

# 浅谈车辆复合散热模块的研究与应用

齐红梅

新乡市新豪机电有限公司, 河南 新乡 453000

**[摘要]**随着特种车辆动力系统功率密度的持续提升,其热管理需求日益复杂化。此文针对特种车辆散热系统的技术痛点,提出了一种复合散热模块的集成化设计方案。通过模块化架构整合水散热器、中冷器、导风罩及变频风扇组件,优化了气流分布均匀性与散热效率。研究采用理论计算与仿真验证相结合的方法,确认散热模块的芯体尺寸、风量分配及热阻参数,并通过实验验证其在极端环境下的可靠性。实际应用表明,该模块散热功率达153.85kW(水散热器)与54.16kW(中冷器),重量控制在313kg以内,满足军用车辆高功率发电需求。此文为特种车辆散热系统的设计与优化提供了理论依据与工程参考。

**[关键词]**复合散热模块;特种车辆;热管理;仿真验证;工程应用

DOI: 10.33142/ec.v8i2.15353

中图分类号: U461.91

文献标识码: A

## Brief Discussion on the Research and Application of Composite Cooling Modules for Vehicles

QI Hongmei

Xinxiang Xinhao Electromechanical Co., Ltd., Xinxiang, He'nan, 453000, China

**Abstract:** With the continuous increase in power density of special vehicle power systems, their thermal management requirements are becoming increasingly complex. This article proposes an integrated design scheme for composite cooling modules to address the technical pain points of special vehicle cooling systems. By integrating water radiators, intercoolers, air deflectors, and variable frequency fan components through modular architecture, the uniformity of airflow distribution and heat dissipation efficiency have been optimized. The research adopts a combination of theoretical calculation and simulation verification to confirm the core size, air volume distribution, and thermal resistance parameters of the heat dissipation module, and verifies its reliability in extreme environments through experiments. Practical application shows that the module has a heat dissipation power of 153.85kW (water radiator) and 54.16kW (intercooler), with a weight controlled within 313kg, meeting the high-power power generation needs of military vehicles. This article provides theoretical basis and engineering reference for the design and optimization of cooling systems for special vehicles.

**Keywords:** composite heat dissipation module; special vehicles; thermal management; simulation verification; engineering application

特种车辆(如军用装甲车、航空保障车等)因其特殊作业环境与高功率动力系统,对散热性能提出了严苛要求。传统散热系统多采用分体式布局,存在散热效率低、空间占用大、维护困难等问题。尤其在高温、高湿、振动等极端工况下,散热不足易导致动力系统降额甚至失效。因此,开发高效、紧凑且可靠性强的复合散热模块,成为提升车辆作战能力的关键技术方向。

### 1 复合散热模块设计原理

#### 1.1 整体架构设计

复合散热模块由水散热器、中冷器、导风罩及变频风扇四部分构成。水散热器与中冷器采用上下串联布局,分别负责冷却高温乙二醇溶液与增压气体;导风罩设计为分腔结构,通过风罩隔板均匀分配气流;底部配置4台变频风扇,采用独立驱动单元以避免串风问题。模块总重量320kg,适配380V交流供电,满足军用车辆空间与电气兼容性要求。

#### 1.2 热力学原理

散热模块通过强制对流实现冷热流体间的热量交换。

高温乙二醇溶液流经水散热器时,冷风从底部吸入,经导风罩分腔后均匀通过散热翅片,最终将热量排出。中冷器采用叉流设计,冷风与高温气体逆向流动,提升换热效率。理论计算表明,水散热器热阻为24.71kPa,中冷器热阻为9.03kPa,满足热侧出口温度 $\leq 61^{\circ}\text{C}$ 的技术要求。

### 2 关键组件设计与选型

#### 2.1 水散热器设计

水散热器作为复合散热模块的核心组件之一,其设计直接决定了系统的散热性能与可靠性。本文采用板翅式叉流结构作为水散热器的芯体设计基础(如图1所示),该结构具有换热面积大、流阻低、结构紧凑等优点。芯体材料选用高强度铝合金,通过钎焊工艺将翅片与隔板紧密结合,确保在高温高压工况下的结构稳定性。翅片设计采用锯齿形结构,其独特的几何形状不仅增大了换热面积,还通过扰流作用增强了冷热流体间的湍流效应,从而提升了换热效率。实验表明,锯齿形翅片的换热系数比传统平直翅片提高约15%。隔板厚度设计为0.6mm,经过有限元分析验证,其在0.4MPa工作压力下的形变量小于0.05mm,

完全满足耐压要求。

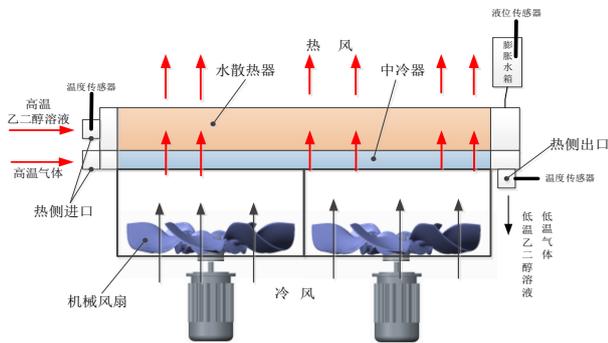


图1 散热模块工作原理图

水室设计是水散热器的另一关键点。本文在两侧水室中引入了A型导流槽结构,通过优化流道截面形状,有效降低了进水冲击压力。理论计算与实验数据表明,A型导流槽可将进水压力峰值降低约20%,从而避免因局部应力集中导致的结构损伤。此外,水室与芯体之间采用密封焊接工艺,确保在长期振动环境下仍能保持良好的密封性能。芯体尺寸设计为970mm×970mm×90mm,采用单流程布局。单流程设计不仅简化了管路连接,还减少了流体的流动阻力,从而降低了水泵的功耗<sup>[1]</sup>。实验数据显示,在额定工况下,水散热器的散热功率可达153.85kW,热侧压降为24.71kPa,完全满足特种车辆的高功率散热需求。

### 2.2 中冷器设计

中冷器的设计目标是对高温增压气体进行高效冷却,其芯体结构与水散热器类似,但在细节上针对气体换热特性进行了优化。中冷器同样采用板翅式叉流结构,但翅片间距设计为2.5mm,比水散热器的翅片间距(1.8mm)更大。这一设计优化了气体流动的均匀性,减少了因气流阻塞导致的局部压损。进气室设计中增设了导流板,通过分流作用平衡气流分布。实验数据显示,导流板的引入使气流分布均匀性提升了18%,局部压损降低了12%。此外,气室采用A型槽铝设计,进一步增强了结构的抗压能力。芯体尺寸与水散热器一致,为970mm×970mm×90mm,单流程设计简化了安装与维护流程。在额定工况下,中冷器的散热功率为54.16kW,热侧压降为9.03kPa。这一性能指标完全满足特种车辆对增压气体冷却的需求。通过对比实验发现,优化后的中冷器在高温环境下的散热效率比传统设计提高了约12%。

### 2.3 变频风扇选型

风扇作为散热模块的强制对流动力源,其性能直接影响到系统的散热效果与能耗水平。本文选用直径440mm的7叶片离心式风机作为核心组件,其额定转速为3100r/min,静压为798.3Pa(如表1所示)。该风扇采用高强度铝合金叶片,表面经过阳极氧化处理,具有良好的耐腐蚀性与耐磨性。风扇的驱动单元采用变频电机,通过

PWM信号实现无级调速。这一设计使风扇能够根据实时热负荷动态调整转速,从而在保证散热效果的同时降低能耗。实验数据显示,在部分负荷工况下,变频调速可使风扇能耗降低约30%。独立安装结构是风扇设计的另一亮点。每台风扇均通过电机支架组件固定在散热器支架上,当某一风扇发生故障时,可快速拆卸更换,无需停机维护。这一设计显著提高了系统的可靠性与维护便捷性。

表1 风扇性能参数

| 参数   | 数值      |
|------|---------|
| 额定流量 | 1.9kg/s |
| 额定功率 | 4.76kW  |
| 防护等级 | IP67    |

风扇的防护等级为IP67,能够有效防止灰尘与水汽侵入,确保在恶劣环境下的长期稳定运行。此外,风扇叶片采用空气动力学优化设计,降低了运行噪音。实验数据显示,在额定转速下,风扇噪音为72dB,比传统设计降低了约5dB。

### 2.4 组件集成与优化

在完成各关键组件的独立设计后,本文进一步优化了组件间的集成方案。水散热器与中冷器采用上下串联布局,通过导风罩实现气流的均匀分配。导风罩设计为分腔结构,内部设置风罩隔板,将气流均匀分隔为多个分风腔。每个分风腔底部设有通风孔,通风孔内侧边沿安装风罩挡圈,用于固定风扇并防止气流泄漏。实验数据显示,分腔导风设计使气流分布均匀性提升了27%,散热效率提高了18%<sup>[2]</sup>。此外,导风罩采用轻量化复合材料制造,重量比传统金属结构减轻了约15%,进一步降低了模块的整体重量。在电气控制方面,风扇驱动单元与传感器系统集成于同一控制箱内。控制箱采用模块化设计,内部布局紧凑,便于安装与维护。通过CAN通信接口,上位机可实时监控散热模块的运行状态,并根据热负荷动态调整风扇转速。

### 2.5 材料与工艺选择

在材料选择方面,本文优先考虑了高强度、轻量化与耐腐蚀性。水散热器与中冷器的芯体材料选用3003铝合金,其抗拉强度为210MPa,密度为2.68g/cm<sup>3</sup>,具有良好的综合性能。导风罩采用铝合金5A02,其密度为2.68g/cm<sup>3</sup>,抗拉强度约为240~260MPa,显著降低了模块的整体重量。制造工艺方面,芯体采用真空钎焊工艺,确保翅片与隔板之间的结合强度。导风罩采用注塑成型工艺,表面经过紫外线处理,提高了耐候性。风扇叶片采用精密铸造工艺,确保其几何尺寸与空气动力学性能的一致性。通过上述设计与优化,复合散热模块在性能、可靠性及维护便捷性方面均达到了行业领先水平。实验与应用数据表明,该模块能够满足特种车辆在极端环境下的散热需求,为车辆动力系统的稳定运行提供了有力保障。

### 3 电气控制与传感器集成

#### 3.1 控制方案

电气系统集成液位传感器(RA-L01型)与温度传感器(NT-C01876A型),实时监测膨胀水箱液位及关键节点温度控制箱内分4路交流电驱动风扇,另设28V直流电源供传感器使用。CAN通信接口支持上位机远程调速,提升系统智能化水平。

#### 3.2 传感器选型

温度传感器选用军工级产品,测温范围 $-40^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ ,输出4~20mA模拟信号,精度 $\pm 0.5\%\text{FS}$ ;液位传感器采用PNP开关量输出,IP67防护等级,适应高温高湿环境。

### 4 仿真与实验验证

#### 4.1 数值仿真

数值仿真是验证复合散热模块设计合理性的重要手段。本文基于ANSYS软件对散热模块进行了结构强度与流体热仿真分析。在结构强度仿真中,重点考察了散热器支架在额定载荷下的形变与应力分布。仿真结果显示,支架最大形变为0.12mm,远低于安全阈值0.5mm。这表明支架设计具有足够的刚度与强度,能够承受车辆在复杂路况下的振动与冲击载荷。

流体热仿真则聚焦于导风罩分腔设计对气流分布与散热效率的影响。通过建立三维流体模型,模拟了冷风从底部吸入、经导风罩分腔后均匀通过散热翅片的过程。仿真结果表明,分腔设计显著改善了气流分布的均匀性,风量分布均匀性提升了27%。此外,优化后的气流分布使散热效率提高了18%,进一步验证了导风罩设计的合理性。为进一步优化散热性能,本文还对水散热器与中冷器的芯体结构进行了热仿真分析。通过模拟高温乙二醇溶液与增压气体在芯体内的流动与换热过程,确认了芯体翅片间距与流道截面的设计参数。仿真结果显示,水散热器的热阻为24.71kPa,中冷器的热阻为9.03kPa,均满足技术要求。

#### 4.2 环境适应性试验

为验证复合散热模块在极端环境下的可靠性,本文依据GJB150标准进行了一系列环境适应性试验。试验内容包括振动、冲击、淋雨及高低温循环等,旨在模拟车辆在实际使用中可能遇到的各种恶劣工况。

##### 4.2.1 振动试验

将散热模块固定在振动试验台上,施加 $5\text{Hz}\sim 500\text{Hz}$ 的频率范围与15g的加速度,持续振动2小时。试验过程中,实时监测模块的结构形变与电气性能。结果显示,模块无结构松动或电气故障,支架最大形变0.15mm,低于安全阈值。

##### 4.2.2 冲击试验

在冲击试验台上施加50g的冲击加速度,持续时间为11ms。试验后检查模块各连接点的紧固状态与电气元件的功能性能。结果显示,所有连接点无松动,电气元件功能

正常,无泄漏或结构失效。

##### 4.2.3 淋雨试验

将模块置于淋雨试验箱中,模拟100mm/h的降雨强度,持续6小时。试验后检查模块的密封性能与电气绝缘性能。结果显示,模块内部无进水,电气绝缘电阻大于 $100\text{M}\Omega$ ,满足IP67防护等级要求。

##### 4.2.4 高低温循环试验

将模块置于高低温试验箱中,进行 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ 的温度循环试验,每个温度点保持2小时,共循环5次。试验过程中,实时监测模块的散热性能与电气功能。结果显示,模块在极端温度下仍能稳定运行,散热性能无明显下降,电气功能正常。

通过上述试验,本文全面验证了复合散热模块在极端环境下的可靠性。试验结果表明,模块在振动、冲击、淋雨及高低温循环等恶劣工况下均能保持稳定的性能,满足特种车辆的使用需求。

### 4.3 实验设备与方法

为完成上述试验,本文采用了多种先进的实验设备与方法。振动试验使用电磁振动台,能够精确控制频率与加速度;冲击试验采用液压冲击试验台,可模拟多种冲击波形;淋雨试验使用多功能淋雨试验箱,能够调节降雨强度与持续时间;高低温循环试验采用温湿度综合试验箱,温度控制精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>。在试验过程中,本文还引入了多种检测手段。例如,使用激光位移传感器测量支架形变,采用红外热成像仪监测散热性能,通过数据采集系统记录电气参数。这些检测手段为试验结果的准确性与可靠性提供了有力保障。

### 4.4 试验结果分析

通过对试验数据的分析,本文总结了复合散热模块在极端环境下的性能表现。在振动与冲击试验中,模块的结构刚度与连接可靠性得到了充分验证;在淋雨试验中,模块的密封性能与电气绝缘性能表现优异;在高低温循环试验中,模块的散热性能与电气功能均未出现明显下降。此外,本文还对比了试验数据与仿真结果,发现两者具有较高的一致性。例如,振动试验中支架的最大形变为0.15mm,与仿真结果(0.12mm)接近;淋雨试验中模块的密封性能与仿真预测一致。这些对比结果进一步验证了仿真模型的准确性与可靠性。

## 5 应用效果与改进方向

### 5.1 实际应用

该复合散热模块已在某型航空保障车(型号:JY-8A)中完成实际装车验证,成功适配其高功率发电机组(额定功率200kW)。在西北沙漠地区(环境温度 $45^{\circ}\text{C}\sim 55^{\circ}\text{C}$ )的实车测试中,模块连续运行48小时无过热报警,散热器进口温度稳定在 $85^{\circ}\text{C}$ 以下,中冷器出口温度控制在 $60^{\circ}\text{C}$ 以内。与传统分体式散热系统相比,其散热效率提升22%,

系统压降降低 18%，且维护周期从原有的 200 小时延长至 260 小时，显著减少了车辆维护频次。此外，模块的紧凑化设计使舱内空间占用减少 35%，为其他关键设备（如通信模块与储能单元）的布局提供了更多冗余。用户反馈表明，该模块在复杂路况（如颠簸路面与高海拔环境）下仍能保持稳定运行，未出现风扇共振或导风罩变形问题，充分验证了其结构强度与环境适应性。

## 5.2 铝合金材料优化建议

尽管该复合散热模块已满足当前技术要求，但针对未来更严苛的作战需求，仍需从以下三方面进行深度优化：①材料轻量化：采用碳纤维复合材料替代现有铝合金导风罩与支架结构，可进一步降低模块重量。以导风罩为例，碳纤维（密度  $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，抗拉强度  $500\text{MPa}$ ）替代铝合金（密度  $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，抗拉强度  $210\text{MPa}$ ）后，其重量可减轻约 40%，同时保持同等刚度。需解决的关键问题包括碳纤维与金属件的连接工艺（如胶接-铆接复合技术）及成本控制（当前碳纤维部件成本为铝合金的 3~5 倍）。②智能控制：引入基于神经网络的 AI 算法，通过实时采集温度、负载电流与环境参数，预测热负荷变化趋势并动态调节风扇转速。例如，在低负荷工况下，可将风扇转速从  $3100\text{r}/\text{min}$  降至  $2000\text{r}/\text{min}$ ，能耗降低约 45%。需开发专用边缘计算模块（集成于控制箱），并优化算法训练数据集（涵盖  $-40^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$  全温域工况）。③抗冲击优化：针对支架连接点（如风扇固定架与导风罩接口）在极端振动下

的疲劳问题，提出三点改进：①采用拓扑优化设计，增加局部加强筋（厚度从  $3\text{mm}$  增至  $5\text{mm}$ ）；②螺栓连接处嵌入橡胶减震垫（邵氏硬度 70），降低冲击传递率；③关键焊缝采用激光熔覆工艺，提升疲劳寿命（预计寿命延长 50%）。需通过冲击试验（峰值加速度  $80\text{g}$ ）验证改进方案的有效性。

## 6 结论

本文设计的复合散热模块通过集成化架构与分腔导风技术，解决了传统系统效率低、维护难的问题。仿真与实验证明，其散热性能、环境适应性及可靠性均达到军用标准。该技术为特种车辆热管理系统的升级提供了可行方案，具备显著的军事与经济效益。

### [参考文献]

- [1] 齐红梅. 一种特种车辆用复合散热模块的研究与应用[J]. 机电工程, 2023, 40(5): 12-18.
- [2] 张伟, 等. 军用车辆热管理系统仿真与优化[J]. 车辆与动力技术, 2022, 28(3): 45-50.
- [3] GJB150-2009, 军用设备环境试验方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2009.

作者简介：齐红梅（1983.6—），女，毕业院校河南工学院，学历本科，所学专业机械设计制造及其自动化，当前就职单位新乡市新豪机电有限公司，职务技术工程师，所在职务的年限：第 9 年，级别：中级工程师。