

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.01.003

新型船用中高速机关键制造技术及发展趋势

任建军, 官威, 张博

(沪东重机有限公司, 上海 200129)

摘要: 基于近年来沪东重机有限公司研制新型船用中高速机的历程, 从关键零部件和整机工艺设计、生产制造、总装总调等方面介绍新型中高速机的技术特点。相关技术在 270 柴油机上得到应用验证。验证结果表明, 使用新技术可提高产品质量、缩短装配周期、提升装配效率。对未来发展趋势进行了展望。

关键词: 中高速机; 制造技术; 发展

中图分类号: TK426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2023)01-0016-04

Key Manufacturing Technology and Development Trend of New Marine Medium and High Speed Engines

REN Jianjun, GUAN Wei, ZHANG Bo

(Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

Abstract: Based on the development process of the new marine medium and high speed engine of Hudong Heavy Machinery Co., Ltd. in recent years, the technical characteristics of the new medium and high speed engines are introduced from the aspects of process design, production and manufacturing, and general assembly and adjustment of components and whole engines. Relevant technologies have been applied and verified on 270 diesel engine. The results show that the new technology can improve product quality, shorten assembly cycle and improve assembly efficiency. The trend of development is forecasted.

Key words: medium and high speed engine; manufacturing technology; development

0 引言

据统计柴油机动力占运营船舶动力的 70% 以上, 是船舶主要动力型式之一, 也是最核心的船舶配套设备之一, 对船舶建造和运维影响重大。沪东重机有限公司(以下简称“沪东重机”)是中国船舶集团有限公司旗下中船动力(集团)有限公司下属公司。1958 年沪东重机研制了第一代中速柴油机 E390, 20 世纪 70 年代先后引进 SEMT(现为 MES-Fr)、MTU 等公司第二代船用中高速柴

油机专利, 完成 500 余台(套)各型大功率中高速机的研制和交付工作, 支撑了国家海洋装备建设。自 2013 年起, 沪东重机开始自主研发新型船用中高速柴油机, 并进行产业化布局, 完成 H175 柴油机试验验证并积极开拓市场, 完成 270 柴油机转产研制并开始小批量应用, 完成 M390 系列柴油机研制并实现产业化交付。以“1(75)-2(70)-3(90)”平台为着力点, 沪东重机深耕自主动力研制领域, 逐步突破新型船用中高速机各项制造关键技术, 取得了丰硕的成果。

相对于上一代柴油机，新型船用中高速机具有性能指标优、功率密度大、强化系数大、环保性和经济性水平高等特点，可满足船舶大型化、远洋化、智能化对动力的诸多需求。随着新型中高速机各项性能指标的进一步提升，柴油机的整体结构更加紧凑，机身、缸盖、连杆、活塞等关键件承受的机械负荷和热负荷不断增加，对材质、成型方式以及制造精度等的要求进一步提升。新型中高速机大量采用模块化设计，并配置高效动力单元、高压共轨燃油喷射系统和电子管理系统等，对零部件和整机的制造提出了更高要求，常规的制造技术已经难以满足新型船用中高速机的制造需求，亟须开展新型船用中高速机关键制造技术研究。

1 关键制造技术

围绕新型中高速机制造工艺全流程，沪东重机以“提质、增效、降本”为目标，开展大量的先进制造技术研究，基本构建了满足新型中高速机研制的先进制造技术体系。

1.1 关重零部件制造

1.1.1 复杂薄壁铸件高精度制芯技术

柴油机机体、缸盖等复杂铸件往往存在型芯强度不均匀、型芯退让性大且易变形，装配累积误差大以及因壁厚不均匀导致易产生缩孔、缩松等问题，严重影响产品质量。在新型船用中高速机机体、缸盖铸造过程中，以大型射芯机技术或3D打印技术替代传统手工砂型的造型制芯方法，先后开展薄壁冷芯盒射芯机和3D打印造型、制芯工艺研究，铸造分型、分芯工艺研究等工作；突破射芯机快速造型制芯技术、3D打印造型制芯关键技术；探索制芯、分芯、成型等关键技术；从减小误差以降低收缩倾向的角度，提高铸件尺寸精度和致密性，提高自主中高速机机体、缸盖等关键铸件的尺寸精度和表面精度，同时也兼顾研发和批产对零部件制造的需求。在270柴油机机体、缸盖等铸件上完成应用验证，通过对外形尺寸进行检测和解剖检查，验证产品质量的稳定性。

1.1.2 高爆压钢质活塞摩擦焊技术

新型船用中高速机最高燃烧压力一般达到23 MPa以上，钢顶铝裙或钢顶铸铁裙活塞以常规的螺栓连接已经难以满足具有超高燃烧压力的柴油机的应用和升级需求，沪东重机在研制过程中首次应用一体式摩擦焊钢质活塞设计及制造技术。摩擦焊是固相焊接工艺方法的一种，在轴向顶锻压

力的作用下，将惯性轮存在的动能转化为摩擦焊接所需的热能，实现材料的有效连接，具有焊接质量稳定、成品率高等优点。活塞形状复杂，为多截面焊接，容易产生焊接裂纹或焊后残余应力；存在内部工作油腔，焊后无法进行二次加工和彻底清洁，故较一般工件摩擦焊接难度更大。沪东重机优化活塞结构的设计与制造工艺，设计开发辅助工装，有效控制焊接接头的性能，先后突破非圆/镂空复杂结构焊接成型控制技术、大截面复杂结构焊接接头力学性能控制技术等技术，确保焊接飞边形貌圆滑、均匀，减少焊瘤、焊屑等缺陷的产生，确保摩擦焊接加载及受力的一致性和均匀性，最终保证焊接成型精度和性能指标。一体式摩擦焊钢质活塞样件如图1所示。



图1 一体式摩擦焊钢质活塞样件

1.1.3 关键零部件加工过程自适应控制技术

在柴油机关键零部件的加工过程中，加工设备或加工过程的不稳定或突发故障会对产品质量、加工稳定性、生产效率等产生显著影响。在新型船用中高速机关键零部件加工过程中，通过采用关键零部件自适应加工技术，实现对加工过程状态数据（机床各轴的负载、速度、位置等）与加工设备状态数据（刀具轨迹、程序代码、切削力/功率、主轴转速、进给速率、加速度、刀具编码、刀具长度等）的在线实时采集与分析；实现对制造过程的实时监控，对制造过程中的异常状态（如刀具崩刃、装夹不紧、缠屑、碰刀等）进行报警或基于预设策略的自主处理，保障设备安全，降低质量风险。同时，基于对加工状态监控数据的进一步分析，还可实现对产品质量问题的回溯与工艺优化，建立加工状态信息、加工特征、工艺参数之间的关系，实现加工工艺参数的自主优化。该项技术在270、H175等柴油机机身、连杆等关键零部件的加工过程中得到了应用验证，可提高关键零部件加工质量的稳定性和一致性。加工过程自适应控制技术方案^[1]见图2。

1.1.4 机体关键要素在线测量技术

主轴承孔和凸轮轴孔是柴油机机体加工中的关键要素，属多档长距离孔系，其精度要求非常

严苛，也是柴油机机体加工的难点。采用传统的加工设备配合千分表测量，费时费力且测量精度不能得到保证。沪东重机应用自准直法内孔直线度检测技术，结合高精度工装完成多档长距离孔系加工误差的在线测量与补偿，保证新型船用中高速机机体中主轴承孔和凸轮轴孔的加工质量和精度要求。

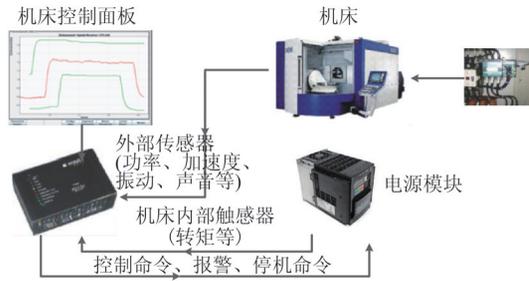


图2 加工过程自适应控制技术方案

自准直法主要利用光线的反射原理（见图3），当反射镜倾斜一个微小角度 α 时，反射回来的光束倾斜 2α ，通过计算可得出较为精确的偏差值。对机体主轴承孔和凸轮轴孔进行测量时，反馈数据为多档长距离孔系的加工误差，可根据该偏差值调整数控程序，以满足机体对多档长距离孔系的加工精度要求。应用自准直法内孔直线度检测技术，根据孔系的精度要求配置相应的自准直仪，并根据孔系结构特征和精度要求设计专用高精度工装。在对多档长距离孔系进行精加工前，须在考虑留一定余量的前提下完成孔系的半精加工；在工件上安装检测设备与工装，对孔系精度进行照光检测；对检测数据进行计算，并按计算结果对孔系加工程序进行优化。多档长距离孔系加工误差在线测量与补偿技术在新型船用中高速机机体加工中的应用，优化了零件的制造、生产过程，使加工质量得到保证。

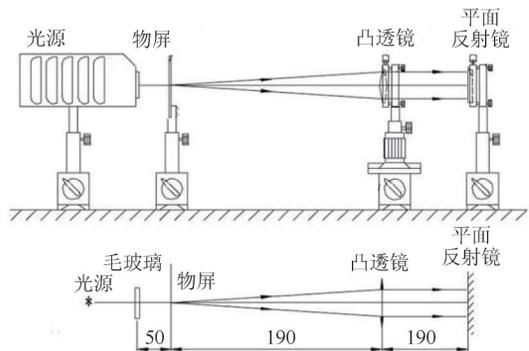


图3 自准直法检测原理示意图

1.2 整机装配和调试

沪东重机以提升装配过程的生产组织协调性、

缩短台位占用周期、提升整机装配及调试效率为目标，在新一代船用中高速机的制造过程中，结合生产实际需求，重点开展脉动式装配生产线及数字化管控系统构建、基于激光对中仪的快速对中测量及试车数据集中监控技术的研究及应用等工作。

1.2.1 脉动式装配生产线及数字化管控系统构建

船用柴油机制造行业采用的传统“岛式”装配模式存在生产组织混乱、工序间协同性较差、生产资源利用率低、装配质量不稳定等问题。以提升新一代船用中高速柴油机小批量生产能力为目标，在传统“岛式”装配模式的基础上，通过重塑柴油机装配工艺流程和生产组织模式、生产节拍划分、站位布局优化、制造资源配置优化、脉动式装配生产线仿真及平衡优化等，构建以“准时化”生产^[2]为核心的船用柴油机脉动式装配生产线管控系统，研究及应用脉动式装配生产线健康管理等技术。

以270柴油机装配生产线为例，通过构建以“准时化”生产为核心的船用柴油机脉动式装配生产线及其数字化管控体系，实现新一代船用柴油机装配过程的站位式管理，具有分工精细化、动作标准化、物料精确到位、节拍均衡、装配效率高等优点。

1.2.2 基于激光对中仪的快速对中测量技术

柴油机及测功器的连接主要采用弹性联轴节，轴系连接一般使用“直线校中”法，借助轴上法兰偏移及开口进行轴系安装，力求各轴承中心在一条直线上。通过调整测功器位置，使用百分表或者深度尺测量轴上法兰平面和柴油机输出端飞轮平面的偏移及开口量，使偏移及开口量满足设计要求，再进行轴系安装连接。此操作方法存在安装精度低、对操作人员技能要求高、安装周期长等问题。针对上述问题，开展基于双激光对中仪的轴系对中连接技术攻关。在进行轴系对中连接时，在两个法兰上各安装1个激光测量单元，只须通过在联轴器上转动相隔角度相同的3个点，通过测量3个点所在的两轴的径向位移偏差，即可计算出两个旋转轴的中心线在垂直方向和水平方向的空间位置，并给出可调整设备前后地脚的调整量^[3]。同时，在调整过程中能实时看到轴系偏差状态及数据，根据测量结果以及调整值实时对轴系进行位置调整，直至达到要求。相对于传统的“直线校中”方式，新的测量方法精度高、效率高，对人员的技能要求低。基于激光对中仪的快速对中测量示意图见图4，图中红色圈中的数字指示如下：①为用于以2-D同时显示水平和垂直地脚结

果；②为仅用于显示垂直地脚结果；③为仅用于显示水平地脚结果；④为用于以2-D显示地脚结果⑤为用于以3-D显示地脚结果；⑥为启动实时移动；⑦为用于生成资源测量报告；⑧为用于在资源库中保存资源测量；⑨为选择结果模式；⑩为点击机器图标上的滑块可打开机组管理器、机组设置、机组固定等3个屏幕；⑪为对中状态容差图标。

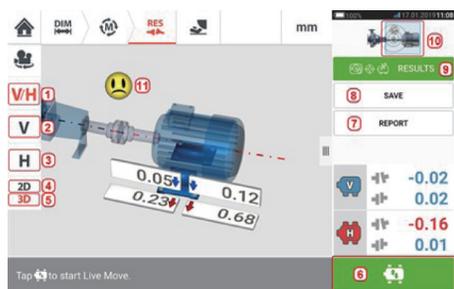


图4 基于激光对中仪的快速对中测量示意图

1.2.3 试车数据集中监控技术

在新一代船用中高速机的台位试验环节，为了缩短台位占用周期、提升试验效率，通过对柴油机试车试验的主机控制系统、柴油机介质辅助系统及测功器控制系统进行升级改造，借助系统传感器等电气设备获取相关数据并进行数据的采集、汇总，搭建一个集中控制测试平台。整合中高速柴油机试车调试的各个控制系统，对柴油机多目标要素的运行情况进行在线监控，实现柴油机多目标要素的数据采集、数据处理、数据分析、状态判断及远程精确控制。柴油机试验台数据采集技术方案如图5所示，该技术在270柴油机试车过程中得到应用验证，可大幅缩短试车台位占用周期。

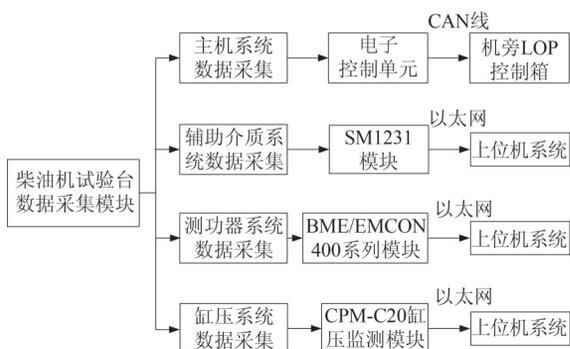


图5 柴油机试验台数据采集技术方案

2 未来发展趋势

现阶段依然存在的生产模式落后、工艺装备效率低等问题制约着船用动力装备批产效率的进

一步提升，无法满足客户对船用动力装备高质量、高效率、低成本批量交付的需求。未来将针对上述问题，在传统生产模式及工艺的基础上，逐步开展数字化、网络化、自动化、智能化制造技术的研究及应用，进一步提升新型中高速机的制造效率及质量稳定性。

2.1 面向船用柴油机制造工艺全流程的智能车间关键技术研究

对标国际先进的精益制造工艺，基于工业机器人等智能化工艺装备，采用模型/知识驱动的智能工艺设计及基于数字孪生的制造过程智能化管控等技术，构建面向船用柴油机制造工艺全流程的智能车间。该举措可实现制造过程闭环管控和自适应控制，提高制造效率和质量稳定性，实现船舶动力由“数字造机”向“智能造机”的转变。

2.2 船用柴油机供应链高效协同关键技术研究

船用柴油机制造具有制造流程长、供应链协作范围广的特点，目前以关键零部件为主的产业链未形成有效协同，影响整机制造效率。针对上述问题，开展船用柴油机供应链高效协同技术研究，在主机厂与配套商之间实现在关键零部件研发、制造及维保等方面的数字化交付及网络化协作，从而大幅提升船用柴油机整体研制效率。

3 结论

我国船用中高速柴油机制造主要采用“经验+试验”的模式，尚未形成完善的先进制造工艺技术体系。这主要体现在设计与制造协同性差，材料及工艺基础数据库不健全，关键工艺环节自动化装备、数字化检测、数字化管控等技术供应不足等，柴油机制造质量、制造周期及成本有待进一步提高。针对上述问题，沪东重机以新型船用中高速机研制为契机，开展零部件和整机制造关键技术研究并实现突破，大幅提升柴油机的质量稳定性及综合制造效率。

参考文献

- [1] 叶文华. 数控机床加工过程自适应控制技术学术研究报告 [C] //中国机械工程学会机械自动化分会和中国自动化学会制造技术专委会学术工作进展报告, 2017.
- [2] 方水良, 刘猛男, 鲜果, 等. 飞机移动装配线: 脉动与续动 [J]. 航空制造技术, 2021, 64 (16): 40-50.
- [3] 王涌鹏. 高精度长焦距测量系统安装误差分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.