

采用无轴泵推技术的动力型热管研究

白改艳, 张晓林*

北京化工大学, 北京 100029

DOI:10.61369/ME.2026050018

摘 要 : 热管是一种具有高热性能的传热元件, 它通过在全封闭真空管壳内工质的蒸发与凝结来传递热量, 具有极高的导热性、良好的等温性、冷热两侧的传热面积可任意改变、可远距离传热、可控制温度等一系列优点。但是常规热管没有外加动力以及一些热管形状复杂, 冷凝回流比较慢、散热率较低, 同时有可能因回流不及时导致热管损坏的问题。

为解决传统热管的技术短板, 本文创新性地将无轴泵推技术与传统热管结构相结合, 研发新型动力型热管系统。本文通过梳理热管与无轴泵推技术的研究现状, 阐述新型动力型热管的结构组成与工作原理, 开展换热性能、驱动能耗的理论计算与性能分析, 论证技术融合的可行性与优越性, 并结合工业实际场景分析其应用价值与推广前景。研究结果表明, 无轴泵推动力型热管可显著提升热管等效对流换热系数, 以极低的电能消耗实现高效散热, 有效降低热管故障损坏率, 延长设备使用寿命与替换周期, 契合节能减排的行业发展需求, 为新型高效散热设备的研发与应用提供了全新的技术思路。

关 键 词 : 无轴泵驱动; 动力型热管; 传热性能

Research on Power-Type Heat Pipes Utilizing Axleless Pumping Technology

Bai Gaiyan, Zhang Xiaolin*

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029

Abstract : A heat pipe is a thermal transfer device with exceptional thermal conductivity that transfers heat through the evaporation and condensation of a working fluid within a fully sealed vacuum tube. It offers numerous advantages, including high thermal conductivity, good isothermal performance, adjustable heat transfer areas on both hot and cold sides, long-distance heat transfer capability, and temperature control. However, conventional heat pipes require external power sources; some have complex geometries, experience slow condensation reflux rates and low heat dissipation efficiency, and may suffer damage due to delayed reflux.

To address the technical limitations of conventional heat pipes, this study innovatively integrates shaftless pump propulsion technology with traditional heat pipe structures to develop a novel power-driven heat pipe system. By reviewing current research on heat pipes and shaftless pump propulsion, the paper elucidates the structural composition and operating principles of this advanced system, conducts theoretical calculations and performance analyses of heat transfer efficiency and drive energy consumption, demonstrates the feasibility and advantages of this technological integration, and evaluates its practical applications and market potential in industrial contexts. The findings indicate that the shaftless pump-driven heat pipe significantly enhances the equivalent convective heat transfer coefficient, achieves high-efficiency heat dissipation with minimal electrical energy consumption, substantially reduces equipment failure rates, extends service life and replacement intervals, aligns with industry demands for energy conservation and emission reduction, and provides a groundbreaking technical approach for developing next-generation high-performance cooling solutions.

Keywords : shaftless pump drive; power-type heat pipe; heat transfer performance

一、研究背景

随着碳达峰、碳中和目标的倡导与落实, 各种节能减排的方法与设计层出不穷, 为了响应国家的号召, 我们团队旨在追求高效、节能与环保, 想到了将动力热管与无轴泵推技术的结合。热

管具有导热性能高、轻便化、小型化的优点, 凭借高传热效率、高稳定性、长寿命和低成本等优势已经成为解决散热难题的主要方案^[1]。无轴推进装置随着综合电力技术的发展应运而生, 它以模块化、集成化为技术思想, 构造了新一代高性能电力推进装置, 在进一步实现电力推进的高功率密度、高效率、低噪声和高

通讯作者: 张晓林。

机动性能等方面,将发挥重要作用,并逐步成为舰船电力^[5]。推进装置重要的发展方向。无轴泵推是无轴推进的一种结构形式,理论上可以兼有无轴结构和泵喷水动力优势,它将推进电机集成于泵喷推进器导管中,取消了推进轴系及其辅件,并将电机转子与推进器桨叶融合为一体,通过电机转子旋转直接驱动桨叶做功。热管循环与制冷循环均通过制冷剂相变传热,在蒸发器中沸腾汽化,在冷凝器中冷凝液化,在传热方式上具有相似性。因此,我们团队提出了无轴泵推动力型热管,把驱动部件完全封闭在热管中,让外部的磁场的变化来驱动内部转动部件的工作的想法,以提高散热性能。

二、研究现状

(一) 热管的研究现状

常规热管如图1所示,一般没有动力驱动,靠重力或这毛细力实现蒸发段和冷凝段工质的流动。

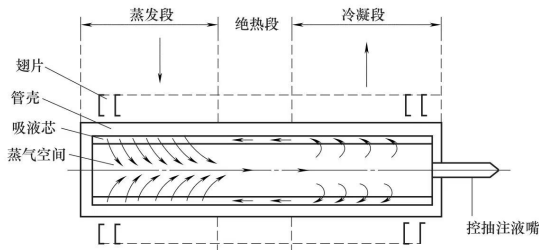


图1 常规热管基本原理示意图

目前已出现了泵驱动的热管系统、旋转离心力驱动的热管系统、电流体驱动的热管系统及磁流体驱动的热管系统。由于电流体驱动和磁流体驱动的热管系统的动力有限,旋转离心力驱动的热管系统仅适用于电机等特定的设备中。而由于泵驱动热管系统具有显著节能效果及其普遍适用性,成为近年来学术界的研究热点,并已经应用于空调、干燥、航天等领域^[2]。

考虑工作稳定性、结构灵活性、技术进步性等问题,团队提出的动力型热管与无轴泵推技术联合优于普通热管热泵联合技术,且节能和工作效率会更高,应用前景也很广阔^[4]。

(二) 无轴泵推技术研究现状

在2003年,美军将无轴泵搬上弗吉尼亚级核潜艇作为辅助螺旋桨,此后无轴泵推技术发展缓慢。2017年,我国工程院院士马伟明及其团队研制出“世界上第一个领先项目”——“潜艇无轴泵喷推进器”,而且,这项技术目前已经投入应用当中,在技术上与美国齐平甚至领先。无轴泵喷推进器没有了主轴,从根本上消除了驱动轴运转带来的各种噪音,其核心技术优势在于将电机无轴推进技术与泵喷低噪、高临界航速的突出优势结合起来,既能发挥泵喷本身的声学性能优势,又能消除轴系噪声。目前,无轴泵喷推进器仍然是最尖端的前沿技术之一^[3]。

而我国目前已研制出更先进的直流无轴泵,其工作原理是中间的轴不动,两边的磁铁旋转,如果磁铁固定在一个圆周轨道上,磁铁就在做圆周运动了,而此时取消中间的轴定子,并把电

供给固定的轨道,一直保持N级和S级的变化,并把磁铁换成磁性叶片,叶片会一直转动。直流无轴泵推相比于交流无轴泵推的优势是调速范围大,可以无级平滑调速;起动转矩较大,能适应频繁起动的场合,作为潜艇的动力源其实非常不错,但是缺陷是设备系统复杂,价格较贵^[5]。

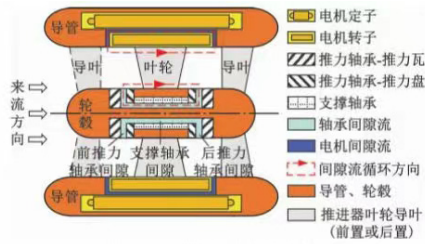


图2 无轴泵推原理示意图

三、研究内容

(一) 主要部件及工作原理

主要部件:热管及无轴泵

原理:无轴泵推动力型热管工作原理示意图如图3所示:将无轴泵安装在热管中,通过无轴泵的转动为热流提供能量,抵抗压损,提高流速,进而大幅提高热管的换热系数。依托外置磁场控制系统驱动管内无轴泵运转,为热管工质的循环流动提供主动驱动力。设备运行时,热管蒸发段吸收外部余热,管内液态工质受热汽化,气态工质携带热量快速向冷凝段流动;无轴泵推装置通电工作,通过桨叶旋转推动管内流体定向流动,有效克服工质循环过程中的沿程阻力、局部压损,大幅提升气态工质的输送速率与液态工质的冷凝回流速率;气态工质在冷凝段完成放热液化后,在无轴泵动力与重力、毛细力的协同作用下,快速回流至蒸发段,持续高效完成相变传热循环。相较于传统热管被动式循环模式,主动动力驱动可彻底解决工质回流滞后、循环动力不足的问题,显著提升热管整体换热效率与运行稳定性。

同时,该结构采用“外置磁场驱动、内部无机械接触”的工作模式,无轴泵运转过程中无机械摩擦、无轴系振动,运行噪音极低,且驱动部件完全封闭于热管内部,无需外部维护,有效避免了传统泵驱动热管部件外露、易损耗、易积尘的问题,大幅提升设备使用寿命。此外,无轴泵可通过电控系统实现转速精准调节,能够根据设备热负荷大小动态调整工质循环速率,实现散热功率的精准匹配,兼顾散热效果与节能效益。

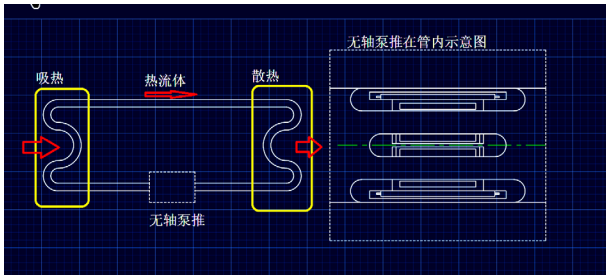


图3 无轴泵推动力型热管示意图

（二）性能计算与分析

（1）热管的换热性能

根据公式^[10]：

$$\alpha_{eq} = \frac{2\lambda L_h L_c Q}{d_i L [2\pi\lambda(T_{ho} - T_{co})L_h L_c - Q(L_h + L_c)\ln(d_o/d_i)]}$$

由于分母中第二项大于0，忽略第二项，当热流Q增加一倍，换热系数也会增加一倍，所以实际上通过的热流Q增加一倍，热管的等效对流换热系数增加量大于一倍，而在热管中加入无轴泵，可以为管内流体提供动力，提高热管的对流换热系数。

通过理论公式推导可知，在换热面积、工质物性参数不变的前提下，热管热流密度与等效对流换热系数呈正相关关系。当热流密度翻倍时，自然循环状态下的热管换热系数提升幅度不足一倍，且热流密度越大，循环动力不足的弊端越明显，换热效率衰减越严重。而内置无轴泵推装置后，可主动提升管内工质的流动速度，有效降低流体流动阻力与传热热阻，加速相变传热过程。在无轴泵的动力驱动下，管内工质流速可随泵体转速精准调控，热流密度提升时，通过增大泵体转速即可同步提升工质循环速率，使热管等效对流换热系数的增长幅度远超热流密度增长幅度。理论计算表明，相较于传统无源热管，无轴泵推动力型热管在同等工况下，等效对流换热系数可提升50%以上，高热流密度工况下提升效果更为显著，彻底解决了传统热管高温工况散热乏力的问题。

（2）驱动能耗

节能性是本文研究的核心优势之一，无轴泵推装置的低能耗特性是实现热管节能减排的关键。与传统有轴泵体相比，无轴泵推取消了机械传动结构，无摩擦能耗、无轴系损耗，能量利用率大幅提升。同时，热管内部为密闭狭小空间，填充的相变工质体积小、流动阻力低，驱动工质循环所需的动力极小，因此无轴泵运行所需电能极低。

为精准验证节能效果，本文开展能耗理论测算：假设电磁转换过程中存在50%的能量损耗，无轴泵持续工作的总电能消耗仍处于极低水平。相较于热管换热效率的大幅提升幅度，其能耗增量可忽略不计。传统泵驱热管因机械摩擦、轴系损耗存在大量无效能耗，节能性价比极低，而无轴泵推动力型热管以微小电能消耗为代价，实现换热效率的大幅提升，同时减少热管故障损耗与设备维护成本，综合节能效益显著，完美契合工业节能减排的发展要求。

四、可行性分析与应用

我们在原有热管上做出的突破是将无轴泵推技术和热管结合起来，提高了热管换热效率，降低了热管损坏率，一定程度上延长了热管使用寿命和替换周期，实现了节能减排的目的。

（一）技术可行性分析

①无轴泵推技术成熟度充足

我国无轴泵推技术目前已经得到了实际应用。无轴泵喷推进器没有了主轴，从根本上消除了驱动轴运转带来的各种噪音，其核心技术优势在于将电机无轴推进技术与泵喷低噪、高临界航速的突出优势结合起来，既能发挥泵喷本身的声学性能优势，又能消除轴系噪声。团队提出的动力型热管与无轴泵推技术联合优于普通热管热泵联合技术，且节能和工作效率更高。

②将无轴泵推安装在热管之中的合理性

我们采用将热管在无轴泵推阶段外凸的方法，这个方法解决了无轴泵推安装在热管内受其内径限制的缺陷。其原理相当于在热管内安装一个电机装置，只不过将热管当作是定子，而将转子安装在热管之内，代替了原本热管的位置，此处运用的原理可以用电机的原理知识来解释，因此，团队提出的动力型热管与无轴泵推技术联合有一定的技术基础，且根据二者的内部结构及其尺寸大小将二者联合的可行性完全成立。

（二）应用

动力性热管和热泵技术结合可以减少一次能源使用，实现高效节能，例如：光伏——太阳能热管/热泵复合系统、分离式热管与热泵技术等，目前均已得到实践和应用^{[8][9]}。无轴泵推动力型热管的具体数据及实物模型团队将在之后进行研究和提供。下面是团队提供的两个无轴泵推动力型热管的应用场景。

①化工异形热管散热场景

在化工、轻工、医药等工业生产领域，蛇形热管换热器是热量交换、物料冷却的核心设备，被广泛应用于化工反应釜散热、物料提纯冷却、生产线余热回收等环节。蛇形热管因管道弯曲、走向复杂、管路跨度大，传统无源热管依靠自然循环无法保证管内工质流动的稳定性，弯曲管路易出现工质堆积、回流停滞、热量堆积等问题，散热效率波动较大，难以满足化工生产高精度、高稳定性的散热需求，工况适配性极差。

②工业循环冷却水防垢延寿场景

工业冷却水循环系统是工业生产的重要配套设施，热管作为冷却水换热的核心部件，长期运行过程中，水中的矿物质、杂质会逐渐析出形成水垢。传统热管管内工质流动速率低、流动性差，水垢极易附着于管壁并持续堆积，长期积累会导致热管管径缩小、换热热阻增大、散热效率骤降，严重时会造成管道堵塞、热管破损失效。工业热管大多集成于生产线内部，拆装更换难度大、维护成本高、停机损失严重，设备长效稳定运行至关重要。

③新能源与精密电子散热场景

随着新能源光伏、储能、精密电子产业的快速发展，高功率、集成化设备的热流密度持续提升，对散热系统的小型化、低噪化、高效化、节能化要求严苛。传统散热设备体积大、噪音高、能耗高，无法适配精密设备运行需求。无轴泵推动力型热管结构紧凑、无机械噪音、能耗极低、散热效率高，可完美适配光伏太阳能复合换热系统、储能电池散热、精密电子器件冷却等场

景，能够在稳定散热的同时，降低系统能耗，助力新能源产业绿色低碳发展。

五、结论与展望

本文通过梳理热管技术与无轴泵推技术的研究现状，结合两类技术的原理契合性与结构互补性，开展无轴泵推动力型热管的技术研究、理论分析与可行性论证，得出以下核心结论：第一，无轴泵推技术与热管结构的深度融合，可彻底突破传统无源热管被动循环的技术瓶颈，通过主动动力驱动加速工质相变循环，大幅提升热管等效对流换热系数，显著提升设备散热性能，有效解决复杂工况下热管散热效率低、运行不稳定的问题；第二，无轴

泵推装置能耗极低，在大幅提升换热性能的同时，仅消耗微量电能，综合节能效益显著，契合双碳战略下工业节能减排的发展需求；第三，新型动力型热管无机械磨损、运行噪音低、抗结垢能力强，可有效降低热管故障损坏率，延长设备使用寿命与替换周期，大幅降低工业设备运维成本；第四，该技术适配性极强，可广泛应用于化工工业、新能源、精密电子、余热回收等多个领域，应用场景广阔，具备极高的工程应用价值与市场推广潜力。

当然，这种技术还有待优化，比如无轴泵推转速的匹配、热管的尺寸大小和材质选择及设计等等，都需要我们在后续的实验中进行提高与优化。

参考文献

- [1]王飞,邵双全,张海南.数据中心冷却用动力型热管的实验研究[J].制冷学报,2020,41(04):89-96.
- [2]张洪旺.动力型热管热泵联合节能技术的研究现状与应用进展[J].科技创新与应用,2018(2):191-192
- [3]王群.无轴泵喷推进器——下一代核潜艇[J].中国国防报,2017-07-21.
- [4]张龙灿.光伏-太阳能环形热管/热泵复合系统的实验研究[D].安徽:中国科学技术大学,2014.
- [5]何升阳,周枫.无轴泵喷推进器水润滑轴承间隙流水动力设计与试验[J].中国机械工程,2022,33(04):406-412.
- [6]孟凡凯,陈赵军,徐辰欣,江帆,谢志辉.基于热管散热的热电制冷器性能综合分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(10):104-113.
- [7]汤勇,孙亚隆,唐恒,万珍平,袁伟.柔性热管的研究现状与发展趋势[J/OL].机械工程学报:1-15[2022-05-02].
- [8]康延滨.太阳能重力热管性能及其关键技术研究[D].齐鲁工业大学,2013.
- [9]王海涛,丁怀况,胡宁,郭二宝.太阳能重力热管传热性能的分析[J].低温与超导,2013,(04):79-8.
- [10]闫小克,唐志伟,俞昌明.热管传热性能的评价方法及其测试装置[J].计量学报,2003(第二期):114.