

基于半导体制冷在变频器快速散热中的应用研究

赵怀飞

兰州城市供水（集团）有限公司，甘肃 兰州 730000

[摘要]在城市供水系统中，变频器的稳定运行至关重要。本研究以第三水厂碧桂园加压站为案例，指出其低压控制室内变频器因散热不畅，IGBT 温度高达 95℃，导致频繁过热跳闸，并引发连锁性供水事故。现有开柜门强制通风等降温措施存在重大安全风险且治标不治本。研究通过红外测温定位了问题的核心在于内部热传导效率低下。为此，本文创新性地提出了一种基于半导体制冷（热电制冷）原理的嵌入式散热方法。阐述了该技术基于珀尔帖效应的基本原理与结构特点，论证了其通过直流电直接、快速地将 IGBT 热量“泵送”至外部散热片的可行性。该方案能够从源头突破散热瓶颈，有望彻底解决变频器高温跳车问题，同时消除了开放式散热带来的安全隐患，对提升供水系统的可靠性与安全性具有显著的工程应用价值。

[关键词]变频器散热；半导体制冷；珀尔帖效应；IGBT；供水安全

DOI: 10.33142/ect.v3i9.17861

中图分类号: TM315

文献标识码: A

Research on the Application of Semiconductor Refrigeration in Fast Heat Dissipation of Inverter

ZHAO Huaifei

Lanzhou City Water Supply Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730000, China

Abstract: The stable operation of frequency converters is crucial in urban water supply systems. This study takes the Country Garden booster station of the Third Water Plant as a case study, and points out that the frequency converter in the low-voltage control room has frequent overheating trips due to poor heat dissipation, with IGBT temperatures reaching up to 95 °C, which has caused a chain of water supply accidents. The existing cooling measures such as forced ventilation through cabinet doors pose significant safety risks and only treat the symptoms without addressing the root cause. The core of the problem identified through infrared temperature measurement is the low internal heat conduction efficiency. Therefore, this article innovatively proposes an embedded heat dissipation method based on the principle of semiconductor refrigeration (thermoelectric refrigeration). The basic principle and structural characteristics of this technology based on the Peltier effect were explained, and the feasibility of directly and quickly "pumping" IGBT heat to external heat sinks through direct current was demonstrated. This solution can break through the bottleneck of heat dissipation from the source, and is expected to completely solve the problem of high-temperature tripping of frequency converters. At the same time, it eliminates the safety hazards caused by open heat dissipation and has significant engineering application value for improving the reliability and safety of water supply systems.

Keywords: inverter heat dissipation; semiconductor refrigeration; Peltier effect; IGBT; water supply safety

1 工程背景

第三水厂碧桂园新一级加压站，现有三台变频控制柜以及一台控制系统柜，安装于 10m² 的低压控制室内。日供水量为 5427m³，三台泵组正常情况下一用两备，根据泵组运行小时数自动切换运行。

碧桂园新一级加压站低压控制室建筑结构比较紧凑，墙体无保温层，随着外部环境温度的升高以及变频器运行自身产生的热量，低压控制室内温度往往高于环境温度，控制室温度过高进而导致变频器内部温度过高跳车，连锁导致碧桂园二级泵站运行泵组跳车，影响整个碧桂园片区用水需求。

根据以往控制室降温措施，在控制室内部安装空调或者用风扇对着变频器直吹进行降温，在实际过程中，如果环境温度过高时，为保证变频器正常运行，在变频器运行过程中将变频柜柜门打开，用风扇直吹或者通过空调降低

控制室温度从而达到降低变频器内部温度的目的。这样做有一个显著的缺点，在变频器运行过程中，变频柜柜门长期无法关闭，首先对值班人员的操作及巡检存在很大的安全隐患，其次柜门长期打开，容易造成一些小动物闯入，对设备的安全稳定运行产生很大的隐患，最后柜门长期打开，运行中的变频器容易吸入更多的灰尘及水汽，对变频器的使用寿命产生影响。

通过对正在运行中的变频柜内各区域红外温度采集，在变频柜底部温度为 29℃，顶部温度为 57℃，变频器散热片温度为 36℃，届时室外温度为 28℃。变频器 IGBT 温度为 95℃，工作频率为 46Hz。目前在变频器底部加装了轴流风机，同时在换气扇底部安装导气管，利用电缆沟将导气管延伸至泵房内部，从泵房内部抽取冷风，定向对运行中的变频器进行冷却。根据以上工况和测温结果分析，变频器出现高温下工作的主要原因是 IGBT 工作产生的

温度没有快速的被导出到散热片中,就算外部散热环境好,变频器依然工作的高温下。

2 研究的必要性

近年随着变频泵组的逐年增多,变频器是泵组运行的重要组成部分,变频器的日常运行管理直接影响城市安全供水,通过对变频器的运行监测,变频器跳车最主要的原因是为变频器内部温度高跳闸。为解决此项问题,各级管理人员采取了许多措施,如在控制室内安装空调或者换气扇降低控制温度以此达到对变频器降温的目的;在控制室内安装风扇直吹变频器对变频器降温,但效果不是很好,同时增加了一些安全隐患及维护管理成本。

对此本项目提出一种基于半导体制冷的技术,将变频器 IGBT 温度快速导入散热片的方法,解决变频器内部工作温度过高的散热问题。

3 半导体制冷的基本原理

3.1 皮尔特效应的介绍

皮尔特效应应为半导体制冷技术的核心物理机制,依托热电效应之中的一种类的独特现象。该效应经由法国物理学家皮尔在 1834 年发现,当下不同材料间的电流穿过接点之际,将伴随着热的吸收或者释放。于含有不同电子浓度的导电材料接触地点,电流的流动引发载流子迁移,因而促成热量的流失或聚集。该效应的方向取决电流的极性和使用材料的性质。在实际应用中,皮尔特效应必须以精密的材料选型与结构设计达成高性能的热交换。

运用 n 型半导体和 p 型半导体的匹配能研发出热电冷却器,其中轮换布局的两种半导体借助导热基板联接构成一定的电路结构,并运用电流的流动达成制冷功能。相较于传统制冷方式,皮尔特效应的特点涵盖无运动部件、运作安静、体积小和兼容性强。皮尔特效应应为电子器件的局部散热给予了理论支持,令制冷模块可以高效地吸纳过剩热量并借助设计的热路径实施排除,对现代电子器件的微型化和高效操作发挥重要推动作用。

3.2 半导体材料和半导体制冷的工作机制

半导体制冷技术的实现完全依靠选用的半导体材料以及背后独特的工作原理。半导体材料通常包括一些热电性能非常好的元素,比如常见的铋元素、碲元素,还有经过掺杂处理的化合物,这些材料的特点是塞贝克系数很大,同时导热系数很小。皮尔特效应的作用下,半导体材料通过载流子的流动来传递能量,这样就能吸收周围的热量或者释放出热量。电流流经不同类型的半导体连接点时,电子能量的重新分配会导致一个连接点吸收热量,另一个连接点释放热量,这样就形成了明显的温度差异。合理设计电路和材料搭配,就能把热量的流动引导到明确的方向,实现精准的制冷或者加热功能。这样的控制方式让半导体制冷片能够应对各种复杂的热量管理需求,尤其是在小型化和高效率的散热应用场景中表现出非常明显的优势,特

别适合用在体积小巧的设备上。

4 半导体制冷在电子器件散热中的应用

4.1 设计与效率优化

半导体制冷的方案设计和效率提高是优化散热效果的关键环节。凭借科学合理的结构设计,能够显著加强半导体制冷片的热量传递能力。设计方案的时候,需要仔细挑选适合的半导体材料,比如有一种名叫碲化化合物的材料,这种材料拥有极为出色的热电转换功能,热电性能也非常优异。半导体制冷片接触面热阻的优化显得尤为重要,降低接触面的热阻,就能让热量交换变得顺畅,从而有效提高整个制冷系统的运行效率。

制冷效率变得更理想,还必须重视电流密度和温度差之间的匹配调节。设计整个系统的时候,优化驱动电流和电路的连接方式,就能充分利用热电效应,防止电流设置过高造成耗能增加或者制冷效果降低的不良情况发生,确保系统运行稳定顺畅。

热电元件的尺寸和几何结构会决定制冷效率的高低,提升散热时的准确程度和应用领域的广泛性。实际使用的过程中,针对热源的具体位置以及散热的具体要求进行详细研究,设计出能够满足个性化需求的制冷片方案,从而提升散热效能,达到更好的冷却效果。定制设计的方案结合了新型封装技术,不仅能够增强系统运行时的可靠性能,还能减少热管理系统消耗的能源,节省更多资源,确保高效散热应用获得不可或缺的技术支持,助力相关设备运行更加顺畅,避免因过热导致的故障问题。

4.2 实际应用案例分析

半导体制冷技术用在电子器件散热领域,已经收获了很明显的成果。针对中央处理器散热困难的情况,可以把半导体制冷片直接贴在处理器表面,快速吸纳处理器工作时产生的热量,然后迅速完成热量传导的工作。这样就能让处理器一直运行得很平稳,不会出现过热的情况,还能有效增加处理器的使用寿命,避免因为高温而损坏设备。针对 LED 灯具散热方面的难题,半导体制冷片发挥了很大作用,帮助处理了高热密度造成的光效降低和寿命变短的问题,明显提升了 LED 光源的可靠性能,减少了故障发生的可能性。针对光通信设备需要控制温度的要求,半导体制冷片可以准确调控设备的温度高低,有效减少光学元器件因温度上升而导致的性能不平稳情况,确保信号传输过程一直保持流畅平稳,不受任何干扰影响。以上这些真实应用的成功例子,清楚地表明半导体制冷技术在现代电子器件领域拥有无法替代的关键价值,同时也为相关领域的技术改进和长远发展提供了特别重要的参考依据,推动整个行业不断向前进步。

5 关键技术与创新点

本项目的核心问题是如何将变频器内的功率器件的温度快速输出到散热器中,以便通过定向送风的方式快速散热,保证在变频器在各种工况下能够正常工作,具体采

用的方法:

(1) 在变频器 IGBT 和散热器之间加装半导体制冷片, 相接面用导热硅胶填充, 通过制冷的方式快速的将功率器件的热量从冷端输送到热端, 然后通过散热器散热。

(2) 为保证极端天气下, 环境温度过高, 导致散热效率过低, 随将泵房冷空气引入变频器控制柜, 使得变频柜内行程一个稳定的风场, 冷风在底部向上吹, 柜顶部通过排气扇将热风带出, 达到变频器外部冷却环境保证; 将底部风扇启停控制接入控制系统, 智能调节变频柜内部温度, 精准自动冷却运行中的变频器, 达到节能降耗的目标。

6 半导体制冷技术的挑战与发展

6.1 当前技术面临的主要挑战

半导体制冷技术在电子器件散热领域拥有突出的优势, 然而其发展依旧遭遇众多挑战。皮尔特效应推动的制冷效率依靠半导体材料的性能, 而目前普遍采用的碲碲基热电材料具备生产成本昂贵、机械性能欠佳和稳定性受制等问题, 阻碍了大范围商业化应用。半导体制冷装置需要与高功率密度电子器件严密融合, 其结构设计必需协调体积精简性与热传导性能, 这对装置的制造精度和融合工艺带来了更严格要求。制冷技术的能量转化效率也就是制冷系数偏低, 引发系统运作时能耗较高, 很难实现更高的绿色要求。因为半导体制冷必须电流驱动, 系统运行将引发额外的热量, 怎样达成这一部分热量的高效管理同样变为急需处理的问题。制冷装置的长时间运行或许引起材料性能衰减, 干扰它的持久稳定性和可信性。上述挑战显示, 半导体制冷技术的进步需要于材料改善、工艺完善和系统设计方面获得进展, 给电子器件的高效热管理供应更加可信的解决方案。

6.2 未来发展趋势及技术革新方向

半导体制冷技术未来的发展方向充满革新希望。研发新型材料成为提升技术效果的中心任务, 高效能又经济的半导体材料有望让制冷效果变得更好, 同时减少能源的使用量。研究的主要内容包括开发出热电转化效果更出色的纳米级材料, 并且探索稀土元素的替代方案, 突破现有技

术的限制。优化整个系统设计能够推动技术向前迈进, 通过集成化和小型化技术手段提高设备的适应能力, 让设备在各种复杂环境下散热表现更优秀。结合人工智能技术来帮助设计系统, 实现智能化的热量控制, 展现出很大的发展空间。制造工艺水平的提高推动半导体制冷片实现大规模批量生产, 同时增强产品的稳定性, 满足复杂电子设备对散热的需求, 应用范围不断扩大, 适应更多领域的实际需要。在反复探索和试验废热再利用的技术方法之后, 能够有效提升半导体制冷在节能方面的优秀效果, 并且还能守护自然环境带来至关重要的持久积极影响。采用这种技术创新的思路, 有助于半导体制冷技术实现全面普及和普遍使用, 真正建立起相当稳固的发展根基。

【参考文献】

- [1]刘建国,王伟,李志强.热电制冷技术及其在电子设备散热中的应用综述[J].制冷学报,2020,41(2):1-10.
 - [2]张磊,陈晓华.基于珀尔帖效应的大功率 IGBT 散热系统设计与实验研究 [J]. 中国电机工程学报,2019,39(15):4567-4575.
 - [3]赵永刚,孙静.变频器故障诊断与维护技术[M].北京:机械工业出版社,2018.
 - [4]周明,谢小荣.大功率变频器散热结构优化与仿真分析 [Z].中国电工技术学会年会论文集.北京:中国电工技术学会, 2021: 234-238.
 - [5]Rowe D M. CRC Handbook of Thermoelectrics[M].Boca Raton: CRC Press,2018.
 - [6]周水庚,王志华.热电制冷器的性能分析与优化[J].工程热物理学报,2017,38(4):721-725.
 - [7]GB 50015-2019,建筑给水排水设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
 - [8]周志敏,纪爱华.变频调速系统设计与应用[M].北京:人民邮电出版社,2017.
- 作者简介: 赵怀飞 (1985.11—), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 甘肃高台, 甘肃省张掖市人, 学历大学本科, 研究方向: 检测技术与自动化装置。