

陕西省科学技术进步奖提名书

(2026年度)

一、项目基本情况

项目名称	面向大功率电子器件的高效液冷关键技术及应用
主要完成人	魏进家（西安交通大学）， 张永海（西安交通大学）， 杨小平（西安交通大学）， 冯亚利（中航光电科技股份有限公司）， 张磊（中国移动通信集团陕西有限公司）， 吕达（中兴通讯股份有限公司）， 阚杰（中兴通讯股份有限公司）， 王磊（中国移动通信集团陕西有限公司）， 宇波（长江大学）， 石瑜（中兴通讯股份有限公司）， 马祥（西安交通大学）， 刘帆（中兴通讯股份有限公司）， 谢地（中航光电科技股份有限公司）， 段凯文（中兴通讯股份有限公司）， 张志伟（中航光电科技股份有限公司）
主要完成单位	西安交通大学，中航光电科技股份有限公司，中国移动通信集团陕西有限公司，中兴通讯股份有限公司，长江大学

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	中共陕西省委军民融合发展委员会办公室	提名等级	☒ 一等奖 ☐ 二等奖及以上 ☐ 三等奖及以上
提名意见： 西安交通大学魏进家、中航光电科技股份有限公司冯亚利、中国移动通信集团陕西有限公司张磊、中兴通讯股份有限公司吕达、长江大学宇波团队面向大功率电子器件热管理重大需求，依托国家级项目和国家级、省部级科研平台，通过产学研用深度融合，攻克了当前芯片热管理存在的传热效率不足、温度均匀性较差、流动阻力较大和能耗高等技术瓶颈，解决了高热流芯片（如雷达）与高功率芯片（如 AI 芯片）的热管理技术难题。首次提出了柱状微结构-非均匀纳米团簇强化沸腾传热新方法，建立了沸腾传热理论模型，开发了重力与微纳结构协同增强的新型三维热虹吸散热器；首次提出了歧管-微射流-微结构协同的强化传热、均温与减阻新方法，单芯片冷却能力达 2.5kW（热流超 500W·cm⁻²），达到国际领先水平；在系统层面，提出了芯片-散热器-冷却系统的低能耗、高可靠垂直互联技术。目前，项目开发的三维热虹吸散热器、微通道散热器均已被成功应用于中兴通讯、中航光电、航天科工二十五所等知名科技企业，在 5G 基站、数据中心、雷达等军民电子设备中发挥了关键作用，提升了电子设备性能与可靠性，并产生显著节能效果。以单座 IT 负载 1500MW 为例，年运行 8000 小时，本项目技术较传统风冷技术实现年节电 34.7 亿度（对应减碳 278.3 万吨）；较微通道液冷技术年节电 6.1 亿度（对应减碳 49.2 万吨），折合节约标准煤约 41.46 万吨，项目技术显著降低了数据中心冷却能耗，为我国信息技术产业可持续发展及节能减排目标实现做出了积极贡献。 提名该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。 说明：省科学技术奖一、二、三等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖，“提名二等奖及以上”的评审落选项目不再降格参评三等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。			

二、提名意见（适用于专家提名）

姓 名			
专家类型	☐ 国家最高科学技术奖获得者 ☐ 中国科学院院士 ☐ 中国工程院院士 ☐ 国家科学技术奖获奖项目第一完成人（需注明获奖等次） ☐ 省最高科学技术奖获奖人（或 xxxx 年省科学技术最高成就奖、xxxx 年基础研究重大贡献奖获奖人） ☐ Xxxx 年省科学技术奖第一完成人（需注明获奖等次）	提名等级	☐ 一等奖 ☐ 二等奖及以上 ☐ 三等奖及以上
责任专家	☐ 是 ☐ 否		
提名意见：			
说明：省科学技术奖一、二、三等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖，“提名二等奖及以上”的评审落选项目不再降格参评三等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。			

三、项目简介

在 5G 通信、人工智能及国防电子等战略领域，芯片性能正逐步演化为系统效能的决定性因素。当前全球科技竞争中，高性能芯片技术已上升至战略制高点。伴随芯片制程持续微缩、集成度不断提高，热管理挑战已从技术难题逐步升级为制约电子设备性能跃升的关键瓶颈。在国防领域，新一代射频功率芯片热流密度已突破 $500 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，对现有散热技术提出了严峻挑战。在民用领域，5G 信号传输速率达 4G 技术的 20 倍以上，使得 5G 基站芯片功耗达到 4G 基站的 3~5 倍。同时，人工智能技术快速发展使全社会算力需求剧增，使 AI 芯片向多功能化和高集成度方向快速演进，导致芯片热管理面临 kW 级大功率与 $100 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 级高热流的双重挑战，远超传统风冷技术理论极限。在系统层面，我国数据中心能耗问题尤为突出。据权威预测，到 2030 年我国数据中心用电量将占全社会用电量的 5% 左右，总量将超过 5000 亿千瓦时。传统风冷方案 PUE 普遍在 1.4~1.5，冷却系统能耗在数据中心总能耗中占比高达 40%。因此，发展新一代高效、低能耗芯片散热技术，不仅是突破芯片性能瓶颈的关键，更是推动我国信息技术产业可持续发展和节能减排的重要战略举措。

基于此，本项目针对传统芯片冷却技术传热效率低、均温性差、流动阻力大及能耗高这一关键技术问题，提出了芯片全路径传热强化新方法，突破了面向大功率电子器件的高效液冷关键技术，形成了具有完全自主知识产权的新一代高效、高均温性、低流阻与低能耗散热核心技术与器件，综合性能达国际领先水平，并实现产业化应用，取得了显著的经济和社会效益，项目研究思路及应用效果如图 1 所示。

面向大功率电子器件的高效液冷关键技术及应用

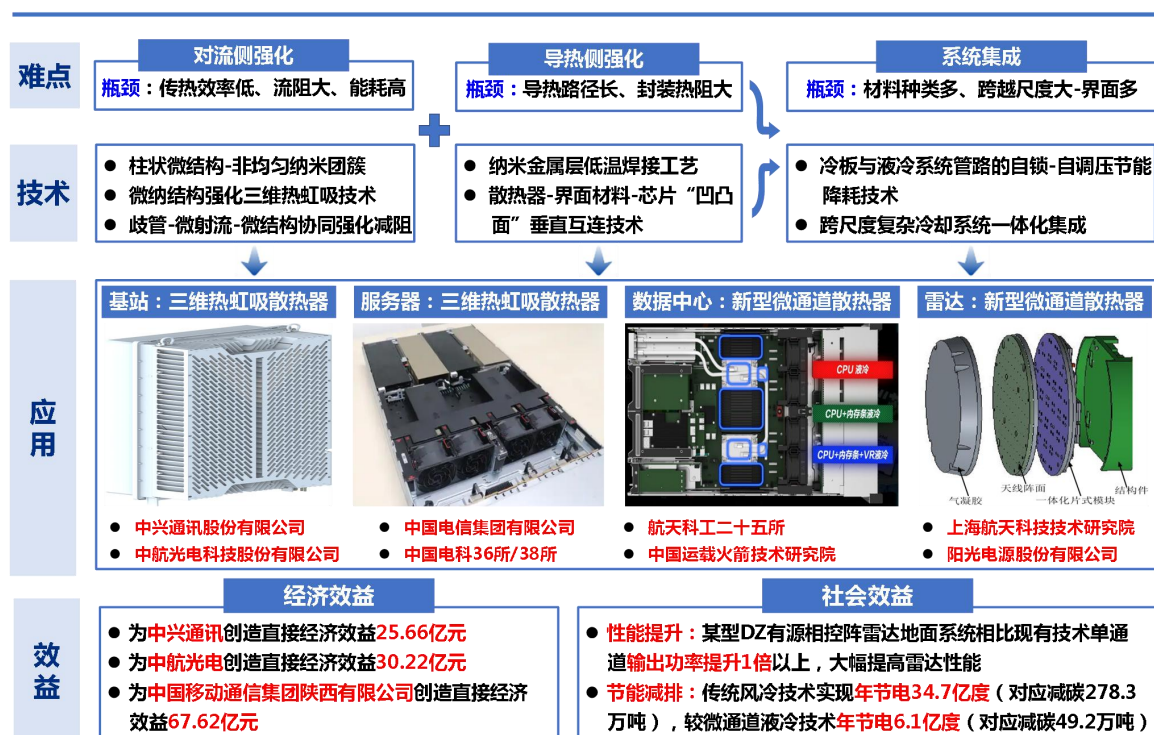


图 1 本项目整体思路

(1) 首次提出柱状微结构-非均匀纳米团簇表面强化结构，实现低、中、高热

流下沸腾传热全过程强化；解决传统强化表面在高热流下汽泡团聚、传热恶化的问题，使传热系数和临界热流密度较传统多孔表面结构分别提高 125%和 62%，从热源侧降低维持芯片安全温度所需的冷却负荷。

(2) 研发微纳结构协同增强的新型三维热虹吸散热器，无循环泵即可完成沸腾吸热、蒸汽输运和冷凝回流；散热能力突破 1000W，最高热流达 $112\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，最低热阻 $0.076\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ，兼顾高散热能力与低辅助能耗，综合性能居国际领先水平。

(3) 研发歧管-微射流-微结构耦合的新型微通道散热器及低阻供液系统，突破了芯片、散热器、供液盒体的跨尺度、低热阻集成技术，单芯片冷却能力达 2.5kW（最高热流 $500\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）同时可使压降降低 39%。相关数据表明，本技术的应用可使数据中心系统 PUE 低至 1.14，节能效果大幅提升。

本项目已获授权发明专利 30 项，实用新型专利 10 项，软件著作权 2 项，发布行业标准（ODCC）3 项，发表 SCI/EI 检索 52 篇，累计培养从事电子器件热管理行业的硕/博毕业生 30 余人。项目所研发的新型三维热虹吸散热器、歧管微通道散热器、液冷系统等关键技术被同行专家认定为达到国际领先水平。三维热虹吸散热器、歧管微通道散热器和液冷系统已应用于中兴通讯 5G 通信与高性能计算系列产品、中航光电数据中心液冷产品及系统、阳光电源高功率光伏逆变器、储能变流器(PCS)及电源模块等主力产品，并在中国移动通信集团陕西有限公司的 5G 基站、路由交换机和高性能服务器等场景推广。主动式液冷技术已用于航天科工二十五所某型 DZ 有源相控阵雷达地面系统并通过现场测试，单通道输出功率提高 1 倍以上；相关技术还在中电科三十六所/三十八所、中国运载火箭技术研究院、上海航天技术研究院、中国空空导弹研究院等重要国防单位的雷达、5G 基站、功率芯片等系列产品高效冷却及节能项目中推广应用，为我国国防事业及人工智能产业发展提供了有力支撑。

相关应用企业财务数据显示，近三年创造直接经济效益达 123.5 亿元。以单座 IT 负载 1500MW 为例，年运行 8000 小时，本项目技术较传统风冷技术实现年节电 34.7 亿度（对应减碳 278.3 万吨）；较微通道液冷技术年节电 6.1 亿度（对应减碳 49.2 万吨），折合节约标准煤约 41.46 万吨，项目技术显著降低了芯片冷却能耗，为我国人工智能产业可持续发展及节能减排目标实现做出了积极贡献。

四、客观评价

1、科技成果鉴定报告评价：项目由中科合创（北京）科技成果评价中心组织，以西安近代化学研究所吕剑院士为组长的专家组鉴定为：各项成果总体指标达到了国际先进水平，部分指标达到了国际领先水平。

(1) 首次提出了柱状微结构与非均匀纳米团簇耦合的液冷传热强化新方法，构建了沸腾传热理论模型，揭示了柱状微结构与非均匀纳米团簇强化沸腾传热机理，解决了汽泡脱离驱动力不足、近临界沸腾阶段壁面润湿驱动力与润湿通道缺乏的问题，显著提高了临界热流密度。（佐证：附件 1、2、3、7、32、33、34、40、41）

(2) 首次提出了表面微纳结构协同增强的新型三维热虹吸散热器结构，创新性地 在沸腾腔吸热面与冷凝腔释热面引入表面微纳与微沟槽结构，散热能力达 1000W，热流达 $112\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，最低热阻达 $0.076\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ，综合散热性能达到国际领先水平。（佐证：附件 1、2、3、4、7、32、33、35）

(3) 首次提出了歧管-微射流-柱状微结构协同的微尺度单相传热强化、均温与减阻新方法，单芯片冷却能力达到 2.5 kW，综合散热性能明显优于台积电、斯坦福大学现行业尖端散热技术，达到国际领先水平，应用于高性能数据中心，相比于传统风冷技术节能 60%。（佐证：附件 1、2、3、4、7、21、32、33、36）

2、学术性评价：

(1) ASME Fellow、美国普渡大学 Issam Mudawar 教授评价道，本项目团队提出的柱状微结构虽然在低热流密度下的性能不如纳米尺度的强化表面，但其临界热流密度却明显更高，可达光滑表面的 2.3 倍。（佐证：附件 42）

(2) 美国工程院院士、麻省理工学院 Evelyn N. Wang 教授在 *Langmuir* 期刊发表的文章中提到，本项目团队在沸腾过程中观察到了相邻微汽泡自发聚合引起的脱离现象，此现象在其团队的后续工作中也得到了证实。（佐证：附件 43）

(3) 华为热管理首席技术专家、上海交通大学洪芳军教授通过数据图谱系统地呈现了本项目团队十余年的研究结果，大篇幅评述了本项目团队提出的柱状微结构在汽泡动力学调控、沸腾传热强化机理方面的研究成果，并指出本团队揭示了柱状微结构耦合纳米线对沸腾传热的重要影响机制。（佐证：附件 44）

(4) ASHRAE Fellow、ACE Fellow、普渡大学机械学院院长 Eckhard A. Groll 教授评价：本项目团队提出模型的独特之处（unique）在于可同时预测池沸腾和流动沸腾临界热流密度。（佐证：附件 45）

(5) ASME Fellow、IEEE Fellow、美国纽约州立大学 Sammakia 教授使用本项目团队提出的沸腾传热系数预测模型来预测其实验数据，在现有 5 种模型中精度最高，MAE=9.2%。（佐证：附件 46）

3、科技查新结论：经教育部科技查新工作站查新，结论为：检索到的国内文献报道与本项目所有查新点均有不同之处，与本项目所有查新点完全相同的未见报道。（佐证：附件 32）

4、中兴通讯股份有限公司技术评价：自 2021 年 10 月起，项目研发的大功率三维热虹吸散热器、歧管微通道散热器技术成功应用于中兴通讯股份有限公司的 5G 通信

及高性能计算系列产品，大幅提升了产品性能、寿命和可靠性，并降低了设备能耗，增强了中兴通讯股份有限公司在全球 5G 通信与高性能计算领域的优势地位，为后续产品市场开发和项目获取创造了有利条件。（佐证：附件 4、8）

5、中航光电科技股份有限公司技术评价：自 2022 年以来，西安交通大学与中航光电科技股份有限公司深入合作，联合成立“西安交大-中航光电未来技术创新中心”，共同开发了多款新型微通道液冷板组件及液冷系统，将新型高效液冷散热技术成功应用于数据中心、AI 服务器和国防军工领域的装备热管理中，显著提升了设备的稳定性、可靠性和节能性，极大提高了公司在大功率液冷市场领域的竞争力，形成新质生产力并为我国高质量发展赋能。（佐证：附件 9）

6、中国移动通信集团陕西有限公司技术评价：2023 年以来，中国移动集团陕西有限公司与中兴通讯股份有限公司深入合作，对高性能计算设备与 5G 通信装备的制造、节能散热和优化布局进行了大量的研究，将西安交通大学和中兴通讯股份有限公司合作开发的新型高效相变散热技术成功应用于 5G 基站、路由交换机、高性能服务器等新一代 5G 通信装备热管理中，大幅降低冷却能耗，改善了通信设备的运行质量，实现了产业化应用。（佐证：附件 10）

7、航天科工集团第二研究院二十五研究所技术评价：依托本项目开发的“基于新型歧管式微通道的超高热流芯片冷却技术”成功应用于某型 DZ 有源相控阵雷达地面系统，并通过了现场测试，相比现有技术单通道输出功率提升 1 倍以上，综合散热性能达到国际领先水平，显著提高我国重要国防电子装备性能。（佐证：附件 11）

8、中国电子科技集团公司第三十六研究所技术评价：中航光电科技股份有限公司配套三十六所的 YF-175-1B 液冷分配系统随整机进行状态鉴定实验考核，试车过程无质量问题，设计保证项目、状态鉴定实验项目顺利通过试验考核。（佐证：附件 12）

9、阳光电源科技股份有限公司技术评价：面向光伏逆变器、储能变流器及大功率电源装备在高负荷、宽温度范围和频繁功率波动工况下的热管理痛点，联合西安交通大学研发了具有自主知识产权的三维热虹吸被动液冷散热模组，该技术利用工质相变潜热与重力回流实现被动传热，热阻与温度均匀性等核心指标达到国际领先水平，显著降低了对高速风机和复杂泵路的依赖。（佐证：附件 17）

10、国家及省部级基金项目验收结论：

(1) 国家杰出青年科学基金项目“两相流动与传热”（51225601），验收意见：验收专家组一致同意课题通过验收。（佐证：附件 37）

(2) 国家自然科学基金重点项目“亲/疏水表面微结构和周期性脉动流及其协同作用强化沸腾传热机理研究”（51636006），验收意见：已考核完毕，准予结题。（佐证：附件 38）

(3) 国家自然科学基金国际合作与交流项目“利用表面微/纳米复合结构强化沸腾传热研究”，（51611130060），验收意见：同意结题，验收通过。（佐证：附件 39）

五、应用情况

1. 应用情况（限 2 页）

本项目成果在中兴通讯股份有限公司、中航光电科技股份有限公司、航天科工集团第二研究院二十五研究所、中电科集团第三十六研究所系列核心产品及装备中得到成功应用，性能达到国际领先水平，解决了 5G 基站、高性能服务器、高性能雷达等核心电子设备的散热难题，取得显著经济和社会效益。典型应用如下：

(1) **中兴通讯股份有限公司**，自 2022 年以来，与西安交通大学展开了密切科研与技术合作，研发新一代被动式和主动式高效液冷技术，解决了中兴通讯在 5G 通信与高性能计算领域芯片热管理迫切需求。项目组研发的新型三维热虹吸散热器成功应用于中兴通讯 5G 基站及高性能计算系列产品，大幅提高了相关产品的性能、寿命和可靠性，降低了设备能耗。其中 5G 通信产品产品应用于多个高密度立体覆盖移动通信网络场景。此外，项目组研发的新型微通道散热器成功应用于国内外数十座数据中心，**显著降低了数据中心能耗**，为公司后续有关高性能服务器产品和 5G 基站的市场开发和项目获取创造有利条件，助力中兴通讯在 5G 通信及高性能计算领域稳居全球前五。（佐证：附件 4、8）

(2) **中航光电科技股份有限公司**，2022 年以来，与西安交通大学深入合作，联合成立“西安交大-中航光电未来技术创新中心”，联合研发以新型微通道散热器为核心的新一代高效液冷板组件以及液冷系统，已规模化应用于多加头部互联网企业数据中心，其衍生液冷系统解决方案更成功拓展至区块链边缘计算、舰船动力电子及航空机载设备热管理领域，解决了高性能计算、雷达等核心电子设备的热管理难题，提升了民用和国防电子装备性能、可靠性和节能性。近三年来相关技术的成功应用，为企业创造了显著的经济和社会效益，极大提高了公司在液冷市场领域的竞争力，助力公司在数据中心液冷领域市场份额稳居全国前三，形成新质生产力并为我国高质量发展赋能。（佐证：附件 9）

(3) **中国移动通信集团陕西有限公司**：自 2023 年以来，中国移动通信集团陕西有限公司与中兴通讯股份有限公司开展面向 5G 基站和数据中心热管理的合作，项目成果重点应用于 5G 基站、数据中心及承载设备等高密度无线场景，显著降低冷却能耗，改善了通信设备的运行质量，为公司带来了巨大的经济效益和社会效益。（佐证：附件 10）

(4) **航天科工集团第二研究院二十五研究所（北京遥感设备研究所）**：自 2022 年以来，应用了研发“基于新型歧管式微通道的超高热流芯片冷却技术”系列成果，包括新型歧管式微通道散热器模块设计与仿真、超高热流芯片与新型微通道散热器低热阻集成技术等基础理论和高新技术结合的自主知识产权，应用于某型 DZ 有源相控阵雷达地面系统中，经现场实测，新型歧管式微通道散热模块及系统中，单通道输出功率提升 1 倍以上，散热功耗、热阻、流阻等综合散热性能指标达到国际领先水平，能够满足高性能有源相控阵雷达超高热流散热需求，显著提高我国重要国防电子装备性能。（佐证：附件 11）

(5) **中电科集团第三十六研究所**：自 2022 年以来，应用了项目组团队开发、中

航光电生产配套的 YF-175-1B 系列液冷系统,该系统随整机进行状态鉴定试验考核,设计保证项目(安全性、可靠性、维修性、保障性)通过了审查,状态鉴定试验项目包括外观质量、安装接口外形尺寸、重量、安全压力成套性、自卸压、流阻、流量分配、低温贮存低温工作、高温贮存、高温工作、湿热、低气压、振动、冲击、跑车,试验过程无质量问题,通过了试验考核。(佐证:附件 12)

(6) 阳光电源股份有限公司:自 2025 年 1 月以来,TH 系列及 TH-P 系列散热模组已成功应用于阳光电源股份有限公司的高功率光伏逆变器、储能变流器及电源模块等主力产品中,在高温满载、循环充放电、低温启动及长期老化等严苛测试中表现优异,有效降低了器件结温、局部热点和热降额概率,提升了整机效率、寿命及复杂环境下的可靠性。该技术还为客户在储能站内辅助散热自耗电降低、设备轻量化和低噪声设计方面创造了显著价值。(佐证:附件 17)

表 2 主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/固定电话
1	中兴通讯股份有限公司	整体技术	5G 基站、高性能服务器、数据中心	2022.07-至今	段凯文 /15991781180
2	中航光电科技股份有限公司	整体技术	高性能数据中心	2022.01-至今	张志伟 /15514510969
3	航天科工集团第二研究院二十五研究所	整体技术	某型 DZ 有源相控阵雷达地面系统	2022.01-至今	孙浩洋 /18205601655
4	中国电子科技集团公司第三十六研究所	整体技术	某型 CZ 雷达整机测试	2022.06-至今	廖海勇 /13750782787
5	中国移动通信集团陕西有限公司	整体技术	5G 基站、数据中心	2023-至今	王磊 /13629278497
6	中国电子科技集团公司第三十八研究所	整体技术	雷达	2025-至今	赵凯 /19965199825
7	中国空空导弹研究院	整体技术	某型号导引头处理系统	2023.05-2024.12	姚达斌 /13653793283
8	中国运载火箭技术研究院	整体技术	某型号高功率测控单元	2024.01-至今	张升升 /15646571155
9	上海航天技术研究院	整体技术	某型号卫星电子组件样机	2024.05-至今	赵凯璇 /18916392049
10	阳光电源股份有限公司	整体技术	高功率光伏逆变器、储能变流器	2025-至今	束洋 /15240181522

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种基于池沸腾散热的液体腔散热装置	中国	ZL 202011400 608.5	2021 年 12 月 28 日	4869999	西安交通大学	魏进家, 周杰, 齐宝金, 刘蕾, 张永海
2	发明专利	一种组合式柱状的芯片强化沸腾传热微结构及其制造方法	中国	ZL 201810069 645.9	2019 年 08 月 23 日	3501658	西安交通大学	张永海, 刘斌, 魏进家, 周杰
3	发明专利	一种低流阻芯片嵌入式阵列微射流散热器及其制造方法	中国	ZL 202010382 883.2	2022 年 03 月 08 日	4980800	西安交通大学	杨小平, 魏进家, 冀昕宇, 张永海, 刘蕾
4	发明专利	基于仿生分形结构的超低流阻微通道散热器及其制造方法	中国	ZL202011 233530.2	2024 年 04 月 06 日	6908998	西安交通大学	魏进家, 冀昕宇, 杨小平, 张永海
5	学术论文	Experimental study of an aluminum based three-dimensional thermosyphon heat sink with microscale enhancement structure	欧洲	10.1016/j.applthermal eng.2024.1 24273	2024 年 09 月 02 日	Applied Thermal Engineering	西安交通大学, 中兴通讯股份有限公司	杨小平, 卜世超, 江朱叶, 周尧, 孙振, 张永海, 魏进家
6	学术论文	歧管式射流微通道液冷散热性能	中国	10.11949/0 438-1157.2 0231228	2023 年 11 月 27 日	化工学报	中兴通讯股份有限公司, 西安交通大学	刘帆, 张莞通, 陶成, 胡成玉, 杨小平, 魏进家
7	发明专利	散热组件及散热器	中国	ZL2021111 34798.5	2025 年 04 月 01 日	7842911	中兴通讯股份有限公司	段凯文, 李帅, 刘欣, 刘帆, 聂志东, 汪艳, 赵明明
8	发明专利	散热装置及电子设备	中国	ZL 202110859 071.7	2020 年 03 月 13 日	5298672	中兴通讯股份有限公司	李振杰, 刘帆, 范皓龙
9	实用新型专利	一种模块化垂直互联功能的微通道冷板组件	中国	ZL 202222816 492.4	2023 年 05 月 16 日	19028182	中航光电科技股份有限公司	蔡艳召, 薛玉卿, 冯亚利, 黄胜利

1 0	发明专利	散热器	中国	ZL 201410775 960.5	2017 年 09 月 22 日	2632497	中航光 电科技 股份有 限公司	冯亚利, 李 俊阳, 叶亚 鹏
--------	------	-----	----	--------------------------	---------------------	---------	--------------------------	-----------------------

七、主要完成人情况表

姓 名	魏进家	排 名	1
行政职务	西安交通大学人力资源部部长		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		

对本项目主要学术贡献：

(1) 对第 1、2、3 项科技创新做出了创造性贡献；(2) 提出了柱状微结构与非均匀纳米团簇协同的沸腾传热全过程强化新方法，研发了被动式相变液冷技术和主动式单相液冷技术，解决了大功率芯片液冷技术中存在传热效率不足、温度均匀性较差、流动阻力较大等优化设计难题；(3) 佐证材料：附件 1、2、3、7、21、27、28、32、33、34、35、36、37、38、39、40、41、47、48、50、52、53、54、55、56

姓 名	张永海	排 名	2
行政职务	院长助理		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		

对本项目主要学术贡献：

(1) 对第 1、2、3 项科技创新做出了创造性贡献；(2) 提出了对流侧液冷传热强化新方法，构建了沸腾传热理论模型，大幅提高了换热系数和临界热流密度；(3) 佐证材料：附件 1、2、3、7、21、27、28、33、34、35、38、39、40、41、49/51、55、56

姓 名	杨小平	排 名	3
行政职务	副所长		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		

对本项目主要学术贡献：			
(1) 对第 1、2、3 项科技创新做出了创造性贡献；(2) 提出了导热侧强化传热新方法，研发了三维热虹吸、歧管微通道等高性能散热器，解决了高热流、大功率芯片液冷板优化设计难题；(3) 佐证材料：附件 3、7、21、33、35、36、55、56			

姓 名	冯亚利	排 名	4
行政职务	环控产品部部长		
技术职称	正高级工程师		
工作单位	中航光电科技股份有限公司		
完成单位	中航光电科技股份有限公司		
对本项目主要学术贡献： （1）对第 2、3 项科技创新做出了创造性贡献；（2）研发了新一代微通道液散热器，开展了泵驱液冷系统设计及性能验证，解决了微小通道液冷系统优化设计难题；（3）佐证材料：附件 4、9、19、24、26、56			

姓 名	张磊	排 名	5
行政职务	副总经理		
技术职称	高级工程师		
工作单位	中国移动通信集团陕西有限公司		
完成单位	中国移动通信集团陕西有限公司		
对本项目主要学术贡献： （1）对第 3 项科技创新做出了创造性贡献；（2）提出了数据中心节能方案，拓展了高性能 5G 通信装备的应用场景，实现了产品在教育端的节能优化；（3）佐证材料：附件 10、20			

姓 名	吕达	排 名	6
行政职务	研究院院长		

技术职称	高级工程师
工作单位	中兴通讯股份有限公司
完成单位	中兴通讯股份有限公司
对本项目主要学术贡献： （1）对第 1、2、3 项科技创新做出了创造性贡献；（2）基于蒸发/沸腾相变强化传热理论模型，提出一种具有弧形接触面的导热垫和新型散热片扣具优化设计方法，解决了传统相变散热器器件安装不便和热传导效果差的问题，大幅度降低了芯片封装过程中的接触热阻；（3）佐证材料：附件 5、8、18、55	

姓 名	阚杰	排 名	7
行政职务	数据中心产品线总经理		
技术职称	无		
工作单位	中兴通讯股份有限公司		
完成单位	中兴通讯股份有限公司		
对本项目主要学术贡献： （1）对第 3 项科技创新做出了创造性贡献；（2）提出并开发了新型、复合微通道散热器，降低了传热热阻并增强了散热效果；（3）佐证材料：附件 5、8、18、55			

姓 名	王磊	排 名	8
行政职务	无		
技术职称	高级工程师		
工作单位	中国移动通信集团陕西有限公司		
完成单位	中国移动通信集团陕西有限公司		
对本项目主要学术贡献： （1）对第 2、3 项科技创新做出了创造性贡献；（2）开展了基于 5G 无线网络规划的设计研究，提出了一种高效、低耗的 5G 分布式基站算力共享技术，实现了不同智能场景下的 5G 技术应用；（3）佐证材料：附件 10、20			

姓 名	宇波	排 名	9
行政职务	院长		
技术职称	教授		
工作单位	长江大学		
完成单位	长江大学		
对本项目主要学术贡献： （1）对第 1 科技创新做出了创造性贡献；（2）发展了柱状微结构沸腾汽泡动力学和传热理论模型，数值模拟获得了汽泡柱状微结构上的生成、成长和脱离规律。（3）佐证材料：附件 33、38、40、47			

姓 名	石瑜	排 名	10
行政职务	无		
技术职称	部长		
工作单位	中兴通讯股份有限公司		
完成单位	中兴通讯股份有限公司		
对本项目主要学术贡献： （1）对第 2、3 项科技创新做出了创造性贡献；（2）提供了一种新型电子设备散热器，有效扩大了微通道散热器内工质的换热面积，解决了高功耗、高热流密度芯片应用场景的散热问题；（3）佐证材料：附件 5、8、18、55			

姓 名	马祥	排 名	11
行政职务	无		
技术职称	助理教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		

对本项目主要学术贡献：			
(1) 对第 1、3 项科技创新做出了创造性贡献；(2) 研发了高性能液冷微通道散热技术、揭示了微通道相变换热机理，提出了微通道优化设计准则，大幅降低了微通道流动不稳定性；(3) 佐证材料：附件 7、27、28、55、56			

姓 名	刘帆	排 名	12
行政职务	科长		
技术职称	高级工程师		
工作单位	中兴通讯股份有限公司		
完成单位	中兴通讯股份有限公司		
对本项目主要学术贡献：			
(1) 对第 2、3 项科技创新做出了创造性贡献；(2) 开展了歧管-微射流-微结构散热器设计优化方法，提高了换热面冷却液温度与流量的时空分布均匀性，提高了芯片表面温度均匀性，缩短了冷却液流程，大幅降低流动阻力；(3) 佐证材料：附件 5、8、18、22、23、25、31、33、36、55			

姓 名	谢地	排 名	13
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	中航光电科技股份有限公司		
完成单位	中航光电科技股份有限公司		
对本项目主要学术贡献： （1）对第 2、3 项科技创新做出了创造性贡献；（2）研发了新一代微通道液散热器，开展了泵驱液冷系统设计及性能验证，解决了微小通道液冷系统优化设计难题；（3）佐证材料：附件 4、9、19、56			

姓 名	段凯文	排 名	14
行政职务	科长		
技术职称	热设计高级系统工程师		

工作单位	中兴通讯股份有限公司
完成单位	中兴通讯股份有限公司
对本项目主要学术贡献： （1）对第 2 项科技创新做出了创造性贡献；（2）提出并建立了数据中心液冷散热系统的热设计优化方法，散热效率显著增强，关键芯片结点温度明显降低；（3）佐证材料：附件 5、8、18、22、25、29、20、31、33、36、55	

姓 名	张志伟	排 名	15
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	中航光电科技股份有限公司		
完成单位	中航光电科技股份有限公司		
对本项目主要学术贡献： （1）对第 2、3 项科技创新做出了创造性贡献；（2）研发了新一代微通道液冷板散热器，开展了泵驱液冷系统设计及性能验证，解决了微小通道液冷系统优化设计难题；（3）佐证材料：附件 4、9、19、56			

八、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
对本项目主要学术贡献： 作为第一完成单位，西安交通大学完成了本项目主要科技创新中创新点一、创新点二、创新点三的部分工作，其中包括：（1）提出了柱状微结构与非均匀纳米团簇协同的沸腾传热全过程强化新方法。（2）构建了新型三维热虹吸散热器传热全过程理论模型，揭示了散热器内部热质传输机理，为高性能相变散热器的设计与优化提供了理论指导。（3）提出了从对流侧到导热侧的全路径传热强化方法，实现了高效、低流阻、低热阻与高均温芯片散热。	

单位名称	中航光电科技股份有限公司
作为第三完成单位，中航光电科技股份有限公司完成了本项目主要科技创新中创新点二、创新点三的部分工作，其中包括：（1）开发了新一代液冷强化换热技术，设计了多种微射流及微通道复合冷板，解决了大功率芯片散热难题。（2）研发了基于纳米金属层低温焊接关键技术，利用纳米铜颗粒超高表面能特性实现了芯片与散热器在 200℃的低热阻、高可靠性集成，解决了传统焊接工艺需高温（350℃）焊接而产生残余热应力的问题。（3）克服了多材料异质集成热膨胀系数不匹配的问题，实现了跨尺度复杂三维立体冷却结构的一体化集成，大幅降低了导热热阻。	

单位名称	中国移动通信集团陕西有限公司
------	----------------

中国移动通信集团陕西有限公司完成了本项目主要科技创新中创新点三的部分工作：对高性能计算设备与 5G 通信装备的制造和优化布局进行了大量的研究，结合 pRRU 点控室分节能方案，将新型高效相变散热技术成功应用于 5G 基站、路由交换机、高性能服务器等新一代 5G 通信装备热管理中，实现了 5G 技术在智慧能源、智能制造、智慧文旅等关键领域的覆盖，形成新质生产力，为我国通信行业创造了巨大的经济效益和社会效益。

单位名称	中兴通讯股份有限公司
对本项目主要学术贡献：作为第四完成单位，中兴通讯股份有限公司完成了本项目主要科技创新中创新点二、创新点三的部分工作，其中包括：（1）提出了重力与表面微结构协同增强的新型三维热虹吸散热器结构，将传统热虹吸散热器的传热模式从准二维拓展到三维，极大地拓展了有效散热面积。（2）提出了硅基芯片与金属基微通道散热器异质材料低热阻、低应力、高可靠性集成技术，实现跨尺度复杂三维供液分流管网集成。	

单位名称	长江大学
作为第四完成单位，长江大学完成了本项目主要科技创新中创新点一的部分工作，其中包括：开发了柱状微结构沸腾传热理论模型，利用自编程精确模拟了汽泡在沸腾过程中的成核、生长以及脱离过程，模拟结果与实验高度一致，大大节约了实验成本。	

完成人合作关系说明

本项目完成人共 15 位。其中，第 1（魏进家）、第 2（张永海）、第 3（杨小平）、第 11（马祥）完成人隶属于第一完成单位西安交通大学，第 6（吕达）、第 7（阚杰）、第 10（石瑜）、第 12（刘帆）、第 14（段凯文）完成人隶属于第二完成单位中兴通讯股份有限公司，第 4（冯亚利）、第 13（谢地）、第 15（张志伟）完成人隶属于第三完成单位中航光电科技股份有限公司，第 5（张磊）、第 8（王磊）完成人隶属于第四完成单位中国移动通信集团陕西有限公司，第 9（宇波）完成人隶属于第五完成单位长江大学。

项目依托国家自然科学基金杰出青年基金项目、重点项目、国际合作项目等，自 2006 年开始，通过产学研联合攻关，开展面向大功率电子器件的高效液冷关键技术及应用。在此过程中，项目主要完成人合作关系如下：2006-2025 年，在国家自然科学基金、陕西省基金、企业委托项目的支持下，本人（第 1 完成人，魏进家）与第 2（张永海）、第 3（杨小平）、第 4（冯亚利）、第 5（张磊）、第 6（吕达）、第 7（阚杰）、第 8（王磊）、第 9（宇波）、第 10（石瑜）、第 11（马祥）、第 12（刘帆）、第 13（谢地）、第 14（段凯文）、第 15（张志伟）等针对大功率电子器件的高效液冷关键技术及应用开展了产-学-研-用研究，形成了一系列研究成果。2023 年以来，中国移动通信集团陕西有限公司与中兴通讯股份有限公司深入合作，对高性能计算设备与 5G 通信装备的制造、节能散热和优化布局进行了大量的研究，将西安交通大学和中兴通讯股份有限公司合作开发的新型高效相变散热技术成功应用于 5G 基站、路由交换机、高性能服务器等新一代 5G 通信装备热管理中，并实现了产业化应用，同时形成了技术研发-产品应用-问题反馈-技术升级的三方合作新模式，促进了科学技术转化为高质生产力。在合作过程中，团队成员取得了丰硕的学术成果，共同获得了多项省部级荣誉及奖励。

（1）共同知识产权。本人与第 2 完成人联合申请并获授权发明专利《一种基于池沸腾散热的液体腔散热装置》（**ZL 202011400608.5**）、《一种组合式柱状的芯片强化沸腾换热微结构及其制造方法》（**ZL 201810069645.9**）；本人与第 2、第 3 完成人联合申请并获授权发明专利《一种低流阻芯片嵌入式阵列微射流散热器及其制造方法》（**ZL 202010382883.2**）、《基于仿生分形结构的超低流阻微通道散热器及其制造方法》（**ZL 202011233530.2**）。

（2）论文合著。本人与第 2、第 3 完成人共同发表代表性论著（*App. Therm. Eng.* **2024, 257:124273**）；本人与第 3、第 11 完成人共同发表代表性论著（*化工学报*, **2024, 75 (5): 1777-1786**）。

（3）共同立项。本人与第 2、第 9 完成人共同获批国家自然科学基金重点项目《亲/疏水表面微结构和周期性脉动流及其协同作用强化沸腾换热机理研究》（**51636006**）。

（4）产业合作。本人与第 2、第 3、第 6、第 7、第 10、第 11、第 12、第 14 完成人共同合作项目《微尺度液冷技术研究项目》；本人与第 2、第 3、第 4、第 11、第 13、第 15 完成人共同合作项目《微通道相变冷却技术研究》。

承诺：本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

第一完成人签名：魏进家

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	共同知识产权	魏进家(1), 张永海(2)	2020.12	2021.12	一种基于池沸腾散热的液体腔散热装置	专利证书(佐证: 附件1)
2	共同知识产权	张永海(2), 魏进家(1)	2018.01	2019.07	一种组合式柱状的芯片强化沸腾传热微结构及其制造方法	专利证书(佐证: 附件2)
3	共同知识产权	杨小平(3), 魏进家(1), 张永海(2)	2020.05	2022.03	一种低流阻芯片嵌入式阵列微射流散热器及其制造方法	专利证书(佐证: 附件3)
5	论文合著	张永海(2), 魏进家(1)	2020.02	2020.05	Enhanced Nucleate Pool Boiling by Coupling the Pinning Actand Cluster Bubble Nucleation of Micro-nano Compositied Surfaces	论文首页(佐证: 附件34)
6	论文合著	杨小平(3), 张永海(2), 魏进家(1)	2024.05	2024.08	Experimental study of an aluminum based three-dimensional thermosyphon heat sink with microscale enhancement structure	论文首页(佐证: 附件35)
7	论文合著	刘帆(9), 陶成(11), 杨小平(3), 魏进家(1)	2023.11	2024.02	歧管式射流微通道液冷散热性能	论文首页(佐证: 附件36)
8	共同立项	魏进家(1), 张永海(2)	2017.01	2021.12	亲/疏水表面微结构和周期性脉动流及其协同作用强化沸腾换热机理研究	项目验收报告及项目书主要成员页(佐证: 附件38, 40)
9	产业合作	魏进家(1), 张永海(2), 杨小平(3), 吕达(6), 阚杰(7), 马祥(11), 刘帆(12), 段凯文(14)	2022.06	2023.06	微尺度液冷技术研究项目	委托技术预研合同首页(佐证: 附件55)
10	产业合作	魏进家(1), 张永海(2), 杨小平(3), 冯亚利(4), 马祥(11), 谢地(13), 张志伟(15)	2021.12	2023.11	微通道相变冷却技术研究	技术开发(委托)合同首页(佐证: 附件56)

承诺：本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

第一完成人签名：魏进家