

引用格式: 李旻, 何庆林, 王平团, 等. 电磁感应快速加热技术在舰船甲板除冰设备研制中的应用与优化 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(增刊 2): 166-174.

LI M, HE Q L, WANG P T, et al. Application and optimization of rapid electromagnetic induction heating technology in development of ship deck deicing equipment[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(Supp 2): 166-174 (in Chinese).

电磁感应快速加热技术在舰船甲板除冰设备研制中的应用与优化

李旻¹, 何庆林², 王平团³, 蔡晓雄², 白龙雷⁴, 王晓晖⁵

1 海军装备部驻无锡地区代表室, 江苏 无锡 214000

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

3 中国船舶集团有限公司工程管理中心, 北京 100097

4 哈尔滨工程大学烟台研究院, 山东 烟台, 264006

5 无锡优磁环保科技有限公司, 江苏 无锡 214000

摘要: [目的] 在极地或高纬度地区航行时, 舰船甲板的除冰清雪工作至关重要。综合考虑能量产生原理、加热效率、温控精度以及能耗等多方面因素, 应用电磁感应快速加热技术开展甲板除冰技术极具创新性 & 先进性, 但全球范围内尚无成熟应用于此领域的装置。[方法] 深入探究电磁感应加热技术原理(涵盖发展历程、工作原理、技术特点优势), 特别是基于绝缘栅双极型晶体管(IGBT)构架的大功率电力电子技术在其中的应用, 开展舰船电磁感应快速加热甲板除冰技术研究 & 装置研制。详细阐述总体方案、技术转化方式、应用试验验证, 全面介绍检测控制 & 信号分析、程序控制 & 反馈、水路冷却 & 机械结构集成设计、输出主线缆 & 感应前端控制设计等关键技术, 并探讨技术应用关键要素。[结果] 应用实验表明, 所设计装置可有效清除 30 mm 以内冰层, 具备高效节能、精准控制、快速响应、清洁环保等优点。[结论] 该装置可提升我国舰船极寒航区除冰能力提供有力支撑, 助力我国极地航行保障能力提升, 推动舰船甲板除冰技术发展, 在军事、工业和民用领域具有广泛应用前景。

关键词: 舰船甲板除冰; 电磁感应加热; 绝缘栅双极型晶体管(IGBT); 极地航行保障; 技术转化

中图分类号: U664.6

文献标志码: A

DOI: [10.19693/j.issn.1673-3185.04145](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04145)

Application and optimization of rapid electromagnetic induction heating technology in development of ship deck deicing equipment

LI Min¹, HE Qinglin², WANG Pingtuan³, CAI Xiaoxiong², BAI Longlei⁴, WANG Xiaohui⁵

1 Military Representative Office of Naval Armament Department in Wuxi, Wuxi 214000, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

3 CSSC Project Management Center, Beijing 100097, China

4 Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264006, China

5 Wuxi CUCE Green-Technologies Co., Ltd., Wuxi 214000, China

Abstract: [Objective] When ships sail in polar regions or high-latitude areas, the work of removing ice and snow from the ship's deck is of vital importance. Considering various factors such as the principle of energy generation, heating efficiency, temperature control precision, and energy consumption, the application of rapid electromagnetic induction heating technology for deck deicing is highly innovative and advanced. However, no mature device is applied in this field on a global scale. [Method] This paper explores the principle of electromagnetic induction heating technology (covering its development history, working principle, and technical characteristics and advantages), especially the application of high-power electronic technology based on the insulated gate bipolar transistor (IGBT) framework therein, and investigates the development and application of electromagnetic induction rapid heating deck deicing technology for ships. [Results] The experimental results show that the designed device can effectively remove an ice layer within 30 mm and has such advantages as high efficiency and energy saving, precise control, and rapid response, as well as being clean and environmentally friendly. [Conclusion] The proposed device provides strong support for improving the deicing ability of Chinese ships in extremely cold navigation areas, helps to enhance the supportability of Chinese ship polar navigation, promotes the development of ship deck deicing technology, and has broad application prospects in military, industrial, and civil fields.

Key words: ship deck deicing; electromagnetic induction heating; insulated gate bipolar transistor (IGBT); polar navigation support; technology transformation

收稿日期: 2024-08-25 修回日期: 2024-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52401402)

作者简介: 李旻, 男, 1978年生, 高级工程师

何庆林, 男, 1969年生, 硕士, 研究员

蔡晓雄, 男, 1992年生, 硕士, 工程师

*通信作者: 蔡晓雄

0 引言

在极地或高纬度地区航行时,舰船常常面临恶劣海况,舰体和甲板容易受到海水溅淋,进而结冰、结霜。同时,低温高湿环境致使甲板露天装备遇冷后表面覆冰严重。舰船甲板结冰危害诸多,不仅降低甲板摩擦系数,威胁舰载机起降和转运安全,影响甲板作业车辆、设备等的正常操作,还会增加舰员滑倒风险。严重时,甲板结冰甚至会改变舰体重心,增大负荷,危及舰艇航行速度和安全。

因此,无限航区舰船的甲板除冰清雪工作不可或缺。当前,舰船甲板除冰方法主要分为主动式和被动式。主动式除冰需要在舰船设计阶段开展,如在甲板涂层中添加特殊材料减轻结冰,或预埋线圈及附件进行电脉冲、电斥离除冰,此方法技术复杂且占用大量总体资源,实船应用尚不成熟。被动式除冰则是在甲板结冰后实施,主要有3种方式:一是机械破冰,借助机械装置铲、敲、振动冰层,但除冰不彻底,容易损伤涂层与钢铁基体;二是化学品除冰,通过抛洒融冰、融雪剂降低冰点除冰,虽有一定效果,但反应慢、时效性差且污染环境;三是加热融冰法,利用电磁波、电极加热、红外线、蒸汽高温气体等加热冰层消融,该方法具有不损伤甲板涂料及钢铁基体、除冰彻底等优点,是主流的舰船甲板除冰方法。

目前,由于美、英等国海军大型水面舰船作战部署区域远离极寒海域,其很少遇到极端冰雪天气。即便如此,各国海军为确保在极端恶劣天气下舰船、甲板系统和设备能够正常运转,均配备了除冰清雪设备。国外实装应用的甲板清雪和除冰手段包含以下几种:

1) 人工除冰和清雪。适用于降雪较小或冰层薄的情况,舰员使用简易设备清理。英美俄法等国海军大型舰船配备舰员虽众多,但人工除冰效率低,极端恶劣天气下无法作业,非战备状态或无专用机械化设备时才使用。

2) 机械化除冰清雪设备。舰船甲板除冰作业的传统手段,如俄罗斯大型舰船上使用吹雪除冰车和辅助机械除冰设备,该设备在车前安装一台航空发动机,利用其开机工作后产生的高温高速气流将飞行甲板上的冰雪快速吹除,满足航空保障作业环境要求。

3) 特种装置除冰。根据美海军“斯坦尼斯”号航母公共事务办公室公布的信息,大型舰船蒸

汽弹射装置、着舰拦阻装置等设备布置在飞行甲板下方,设备在运行过程中散发出大量热能,可将飘落在飞行甲板上的雪溶解,并能除掉甲板冰层。此外,若冰层较厚,还可启动飞行甲板喷淋系统,通过向飞行甲板喷洒加热后的海水,溶解和清洗飞行甲板上的冰雪。

4) 大型舰船飞行甲板移动式清洁回收与循环系统(MCRRS)。由美海军研制,采用水力旋流技术进行清洗,无需清洗剂,高压水流对飞行甲板进行大面积的清洁且可循环利用,能清除薄雪、油料、燃料以及松动的螺栓,但对较为坚固的冰层效果不佳。

5) 电斥力分离系统。由美国国家航空航天局(NASA)研制,已在部分军舰上试验。该系统利用除冰导体构件,电流从导体构件的一臂流入,从另一臂流出;当电容向导体构件快速充放电时,两臂中的电流产生瞬时的相反磁场,嵌入舰上的除冰带进行除冰。与一般的电加热系统相比,能耗仅为后者的千分之一,重量仅为其十分之一,可在小于1 ms的时间内推斥25 mm厚的冰层,并可根据使用环境的不同形状进行改装,但该除冰系统尚未成熟应用。

国内舰船除冰实装设备多类似于陆上使用的除雪车,对厚冰层清除效果不理想。例如,2014年,刘国瑞等^[1]研究的热风除冰方案原理可行,但能量利用率和经济性较差,不具备推广使用条件;2019年,张以都等^[2]利用导电滑环将电热丝和温度传感器连接,发明一种直升机旋翼防/除冰实验平台,但不适用于舰船大面积的甲板。

综上所述,在舰船甲板除冰实装应用方面,国外以传统机械式除冰为主,仅美国开发中的电斥力分离系统具备应用潜力。在加热融冰方法领域,综合考虑能量产生原理、加热效率、温控精度和能耗等因素,电磁感应加热技术优势显著,具有高效、节能环保、速度快、安全可靠等特点^[3],处于舰船装备工业前沿,在甲板除冰领域应用前景广阔,是未来发展趋势。国内若能依据电磁感应快速加热的技术原理,研制甲板除冰装置将很有可能逐步取代传统手段中的多种加热方式。

因此,本文将研究电磁感应加热技术的原理,综合舰船供电的实际需求,详细介绍本团队所设计研制的一种新型甲板除冰装置的总体方案、构成和功能设计,以及相关的关键技术。最后,将通过试验验证其工程有效性。为解决我国极寒航区舰船甲板除冰难题,提升我国极地航行保障能力提供支撑。

1 电磁感应加热技术原理

1.1 技术发展历程

电磁感应加热技术经历了长时间的发展历程。1870年,英国物理学家奥利弗·赫维赛德提出涡流产生的热可以加以利用,标志着电磁感应加热理论的诞生^[4]。1916年美国发明的感应加热炉标志着电磁感应加热技术逐渐进入实用化阶段^[5]。20世纪60年代,欧洲研制出高频感应加热电源及控制电路,在实际加热过程中取得不错的效果。90年代初,电力电子器件的高速发展使得电磁感应加热技术取得突破性进展。1993年,西班牙制造出30~600 kW/50~100 kHz的超音频电流型感应加热设备^[6]。2011年,意大利帕多瓦大学的Alotto等^[7]提出的基于无参数、自适应粒子群算法的多线圈横向磁通感应加热装置,成功加热宽度在600~800 mm之间的带材,并达到所需的均匀性。

我国感应加热技术研究起步较晚。1996年,浙江大学采用多管并联方式研制了20 kW/300 kHz高频感应加热设备^[8]。2002年,江南大学研制了2 MHz/1 kW超高频感应加热设备^[9]。2006年,华北电力大学研制了一台200 kW/400 kHz的固态高频感应加热设备^[10]。目前,我国电磁感应加热技术积累了许多技术经验,在工业领域得到广泛应用。2021年,上海外高桥造船有限公司应用大型邮轮薄板变形矫平电磁感应加热装备,满足大型邮轮薄板建造的平整度要求^[11]。2022年,敬业钢铁有限公司利用双通道式电磁感应加热中间包来分析通道内钢液流动和夹杂物的去除情况,结果发现,随着感应加热时间的延长,夹杂物去除率可得到有效提高^[12]。2024年,厦门大学研究发现利用高频电磁感应技术辅助激光烧蚀,能增强金属基板纳秒激光烧蚀过程中的效率并改善表面加工质量^[13]。

此外,电磁感应加热技术也可以应用于去除物体附着物。国外相关单位利用电磁感应技术进行了大型舰艇的快速除漆。美海军自2008年起,将电磁感应加热技术用于潜艇表面消声瓦的去除修理,还用于去除大型舰船飞机跑道的环氧金刚砂涂层^[14]。

但是,将该技术用于融化冰雪的研究相对较少。2022年,闫胜春^[15]利用理论计算、试验对比以及数学建模的方法研究确认在道岔融雪除冰作业中应用电磁感应加热技术,可大幅降低能源消耗且除雪融冰效果更好。2024年,北京市地铁运

营有限公司线路分公司设计的接触轨融冰用中频感应加热设备仿真实验达到预期效果,输出固定频率20 kHz、功率120 kW,但尚未实际应用^[16]。关于舰船甲板除冰的研究与发展仍停留在传统的除冰方式,成熟的感应加热除冰系统与装置尚未出现。因此,电磁感应加热技术应用于甲板快速除冰具备可行性,也很有必要结合我国舰船供电的实际情况开展相应装置的研制探索。下面将从电磁感应加热技术的原理分析入手,详细呈现本团队所研制的一种新型快速甲板除冰装置的设计方案。

1.2 工作原理详解

电磁感应加热技术利用电磁感应现象,通过高频变化的电磁场在被加热导体内部产生涡流,从而实现加热。即高速变化的高频高压电流流过线圈会产生高速变化的交变磁场,当在上面放置含铁质容器时,容器表面切割交变磁力线而在容器底部金属部分产生交变的电流(即涡流),涡流使容器底部的铁原子高速无规则运动,原子互相碰撞、摩擦而产生热能,从而起到加热钢铁表面的效果。此即是通过电能转化为磁能,使被加热钢体表面产生感应涡流的一种加热方式。该原理可获得低穿透率的高密度热能,实现电磁感应热能输出的精确控制。电磁感应涡流产生原理图如图1所示。

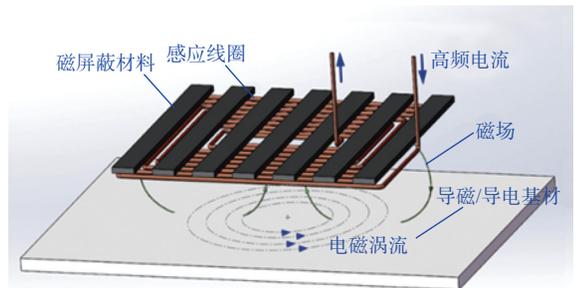


图1 电磁涡流产生原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the electromagnetic eddy current generation principle

根据法拉第电磁感应定律,导磁/导电基材回路中的感应电动势 e 为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

式中: N 为感应线圈匝数; Φ 为感应线圈磁通量。

假设磁通量 Φ 以正弦规律变化,即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (2)$$

式中: Φ_m 是 Φ 的峰值;电流角频率 $\omega = 2\pi f$,其中 f 为交变电流的频率。

因此,导磁/导电基材回路中的感应电动势有

效值 E 为

$$E = \frac{\omega N \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N \Phi_m \quad (3)$$

由焦耳热效应,涡流通过导磁/导电基材回路产生的热量 Q 为

$$Q = k I^2 R t \quad (4)$$

式中: Q 为热能值; k 为可变系数; I 为涡流幅值; R 为被加热基材的等效电阻; t 为加热时间。

导磁/导电基材产生的功率 P 为

$$P = E I \cos \varphi = \sqrt{2} \pi f N \Phi_m I \cos \varphi \quad (5)$$

由式(5)可知,导磁/导电基材加热产生的功率与交变电流的频率、交变磁场的强度有关。因此导磁/导电基材的加热功率可以通过调整交变电流频率或输入电压来实现。

2 电磁感应快速加热甲板除冰技术方案

2.1 总体目标与思路

基于上述电磁感应加热原理及技术发展趋势,利用电磁涡流感应进行舰船甲板快速加热与除冰的技术具有较好的工程转化应用价值,并且该技术具有受极寒海域环境影响小、适应舰船运行条件能力强、除冰效率高和对舰船表面涂层损伤低等优势。因此,有必要开展基于电磁感应的甲板快速加热除冰技术方案设计及装备研制,实现极端恶劣环境下舰船关键部位的快速除冰作业,提升我国舰船在极地或极寒地区的航行能力。

2.2 总体方案设计

经调研,国内相关企业已经开发出大功率智能化电磁感应舰船防滑涂料去除设备,系列产品已成熟应用于大型舰船及民用船舶上。在电磁去除设备基础上,采用类似电磁感应加热技术原理,研发甲板除冰装置具备可行性。

因此,结合我国舰船供电实际情况,本文将基于绝缘栅双极型晶体管(IGBT)构架的大功率电力电子技术的设计与应用,设计一套整流逆变装置,即通过 IGBT 逆变桥单元的输出方式由感应前端线圈产生高频交变磁场来输出热能,解决感应加热的关键所需。

所设计的装置主要由主机(机械部分、水路部分、电气部分、控制部分组成)、前端线缆(平面感应、手持部分、耦合部分、电缆部分组成)及滤波器组成,其外观设计如图 2 所示。



图 2 电磁感应快速加热除冰装置设计外观图

Fig. 2 Appearance of a deicing device using the rapid electromagnetic induction heating technology

2.3 技术转化原理

2.3.1 工作原理

通过前期电磁感应加热技术的研究和实践,对各种钢质基材表面融冰所需温度进行测试和分析后发现,要达到去除钢质基材表面覆冰的良好效果,须在钢质基材表面瞬间产生 $>180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温,才能使结冰覆层与钢铁结合部位产生较大的温度差。本文设计思路是将来自岸基或船舶电网的 $380\text{ V}/50\text{ Hz}$ 工频交流电整流变换为可调直流电,并通过逆变电源将该直流电逆变为高频交流电 ($>25\text{ kHz}$),再将高频交流电接入感应谐振线圈产生强磁场。进而,在船舶钢质壳体表面及一定深度内感生出特定强度的电磁涡流,实现钢质壳体与厚型冰覆盖层间快速产生 $>180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的高温,从而达到有效破坏厚型冰覆盖层与钢质壳体表面的结合界面(使冰层在温度响应系数差的条件下瞬间破碎),实现厚型冰覆盖层剥离的目的。

基于上述思路,本文设计的电磁涡流效应加热系统整体功能结构如图 3 所示,系统整体工作流程如图 4 所示。

2.3.2 电气控制原理

1) 晶闸管触发。

本文所设计的装置采用三相桥式全控整流电路。如图 5 所示,该装置由三相 380 V 交流电网电源供电,采用四线制输入方式, U, V, W 为三相交流电输入线, N 为中心线。为确保人机安全,在交流输入端附加漏电保护器,当漏电电流超过规定的安全值(小于 10 mA)时,漏电保护器动作,切断输入电源。用晶闸管替代三相桥式不控整流电路中的二极管,通过控制触发电路来调节晶闸管的导通控制角。在一个周期 (20 ms) 内,相位互差 60° 的触发脉冲依次触发三相桥式中的 6 只晶闸管。当触发脉冲宽度小于 60° , 则一个周期内每个晶闸管触发 2 次。同时控制电路输出至晶闸管

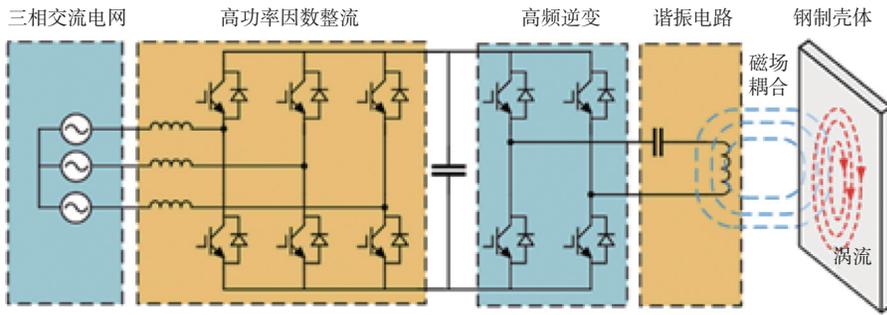


图 3 系统整体功能原理结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the overall functional principle and structure of the system

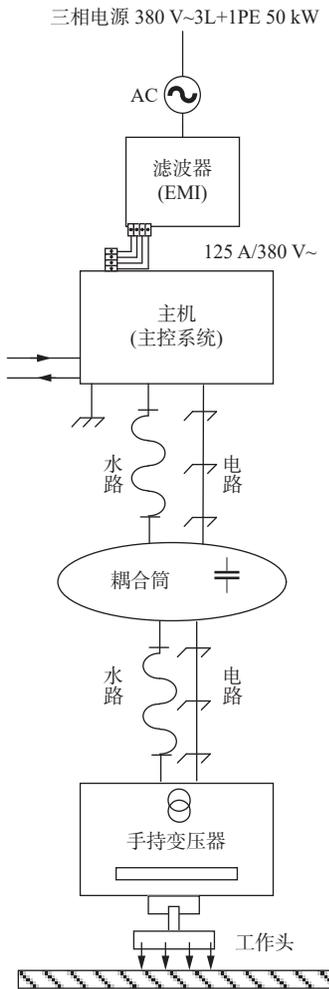


图 4 系统整体工作流程图

Fig. 4 The overall workflow of the system

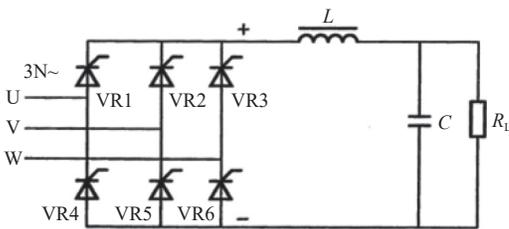


图 5 三相晶闸管桥式全控整流原理图

Fig. 5 Schematic diagram of three-phase thyristor bridge fully-controlled rectification

控制极 G 的触发脉冲, 必须保证任何瞬间有 2 个晶闸管同时导通, 以形成整流电路的电流回路。

同时, 改变晶闸管的导通控制角, 以达到调节整流器输出直流电压的目的。用电压的高低来改变输出功率大小。

当触发晶闸管的脉冲宽度介于 $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 之间, 在一个交流电源周期内, 每个晶闸管只需要触发一次, 其工作过程和波形如图 6 所示。

2) IGBT 驱动技术。

(1) IGBT 栅极驱动电路基本性能。

直流电不能通过 IGBT 器件发射极和栅极之间的绝缘二氧化硅结构, 因而低频的静态驱动功率接近于零。但是栅极和发射极之间构成栅极电容 C_{GS} , 因而在高频的交替导通和关断时需要一定的动态驱动功率。小功率 IGBT 的 C_{GS} 一般在 $10 \sim 100$ pF 之内, 但对大功率的绝缘栅功率器件而言, 其栅极电容 C_{GS} 较大(一般介于 $1 \sim 100$ nF, 甚至更大), 因而需要较大的动态驱动功率。

IGBT 栅极电压可由不同的驱动电路产生, 栅极驱动电路设计的优劣直接关系到由 IGBT 构成的系统的长期运行可靠性。正向栅极电压值应使 IGBT 产生完全饱和, 并使通态损耗减至最小, 同时也应限制短路电流及其带来的功率应力。当栅极电压为零时, IGBT 处于断态。为保证 IGBT 在集电极-发射极电压上出现 dv/dt 噪声时仍保持关断, 必须在栅极上施加反向关断偏压, 采用反向偏压可减少关断损耗。IGBT 正栅压 V_{GE} 越大, 导通电阻越低, 损耗越小。但若 V_{GE} 过大, 一旦 IGBT 过流, 内部寄生晶闸管产生静态擎柱效应, 就会造成 IGBT 失效; 相反, 若 V_{GE} 过小, 可能会使 IGBT 的工作点落入线性放大区, 最终导致器件的过热损坏。在任何情况下, 开通时的栅极驱动电压, 应该在 $12 \sim 20$ V 之间。

(2) IGBT 驱动条件。

驱动电路的设计决定了器件的应用性能。理论上 $V_{GE} \geq V_{GE(th)}$ 时 IGBT 即可以导通。一般情况下 $V_{GE(th)} = 5 \sim 6$ V。当 V_{GE} 增大时, 通常压降减小, 通态损耗减小, 但 IGBT 承受短路电流能力也随之减小。若 V_{GE} 太大, 可能引起栅极电压振荡, 损坏

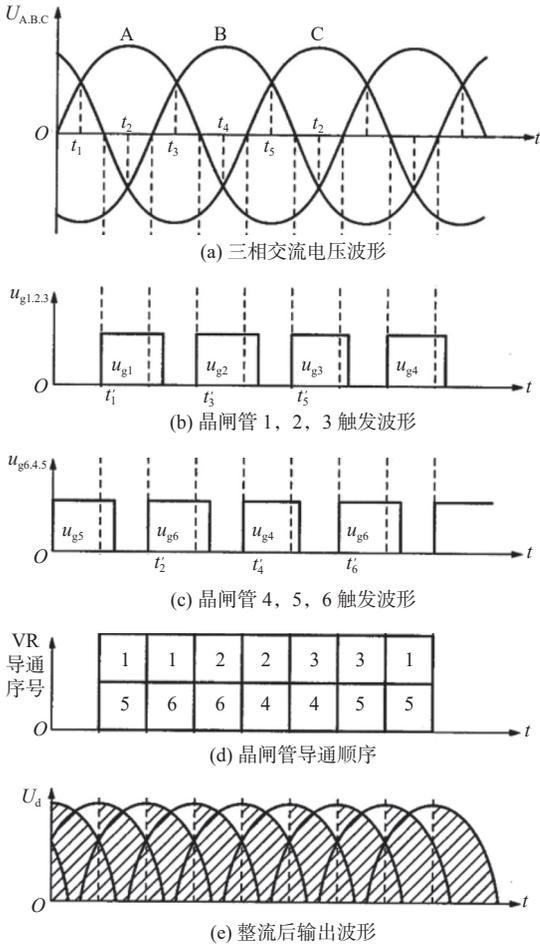


图 6 三相桥式全控整流波形图

Fig. 6 Waveform diagrams of three phase bridge fully-controlled rectification

栅极。当 V_{GE} 减小, 通态压降增加, 通态损耗增加。

在 IGBT 栅极驱动电路设计时, 应特别注意导通特性、负载短路能力和 dv_{GE}/dt 引起的误触发等问题。正偏置电压 V_{GE} 增加, 通态电压下降, 导通损耗 E_{ON} 也下降。若使 V_{GE} 固定不变, 导通电压将随集电极电流的增大而增高, 导通损耗将随结温升高而升高。

IGBT 栅极负偏电压 $-V_{GE}$ 直接影响 IGBT 的运行可靠性, 负偏电压增高时集电极的浪涌电流明显下降, 对关断能耗无显著影响。栅极电阻 R_G 增加, 将使 IGBT 的导通与关断时间增加, 进而使导通与关断能耗均增加。二栅极电阻减少, 则又使 di/dt 增大, 可能引发 IGBT 误导通, 同时 R_G 上的损耗也有所增加。

2.4 检测控制与信号分析

2.4.1 检测输入源电源特性

感应加热电源通常采用船用三相 380 V($\pm 10\%$)、50 Hz 正弦交流电网电压。源电压的允许波动范围是考量加热电源电气性能的参数指标之一, 即在源电压允许波动范围内, 加热电源不仅要能正

常工作, 而且输出电压、输出电流等电气参数应符合产品标准要求, 对加热质量不产生影响。

2.4.2 控制输入额定功率及功率调节范围

电磁感应加热电源的输入功率是根据被加热器件所需功率、电磁感应电源自身损耗功率所决定的, 其中器件加热所需功率包括器件加热的实际有效功率和传导热损失功率、辐射热损失功率及对流热损失功率之和, 即满足使用需求的电源输出功率。电磁感应加热电源自身损耗功率主要包括整流器损耗、逆变器开关损耗和功率开关管导通损耗、加热绕组损耗。一般性能优良的电磁感应加热电源, 输入功率调节可以在 10%~100% 额定功率范围内调节, 所设计装置的功率控制技术应满足这一指标。

2.4.3 检测三相电源相序与缺相保护

电磁感应加热整流电路采用三相桥式全控晶闸管整流, 因此产品设计有相序不对或缺任一相电压时, 电磁感应加热电源需能自动进入保护状态或发出警示信号。

2.4.4 检测输入过电压保护

所设计的装置需具备输入过电压保护功能。当输入电源电压高于规定的允许电压波动上限值时, 加热电源应进入自动保护状态, 能够产生警示或关机; 当输入电源电压低于上限电压时, 加热电源能自动恢复工作。

2.4.5 检测输入欠电压保护

装置需具备输入欠电压保护。当输入电源电压低于允许波动的下限规定电压时, 加热电源应进入自动保护状态, 能够产生警示或关机; 当输入电源电压高于允许波动的下限规定电压时, 加热电源能自动恢复工作。

2.4.6 检测过电流保护

装置需具备过电流保护。当加热电源的输入电流或负载电流发生超出规定的额定电流时, 电源自动进入限流状态; 短时间或严重短路过电流时, 封闭功率开关的驱动脉冲, 自动关机保护。

2.4.7 过热检测保护

装置需具备过热检测保护。电磁加热电源的过热保护对象主要是逆变器的功率开关管 IGBT、加热绕组、谐振补偿电容, 以及对热敏感且关键性元器件。当温度达到设定的温度阈值时, 进入自动保护。

2.4.8 漏电检测保护

装置需具备漏电检测保护。当电源装置发生漏电且超过规定的漏电流时, 应进入自动保护状态, 此时应自动及时切断输入电源, 以免危及人身和设备的安全。

2.5 程序控制与反馈

因可编程控制器(PLC)输入和输出都是采用的数字信号,主控单元采用的又是逻辑电路,二者无法达到互相通信状态;同时,部分动态控制需要 PLC 去告知主控单元对各种元器件输出脉冲信号,并需返回给 PLC 一个反馈。因此,为达成这样的闭环反馈控制系统,本文通过加载模数转换(A/D)模块、数模转换(D/A)模块,专门设计逻辑电路控制专用电路板来完成闭环反馈控制。

在整个设备反馈系统中,多种信号不断变化,通过专门的传感器对感应头运动速度和温度进行检测并传输给 PLC,通过 PLC 内部处理运算后,输出信号到控制电路上,来改变功率输出的大小并告知前端操作者是否需要加快速度或者放慢速度。同时,通过 PLC 与文本显示器的通信来告知操作者目前设备的功率输出变化情况和前端感应头的滑动速度、温度等参数。

2.6 水路冷却控制与机械结构集成设计

2.6.1 内部水冷基板基本结构设计

由于前端感应部分、逆变单元和整流单元等大功率器件在工作状态下会产生很高的温度,因此还需要对冷却系统进行设计,本设计采用水冷系统对其进行高效散热处理。在实际安装逆变单元、晶闸管单元以及整流单元的元件(模块)时,将元件(模块)安装在冷却水通道上,以进一步提高冷却效果。水冷系统工作时,在逆变单元和前端感应部分设置专门的温度传感器。温度传感器以物理接触方式来感应发热元件的温度。如果高出设定的温度,温度传感器会将报警信号输送至控制主板,由控制主板将信号传递到 PLC,最后通过 PLC 在文本显示器上警告操作者。当供水水压低于设定值时机器直接报警,文本显示器可显示冷却水液位太低、设备无法工作的信息。

2.6.2 主机机械外部框架设计

针对功率输出设备,为方便使用,中前端感应



图9 整流单元和逆变单元连接工作原理图

Fig. 9 The working principle diagram of rectifier and inverter units connection

3 技术应用关键

3.1 PLC 与各信号联控技术

1) PLC 与前端感应头信号变化处理。

器设计成人工手提式操作。为提高使用效率及扩大操作半径,对功率输出设备设计为四轮移动,以更快速、高效地完成大范围除冰等工作。所设计的主机机械外部框架如图7所示。

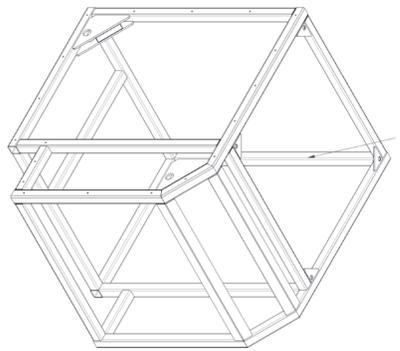


图7 主机机械外部框架设计图

Fig. 7 Design drawing of the external framework for the host machine mechanics

2.7 输出主线缆与感应前端控制设计

装置感应头原理结构如图8所示,由高频谐振电容、高频变压器及感应线圈构成。高频变压器起到电压调整的作用,且可有效隔离电气故障。高频变压器二次侧(电流 I_{AC2} 和频率 f)为低压大电流特性,需采用水冷系统为感应线圈降温。温度及速度传感器电缆、主输出电缆以及冷却水路统一设计在主机与感应头的复合线缆中。感应头侧谐振电容与折算至变压器原边的负载电感构成并联谐振电路,逆变单元捕获谐振频率且控制逆变频率与之相同,达到最大功率因数控制。整流单元和逆变单元设计连接情况见图9。

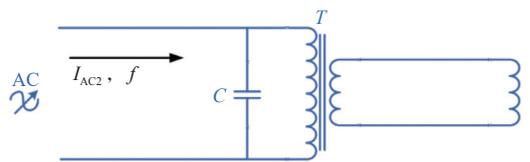


图8 装置感应头原理结构图

Fig. 8 Schematic diagram of the principle and structure for the device induction head

在整个设备工作反馈系统中,多种信号是在不断变化的,这需要通过专门的传感器对感应头的运动速度和温度进行检测并传输给 PLC,经 PLC 内部处理运算后,输出信号到控制电路上,来改变功率输出的大小并告知前端操作者是否需

要加快速度或者放慢速度。将 PLC 与多种信号集成联控,保证设备工作各工况的正常运行。

2) PLC 与水冷系统关系解决方案。

为防止设备在运行状态下因水流循环滞后等原因导致散热不及时造成设备损害,设定必须是在先通水情况下及水流达到一定流量后才可使其流量开关动作,并经继电器控制板卡输出信号告知 PLC 和主控单元,同时文本显示器告知工作人员水流是否正常。反之,若水流量未达到一定量,流量开关不动作,主控单元会强制让接触器内部带电线圈分离,在告知 PLC 的同时反映到文本显示器上反馈给操作人员目前的设备状态。

3) 电源相位、相序问题与 PLC 关系的解决方案。

由于整流单元是通过改变相位角的方式工作,相序不正确或者缺失都会导致整流单元出现问题。为防止该问题的发生,应在电网输送的接触器上端取样,通过专门检测电路来判断电网输送电源相位、相序是否正确,再由检测电路板通过 PLC 传送至文本显示器,给操作人员警示。

3.2 整流单元和逆变单元应用关键技术

整流和逆变单元可能因元器件损坏或人为操作不当等各种原因导致故障,例如逆变单元 IGBT 导通顺序的不正确或整流单元相位角调节不当等,都可能对功率发生装置及人身安全造成极大隐患。因此,主要采用专门的检测电路板对其 2 个单元输出的电流和电压取样,再与预先设置的参数进行数据对比。若不在正确参数的范围内,控制单元会对一次元件或从触发电路板输出一个脉冲信号来强制停止功率器件的工作。

3.3 逆变电路输出到前端感应头的关键技术

感应前端线圈产热需要产生一个高频交变磁场,目前最优方案是通过 IGBT 逆变桥单元的输出方式来实现。逆变单元由 IGBT-H 桥电路构成,H 桥上桥臂与下桥臂的 IGBT 开关器件,在逆变单元主控板的控制下,以一定的频率上下桥臂交错导通,输出频率可以调节的高频交流电。逆变单元只控制高频交流电的频率,而高频交流电的功率由整流单元调节。高频交流电的频率与电磁场穿透深度相关,高频交流电的功率与加热速率相关。如果逆变桥单元触发顺序混乱会导致功率器件损坏,更可能危及人身安全,为防止此类问题发生,可通过以下两个办法解决:

1) 采用专门的 IGBT 触发电路,由四路开关电源信号通过主控板输出给触发电路脉冲信号,

由触发电路控制 IGBT 功率模块的通断,来实现整个 4 路桥臂的正确导通顺序。

2) 在主控单元对 IGBT 触发电路间接控制的同时,对 IGBT 输出的交流电压进行检测并反馈给专门的检测单元进行判断,以确认 IGBT 输出的交流电压是否正常。如果反馈给控制单元的信号处于非正常状态,主控单元将切断对 IGBT 触发电路的输出信号,以避免对机器和操作人员造成危害。对判断逆变单元是否出现问题,从自动化角度而言是一个典型的反馈控制系统。

3.4 电磁感应加热动态阻抗模块匹配控制关键技术

装置功率和高频逆变器的频率均需要根据实际应用情况进行设置和调整,以实现加热温度和加热深度的控制。通过匹配模块化的感应谐振线圈组件,可适应不同尺寸的厚型冰覆层区域,确保可以最小能耗实现准确温控下的局部破碎覆冰层。同时,由于在高频逆变器的前端采用高功率因数的 PWM 整流器与岸基电网接口,实现网侧电压/电流近似同相位和正弦化,从根本上解决大功率电能变换器对电网的谐波污染和电磁干扰。

3.5 加热线圈精准温控关键技术

通过采用以 IGBT 逆变单元为核心的控制系统配合温度传感器可对加热线圈产生的热量进行探测,并通过调节电力晶闸管来调节功率的升降,以保持加热线圈加热温度的恒定,提升破除冰覆层效果的稳定性和可靠性。

4 技术应用验证及成效

本文根据电磁感应快速加热技术应用转化所设计研发的装置已完成样机研发,并在第三方机构开展甲板覆冰破除试验,验证了技术应用的成效。试验照片如图 10 所示。



图 10 甲板覆冰破除试验照片

Fig. 10 Photos of deck deicing test

经甲板冰层的快速清除试验,验证了所述电磁感应快速加热除冰方案可适用于清除30 mm厚度内的甲板冰层,冰层脱落效率不低于50 m³/h,作业半径≥20 m,除冰操作不影响冰层下涂料保留区域的涂料工作状态及参数(附着力)。据此,该项技术的应用转化可使我国在舰船除冰问题上与美国及北约国家处于同一水平,能够适应极寒航区环境条件,在不伤害舰船表面涂层及钢铁结构的情况下快速有效地去除冰层,为我国消除极地航行中舰船面临的重大危害之一——“舰船覆冰”去除难题提供可工程应用的解决方案。

5 结 语

舰船于极地或高纬度地区航行时,甲板除冰是一项必需工作,目前主流方法为被动式除冰。经过对国内外舰船甲板除冰方法的调研分析,电磁感应快速加热技术代表着未来发展方向,不过现阶段全球范围尚未出现可大规模推广应用的成熟电磁加热技术除冰装置。本研究团队已基本完成了工程化应用转化,所研制的装置能够有效清除30 mm厚度以内的甲板冰层,具备高效节能、精准控制、快速响应、清洁环保等优点。

未来该技术在智能化控制与降损提效方面仍有较大改进空间,相关研究也将围绕其在各类型舰船中的适用性与拓展性展开,以提升处理舰船甲板过厚覆冰、受损涂层等特殊情况的能力,使我国处理极寒航区舰船甲板除冰能力达到更加先进的水平,为极地航行安全提供更为坚实的保障。

参考文献:

- [1] 刘国瑞,肖汉斌,路世青. 热风除冰在甲板机械上应用的可行性研究[J]. *起重运输机械*, 2014(6): 45-49.
LIU G R, XIAO H B, LU S Q. Feasibility research on application of hot-air deicing in board machinery[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2014(6): 45-49 (in Chinese).
- [2] 张以都,高子涵,吴琼,等.一种直升机旋翼防/除冰实验平台:CN201710362018.X[P].2019-11-05.
ZHANG Y D, GAO Z H, WU Q, et al. An experimental platform for helicopter rotor anti-icing/deicing: CN201710362018.X[P]. 2019-11-05 (in Chinese).
- [3] 张湘雨. 多线圈磁耦合谐振式无线功率传输系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2019.
ZHANG X Y. Research on multi-coil magnetically coupled resonant wireless power transmission system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019 (in Chinese).
- [4] 郭均高,张爱萍,罗肖邦. 美国感应热处理的最新发展趋势[J]. *国外金属热处理*, 2002, 23(6): 1-3, 27.
GUO J G, ZHANG A P, LUO X B. The latest development trend of induction heat treatment in USA[J]. *Guowai Jinshu Rechuli*, 2002, 23(6): 1-3, 27 (in Chinese).
- [5] 黄化伟. 电感应加热线圈优化设计及变频电源控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
HUANG H W. Research on the design optimization of induction heating coil and the control of variable frequency power sources[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015 (in Chinese).
- [6] 沈庆通. 感应热处理技术60年回顾[J]. *金属加工(热加工)*, 2016(1): 7-11.
SHEN Q T. 60 years review of induction heat treatment technology[J]. *Metal Processing (Hot Processing)*, 2016(1): 7-11 (in Chinese).
- [7] ALOTTO P, SPAGNOLO A, PAYA B. Particle swarm optimization of a multi-coil transverse flux induction heating system[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(5): 1270-1273.
- [8] 沈旭,吴兆麟,马骏,等. 20kW/300kHz高频感应加热电源[J]. *电力电子技术*, 1996, 30(2): 12-15.
SHEN X, WU Z L, MA J, et al. 20kW/300kHz high frequency power supply for induction heating applications[J]. *Power Electronics*, 1996, 30(2): 12-15 (in Chinese).
- [9] 沈锦飞,惠晶,吴雷. 2MHz/1kW超高频感应加热电源[J]. *电力电子技术*, 2002, 36(6): 13-15, 57.
SHEN J F, HUI J, WU L. 2MHz/1kW ultra-high frequency induction heating power supply[J]. *Power Electronics*, 2002, 36(6): 13-15, 57 (in Chinese).
- [10] 朱晓荣,彭咏龙,石新春,等. 200kW/400kHz固态高频感应加热电源[J]. *电力电子技术*, 2006, 40(3): 67-69.
ZHU X R, PENG Y L, SHI X C, et al. Development of 200kW/400kHz high frequency inverter for induction heating[J]. *Power Electronics*, 2006, 40(3): 67-69 (in Chinese).
- [11] 冯敏超,孙建志,蒋林勇. 电磁感应加热矫平工艺在船用薄板中的应用[J]. *船海工程*, 2021, 50(2): 94-97.
FENG M C, SUN J Z, JIANG L Y. Application analysis of electromagnetic induction heating leveling technology in marine sheet[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2021, 50(2): 94-97 (in Chinese).
- [12] 余慧,史志鹏,王红国,等. 双通道式电磁感应加热中间包冶金效果研究[J]. *炼钢*, 2022, 38(3): 37-42.
YU H, SHI Z P, WANG H G, et al. Research on metallurgical effect of double-channel electromagnetic induction heating tundish[J]. *Steelmaking*, 2022, 38(3): 37-42 (in Chinese).
- [13] XIE C X, CHEN Z K, HONG M H. Enhancement of laser ablation via high-frequency electromagnetic induction heating[J]. *Optics Express*, 2024, 32(11): 19034-19041.
- [14] 帅刚,邱曩,蔡嘉辉. 新型除漆技术的应用现状[C]/2015第二届海洋材料与腐蚀防护大会论文集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2015: 5.
SHUAI G, QIU J, CAI J H. Application status of new technology of paint removal[C]/2015 Second Marine Materials and Corrosion Protection Conference Thesis Collection. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015: 5 (in Chinese).
- [15] 闫胜春. 电磁感应加热技术在道岔融雪除冰作业中的应用[J]. *电气化铁道*, 2022, 33(4): 96-99,
YAN S C. Application of electromagnetic induction heating technology in snow melting and de-icing operation for switches[J]. *Electric Railway*, 2022, 33(4): 96-99 (in Chinese).
- [16] 刘铁生,张寅,龚晓,等. 接触轨融冰用电磁感应加热电源应用研究[J]. *智慧轨道交通*, 2024, 61(2): 63-67.
LIU T S, ZHANG Y, GONG X, et al. Study on the application of electromagnetic induction heating power supply for melting ice on contact rails[J]. *Smart Rail Transit*, 2024, 61(2): 63-67 (in Chinese).