

对自主研发舰船柴油机的几点思考

陈华清

(海军装备技术研究所, 北京 102442)

摘要: 从技术性能和动力政策两方面阐述了舰船柴油机选型论证须考虑的主要因素。对国外舰船柴油机动力的需求和技术发展趋势进行了分析, 总结了这种趋势对我国发展舰船柴油机的启示。在此基础上, 提出了我国自主研发舰船柴油机须关注的主要问题。

关键词: 舰船柴油机; 自主研发; 动力政策

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)05-0001-05

Several Thoughts on Independent Research and Development of Warship Diesel Engines

Chen Huaqing

(Navy Equipment Technology Institute, Beijing 102442)

Abstract: The main factors involved in the type selection of warship diesel engines are expounded from the two aspects of technical characteristics and naval vessel power policy. The power requirement of foreign warship diesel engines as well as the technology development tendency are analyzed. Moreover, how to develop our own warship diesels with reference to the above mentioned tendency are concluded. Based on the study, the main issues in self-development of our own warship diesel engines which need to pay attention to are proposed.

Key words: warship diesel engine; independent research and development; power policy

0 引言

我国是造船大国, 造船总量位居世界前三甲, 但我国不是造机大国, 除部分内河船舶采用国内自行设计的柴油机外, 其它船舶(含海军舰船)几乎都采用国外品牌的柴油机。这些柴油机要么是引进国外生产许可证、国内生产制造的, 要么是整机引进的。虽然我们引进了国外几乎所有先进柴油机的生产许可证, 但并未实质性地改变我国舰船柴油机落后于人、受制于人的被动局面, 立足国内研制自主品牌的舰船柴油机已到了刻不容缓的程度。

1 舰船柴油机论证选型须要考虑的主要因素

由于在狭小空间和海洋环境下工作, 船用柴油机一般应具有功率密度大、抗摇摆、海淡水冷却、对外散热少、耐海水和海洋环境腐蚀、振动噪声小、可承受3~5 kPa背压、维修方便等基本特征。舰船用柴油机更看重以下特性: 一是功率密度。海军舰船, 特别是驱护舰的机舱更为狭小, 必须在更小的空间内达到所需要的功率。二是机动性能与瞬态性能。如突加速性能、突加负荷性能、调速性能。三是振动噪声。柴油机的振动噪声直接影响舰船的隐身性能, 必须重点关注。四是抗冲击性能。陆用或民船用柴油机对抗冲击性能没有明确要求,

而舰船柴油机在作战环境下使用，必须达到规定的抗冲击性能。五是负荷特性。对舰船柴发机组，要求柴油机在 10% ~ 20% 负荷下有长期运行能力；对舰船主机，要求柴油机在高转速时有较好的超负荷能力，在中低转速区域有宽广的运行区。六是可靠性、维修性、保障性。舰船长期在海上航行，对柴油机的可靠性要求非常高。平时操作舰船柴油机的不是专业技师，而是大多具有中学学历的士官，柴油机易于维修、保障非常重要。让部队熟悉一型柴油机的使用管理，并建立一套完整的维修保障体系，需要较长时间的积累。七是动力政策的继承性。一型舰船用柴油机从开始应用到淘汰，一般要经历 40 年以上的时间，没有大的问题轻易不会更换。绝对不是有一款新机型出来，马上就用新机型替换旧机型。动力政策的连贯性是舰船动力选型的关键因素。八是特殊需求。比如潜艇用柴油机的排气背压要求达到 65 kPa，猎扫雷舰艇用柴油机要求低磁性等。与此同时，一些民用柴油机非常重要的指标，如油耗、排放等，舰船柴油机并不特别看重。

2 国外舰船柴油机发展的启示

2.1 舰船柴油机动力发展路线

由于海军舰船类型众多，军辅船可选用民船用柴油机，所以驱护舰柴油机的选用原则就决定了一个国家舰用柴油机的动力政策。从国外看，驱护舰柴油机大致有三种发展思路：一是以德国 MTU 公司为代表，发展以海军用为主的高速柴油机。典型机型是 MTU396/956/1163/4000/8000 系列柴油机。这些机型是典型的以海军驱护舰（含潜艇）、准军用船舶、民用快船为应用对象，已在全世界舰船范

围内得以广泛应用。同时，通过变型设计，在民用市场上也得以广泛应用。二是以法国 Pielstick 公司为代表，发展军民通用的中高速柴油机。典型机型是 PA6 系列柴油机，该机型在满足驱护舰基本使用要求的同时，还考虑铁路、商船、陆用电站等的使用要求。三是以 MAN 公司和 Warsilla 公司为代表，发展以民为主的柴油机。立足民用，逐渐向海军非作战舰艇渗透。特别是随着驱护舰由传统的机械推进模式向柴电燃或综合电力系统推进模式发展，MAN 公司和 Warsilla 公司的产品在海军舰艇上开始得到应用。

2.2 舰船柴油机需求的变化

国外驱护舰大致有四种动力型式：一是全燃动力。柴油机主要是用作发电机组，应用最为广泛的是 MTU396 柴油机，单机组功率一般在 1 500 kW 以下。二是柴燃联合动力（CODOG/CODAG），这是驱护舰应用最多的动力型式。典型应用是 MTU956/1163/PA6 柴油机（巡航主机）和 MTU396 柴油机（发电机组）。三是全柴动力。主要用于 3 000 t 以下的护卫舰。应用较多的机型是 MTU1163/8000 或 PA6/PA6BSTC 柴油机。四是综合电力系统或柴电燃动力（CODLAG/CODLOG）。柴油机主要用于发电，舰船由电力推进。从国外驱护舰的应用情况（见表 1）看，柴电推进的功率一般都不大，柴发机组的单机功率一般为 1.5 ~ 3 MW，超过 3 MW 的柴油发电机组就很难配置（国外一般选用 Paxman 或 Warsilla 高速柴油机）。柴油发电机组的数量一般为 4 台，电力推进的设计航速（也就是舰艇的巡航航速）一般为 15 节左右。

表 1 国外典型舰艇的动力方案

国家	型号	满载排水量/t	航速/kn	续航力/（海里）	动力方案	建造年代
英	45	7 200	29	7 000/15	综合电力推进：2 台 WR-21 燃机，2 台 2 100kWWarsilla12V200 柴油机组	2010 年
法意	地平线	6 100	30	7 000/18	三个方案：1）CODLAG：2 台燃机（18MW），4 台柴油机（2600kW），2 台电机（3300kW），双轴。2）CODLOG：2 台燃机（21MW），4 台柴油机（1300kW），2 台电机（1000kW），双轴。3）CODOG：2 台燃机（21MW），2 台 12PA6BSTC 柴油机。最终选择方案三。	2007 年
英	公爵（23）	4 200	28/15	7 800/15	CODLAG：2 台斯贝燃机，4 台 Paxman1500kW 柴油机。2 台 1500kW、750V 直流推进电机，定距桨。	1985-2002 年
德	F125	6 800	26	/20	CODLAG：1 台 20MW 燃机，4 台 2900kW 柴油发电机组，跨接齿轮箱，调距桨。	2010 年
法意	FREMM	~5800	27/15.5	6 000	CODLAG：1 台 30MW 燃机，4 台 2100kW 柴油发电机组，跨接齿轮箱，定距桨（法）或调距桨（意）。	2007 年

从国外舰艇动力发展趋势可以看出：越来越多的驱护舰和大型舰艇（如两栖攻击舰）采用了综合电力系统或柴电燃动力型式。以前的驱护舰采用柴燃或全柴动力，一般会依赖 MTU956/1163 或 PA6 这种大功率柴油机。而采用综合电力系统或柴电燃混合推进之后，舰艇对柴油机的使用就可以有多种选择。驱护舰柴发电机组一般采用高速柴油机，如 Warsilla200、Paxman、MTU4000 柴油机，机组功率不超过 3MW；大型舰船（如两栖攻击舰、航母等），柴发电机组一般采用中速或中高速柴油机，如 Warsilla26 柴油机（转速 $1\,000(r \cdot \min^{-1})$ ）、32 柴油机（转速 $720(r \cdot \min^{-1})$ ）、38 柴油机（转速 $600(r \cdot \min^{-1})$ ）、PA6B 柴油机（转速 $900(r \cdot \min^{-1})$ ），机组功率可达到 4.7~6.5 MW。

2.3 典型舰用柴油机的发展经验借鉴

国外一型成熟的舰船柴油机，往往应用的时间期限都很长，且在原来机型的基础上进行系列化发展和技术的整体提升。如从 MTU396 到 MTU4000，从 MTUMTU956 到 MTU1163 再到 MTU8000；从 PA6/PA6STC 到 PA6B/PA6BSTC 再到 MAN28/33D，都可以看到清晰的技术发展路线。其中，MTU8000 系列柴油机的技术研发，可为我们研发自主品牌舰船柴油机提供借鉴^[1]。

德国 MTU 公司从 1996 年开始研发 8000 系列柴油机。1998 年完成第一台 20V8000 柴油机并进行试验，2000 年形成销售，同时获得 11 个船级社的认证。2001 年第一台柴油机交货。在 2002~2003 年又进行了 300+200 h 的耐久性试验考核。MTU8000 系列柴油机的试验过程如下：(1)单缸机，试验 790 h。试验目的：考核燃烧过程、动力单元。(2)16V8000V1 柴油机，试验 580 h。试验目的：考核 HCF（高周疲劳）程序、整机概念设计。(3)20V8000V2 柴油机，试验 1 030 h。试验目的：考核 HCF 程序、LCF（低周疲劳）程序（模拟一年的运行）。(4)20V8000V3 柴油机，试验 930 h。试验目的：考核 HCF 和 LCF 程序，以验证柴油机机带的附件在实际使用条件下是否可靠。(5)附加的交付柴油机试验，试验时间为 600 h。试验目的：按合同约定的试验。以上累计试验 3 930 h。

MTU8000 柴油机的研发过程给我们的启示是：在柴油机研发模式上，利用以数据库、知识库、专用分析软件为特征的研发平台和专项技术试验平台，将单缸机试验与数字化样机试验相结合，既保证了设计技术的先进性，又大大缩短了柴油机的研制周期。柴油机的研发，从单缸机开始试验，其试

验是逐步进行的，可靠性也是逐步提升的。柴油机的技术方案是通过试验考核逐步升级与完善的；对新研制的柴油机而言，单台样机的 1 000 h 试验，不足以验证和考核其可靠性，要通过多样机、分阶段的考核逐步提升其技术成熟度。

2.4 新一代舰船柴油机应具有的技术特征

目前，世界上先进舰船大功率柴油机的代表是 MTU4000、MTU8000、PA6BSTC、MAN28/33D 柴油机。这些柴油机的功率大致分为二档：第一档是以 MTU4000 柴油机为代表的高速柴油机，缸径大约在 170 mm 左右，主要用于水面舰艇的发电机组和快艇主机，强载系数达到 35~39 以上。第二档是以 MTU8000、PA6BSTC、MAN28/33D 为代表的中高速柴油机，缸径 265~280 mm，标定转速为 $1\,000 \sim 1\,150(r \cdot \min^{-1})$ ，单机功率达到 9MW，强载系数达到 30~35。这三型柴油机在国外海军舰船上的主要用途是轻型护卫舰、训练舰、海岸巡逻艇、补给船主机；而在民用市场上主要用于滚装船、快速运输船、核电站应急发电等。由于它们的尺寸重量比较大，除法意“地平线”级护卫舰采用 12PA6BSTC 柴油机作巡航动力外，基本没有应用于传统驱护舰作主机（机械推进）的实例。除美国新型两栖攻击舰采用 12PA6B 柴油机作发电机组原动机外，其它舰艇没有将 MTU8000、MAN28/33D、PA6BSTC 柴油机用作综合电力系统、柴电燃推进系统发电机组原动机的实例。

上述四型柴油机的技术特征代表了舰船柴油机技术的发展方向。主要有：①长冲程设计技术。冲程与缸径比为 1.1~1.2。②模块化设计技术。采用动力单元，机型系列发展。③高压共轨技术。燃油喷射压力达 1 80~200 MPa，改善柴油机低负荷性能与经济性（燃油耗率达到 $190(g \cdot (kW \cdot h)^{-1})$ ），排放控制更为严格（排放满足 IMO NO_x-2000 和 EPA Tier II 要求）。④智能控制技术。实现柴油机全过程调节与优化控制。⑤新型增压技术。高效、大流量、高压比（单级压比达到 4.5）增压器普遍应用。⑥长寿命设计技术。柴油机的使用寿命与以前相比大幅提升，高速与中高速柴油机的大修期分别超过 1 万和 2 万 h 以上。

3 自主研发舰船柴油机须要关注的问题

3.1 柴油机的使用定位

自主研发舰船柴油机，其定位首先是满足未来驱护舰综合电力系统或柴电燃推进系统对柴发机组

的需要。柴油机装船应用的对象是作战用驱逐舰、护卫舰，而不是军辅船；应用的方式主要是发电机组，同时兼顾轻型护卫舰、军辅船全柴推进用主机。这些要素不仅决定了柴油机的功率等级、尺寸重量等战技术性能指标，而且决定柴油机的研发必须体现以军为主的设计思想。

舰船柴油机，特别是驱护舰用柴油机，与一般的舰船柴油机相比，除功率密度要求更高外，有三点特别重要：一是瞬态性能。包括突加速性能（涉及柴油机在全转速范围内的运行区）、突加载荷能力。如 16V396TE54 柴油机要求达到 II 级调速精度和 3 级加载能力（0-50%-80%-100%）；PA6 柴油机用于电站时也要求 II 级调速精度和 3 级加载能力（0-40%-70%-100%）；620 柴油机用于电站时要求 2 级调速精度、2 级加载（620V12 柴油机：0-60%-100%）或 3 级加载（620V16 柴油机：0-45%-75%-100%）能力。这三型柴油机都是以军用为主的舰船柴油机，与之对比的是 MAN28/33D 柴油机，采用 4 级加载（0-25%-50%-75%-100%，没有补气方案）。二是抗冲击性能。国军标 GJB150.18-86 对舰用设备的抗冲击性能提出了明确的要求，相关舰船型号生命力顶层设计要求，也提出了舰船柴油机隔离安装系统和柴油机本体应能承受的抗冲击指标。这种指标可采用三种方式来表述，分别是：频域系统的谱加速度、速度、位移；时域系统的加速度峰值和脉宽；频域系统一阶频率所对应的垂向加速度指标。以 396、620、PA6 柴油机为例，抗冲击性能的一般要求（第三种表述方式）是：垂向 10 g，横向 7.5 ~ 10 g，纵向 5 ~ 10 g。民用船舶柴油机则没有抗冲击的要求。在舰船受到冲击载荷时，通过船体、安装机座和隔振器（或隔冲器）的衰减，作用在柴油机机身上的冲击载荷应该在 10 g（垂向）以下。柴油机抗冲击性能的要求不同，直接影响柴油机的整体布局。柴油机机身和主要运动部件（曲轴、连杆、活塞）的抗冲击性能较好，抗冲击性能相对薄弱的是固定在机身上重量较大的附件，如增压器、中冷器、滑油冷却器等。一般船用柴油机的附件可采用悬臂支撑，而驱护舰用柴油机则不允许，必须采用凸台或强结构支撑。这从 MTU8000 和 MAN28/33D 柴油机的整体布置上就可以看出差别^[1,2]。三是环境适应性能。一般船用柴油机的海水泵、淡水泵可以机带，也可以外配，但驱护舰用柴油机的海水泵、淡水泵一般都要求机带。PA6、MTU396/956/1163/8000 柴油机的海水泵、淡水泵都是机带，而 PC2-

5/6、MAN28/33D 柴油机的海水泵、淡水泵一般都是外配。

对舰船柴油机瞬态性能影响最大的是增压系统。一般舰船（军辅船）或民用船舶柴油机大多采用两个增压器，在突加速或突加载时可采用补气的技术措施，以弥补增压系统瞬态性能的不足。对驱护舰用柴油机而言，由于对功率密度要求较高，对增压器的压比和流量都要求较大，在设计时很难兼顾到柴油机的低负荷运行区、高负荷的功率输出、加速与加载时的瞬态性能。为了解决这个问题，MTU 柴油机多采用比较复杂的增压系统，以解决柴油机的瞬态性能。如 MTU20V1163-03 柴油机采用了二级顺序涡轮增压系统（见图 1），共 5 个增压器，随着转速和负荷的增加，5 个增压器相继投入使用，使得该柴油机不仅具有良好的低负荷性能，而且高负荷的性能也得到了改善。图 2 显示：柴油机采用顺序增压，不带补气措施时最大可突加 65% 负荷；但带补气措施时最大可突加 100% 负荷^[1]。由此可见采用补气措施对柴油机瞬态性能的影响，但由于系统复杂，附属部件多，驱护舰用柴油机一般不允许采用补气措施。

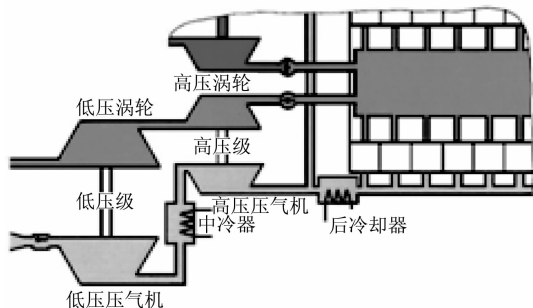


图 1 MTU 柴油机二级顺序涡轮增压系统

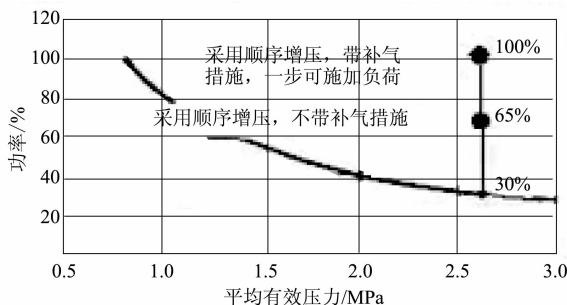


图 2 按国际标准 3046，四冲程柴油机可施加的最大负荷

3.2 柴油机的研发模式

自主研发舰船柴油机项目的实施，不能只是研制一型柴油机，更重要的是以典型产品带动全行业的技术进步与能力提升。舰船柴油机的研发已完全摒弃了过去一家独打天下的历史，必须建立全行业

范围内的大协作，举全国之力，调动全行业的技术力量，同时要借鉴国外的先进技术，开展广泛的国际合作。这种合作，不只是技术力量的优化与整合，更重要的是市场的竞争与包容。只有优化整合全国的技术力量，形成合力，总结与借鉴成功的经验，才能提高自主研发的技术起点与水平层次；只有在全行业内开展广泛的生产制造与配套合作，找专业的人干专业的事，才能调动各生产制造单位的积极性，推动自主研发舰船柴油机的工作又好又快地向发展。

自主研发必须充分借鉴国外的先进技术与研发经验，尽可能地与国外合作。合作模式可以是请国外专业公司参与或协助柴油机关键零部件（如活塞、高压共轨系统、增压系统）的设计；也可以进行同步设计；还可以请国外专业公司对自主研发设计方案进行全方位的评估。对那些国际市场上很容易采购、而国产化难度却很大的配套件，可以直接从国际市场采购。总之，只要对提高我们的设计水平有利，对缩短研发周期有利，一切都可以借鉴或拿来，前提是掌握其关键技术，知识产权归我。

3.3 市场与质量风险控制

在柴油机研发阶段，一般会对技术风险、进度风险进行较为全面的分析评估，而对市场风险、质量风险分析较少。随着柴油机设计技术与市场配套能力的提升，研发一型柴油机的周期可大为缩短，在技术上取得成功的把握性很大。但取得技术与市场的双赢，难度就很大，这种“叫好不叫座”的新机型比比皆是。在市场经济的环境下，没有民用市场做依托的海军专用柴油机，很难有长久的生存力，也很难形成稳定的产品批量与质量。没有市场和生产批量，就难以有质量上的保障。自主研发舰船柴油机必须兼顾军用、民用两种需求，以期求得军民市场质量的共赢。另一方面，为了化解研制进度与质量风险，可借鉴航空行业的研发经验，对关键零部件采用“双流水”方案。通过竞争建立激励机制，互为备份，防范技术与质量风险。

3.4 对研发困难要有充分认识

依托国内技术力量自主研发大功率舰船柴油机，绝不可能一蹴而就，要对研制中的困难有足够的认识。可能面临的困难：一是设计技术不成熟，工程研制经验与基础技术储备不足。国内在高压共轨、电控电喷、超高增压、模块化设计等新技术开发与应用方面还刚刚起步，柴油机的部分关键零部件，如曲轴、轴瓦、活塞环、共轨燃油系统等仍不

过关，受制于人。二是国内配套难度大。因配套数量少，配套生产单位可能没有积极性，或者国内配套的零部件达不到技术要求，质量难以控制；从国外配套的零部件难以实现国产化。三是市场支持不足，不能形成稳定的批量，产品质量与保障存在问题，竞争力弱。如果不能与国内其它市场（如油田、铁道、民船、陆用电站）结合，自主研发舰船大功率柴油机将面临很大的市场压力。特别是在没有全球服务网络，不具有国际知名品牌的条件下，难以参与国际竞争。一型新柴油机的开发与应用，除了技术性能先进与否外，建立全球的服务与技术保障网络特别重要。

3.5 同步考虑保障能力建设

一型装备或者一个新产品，是否好用，除了其性能先进、质量好以外，另一个非常重要的因素是它的服务保障好。比如，海尔公司非常重视其产品的售后服务，因而赢得了市场与尊重。新型舰船柴油机的研制，除了重视装备的战技术性能，如功率、油耗、噪声等，还要同步考虑维修保障能力建设的问题。

“六性（可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性、环境适应性）”是装备维修保障的核心，是实现装备“好保障、保障好”的基础，也是装备好用、顶用和形成战斗力、保障力的基础。一方面，在新型舰船柴油机研制过程中，要将装备战技性能指标与“六性”指标一体化设计，避免通用质量特性与功能特性设计“两张皮”。只有像抓装备的战技性能指标那样去抓“六性”工作，尽可能地将“六性”指标量化考核，才能将这项工作做牢做实。另一方面，要同步考虑新研制舰船柴油机的维修保障能力与体系建设。自主研发柴油机要与国际先进柴油机竞争，除了其战技术指标要达到国外先进水平以外，还要建立满足军民市场需求的维修服务与保障体系。一型性能再先进但维修服务与保障体系不完善的柴油机是很难有竞争力的。

4 结论

（1）舰船柴油机与一般的船用柴油机相比，在技术上有很大的相似性，但对功率密度、瞬态性能、振动噪声、负荷特性、抗冲击性能、可靠性维修性保障性的要求更高。除此之外，还要更多地考虑舰船柴油机动力政策的连贯性。

温度偏高等问题，是由于机滤总成旁通阀开启压力设置太低和 PCJ 阀的开启压力设置太高所致。根据优化分析，机滤总成旁通阀开启压力由 0.1 MPa 上调为 0.28 MPa，PCJ 阀的开启压力由 0.24 MPa 下调为 0.17 MPa；同时优化后的润滑系统取消了机油冷却器旁通阀和主油道压力限压阀，因而降低了成本。

试验验证表明：优化后的润滑系统消除了增压器轴承早期失效及活塞冷却不良的现象，从而提高了发动机工作的可靠性。

参考文献

[1] FLOWMASTER User Manual [R]. Mentor Graphic,

2013.

[2] EXCIT-designer Manual [R]. AVL List GmbH, Austria, 2013.

[3] Soltani, R, Ghorbanian J. A new approach to flow network analysis of an Engine Lubrication System [J]. The Journal of Engine Research, Vol. 18 (Spring), pp12-19, 2010.

[4] Dudziak, N, Uppuluri, S. Lumped analysis of engine lubrication systems using flowmaster, White paper [M]. REF: AUTWP07, 1-15, Flowmaster USA, 2007.

[5] Miller, D. S. Internal Flow Systems [M]. 2nd edition, Flowmaster, 2009.

(上接第 5 页)

(2) 从国外舰船动力的发展趋势看，由于综合电力系统和柴电燃推进型式的应用，舰船对柴油机的需求已发生较大变化，已从原来的以主机推进为主，转变为以电力推进为主。新一代的舰船柴油机普遍采用长冲程、模块化、高压共轨、智能控制、新型增压、长寿命设计技术，这些发展趋势可为我们所借鉴。

(3) 自主研发舰船柴油机，首先要满足未来驱护舰综合电力系统或柴电燃推进系统对柴发电机组的需要，充分考虑柴油机的瞬态性能、抗冲击性能要求，优化增压系统和总体布置。在此基础上，要发动全行业的技术力量，借鉴国外先进技术，对困

难充分准备，化解市场与质量风险。在设计中，将战技术性能与“六性”指标一体设计，同步推动维修保障体系建设。

参考文献

[1] MTU 公司. MTU8000 系列柴油机机技术介绍 [R]. 2004. 8.

[2] MAN 公司. Propulsion engines for naval ships [R]. 2008. 12.

[3] H. Deutschmann (MTU 公司). 新的增压技术改进了高增压柴油机的性能 [C]. 中国内燃机学会第二届学术年会. 1987.

(上接第 27 页)

5 结论

本文通过整理活塞历史测试数据和计算数据，形成活塞温度场数据库；归纳了在预测新型柴油机活塞温度场时，参考历史相似机型的结果，将工作过程计算得到的活塞顶对流换热系数离散化，并采用所开发的施加工具将对流换热系数通过插值的方式连续施加到活塞顶表面的方法，并将计算结果与实测结果进行了对比。该项工作可得到如下结论：

(1) 借鉴国外经验，建立和完善了柴油机受热零部件边界条件、测试结果数据库，可为新设计提供参考依据。

(2) 在活塞部件设计之初，缺乏准确边界条件和验证手段的情况下，采用上述方法进行活塞顶温度场预测，分析结果与实测结果的对比表明，计

算精度在可接受范围内。

(3) 该方法可以推广到柴油机其他受热零部件（缸盖、缸套）的温度场分析。

参考文献

[1] 陆瑞松. 内燃机的传热与热负荷 [M]. 北京：人民交通出版社. 1988.

[2] 肖永宁. 内燃机热负荷和热强度 [M]. 北京：机械工业出版社. 1988.

[3] 梁刚. 中速大功率柴油机组活塞的有限元分析. [D]. 上海：上海交通大学, 2007.

[4] 梁刚, 陈志忠, 杨志祥. 中速大功率柴油机活塞设计技术的新发展 [J]. 柴油机, 2007, 29 (2): 36-40.

[5] 楼狄明, 张志颖, 王礼丽. 机车柴油机组活塞的换热边界条件及热负荷 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2005, 33 (5): 664-668.