

3.4 性能对比

将新型换罐接头从操作性,抗振动性,安全功能与国外某品牌干式快速接头进行对比分析。新型换罐快速接头采用抱箍提拉式连接方式,解决了传统干式接头需要旋转推进,软管扭矩大的问题,其结霜条件下断开操作力为 25N,某国外干式快速接头分离力约为 160N,前者仅为后者 1/6,新型换罐快速接头操作更方便。在抗振动性上,某国外干式快速接头在进行表 2 中 0.06mm 振幅振动试验时,在振动约 5h 后发生滴液泄漏,试验表明干式快速接头在船舶航行微振动的环境中可能有泄漏风险,新型换罐快速接头通过 110h 全部振动测试。在安全功能上,干式快速接头具备自密封结构,公母头分离后两端能自动密封,具备意外脱落防泄漏功能;新型换罐快速接头不具备自密封结构,阀门手柄与抱箍手柄操作有严格顺序要求,设置有抱箍安全销防止脱落。两接头对比结论详见表 3。后续将考虑结合干式快速接头与换罐快速接头特点,进一步开展结构优化,将抱箍操作动作与阀芯开闭动作连锁,使其可实现自密封功能,进一步提升操作安全性。

表 3 接头性能对比

接头	操作性	抗振动性	安全功能
新型换罐快速接头	分离力 25N, 操作便携	强	无意外脱落自密封功能, 具备安全销防止脱落
国外某干式快速接头	分离力约 160N, 需旋转推进连接	弱	具有自密封结构, 脱落后可防止泄露

4 结论

(1) 分析换罐加注模式特点,对罐箱与供气系统之间连接接头提出要求,该接头必须具有抗振动性,既有长时连接可靠性,又有断开/连接操作便携性。

(2) 设计研发了抱箍连接式低温新型换罐快速接头,采用有限元流体分析软件对其温度,流阻特性进行仿真校核。结果表明,在低温使用环境下接头结构设计合理,阀门手柄和抱箍手柄无结冰情况;在 50m³/h 流量状态下,接头流阻为 0.07MPa,并获得新型换罐接头流量-流阻曲线。

(3) 开展接头结霜操作力,耐久性,抗弯,振动等性能试验,并顺利通过各项试验。试验结果表明在接头表面 10.3mm 冰层厚度下,接头分离力为 25N,人力操作可轻松分离;接头在 10000 次耐久性试验中无泄漏情况发生,疲劳寿命满足要求;在 460Nm 弯矩下低温

保持 10min 无泄漏发生;接头在 110h 以上振动工况下无泄漏情况发生。

(4) 本论文提出的新型换罐快速接头在低温可靠性、操作便捷性及抗振性能方面均优于传统干式接头,但当前设计仍存在非自密封结构的局限性。未来研究将重点优化联动机制,通过机械连锁设计实现“抱箍提拉动作”与“阀芯关闭动作”的同步触发,从而在意外脱落时自动切断流体通路,提升接头的本质安全性与工程适用性。

参考文献:

- [1] 石国政,张晖,范洪军.天然气燃料动力船燃料加注模式研究[J]. 船海工程,2013,42(06):57-60.
- [2] LNG 换罐补给模式正式进入船舶市场[J]. 市场瞭望,2023,(03):2.
- [3] 林钢,苗小超,张莹莹.船用 LNG 燃料罐换罐加注模式探讨[J]. 水运管理,2023,45(12):18-20+25.
- [4] 刘保利,余德平,郑建风.内河液化天然气加注码头储罐分配与加注船调度集成优化[J]. 系统工程理论与实践,2023,43(12):3668-3684.
- [5] 潘阳,王忠杰,刘川川,等.长江干线 LNG 集装箱码头 LNG 船舶燃料罐换罐分析[J]. 中国水运,2025,(10):49-50.
- [6] 王思佳.内河 LNG 动力船换罐模式新突破[J]. 中国船检,2023,(02):26-29.
- [7] 游立新,顾安忠.液化天然气热物性的计算[J]. 石油与天然气化工,1991,(02):48-52.
- [8] 应媛媛,李亚鹏,宋健,等.高柔性真空多层绝热软管的研制[J]. 机电产品开发与创新,2016,29(04):28-29.
- [9] 陈晨,程龙军.液化天然气装卸干式接头设计及应用研究[J]. 安全、健康和环境,2022,22(07):15-20+28.
- [10] 刘铁英,吴顺平,吴笑风,等.船用 LNG 加注干式接头性能试验与技术标准[J]. 船舶标准化工程师,2019,52(05):21-28.

基金项目:“XXX 型绿色智能沿海内河示范船”CBG4N21。

船舶轮机模拟器发展研究

马建坤, 吴天

(渤海大学航运学院, 辽宁 锦州 121013)

摘要: 船舶轮机模拟器作为现代海事教育和培训的重要工具, 经历了快速的发展和革新。鉴于其高效、安全和环保的特点, 船舶轮机模拟器在全球范围内得到了广泛应用。本文系统回顾了船舶轮机模拟器的发展历程, 分析了国内外在硬件、软件及系统集成方面的研究现状, 并探讨了未来的发展趋势, 为相关研究和实践提供参考。

关键词: 船员培训; 轮机模拟器; 海事教育

中图分类号: U676.4 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0063—04

1 引言

全球航运业的快速发展, 对各国的海事教育和培训提出了更高的要求。船舶轮机模拟器作为海员培训的重要工具, 提供了高度仿真的操作环境, 能够有效提高船员的操作技能和应急响应能力。自 20 世纪 70 年代以来, 轮机模拟器技术不断更新, 从最初的简单仿真到如今的高复杂度系统, 为海员培训提供了强有力的支持。现代轮机模拟器集成了 3D 显示、实物模型、智能评估等先进技术, 提供了逼真的训练环境, 显著提高了培训效果。国际海事组织 (IMO) 在其修订的《国际海员培训、发证和值班标准公约》(STCW) 中, 着重强调了轮机模拟器在海员培训中的核心作用并对其应用提出了具体要求。然而, 随着技术进步和航运业对环保及效率的要求日益提高, 轮机模拟器的发展仍面临诸多挑战。

2 船舶轮机模拟器的发展历程

2.1 起源与早期发展 (20 世纪 70 年代)

船舶轮机模拟器的发展可以追溯到 20 世纪 70 年代。当时, 海事教育和培训的需求推动了模拟器的诞生。国际海事组织 (IMO) 于 1978 年 9 月成立了国际船舶模拟器组织 (IMSIF), 致力于研究和推动船舶模拟器在船员培训与考核中的应用^[1]。大连海事大学率先引进了世界上为数不多的模拟器, 成为我国第一家引进轮机模拟器的高校。这套模拟器以一艘 16 万吨油轮机舱动力装置为原型, 主机为 B&W K90GF, 电子计算机采用 NORD-42 型, 数学模型通过软磁盘输入。早期的轮机模拟器主要依托电子计算机与数学模型的结合, 模拟船舶主机及其他机舱设备的基本操作。这些早期模拟器虽然功能有限, 但为船员提供了一个低风险的训练环境, 有效减少了在实船操作中的错误和事故。

2.2 中期发展 (20 世纪 80 至 90 年代)

20 世纪 80 年代, 计算机技术的发展为轮机模拟器带来了重要的转折。随着计算机能力的提升, 模拟器能

够处理更为复杂的系统和操作情景, 学员可以通过键盘和鼠标与模拟器进行交互, 显著提升了培训的效果。进入 20 世纪 90 年代, 计算机图形学的进步使得模拟器的图像显示更加逼真, 用户界面设计和互动体验得到了显著改善^[2]。与此同时, 网络技术的发展使得远程培训成为可能, 多个学员可以通过网络连接, 进行协同训练和互动。这一阶段的技术进步完善了轮机模拟器的功能, 扩大了其在海事教育和培训中的应用范围^[3]。

2.3 现代技术的融合 (21 世纪初至今)

进入 21 世纪, 人工智能 (AI)、虚拟现实 (VR)、增强现实 (AR) 等先进技术与轮机模拟器的结合极大地促进了其发展^[4]。学员可以通过佩戴相关设备在真实环境中进行操作训练, 还可以在虚拟机舱环境中看到操作提示和故障诊断信息。这些技术的应用大大提升了培训的直观性和实用性, 增强了学员的学习效果和技能掌握。这些技术的结合使轮机模拟器在现代海事教育中成为不可或缺的培训工具。



图 1 轮机模拟器发展时间轴

3 船舶轮机模拟器技术进步

3.1 硬件

近年来, 船舶轮机模拟器的硬件技术取得了显著的进展。最初的模拟器主要依赖于简单的微机和数学模型, 仿真效果较为有限。随着计算机性能的持续提升, 尤其是在处理器速度和内存容量方面的飞跃, 现代轮机模拟器能够处理更为复杂的数学模型和实时数据。这些硬件上的进步使得模拟器能够更加真实地再现船舶机舱内的各种操作和故障情景^[5]。现代轮机模拟器可以模拟多种

类型的船舶主机、推进系统和辅助设备，还能提供高分辨率的图像显示和真实的声音效果，从而大幅提升学员的沉浸感和操作体验。

3.2 软件技术

轮机模拟器的内置软件发展同样令人瞩目。早期的模拟器软件主要是基于简单的控制逻辑和静态模型，功能相对单一。随着仿真技术的不断发展，现代轮机模拟器的软件系统已经能够支持高度复杂的动态建模和实时仿真。当前的模拟器软件通常采用模块化结构，能够灵活地根据用户需求进行功能扩展和系统升级^[6]。例如，大连海事大学的 DMS2024A 轮机模拟器软件可以仿真传统的船舶主机到双燃料柴油机等各种船舶推进系统的操作。

3.3 系统集成与智能化

轮机模拟器的系统集成和智能化也是近年来技术进步的重要方向。现代轮机模拟器可以集成整个船舶系统，包括动力系统、电力系统、冷却系统和应急操作系统等。通过高精度的系统集成和智能控制技术，模拟器能够提供全面、逼真的训练环境，使学员能够在复杂的操作条件下进行训练。此外，如果模拟器接入外网，能够实现远程监控和管理，提供更加灵活和高效的培训方案。

3.4 用户界面与交互体验

用户界面和交互体验的提升也是轮机模拟器技术进步的重要方面。早期的模拟器界面较为简单，操作复杂且不直观。如今，现代模拟器通过采用先进的用户界面设计，极大地提升了用户操作的便捷性和直观性。例如，触摸屏、VR 眼镜等设备的应用，使得学员可以更加自然和便捷地与模拟器进行交互，使学员可以在一个沉浸式的虚拟环境中进行训练，大大提升了培训的效果和学员的参与感。

4 国内外发展现状

4.1 国外轮机模拟器发展现状

国外轮机模拟器的研发和应用早于国内，尤其是挪威、波兰、英国等国家的模拟器技术已经发展得相当成熟，以极高的仿真度和灵活的模块化设计著称。波兰的 Unitest 公司作为全球主要模拟器供应商之一，凭借高质量的 3D 仿真和模块化设计在全球市场中占据重要位置。其生产的全任务轮机模拟器支持多种船舶类型和主机型号选择，提供高度仿真操作环境，满足不同级别的培训需求。总部位于土耳其的 GDS 公司专注于开发海事培训模拟器，包括轮机模拟器和其他船舶相关的培训设备。该公司拥有自己的工程建模和分析程序，开发了用于船舶柴油机分析和仿真的数学模型，有助于测试柴油机并将结果与模拟的基准系统进行比较。同时，GDS 可以提供工程平台建模服务，找到能效管理的不足之处，从而实现节约成本，在国际市场上具有一定的影响力。

在技术趋势方面，欧美国家的轮机模拟器正在引入虚拟现实（VR）、增强现实（AR）和人工智能（AI）技术，提高海员培训模拟器的沉浸感和互动性。此外，国外轮机模拟器还特别注重船舶能效管理模块，挪威的 Kongsberg 通过开发用于绿色机舱的最新模拟器来培训具有环保意识的海员，提高船上的防污染操作技能。国外轮机模拟器技术的持续创新，为全球海事教育和培训提供了参考。

4.2 国内轮机模拟器发展现状

近年来，我国在轮机模拟器领域的技术发展取得了显著进步。虽然起步较晚，但凭借持续的研发投入和技术积累，我国的轮机模拟器在仿真精度、系统集成和用户体验等方面已逐步赶上国际先进水平。大连海事大学、上海海事大学和武汉理工大学等知名高校在该领域中发挥了重要作用，成为国内轮机模拟器研发和应用的中坚力量。

大连海事大学作为国内海事领域的双一流高校，其最新的 DMS-2024A 半实物轮机模拟器凭借高精度仿真船舶机舱系统和支持多种船舶类型在国内广泛应用，也在国际市场上赢得了良好的声誉。在仿真精度上，国内产品逐步达到了国际先进水平，并结合本土需求进行了创新优化。其次，国内轮机模拟器逐步实现了自主研发，许多产品已具备自主知识产权，打破了国外技术垄断的局面。目前已经开发出多种船型的轮机模拟器，未来将开发豪华邮轮轮机模拟器，双燃料二冲程柴油机为主机的轮机模拟器等。

5 最新轮机模拟器简介

随着轮机模拟器技术的不断发展，多个机构推出了具备先进功能和高仿真精度的新一代模拟器并在多个方面展现出独特的创新和优势。以下是三款代表性产品的详细介绍。

5.1 Unitest 的 MER3D 型号

Unitest 公司的 MER3D 型号是当前市场上最先进的轮机模拟器之一。该型号获得了挪威船级社的认证，确保其符合国际海事组织（IMO）规定的 STCW 公约标准。MER3D 模拟器以其高精度的 3D 仿真和真实感而著称，能够模拟各种船舶的机舱操作环境。

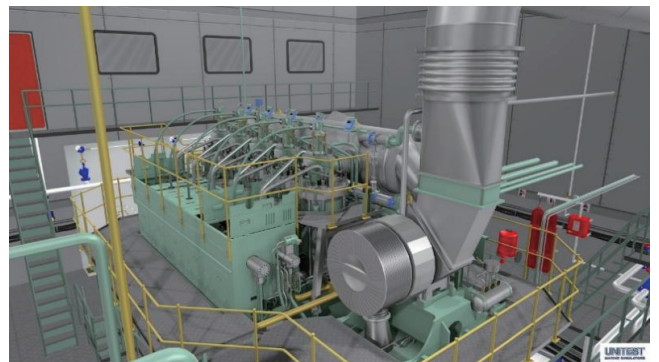


图 2 MER3D 轮机模拟器（UNITEST）

MER3D 的主要特色在于其灵活的模块化设计，允许用户根据培训需求自由配置系统。其仿真引擎可以精确模拟主机、发电机和其他辅助设备的运行状态，提供真实的操作体验。此外，MER3D 还集成了虚拟现实（VR）技术，使学员能够在逼真的虚拟环境中进行互动操作，从而提高学习效果和培训质量。该模拟器的故障模拟功能也十分强大，可以帮助学员提高船上的应急处理能力。

5.2 GDS 的 SERS™ 型号
GDS Engineering 公司的 SERS™ 型号产品获得了包括美国船级社（ABS）在内的多家国际船级社认证，符合国际航运和海事培训的高标准要求。SERS™ 以其综合系统集成和高精度仿真能力受到广泛认可。

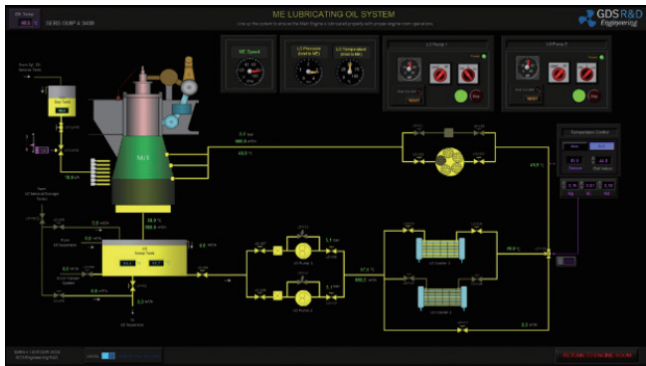


图 3 SERS™ 轮机模拟器滑油系统界面

SERS™ 的独特之处在于其全面的系统集成，涵盖了动力、冷却、电力、液压等多种船舶系统。模拟器的物理引擎能够非常细致地模拟系统的动态响应，特别适合用于复杂操作和故障排除的培训。SERS™ 还引入了增强现实（AR）技术，通过叠加在真实环境中的虚拟信息，进一步增强了学员的操作体验和学习效果。此外，该型号的智能化评估功能可以实时监控学员的操作表现，为学员的培训进行系统评价。

5.3 大连海事大学 DMS-2024A 模拟器

大连海事大学的 DMS-2024A 模拟器是国内自主研发的高端全任务轮机模拟器，已获得挪威船级社（DNV）轮机模拟器 A 级证书，符合 STCW 公约要求。作为国内领先的轮机模拟器产品，DMS-2024A 以其创新的技术和高精度的仿真而受到业界的高度关注。



图 4 DMS 系列轮机模拟器系统目录

DMS-2024A 轮机模拟器的功能与软件技术要求高于当前轮机模拟器的惯例，所有模拟器按实船图纸与影像制作，能够完成实船全任务训练内容。该模拟器满足自适应显示要求、具有评估管理和智能评估功能。其母型船为 30 万吨级超大型油轮，机舱采用低压电力系统，双辅助锅炉设计，主机为 MAN B&W ME 型，满足 NOx Tier II 的最新排放要求，具有极致的经济性、环保性和安全性。

6 船舶轮机模拟器的未来发展趋势

6.1 研究智能船舶与绿色船舶模拟器

未来的轮机模拟器将紧密结合智能船舶与绿色船舶的发展趋势，重点研发适用于新型船舶的轮机模拟器。智能船舶模拟器将集成更多自动化和智能控制技术，增强对现代船舶复杂系统的模拟能力。绿色船舶轮机模拟器将包括氢燃料电池系统和混合动力系统等仿真模型，这些模型能够真实再现新型环保动力系统的运行状态和特点，培养适应航运业未来发展的高素质海员。

6.2 内置虚拟拆装功能的设备模型

未来的轮机模拟器应结合 3D 技术和虚拟现实（VR）技术，实现轮机设备的虚拟拆装功能。这些技术将为学员提供更广泛的实船操作训练，通过使用头盔、数据手套等设备，进行船舶设备的拆装模拟训练。模拟器内置的软件将允许学员对主要设备，如主机、发电机、空压机等进行虚拟拆装操作，提供动态可视化的拆装过程，从而提高实际操作的熟练度和应对复杂情况的能力。

6.3 硬件升级

在硬件升级方面，模拟器需引入更高分辨率的显示屏，提供更清晰的界面。由于仿真模型越来越大，还需升级处理器和图形显卡来支持复杂的 3D 渲染和实时模拟。升级传感器和反馈系统来实现更准确的感应和反馈。同时，改进硬件设备与软件系统的兼容性，让操作响应更加灵敏。

6.4 智能化评估与考试系统

为更好地让适任考试与评估适应国际航运发展的实际需求，应引入人工智能和专家系统，构建智能化的模拟器评估与考试系统。通过实时分析学员的操作数据，模拟器将能够对学员的表现进行更加精准地评估，给出最合适的反馈和改进建议。专家系统将为学员提供个性化的训练计划，帮助他们有效提升操作水平。

6.5 基于云计算的远程培训

云计算技术的快速发展，为轮机模拟器的网络化和远程培训提供了可能。基于云计算的远程仿真平台，可以将轮机模拟器的计算和存储资源集中在云端，学员通过互联网即可访问和操作仿真系统，提高了培训的灵活性。学员可以随时随地进行仿真训练，不再受限于传统