热结构温差从 18.34℃上升到 19.66℃，升高了 7.2%。

综上所述，最优设计的多层负泊松比结构在抗冲击和散热方面均优于初始设计。不仅显著减轻了电池包在受到碰撞时所承受的冲击力，而且有效减少了碰撞过程中对电池包及电动汽车的挤压损伤。此外，优化设计下电池包的最高温度得到有效控制，这表明该结构具备优越的散热性能，能够更加有效地调节锂电池的工作温度。

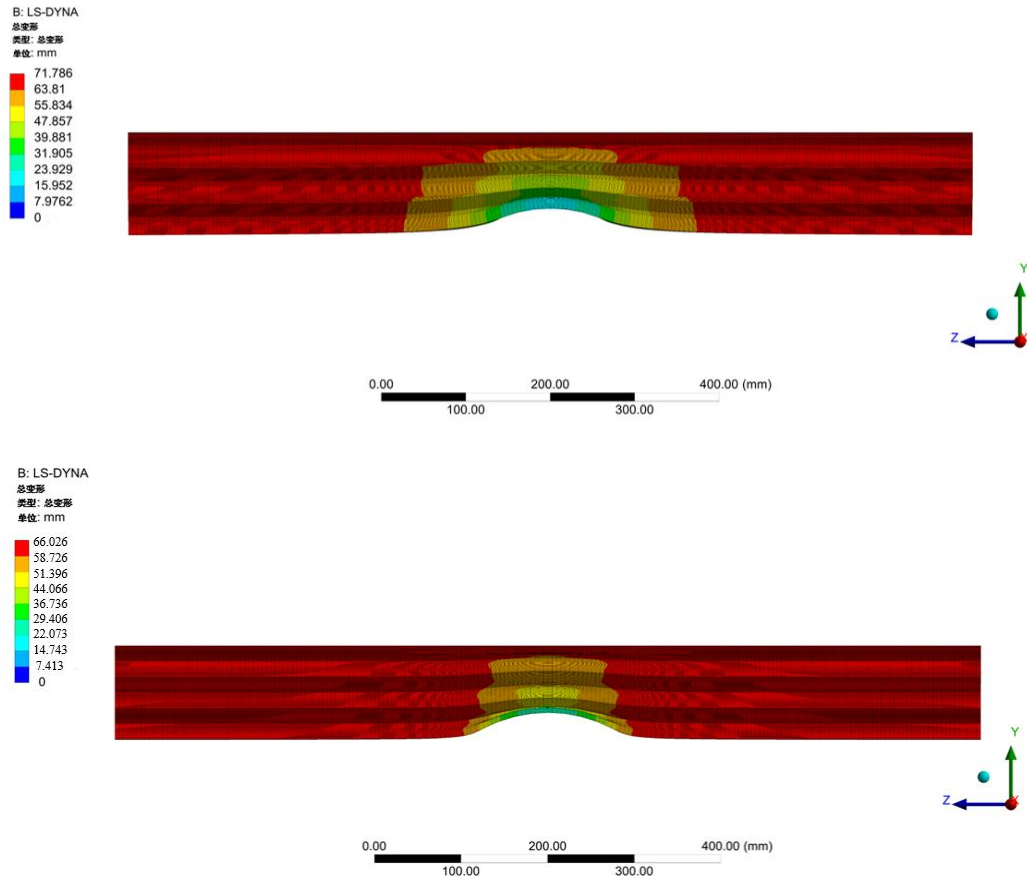


图 5-14 形变对比图

图 5-14 展示了初始设计和最优设计多层负泊松比结构在碰撞过程中的形变量。对比发现，最优设计的负泊松比结构在碰撞过程中未发生形变的部分多于初始设计，防撞性能较好。

图 5-15(a)和 5-15(b)分别为侵入量和比吸能的对比曲线图。从图 5-15(a)可以看出，最优设计在碰撞过程中的侵入量明显小于初始设计，尤其是在碰撞时间达到 1 秒后，最优设计的侵入量迅速增加后趋于稳定，而初始设计的侵入量则继续增加并在 2 秒后略有下降，但整体上仍高于最优设计。从图 5-15(b)可以看出，在碰撞发生的最初阶段，最优设计的能量吸收性能略高于初设设计，并且迅速达到峰值。两种设计的能量吸收均有所下降，但最优设计在整个碰撞过程中保持了较高的比吸能值，显示出更优越的能量吸收能力。

综上所述，最优设计在控制多层负泊松比结构的侵入量方面和能量吸收方面表现更优，能够有效减少结构在碰撞过程中的变形，在碰撞过程中不仅能够更快地达到高能量吸收状态，而且在碰撞后期仍能维持较高的能量吸收水平，这表明其在抗冲击和能量吸收方面均优于初设设计从而提高结构的抗冲击性能。

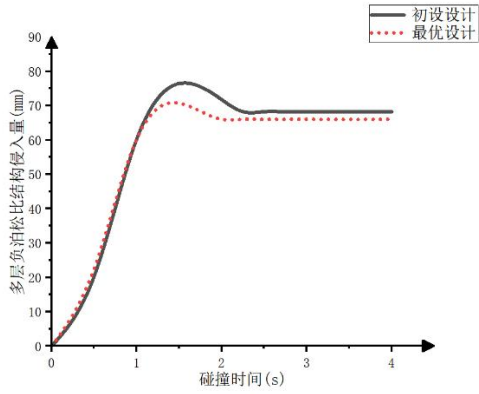


图 5-15(a) 侵入量对比曲线图

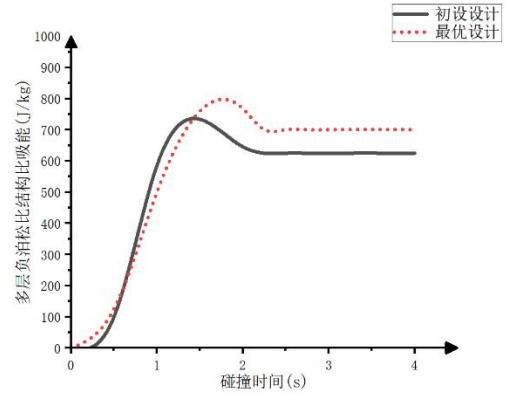


图 5-15(b) 比吸能对比曲线图

图 5-16、5-17 为初始设计与最优设计的多层负泊松比散热结构散热效果云图。从图 5-16、5-17 可以看出，在初始设计中，多层负泊松比结构的温度分布不均匀，部分区域温度较高，表明可能存在热点区域，可能导致局部过热问题。而在最优设计中，温度分布相对均匀，大部分区域的温度维持在 30°C 至 40°C 之间，最高温度明显低于初始设计。

综上所述，优化后的设计方案散热效果更为有效，最优设计在温度控制方面表现更佳，有助于提高多层负泊松比结构的散热效率，减少因局部过热可能引起的安全风险。

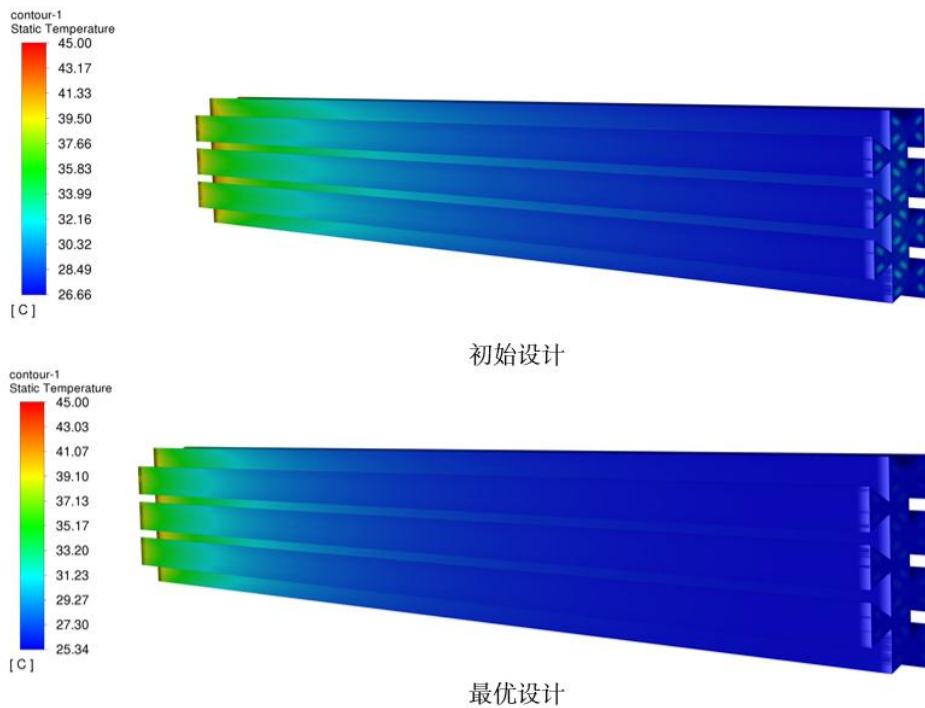


图 5-16 温差对比云图

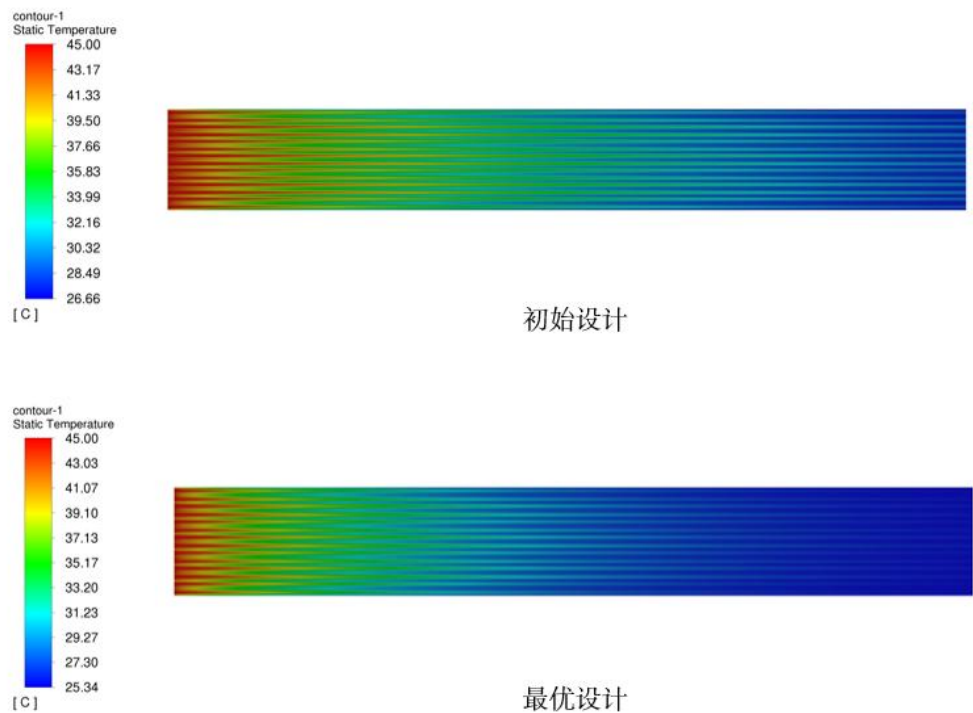


图 5-17 中心截面温差对比云图

5.4 本章小结

本章介绍了新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热系统的优化过程。首先建立了近似模型，然后利用浣熊优化算法（ROA）进行了多目标优化，并应用标准边界交叉法（NBI）从 Pareto 前沿解集中筛选出最接近理想解的个体。优化结果表明，经过优化的系统在防撞和散热性能上都有显著提升，为电池包的设计提供了更优的解决方案。

第 6 章 多层负泊松比散热装置模拟实验

为验证多层负泊松比散热结构的参数在优化后的冷却效果，设计了三种不同结构参数（A、B、C、D、E）的多层负泊松比散热实验装置并搭建实验台，实验对比三种多层负泊松比散热装置的散热性能。

6.1 实验系统原理

实验用乙二醇水溶液作为冷却介质，通过水泵作为冷却液的驱动装置^[93]，风冷装置带动空气流动模拟新能源汽车在行驶过程中的空气流动，通过温度传感器采集实验件的进出口温度。图 6-1 所示为实验系统示意图。

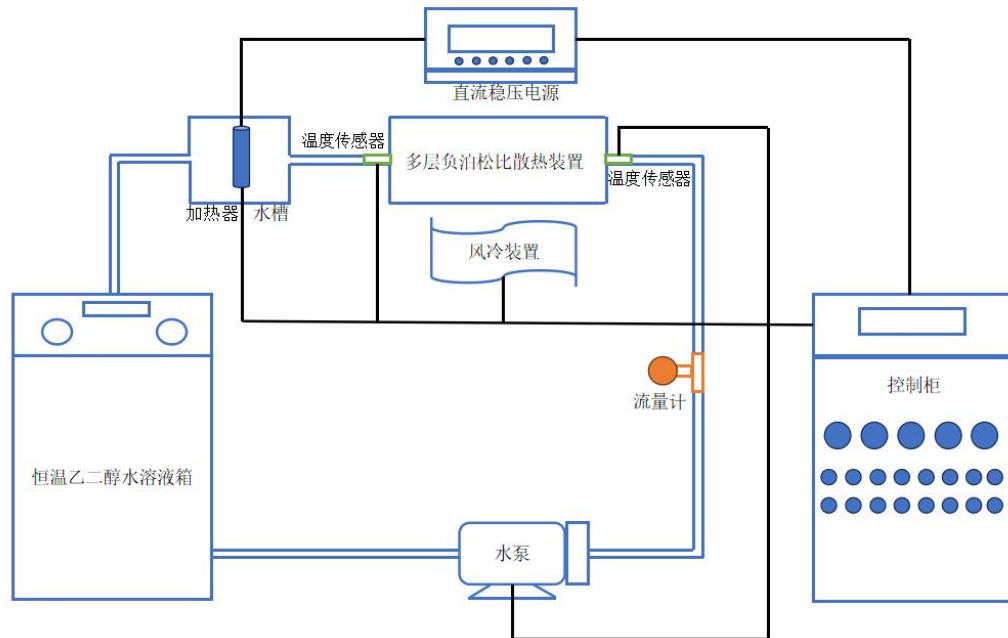


图 6-1 散热实验示意图

本次实验装置包括：水泵、恒温乙二醇水溶液箱、控制柜、直流稳压电源、加热棒、风冷装置、多层负泊松比散热装置、流量计和温度传感器。冷却液从恒温乙二醇水溶液箱（25℃）中通过水泵导入加热模块，经过加热棒加热导入多层负泊松比散热装置中，随后经过空气流动进行散热，冷却液再通过回流管流回恒温乙二醇水溶液箱中。

6.2 实验装置设计

本次实验台主要部分共有 3 部分，分别为：模拟发热装置、多层负泊松比

散热装置和温度控制装置。

6.2.1 模拟发热装置

鉴于新能源汽车电池包单体数量多、实验成本高且难以模拟实际工况，本文采用电加热器替代电池包，模拟其工作时的放电发热状态。

本次实验采用的是盐城富中电热器材有限公司生产的防爆电加热器（如图 6-2），该设备型号为 FZF-5，额定电压为 380V，功率为 5KW，防护等级达到 IP65，防爆标志为 ExdIICT4，其具备良好的防尘和防水性能。



图 6-2 防爆电加热器

直流稳压电源是一种能够提供稳定直流电压输出的电源设备，其核心功能是将交流电转换为稳定的直流电。图 6-3 为直流稳压电源。

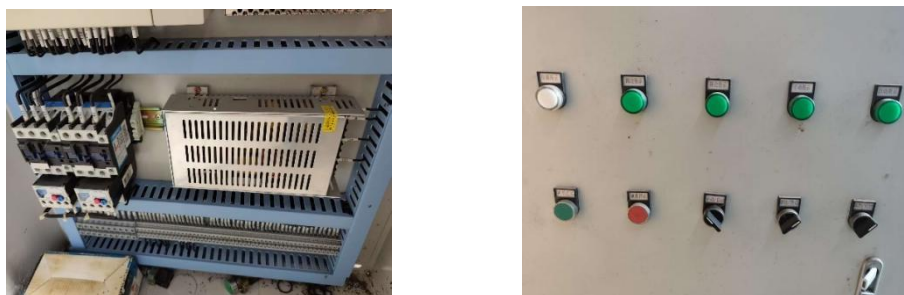


图 6-3 直流稳压电源

6.2.2 多层负泊松比散热装置

影响多层负泊松比散热装置因素较多，考虑总体散热器连接较为复杂，对多层负泊松比散热装置进行简化，仅验证单层多层负泊松比散热结构是否有所改善，随机设置两个对照组进行分析，如图 6-4。验证优化后的设计参数是否加强多层负泊松比散热装置的散热效果。选用冷却效果较好的乙二醇冷却液置于恒温箱中，如图 6-5。



图 6-4 多层负泊松比结构



图 6-5 恒温乙二醇水溶液箱

风冷装置是散热实验中常用的一种非接触式冷却方法，它通过强制对流的方式加速热量从热源向周围环境的传递，以达到降低设备或系统温度的目的，风冷装置的工作原理基于热对流，通过风扇或其他机械装置产生气流，将热源产生的热量带走。本文选用的风冷装置如图 6-6 所示。



图 6-6 风冷装置

以多层负泊松比结构参数变化为自变量，验证本文设计的正交实验及优化后的多层负泊松比散热装置是否具有更好的冷却效果。

6.2.3 温度控制装置

实验中，温度控制装置是确保实验顺利进行并获取准确数据的关键设备，温度控制装置的核心功能是维持实验过程中温度的稳定性和可调节性，为了实现这一目标，装置通常集成了多种关键组件。温度控制装置主要包括温度传感器、流量计和控制柜等部件。

温度传感器是一种将温度变化转换为电信号的装置，选取温度传感器的目的是为了测定冷却液进口温度和出口温度的温差。图 6-7 为本文选用的温度传感器。



图 6-7 温度传感器

流量计是一种用于测量流体（如液体或气体）在管道或通道中流量的精密仪器流量计，选取流量计的目的是确保在实验中冷却液流量保持稳定，实验条件保持一致。本文选用的流量计如图 6-8 所示。



图 6-8 流量计

散热实验中，温度控制柜是至关重要的设备，它不仅能够确保实验过程中温度的精确控制，还能通过搭载各种开关设备实现对电气设备的启停、调节和运行控制。本文选用的控制柜如图 6-9 所示，温度传感器对应的温度由控制柜界面可直接读取。



图 6-9 温度控制柜

6.3 实验步骤

本次实验的目的是验证多层负泊松比散热结构在经过参数优化后的冷却效果。本次实验设计并搭建了三种不同结构参数的多层负泊松比散热实验装置，并进行了详细的散热性能对比实验。

多层负泊松比散热装置实验操作步骤如下：

(1) 将水槽、多层负泊松比散热装置以及水泵的管道与恒温乙二醇水溶液箱连接，形成一个完整的冷却液循环系统。启动一次循环以检查所有连接件和实验设备的密封性，确保无泄露现象发生。

(2) 将恒温乙二醇水溶液箱的温度设定为常温 25℃。等待 10 分钟后，测量冷却液的温度是否稳定在 25℃。

(3) 将加热器固定置于水槽内，启动水泵。记录乙二醇水溶液在水槽中从 25℃温升到 45℃所需的时间。确保温度传感器监测点的初始平均温度为 25℃，经过 10 分钟的预热过程，使加热器水槽的温度达到 45℃。

(4) 再次启动水泵，等待 10 分钟以确保冷却液循环达到稳定状态，然后开始记录各温度测量点的数据。继续运行 20 分钟后结束实验，关闭电源，并整理收集到的数据。

(5) 更换具有不同参数的多层负泊松比散热装置，保持其他实验条件不变，重复步骤 2 和步骤 4，以评估不同参数对散热性能的影响。

6.4 实验结果分析

实验过程中多层负泊松比散热装置参数不同，设置初始冷却液温度为 25℃，加热器设定为 45°，加热 10 分钟，对比三组不同设计方案进行实验，其中方案 1 为初始结构参数，方案 2 为随机结构参数，方案 3 为优化后的结构参数。设计参数如表 6-1。

表 6-1 三种方案结构参数

方案类别	A(mm)	B(mm)	C(°)	D(mm)	E(mm)
方案 1	28.000	18.000	60.00	2.000	2.000
方案 2	29.486	19.236	63.24	2.986	2.652
方案 3	28.645	18.794	62.68	2.862	2.262

按照 6.3 节中的实验步骤进行操作，测得各显示器收集的数据如表 6-2。

表 6-2 三种方案散热结果

方案类别	进口温度(℃)	出口温度(℃)	温差(℃)	散热效率
方案 1	45℃	40.2℃	4.8℃	10.67%
方案 2	45℃	40.9℃	4.1℃	9.11%
方案 3	45℃	39.7℃	5.3℃	11.78%

为了更加直观看表 6-2 中数据的差异，绘制了三种方案散热效果对比柱状图，如图 6-10 所示。

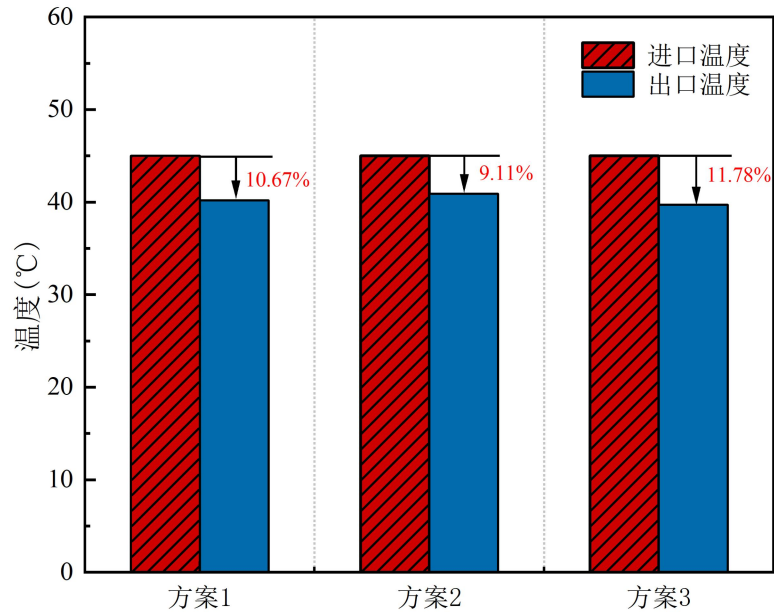


图 6-10 散热对比柱状图

针对三种不同的散热方案，对各自的散热效率进行详细分析。图 6-10 展示了每个方案的进口温度和出口温度，以及相应的散热效率，方案 1 中进口温度与出口温度之间的温差为 4.8℃，散热效率为 10.67%。方案 2 的散热效率略低于方案 1，为 9.11%，进口温度与出口温度之间的温差为 4.1℃。方案 3 则展现出最高的散热效率，达到了 11.78%，进口温度与出口温度之间的温差为 5.3℃。说明在该方案下，散热系统能够更有效地降低流经介质的温度。经过浣熊算法优化后的多层负泊松比结构的散热有效性得到验证。

6.5 本章小结

本章设计并搭建了三三种不同结构参数的多层负泊松比散热实验装置，进行了详细的散热性能对比实验。结果表明，不同设计方案的多层负泊松比散热装置在散热效率上存在差异，其中方案 3 展现出最高的散热效率，达到了 11.78%，说明优化后的结构参数能够更有效地提高散热效率。

第 7 章 总结与展望

7.1 总结

本文提出了一种新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热系统，建立了三种电池包碰撞和散热的有限元模型，采用正交试验设计法分析系统性能，并对其进行了多目标优化研究和实验验证。具体工作内容和结果如下：

(1) 简述负泊松比结构设计要求，基于传统内凹六边形负泊松比结构设计多层负泊松比结构。根据设计要求确定其五个主要参数，并计算其相对密度，验证弹性模量，分析能量吸收特性。因多层负泊松比结构具有良好的防撞与吸能特性，将其用作新能源汽车电池包防撞结构。

(2) 建立新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热系统模型。建立电池包模型，依据多层负泊松比结构的防撞性能，将多层负泊松比结构排列覆盖电池包表面作为防撞结构，建立电池包碰撞模型。将水冷板横向贯穿安放至电池包中间形成回路，起到水冷散热效果，使结构不添额外装置兼具防撞与散热功能。

(3) 验证新能源汽车电池包中多层负泊松比结构的防撞及散热性能。利用 LS-DYNA 和 ANSYS-Fluent 建立有限元模型进行仿真分析，通过对三种不同结构模型的对比仿真，证实了多层负泊松比结构在防撞和散热方面的优越性。进一步采用正交试验设计法选取样本点，对结构参数变化范围及防撞、散热性能评价指标进行了系统分析，计算了不同参数组合下的性能指标，并绘制影响力图论述结构参数与性能指标之间的关系。

(4) 基于正交试验设计法，利用 BP 神经网络模型和浣熊优化算法对系统进行优化。基于正交试验设计法，用多项式响应面模型和 BP 神经网络模型建立多层负泊松比防撞散热系统近似模型，据预测精度选优。基于精度更高的 BP 神经网络模型，用浣熊优化算法开展多目标优化，获得最优结构参数组合。经碰撞散热仿真验证，结果表明多层负泊松比防撞散热系统遭受碰撞时最大侵入量减小 5.76mm（下降 8.02%），水冷板进出口温差增大 1.32℃（升高 7.2%），整体性能有效提升。

(5) 通过试验对多层负泊松比结构的散热性能进行了验证。试验目的在于

评估该结构在散热效率方面的优化效果，并探究其在实际应用中的可行性。为确保试验结果的可靠性和有效性，本研究设立了三组对照组，分别对应不同的结构设计和相同的工况条件。通过对试验结果的分析，本文证实了多层负泊松比结构设计的正确性，并展示了其在提高散热性能方面的显著优势。

本文主要创新点如下：

(1) 设计新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热装置，提出多层负泊松比结构参数与力学性能之间的关系并验证。论述了多层负泊松比结构的力学特性和能量吸收特性，利用其特性建立了防撞散热装置，根据正泊松比六边形蜂窝结构的力学性能公式，计算多层负泊松比结构的相对密度，验证了多层负泊松比结构的力学性能。

(2) 基于正交试验原理，提出并验证了新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热系统模型。选取新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热系统优劣的评价指标，利用正交试验的方法设计出不同试验的参数组合，根据 LS-DYNA 和 ANSYS-Fluent 的仿真结果，验证得出新能源汽车电池包多层负泊松比防撞散热系统具有良好的防撞与散热效果。

(3) 提出了多层负泊松比结构设计参数的优化方法。运用优化设计原理，以多层负泊松比结构最大侵入量和水冷板进出口温差为优化设计目标函数，以顶部长度 A、斜边长度 B、顶部与斜边的夹角 C、底部厚度 D 和斜边厚度 E 为设计变量，建立了结构最大侵入量和温差的 BP 神经网络模型，利用浣熊优化算法对结构侵入量和温差的优化模型进行求解，得到多层负泊松比结构最优参数组合。

7.2 展望

本文对电池包防撞与散热系统进行了结构设计及参数优化研究，但由于作者水平有限，仍存在一些不足之处需要进一步完善：

(1) 在设计电池包多层负泊松比防撞结构时，主要考虑多层负泊松比结构的外部参数，忽视了内部参数的影响，此外没有对多层负泊松比结构进行碰撞实验进行验证，需要在今后研究设计多层负泊松比结构时进一步改进，使多层负泊松比结构的有效性进一步提高。

(2) 在建立电池包散热模型时, 仅考虑散热器本身散热效果, 忽略了环境温度、内部器件连接等对冷却液的影响, 因此电池包散热仿真试验的结果仅具有研究意义, 与散热系统现实工作状态有一定的偏差。

参考文献

- [1]孙越. 我国新能源汽车分类及发展现状浅析[J]. 汽车实用技术, 2020(04): 13-15.
- [2]财政部. 明确新能源汽车政府采购比例[J].中国招标,2025,(02):2.
- [3]吕菊平. 新能源汽车常见故障与维修措施优化探究[J]. 湖北农机化, 2020, 243(6), 93.
- [4]Balakrishnan P G, Ramesh R, Prem K T. Safety mechanisms in lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2006, 155(2): 401-414.
- [5]Shengxin E ,Yuxian L ,Yaxin C. Effects of composite cooling strategy including phase change material and cooling air on the heat dissipation performance improvement of lithium ion power batteries pack in hot climate and its catastrophe evaluation[J].Energy,2023,283.
- [6]周鑫. 新能源汽车动力电池组热失控检测与热管理策略探析[J].专用汽车,2024,(12),22-24.
- [7]Fadel Z A ,Mohaiman S ,Abass A B H. Crashworthiness Performance of Rear Underrun Protection Device under Simulated Car Collision[J].SAE International Journal of Passenger Vehicle Systems,2023,16(3).
- [8]Renreng I ,I R ,F D. Energy Absorption Analysis of aluminum Filled Foam Tube Under Axial Load using Finite Element Method with Cross Section Variations. [J]. Materials Science and Engineering, 2020, 875 (1).
- [9]Vignesh K S ,Jaikumar M ,Koenig P. Enhancing the Crashworthiness of Passenger Vehicle through Modification of Bumper Beam Design and Energy Absorption Materials[J]. International Journal of Vehicle Structures &, 2023,15(7):892-895.
- [10]赵曦,陈帅,盈亮. 梯度强度汽车薄壁结构抗撞性优化 [J]. 汽车工程,2018,40(05):508-514.
- [11]马芳武,王强,马文婷等.混合梯度负泊松比结构多工况耐撞性研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(07):85-97.

- [12]Tao M ,Shijuan D ,Weiwei W , et al.Reliability optimization of a large-size tubular negative Poisson's ratio battery protection structure[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C:Journal of Mechanical Engineering Science, 2021,235(19):4214-4230.
- [13]Wang W ,Dai S ,Zhao W , et al.Reliability-based optimization of a novel negative Poisson's ratio door anti-collision beam under side impact[J].Thin-Walled Structures,2020,154.
- [14]Ruiyao L ,Guofeng Y ,Zezhou X , et al.Mechanical Characteristics Analysis of 3D-printing Novel Chiral Honeycomb Array Structures Based on Functional Principle and Constitutive Relationship[J].Journal of Bionic Engineering,2023,20(5):1917-1929.
- [15]Congcheng M ,Jihong H ,Fengchong L , et al.Structural Analysis of Battery Pack Box for New Energy Vehicles Based on the Application of Basic Foam Aluminum Materials[J].Journal of Physics: Conference Series,2022,2355(1).
- [16]董其娟,韩明亮,夏德伟等. 铝合金电池包箱体强度刚度分析 [J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61 (10): 101-106.
- [17]侯凯,范艳辉,赵长利.新能源汽车前防撞梁结构优化仿真与耐撞性提升研究[J].农业装备技术,2024,50(01):13-17.
- [18]Yu S ,Shakeel A ,Huaqiang L , et al.Optimization of air-cooling technology for LiFePO₄ battery pack based on deep learning[J].Journal of Power Sources,2021,497.
- [19]何闯,赵钦新,梁志远.具有扰流结构的风冷型锂电池包热管理系统优化[J].郑州大学学报,2025,46(01):90-97.
- [20]白晓辉,高渊博,张玉碧等.方形动力电池组多风道热管理研究[J].西北工业大学学报,2024,42(02):260-268.
- [21]Yu D ,Huang W ,Wan X , et al.Optimization of simultaneous utilization of air and water flow in a hybrid cooling system for thermal management of a lithium-ion battery pack[J].Renewable Energy,2024,225120248.
- [22]李岳峰,徐卫潘,韦银涛等.储能锂电池包浸没式液冷系统散热设计及热仿真分

- 析[J].储能科学与技术,2024,13(10):3534-3544.
- [23]魏小平,杨智辉,胡海涛等.钢制多通道结构液冷板散热特性仿真分析[J].机械设计与研究,2023,39(01).
- [24]冯帅,王国岩,何嘉俊等. 浸没式交换机液冷技术仿真与实验 [J]. 制冷学报, 2021, 42 (03): 135-144.
- [25]Vishal B K ,Parmanand K D ,Manikant P D .Thermal Management Analysis of a Lithium-Ion Battery Cell using different coolant[J].Journal of Physics: Conference Series,2022,2178(1).
- [26]Hassan F M ,Khalifa N H A ,Hamad J A .Experimental investigation of lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using mini channels cold plate and phase change material[J].Applied Thermal Engineering,2025,267125682-125682.
- [27]Yang Y ,Yang L ,Du X , et al. Pre-cooling of air by water spray evaporation to improve thermal performance of lithium battery pack [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 163 (C): 114401-114401.
- [28]张威,罗仁宏,方超. 水冷型高功率动力电池包冷却结构优化[J].机械设计与制造,2024,(09):223-227.
- [29]刘仲康,张冠华,孙玥. 基于复合相变材料的锂离子电池控温性能[J].新能源进展,2024,12(06):696-703.
- [30]郑玲玲,智茂永,岳姗等. 水合盐相变材料用于锂离子电池热管理[J].电池,2024,54(02):217-221.
- [31]Weng J ,Ouyang D ,Yang X , et al. Optimization of the internal fin in a phase-change-material module for battery thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167 114698-114698.
- [32]Miaari A A ,Mohaisen O K ,Ahmed A A , et al.Experimental investigation on thermal management and performance enhancement of photovoltaic panel cooled by a sustainable shape stabilized phase change material[J].Case Studies in Thermal Engineering,2025,67105763-105763.
- [33]陈慧敏,李香龙,刘秀兰等. 大功率充电连接器相变冷却换热特性研究[J].电力

- 科学与技术学报,2024,39(01):201-207.
- [34]姜鑫鑫,李凌. 相变材料和液冷结合的锂离子电池热管理性能优化[J].上海理工大学学报,2024,46(01):36-43.
- [35]杨延新,宋玉超,池常宽等. 内凹型负泊松比结构的静载与隔振分析[J].噪声与振动控制,2025,45(01):287-293.
- [36]吴东伟,郁荣,钱卫东等. 增强型负泊松比舷侧防护结构吸能特性研究[J].船舶物资与市场,2024,32(11):24-27.
- [37]沈佳兴,董建秀,范中海等. 防冲吸能液压支架点阵负泊松比吸能结构设计及优化[J].中国机械工程,2025,20(02):1-10.
- [38]刘卫东,陈浩波,郭苏等. 新型手性蜂窝结构设计及力学分析[J/OL].复合材料学报,2025,15(02):1-14.
- [39]Longlong L ,Liang G .Research on the optimization and preparation of negative Poisson's ratio structure of quartz glass[J].Materials Letters,2025,384138105-138105.
- [40]Chen Y ,Yang K ,Wang Y , et al.Design and Mechanical Properties Analysis of Structures with Shape Memory Negative Poisson's Ratio[J].Mechanics of Solids,2024,59(4):2509-2534.
- [41]高庆云,周鹏,刘竹丽等. 动力电池包液冷系统结构设计及流道结构优化[J].电源技术,2025,49(02):374-382.
- [42]李艳. 仿生吸能盒结构与多目标优化研究[D]. 南京航空航天大学, 2019.
- [43]陈煦芬,杨炜沂. 无模直写制备负泊松比多孔材料及其力学行为研究 [J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2023, 36 (04): 35-43.
- [44]丛苏婷,周一一,陈联盟. 凹六边形负泊松比蜂窝结构及其静动力学性能研究综述 [J]. 空间结构, 2024, 30 (02): 21-31.
- [45]任毅如,蒋宏勇,金其多等. 仿生负泊松比拉胀内凹蜂窝结构耐撞性[J].航空学报,2021,42(03):314-324.
- [46]朱荣秀,郭今心,刘希功等. 基于计算化学的可视化教学:手性及立体异构现象 [J].化学教育,2025,46(02):112-116.
- [47]王硕,燕群,延浩等. 类星型手性超材料超宽带隙特性研究[J].航空工程进

- 展,2024,15(05):179-190.
- [48]Soman P ,Lee W J ,Phadke A , et al.Spatial tuning of negative and positive Poisson's ratio in a multi-layer scaffold[J].Acta Biomaterialia,2012,8(7):2587-2594.
- [49]刘援越,高满屯,张晓鸥. 从一维透视投影图恢复二维刚体运动和结构[J].机械科学与技术,2004,(01):28-30.
- [50]何满潮,王炯,孙晓明等. 负泊松比效应锚索的力学特性及其在冲击地压防治中的应用研究[J].煤炭学报,2014,39(02):214-221.
- [51]沈锴君. 新型负泊松比电池保护系统耐撞性分析与多目标优化设计[D].南京航空航天大学,2020.
- [52]马韬. 电动汽车动力电池包负泊松比防撞散热系统优化设计[D].南京航空航天大学,2021.
- [53]李洪涛,张佳琦,宋庆松等. 吸能盒式前防撞横梁系统的碰撞吸能特性研究[J].机械强度,2024,46(06):1338-1345.
- [54]谭海伦. 负泊松比多层级结构研究及其在新能源汽车中的应用[D].湖南大学,2020.
- [55]江博. 锂电池叉车动力锂电池组散热系统设计与验证[J].内燃机与配件,2024,(16):26-28.
- [56]韩广,郗彦辉,班宝旺. 新型斜十字负泊松比结构弹性力学性能研究[J].机械强度,2023,45(01):183-189.
- [57]王奕霖,秦卫阳,刘琦. 负泊松比超材料减振结构设计与实验验证[J].动力学与控制学报,2023,21(05):53-59.
- [58]周冠. 新型负泊松比结构关键技术研究及其在车身设计中的应用[D]. 湖南大学, 2015.
- [59]Farong K ,Dongming Z ,Tianxiang Y , et al.State of health estimation of lithium-ion batteries based on maximal information coefficient feature optimization and GJO-BP neural network[J].Ionics,2025,(prepublish):1-12.
- [60]梁振鹏. 不同原料配比下制备新型锂电池正极材料对电化学性能的影响 [J].广州化工, 2024, 52 (12): 60-62.

- [61]贾晓峰,刘晓杰. 电动汽车电池管理系统主动均衡策略优化[J].中国汽车(中英文对照),2025,35(02):119-123.
- [62]李春,邹阳. 燃料电池汽车碰撞后技术要求及测试方法研究[J].专用汽车,2022,(11):75-79.
- [63]李素雯. 变截面薄板车身零部件的优化设计[D]. 湖南大学, 2016.
- [64]恽强龙,陈宇曦,姜波等. 风冷 IGBT 散热器正交设计及优化研究[J].机电工程技术,2024,53(02):270-274.
- [65]JingHe S ,HengYun Z ,Hong Y , et al.Experimental determination of heat generation rates of lithium-ion batteries by thermal protection method[J].Science China(Technological Sciences),2024,67(12):3647-3658.
- [66]泮冰妮. 基于电热耦合模型的动力锂电池充电方法研究[D]. 湖北工业大学.
- [67]林达,张雪松,汪湘晋. 基于数字孪生的锂离子储能电站环境控制方法 [J]. 电力安全技术, 2023, 25 (11): 50-55.
- [68]胡瑾华,白保卫,谭晓光. 圆筒型 FPSO 液压仪表管串油关键技术研究 [J]. 化工设计通讯, 2021, 47 (09): 15-16.
- [69]Hebishima H ,Inage I S . Refining turbulence models: Time decay dynamics and energy spectrum insights from the GOY shell model [J]. Chaos, Solitons and Fractals: the interdisciplinary journal of Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 2025, 193,116101-116101.
- [70]伍开宇,朱海清,沈伟等. 基于响应面法的螺纹接头快速连接器分瓣内螺纹片优化设计 [J]. 轻工机械, 2022, 40 (06): 38-43.
- [71]Çilingir S ,Duran G ,Gökyildiz B , et al. Optimization of Pectin Extraction from Lemon Peel Powder by Ohmic Heating Using Full Factorial Design [J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 17 (8): 2339-2349.
- [72]曹晓琳,朱光明,乔松等. 全因子试验方法在薄带连续铸轧中的应用 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (03): 103-109.
- [73]伊洪彬,李勇,张晓燕. 兴安落叶松高枝嫁接树体矮化技术方法拉丁方试验 [J]. 中国林副特产, 2016, (04): 32-34.
- [74]卢迪,胡瑞,史剑兵等. 基于正交试验法的轴流风扇气动特性研究[J].机械管理

- 开发,2024,39(12):16-19.
- [75]Vijai P ,P. S B .A hybrid multi-objective optimization approach with NSGA-II for feature selection[J].Decision Analytics Journal,2025,14100550-100550.
- [76]Abdul G ,Mohammad A ,Faisal T , et al.Identification, ranking and prioritisation of vital environmental sustainability indicators in manufacturing sector using pareto analysis cum best-worst method[J].International Journal of Sustainable Engineering,2021,14(3):226-244.
- [77]靳明珠,尹冠生,郝文乾等. 新型多胞管轴向吸能特性的理论和数值研究 [J]. 应用力学学报, 2021, 38 (02): 480-489.
- [78]唐伟方,李胜男,罗刚. 基于双层帕累托分析的舰船质量信息利用研究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32 (12): 102-105.
- [79]江嘉伟,程起有,刘正江等. 基于多项式响应面 MDOE 的低速风洞试验方法研究[J].航空科学技术,2024,35(06):114-120.
- [80]孔维峰,方川,刘继红等. 基于单片阻抗一致性吹扫的燃料电池低温冷启动策略研究 [J]. 汽车工程, 2024, 46 (02): 260-268.
- [81]Tian W ,Zhang C ,Mao Z , et al.Optimization of a Dual-Channel Water-Cooling Heat Dissipation System for PMSM in Underwater Unmanned Vehicles Using a Multi-Objective Genetic Algorithm[J].Journal of Marine Science and Engineering,2024,12(12):2133-2133.
- [82]吕进,彭毅,关小雅等. 基于 NSGA-II 和响应面法的交错内肋微通道热沉的多目标优化[J].工程热物理学报,2025,46(02):627-637.
- [83]庞祎帆,傅戈雁,王明雨等. 基于响应面法和遗传神经网络模型的高沉积率激光熔覆参数优化 [J]. 中国激光, 2021, 48 (06): 152-162.
- [84]廉城,曾志刚,苏义鑫等. 基于误差修正 EOS-ELM 的滑坡位移预测 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45 (09): 52-57.
- [85]杨克帆. 后轮罩外板冲压模具成形参数优化及其寿命研究[D]. 安徽工程大学, 2023.
- [86]Yue Z ,Wendi D ,A. L V , et al.Neural network approach to response surface development for reaction model optimization and uncertainty minimization[J].Combustion and Flame,2023,251.

- [87]杨凯,苏艳萍,杜强,等.基于多目标浣熊优化算法的双向长短期记忆神经网络预测[J].计算机测量与控制,2025,33(01):36-44.
- [88]Yinghui S ,Junwu W ,Jiequn L , et al.Research on collaborative scheduling of multiple projects of prefabricated building based on the niche genetic-raccoon family optimization algorithm[J].Alexandria Engineering Journal,2023,641015-1033.
- [89]邱文浩. 基于改进浣熊优化算法的含抽水蓄能电力系统经济调度研究[D]. 南昌大学, 2024.
- [90]苏仁斌,熊卫红,刘先珊等. 基于新型元启发式 BP 神经网络的 500kV 覆冰输电线路力学响应预测研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32 (01): 100-122.
- [91]王显会,余磊,郭启涛等. 基于抗冲击波响应的新型蜂窝夹层结构多目标优化设计[J].车辆与动力技术,2014,(04):25-30.
- [92]王宗千,钱明军,周云波等. 帕累托最优在新型蜂窝结构吸能盒防撞性能中的应用[J].南京理工大学学报,2016,40(05):599-606.
- [93]朱楠林. 柴油机冷却流道内沸腾换热两相流模型研究[D]. 江苏大学, 2018.

攻读硕士期间发表的学术成果

1 论文发表情况

[1] Rao Zhi, Tang LF, Zhang Hui. Double-Tongue Worm Shell Structure on Plastic Centrifugal Pump Performance Study [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (14), 8507. (SCI, Accession number:001037981100001)

[2] Rao Zhi, Tang LF, Shi YF. Structural design and static stiffness optimization of magnetorheological suspension for automotive engine[J]. Applied Sciences, 2024, 14 (16), 6975. (SCI, Accession number: 001305501000001)

2 专利发表情况

[1] 饶志,唐铃凤等.一种海水驱动二级压缩淡水净化装置:中国,CN202310327182.2. 2023.03.30 (发明专利实审,第一作者)

致谢

时光荏苒，岁月如梭。在硕士研究生的学习生涯即将结束之际，回首这段充实而难忘的旅程，我心中充满了感激之情。在这段充满挑战与收获的时光里，我有幸得到了许多人的帮助和支持，他们为我指引方向，给予我力量，让我得以顺利完成学业和论文。

首先，我要向我的导师唐铃凤教授和王幼民教授致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。你们不仅是我的学术导师，更是我人生道路上的引路人。在我迷茫时，你们耐心地为我答疑解惑，在我遇到困难时，你们鼓励我勇敢前行。你们的严谨治学态度、渊博学识和对学术的执着追求，深深地影响了我。你们给予我的不仅仅是知识的传授，更是思维方式的培养和人格的塑造。在论文的撰写过程中，你们多次审阅我的稿件，提出了许多宝贵的意见和建议，使我能够不断完善自己的研究。你们的悉心指导和无私关怀，我将永远铭记在心。

在学术研究的道路上，我还要感谢我的同门程诗雨、李叶春和周路祥。我们一同经历了无数个日夜的奋战，彼此鼓励，相互支持。程诗雨，你思维敏捷，总能为我提供独特的视角和思路；李叶春，你勤奋刻苦，严谨细致，让我学会了如何脚踏实地地做研究；周路祥，你乐观开朗，总能在紧张的研究氛围中带来轻松与欢乐。我们一起讨论学术问题，分享研究心得，这段并肩作战的日子将成为我一生中最珍贵的回忆。感谢你们在这段旅程中与我相伴，让我感受到团队的力量和温暖。

此外，我还要感谢我的家人。是你们在我最需要的时候给予我无条件的支持和理解，让我能够全身心地投入到学习和研究中。感谢你们一直以来的陪伴和鼓励，让我在追求梦想的道路上不再孤单。

最后，我要感谢学院的领导和老师们，是你们为我们创造了良好的学习环境和科研条件。

在未来的日子里，我会带着这份感恩继续前行，努力成为对社会有用的人。再次感谢所有帮助过我的人，是你们让我的硕士生涯如此美好。

饶志

2025年3月5日

尚德致学 唯实惟新

