



汽车低压电子电气系统用液冷散热 装置标准化需求研究报告



全国汽车标准化技术委员会电子与电磁兼容分技术委员会
汽车电子环境及可靠性评价工作组

2025 年 7 月

目 录

前 言	6
1 引言	7
1.1 研究背景	7
1.1.1 汽车电动化的快速发展	7
1.1.2 提高汽车性能和续航里程	8
1.1.3 汽车智能化和自动驾驶的趋势	8
1.1.4 对汽车热控制的更高要求	9
1.1.5 汽车设计的紧凑化和轻量化	9
1.1.6 消费者对舒适性的期望	9
1.2 研究对象	10
1.3 产业概述	11
1.3.1 车企	11
1.3.2 供应商（电气及电子设备）	12
1.3.3 供应商（液冷器）	12
1.3.4 检测机构	13
1.4 研究意义	13
2 汽车零部件散热方式简介	14
2.1 自然散热	14
2.1.1 定义与原理	14
2.1.2 结构特点	14
2.1.3 应用场景	14
2.1.4 优缺点分析	14
2.1.5 典型技术对比	15
2.2 热管散热	15
2.2.1 定义与原理	15
2.2.2 结构特点	16
2.2.3 应用场景	16

2.2.4	优缺点分析	16
2.2.5	典型技术对比	17
2.3	风冷散热	17
2.3.1	定义与原理	17
2.3.2	结构特点	17
2.3.3	应用场景	18
2.3.4	优缺点分析	18
2.3.5	典型技术对比	19
2.4	多级散热	19
2.4.1	定义与原理	19
2.4.2	结构特点	19
2.4.3	应用场景	20
2.4.4	优缺点分析	20
2.5	液冷散热	20
2.5.1	定义与原理	20
2.5.2	结构特点	21
2.5.3	应用场景	22
2.5.4	优缺点分析	23
2.5.5	典型技术对比	24
3	液冷散热技术的发展历程	24
3.1	萌芽期：风冷主导与早期液冷探索	24
3.2	探索期：液冷技术跨领域应用	25
3.3	成熟期：材料升级与系统集成	25
3.4	创新期：高性能与绿色化发展	26
4	液冷散热技术概述	27
4.1	液冷散热的基本原理	27
4.1.1	概述	27
4.1.2	直接冷却	27
4.1.3	间接冷却	28

4.2 液冷散热系统的组成	28
5 液冷散热技术在汽车零部件中的应用	29
5.1 发动机冷却	29
5.1.1 液冷散热技术在发动机冷却应用上的简介	29
5.1.2 液冷散热技术在发动机冷却应用上的实际效果	30
5.2 变速箱冷却	30
5.2.1 液冷散热技术在变速箱冷却应用上的简介	30
5.2.2 液冷散热技术在变速箱冷却应用上的实际效果	31
5.3 电池冷却	32
5.3.1 液冷散热技术在电池冷却应用上的简介	32
5.3.2 液冷散热技术在电池冷却应用上的实际效果	32
5.4 电机冷却	33
5.4.1 液冷散热技术在电机冷却应用上的简介	33
5.4.2 液冷散热技术在电机冷却应用上的实际效果	34
5.4.3 电机冷却应用上的技术对比与场景匹配	35
5.5 集成控制单元冷却	35
5.5.1 液冷散热技术在集成控制单元冷却应用上的简介	35
5.5.2 液冷散热技术在集成控制单元冷却应用上的实际效果	35
6 液冷型低压控制器在整车上的应用	36
6.1 液冷冷却方式的使用	36
6.1.1 概述	36
6.1.2 高功率密度与散热效率需求	36
6.1.3 空间限制与紧凑化设计	37
6.1.4 复杂环境适应性	38
6.1.5 热管理系统集成需求	38
6.1.6 可靠性及长期维护优势	38
6.2 与风冷散热的比对	39
6.2.1 散热效率与温控精度	39
6.2.2 环境适应性与稳定性	39

6.2.3 成本、空间与能耗对比	40
6.3 应用案例	40
6.4 现有问题	43
7 液冷散热技术的未来发展趋势	44
7.1 新材料与技术的应用	44
7.1.1 高效散热	44
7.1.2 节能环保	45
7.1.3 故障诊断	46
7.1.4 降低成本	46
7.2 智能化与自适应控制	47
7.2.1 智能化控制	47
7.2.2 自适应控制	48
7.3 与其他散热方式的结合	48
7.3.1 耦合相变材料的液冷式	48
7.3.2 耦合热管的液冷式	50
7.3.3 耦合相变材料-铝板-翅片复合的液冷式	51
7.3.4 耦合半导体冷却的液冷式	52
8 液冷散热技术的优势与挑战	53
8.1 优势	53
8.1.1 高效的散热性能	53
8.1.2 优化空间设计	53
8.1.3 精准的温度控制	53
8.1.4 环境适应能力	53
8.1.5 静音运行	54
8.2 挑战	54
8.2.1 成本提高	54
8.2.2 供应链压力	54
8.2.3 泄漏风险与长期可靠性	54
8.2.4 复杂结构设计	55

8.2.5 维护难度	55
8.2.6 标准化不足	55
9 现有标准分析	56
9.1 与 GB/T 28046 系列标准的关系	56
9.1.1 GB/T 28046 系列标准介绍	56
9.1.2 GB/T 28046 系列标准与国际标准的一致性关系	57
9.1.3 需求标准与 GB/T 28046 系列标准的关系	58
9.2 与 ISO 16750 系列标准的关系	59
9.2.1 ISO 16750 系列标准介绍	59
9.2.2 ISO 16750 最新标准信息	62
9.2.3 需求标准与 ISO 16750 系列标准的关系	63
9.3 与其他标准的关系	63
9.4 与现有公告认证试验标准的关系	64
10 试验项目需求分析和试验设置	64
10.1 试验需求分析	65
10.2 试验分类	66
10.3 液冷特定试验	66
10.4 电气负荷试验	69
10.5 机械负荷试验	72
10.6 气候负荷试验	75
10.7 化学负荷试验	83
11 标准化建议	83
11.1 标准化概述	83
11.2 国际标准提案	83
11.3 国内标准新项目提案	85
附录 A 规范性引用文件	87
附录 B 术语和定义	88
参考文献	90

前 言

智能网联技术的广泛应用，也为电动汽车注入了新的活力。新一代电动车不仅在续航里程和动力输出上有了大幅提升，在智能化和网联化方面也有了质的飞跃。车载信息娱乐系统、智能语音交互、高精度定位导航等前沿技术的融合，让电动汽车不仅更加智能、互联，也更加人性化和贴心。随着 5G 等通信技术的普及，电动车与充电桩、城市交通等的深度融合，将进一步提升出行体验，加快电动化进程。低压液冷型电气及电子设备目前越来越多的应用在整车上，但目前针对低压部件无相关标准。

此外，在强制性国家标准和公告认证试验方面，针对低压电气及电子设备均有相关试验要求和方法，但并未考虑低压液冷型电气及电子设备。如何开展相关试验也成为急需研究的方向。

同时，由于用车环境和技术的飞速发展，新的问题和需求也会持续涌现，相信此研究工作必将是不断持续的。

在此衷心感谢参加研究报告编写的各单位、组织及个人。

本报告编制过程中参考了行业很多研究成果，在此一并感谢。

组织指导：全国汽车标准化技术委员会电子与电磁兼容分技术委员会。

起草单位：中国汽车标准化研究院、中国第一汽车股份有限公司、吉利汽车研究院（宁波）有限公司、上海启津测试技术有限公司、阿波罗智联（北京）科技有限公司、上海引望智能技术有限公司、零束科技有限公司、深圳市航盛电子股份有限公司、宁波赛宝信息产业技术研究院有限公司、上海洛轲智能科技有限公司、奇瑞汽车股份有限公司、小米汽车科技有限公司、上海集度汽车有限公司、中国汽车工程研究院股份有限公司、襄阳达安汽车检测中心有限公司、上海电器设备检测所有限公司、上海世科嘉车辆技术研发有限公司、苏州智华汽车科技有限公司、立昇智能科技（上海）有限公司、上海鼎真测试技术有限公司。

主要起草人：文清浩、朱顺、王雪良、裴学达、季宜麟、李非凡、王建国、张宝军、王冲、汤仕晖、王小刚、徐逸诚、徐金成、邓绍坤、姚佳爱、谷腾蛟、谭功伟、丁鹏、操龙飞、王建、秦高峰、朱俊、李柯平、王永合。

1 引言

1.1 研究背景

1.1.1 汽车电动化的快速发展

近年来，电动汽车技术飞速发展，续航里程持续刷新纪录。新能源车企不断推出续航里程超过 600 公里甚至 1000 公里的全新车型，让消费者真正体验到了电动汽车在续航里程上的优势，这也极大地提升了消费者对电动车的信心。此外，整车安全性能的大幅提升，也为电动车未来的大规模推广铺平了道路。

智能网联技术的广泛应用，也为电动汽车注入了新的活力。新一代电动车不仅在续航里程和动力输出上有了大幅提升，在智能化和网联化方面也有了质的飞跃。车载信息娱乐系统、智能语音交互、高精度定位导航等前沿技术的融合，让电动汽车不仅更加智能、互联，也更加人性化和贴心。随着 5G 等通信技术的普及，电动车与充电桩、城市交通等的深度融合，将进一步提升出行体验，加快电动化进程。

电动汽车产业链从上游到下游正在发生深刻变革。在上游，电池 pack 及电机等核心零部件的技术创新不断推进，大幅提升了电池能量密度和动力系统的效率。在中游，车企通过模块化设计、电子电气架构等技术的应用，实现了电动车整体性能的全面提升。在下游，充电设施网络的快速建设，为电动车的推广营造了良好的外部环境。可以预见，随着产业链各环节的持续升级，未来电动汽车将会拥有更加出色的产品竞争力。

政策上，近年来各国政府相继出台了一系列支持电动车发展的政策措施。从购置补贴、税收优惠到基础设施建设，多管齐下为电动汽车的普及创造了有利条件。同时，各国还出台了碳中和目标，并将限制内燃机车型的时间表。在政策倾斜和社会环保诉求的双重驱动下，电动汽车正在快速渗透到日常生活中，成为绿色出行的新风尚。

总的来说，电动汽车技术的快速进步，再加上国家政策的大力支持，正推动着电动化进程不断加速。电动汽车和混合动力汽车的普及，电池组、电机和电子控制单元等部件在工作过程中会产生大量热量。传统的风冷散热方式难以满足这

些高热负荷部件的散热需求，液冷技术因其高效的散热性能成为保障汽车动力系统稳定运行的关键，从而推动了液冷控制器的研究。

1.1.2 提高汽车性能和续航里程

首先，液冷系统能够更有效地控制汽车电池、电机等关键部件的工作温度。相比风冷，液冷的散热效率更高，可以防止部件在高功率运行时因过热而出现性能下降的情况，从而确保汽车在各种工况下都能保持稳定且高效的性能输出。

其次，精确的温度控制有助于延长零部件的使用寿命。如电池在适宜的温度范围内工作，其充放电效率更高，容量衰减速度减缓，这意味着车辆在相同的电池容量下能够行驶更长的里程。

再者，液冷系统能够应对汽车在高负荷运行时产生的集中热量，确保各个部件始终处于最佳工作温度，从而充分发挥其性能潜力，提升汽车的整体性能和续航里程。

此外，液冷系统相对更节能，减少了散热过程中的能量损耗，间接为汽车续航里程的提升做出贡献。

1.1.3 汽车智能化和自动驾驶的趋势

自动驾驶技术和智能汽车趋势成为了汽车行业近年来的热点话题。自动驾驶技术的发展为实现智能化的驾驶方式奠定了基础，而智能汽车则通过与互联网技术相结合，实现了数据的联通和交互，为用户提供更加便捷、高效、安全的出行体验。

未来汽车的智能化将会在多个方面发挥作用，首先是改变驾驶体验。当前的驾驶一直以来都是人为的方式，需要驾驶员时刻集中精力观察路况，以便做出相应的判断和控制。而自动驾驶技术能够完全改变这种驾驶方式车辆会自行寻找最佳路径和最佳速度，驾驶员将会享受到自由、舒适的出行体验。其次，智能汽车将会改变出行方式的载体。未来，我们可能不再需要拥有一辆属于自己的汽车。智能化的出行将会提供更加灵活、定制化的服务用户可以选择不同的出行方式，根据当时的出行需求，灵活选择自己所需的汽车服务。比如需要在城市之间快速出行时，车辆可以提供更高端的服务，而在日常的通勤或出行时，汽车的定制服务则可以更加简单、经济。

现代汽车配备了越来越多的智能电子设备和传感器，这些设备（尤其是控制器）的运行稳定性对温度控制要求较高。液冷能够更精确地调节温度，确保这些电子设备的可靠运行，为汽车智能化和自动驾驶提供有力支持。

1.1.4 对汽车热控制的更高要求

过热可能导致电池热失控、电机故障、电子设备（尤其是控制器）故障等严重安全问题。液冷控制器通过实时监测和精确控制温度，可以有效预防过热情况的发生，提高汽车的整体安全性。

1.1.5 汽车设计的紧凑化和轻量化

汽车设计的紧凑化和轻量化具有多方面的重要意义。紧凑化设计能够最大程度地优化车内空间利用，使得车辆在有限的尺寸内提供更舒适和实用的驾乘环境。同时，紧凑化还有助于减少车辆在行驶中的空气阻力，提高燃油效率或增加电动汽车的续航里程。轻量化可以显著降低车辆的整备质量，这不仅能提升车辆的加速性能、操控性能和制动性能，还能减少能源消耗，降低尾气排放。在电动汽车中，轻量化对于延长续航里程尤为关键，因为减轻车重可以降低电池的能量消耗。

为了提高汽车的空间利用率和降低整车重量，部件的集成度不断提高，发热密度也随之增大。液冷技术能够在有限的空间内实现高效散热，而液冷控制器则负责优化散热过程，以适应汽车紧凑化和轻量化的设计需求。

1.1.6 消费者对舒适性的期望

液冷技术主要影响的是汽车的性能和稳定性，对消费者舒适性的直接影响相对较小。然而，从间接方面来看，液冷技术能使汽车在极端环境下稳定运行，这有助于保持车内空调系统、电子设备等的正常工作。比如，在炎热的天气中，液冷系统保障了汽车电子设备的良好运行，从而使空调能持续有效地制冷，为消费者提供舒适的车内温度环境。车内电子设备的发热会影响乘客的舒适性。良好的液冷控制可以降低车内温度，提升驾乘体验。

另外，液冷技术有助于优化汽车的设计，实现紧凑化和轻量化，降低能耗；因此，车辆在行驶过程中的噪音和震动将会减少，从而间接提升消费者的驾乘舒适性。

1.2 研究对象

汽车上所用的液冷部件可大致分为两类：一类是非电气及电子设备，另一类是电气及电子设备。

非电气及电子设备通常包含：散热器和液冷机构两个方面。散热器是指汽车散热器水箱、中冷器和冷凝器。冷却机构是指内燃机和变速箱中的液冷机构。

电气及电子设备分为：高压部件和低压部件。高压部件包括动力电池和驱动电机以及这些部件中的液冷板（液冷机构）。低压部件包括液冷型低压控制器总成和总成内包含的液冷板（液冷机构）。见图 1。

在现行技术标准体系中，非电气及电子设备领域已构建起配套完善的国家标准与行业标准体系。针对高压部件产品，现阶段已形成覆盖国际标准、国家标准及行业标准的多层级标准框架，典型技术规范包括：GB/T 18488-2024《电动汽车用驱动电机系统》、QC/T 468-2010《汽车散热器》、QC/T 907-2013《汽车散热器散热性能试验方法》以及 QC/T 780-2007《摩托车用液冷散热器》等系列指导性文件。值得关注的是，相较上述技术领域，低压部件目前尚未形成统一的规范性文件，相关技术参数、性能要求及测试方法仍缺乏系统性标准支撑，亟待相关主管部门协同行业机构加快标准化建设进程。

基于上述研究背景与技术发展现状，本研究以低压电子电气系统液冷散热装置为核心研究对象，通过多维度深度解析构建系统性研究框架。具体而言，本研究聚焦液冷型低压控制器在整车平台的集成应用实践、液冷散热技术的前沿技术演进趋势、技术效能与实施瓶颈的辩证分析，以及对现有标准体系的适配性评估，形成涵盖技术应用、产业发展与标准建设三位一体的综合分析体系。在此基础上，本研究提出具有前瞻性的标准体系架构方案，并围绕标准缺失领域研制优先级划分、技术指标量化准则及测试验证规程等维度形成标准化建设路线图。研究成果将为新能源汽车低压电子电气系统散热技术标准体系的完善提供理论支撑，对引导产业技术规范化发展具有战略指导价值。

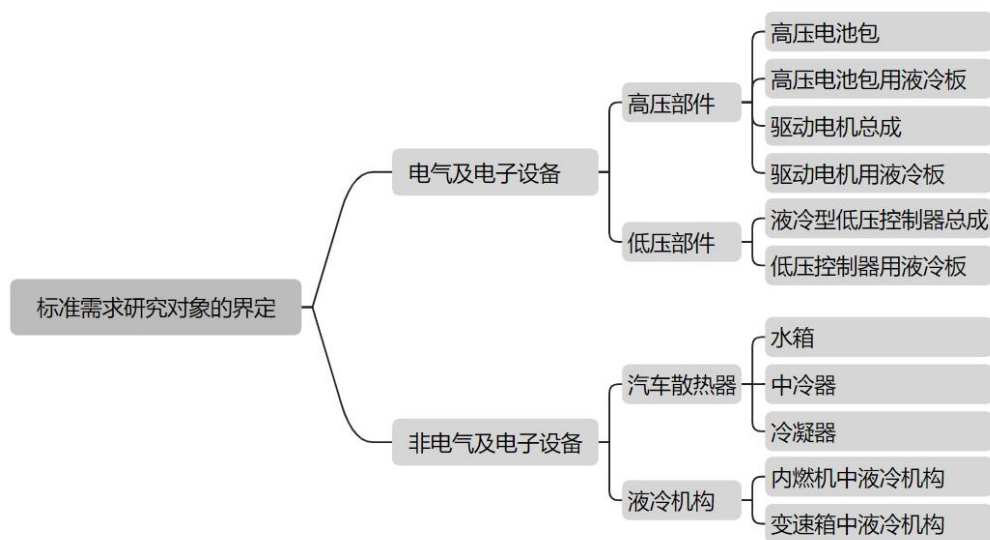


图 1 标准需求研究对象的界定

1.3 产业概述

1.3.1 车企

在新能源汽车技术快速迭代的背景下，低压电子电气系统热管理领域已形成明确的技术演进路径。现阶段行业主流企业已逐步推进低压液冷散热解决方案在量产车型中的商业化应用，技术导入范围涵盖动力域控制器、车载计算单元及充电管理系统等关键部件。根据市场调研数据显示（详见表 1），以一汽、吉利、长安、理想、蔚来、小鹏、小米等为代表的 OEM 厂商，已在其主推的车型产品中实现该散热架构的规模化搭载，标志着低压液冷技术正式进入产业化成熟阶段。此技术路径的推广应用，有效解决了传统风冷方案在热流密度提升与 NVH 性能优化方面的技术瓶颈，为智能电动汽车电子电气系统的可靠性升级提供了创新性工程实践范式。

表 1 部分应用低压电子电气系统用液冷散热装置的车型

序号	车企	量产应用车型示例	电气及电子设备示例
1	一汽	红旗 EH7	自动驾驶控制器
2	吉利	极氪 001	自动驾驶控制器、座舱控制器
3	长安	阿维塔 11	自动驾驶控制器、座舱控制器
4	理想	L9	自动驾驶控制器、座舱控制器

表 1 部分应用低压电子电气系统用液冷散热装置的车型（续）

序号	车企	量产应用车型示例	电气及电子设备示例
5	蔚来	ET7	自动驾驶控制器、座舱控制器
6	小鹏	G9	自动驾驶控制器、座舱控制器
7	小米	SU7	自动驾驶控制器
8	集度	极越 01、极越 07	自动驾驶控制器、座舱控制器
9	特斯拉	model S、model Y	中央域控制器

1.3.2 供应商（电气及电子设备）

基于当前量产车型的技术配置分析，在已实现低压电子电气系统液冷散热装置集成应用的车型中，其搭载的液冷控制器（作为关键电气电子组件）供应链体系已形成明确的产业分工格局。根据行业调研数据显示，该领域供应商集群主要包括但不限于：

- a) 华为；
- b) 百度阿波罗；
- c) 安波福；
- d) 东软；
- e) 弗迪科技；
- f) 德赛西威；
- g) 伟创力；
- h) 台达电子（中国台湾），等。

1.3.3 供应商（液冷器）

基于当前新能源汽车热管理系统的产业化实践，针对已实现低压电子电气系统液冷散热技术规模化应用的量产车型，其配套核心热管理模组——液冷器（液冷板）的供应链体系已形成明确的市场格局。根据产业链调研分析，该细分领域的主要技术供应商群体包括但不限于：

- a) 菲斯达
- b) 讯冷；

c) 溧阳文轩，等。

1.3.4 检测机构

在新能源汽车零部件检测认证体系持续完善的产业背景下，除整车及零部件供应商自建实验平台已通过 CNAS 认证并获得相应检测资质外，行业认证数据库显示，下列具有独立法人资质的第三方检测机构亦已构建完整的低压液冷散热系统检测能力矩阵。这些机构不仅取得 ISO/IEC 17025 认可，其检测服务范围更涵盖了低压电子电气系统液冷散热装置所需的常规试验（ISO 16750 系列标准规定的试验项目）和液冷板所需的试验项目（如泄露检查、压力脉冲）等关键项目。这些独立法人资质的第三方检测机构包括但不限于：

- a) 中汽零部件；
- b) 中国赛宝；
- c) 中国汽研；
- d) 上海电科所；
- e) 襄阳达安；
- f) 启津测试等。

1.4 研究意义

首先，标准需求研究将有助于精准定位市场和用户的实际需求。通过深入研究，可以清楚了解不同应用场景中对低压电子电气系统用液冷散热装置的性能、功能、可靠性等方面的具体要求，从而使制定出的标准更具针对性和实用性。

其次，能够提前预见技术发展趋势。研究标准化需求可以洞察行业未来的走向，为标准的前瞻性和适应性提供依据，确保标准不会很快过时，能够在较长时间内引导行业的健康发展。

再者，有利于优化产业结构和资源配置。明确标准需求可以避免企业的盲目投入和重复开发，促使企业集中资源进行有针对性的创新和生产，提高整个产业的效率和竞争力。

此外，还能加强行业内的沟通与协作。在研究过程中，各相关方能够充分交流意见，达成共识，增强行业的凝聚力和协同创新能力。

最后，有助于保障产品质量和安全性。基于充分的标准需求研究制定的标准，

可以对液冷型控制器的质量和安全特性进行严格规范，保护消费者的权益，降低使用风险。

2 汽车零部件散热方式简介

2.1 自然散热

2.1.1 定义与原理

自然冷却散热方式指不依赖外部机械装置（如风扇、泵等），通过自然对流、热传导或辐射实现热量传递的被动散热方式。其核心原理是依靠物理规律（如热空气上升、冷空气下沉）和环境条件实现温控。例如，发热单元通过散热片与空气直接接触，将热量散入空气中。

2.1.2 结构特点

无主动设备：无需风扇、压缩机等强制散热装置，仅通过设计结构（如散热片、导流罩）或材料导热性（如铜铝板材）实现散热。散热片示例见图 2。

简单紧凑：系统结构简化，占用空间小，适用于对安装空间敏感的零部件。

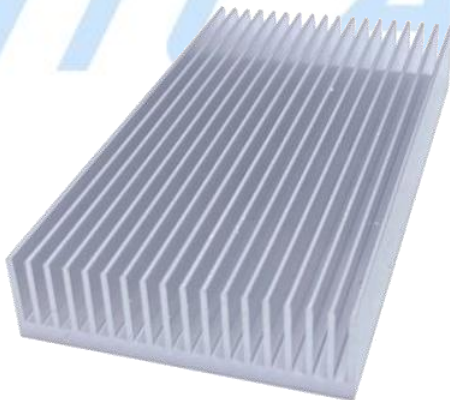


图 2 散 热片示例

2.1.3 应用场景

低热负荷场景：适用于发热量小、功率密度低的部件，如低功耗电机。

环境依赖型场景：在环境温度较低或空气流动性良好的条件下效果更优（如自然风冷电池组通过导流管引入迎风气流）。

2.1.4 优缺点分析

(1) 优势

低成本：无额外能耗，硬件投入和维护费用低；

高可靠性：无机械部件故障风险，适合长期稳定运行；

环保性：无噪音或有害气体产生（如风扇磨损粉尘）。

(2) 局限性

效率受限：空气热容和导热率低，散热速度较慢；

温控精度低：易受环境温度波动影响，难以满足高算力芯片或快充电池的散热需求。

2.1.5 典型技术对比

与风冷对比：自然冷却无需风扇，但散热效率仅为强制风冷的 20%~30%；

与液冷对比：液冷散热热传递超自然冷却 1000 倍以上，但成本和技术复杂度显著增加。

自然冷却散热方式凭借其经济性和可靠性，仍是低热负荷场景的主流选择，但在高功率密度部件（如域控制器、快充电池）中逐渐被液冷或风冷替代。

2.2 热管散热

2.2.1 定义与原理

热管冷却是一种基于相变传热的高效被动散热技术，通过封闭管体内工质的蒸发-冷凝循环实现热量快速转移。其核心原理包括三个阶段：

热管冷却示意图见图 3。

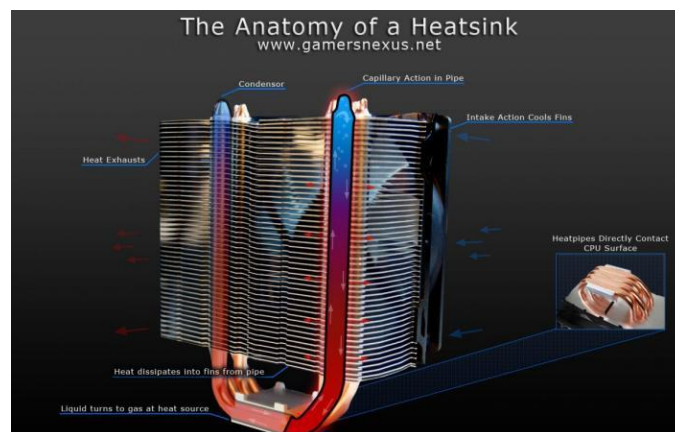


图 3 热管冷却示意图

蒸发段吸热：热量作用于热管一端（蒸发段），液态工质（如水、氨、丙酮等）吸收热量后汽化；

蒸汽传输：高温蒸汽在压差驱动下流向冷凝段，过程中几乎无热量损耗；

冷凝放热：蒸汽在冷凝段释放热量并液化，液体通过毛细力（吸液芯结构）或重力返回蒸发段，完成循环。

2.2.2 结构特点

核心组件包括：

管壳：通常采用铜、铝等导热材料，内部抽真空后填充工质；

吸液芯：多孔材料（如金属纤维或烧结粉末），利用毛细作用实现液体回流；

工质选择：根据温度需求选用不同工质（如低温场景用氨，高温场景用钠）。

性能优势主要体现在：

超高导热效率：热导率可达铜的 1000 倍以上；

等温性优异：管体轴向温差可控制在 $1^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 内，避免局部过热；

无机械部件：无运动部件，可靠性高且免维护。

2.2.3 应用场景

在汽车行业的应用场景主要体现在：

动力电池散热：用于锂离子电池模组，通过热管直接接触电芯，将热量均匀导出至散热片或液冷系统，温差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内。如特斯拉部分车型采用热管+液冷混合方案，提升电池热失控防护能力。

电机与功率器件冷却：集成于电机定子或转子，利用热管快速导出绕组热量，降低温升 30% 以上。IGBT 模块散热中，热管嵌入散热基板，实现芯片结温降低 $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

车载电子设备：应用于高算力域控制器（如自动驾驶主控芯片），通过热管连接散热鳍片，减少对强制风冷的依赖。

2.2.4 优缺点分析

（1）优势

高效节能：无额外能耗，散热效率远超自然冷却；

轻量化设计：同等散热需求下，热管系统重量比液冷轻 40%以上；

环境适应性：可在-50℃至 200℃范围内稳定工作。

（2）局限性

成本较高：精密加工和真空封装工艺导致成本高于风冷系统；

设计复杂度：需匹配工质与热源温度，定制化要求高；

轴向长度限制：长距离传热需多级热管串联，增加系统体积。

2.2.5 典型技术对比

与液冷对比：热管无需泵阀，可靠性更高，但液冷散热上限更高（如支持 500W/cm²以上热流密度）。混合方案（热管+液冷）成为高端车型主流，兼顾效率与成本。

与风冷对比：热管散热效率是风冷的 5~10 倍，且无噪音问题。在空间受限的域控制器中，热管可替代传统鳍片风冷，体积减少 50%。

热管冷却凭借其高效、可靠的特性，在新能源汽车高精度温控场景中逐步普及，尤其适用于电池热管理、高密度电子器件散热等关键领域。

2.3 风冷散热

2.3.1 定义与原理

风冷散热是通过空气流动带走热量的被动或主动散热技术，主要分为两类：

自然风冷：依赖车辆行驶产生的气流或自然对流散热，无需额外能源驱动，适用于低热负荷场景（如磷酸铁锂电池组）。

强制风冷：通过风扇或空调系统强制加速空气流动，提升散热效率，常见于中高功率场景（如电机、早期动力电池）。

2.3.2 结构特点

（1）自然风冷系统

主要有以下部分构成：

散热片：覆盖发热部件（如电池模组、电机壳体）以增大散热面积；

导流管：引导车辆行驶中的迎风气流直接进入散热区域；

分流板：优化气流分布，避免散热死角。

(2) 强制风冷系统

主要有以下部分构成：

风扇/空气泵：主动驱动空气流动（如乘员舱空调风引入电池组）；

散热鳍片：与风扇配合加速热量传递（常见于电机散热设计）；

风道设计：通过密封管道集中气流，提升散热定向性（如舱内引风式冷却）。

强制风冷散热示例见图 4。



图 4 强制风冷散热示例

2.3.3 应用场景

自然风冷主要应用于低发热要求的设备，强制风冷主要应用于高发热要求的设备。例如，自然风冷用于低功率电机，通过同轴风扇构建内循环散热。强制风冷用于高负荷电机，结合散热鳍片和风扇提升散热效率。

2.3.4 优缺点分析

(1) 优势

低成本：自然风冷无需额外能耗，硬件成本仅为液冷系统的 20%~30%；

结构简单：无复杂管路或密封需求，维护便捷（如更换风扇即可修复强制风冷系统故障）；

轻量化：相比液冷系统，重量降低 40%以上，适合对空间敏感的部件。

(2) 局限性

散热效率低：空气热导率仅为水的 0.025%，自然风冷效率不足液冷的 1%；

环境依赖性：自然风冷在高温或静止状态下易失效，强制风冷能耗增加 30%~50%；

噪音问题：强制风冷风扇运行噪声最高可达 70dB，影响驾驶舒适性。

2.3.5 典型技术对比

与液冷对比，液冷散热导率虽然超风冷 1000 倍以上，但成本增加 3~5 倍。风冷在低端车型和特定场景（如短续航电动车）仍具成本优势。

技术趋势上，将向着以下方向发展：

混合散热：部分车型采用风冷+液冷组合（如电池组风冷辅助液冷主散热）。

智能控制：通过传感器调节风扇转速，降低强制风冷能耗（如特斯拉电池温控策略）。

风冷散热凭借其经济性和结构简单性，在低热负荷场景和早期电动车型中仍占一席之地，但高功率密度部件（如域控制器、快充电池）已逐步转向液冷散热方案。

2.4 多级散热

2.4.1 定义与原理

多级散热方式是通过多阶段温控策略或多种散热技术协同实现的复合散热方案，其核心在于根据不同工况动态调整散热模式，或通过结构设计实现热量逐级传导。典型应用包括：

温度分层控制：低温时优先采用自然冷却，中温启动强制风冷，高温阶段启用液冷或热管散热，例如发动机冷却系统通过节温器控制大小循环切换。

技术协同散热：结合液冷、风冷及相变材料，如动力电池组采用液冷主散热+风冷辅助散热+导热硅胶填充间隙的三级结构。

2.4.2 结构特点

（1）分层控制模块

节温器：根据冷却液温度自动切换小循环（仅发动机内部循环）和大循环（散热器介入），减少冷启动热损耗；

智能风扇系统：多组风扇分时启动（如单风扇用于中低温散热，双风扇并联应对高负荷工况）。

（2）多技术协同结构

复合散热器：例如中冷器与液冷散热器叠加布置，同时降低进气温度和冷却液温度；

导热介质桥接：利用导热硅胶片连接发热部件与散热基板，实现热量从电芯→液冷管→散热鳍片的多级传递。

2.4.3 应用场景

（1）传统燃油车发动机散热

小循环阶段：冷启动时关闭散热器通路，加速发动机升温至 90℃，减少燃油消耗；

大循环阶段：高温时开启散热器与风扇，通过液冷+强制风冷组合散热。

（2）新能源汽车电池热管理

低温环境：优先使用加热片+导热硅胶预热电池组；

高温快充：切换至液冷系统并启动风扇强化散热，温差控制精度达 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

2.4.4 优缺点分析

（1）优势

能效优化：低负荷时减少散热能耗（如小循环模式降低燃油车冷启动油耗 15%~20%）；

温控适应性：覆盖 -30°C 至 150°C 宽温域，满足极端工况需求（如高寒地区电池预热与热带快充散热）。

（2）局限性

系统复杂度高：需集成传感器、控制阀等多组件，故障率比单级散热系统提升 30%~50%；

成本增加：液冷+风冷混合系统成本是单一风冷方案的 3~5 倍。

多级散热方式通过动态调节与多技术协同，显著提升了汽车零部件的热管理效率，尤其在新能源高功率密度部件（如域控制器、800V 快充电池）和传统动力系统中已成为主流方案。

2.5 液冷散热

2.5.1 定义与原理

液冷散热是通过循环流动的冷却液（如水、乙二醇或油）主动吸收并转移热量的技术，其核心原理包括：

热量吸收：冷却液流经发热部件（如电池模组、电机绕组或芯片）表面，通过热传导吸收热量；

热量传递：吸热后的高温冷却液经管道输送至散热器（或热交换器），与空气或其他介质进行热交换；

温度调控：通过传感器实时监测温度，动态调节冷却液流量或散热器功率，维持部件工作温度在最佳区间。

2.5.2 结构特点

（1）间接液冷

冷却水道集成：在设备内布置封闭水道，冷却水不与部件直接接触，适用于中高功率场景。

典型组件：水泵、水箱、散热器、温度控制器，成本约为风冷系统的 3~5 倍。

间接冷却式液冷散热装置示例见图 5。

（2）直接液冷

介质接触式散热：使用绝缘油直接喷淋或浸没发热部件（如电机转子或 IGBT 模块），散热效率较间接液冷提升 30% 以上。

创新方案：如小米汽车“双向全油冷技术”（见图 6），通过油路双向循环增强散热均匀性。

直接冷却式液冷散热装置示例见图 7。

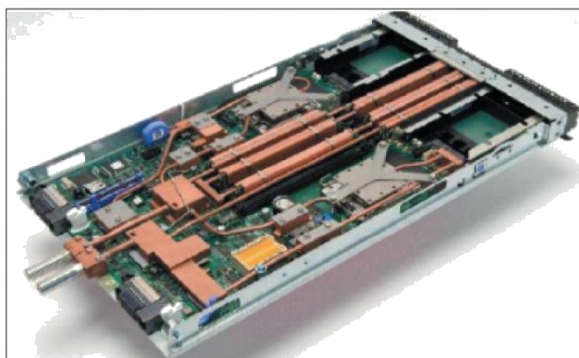


图 5 间接冷却式液冷散热装置示例

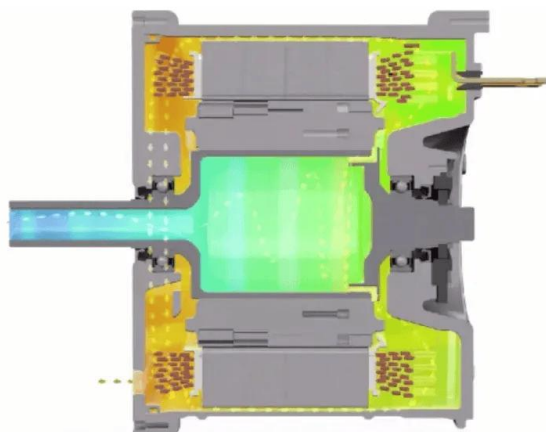


图 6 双向全油冷技术示意图

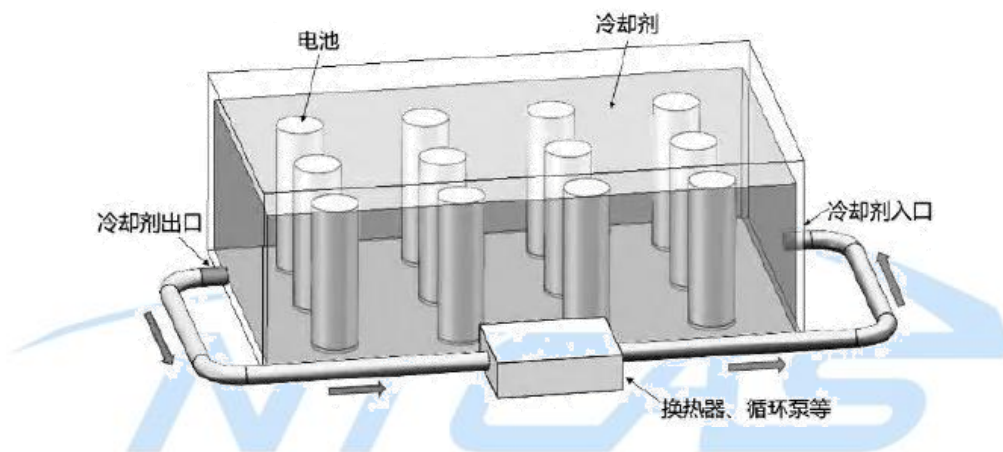


图 7 直接冷却式液冷散热装置示例

2.5.3 应用场景

(1) 新能源汽车领域

电机控制器散热：液冷技术用于冷却 IGBT 模块（绝缘栅双极型晶体管），通过冷却液直接接触或冷板间接导热，将热流密度超过 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ 的芯片温度控制在安全范围，保障动力系统稳定性。典型方案如云道智造研发的伏图-电子散热模块（Simdroid-EC），可精准模拟 IGBT 温度分布并优化散热方案。

动力电池热管理：液冷系统通过冷却板覆盖电池模组间隙，温差可控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 内，支持 -30°C 至 60°C 极端环境，延长电池寿命（如特斯拉液冷电池包）。800V 高压平台及 SiC 功率器件的普及进一步推动液冷需求，提升快充效率。

超充桩散热：液冷充电枪线通过内置循环管路降低线缆温度，直径减少 50%，重量减轻 30%，支持 480kW 超充功率，防护等级达 IP65。

（2）数据中心与算力设备

高密度服务器散热：液冷技术（冷板式/浸没式）用于 GPU、AI 芯片等高功率部件，单机柜功率超 20kW 时，PUE（能源使用效率）可降至 1.1 以下，相比传统风冷节能 30% 以上。英伟达 Blackwell Ultra 芯片采用机架级液冷，单机架功率达 120kW，支持百亿亿次计算。

余热回收利用：60°C 以上的高温冷却液可接入建筑供暖或工业流程，提升能源循环利用率（如北欧数据中心为居民区供暖）。

（3）工业与电力电子设备

风力发电变流器：IGBT 液冷板通过内部流道设计快速导出热量，解决高海拔、高湿度环境下散热难题，提升设备可靠性。

高铁牵引系统：液冷技术用于牵引变流器和电机控制器，支持持续高功率输出，散热效率较风冷提升 10 倍以上。

航空航天电子设备：液冷方案适应极端温度与振动环境，为机载雷达、航电系统提供紧凑型散热支持。

（4）消费电子与通信设备

5G 基站散热：液冷技术替代传统空调，降低基站能耗 40%，同时减少噪音（≤50dB），适用于密集城区部署。

高性能计算芯片：3nm 以下制程芯片采用微通道液冷板，热阻降低 50%，保障算力密度持续提升（如 AI 大模型训练集群）。

液冷散热凭借高效、精准的温控能力，已成为高功率密度场景的核心解决方案，并在新能源、算力基建、工业等领域持续拓展应用边界。

2.5.4 优缺点分析

（1）优势

散热效率高：冷却液热容是空气的 3500 倍，同等体积下热导能力超风冷 1000 倍；

环境适应性强：可通过加热/冷却模块应对 -40°C 至 150°C 工况；

低噪音：水泵运行噪音 ≤45dB。

（2）局限性：

成本高昂：液冷系统硬件成本是风冷的 3~5 倍，维护复杂度增加 30%；

泄漏风险：管道密封失效可能导致冷却液渗漏，引发短路或腐蚀。

2.5.5 典型技术对比

与风冷对比，液冷散热导率超风冷 1000 倍以上。

液冷散热凭借其高效、精准的温控能力，已成为新能源汽车、高算力芯片及超充设备的核心散热方案，并在 800V 高压平台、SiC 功率器件等前沿领域持续迭代。

3 液冷散热技术的发展历程

3.1 萌芽期：风冷主导与早期液冷探索

该时期主要分布在 20 世纪 20 年代至 20 世纪 60 年代。

在汽车领域，早期汽车发动机主要依赖自然风冷散热，通过行驶气流或简单风道设计散热，如保时捷 911 早期车型采用风冷技术。1927 年乙二醇防冻液问世，替代易燃易挥发的酒精，成为早期液冷系统的基础介质。

在航空领域，寇蒂斯 B-8 航空引擎（1908 年）采用灰铁铸造气缸与宽散热片设计，但因铸铁导热性差导致效率受限。雷诺-8 发动机（1909 年）：因散热问题导致功率受限，需通过过量燃油喷射辅助降温（油耗高达 11b/hp/hr），被称为“油冷发动机”。

在计算机领域，1967 年，IBM 推出全球首台冷水冷却计算机 System360（见图 8），首次将液冷技术引入服务器领域。



图 8 全球首台冷水冷却计算机 System360

风冷发动机依赖外部气流，散热效率受环境温度与空气密度影响显著，高海拔、高温场景下易过热，使得风冷出现技术局限性。

3.2 探索期：液冷技术跨领域应用

该时期主要分布在 20 世纪 70 年代至 21 世纪初。

在汽车领域，19 世纪 80 年代，铝制发动机和散热器普及，推动防腐剂（如磷酸盐）和冷却液配方迭代，解决铝材与硬水的兼容性问题。19 世纪 90 年代，保时捷 911（993 车型，见图 9）结束风冷历史，全面转向液冷技术，标志汽车散热系统升级。

在工业与电子设备领域，液冷技术开始应用于高功率工业设备（如风力发电变流器）和通信基站，通过冷板式液冷提升散热效率。



图 9 保时捷 911（993 车型）

3.3 成熟期：材料升级与系统集成

该时期主要分布在 21 世纪 10 年代至 21 世纪 20 年代。

（1）材料与工艺突破

冷却液配方加入纳米流体（如石墨烯基溶液），导热性能提升 50%；3D 打印微通道散热器使液冷系统体积缩小 30%。

密封技术改进（如硅胶密封圈，见图 10）和智能温控模块普及，降低泄漏风险并实现精准温控。



图 10 硅胶密封圈

(2) 新能源汽车推动

液冷技术成为动力电池热管理核心方案，如特斯拉液冷电池包温差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 内，支持快充与极端环境。

电机控制器采用油冷技术（如小米汽车“双向全油冷”），散热效率较风冷提升 10 倍以上。

3.4 创新期：高性能与绿色化发展

该时期主要分布在 21 世纪 20 年代至今。

(1) 算力革命驱动

2025 年，英伟达 Blackwell Ultra 芯片采用机架级液冷，单机架功率达 120kW，支持百亿亿次计算；浸没式液冷 PUE（能源使用效率）降至 1.05，算力密度提升 5 倍。

统一石化推出单相浸没式冷却液 IMF F6210，实现 100%阻燃与 160 $^{\circ}\text{C}$ 耐高温，适配 AI 芯片极端散热需求。

(2) 绿色可持续发展

液冷系统余热回收技术（如数据中心为居民区供暖）提升能源利用率，减少碳排放。

混合散热方案（液冷+风冷/热管）普及，能耗降低 20%以上。

综上所述，液冷技术从早期单一散热手段发展为跨领域、多场景的高效热管

理方案，其迭代历程体现了材料科学、智能控制与绿色能源理念的深度融合。

4 液冷散热技术概述

4.1 液冷散热的基本原理

4.1.1 概述

液冷散热技术是一种通过使用液体作为传热介质来降低电子设备的温度，从而带走热量的技术。基本原理是利用液体的热导性能和热容量来吸收和传递热量。通常情况下，液冷散热系统由散热器、水泵、水管和散热介质等组成。散热器是液冷散热系统的核心部件，它通过与热源接触，将热量传递给流过散热器的液体介质。水泵负责将热载体（通常是水或液态冷却剂）推送到散热器，以保持流动。水管用于连接散热器和水泵，形成一个封闭的循环系统。热载体在循环中吸收热量后，通过水泵再次送回散热器，形成循环往复。

液冷散热系统通常分为直接冷却和间接冷却两类。

4.1.2 直接冷却

将发热元件直接浸没在冷却液中，依靠液体的流动循环带走热量。主要分类有喷雾式、喷淋式、浸没式三种。

（1）浸没式冷却

直接冷却中的浸没式是将发热电子元件直接浸没在冷却液中。其原理是基于液体的高比热容和良好的热传导性。当电子元件工作产生热量时，热量会以热传导的方式传递给周围的冷却液。因为液体分子之间的距离相对较近，热传导效率比空气高得多。

以数据中心服务器为例，当服务器中的 CPU、GPU 等高性能芯片运行发热后，浸没在其中的冷却液（如电子氟化液）会迅速吸收芯片散发的热量。这些热量会使冷却液温度升高，而由于液体的流动性，温度升高后的液体在自然对流或强制对流（通过泵等设备驱动液体循环）的作用下，离开发热元件表面。

（2）喷雾式冷却

喷雾式是将冷却液通过喷头雾化后喷向发热元件。雾化后的冷却液液滴具有很大的表面积，能够快速吸收热量。这是因为表面积增大后，热交换的面积也相

应增大。当液滴接触到发热元件表面时，热量从元件传递到液滴，使液滴温度升高。

(3) 喷淋式冷却

喷淋式则是将冷却液以液流的方式喷淋到发热元件上。其原理和喷雾式类似，也是利用液体的高热传导性来吸收热量。不过，喷淋式的液滴相对较大，流量也可能更大。在这个过程中，冷却液在元件表面形成一层液膜，热量从元件传递到液膜，再通过液膜的流动（在重力或外力作用下）不断更新液膜，将吸收的热量带走。

比如在一些高功率密度的电子设备散热应用中，对于发热极为严重的特定元件，采用喷雾式或喷淋式冷却，能够快速降低元件表面温度，避免元件因过热而损坏。

4.1.3 间接冷却

设备热源与液冷剂之间没有直接接触的换热过程，主要是冷板式。

冷板式液冷散热是一种典型的间接冷却方式，主要是通过一块特制的冷板来实现热量交换。冷板是一个内部含有流道的金属板，一般由高导热性材料（如铜）制成。工作时，冷板与发热元件紧密贴合，发热元件产生的热量通过热传导的方式传递到冷板。由于冷板与发热元件接触的一面温度升高，而冷板内部有循环流动的冷却液，热量就会从冷板较高温度的一侧传递到冷却液中。

例如，在服务器的 CPU 散热中，冷板贴合在 CPU 表面。当 CPU 运行产生热量后，热量传导至冷板，冷却液（如乙二醇水溶液）在冷板的流道中流动，吸收热量后被泵输送到外部的散热器。在散热器中，冷却液的热量再通过散热鳍片和风扇散发到周围空气中。

这种方式使得发热元件和冷却液没有直接接触，避免了冷却液泄漏可能对元件造成的损坏风险，同时利用了液体良好的热传导特性来有效散热。

4.2 液冷散热系统的组成

液冷散热系统通常由以下几个部分组成：

a) 水冷块：内部留有水道的金属块，由铜或铝制成，与发热部件接触并吸收热量。

b)循环液：在系统中循环流动，将热量从发热部件带走。常见的循环液有水、矿物油、电子氟化液等。

c)水泵：提供动力，使循环液在系统中循环。

d)管道：连接各个部件，形成循环回路。

e)水箱或换热器：储存循环液或进行热交换。

f)散热器：将循环液中的热量散发到空气中，通常由散热片和风扇组成。

此外，部分液冷散热系统还可能包括以下部件：

g)温度传感器：监测系统温度，以便控制水泵和风扇的运行。

h)控制器：根据温度传感器的反馈，自动调节水泵和风扇的转速，以实现最佳的散热效果。

i)冷却液过滤器：过滤循环液中的杂质，防止堵塞管道和水冷块。

j)补液口：用于添加或更换循环液。

k)泄压阀：防止系统中的压力过高。

5 液冷散热技术在汽车零部件中的应用

5.1 发动机冷却

5.1.1 液冷散热技术在发动机冷却应用上的简介

汽车发动机工作循环时，混合油气发生“爆炸式”燃烧，其燃烧时的温度可达2000℃以上，发动机的活塞、缸体、汽缸盖、气门等部件与高温可燃混合气接触而强烈受热。如果发动机得不到有效降温会使其机械强度变差，且汽缸内温度过高还会使混合油气早燃，导致发动机爆震现象，过高的温度还会使润滑油烧损及变质，高温情况下会使汽缸内间隙变小，造成润滑能力下降，严重时还会引起粘着磨损、发动机拉缸故障。

汽车发动机的冷却系统包括风冷和液冷，其中液冷是最主要的冷却方式。液冷利用水泵提高冷却液的压力，强制冷却液在发动机的冷却水道中循环流动，将发动机多余的热量带走，使其保持在良好工作温度。

示意图如图 11 所示。

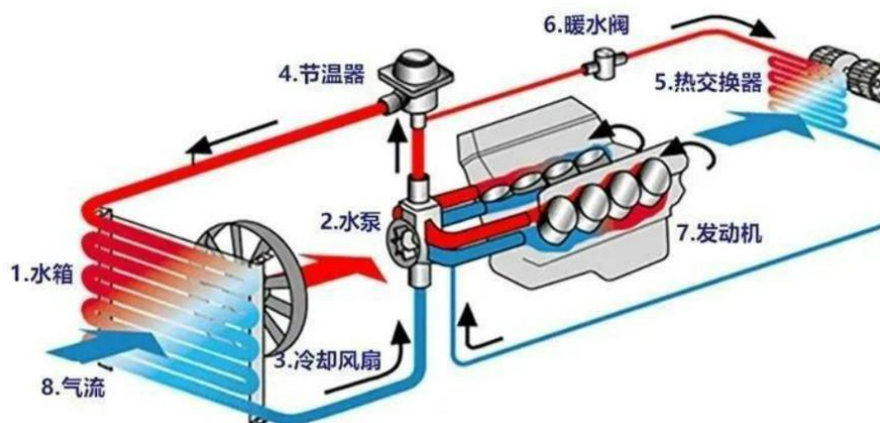


图 11 发动机冷却系统示意图

5.1.2 液冷散热技术在发动机冷却应用上的实际效果

（1）精准温度控制

最佳工作温度维持：通过循环冷却液（通常为 50%乙二醇溶液），将发动机温度稳定在 85°C~105°C 区间（铸铁缸体略高，全铝缸体略低），相比风冷系统波动范围缩小 60%以上。

快速暖机：冷启动时通过节温器闭锁小循环，使发动机在 2-3 分钟内达到 60°C（风冷需 5-8 分钟），降低低温磨损。

（2）性能提升

爆震抑制：冷却液通过缸体水道直接吸收燃烧室热量，降低缸盖温度至 120°C 以下（风冷可达 180°C），允许压缩比提升至 12:1（如马自达 Skyactiv-X）。

涡轮增压支持：集成涡轮中冷器冷却回路（如大众 EA888 发动机），将增压空气温度从 200°C 降至 50°C，提升进气密度 15%。

（3）燃油经济性与排放优化

摩擦损失降低：精确控温使机油粘度稳定在 10-15 cSt，减少机械摩擦，燃油效率提升 5%-10%（NEDC 工况）。

排放控制：维持三元催化器工作温度在 400-800°C，减少冷启动阶段 HC/CO 排放达 70%（国六标准要求）。

5.2 变速箱冷却

5.2.1 液冷散热技术在变速箱冷却应用上的简介

变速箱在工作时，内部齿轮、离合器片、液力变矩器等部件因摩擦和液压阻力产生大量热量。若温度超过设计阈值(通常为 90-120°C)，会导致变速箱油(ATF)黏度下降、润滑失效，加速部件磨损，甚至引发油液氧化、密封件老化等问题。

通过独立散热器或与发动机冷却系统联动(水冷)，利用冷却液循环带走热量。例如，部分自动变速箱通过外置油冷器与发动机水箱并联，实现高效散热。

5.2.2 液冷散热技术在变速箱冷却应用上的实际效果

(1) 精准油温控制

液冷系统通过冷却液与变速箱油的热交换(如连接发动机冷却回路或独立散热器)，将油温稳定在 80°C~110°C 的合理区间。

在高温工况(如连续爬坡或激烈驾驶)下，液冷系统可将油温峰值降低 15°C~20°C，避免因过热导致的油液氧化和润滑失效。

(2) 延长变速箱寿命

稳定油温可减少内部金属部件(如齿轮、离合器片)的热膨胀差异，降低磨损率，延长变速箱大修周期 30%~50%。通过抑制高温引起的油液黏度下降，保持润滑性能，减少阀体卡滞等故障风险。

(3) 提升换挡平顺性

液冷系统配合液力变矩器热交换器设计(如第三代 6AT 变速箱)，可快速吸收换挡冲击产生的热量，减少换挡顿挫，换挡响应速度提升 0.1 秒以上。低温环境下，通过发动机冷却液预热变速箱油，缩短冷启动暖机时间，改善冬季换挡迟滞问题。

(4) 支持高负荷运行

液冷系统可满足大扭矩(如湿式双离合变速箱承受 500 牛米以上)场景的散热需求，避免因高温触发的动力保护限制。在连续高负荷工况(如拖挂或赛道驾驶)下，液冷散热效率比风冷系统提高 40%~60%，保障持续动力输出稳定性。

(5) 节能与降噪优化

通过优化冷却液循环流量(如可变流量电控机油泵)，液冷系统能耗降低 5%~9%，同时减少油液搅动阻力以提升燃油经济性。液力变矩器集成长行程减震器与液冷协同作用，降低机械振动噪音 3dB~5dB，提升 NVH 表现。

5.3 电池冷却

5.3.1 液冷散热技术在电池冷却应用上的简介

以高压电池包为能量来源的新能源汽车越来越普及，如何保障电池包安全可靠地长期运行越来越受到重视。电池包中的电芯需要工作于合适的温度范围内，温度过高或者过低都会影响电池包的电流输出以及续航，轻则降低新能源车辆的续航里程，重则引发电芯热失控，造成安全事故。

锂离子电池的工作温度需控制在 25°C~40°C 之间，超出此范围会导致：

高温风险：温度 > 50°C 时，电解液分解加速，内阻增大，容量衰减速度提升 30% 以上，极端情况可能引发热失控。

低温限制：温度 < 0°C 时，锂离子迁移速率降低，充放电效率下降 50%，甚至导致析锂短路。

此外，快充（如 350kW 超充）和大电流放电（如电动赛车）时，电池产热速率可达常规工况的 3~5 倍，自然散热或风冷难以满足需求。

电池包总成主流的温度控制系统采用液冷循环系统，可以在高温时（一般 40°C~50°C）降低电芯温度，低温时（比如 -30°C）提升冷却液温度，调节电芯工作于合适的温度范围内，安全可靠地保障车辆正常运行。

5.3.2 液冷散热技术在电池冷却应用上的实际效果

（1）性能提升数据

温控精度：NEDC 工况下，电池包平均温度波动 < 2°C，峰值温度降低 15-20°C；

循环寿命：在 40°C 环境中，液冷系统可使电池循环寿命从 800 次（风冷）提升至 1200 次以上；

充能力：支持 4C 倍率快充（如宁德时代麒麟电池，见图 12），充电时间缩短 40%，且温升 < 10°C。

（2）安全与能效优化

热失控抑制：液冷系统可延缓热扩散时间至 30 分钟以上（国标要求 ≥ 5 分钟）。

能耗经济性：相比风冷，液冷系统整体能耗降低 15%（如比亚迪刀片电池液冷功耗 < 200W，见图 13）。

冬季续航：通过热泵+液冷加热，-20°C 环境续航损失从 40% 缩减至 20% 以内。

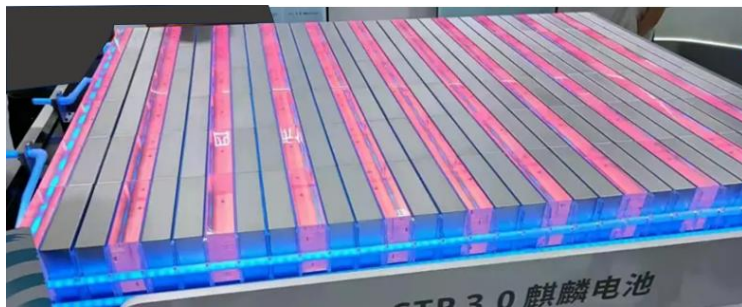


图 12 宁德时代麒麟电池包冷却示意图

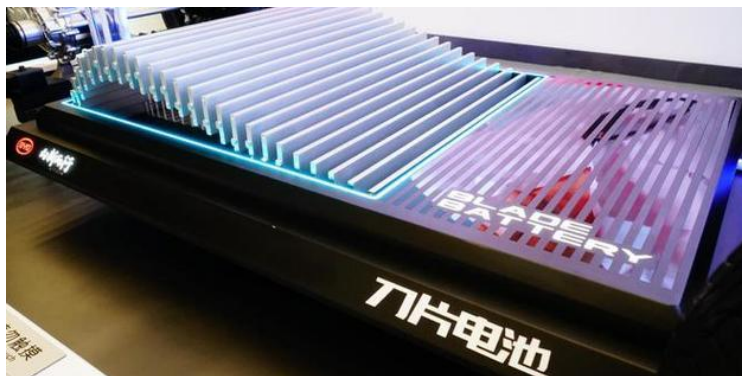


图 13 比亚迪刀片电池

5.4 电机冷却

5.4.1 液冷散热技术在电机冷却应用上的简介

新能源汽车（包括混动和纯电动）的电机系统中处于高速运转状态，其定子、转子、绕组等部件温度较高，过热时会造成热损伤、绝缘失效等问题，影响车辆动力输出。电机常用的冷却系统包括油冷以及冷却液液冷方式，见图 14。

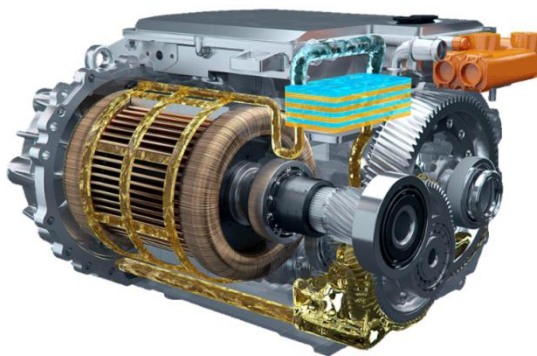


图 14 电驱冷却示意图

电驱系统除了电机本身以外，其集成了越来越多的控制单元，包括电机控制

单元（MCU）、充电控制（OBC）、电源分配单元（PDU）、直流变换（DC-DC）等，出现了三合一或者多合一的电驱系统，其集成控制单元主要采用冷却液液冷方式，连接于车辆液冷系统电驱回路，保障电驱以及车辆功能正常运行。

5.4.2 液冷散热技术在电机冷却应用上的实际效果

（1）高效散热与精准温控

液冷系统通过循环冷却液（如绝缘冷却液）直接吸收驱动电机内部热量，工作温度比传统风冷电机降低 30℃，减少因高温导致的磁钢退磁风险。

采用闭环温控策略（如传感器实时反馈+流量调节），维持电机温度在 60℃~90℃ 最佳区间，避免低温效率损失和高温绝缘老化。

（2）能效与动力性能提升

冷却液的高效散热使电机能效转化率提升至 90%以上（普通电机约 80%），相同功率下续航能力增加 10%~15%。

大功率电机（如 200kW 以上）连续高负荷运行时，液冷系统可减少 20%~25% 的热衰减，保障峰值扭矩输出稳定性。

（3）防护性能优化

液冷电机通过密封结构和 IP67 防尘防水设计，避免沙尘、雨水侵入导致短路或锈蚀，故障率降低 40%。

冷却液循环同时抑制电机内部氧化反应，轴承润滑脂寿命延长 2~3 倍，维护周期从 5 万公里提升至 10 万公里。

（4）复杂环境适应性

高温环境（如 50℃沙漠工况）下，液冷系统仍能维持电机温度 $\leq 100^{\circ}\text{C}$ ，避免触发过热保护限功率。

液冷散热效率比风冷系统提高 3~5 倍，尤其适合高功率密度电机（如 300kW/kg 以上）的长时间运行需求。

（5）轻量化与集成化应用

液冷系统通过紧凑型管路设计（如扁管散热器），整体体积比风冷系统减少 30%，适配电动车底盘空间限制。

与电池、电控共用冷却回路（如三合一电驱系统），散热组件重量降低 15%，系统能效提升 8%。

5.4.3 电机冷却应用上的技术对比与场景匹配

电机冷却应用上的技术对比与场景匹配见表 2。

表 2 技术对比与场景匹配

冷却方式	适用场景	局限性
液冷	高功率电机（>150kW）、极端环境	成本较高，维护复杂度略高
风冷	低功率电机（<50kW）、短途通勤	散热效率低，易受环境影响

5.5 集成控制单元冷却

5.5.1 液冷散热技术在集成控制单元冷却应用上的简介

随着智能汽车的发展，电子控制单元功能越来越复杂，功率越来越大，传统的自然冷却或者风冷已经越来越难以满足高功率小体积电子控制单元的散热需求，液冷需求越来越强烈。

智能座舱域控制器（CDC）、自动驾驶域控制器（ADC/MDC）、充电控制单元（OBC）、电源分配单元（PDU）、智能车灯投影光机等均出现了液冷版本，有效降低了电子控制单元工作温度，满足了高功率高集成度的功能需求。

液冷域控制器示意图见图 15。

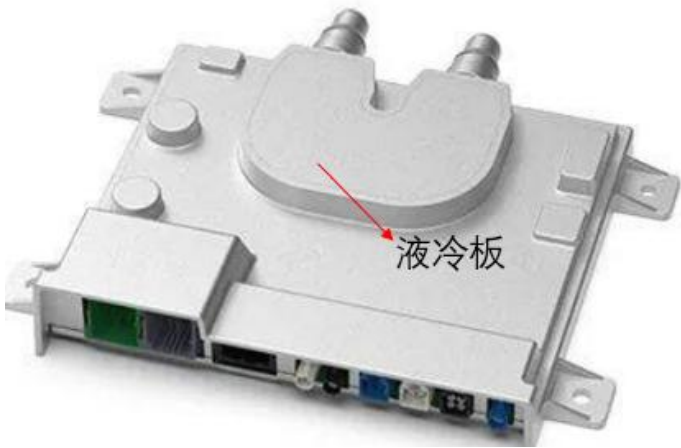


图 15 液冷域控制器示意图

5.5.2 液冷散热技术在集成控制单元冷却应用上的实际效果

（1）高效散热与温度均匀性

热效率提升方面：液冷技术利用冷却液的高比热容特性，相比传统风冷散热，

液体（如水）的导热能力是空气的 1000 倍以上，能快速带走域控制器中 IGBT 等核心部件产生的热量，确保芯片温度稳定在安全阈值内。

（2）节能降耗效果突出

液冷系统可减少对空调和风扇的依赖，能源使用效率可降至 1.1 以下（风冷 PUE 通常为 1.5~2.0）。

（3）空间与噪声优化

省去风冷基础设施，布局更紧凑，相同空间内算力密度提升 3-5 倍。无风扇设计使噪声从风冷的 40dB 降至 20dB 以下。

（4）可靠性增强

液冷减少设备内部灰尘堆积和氧化风险，延长服务器寿命；无振动设计降低硬件故障率，系统稳定性更高。

（5）适配未来技术趋势

支持高算力芯片（如 3nm 以下制程芯片）的散热需求，为 AI 大模型训练、自动驾驶等场景提供技术保障。

（6）碳中和目标下的长期红利

液冷助力数据中心减少碳排放，符合全球 ESG（环境、社会、治理）投资趋势，吸引绿色金融支持。

6 液冷型低压控制器在整车上的应用

6.1 液冷冷却方式的使用

6.1.1 概述

随着智能汽车的发展，电子控制单元功能越来越复杂，功率越来越大，传统的自然冷却或者风冷已经越来越难以满足高功率小体积电子控制单元的散热需求，液冷需求越来越强烈。

归结起来采用液冷控制的主要原因如下：

6.1.2 高功率密度与散热效率需求

（1）芯片热负荷激增

自动驾驶控制器需处理激光雷达、摄像头等多传感器数据，并运行复杂算法

（如神经网络推理），导致算力芯片（如 GPU、SoC）功耗高达 200W~400W，热流密度超过 1kW/cm²。

智能座舱域控制器需支持多屏交互、语音识别及 5G 通信，主控芯片（如高通 8155）峰值功耗达 30W~50W，传统风冷难以满足高效散热需求。为了确保车辆座舱性能的优良体验，一些汽车的智能座舱域控制器采用了高性能的芯片高通 8295P（见图图 16 和图 17），其峰值功耗将更大。



图 16 高性能的芯片高通 8295P

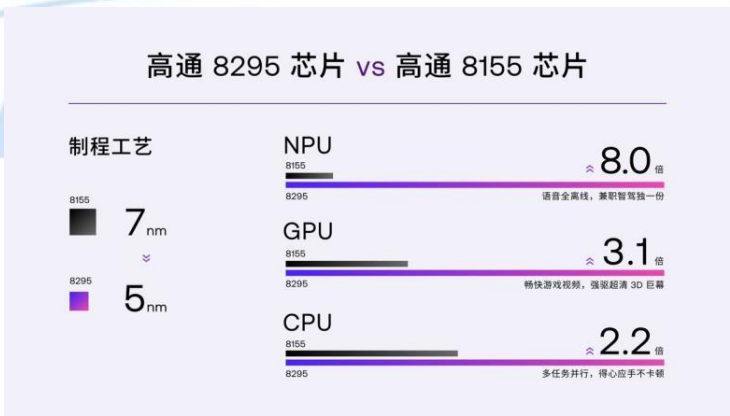


图 17 高通 8295 和 8155 性能对比

（2）液冷散热优势

液体（如乙二醇水溶液）的比热容（约 3.5kJ/kg·K）是空气的 4 倍，导热系数（0.4W/(m·K)~0.6W/(m·K)）为空气的 25 倍以上，可快速吸收并转移热量。此外，液冷系统还可将芯片温度控制在±2℃波动范围内，避免因过热引发的性能降频或硬件损坏。

6.1.3 空间限制与紧凑化设计

(1) 车内空间约束

针对空间要求，不同零部件各有不同需求。例如，自动驾驶域控制器需集成于驾驶舱前舱或底盘区域，座舱域控制器常位于中控台内部，传统风冷需预留风道空间，占用体积达 30% 以上，与轻量化、紧凑化设计目标冲突。

液冷系统通过冷板或微通道直接集成于控制器外壳，体积较风冷减少 20%~30%，适应狭小空间布局。

(2) 噪音控制

风冷风扇在高转速下噪音超过 45dB，影响座舱静谧性；液冷仅需低转速电子水泵（噪音 < 20dB），提升驾乘体验。

6.1.4 复杂环境适应性

(1) 极端温度场景

液冷系统支持宽温域运行（-40°C 至 125°C）：

高温：主动循环冷却液可维持控制器温度稳定（如特斯拉 Model Y 在高温环境下仍保持芯片温度 ≤ 65°C）；

低温：通过预热冷却液避免冷启动时芯片性能衰减（风冷需额外加热模块，能耗增加 20%）。

(2) 高海拔与振动环境

风冷在高海拔地区因空气密度下降导致散热效率降低 50%，而液冷通过介质循环不受气压影响。

液冷管路采用柔性连接与减震设计，适应车辆行驶中的持续振动。

6.1.5 热管理系统集成需求

液冷系统可与电池热管理、电机冷却等子系统联动（如华为 TMS 集成式热管理平台），通过统一冷却液循环网络实现多热源协同控温，提升整体能效。

例如，智能座舱域控制器余热可回收用于电池预热，降低冬季暖风能耗。

6.1.6 可靠性及长期维护优势

(1) 泄漏与腐蚀防护

液冷系统采用铝合金冷板与耐腐蚀密封材料（如氟橡胶 O 型圈），配合低

电导率冷却液（如硅基油），降低泄漏风险。

定期维护周期达 2-4 年，较风冷滤网清洁频率（每 6 个月）更低。

（2）预测性维护支持

通过智能传感器监测冷却液流量、温度及纯度，结合 AI 算法预测管路老化或堵塞风险，提前预警维护需求。

综上所述，液冷技术通过高效散热、空间优化、环境适应及系统集成能力，成为自动驾驶、智能座舱域控制器等零部件的核心热管理方案。其本质是通过液体介质的高热容特性，在有限空间内实现精准温控，同时满足车辆智能化与电气化转型对稳定性、可靠性的严苛要求。

6.2 与风冷散热的比对

6.2.1 散热效率与温控精度

（1）液冷系统

采用冷却液（如乙二醇水溶液或硅基油）作为介质，其比热容（ $3.5\text{kJ/kg}\cdot\text{K}\sim 4.2\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ）是空气的 4 倍以上，导热系数（ $0.4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})\sim 0.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）为空气的 25 倍，可快速吸收并转移热量。

液冷通过微通道或冷板直接接触发热部件（如自动驾驶域控制器），热流密度可达 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ 以上，温差控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内。例如特斯拉 Model Y 的液冷系统可将控制器温度稳定在 65°C 以下，显著优于风冷方案。

（2）风冷系统

依赖空气自然对流或强制风扇散热，热流密度上限仅 $0.2\text{kW}/\text{cm}^2$ ，温差波动可达 $\pm 10^\circ\text{C}$ ，散热效率受环境温度影响显著。

高温或高功率场景下（如连续高速行驶），风冷易因气流不足导致局部过热，引发电池性能衰减或电机降功率。

6.2.2 环境适应性与稳定性

（1）极端温度适应性

液冷系统支持宽温域运行（ -40°C 至 125°C ）：在高温环境下，主动循环冷却液可维持部件温度稳定。在低温环境下，液冷可通过预热冷却液提升电池效率，

而风冷需额外加热模块（如 PTC），能耗增加 20%。

风冷在高海拔地区因空气密度下降，散热效率降低 50%，而液冷通过封闭循环不受气压影响。

(2) 抗污染与可靠性

液冷采用封闭管路设计，隔绝灰尘、油污等外部污染物，长期运行稳定性更优；风冷易因风道堵塞导致散热效率下降 30%以上。

液冷系统泄漏风险需依赖高精度密封技术（如氟橡胶 O 型圈）和耐腐蚀材料（铝合金冷板）解决，维护周期为 2-4 年；风冷仅需定期清洁滤网，但频率更高（每 6 个月）。

6.2.3 成本、空间与能耗对比

成本、空间与能耗对比见表 3。

表 3 液冷系统与风冷系统成本、空间与能耗对比

指标	液冷系统	风冷系统
成本	硬件成本高（冷板、泵阀、管路成本增加 3~5 倍）	结构简单，成本仅为液冷的 1/3~1/5
能耗	电子水泵功耗约 200W，综合能效高	风扇功耗约 500W，高转速下噪音 >40dB
空间占用	体积减少 30%，支持紧凑集成（如冷板嵌入控制器）	需预留风道空间，布局灵活性低

6.3 应用案例

在当前新能源汽车产业技术迭代进程中，热管理系统的智能化演进已进入规模化应用阶段。主流主机厂在量产车型低压电子电气架构热管理方案中，普遍采用基于液态介质的主动循环冷却技术路径。需特别指出的是，该技术方案已实现跨品牌、跨平台产业化应用，典型实施案例包括：中国一汽集团红旗新能源序列旗舰车型 EH7、吉利控股集团极氪品牌 ZEEKR 001、长安汽车阿维塔科技首款情感智能电动车型 11、理想汽车 L 系列全尺寸旗舰 SUV L9、蔚来汽车 NT2.0 平台智能电动旗舰轿车 ET7、小鹏汽车扶摇架构高端 SUV G9、小米汽车首款战略车型 SU7，以及特斯拉上海超级工厂生产的全球化车型 Model Y 等。上述车型在电驱

动系统、车载控制器及智能驾驶域控系统等关键子系统中均已集成高效液冷散热系统。

图 18 至图 25 给出了上述车辆近 12 个月（2024 年 4 月至 2025 年 3 月）的销量信息，该信息来源于太平洋汽车网站（<https://price.pcauto.com.cn>）的统计数据。

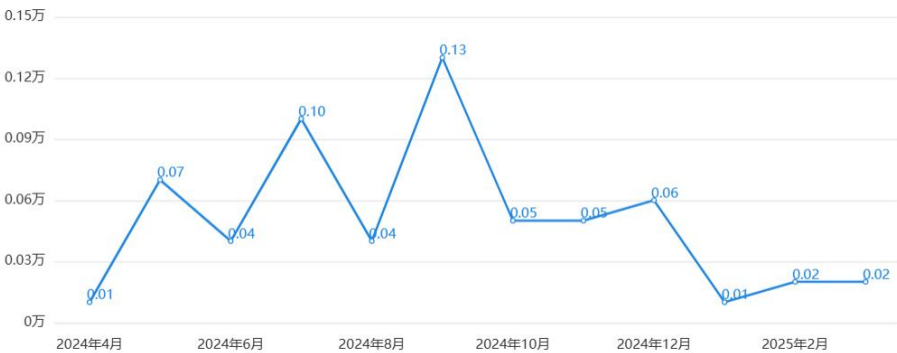


图 18 一汽红旗 EH7 近 12 个月销量



图 19 吉利极氪 001 近 12 个月销量

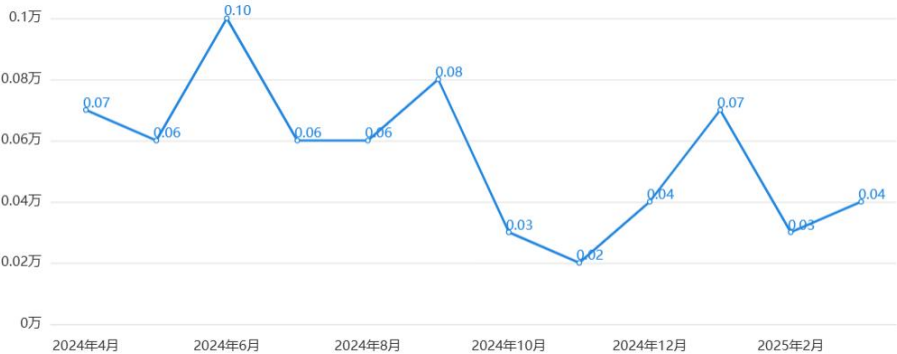


图 20 长安阿维塔 11 近 12 个月销量

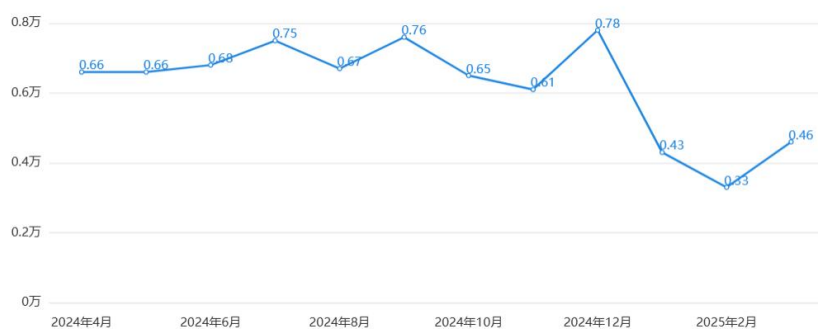


图 21 理想 L9 近 12 个月销量



图 22 蔚来 ET7 近 12 个月销量



图 23 小鹏 G9 近 12 个月销量



图 24 小米 SU7 近 12 个月销量

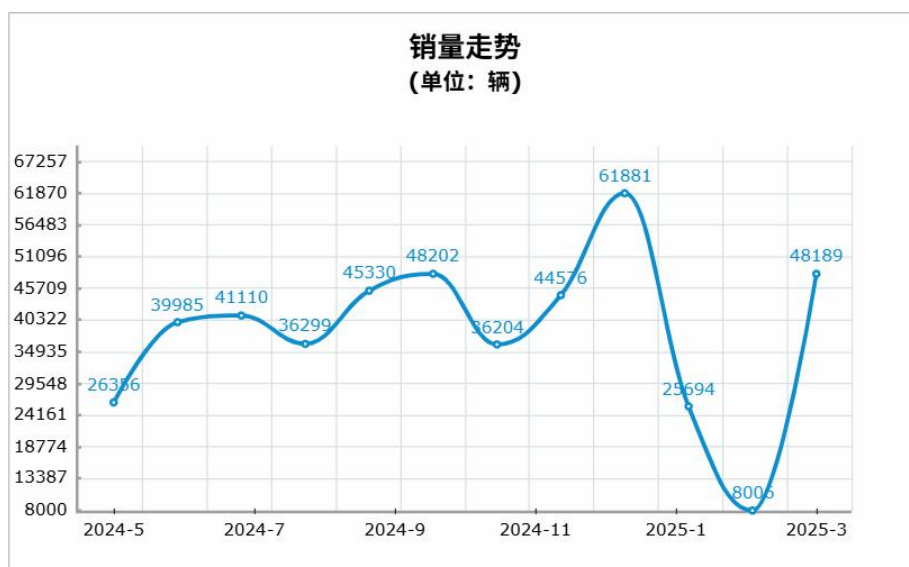


图 25 特斯拉 model Y 近 12 个月销量

通过对图 18 至图 25 的实证数据分析可知,所述车型在 12 个月的自然年周期内实现的累计终端销售量已达 88.35 万辆。需要特别强调的是,具备液冷式低压热管理系统的在役车辆总量存在显著统计外延性——基于产业链调研数据显示,当前市场在售车型中配置该系统的总量已突破百万辆规模量级,充分印证了智能化液冷式低压热管理系统在新能源汽车领域的市场渗透率。

6.4 现有问题

(1) 液冷系统的挑战

低温流动性: 冷却液在 -40°C 以下粘度剧增,需采用低粘度硅油(成本上升 30%)或预加热模块。

泄漏风险: 密封件老化或管路振动可能导致冷却液渗漏,例如某车企因 O 型圈失效引发召回事件。

(2) 风冷系统的局限性

散热天花板: 风冷热流密度无法满足高算力芯片($>100\text{W}$)或快充电池($>2\text{C}$)的散热需求。

环境依赖: 在高温、高湿度或多尘环境中,风冷散热效率与可靠性大幅下降。

(3) 标准化不足

目前缺失液冷式低压设备的相关环境可靠性试验标准,具体见章节 9 和章节 10。

注：有关汽车液冷型低压电子电气设备的液冷现有问题和挑战的更详细信息见章节 8.2。

7 液冷散热技术的未来发展趋势

7.1 新材料与技术的应用

新材料与技术的应用将主要体现在以下几个方面：

7.1.1 高效散热

优化冷却系统设计，可以提高热量传导效率，确保零部件在高功率工作状态下能够及时散热，提高整车性能。

首先，对液冷板内部通道进行优化设计是提升液冷板冷却效率的关键方法。在液冷板通道内添加扰流翅片可以增大流体在通道内部的扰动，增强换热，提高液冷板的散热能力，不同扰流翅片形状对液冷通道内流体的流动与换热特性的影响也不同。常见的六种扰流翅片形状分别为：圆形、矩形、菱形、三角形、梭形和水滴形（见图 26）。

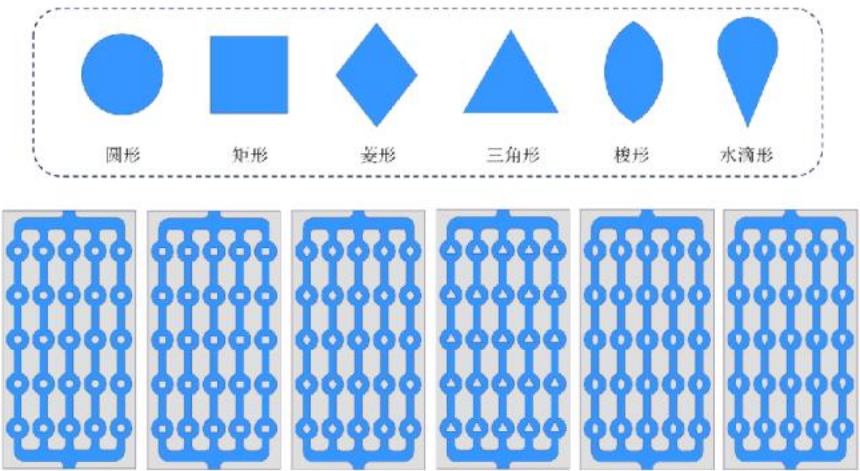


图 26 扰流翅片结构示意图

其次，基于变密度的拓扑优化方法，以平均温度和流体耗散功作为多目标优化函数。以液冷板的平均温度指标和最小粘性耗散功指标作为多目标优化函数，对不同权重系数下的液冷板进行比较和分析，并得到相应的帕累托前沿，最后研究了不同进出口布置方式的冷板流道最优结构。

第三，辅之以相变材料，相变材料由于具有散热效率高、控温均匀性好、不

需要额外的能量等优点,成为了研究热点。但常见相变材料存在导热率低、吸热窗口窄等问题。利用十八烷、二十烷和月桂酸三种熔点不同的 PCM,以不同的比例将其混合,通过热流曲线比较不同样品的吸放热能力,最终得到一种拥有宽相变吸热窗口的复合相变材料(CPCM,Composite Phase Change Material),并以泡沫铝为骨架搭建。

第四,浸没式液冷。根据不同的换热机理,浸没式液冷系统可分为单相和两相浸没式液冷系统。在单相浸没式液冷系统中,通过外部散热器循环散热的冷却液始终保持液态。为了满足单相浸没式液冷的要求,需要选择具有高沸点、低黏度、高导热系数、不易挥发和兼容性好的冷却液,并避免频繁补充。在两相浸没式液冷过程中,随着零部件温度升高,冷却液发生相变并依靠液体沸腾快速带走热量。沸腾换热性能随着温度的上升而快速提高,并吸收大量潜热以实现快速传递热量。当冷却液蒸发后遇到冷凝器表面时会凝结成为液体重新回到腔体内。由于冷却液发生相变,对容器的密封性有一定的要求。

第五,磁流体冷却。采用磁流体冷却的方式,往往冷却回路与汽车山的其他冷却回路是不连通的。磁流体冷却方式是冷却回路中的冷却液为磁性冷却液,冷却回路是封闭的。这种方式适用于单一零部件中某个或者某些元器件发热较大,但是经过磁流体液冷将热量传递给热板(或风扇)等其他扩大热量流失的地方,进而实现温度控制。

7.1.2 节能环保

采用高效节能的冷却系统和环保的冷却液,减少能耗和对环境的影响,符合可持续发展的趋势。

乙二醇由于具有良好的降低冰点的效果,同时具有沸点高、粘度适中等特点,成为应用最广泛的冷却液防冻剂。但是乙二醇的代谢产物羟基醛、乙醇酸、草酸容易对人体健康造成损害,因此,研究人员开始寻求无毒的如丙二醇等防冻剂替代乙二醇。加之水—二元醇型冷却液的传热性能提高困难等因素的存在,使不含二元醇即非二元醇型冷却液重新受到了人们的关注。

新型非二元醇环保型冷却液主要有:有机酸为防冻剂的冷却液、一元羧酸为防冻剂的冷却液、二羧酸盐为防冻剂的冷却液和二羧酸盐为防冻剂的冷却液 4 类。

有机酸非二元醇型发动机冷却液与乙二醇型冷却液相比具有以下特点：首先是无毒环保，其基液中不含乙二醇，冷却液中不含常规的亚硝酸盐、铬酸盐、铵盐等毒性大的缓蚀剂，消除了使用中对人体健康危害和对环境影响的问题；其次，由于基液中不含乙二醇，冷却液的传热性能得到了显著提高，同时降低了冷却液生产成本。

采用低碳羧酸（C1~C2）一元羧酸盐和多碳羧酸（C3~C5）一元羧酸盐组合物增加发动机冷却液的传热性能和腐蚀保护性能。由于 C1~C2 和 C3~C5 的协同作用，冷却液组合物与以往的一元羧酸（甲酸盐、乙酸盐）体系相比，在提供相同冰点保护的前提下，所需总的羧酸盐的量明显降低。该配方体系的优点是允许含有更高的水含量，使冷却液的导热性能显著提高，同时也使该配方体系更具经济性。

选用脂肪族或芳香族的二元羧酸的碱金属盐与多种缓蚀剂进行组合配制的冷却液。二羧酸盐本身作为防冻剂的冰点可达-30℃以下，同时具有优异的热传导性和非常好的防腐蚀性能。

添加三甲基甘氨酸为防冻剂的方法，制备水基冷却液。该冷却液很好地防止了铝表面的空穴腐蚀，化学稳定性和耐热性优良，特别是使用过程中不会产生腐蚀降解产物，而乙二醇使用过程中会生成醇酸、醛酸、二酸等腐蚀产物。三甲基甘氨酸冷却液在化学和热性能上是稳定的，因此不需要经常更换。而乙二醇冷却液通常每 2~5 年需更换或补加腐蚀抑制剂。另外，三甲基甘氨酸冷却液突出的特点是无毒环保，废弃时不需要进行危险废料处理。

7.1.3 故障诊断

引入智能监控系统，实时监测电池温度和液冷系统运行状态，及时发现故障并进行处理，提高系统安全性和稳定性。

为了提升设备的故障诊断准确率及维修效率，采用深度学习算法，特别是卷积神经网络（CNN）和循环神经网络（RNN），对设备操作数据进行处理与分析。通过这些算法，系统能够自主抽取关键特性，并据此对设备的运行状况作出推测与判定。

7.1.4 降低成本

通过材料和工艺的优化,降低液冷系统的制造成本。

毫米波波段在高速通信、雷达探测、高分辨率成像等领域的应用优势愈加明显,尤其是 W 波段等典型窗口。在短毫米波器件方面,矩形波导是首选传输线结构,拥有高 Q 值、低损耗、高功率容量、易装配至系统等优点,得益于高精度机械加工技术的进步,此类型器件被大量报道。双工器(甚至多工器)作为毫米波探测/通信系统中关键器件之一,能够分离或合并不同波段谱信号,并推动接收机系统向更多频带覆盖方向发展。

增材制造技术作为先进的制造技术,它的出现推动了传统制造模式的改变,使面向制造的设计逐步转变为了面向功能的制造。随着增材制造技术的规模化和产业化,成形零件的尺寸精度低,表面光洁度差,以及悬垂结构和随形流道内部表面难以加工等问题越来越突出,这极大地限制了增材制造技术在航空、航天、汽车、模具等领域地进一步发展。激光选区熔化/CNC 增减材复合制造技术是在激光选区熔化工艺的基础上引入 CNC 减材工艺,实现两种工艺在同一装备上的集成。

7.2 智能化与自适应控制

7.2.1 智能化控制

利用传感器和数据分析技术,实时监测设备的温度和负载情况,并根据数据调整冷却剂的流量和散热器的工作状态,以实现最佳的散热效果。

智能化的传感器网络方面,在汽车液冷系统中部署多个高精度的温度、压力和流量传感器,这些传感器能够实时、准确地采集系统各处的关键参数,并将数据快速传输给控制单元。

先进的控制算法方面,运用复杂的数学模型和算法,如模糊逻辑控制、神经网络控制等,对采集到的数据进行处理。根据车辆的行驶状态(如速度、加速度)、零部件负载、环境温度等因素,动态地调整冷却液的流量、风扇的转速以及水泵的工作效率。

预测性维护方面,通过对液冷系统长期运行数据的分析,预测可能出现的故障和部件磨损情况。提前通知车主进行维护保养,避免突发故障,提高车辆的可靠性和安全性。

与车辆其他系统的集成方面,智能化的汽车液冷系统与发动机管理系统、电

子稳定控制系统等其他车辆子系统实现紧密集成和协同工作。例如，根据产品的工作负载和工作性能要求，优化冷却液的温度，以提高能耗经济性和实现产品性能的最佳表现。

远程监控和诊断方面，利用车联网技术，将液冷的运行数据上传至云端服务器。车主或维修人员可以通过手机应用或网页远程监控液冷系统的工作状态，及时发现问题并进行远程诊断和初步的故障排除。

7.2.2 自适应控制

液冷系统的控制单元具备自适应学习能力，能够根据车辆的使用习惯、不同的路况和气候条件，不断优化控制策略，以提供更精准、高效的散热效果。

其工作原理通常包括以下几个方面：

首先，通过分布在车辆关键部位的传感器，持续监测零部件温度、冷却液温度、车速、工作负荷、环境温度等多种参数。

然后，控制单元会接收这些传感器传来的数据，并运用预先设定的算法和模型进行分析处理。

当车辆处于重载、高温环境等工况时，自适应控制系统会增加冷却液的流量、提高风扇的转速，以增强散热效果，防止产品过热。

相反，在轻载、低温环境等情况下，系统会相应地降低冷却液的流量和风扇转速，以减少能源消耗，并避免过度冷却。

7.3 与其他散热方式的结合

7.3.1 耦合相变材料的液冷式

(1) 普通耦合

即相变材料与液冷方式的简单组合使用。

(2) 血管型相变液冷复合式

仿生毛细血管/蜂窝混合热管理系统的几何模型（见图 27），其设计灵感来源于毛细血管和自然界中的蜂窝结构。毛细血管在血室和组织间质空间之间交换营养物质，在感知组织环境、协调微血管网络反应和控制血液流动方面发挥着重要作用。

借鉴毛细血管的特性，提出了一种分布广、管径小和管壁薄的多级分岔空间流道。另一方面，蜂窝是一种自然形成结构，具有超轻、高刚度和强度、优良的散热性等特点。因此，蜂窝状结构能够在增加散热器与零部件接触面积的同时减轻散热器的重量。与此同时，仿生热管理系统结合了液冷和相变冷却的优点，多级分叉空间流道能够更好的传递交换营养物质“热量”，并且可以最大限度的减少功耗；将相变材料填充到毛细血管/蜂窝骨架的间隙中，能过有效地吸收热量，并将热量均匀地分散到散热器。

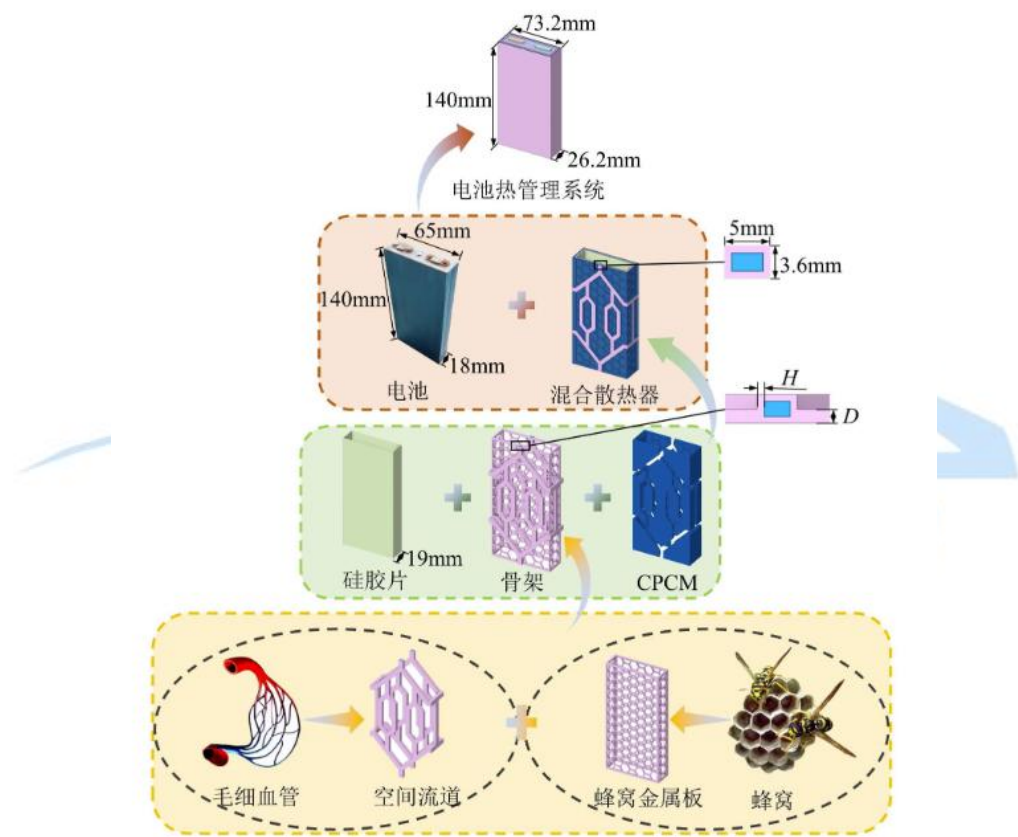


图 27 血管型液冷几何模型（以电池单体为例）

（3）多孔金属-相变复合式

将多孔金属结合相变材料作为热管理系统的主体（见图 28），这样一来既解决了相变材料（PCM）导热率低的问题又解决了金属重量过大问题。内置液冷管道的蜂窝状多孔金属支架填充 PCM 的零部件热管理系统,与纯相变材料相比,该系统的散热效率有很大高,多孔金属支架具有优异的散热性能和较低的系统重量,与相同体积的传统铝制散热器相比,系统重量减少且系统最高温度有所降低。

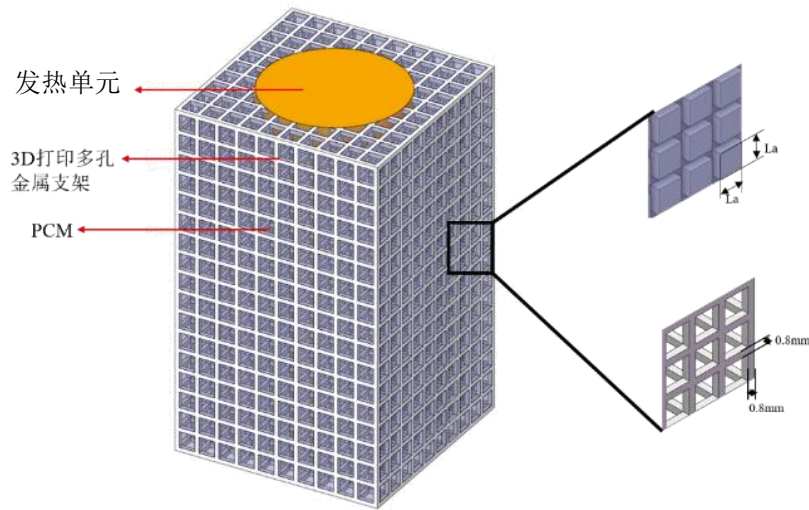


图 28 多孔金属-相变复合式网格模型

7.3.2 耦合热管的液冷式

液冷板内部的温度分布直接反映了液冷板的散热效果，平均温度越低，换热系数越大，表明液冷板的散热性能越好。在图 29 中，展示了雷诺数为 199.4 时不同扰流翅片下液冷板中间通道的温度分布云图，为了对比效果，图中还包含了传统的直通道式。观察结果可以发现，无论是直通道还是添加扰流翅片的通道，其温度都呈现出从入口到出口逐渐升高的趋势。然而，直通道的温度低温区域与高温区域所占面积大致相同，而添加扰流翅片后的液冷板高温区域面积更小，且主要集中在靠近出口的区域，这说明添加扰流翅片后液冷板的温度相对较低，其换热效果更佳。这一现象的原因在于，在通道中加入扰流翅片增强了其附近的流体扰动，促进了冷流与热流充分混合，从而显著提升了液冷板的换热能力。

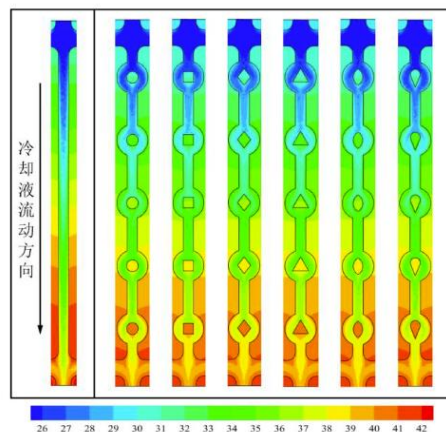


图 29 不同扰流翅片的温度云图

换热系数可以反映液冷板在热传递过程中的传热效率，是热能从液冷板传递到冷却介质的关键参数，高换热系数就意味着高的热传递效率。如图 30 所示，换热系数随着雷诺数 Re 的增大而增大，但是增大的幅度逐渐减小。在不同的雷诺数下，三角形扰流翅片的换热系数明显优于其他形状的，其次是矩形扰流翅片，而梭形扰流翅片的换热系数最小。造成这种现象的成因可以归结于梭形扰流翅片周围的流线型结构更为流畅，其速度变化相对较小，因此其引起的扰动强度也最小，从而使得换热效果相对较差。相比之下，三角形和矩形扰流翅片因为其结构包含锐角和直角，其周围流线型的连续性较差，造成的扰动强度也较大，因此换热系数也相对较高。

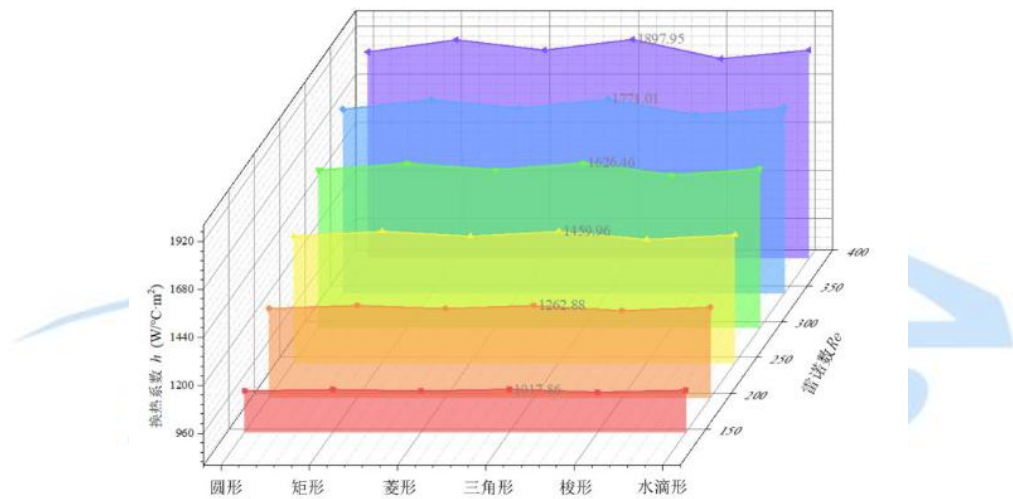


图 30 不同扰流翅片的换热系数随雷诺数的变化

7.3.3 耦合相变材料-铝板-翅片复合的液冷式

针对零部件温度过高而引发热安全问题。目前主流的解决办法有两种，一种是从 PCM 中添加泡沫金属以此来提高 PCM 整体的导热系数，另外一种是在 PCM 中插入翅片和热管等高导热系数散热元件，通过散热元件将大部分热量导出外界。

相较于 PCM 中加入泡沫金属材料，PCM 与热管复合散热的方式，PCM 中添加铝板-翅片，具有结构简单、成本低和使用方便等优势。散热结构的几何形状见图 31。

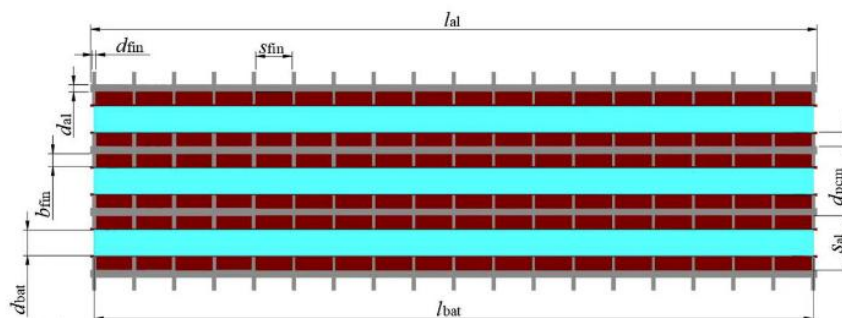


图 31 相变材料-铝板-翅片复合电池模组散热结构图

7.3.4 耦合半导体冷却的液冷式

半导体热电制冷(TEC)是由多个热电元件(热电臂)模块夹在陶瓷板之间相互连接组成,热电制冷元件呈电串联热并联的方式排列。每组半导体热电元件由带正电荷的 P 型半导体和带负电荷的 N 型半导体以及金属连接片连接构成,其中热电元件(热电臂)材料为 Bi_2Te_3 ,金属连接片材料为 Cu。TEC 制冷原理是当电流方向是 $\text{N} \rightarrow \text{P}$ 时, P-N 结处温度降低,冷端吸热产生吸热或制冷效果;当电流方向是 $\text{P} \rightarrow \text{N}$ 时, P-N 结处温度升高,热端放热产生放热效果。Peltier 效应原理图如图 32 所示。

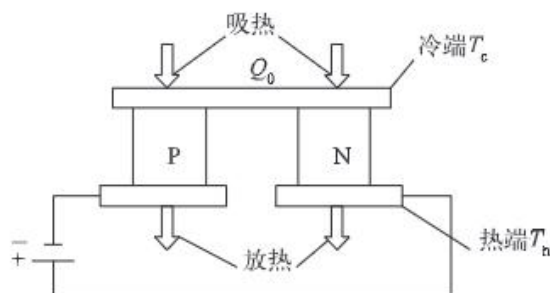


图 32 Peltier 效应原理

采用半导体热电耦合增强型液冷复合散热架构,其核心特征在于将 TEC 以界面热桥形式集成于高热流密度电子元器件与液冷散热基板之间的热传导路径。该创新设计的工程优势体现在双重维度:其一,基于珀尔帖效应(Peltier Effect)构建的固态主动制冷机制,可实现元器件表面瞬态温升速率的有效抑制,其动态热响应速率较传统被动式液冷方案提升约 40%;其二,通过半导体热电模块的主动热流调控特性,系统解除了传统液冷装置对冷却工质入口温度的严苛要求,可将冷却回路工作温度区间从常规的 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 扩展至 $5\text{--}35^\circ\text{C}$ 范围,显著降低对冷却

介质温控精度的依赖性。数值模拟显示，在功率密度达 $150\text{W}/\text{cm}^2$ 的 IGBT 模块应用中，该复合散热方案可将器件结温波动幅度控制在 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 以内，同时系统 COP（性能系数）较纯液冷模式提升 22.6%，体现了热电-液冷多物理场协同散热的技术优越性。

8 液冷散热技术的优势与挑战

8.1 优势

从章节 2、章节 5 和章节 6 可以看出液冷散热在零部件散热上凸显出显著的优势，概括而言，具体表现在：

8.1.1 高效的散热性能

液冷散热技术利用冷却液的高导热性和流体循环，能够快速转移和释放热量，在高负载工况下散热效率远超传统风冷方式。尤其在电池组热管理、电机控制器及逆变器等高功率密度设备中表现卓越，能够有效防止热失控，提升整车的安全性和可靠性。

8.1.2 优化空间设计

液冷系统的部件体积较小，相比传统散热方式，能够显著减少对整车布置的空间要求。通过灵活的管路设计，可有效避开车身结构限制，为新能源汽车设计提供更大灵活性，节省发动机舱或电子模块区域的空间。

8.1.3 精准的温度控制

液冷系统可通过调节冷却液流速和温控算法，确保关键电子部件在最佳温度范围内运行，延长部件寿命并提升系统可靠性。对于电池热管理，液冷系统能够分区控制单体和模组温度，减少电池组内部温差，延长电池寿命并提高充放电效率。在智能驾驶背景下，液冷系统可为车载 GPU、CPU 等大型运算单元提供冷却保障，避免因过热引发性能衰退或设备损坏。

8.1.4 环境适应能力

液冷系统在高温、高负载等极端工况下仍能保持高效散热性能，适应新能源

汽车复杂的使用环境。在高湿、震动和粉尘环境中的可靠性也高于风冷系统，能够满足长时间持续运行的稳定需求。

8.1.5 静音运行

液冷系统通过液体循环代替风扇散热，有效降低噪声水平，运行时噪声可低于 20 分贝，提升车内乘客的舒适体验，符合新能源汽车对车内静谧性的要求。风冷系统中的风扇在运行时会产生较大的噪声，影响车内的安静环境。而液冷系统几乎没有噪音，为乘客提供更加舒适的驾乘体验。特别是在高端新能源汽车中，静音运行是一个重要的卖点。

8.2 挑战

8.2.1 成本提高

液冷系统的研发、制造和维护成本高于传统散热方案。冷却液、泵及管路的选型、制造复杂度和维护要求均影响整车成本。例如，液冷泵的设计和制造需兼顾高效能和耐久性，增加了制造成本。

冷却液在-40°C以下粘度剧增，需预加热模块或低粘度硅油（成本增加 30%）。

8.2.2 供应链压力

核心部件依赖进口：液冷系统的关键组件（如高精度密封件、耐腐蚀铝合金冷板）仍依赖进口，例如氟橡胶 O 型圈需从日本/德国采购，导致成本占比达系统总成本的 15%~20%。

规模化生产不足：国内精密加工设备（如微通道激光焊接机）产能不足，难以支撑大规模量产需求。

技术专利壁垒：液冷微通道设计专利（如特斯拉蛇形流道布局）被海外企业垄断，国内厂商需支付 5%~8%的专利授权费。

上下游协同滞后：芯片厂商与液冷供应商的技术协同不足，导致热设计参数（如芯片布局与冷板流道匹配）优化周期延长 30%以上。

此外，供应链稳定性也存在挑战。

8.2.3 泄漏风险与长期可靠性

液冷系统对冷却液的材料特性要求高，存在泄漏、腐蚀或老化等风险。一旦泄漏，可能导致电子设备短路或热失效，影响整车安全性。

风冷系统不需要使用冷却液，不存在冷却液泄漏的风险。而液冷系统中的冷却液如果泄漏，可能会对电子设备造成严重损坏，甚至引发安全事故。因此，液冷系统对可靠性要求非常高。

8.2.4 复杂结构设计

液冷散热系统增加了整车热管理的复杂性。设计和集成过程中，需要精准计算管路布局及密封性，避免冷却液泄漏。多模块协同工作时，需协调多个冷却回路的温控策略，提升了设计难度。

风冷系统相对简单，只需安装散热片和风扇即可。而液冷系统需要设计复杂的管路布局，确保冷却液能够均匀地流过每个发热部件。同时，还需要考虑密封性，防止冷却液泄漏。在多模块协同工作时，液冷系统需要协调多个冷却回路的温控策略，增加了系统的复杂性和设计难度。

8.2.5 维护难度

液冷系统需定期更换冷却液、清洁管路或维护泵系统，提高了整车后期使用和维护成本。车辆高龄化后，液冷系统的可靠性可能成为用户关注的焦点。

风冷系统的维护相对简单，只需定期清洁散热片和风扇即可。而液冷系统需要定期更换冷却液、清洁管路和维护泵系统，这些工作需要专业技术人员和设备，增加了维护成本和难度。特别是在车辆高龄化后，液冷系统的部件可能会出现老化和损坏，需要更加频繁地进行维护和更换。

8.2.6 标准化不足

行业内液冷散热技术标准化进程滞后，缺乏统一的设计规范和可靠性评价标准。不同厂商接口和性能规范差异大，不利于规模化应用。例如，汽车制造供应链中缺乏通用的冷却液成分和流量标准，增加了跨厂商协同设计的复杂性。

风冷系统已经有较为成熟的标准和规范，不同厂商的产品可以相互兼容。而液冷散热技术由于标准化不足，不同厂商的产品接口和性能规范差异较大，难以实现规模化应用。这不仅增加了汽车制造商的成本和风险，也不利于液冷散热技

术的推广和发展。

有关标准化的详细信息见章节 10。

9 现有标准分析

9.1 与 GB/T 28046 系列标准的关系

9.1.1 GB/T 28046 系列标准介绍

GB/T 28046 是我国针对道路车辆电气及电子设备环境条件与试验的国家标准，旨在用于在零部件寿命周期内预期将要承受的真实环境系统地向用户提供一组环境条件、试验和要求。

该系列标准内容考虑了下列环境因素：

——世界地理和气候

车辆几乎在世界所有陆地区域使用和运行。由于外界气候，包括可以预测的每天和季节的变化，使车辆环境条件有重大变化。按世界范围考虑温度、湿度、降水和大气条件，还包括灰尘、污染和海拔高度。

——车辆类型

车辆的设计特征决定了车辆内（和车辆上）的环境条件，如发动机类型、发动机尺寸、悬挂特性、车辆自重、车辆尺寸、供电电压等。考虑到了车辆的典型类型，包括商用车、乘用车以及柴油和汽油发动机。

——车辆使用条件和工作模式

由道路质量、路面类型、道路地形、车辆使用（如通讯、牵引、货物运输等等）和驾驶习惯引起的车辆内（和上）环境条件的变化值得重视。工作模式如储存、起动、行驶、停车等都予以考虑。

——设备寿命周期

在制造、运输、装卸、储存、车辆装配、车辆保养和维修过程中，电气、电子设备耐受的环境条件。

——车辆供电电压

车辆使用、工作模式、电气分布系统设计、甚至气候条件会导致供电电压变化，引起车辆电气系统的故障，如可能发生的交流发电机过电压和连接系统的断

路。

——在车辆内的安装位置

在目前或未来的车辆中，系统/组件可能安装在车辆的任何位置，每一特定应用的环境要求通常取决于安装位置。车辆的每个位置都有特定的环境负荷。例如，发动机舱的温度范围不同于乘客舱，振动负荷也是如此。此时不仅振动的量级不同，振动的类型也不同。安装在底盘上的组件承受的是典型的随机振动，而安装在发动机上的系统/组件，还应考虑来自于发动机的正弦振动。又如，安装在门上的装置因受门的撞击要经受大量的机械冲击。

9.1.2 GB/T 28046 系列标准与国际标准的一致性关系

GB/T 28046 系列标准与国际标准 ISO 16750 系列标准的一致性关系为修改采用（MOD）。具体对应关系见表 4。

表 4 GB/T 28046 系列标准与 ISO 16750 系列标准的对应关系

国家标准号	国家标准名称	国际标准号	国际标准名称	一致性关系
GB/T 28046.1-2011	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第 1 部分：一般规定	ISO 16750-1:2006	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment Part 1: General	修改采用
GB/T 28046.2-2019	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第 2 部分：电气负荷	ISO 16750-2:2012	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment Part 2: Electrical loads	修改采用
GB/T 28046.3-2011	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第 3 部分：机械负荷	ISO 16750-3:2007	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment Part 3: Mechanical loads	修改采用

表 4 GB/T 28046 系列标准与 ISO 16750 系列标准的对应关系（续）

国家标准号	国家标准名称	国际标准号	国际标准名称	一致性关系
GB/T 28046.4-2011	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验第 4 部分：气候负荷	ISO 16750-4:2006	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment Part 4: Climatic loads	修改采用
GB/T 28046.5-2013	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验第 5 部分：化学负荷	ISO 16750-5:2010	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 5: Chemical loads	修改采用

注：最新的 ISO 16750 系列标准的信息见 9.2 章节。

9.1.3 需求标准与 GB/T 28046 系列标准的关系

通过对现行 GB/T 28046 系列标准体系的规范性分析发现，该标准架构中确立的环境负荷工况分类框架仍延续传统热管理技术范式，具体表现为：现行标准定义的工作模态仅涵盖模式 1.X（不通电模式）、2.X（通电模式 U_b 供电）及 3.X（通电模式 U_a 供电），尚未涵盖液冷散热部件专属工作模式 4.X 的定义——该工作模式已在 ISO 16750:2023 中定义。这种标准体系结构性缺失导致两个维度的工程实施困境：

其一，标准文本中缺乏对液冷式电子电气部件特征工况（如冷却液流态参数等）的规范性描述；

其二，在振动、温循、湿热等环境可靠性验证项目中，现有试验规程未建立与液冷系统运行参数（冷却液温度梯度、流量波动范围、压力脉动幅值等）相关联的试验边界条件矩阵。

这种标准滞后性已实质性影响新型液冷设备在新能源汽车领域的标准化验证进程。例如 10.6 中描述的因不同参数引起的不同结果的示例。

此外，GB/T 28046 系列标准是通用的环境试验标准，虽然包含了最常规的

环境试验，但是缺少液冷型零部件所特有的试验。

需要注意的是，上述试验是推荐增加的试验项目的示例，而非仅仅需要增加这些试验。针对环境试验，还需要考虑由于液冷回路的加入而引起的寄生环境的影响。例如，夏季车辆快充时，由于电池回路的降温而因此的电池冷却回路上的液冷型 DUT 出现的结露情况，而这种情况不同于 ISO 16750-4:2023 中定义的结露试验和冷凝试验。

针对以上试验的建议，可以采用以下两种方式进行处理：

一种是在现有 GB/T 28046 系列标准的基础上完善相关试验。另一种是独立建立一份液冷型 DUT 的专属标准。

9.2 与 ISO 16750 系列标准的关系

9.2.1 ISO 16750 系列标准介绍

ISO 16750 系列标准（2023 版）是针对道路车辆电气及电子设备环境条件与试验的国际标准，旨在用于在零部件寿命周期内预期将要承受的真实环境系统地为用户提供一组环境条件、试验和要求。

考虑了下列环境因素：

——世界地理和气候

车辆几乎在世界所有陆地地区使用和运行。由于外界气候，包括可预测的每天和季节的变化，使车辆环境条件有重大变化。应按世界范围考虑温度、湿度、降水、大气条件、灰尘、污染和海拔高度。

——车辆类型

车辆的设计特征决定了车辆内和车辆上的环境条件，例如是否为车辆配备内燃机和/或驱动电机、车辆质量、车辆尺寸、供电电压等。ISO 16750 考虑了典型的车辆种类，包括乘用车、轻型卡车和(重型)商用公交车和卡车，这些车辆不仅可通过柴油或汽油发动机驱动，还可通过电机驱动。其中电动汽车的典型类型包括纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车，但不包括燃料电池系统专用设备。

——车辆使用条件和工作模式

考虑由道路质量，路面类型，道路地形，车辆使用(例如通讯、牵引、货物

运输等)和驾驶习惯引起的车辆内(和上)的环境条件变化;储存、起动、行驶、停车等工作模式;内燃机转速分布和混合动力汽车电动驾驶模式在内燃机完全关闭期间的显著差别。

——设备寿命周期

ISO 16750 也包括了电气和电子设备在制造、运输、装卸、储存、车辆装配和车辆维修期间可能耐受的环境条件(如自由跌落试验)。

——车辆供电电压

车辆使用、工作模式、电气分布系统设计、甚至气候条件会导致供电电压变化。

——部件质量和体积

DUT 环境负荷(尤其是振动和热负荷)的影响与部件的质量和体积关系较大,热负荷的主要影响因素是 DUT 具有较高的热容,振动负荷与高质量、惯性矩和重心引起的高动态系统耦合相关。电动汽车驱动系统目前使用的部件(例如电机、逆变器、DC/DC 变换器等)通常比小型和轻型电气电子部件(例如小型传感器、ECU 或燃料喷射设备)的体积和质量更大,本文件的范围增加了电动汽车驱动系统用部件后,考虑了其尺寸和质量。例如:振动试验中部件惯性质量对测量激励的影响:温度试验中部件尺寸和质量对在高低温下保持时间的影响(在 ISO 16750-4 中需要更长的时间使整个部件达到预期的温度)。通过对部件的质量分类确定不同的试验曲线,分类示例见 ISO 16750-1: 2023 附录 C。

——在车辆中的安装位置

在目前或未来的车辆中,系统/部件可能安装在车辆的任何位置,每一特定应用的环境要求通常取决于安装位置,车辆的每个位置都有特定的环境负荷。例如:发动机舱/电机舱的温度范围和振动量级和类型不同于乘客舱,安装在车身上的部件承受的是典型的随机振动,而安装在发动机上的系统/部件还需要考虑来自于发动机的正弦振动;安装在门上的装置因受门的撞击要经受大量的机械冲击。

车辆制造商期望将不同的环境负荷类型和级别按要求进行合理的组合,这样就有可能将某一车辆上的系统/部件扩展到其他车辆。但是具体要求通常在设计未来车型的部件时是未知的,预期的环境负荷通常来自于其他车型的类似条件。

通常根据安装位置进行组合，由于有限的几个等级难以满足多样化的实际需求，因此很难定义不同安装位置及各自负荷特性的合理数值。环境负荷并不是由安装位置一个因素确定的，还包括其他影响系统/部件应力量级的因素，例如，车身的流线、动力系统或紧凑程度对安装在不同车辆内几乎相同位置的装置能形成完全不同的量级要求。

ISO 16750 对几种负荷类型定义了要求等级，包括电气、机械、热、气候和化学负荷。对每一种负荷类型定义若干要求等级，每一个要求等级用一特定字母代码表示，全部环境要求由被定义的代码字母组合表示，代码字母由 ISO 16750 的相关部分定义。每部分附录中的表内包括常规的安装位置和它们各自代码字母的定义示例。对一般应用，这些代码是适用的。如有特殊应用且这些代码组合无法表达时，可创建新的代码组合。当新的要求量级没有适用的代码时，可使用代码“Z”，此时可单独定义特殊要求但不应改变试验方法。

用户需注意受试装置（DUT）试验时考虑 ISO 16750-1: 2023 第 4 章中提及的安装位置所处的热、机械、气候和化学负荷情况。

a) 对制造商责任的适用性

在设计阶段由于技术限制或变化，车辆制造商要求将部件放置在不能承受 GB/T 28046 环境条件的位置，制造商有责任提供必要的环境防护。

b) 对线束、电缆和电气连接器的适用性

尽管 ISO 16750 的一些环境条件和试验与车辆的线束、电缆和电气连接器有关，但将其作为完整标准来使用其范围是不够的，因此不推荐将 ISO 16750 直接适于这些装置和设备。

c) 对构成设备的部件或总成的适用性

ISO 16750 描述了直接安装在车辆内/上的电气和电子设备的环境条件和试验，不直接用于构成设备的部件或总成。例如 ISO 16750 不直接用于构成设备的集成电路（ICs）或分立器件、电气连接器、印刷电路板（PCBs）、仪表等，这些部件或总成的电气、机械、气候和化学负荷与 ISO 16750 的描述可能完全不同。

对用于构成设备的部件或总成可参考 ISO 16750 得到预期的环境条件和试验要求。例如，设备温度范围为在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，构成设备的部件定义的温度范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，有 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升。

d) 对系统集成和验证的适用性

使用者需注意 ISO 16750 的范围在条件和试验上有局限，不能反映车辆系统所有认证和验证所需的条件和试验，设备部件和车辆系统可能需要进行其他环境和可靠性试验。

例如，ISO 16750 不直接对焊接、非焊连接、集成电路等规定环境和可靠性要求，但是这些项目应由零部件、材料或集成阶段的验证来保证。在车辆上使用的装置需在整车和系统级进行验证。

e) 对高压电池包和内部系统或部件的适用性

尽管 ISO 16750-3: 2023 定义的机械负荷与 ISO 16750-4:2023 定义的气候负荷的一些环境条件和试验可能与高压电池包（例如动力电池包）和内部系统或部件相关，但将其作为完整标准来使用其范围是不够的，因此不推荐将 ISO 16750 直接适于这些装置和设备。

9.2.2 ISO 16750 最新标准信息

ISO 16750 系列标准的最新信息见表 5。

表 5 ISO 16750 系列标准的最新信息

标准号	英文名称	中文名称
ISO 16750-1:2023	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 1: General	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第 1 部分：一般规定
ISO 16750-2:2023	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 2: Electrical loads	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第 2 部分：电气负荷
ISO 16750-3:2023	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 3: Mechanical loads	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第 3 部分：机械负荷
ISO 16750-4:2023	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 4: Climatic loads	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第 4 部分：气候负荷
ISO 16750-5:2023	Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 5: Chemical loads	道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第 5 部分：化学负荷

注：标准查新时间为 2025 年 4 月 15 日。

9.2.3 需求标准与 ISO 16750 系列标准的关系

虽然 ISO 16750 系列标准中增加了工作模式 4.X。但是并未明确在每个试验项目中如何设置液冷回路以匹配环境试验。因此依旧会导致两个维度的工程实施困境：

其一，标准文本中缺乏对液冷式电子电气部件特征工况（如冷却液流态参数等）的规范性描述；

其二，在振动、温循、湿热等环境可靠性验证项目中，现有试验规程未建立与液冷系统运行参数（冷却液温度梯度、流量波动范围、压力脉动幅值等）相关联的试验边界条件矩阵。

ISO 16750-1:2023 中定义的 4.X 模式信息如下：

工作模式 4：所有电气连接完好，DUT 以电压 UA 或 UX 带电运行，并安装辅助设备（如冷却系统）。工作模式（最小、典型、最大）应由供需双方协商确定。供需双方可协商将工作模式 4.4 改为 4.2，避免 DUT 过热或无法进行试验布置。

当 DUT 具有 48V 电路但不具有 B 级电压电路时，使用 U_{48N} 代替。当 DUT 仅具有 12/24 V 电路时，仅施加 12/24 V 电压。对于特定的试验条件，可施加其他试验电压或电压曲线。

工作模式 4.1：系统/部件功能不被激活。

工作模式 4.2：系统/部件带电运行并控制在典型工作模式。

工作模式 4.3：系统/部件带电运行并控制在最小负荷。

工作模式 4.4：系统/部件带电运行并控制在最大负荷。

此外，ISO 16750 同样也存在 9.1.3 章节规定的其他不足，同时也建议：一种方式是在现有 ISO 16750 系列标准的基础上完善相关试验。另一种方式是独立建立一份液冷型 DUT 的专属标准。

9.3 与其他标准的关系

除了 ISO 16750 系列标准和 GB/T 28046 系列标准外，我国汽车行业标准也规定了散热器相关的试验项目及要求，包括 QC/T 468-2010 汽车散热器标准、

QC/T 907-2013 汽车散热器散热性能试验方法和 QC/T 780-2007 摩托车用液冷散热器，具体如下：

1) QC/T 468-2010 规定了汽车散热器的低温密封性能、静压强度性能、真空试验、冷热循环性能、耐高温性能和压力循环试验等。

2) QC/T 907-2013 规定了汽车散热器的散热量、散热效率、阻力特征试验要求和方法。

3) QC/T 780-2007 规定了摩托车用液冷散热器的耐腐蚀性、散热性能、风阻、水阻试验、密封性能、往复振动、扭转振动和交变压力等试验方法。

虽然 QC/T 468、QC/T 907、QC/T 780 等标准规定了液冷相关的性能测试，但是其存在以下原因，导致无法直接使用：

a) 回路的压力、流量和温度等条件不同；

b) 被测试对象有差异，这些行业标准重点是考察的热传递性能，而液冷型电气及电子设备还需要考核功能，已经在环境试验下的表现。

c) 试验项目不全，例如缺少寄生环境带来的影响。

但是，可以确认的是，上述的行业标准可以作为相关项目的参考，为后续试验项目和方法的制定提供技术支持。

9.4 与现有公告认证试验标准的关系

现有汽车公告认证试验标准，在零部件层面，针对环境可靠性的要求均是引用 GB/T 28046 系列标准。显而易见 9.2.3 章节中描述的信息也存在对应的公告认证工作中。

这些公告认证标准包括但不限于：

——GB/T 32960.2-2016《电动汽车远程服务与管理系统技术规范 第 2 部分：车载终端》

——GB/T 43187-2023《车载无线通信终端》

——GB 44497-2024《智能网联汽车 自动驾驶数据记录系统》

因此，完善 GB/T 28046 系列标准或者新建立液冷型 DUT 的专属标准，将有利于实现认证产品质量控制的目标。

10 试验项目需求分析和试验设置

10.1 试验需求分析

为确保液冷型低压设备环境适应性与可靠性的验证有效性，需系统解析其试验规范的制定依据。从设备架构维度而言，如 4.2 章节技术特征分析所示，液冷型低压设备本质上构成对自然冷却式低压设备的热管理架构升级，其核心演进特征体现为创新性集成液冷散热模组（液冷板）。

首先，该产品作为低压电气设备类别，需严格遵循 ISO 16750:2023 系列国际标准确立的规范框架。其系统性验证要求涵盖四个核心维度：1）依据 ISO 16750-2 实施供电特性与电源变化的抗扰性验证；2）依据 ISO 16750-3 开展振动冲击等机械力学环境适应性验证；3）依据 ISO 16750-4 执行温湿度循环、热冲击等大气环境模拟测试；4）依据 ISO 16750-5 进行耐化学试剂防护能力评估。上述所有验证流程均需严格遵循 ISO 16750-1 中规定的一般规定。

其次，鉴于液冷系统架构中水冷板的热管理功能属性，其可靠性验证应被有效纳入产品系统性试验矩阵。需要特别指出的是，所有涉及液冷板的验证项目均需执行标准覆盖性分析：对于 ISO 16750 系列标准已完整定义的通用试验条款（如盐雾腐蚀试验），无需针对水冷板部件制定重复性试验规范。值得强调的是，此类标准适用性判定的技术逻辑应贯穿验证方案设计全过程，确保在满足液冷散热装置专属测试需求的同时，充分继承现有国际标准体系的验证成果，实现技术规范的经济性与合规性双重优化。

第三，鉴于液冷热管理系统集成引发的热力学耦合效应，需着重评估水冷板介入带来的寄生环境生成机制。具体而言，车辆液冷循环系统的架构重构将导致液态冷却型低压设备的微环境发生热力学参数偏移，形成具备相变传质风险的寄生性环境模态。典型风险场景表现为：在电动车辆夏季大功率快速充电工况下，动力电池热管理系统因主动冷却需求进入高负荷运行阶段，此时车舱内部湿热空气与低温冷却液循环系统形成的温差界面，将引发空气中饱和水汽的凝结现象。此类相变过程将导致液态水膜分布于 PCB 基板表面，引发金属触点氧化腐蚀或绝缘失效等失效模式；更严重的系统性风险在于，寄生冷凝水在设备通电瞬间形成的离子迁移通道，将造成关键电路节点短路故障。基于此，建议在液冷型低压设

备的可靠性验证体系中增设寄生环境模拟模块，以复现设备在实际运行周期内可能遭遇的复合应力冲击。为结构优化提供验证支撑。

10.2 试验分类

基于液冷系统集成引发的验证维度扩展，建议构建系统化试验分类框架以实现验证要素的完整覆盖。根据组件功能耦合性分析，水冷板的引入将试验范围延展为三个正交维度：标准化通用试验（覆盖 ISO 16750 系列标准中已定义的气候、机械及化学环境试验项目）；组件特异性试验（针对水冷板结构特性设计的密封性验证、流体力学性能测试及异种材料相容性评估）；以及耦合效应衍生试验（由液冷系统与电气设备交互作用产生的寄生环境模拟场景，如复合温湿度梯度试验）。建议采用分级目录式验证路线图，具体分类层级如下：

- a) 液冷特定试验；
- b) 电气负荷试验；
- c) 机械负荷试验；
- d) 气候负荷试验（包括通用试验和特定试验）；
- e) 化学负荷试验。

10.3 液冷特定试验

本验证模块聚焦于水冷板集成引入的专属验证维度。如第 8.2.3 节所示，密封与长期可靠性构成液冷系统可靠性的关键验证指标。

针对液冷低压设备与整车液冷系统的集成应用，需特别指出：该设备的引入将对整车液冷回路的冷却液回流特性产生直接影响。鉴于此，需确保其产生的系统压力损失严格受控。尽管理论上压力损失的极小化符合系统优化目标，但需明确该参数不可能完全降为零值。因此，在系统集成过程中需对其压力损失进行严格检测与验证。建议通过如下试验方案开展系统性评估：

（1）压力降

试验方法：冷却液温度在 $T_{cool, max}$ （冷却液最高温度）、 $T_{cool, min}$ （冷却液最低温度）以及供需双方协商的其他温度。冷却液流速为 $V_{cool, max}$ （冷却液最高

流速)、 $V_{cool, min}$ (冷却液最低流速) 以及供需双方协商的其他流速条件下 (示例见表), 测试 DUT 冷却液入口和出口之间的压力差, DUT 工作模式为 ISO 16750-1 定义的 1.1 模式。

冷却液成分 (如 50% 的乙二醇溶液) 由供需双方协商。冷却液温度和冷却液流速的组合示例见表 6。

表 6 冷却液温度和冷却液流速的组合示例

冷却液温度	60°C	23°C	0°C	-30°C
冷却液流速	10L/min	6L/min	2L/min	0.5L/min

要求: 满足产品技术文件的规定。

遵循技术规范体系要求, 需进一步阐明: 如第 8.2.3 节所述, 液冷系统的防泄漏性能及其长效运行可靠性, 是维持液冷型低压设备功能完整性的关键性技术指标。为有效管控密封失效风险, 需依据标准化检测流程执行系统性验证试验, 具体实施路径如下:

(2) 密封性试验

试验方法: 对 DUT 施加 $0.35\text{MPa}\pm0.01\text{MPa}$ ($3.5\text{bar}\pm0.1\text{bar}$) 的过压, 测量 DUT 的泄漏量。DUT 工作模式为 ISO 16750-1 定义的 1.1 模式。

要求: DUT 的泄漏量不超过 $1\text{cm}^3/\text{min}$ (0.0167 mbar L/s)。

(3) 脉冲循环试验

试验方法:

DUT 在如下的条件下进行 100000 次循环, 一次欠压和一次过压为一个循环, 试验频率为每分钟 25 至 35 次循环。

——欠压: $0.05\text{MPa}\pm0.005\text{MPa}$ ($0.5\text{bar}\pm0.05\text{bar}$, 绝对压力);

——过压: $0.35\text{MPa}\pm0.01\text{MPa}$ ($3.5\text{bar}\pm0.1\text{bar}$, 绝对压力);

——冷却液温度: $T_{cool, max}$;

——环境温度: T_{max} (DUT 最高工作温度);

——冷却液: 由供需双方协商 (如 50% 的乙二醇溶液)。

DUT 工作模式为 ISO 16750-1 定义的 1.1 模式。

要求: 试验后 DUT 功能状态满足 A 级要求, 未出现形变。且试验后进行密

封性检查，泄漏量不超过 $1\text{cm}^3/\text{min}$ (0.0167 mbar L/s)。

(4) 长时过压力试验

试验方法：对 DUT 施加 $0.2\text{MPa}\pm 0.01\text{MPa}$ ($2.0\text{bar}\pm 0.1\text{bar}$) 的过压。在冷却液最高温度 $T_{cool, max}$ 和 DUT 最高工作温度 T_{max} 条件下，试验持续进行 800h。DUT 工作模式为 ISO 16750-1 定义的 1.1 模式。冷却液成分（如 50% 的乙二醇溶液）由供需双方协商。

要求：试验后 DUT 功能状态满足 A 级要求，未出现形变。且试验后进行密封性检查，泄漏量不超过 $1\text{cm}^3/\text{min}$ (0.0167 mbar L/s)。

(5) 短时过压力试验

试验方法：在冷却液最高温度 $T_{cool, max}$ 和 DUT 最高工作温度 T_{max} 条件下，对 DUT 施加 $0.45\text{MPa}\pm 0.01\text{MPa}$ ($4.5\text{bar}\pm 0.1\text{bar}$) 的过压，过压的保持时间为 10s。DUT 工作模式为 ISO 16750-1 定义的 1.1 模式。冷却液成分（如 50% 的乙二醇溶液）由供需双方协商。

要求：试验后 DUT 功能状态满足 A 级要求，未出现形变。且试验后进行密封性检查，泄漏量不超过 $1\text{cm}^3/\text{min}$ (0.0167 mbar L/s)。

(6) 短时低压力试验

试验方法：对 DUT 施加 $0.002\text{MPa}\pm 0.001\text{MPa}$ ($0.02\text{bar}\pm 0.01\text{bar}$ ，绝对压力)，低压的保持时间为 10s。DUT 工作模式为 ISO 16750-1 定义的 1.1 模式。试验介质为空气。

要求：试验后 DUT 功能状态满足 A 级要求，未出现形变。且试验后进行密封性检查，泄漏量不超过 $1\text{cm}^3/\text{min}$ (0.0167 mbar L/s)。

第三，为了考虑冷却回路在长期运行后可能产生的杂质，以及这些杂质在流动中对液冷回路产生影响。因此可开展以下试验进行验证确认：

(7) 磨损试验

试验方法：DUT 应按以下要求进行试验。

——试验介质：0.8g/L 的 ISO 12103-1 中规定的亚利桑那 A2 试验粉尘和冷却液的混合溶液。冷却液成分（如 50% 的乙二醇溶液）由供需双方协商。

——试验介质流速： $V_{cool, max}$ ；

- 试验介质温度：温度： $T_{cool, max}$ ；
- 环境温度： T_{max} ；
- 试验时长：1200h；
- DUT 工作模式：ISO 16750-1 定义的 1.1 模式。

要求：试验后 DUT 功能状态满足 A 级要求，未出现形变，水冷板与冷却液接触面的底切面（坑洼面）应不高于接触面面积的 50%。且试验后进行密封性检查，泄漏量不超过 $1\text{cm}^3/\text{min}$ (0.0167 mbar L/s)。

10.4 电气负荷试验

本验证模块是低压设备所特有的试验。需要指出的是并非因为设备包含了液冷板而导致试验波形发生变化，因此这部分试验按照 ISO 16750-2:2023 定义的电气负荷试验即可。

为了确保电气负荷试验在液冷型低压设备的有效定义，将 ISO 16750-2:2023 中规定的电气负荷试验进行了如下区分：

a) 在极端环境条件下开展的试验

这些试验包含：

- Direct current (DC) supply voltage 直流供电电压试验；
- Long term overvoltage 长时过电压试验；
- Starting profile 启动波形。

b) 在室温下开展的试验

这些试验包含：

- Transient overvoltage 瞬态过电压试验；
- Superimposed alternating voltage 叠加交流电压试验；
- Slow decrease and increase of supply voltage 供电电压的缓慢下降和上升；
- Momentary drop in supply voltage 供电电压的瞬态跌落；
- Micro interruption in supply voltage 供电电压的微中断试验；
- Reset behaviour at voltage drop 电压跌落后的复位特性；
- Load dump 抛负载；
- Reversed voltage 反向电压；

- Ground reference and supply offset 接地偏移；
- Single line interruption 单线中断；
- Multiple line interruption 多线中断；
- Short circuit in signal lines and load circuits 电源线和信号线短路；
- Overloading of load circuits 负载回路的过载；
- Withstand voltage 耐电压；
- Insulation resistance 绝缘电阻。

针对 a) 在极端环境条件下开展的试验，这些试验是考虑了 DUT 在极端环境条件下的表现。因此，针对这些试验，液冷型 DUT 需要按照 4.X 模式进行试验并按照特定的要求通冷却液。

针对 b) 在室温下开展的试验，部分液冷型 DUT 可以在不通冷却液的条件长时间工作，但是有些液冷型 DUT 在不通冷却液的情况下无法长时间工作。因此，这类试验可以根据液冷型 DUT 实际情况决定是否通冷却液。

综上，电气负荷试验在液冷型 DUT 产品上的具体应用见表 7。

表 7 液冷型 DUT 开展电气负荷试验的描述

序号	试验项目	工作模式 ¹⁾	环境条件	液冷条件
1	Direct current (DC) supply voltage 直流供电电压试验	3.2、3.3、和 3.4	T_{min}	$V_{cool, min}$ $T_{cool, min}$
			RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
			T_{max}	$V_{cool, max}$ $T_{cool, max}$
2	Long term overvoltage Test at a temperature of (Tmax – 20) °C for alternator failure 长时过电压 在 (Tmax–20) °C 的温度下测试 交流发电机故障	3.4	$T_{max}-20$	$V_{cool, max}$ $T_{cool, max}$ 或 $T_{max}-20^{3)}$

表 7 液冷型 DUT 开展电气负荷试验的描述（续 1）

序号	试验项目	工作模式 ¹⁾	环境条件	液冷条件
3	Long term overvoltage Test at room temperature and Tmin for jump start 长时过电压 在室温和 Tmin 温度下的跳跃启动	2.2 或 2.3	RT	N.C.
			T_{min}	N.C.
4	Transient overvoltage 瞬态过电压	3.4	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
5	Superimposed alternating voltage 叠加交流电压试验	3.2	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
6	Slow decrease and increase of supply voltage 供电电压的缓慢下降和上升	3.2	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
7	Momentary drop in supply voltage 供电电压的瞬态跌落	3.4	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
8	Micro interruption in supply voltage 供电电压的微中断试验	3.4	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
9	Reset behaviour at voltage drop 电压跌落后的复位特性	3.4	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
10	Starting profile 启动波形	3.2	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
			T_{min}	$V_{cool, min}$ $T_{cool, min}$
11	Load dump 抛负载	3.4	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
12	Reversed voltage 反向电压	N.C.	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT
13	Ground reference and supply offset 接地偏移	3.4	RT	$V_{cool, n}^{2)}$ RT

表 7 液冷型 DUT 开展电气负荷试验的描述（续 2）

序号	试验项目	工作模式 ¹⁾	环境条件	液冷条件
14	Single line interruption 单线中断	3.4	RT	$V_{cool, n}$ ²⁾ RT
15	Multiple line interruption 多线中断	2.1/3.4	RT	$V_{cool, n}$ ²⁾ RT
16	Short circuit in signal lines and load circuits 电源线和信号线短路	3.4	RT	$V_{cool, n}$ ²⁾ RT
17	Overloading of load circuits 负载回路的过载	3.4	RT	$V_{cool, n}$ ²⁾ RT
18	Withstand voltage 耐电压	1.1/1.2	RT	N.C.
19	Insulation resistance 绝缘电阻	1.1/1.2	RT	N.C.

注：

¹⁾ 表示 ISO 16750-2:2023 标准中虽然定义为 3.X 模式，但是若试验需要按照规定的要求通冷却液，则应修改为对应的 4.X 模式。

²⁾ 表示经供需双方协商，可以不通冷却液。

³⁾ 表示取两者之间的较小者。

$V_{cool, n}$ 表示冷却液典型流量。

10.5 机械负荷试验

该部分试验是低压设备通用的试验，并非因为设备包含了水冷板而发生变化，因此这部分试验按照 ISO 16750-3:2023 定义的机械负荷试验即可。

ISO 16750-3:2023 定义了 Vibration 振动试验、Mechanical shock 机械冲击、Free fall 自由跌落、Surface strength/scratch and abrasion resistance 表面强度/耐刮擦性和耐磨性和 Gravel bombardment 碎石冲击试验。

首先，针对振动试验，ISO 16750-3:2023 中定义的温度曲线见图 33。

表 8 振动试验温度循环的时间参数定义（续）

时间参数	持续时间/min	温度/℃
t_6	70	从 T_{max} 至 RT

图 33 中符号 b 和 e 采用的是工作模式 4.4。此时液冷 DUT 需要定义冷却液温度和流量信息。因此在此情况下，冷却液的温度为 RT 至 T_{max} ，冷却液流量由 $V_{cool, n}$ 线性变化至 $V_{cool, max}$ 。其余情况下不需要通冷却液。

其次，针对机械冲击试验。Shock I— Test for devices in or on doors and flaps on passenger cars（冲击 I——乘用车车门和襟翼内外装置）试验采用的是工作模式 1.2。因此不需要通冷却液。Shock II— Test for devices on rigid points on the body and on the frame(冲击 II——车身和车架刚性点装置)试验采用的是工作模式 3.2。因此，需要通流量为 $V_{cool, n}$ 和温度为 RT 的冷却液。经供需双方协商，可以不通冷却液。Shock III — Test for devices in or on the gearbox（冲击 III——齿轮箱内或齿轮箱上装置）试验采用的是工作模式 3.2。因此，需要通流量为 $V_{cool, n}$ 和温度为 RT 的冷却液。经供需双方协商，可以不通冷却液。

第三，针对自由跌落试验，采用的工作模式 1.1，因此不通冷却液。

第四，针对表面强度/耐刮擦性和耐磨性试验，通常采用的是 1.1 工作模式或者使用外壳进行试验。因此不通冷却液。

第五，针对防异物试验，通常采用的是 1.1 工作模式或者使用外壳进行试验。因此不通冷却液。

综上，机械负荷试验在液冷型 DUT 产品上的具体应用见表 9。

表 9 液冷型 DUT 开展机械负荷试验的描述

序号	试验项目	工作模式	环境条件	液冷条件
1	Vibration 振动试验	2.1、3.3、 3.4、4.3、 4.4	T_{min} 至 T_{max}	图 33 中符号 b 和 e 冷却液的温度为 RT 至 T_{max} 线性变化至保 持 T_{max} ，冷却液流量 由 $V_{cool, n}$ 线性变化 至 $V_{cool, max}$

表 9 液冷型 DUT 开展机械负荷试验的描述（续）

序号	试验项目	工作模式	环境条件	液冷条件
2	Mechanical shock 机械冲击 Shock I — Test for devices in or on doors and flaps on passenger cars 冲击 I——安装在门和盖板内/上	1.2	RT	N.C.
3	Mechanical shock 机械冲击 Shock II — Test for devices on rigid points on the body and on the frame 冲击 II——安装在车身和车架刚性点上	3.2	RT	$V_{cool, n}^{1)}$ RT
4	Mechanical shock 机械冲击 Shock III — Test for devices in or on the gearbox 冲击 III——安装在变速器内/上	3.2	RT	$V_{cool, n}^{1)}$ RT
5	Free fall 自由跌落	1.1	RT	N.C.
6	Surface strength/scratch and abrasion resistance 表面强度/耐刮擦性和耐磨性	1.1 或外壳	RT	N.C.
7	Gravel bombardment 碎石冲击试验	1.1 或外壳	RT	N.C.

注：

¹⁾ 表示经供需双方协商，可以不通冷却液。

10.6 气候负荷试验

该部分试验是低压设备所必需的试验。ISO 16750-4:2023 定义类低压设备的气候负荷试验，但是这些试验是低压设备的通用气候试验。然而，由于设备包含了水冷板而发生变化，这部分试验属于液冷型 DUT 所特有的。因此，还需要考虑由于液冷回路的加入而引起的寄生环境的影响。例如，夏季车辆快充时，由于电池回路的降温而因此的电池冷却回路上的液冷型 DUT 出现的结露情况，而这种情况不同于 ISO 16750-4:2023 中定义的结露试验和冷凝试验。

由上述可以看到，液冷型 DUT 的气候试验分为两类，一类是 ISO 16750-4:2023 定义的通用气候试验，另一类是液冷型 DUT 的特有气候试验。

首先，针对 ISO 16750-4:2023 定义的通用气候试验。采用不同的通液方式可能会产生不同的结果。例如：

(1) 高温运行试验

该项目的试验方法在 ISO 16750-4:2023 中 5.1.2.2.2 描述为：

Perform the test in accordance with IEC 60068-2-2:2007, 5.2 Test Bb or 5.3 Test Bd, at a temperature of T_{max} for a duration of 96 h. Test Bb is applied for non-heat-dissipating DUTs and Test Bd is applied for heat-dissipating DUTs. The operating mode is 3.4 or 4.4 as defined in ISO 16750-1.

中文译文为：按照 IEC 60068-2-2:2007 的 5.2 试验 Bb 或 5.3 试验 Bd 的方法进行，在 T_{max} 的条件下持续 96h。试验 Bb 适用于非散热 DUT，试验 Bd 适用于散热 DUT。工作模式为 ISO 16750-1 定义的模式 3.4 或 4.4。

以 85℃为例，不同的温度，使得 DUT 本身的温度变化较大，见表 10。

表 10 高温运行试验下的温度对比

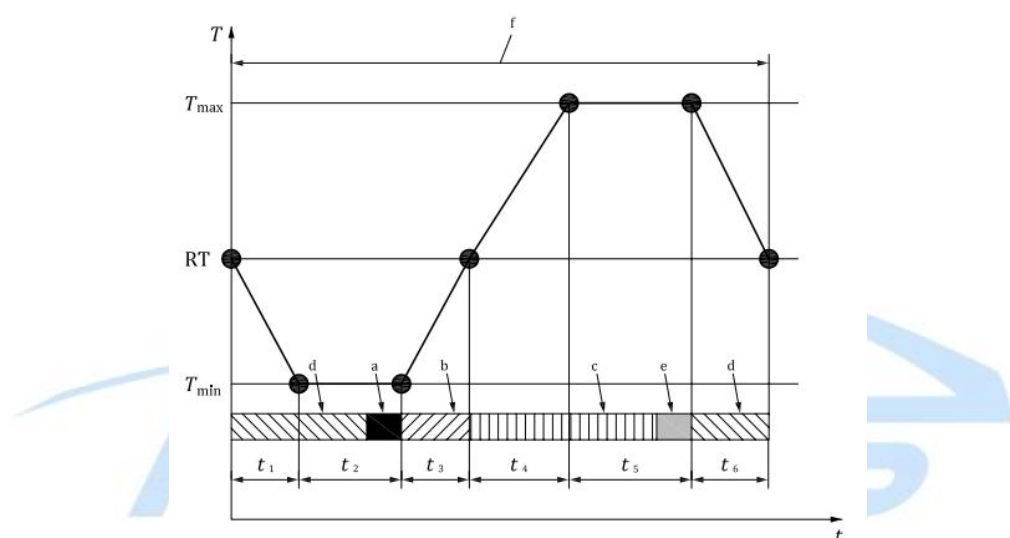
项目	不通冷却液	通冷却液	
		冷却液温度不控制，冷却液槽位于环境试验箱外，且敞开在实验室环境中	冷却液温度和流量控制
试验箱温度	85 °C	85 °C	85 °C
冷却液温度	无冷却液	25°C~ 45°C@3L/min	25°C @3L/min&5L/min 45°C @3L/min&5L/min 65°C @3L/min&5L/min
功能等级	功能等级 C（DUT 超温后终止工作）	功能等级 A	功能等级 A 或者功能等级 B 或者 C（高于一定的温度后 DUT 性能降低或者出现超温报警）

(2) 规定变化率的温度变化试验

该项目的试验方法在 ISO 16750-4:2023 中 5.3.1.2 描述的温度曲线见图 34。

一个循环是：Perform temperature cycling with the following as one cycle. Decrease ambient temperature from room temperature (RT) to T_{min} , expose the DUT at T_{min} , increase ambient temperature from T_{min} to T_{max} , expose the DUT at T_{max} with/without including $T_{max}HS$ and then decrease ambient temperature from T_{max} to RT.

中文译文：将环境温度从室温（RT）降低到 T_{min} ，将受试装置（DUT）暴露在 T_{min} ，将环境温度从 T_{min} 增加到 T_{max} ，将受试装置(DUT)暴露在 T_{max} （含/不含 $T_{max}HS$ ），将环境温度从 T_{max} 降低到 RT。



注：

T——温度；

t——时间；

T_{min} ——最低工作温度；

T_{max} ——最高工作温度；

RT——室温（见 GB/T 28046.1）；

t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 t_6 ——时间参数定义见表 11；

a——使用 ISO 16750-1 中定义的工作模式 3.3 或 4.3 进行功能试验；

b——执行 ISO 16750-1 中定义的工作模式 3.3 或 4.3；

c——执行 ISO 16750-1 中定义的工作模式 3.4 或 4.4；

d——执行 ISO 16750-1 中定义的工作模式 2.1；

e——使用 ISO 16750-1 中定义的工作模式 3.4 或 4.4 进行功能试验；

f——一个循环。

图 34 规定变化率的温度变化试验曲线

表 11 规定变化率的温度变化试验时间参数

时间参数	持续时间/min	温度/℃
t_1	60	从 RT 至 T_{min}
t_2	90	T_{min} 下保持
t_3	60	从 T_{min} 至 RT
t_4	90	从 RT 至 T_{max}
t_5	110	T_{max} 下保持
t_6	70	从 T_{max} 至 RT

以小型和轻型 DUT，最高温度 85℃，最低温度 -40℃ 为例。冷却液不同的温度，DUT 表现见表 12。

表 12 规定变化率的温度变化试验下的温度对比

项目	不通冷却液	通冷却液 (3L/min)		
		冷却液温度不控制，冷却液槽位于环境试验箱外，且敞开在实验室环境中	通冷却液（高温阶段通液）	通冷却液（与温度曲线同步）
试验箱温度	-40℃~85℃	-40℃~85℃	-40℃~85℃	-40℃~85℃
冷却液温度	无冷却液	-10℃~45℃	65℃	-30℃~65℃
功能等级	功能等级 C（超温报警）	功能等级 A	功能等级 C（升温至一定温度后超温报警，通液后一段时间正常工作）	功能等级 A
其他现象	未出现凝结水	出现凝结水（少量）	未出现凝结水	出现凝结水

（3）泄露和功能试验

该项目的试验方法在 ISO 16750-4:2023 中 5.5.3.4 描述的方法如下：

.....in accordance with IEC 60068-2-11:2021, Clauses 6 and 11. The duration of one cycle is 24 h. Spray on the DUT for 8 h, then stop spraying for a rest period of 16

h. Operate the DUT with operating mode 3.2 or 4.2 as defined in ISO 16750-1 between the fourth and fifth hour of each cycle. Test duration: 6 cycles correspond to 6 days as a minimum.

中文译文：

按照 IEC 60068-2-11:2021 条款 6 和 11 进行试验。一个循环持续 24h。对 DUT 喷雾 8h，休息 16h，在一个循环的第 4 小时和第 5 小时之间以 ISO 16750-1 定义的 3.2 或 4.2 工作模式运行 DUT，共进行 6 个循环即最少进行 6 天。

冷却液不同的温度，DUT 表现见表 13。

表 13 泄露和功能试验下的温度对比

项目	不通冷却液	通冷却液（3L/min）		
		冷却液温度不控制，冷却液槽位于环境试验箱外，且敞开在实验室环境中	通冷却液	通冷却液
试验箱温度	35°C	35°C	35°C	35°C
冷却液温度	无冷却液	28°C	65°C	35°C
功能等级	功能等级 C	功能等级 A	功能等级 A	功能等级 A
其他现象	未出现积液，无腐蚀	出现积液，积液处出现腐蚀	未出现积液，轻微腐蚀	未出现积液，无腐蚀

需要提醒的是，以上所列出的示例旨在说明 ISO 16750 系列标准并未规定详细的液冷型 DUT 试验参数，因此出现了不同条件下的 DUT 表现不同。并不意味着 ISO 16750 中存在液冷型 DUT 不同表现的试验项目仅有这些。

因此，可以采用以下原则进行：

a) 冷却液温度的极限温度与环境温度的极限温度是同步的，即环境温度在高温时，冷却液温度为高温；环境温度在低温时，冷却液温度为低温。

b) 基于冷却回路在实车运行工况下的特性设置冷却液温度和流量。即冷却回路在高温环境时，冷却回路的流量达到最大，温度达到最高；冷却回路在低温环境时，冷却回路的流量达到最小，温度达到最低。

c) 在温度变化的过程中，冷却液的流量会随之发生变化。即环境温度从最

低温度线性上升到最高温度的过程中，冷却液温度由最低温度线性上升到最高温度，并且冷却液流量由最低线性上升至最高。

d) 在室温的条件下，液冷回路的流速定义为典型流速。在实际车辆中，若环境温度为室温，冷却液的温度往往比环境温度高 $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。但是为了便于实验室控制对应参数，因此将冷却液的温度调整为室温。

e) 若环境温度高于冷却液的最高温度 $T_{cool, max}$ ，冷却液温度保持为 $T_{cool, max}$ ；若环境温度低于冷却液的最低温度 $T_{cool, min}$ ，冷却液温度保持为 $T_{cool, min}$ 。

基于上述原则，ISO 16750-4:2023 规定的气候负荷试验在液冷型 DUT 产品上的具体应用见表 14。

表 14 液冷型 DUT 开展 ISO 16750-4:2023 气候负荷试验的描述

序号	试验项目	工作模式	环境条件	液冷条件
1	Low-temperature tests 低温试验 Storage test 存储试验	1.1	T_{min}	N.C.
2	Low-temperature tests 低温试验 Operation test 工作试验	4.3	T_{min}	$V_{cool, min}$ $T_{cool, min}$
3	High-temperature tests 高温试验 Storage test 存储试验	1.1	T_{max}	N.C.
4	High-temperature tests 高温试验 Operation test 工作试验	4.4	T_{max}	$V_{cool, max}$ $T_{cool, max}$
5	Temperature step test 温度梯度试验	3.2 ¹⁾ / 2.1	T_{min} 至 T_{max}	环境温度在 $T_{cool, min}$ 至 $T_{cool, max}$ 的范围内，每个温度梯度下冷却液的温度与环境温度保持一致，在环境温度低于 $T_{cool, min}$ 条件下，冷却液温度维持在 $T_{cool, min}$ ，在环境温度高于 $T_{cool, max}$ 条件下，冷却液温度维持在 $T_{cool, max}$ 。 ²⁾

表 14 液冷型 DUT 开展 ISO 16750-4:2023 气候负荷试验的描述（续 1）

序号	试验项目	工作模式	环境条件	液冷条件
6	Temperature cycling tests 温度循环试验 Temperature cycle with specified change rate 规定速率的温度循环试验	2.1、4.3、 4.4	T_{min} 至 T_{max}	环境温度在 RT 至 $T_{cool, max}$ 的范围内，冷却液温度与环境温度保持一致，冷却液流速由 $V_{cool, n}$ 至 $V_{cool, max}$ （线性变化）。环境温度在 $T_{cool, max}$ 至 T_{max} 的范围内，冷却液温度为 $T_{cool, max}$ ，流速为 $V_{cool, max}$ ，其余条件下不通液。
7	Temperature cycling tests 温度循环试验 Rapid change of temperature with specified transition duration 规定转化时间的温度变化试验	1.2	T_{min} 至 T_{max}	N.C.
8	Cold water shock tests 冰水冲击试验 Splash water test 水飞溅试验	1.1、4.2	见 ISO 16750-4:202 3 图 8	在 T_{max} 条件下，冷却液温度为 $T_{cool, max}$ ，流速 $V_{cool, max}$
9	Cold water shock tests 冰水冲击试验 Submersion test 浸没试验	4.2	T_{max} 、0℃	在 T_{max} 条件下，冷却液温度为 $T_{cool, max}$ ，流速为 $V_{cool, max}$
10	Salt spray tests 盐雾试验	1.2	35℃	N.C.
		2.1	35℃	N.C.
		4.2	35℃	冷却液温度为 35℃，流速为 $V_{cool, n}$
		4.3	35℃	冷却液温度为 35℃，流速为 $V_{cool, n}^{2)}$

表 14 液冷型 DUT 开展 ISO 16750-4:2023 气候负荷试验的描述（续 2）

序号	试验项目	工作模式	环境条件	液冷条件
11	Humid heat, cyclic tests 湿热循环试验 Test 1: Damp heat cyclic test 试验 1: 湿热循环试验	2.1、3.3	25℃至 55℃	N.C.
12	Humid heat, cyclic tests 湿热循环试验 Test 2: Composite temperature/humidity cyclic test 试验 2: 温度湿度组合循环试验	2.1、3.3	-10℃至 65℃	N.C.
13	Humid heat, cyclic tests 湿热循环试验 Test 3: Dewing test 试验 3: 结露试验	2.1、3.3	25℃至 80℃	N.C.
14	Damp heat, steady state test 恒定湿热试验	2.1、3.3	40℃	N.C.
15	Condensation test 冷凝试验	1.2、3.3	-30℃/10℃ 至 25℃/50℃	N.C.
16	Corrosion test with flow of mixed gas 混合气体腐蚀试验	1.2	25℃	N.C.
17	Solar radiation test 阳光模拟试验	材料层面	38/65℃	N.C.
18	Dust test 防尘试验	1.2/3.2	室温	冷却液温度为室温，流速为 $V_{cool, n}^{2)}$
19	Atmospheric pressure test 低气压试验	不适用	不适用	不适用

注：

¹⁾ 表示 ISO 16750-2:2023 标准中虽然定义为 3.X 模式，但是若试验需要按照规定的要求通冷却液，则应修改为对应的 4.X 模式。

²⁾ 表示经供需双方协商，可以不通冷却液。

其次，针对寄生环境产生的气候负荷。在液冷 DUT 上面，主要体现在外接环境温湿度较高，而冷却液温度较低，由于冷却液温度与外界环境温湿度的温差而导致液冷 DUT 上凝结水出现，进而导致 DUT 失效或者功能损伤。

基于此，可以将该情况进行分析。车辆外部环境的平均温湿度为 23℃/60%RH，车辆内部的平均温湿度为 23℃/55%RH。通常而言，一年之内的出现的最高环境温度湿度为 55℃/65%RH。因此建议将上述试验规整为：

工作模式：ISO 16750-1 定义的 1.2 模式；

试验的一个循环为：

——均衡阶段：环境温度为 55℃，环境湿度设置为 65%RH，冷却回路不通液，时间为 3h；

——通液阶段：冷却液温度为 25℃，环境温湿度同均衡阶段，通液时间为 0.5h；

——恢复阶段：环境温度为 25℃，环境湿度设置为 50%RH，恢复时间为 4.5h。

循环数：5 个循环

要求：功能等级 C 级。

10.7 化学负荷试验

该部分试验是低压设备通用的试验，并非因为设备包含了水冷板而发生变化，因此这部分试验按照 ISO 16750-5:2023 定义的化学试剂负荷试验即可。

ISO 16750-5:2023 定义的化学试剂负荷试验工作模式为 1.1 或者 1.2，因此在试验过程中无需通冷却液。

11 标准化建议

11.1 标准化概述

泄露和可靠性（见 8.2）是液冷型 DUT 产品质量和供应链良好发展的基础。因此，完善这一部分的标准，将是相关工作的重中之重。

由章节 9 可以看出，环境试验的基础标准 ISO 16750 系列标准的完善可以实现所需的目标。然而虽然 ISO 16750 系列标准规定了 4.X 模式，但是并未规定详细的应用说明。

11.2 国际标准提案

在国际标准层面，针对液冷型 DUT 的标准化建议，可以采用以下两种方式

进行处理：

一种是在现有 ISO 16750 系列标准修订阶段提出液冷型 DUT 的完善建议。
另一种是提出专门针对液冷型 DUT 的新项目提案。

(1) ISO 16750 系列标准的完善建议

关于 ISO 16750 系列标准修订中液冷型 DUT（被测设备）的完善建议，可采取以下三种技术路径予以实现：

方案一：在 ISO 16750 标准体系中增补液冷型 DUT 的基础试验原则，为相关试验提供规范性指导。

方案二：对现行 ISO 16750 标准进行技术性补充，重点完善液冷型 DUT 的相关试验方法（具体参见章节 10.4 至 10.7），从而系统性地提升现有试验方法的完整性与适用性。

方案三：在建议方案二的基础上，进一步补充液冷型 DUT 特有的专项试验项目（具体参见第 10.3 章节），构建涵盖通用要求与特殊要求的完整液冷 DUT 试验体系。

针对方案一，具体实施原则根据章节 10 可概括如下：

a) 冷却液温度的极限温度与环境温度的极限温度是同步的，即环境温度在高温时，冷却液温度为高温；环境温度在低温时，冷却液温度为低温。

b) 按照冷却回路在整车上面实际情况进行设置。即冷却回路在高温环境时，冷却回路的流量达到最大，温度达到最高；冷却回路在低温环境时，冷却回路的流量达到最小，温度达到最低。

c) 在温度变化的过程中，冷却液的流量会随之发生变化。即环境温度从最低温度线性上升到最高温度的过程中，冷却液温度由最低温度线性上升到最高温度，并且冷却液流量由最低线性上升至最高。

d) 在室温的条件下，液冷回路的流速定义为典型流速。在实际车辆中，若环境温度为室温，冷却液的温度往往比环境温度高 $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。但是为了便于实验室控制对应参数，因此将冷却液的温度调整为室温。

e) 若环境温度高于冷却液的最高温度 $T_{cool, max}$ ，冷却液温度保持为 $T_{cool, max}$ ；
若环境温度低于冷却液的最低温度 $T_{cool, min}$ ，冷却液温度保持为 $T_{cool, min}$ 。

f) 在极端环境条件下开展的试验，液冷型 DUT 需要按照 4.X 模式进行试验并按照特定的要求通冷却液。

g) 在室温下开展的试验，如果不通冷却液的情况下 DUT 依旧能够实现正常工作；则经供需双方协商，可以不通冷却液。

(2) 新项目提案

专门针对液冷型 DUT 的新项目提案初步信息如下：

a) 适用范围：适用于道路车辆上使用液冷方式进行冷却的低压电气及电子设备。但不适用于摩托车和轻便摩托车用液冷方式进行冷却的电气及电子设备。

b) 规范性引用文件：见附录 A。

c) 技术内容：包括一般规定、液冷特定试验、电气负荷试验、气候负荷试验（包括通用试验和特定试验）、机械负荷试验、化学负荷试验等（试验项目见第 10 章节）。

11.3 国内标准新项目提案

目前，液冷型被测设备（DUT）在国内市场的应用呈现显著增长态势，而国际市场的普及程度相对滞后。这种差异化发展格局导致在国际标准化组织（ISO/IEC）层面推进相关标准提案面临较大挑战。

基于当前发展现状，可采取分阶段标准化实施路径：

首先，优先建立国家标准体系：依托国内成熟的应用基础，率先在国家标准化文件中制定液冷型 DUT 的技术规范。

然后构建国际转化机制：动态跟进国外液冷 DUT 技术发展状况，待国际市场出现标准化需求时，通过国家标准化文件向国际标准化文件的转化实现国际推广。

国家标准化文件的提案初步信息如下：

a) 适用范围：适用于道路车辆上使用液冷方式进行冷却的低压电气及电子设备。但不适用于摩托车和轻便摩托车用液冷方式进行冷却的电气及电子设备。

b) 规范性引用文件：见附录 A。

c) 技术内容：包括一般规定、液冷特定试验、电气负荷试验、气候负荷试验（包括通用试验和特定试验）、机械负荷试验、化学负荷试验等（试验项目见第 10 章节）。



附录 A 规范性引用文件

针对液冷型 DUT 的环境试验，所需引用的规范性引用文件可能包括：

ISO 16750-1 Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 1: General

ISO 16750-2 Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 2: Electrical loads

ISO 16750-3 Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 4: Climatic loads

ISO 16750-4 Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 4: Climatic loads

ISO 16750-5 Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 5: Chemical loads

除了上述标准外，可能还会涉及泄露等试验引用相关国际、国家或行业标准。



附录 B 术语和定义

为了便于理解，文中涉及以及虽未涉及但仍需说明的术语和定义包括：

受试装置 device under test

DUT

进行试验的单个部件或部件的组合（系统）。

驻留时间 dwell time

系统/部件达到并保持在指定条件（例如温度、电压、发动机转速）下的时间。

暴露时间 exposure time

系统/部件暴露在恒定试验条件（如温度、湿度）下的总时间。

稳定时间 stabilisation time

系统/部件达到规定条件（如温度、湿度）所需的时间。

功能检查 functional test

用于验证系统/部件满足设计要求（特别是典型功能和/或性能）的基本检查，如输出信号、输出功率和绝缘性能等。

注：在尽可能短的时间内进行功能检查，避免系统/部件因自热导致温度上升。在尽可能短的时间进行检查的功能和/或性能由供需双方协商确定。

热浸透温度 hot-soak temperature

$T_{\max HS}$

在车辆停止且发动机关闭后，发动机/电机舱内可能短时出现的环境温度最高值。

最高工作温度 maximum operating temperature

$T_{\max}$

系统/部件设计能够工作的周围环境温度最高值。

最低工作温度 minimum operating temperature

$T_{\min}$

系统/部件设计能够工作的周围环境温度最低值。

热平衡 thermal equilibrium

除非系统/部件规范另有规定,系统/部件所有位置的温度都在最终温度的 3K 范围内的状态。

注: 3 K 的公差符合 GB/T 2421-2020 中 3.11 对于散热试验样品和非散热试验样品热稳定的要求。



参考文献

- [1] 田野.1000 公里:可否治愈“里程焦虑”[N].新能源汽车报,2022-04-25(006).
- [2] 刘晓翠.新能源汽车智能化发展趋势及其在电工领域的应用前景[J].内燃机与配件,2024,(16):137-139.
- [3] 王春丽.我国新能源汽车产业的财税补贴政策现状及其对策研究[J].商业观察,2024,10(21):21-24.
- [4] 吴崇伯,吴雨禾.东盟国家新能源汽车产业发展的政策措施与路径[J].东南亚研究,2024,(03):1-22+153-154.
- [5] 阮淑慧,漆彤.美国区域价值链规则的路径转向——以《通胀削减法》新能源汽车补贴条款为视角[J].亚太经济,2024,(04):76-86.
- [6] 詹婷.“一带一路”视域下新能源汽车企业高质量绿色发展的路径研究[J].汽车维修与保养,2024,(07):83-84.
- [7] 刘晓翠.新能源汽车智能化发展趋势及其在电工领域的应用前景[J].内燃机与配件,2024,(16):137-139.
- [8] 闫翠萍,丁勇.新能源汽车轻量化技术及应用分析[J].农机使用与维修,2024,(06):113-116.
- [9] 赵振杰.基于虚拟仪器的汽车发动机液冷性能综合测试系统研究[D].安徽农业大学,2019.
- [10] 王盛沧.国外液冷汽车发动机散热器及冷却系统的发展水平[J].国外汽车,1973,(Z1):23-33.
- [11] 张钦国.工程车辆温控独立冷却系统关键技术研究[D].吉林大学,2016.
- [12] 吴世民.博世开发出新型液冷式汽车发电机[J].汽车与配件,2000,(05):18.
- [13] 6AT 自动变速箱的多重优势特点解析[OL], <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1825177364994665081&wfr=spider&for=pc>, 2025-02-27.
- [14] 朱剑杰,庄园,欧阳洪生,等.浸没液体冷却技术在动力电池热管理中的应用研究进展[J/OL].制冷学报,1-18[2025-04-11].
- [15] 杨忠原,张杰,饶兴宁,等.大型变压器散热技术发展现状及展望[J].能源研究与管理,2024,16(03):41-48.
- [16] 张佳欣.纯电动汽车电池液冷系统研究[D].长安大学, 2024.
- [17] 韩耀夫.新能源汽车电池冷却系统研究[J].时代汽车,2023,(24):109-111.
- [18] 刘田奇,汪伟,张擎鸣,等.拖拉机驱动电机的冷却水道优化及温度场仿真[J].中国农机化

学报,2025,46(03):175-181.

[19] 周湘晔,孔丽君,李昂,等.电力牵引设备液冷装置用技术标准应用现状[J].铁道机车与动车,2025,(02):7-11+61.

[20] 高志强,周立明,石成玉,等.液冷永磁同步电机电磁热流耦合仿真分析[J].中国汽车,2024,(12):59-64.

[21] 刘俊,王小碧,徐人鹤,等.极低温环境下某液冷电机降效制热的热仿真分析及试验研究[C]//中国汽车工程学会.第三十一届中国汽车工程学会年会论文集(2).东风汽车集团有限公司研发总院;东风商用车有限公司技术中心,2024:449-454.

[22] 寿好芳.新能源汽车电机控制器液冷散热系统热仿真分析及特性研究[J].机床与液压,2024,52(20):205-210.

[23] 巫仟煌,江吉彬,郑金波,等.电机控制器散热结构多目标优化[J].微特电机,2024,52(08):20-25.

[24] 徐则诚,欧阳友,杨麟,等.高海拔环境对西藏扎拉水电站电气设备选型的影响研究[J].水利水电快报,2024,45(06):99-102.

[25] 郭银杰,赵春雨.数据中心冷却技术发展综述[J].制冷与空调,2025,25(03):1-8.

[26] 潘永莉,王会娟,宗皓男,等.数据中心服务器浸没式液冷技术研究进展[J].润滑油,2024,39(06):7-13.

[27] 张浩然.低气压下风冷方式对三元锂电池性能的影响机制研究[D].中国民用航空飞行学院,2024.

[28] 李洋.车用功率集成模块微小通道液冷系统优化研究[D].山东交通学院,2024.

[29] 张鑫磊.纯电动商用车电机控制器的散热特性研究[D].福建农林大学,2024.

[30] 程正林.锂离子电池热管理系统液冷板通道拓扑优化设计研究[D].重庆交通大学,2024.

[31] Location-dependent distributed control of battery energy storage systems for fast frequency response[J]. Zhao Tianqiao, Parisio Alessandra, Milanović Jovica V.. International Journal of Electrical Power and Energy Systems.

[32] 高卫林.血管型相变液冷复合式锂电池组热管理性能研究[D].重庆交通大学,2024.

[33] 张继尧.多孔金属-相变复合式圆柱形锂电池组散热性能研究[D].重庆交通大学,2024.

[34] 李雪.耦合热管的液冷式动力电池散热结构设计及优化[D].重庆交通大学,2024.

[35] 陈琅,刘嘉辰,章珺越,等.新型半导体激光巴条衬底与液冷微结构集成散热研究[J].发光学报,2025,46(02):343-353.

- [36] 张亚萍,陈文达,王兵,等.电动汽车液冷超充技术现状与发展方向[J].汽车与新动力,2024,7(05):4-7.
- [37] 周彪,葛慕滢,王凯,等.液体浸没条件下锂离子电池新型热灾害的研究进展与挑战[J].消防科学与技术,2024,43(06):767-773.
- [38] 李建,阮迪.多样化算力对服务器的散热挑战分析[J].信息通信技术与政策,2024,50(02):46-54.
- [39] 唐启明.智能算力时代,金融数据中心如何应对绿色节能挑战[J].中国金融电脑,2022,(07):35-37.
- [40] 朱顺.ISO 16750-2 新旧标准差异分析[J].上海计量测试. 2023,50(6): 29-32
- [41] 胡凯,王钊桐,于国林,张旺威,张仕彬.标准 ISO 16750-3:2023 与 ISO 16750-3:2012 差异分析[J].环境技术. 2024,42(2): 174-180

