



黄立
中国船舶集团有限公司首席专家
上海船用柴油机研究所副总工程师，研发中心主任
享受国务院政府特殊津贴

专栏主编简介

黄立研究员于1990年7月毕业于哈尔滨船舶工程学院（现为“哈尔滨工程大学”），长期在船用柴油机领域从事研发工作，主要研究方向为船用中高速柴油机、气体发动机等的关键技术研究 and 产品开发。黄立研究员带领团队建立了先进的船用柴油机研发体系，完成某船用中高速柴油机系列的自主研发工作，实现了跨越式发展。

专栏主编观点

大功率船用中高速机是船舶及海洋装备的核心配套设备，是国家实施海洋强国战略的基础和重要支撑。

经过多年的引进、消化吸收和自主创新，我国船用中高速机正从“专利引进”向“自主研发、自主品牌”的目标快速转型。近年来，我国已成功研制一批拥有自主知识产权的高性能新型船用中高速发动机产品，总体技术达到国际先进水平，形成7个新型船用中高速机产品系列，缸径覆盖170 ~ 390 mm，功率覆盖800 ~ 16 000 kW，产品可满足各类船舶、海工、陆用发电等领域的市场需求。

新型船用中高速机的自主研发带动了关键配套产业的快速发展。相关配套企业的研发条件、研发能力、人才队伍等都得到快速提升。各配套企业通

过许可证引进及国产化攻关，形成了独特的生产制造模式和配套体系，机体、曲轴、连杆、缸盖等主要铸锻件的自主供应能力快速提升；高压共轨、电控系统、增压器、排放后处理、燃气喷射阀、电子调速器等核心配套件打破国外垄断，自主研发和制造能力不断增强。

在IMO温室气体减排战略和我国“双碳”战略目标的推动下，我国船用中高速柴油机产业又迎来了转型发展的重大机遇和挑战，绿色低碳已成为船用中高速机行业未来的发展方向。

船用中高速机专栏将从新型船用中高速机自主研发、关键配套件研制以及船用中高速机绿色低碳发展等3个方面，邀请行业相关专家分析我国船用中高速机行业自主研发现状，展望未来技术及产品发展方向。

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.01.001

新型船用中高速机自主研制现状与展望

黄立^{1,2}, 张东明^{1,3}, 张学艳¹, 周洲¹, 沈翔¹

(1. 上海船用柴油机研究所, 上海 201108; 2. 上海交通大学, 上海 200240; 3. 天津大学, 天津 300072)

摘要: 基于我国大功率船用中高速机的发展背景与历史, 介绍我国新型船用中高速机自主研制的现状。详细介绍6个已发布的机型及其主要技术参数, 包括功率、燃油系统模式、平均有效压力、燃油消耗率等, 以及每种机型的适用领域。指出在航运业温室气体减排的大背景下, 低碳、碳中和、零碳燃料是船舶实现碳减排和碳中和的可行途径。

关键词: 中高速机; 自主研发; 低碳; 燃料

中图分类号: TK421 文献标志码: A 文章编号: 1001-4357(2023)01-0002-06

Status and Prospect of Independent Development and Manufacturing of New Marine Medium and High Speed Engines

HUANG Li^{1,2}, ZHANG Dongming^{1,3}, ZHANG Xueyan¹, ZHOU Zhou¹, SHEN Xiang¹(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China;
2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the development background and history of high power medium and high speed marine engines in China, the current situation of independent development and manufacturing of new marine medium and high speed engines in China is introduced. The six released models and their main technical parameters are introduced in detail, including power, fuel system mode, mean effective pressure, fuel consumption rate, and the applicable fields of each model. It is pointed out that in the context of greenhouse gas emission reduction in the shipping industry, low-carbon, carbon-neutral and zero-carbon fuels are the feasible way for ships to achieve carbon emission reduction and carbon-neutral.

Key words: medium and high speed engine; independent research and development; low carbon; fuel

0 引言

大功率船用中高速机是船舶及海洋装备的核心配套设备, 是为内河、沿海、近海和远洋船舶、

海洋开发以及国防建设提供原动力的关键设备, 是国家实施海洋强国战略的基础和重要支撑。

改革开放以来, 我国船用中高速机产业结构发生了重大转变, 发展重点逐渐由军事领域转向

民用领域，并掀起了专利引进的热潮。这段时期共引进包括德国MAN、日本DAIHATSU、法国PIELSTICK、德国MWM的中高速机许可证机型22个系列，缸径范围为128~400 mm，功率覆盖91~12 000 kW，基本满足我国船用中高速柴油机的市场需求^[1]。经过多年引进、消化和吸收，我国船用中高速机逐步从“专利引进”向“自主研制、自主品牌”的目标快速转型。近年来，我国更加注重船舶动力自主研制，相继成功自主研制了一系列具有自主知识产权且可达到国际先进水平的新型高性能船舶中高速柴油机产品。

1 新型船用中高速机自主研制现状

目前，我国新型船用中高速机自主研制产品共计包括7个缸径系列，分别为170、175、210、230、270、320、390 mm，功率范围为800~17 000 kW，产品可覆盖远洋、近海、内河、海工、陆用发电等领域的市场需求。

这批新型大功率中高速机具有的典型技术特点为：整机最高燃烧压力、机械负荷和热负荷承受能力显著提升；普遍采用电控高压共轨燃油喷射、高增压、米勒循环燃烧等先进技术；增压器、喷油系统、轴瓦等自主核心配套件的设计与制造也有突破。采用上述技术后，新型船用中高速机的各项技术指标均达到国际先进水平：强化度达32 MPa·m/s，增压器压比突破5.5，燃油喷射压力最高达180 MPa，整机最高燃烧压力可达25 MPa，平均有效压力可达3 MPa。

1.1 CS21系列中速机的自主研制

2008年，上海船用柴油机研究所作为主要研制单位，对标国际先进产品，启动了210 mm缸径船用中速机的自主研制。研发团队先后攻克了基于通用化及模块化的系列化总体设计、考虑低速大转矩的全工况性能优化、柴油机与SCR一体化等多项关键技术，形成了系列化设计技术体系，成功研制了单缸功率为220 kW的CS21系列中速机产品，并在上海港港作拖船上装船应用，实现了自主品牌船用大功率柴油机“从无到有”的突破。该机强化指标达到28 MPa·m/s，其研制成功预示着我国高性能船用大功率柴油机的自主研发与制造正式拉开了序幕。CS21系列船用中速柴油机见图1。

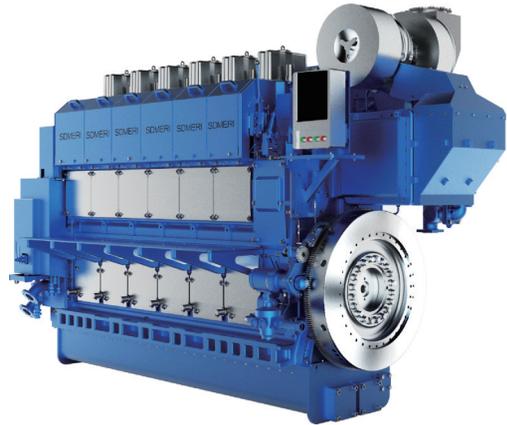


图1 CS21系列船用中速柴油机

CS21系列柴油机缸径为210 mm，冲程为320 mm，额定转速为1 000 r/min和900 r/min，系列化机型包括6/8/9缸产品，功率范围覆盖1~2 MW。按照供油系统的不同，CS21柴油机分共轨、机械燃油系统两个版本，主体结构具备承受25 MPa燃烧压力的能力，国产化率超过90%，达到同类产品国际先进水平。这款自主品牌中速机可用做各类客滚船、拖船、近海渔船、海监船、沿海/近海散货船、半浅船的推进主动力，也可作为发电机组原动机用于各支线集装箱船、16万t级油船和10万t级散货船等远洋船舶。

2017年CS21中速机应用于上海港港作拖船，截至目前CS21中速机运行时间已超过13 000 h。CS21系列中速机主要技术参数如表1所示。

表1 CS21系列船用中速机主要技术参数

项目	参数
型式	直列四冲程、增压中冷
燃油系统	机械/电控共轨
缸数	6/8/9
缸径/mm	210
行程/mm	320
额定功率/kW	1 320/1 760/1 980
单缸功率/kW	220
额定转速/(r·min ⁻¹)	900/1 000
平均有效压力/MPa	2.38
燃油消耗率/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	195
最高燃烧压力/MPa	25
排放水平	IMO Tier II

为了适应未来清洁燃料应用的需求，2014年上海船用柴油机研究所组织行业内优势企业，自主研制了CS23G大功率船用天然气中速机，见图2。2018年产品发布，首台套应用于广西涠洲岛陆用发电。

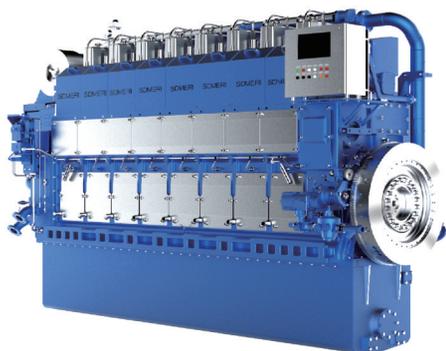


图2 CS23G 气体燃料发动机

CS23G 大功率船用天然气中速机以 CS21 柴油机为原型机进行扩缸设计, 通过采用多点喷射、预燃室高能点火、空燃比精确控制等技术, 实现了高效稀薄燃烧、热负荷控制等, 达到了高热效率、低排放、本质安全型天然气发动机的设计目标。该系列气体机单缸功率达到 200 kW, 排放满足 IMO Tier III 要求, 平均有效压力达到 1.8 MPa 的国际先进水平, 其主要技术参数如表 2 所示。该系列气体机可用于天然气加注船、LNG 运输船、拖船、公务船、内河运输船、沿海运输船以及陆用电站。

表 2 CS23G 系列气体燃料发动机主要技术参数

项目	参数
型式	直列四冲程、增压中冷
燃油系统	多点电喷
缸数	6/8/9
缸径/mm	230
行程/mm	320
额定功率/kW	1 200/1 600/1 800
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
单缸功率/kW	200
平均有效压力/MPa	1.8
最高燃烧压力/MPa	16
气耗率/(kJ·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	8 750
排放指标	IMO Tier III

1.2 CS27 系列中速机的自主研制

2018 年, 上海船用柴油机研究所联合陕西柴油机重工有限公司自主研制了运行和维护成本低、环境友好型 CS27 系列智能型中速机, 旨在为客户提供全生命周期绿色、高效、可靠、智能的船舶动力解决方案。

CS27 智能型中速机为直列、四冲程、高增压、电控柴油机, 缸径为 270 mm, 冲程为 390 mm; 采用新型电控高压共轨燃油系统, 最高燃油喷射压力可达 180 MPa; 基于可调增压、可变配气等柔性可

控技术, 通过全工况动力性、经济性和排放性最优化设计, 单缸最高功率达 418 kW, 平均有效压力达 3.0 MPa, 最低燃油消耗率为 180 g/(kW·h) (带泵油耗), 排放可满足 IMO Tier II 和 GB 15097—2016 (第二阶段) 排放法规要求, 技术指标达到同类产品国际先进水平。客户根据自身需求还可选配对燃烧室、主要摩擦副、高压共轨和增压器等关键系统进行故障诊断和状态评估的附加配置, 从而进一步提升产品可靠性, 大幅降低维修成本。其主要技术参数如表 3 所示。

表 3 CS27 智能中速机主要技术参数

项目	参数
型式	直列四冲程、增压中冷
燃油系统	电控高压共轨
缸数	6/8/9
缸径/mm	270
行程/mm	390
额定功率/kW	2 280/3 040/3 420
额定转速/(r·min ⁻¹)	720/750
最高平均有效压力/MPa	3.0
单缸额定功率/kW	380
单缸超负荷功率/kW	418
最高燃烧压力/MPa	24
最低燃油消耗率/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	180 (带泵油耗)
排放指标	GB 15097—2016 (第二阶段), IMO Tier II

CS27 系列化机型包括 6、8、9 缸产品, 功率范围覆盖 2.0~3.5 MW, 可满足大型科考船、拖船、公务船、疏浚工程船、三用工作船、滚装船、油船、散货船及集装箱船等各类沿海、近海和远洋船等的不同动力需求, 见图 3。



图3 CS27 船用中速柴油机

1.3 ACD320 系列中速机的自主研制

2013 年, 安庆中船柴油机有限公司 (以下简称“安柴”) 历时 4 年成功研制了具有自主知识产

权的ACD320大功率气体燃料发动机，见图4。ACD320气体发动机缸径为320 mm、行程为420 mm、单缸功率为405 kW、额定转速为750 r/min、平均有效压力为2.0 MPa、热效率（设计值）为47.2%，在不加装SCR后处理装置的情况下即可满足IMO Tier III排放法规。这款发动机体现了创新的设计理念，具有低碳、环保、高效等诸多优点，其主要技术参数如表4所示。

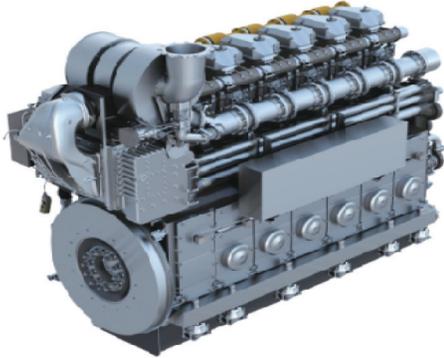


图4 ACD320气体燃料发动机

表4 ACD320气体燃料发动机主要技术参数

项目	参数
型式	直列四冲程、增压中冷
燃油系统	多点电喷
缸数	6
缸径/mm	320
行程/mm	420
额定功率/kW	2 430
额定转速/(r·min ⁻¹)	750
平均有效压力/MPa	2.0
单缸额定功率/kW	405
热效率（设计值）/%	47.2
排放指标	IMO Tier III

在气体机基础上，2017年安柴发布了ACD320DF双燃料发动机。该型机采用微引燃共轨系统、单体泵主燃油喷射系统、多点式燃气供应系统、ECU控制系统等多项先进技术。通过精确控制空燃比、各缸燃烧压力和点火正时，实现各缸单独控制，有效提高各缸性能和发动机的可靠性。ACD320DF是一款高性能、绿色、环保的双燃料四冲程发动机，其各项技术指标均达到设计要求。

2020年，安柴启动了ACD320柴油机研制项目。该款柴油机缸径为320 mm、行程为420 mm、单缸功率为500 kW、转速为720 r/min或750 r/min。该机具有燃油及滑油消耗率低、可燃380 cSt/50℃

(1 cSt=1 mm²/s)重油、满足IMO Tier II排放要求等诸多优点。

1.4 M390系列中速机的自主研制

2012年，沪东重机与中船动力研究院有限公司成功研制12MV390中速柴油机，如图5所示。该型中速机采用电控共轨燃油系统和高效增压技术，缸径为390 mm、冲程为550 mm、额定转速为600 r/min、最高燃烧压力为25 MPa、单缸功率为850 kW、整机额定功率为10 200 kW，其系列化产品可覆盖17 MW功率需求（功率可达17 MW）^[2]。整机结构紧凑，机带高低温水泵、滑油泵、燃油泵、自清式滑油滤器，采用了高刚性一体式球墨铸铁机架、全平衡曲轴和球墨铸铁气缸盖等设计，有效降低了整机的振动噪声。由于采用高效高压比涡轮增压器、两级空气冷却器和第三代高压共轨燃油系统，燃油消耗率能够控制在175 g/(kW·h)（不带泵），其主要技术参数如表5所示。该型机可用于远洋大型工程船舶、豪华邮轮、海工平台和大型陆用电站、核电站。

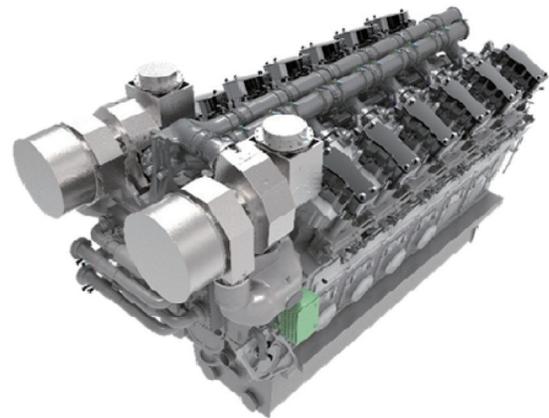


图5 12MV390船用中速柴油机

表5 12MV390中速机主要技术参数

项目	参数
型式	直列四冲程、增压中冷
燃油系统	电控共轨
缸数	12
缸径/mm	390
行程/mm	550
额定功率/kW	10 200
额定转速/(r·min ⁻¹)	600
平均有效压力/MPa	2.59
单缸额定功率/kW	805
最高燃烧压力/MPa	25
油耗率/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	175（不带泵）
排放指标	IMO Tier II/III（后处理）

1.5 CS175系列高速机的自主研制

国外大功率船用高速机总体发展趋势是高功率密度、智能化、低油耗、高可靠性^[3]，代表机型包括MTU的4000系列，Caterpillar的175系列，MAN的175D高速机和Cummins的QSK95等。

2018年，上海船用柴油机研究所联合行业优势配套企业，自主研制4 MW级CS175系列新型大功率船用高速机，见图6。目前产品处于可靠性验证阶段，预计在2023年可获得船级社产品认证并进行市场推广。这款新型船用高速柴油机同样采用电控共轨喷射、高增压、米勒循环等先进技术，缸径为175 mm，额定转速为1 800 r/min，排放满足IMO Tier II及GB 15097—2016（第二阶段）法规要求，各项技术指标均达到国际先进水平。



图6 CS175高速柴油机

CS175系列大功率船用高速机机体采用挂式主轴轴承结构，集成式缸套冷却腔，整体锻钢曲轴，独立式平衡重，4台增压器同时为V型机两列气缸提供进气，机带附件尽可能布置在柴油机自由端和柴油机两侧，便于维护保养的同时，也保证整机的紧凑性。该型高性能大功率船用高速机可广泛应用于公务船（海警巡逻艇、执法船）、高速渡船、单体船、双体船、游艇等。

1.6 CHD622系列高速机的自主研制

2015年，河南柴油机重工有限责任公司（以下简称“河柴”）成功研制了自主品牌CHD622V20CR柴油机，见图7。该机缸径为170 mm、冲程为215 mm、额定功率为3 200 kW，采用电控高压共轨技术，零部件具有强承载能力，燃烧系统设计优良，整机运行平稳。由于采用“HALLO高低负荷最优化涡流”技术，CHD622柴油机能够在标定功率的20%以上负荷长期连续运行。

河柴已具备小批量生产该机的条件，并与俄

罗斯客户陆续签订了70台（套）CHD622V20柴油机销售合同。到目前为止，该机单机最长运行时间为6 000 h，运行良好。河柴现已完成CHD622V20、CHD622V20CR、CHD622V16、CHD622L6柴油机系列化研制，扩展了柴油机功率覆盖范围。CHD622系列柴油发动机可广泛应用于船舶、发电机组、机车、工程机械等领域。

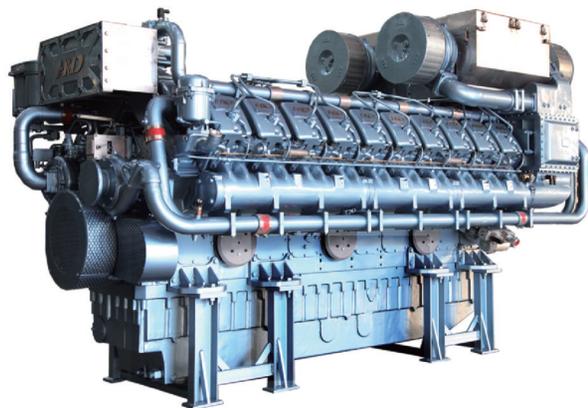


图7 CHD622高速柴油机

2 新型船用中高速机核心配套部件现状

21世纪以来，随着我国新型船用中高速机自主研制进程的推进，核心配套产业也得到快速发展。各生产企业通过许可证引进及国产化攻关，形成自有的一套生产制造模式和配套体系，机体、曲轴、连杆、缸盖等中高速机主要关重铸锻部件的自主供应能力快速提升。高压共轨、电控系统、增压器、排放后处理系统、燃气喷射阀、电子调速器等核心配套件的自主研发和制造能力不断增强，打破了国外垄断的局面。例如：上海船用柴油机研究所自主研发的电控高压共轨喷射系统最高喷射压力达到180 MPa；重庆跃进研制的高性能轴瓦钢背材料屈服强度达到350 MPa，相比传统材料提升了30%；重庆江增自主研发的JTH系列增压器最高压比达到了4.7，CTA系列增压器最高压比达到了5.5。部分高端配套件产品已进入中高端市场，中高速大功率柴油机装机国产化率达到80%。这些核心配套件的质量一致性和实船应用可靠性将是未来配套企业研究和攻关的重点。

3 船用中高速机未来发展趋势

为加快航运业温室气体减排步伐，国际海事组织于2018年制定温室气体减排初步战略，该战略要求2030年国际航运碳排放强度相比2008年至

少降低40%，2050年力争降低70%，且2050年年度温室气体排放总量相比2008年至少降低50%。2020年9月22日，习近平主席在第七十五届联合国大会上宣布中国将力争于2030年前达到二氧化碳排放峰值，并努力争取于2060年前实现碳中和。

在此背景下，温室气体减排已成为国际社会共同努力的方向，碳减排也成为船舶发动机技术发展的重要方向。低碳、碳中和、零碳燃料是船舶实现碳减排和碳中和最有效、最根本的途径。通过使用LNG、甲醇、氨、氢等燃料，船舶可以实现大幅碳减排甚至碳中和。航运业脱碳转型将促进氢、氨发动机等新兴能源动力的技术发展与变革，对以低碳燃料（天然气、醇类燃料、醚类燃料等）、碳中和燃料（生物燃料、合成甲醇、合成LNG等）、零碳燃料（氢、氨、电能等）等为清洁燃料的船用发动机来说既是挑战也是机遇。

当前，国外发动机低碳、碳中和、零碳技术的研究与应用尚处于初级阶段，为我国在这一领域实现技术引领提供了战略机遇。

4 结论

(1) 近年来，在国家政策的引领下，我国

船用中高速发动机产业整体研发及制造能力取得了长足发展，已经自主研制出功率能够覆盖800~17 000 kW，具有国际先进水平的新型船用中高速机系列产品，具备了参与国际船用中高速机技术和产品竞争的基础条件。

(2) 在新型船用中高速机零部件及核心部件配套方面，我国实现了80%以上的零部件国产化，其中电控高压共轨系统、增压器、曲轴、轴瓦等核心配套件均已实现国产化。

(3) 温室气体减排已成为船舶行业共同努力的方向，低碳、碳中和、零碳燃料等清洁燃料在船用中高速机上的应用对船舶行业而言既是挑战也是机遇。未来船用中高速机必须更加环保才能满足新法规和市场的需求，抢抓“双碳”发展机遇将成为船用中高速机自主研制的重要方向。

参考文献

- [1] 时志刚，刘啸波. 世界舰船柴油机技术发展回顾与展望[J]. 舰船科学技术, 2012, 34 (3): 137-139.
- [2] 李帆，钱德英，刘利军. 10 MW级中速大功率柴油机开发[J]. 柴油机, 2017, 39 (5): 1-4, 11.
- [3] 敖晨阳，徐飞，霍柏琦. 国外舰船柴油机发展现状与趋势[J]. 舰船科学技术, 2013, 35 (12): 1-4, 16.