



现代舰船 综合电力系统

**Integrated Power System for
Modern Naval Ships**

章以刚 赵芳 编著

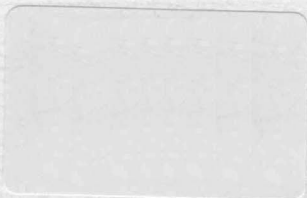


中国工信出版集团



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press





现代舰船 综合电力系统

Integrated Power System for
Modern Naval Ships



赵芳 编著



内容简介

本书综述了国外舰船综合电力系统技术发展的现状和趋势,详细论述了舰船综合电力系统的基本网络和电制、交流高压电力的界面要求、生命力和使用质量及电力负载分析,并对发电系统、配电系统、高压岸电连接系统、电力推进系统,以及控制和自动化系统做了介绍,也对综合电力系统与新概念武器脉冲负载之间的协调做了探讨,最后阐述了 DDG-1000 舰船综合电力系统的风险评估和降低——陆基试验。

本书可供从事舰船电力系统和设备的研究设计与运行的工程技术人员参考,也可作为舰船电气专业的本科生和研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代舰船综合电力系统/章以刚,赵芳编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2018.6

(国之重器出版工程. 现代舰船设计)

ISBN 978-7-5661-1758-8

I. ①现… II. ①章… ②赵… III. ①军用船—电力系统—研究 IV. ①U674.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 310190 号

选题策划 史大伟
责任编辑 张玮琪
封面设计 刘长友

出版 哈尔滨工程大学出版社
社址 哈尔滨市南岗区南通大直街 145 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传真 0451-82519699
经销 新华书店
印刷 固安县铭成印刷有限公司
开本 710×1 000mm 1/16
印张 41.25
字数 812 千字
版次 2018 年 6 月第 1 版
印次 2018 年 6 月第 1 次印刷
定价 208.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

《国之重器出版工程》

编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 哈尔滨工业大学副校长
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士，上海大学校长
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任

项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长

柳百成 中国工程院院士

闻学友 中国工程院院士

徐德民 中国工程院院士

唐长红 中国工程院院士

黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授

黄先祥 中国工程院院士

黄 维 中国科学院院士，西北工业大学常务副校长

董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员

焦宗夏 “长江学者计划”特聘教授



前言

美国海军为了称霸世界,未来30年要建造大量舰船,发展激光武器、电磁轨道炮和远程侦察设备等新概念武器,需要大量经费预算和燃料消耗。为了满足更大的功率要求,减少对矿物燃料的依赖,控制和降低造价,减少全寿命周期费用,20世纪90年代美国海军提出了日用供电与电力推进一体化的综合电力系统IPS,并将其应用于DDG-1000驱逐舰;英国皇家海军将此称为综合全电力推进系统IFEP,并将其应用于45型驱逐舰和CVF航母。法国和意大利海军开发了采用混合电驱动HED的FREMM护卫舰。我们将IPS,IFEP和HED统称为现代舰船综合电力系统。

2005年,美国海军提出未来战舰下一代综合电力系统发展路线图,针对不同舰船将综合电力系统分成两个层次:发电层次为中压交流MVAC、高频交流HFAC和中压直流MVDC,负载层次为区域配电。

近十多年来,作者有幸依托标准化平台,从事相关的课题研究工作,跟踪和搜集了有关的技术信息,特别是“电力船研究联盟”(由美国八所研究型大学在美国海军研究局支持下成立的)成员在IEEE电力船技术研讨会上发表的论文。我们结合其他期刊上的文章、AD报告和相关的标准,有意选择了反映国外综合电力系统领域中的新理念、新方法、新技术、新产品和新标准的资料,将其编辑成书,供读者参考。

如果拙作能对我国综合电力系统研究的决策和引领尽绵薄之力,对于古稀之年的我来说,将是平生莫大的欣慰。

本书在编辑过程中得到了焦依、金焘、唐石青、耿惠彬、杨平西、阎涛、刘震、刘莉飞等同志和标情室同仁的关心与支持,以及四十多年来一直帮助和支持我的邢维如同志,在此一并表示衷心感谢!

由于专业水平有限,错误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

章以刚

2017年1月



目 录

0	绪论	001
0.1	美国海军综合电力系统(IPS)	002
0.2	英国皇家海军的综合全电力推进系统(IFEP)	013
0.3	法国海军的电力推进系统	016
0.4	其他国家的海军动向	018
0.5	小结	019
1	基本网络和电制	021
1.1	美海军提出的高性能中压直流(MVDC)综合电力系统	022
1.2	美海军 LHD -8 两栖攻击舰中压交流(MVAC)综合电力系统	028
1.3	美海军 DDG -51 舰混合电力推进系统	030
1.4	英国皇家海军 45 型驱逐舰综合全电力推进系统	031
1.5	英国皇家海军两栖船坞运输船综合全电力推进系统	033
1.6	英国皇家海军 CVF 航母的综合全电力推进系统	035
1.7	法国、意大利海军的 FREMM 多功能护卫舰混合电力推进系统	037
1.8	小结	037
2	交流高压电力的界面要求	041
2.1	定义	043
2.2	界面要求	053
3	生命力和使用质量	061
3.1	有关生命力的定义	063
3.2	基于生命力的电力系统设计	065
3.3	综合电力系统对舰船生命力的影响	068
3.4	使用质量概念和负载分类	085
3.5	基本使用质量计算	086



4	电力负载分析	089
4.1	范围	091
4.2	定义	093
4.3	一般要求	100
4.4	特定要求	106
5	发电系统	137
5.1	电站容量的确定和设计	139
5.2	功率管理系统	148
5.3	发电模块——燃气轮机发电机组	154
5.4	储能模块	203
5.5	脉冲负载的影响	229
5.6	稳定性	250
5.7	中压直流系统内的电压调节	287
6	配电系统	303
6.1	概述	305
6.2	区域配电系统配置方案	309
6.3	中压交流配电系统	317
6.4	直流区域配电系统	330
6.5	故障电流限制器及其应用	392
6.6	直流电力系统的短路电流计算	399
7	高压岸电连接系统	427
7.1	系统描述	428
7.2	配电系统	430
7.3	连接前兼容性评估	430
7.4	系统集成和管理	431
7.5	人身安全	431
7.6	系统设计要求	432
7.7	系统电气要求	432
7.8	系统研究和计算	433
7.9	包括紧急停机设施在内的紧急关机	433
7.10	高压岸电连接的船上配电系统	434



8 电力推进系统	441
8.1 三种主流电力推进系统	443
8.2 系统设计接口基本要求	446
8.3 推进电动机	450
8.4 推进变流器	471
8.5 推进控制和监测	505
8.6 吊舱式电力推进装置	515
8.7 电力推进变流器和供电网络的电磁兼容性	521
8.8 混合电力推进系统	539
9 控制和自动化系统	569
9.1 控制和自动化系统要求	571
9.2 对确定性控制系统的要求	580
9.3 开放式结构机械控制系统	591
10 综合电力系统与新概念武器脉冲负载之间的协调	601
10.1 激光武器	603
10.2 防空和导弹防御雷达系统(AMDR)	607
10.3 电磁轨道炮	609
10.4 综合电力系统与新概念武器脉冲负载之间的协调	615
11 DDG-1000 舰船综合电力系统的风险评估和降低——陆基试验	629
11.1 美国海军 DDG-1000 级综合电力系统的特点	631
11.2 DDG-51 与 DDG-1000 的 HM&E 比较	631
11.3 管理 DDG-1000 综合电力系统风险产生	633
11.4 DDG-1000 综合电力系统风险区域	634
11.5 DDG-1000 综合电力系统风险降低策略	635
11.6 讨论	638
11.7 小结	640
11.8 未来可能的持续保障风险降低工作	640
参考文献	643



第0章 绪论

家D(Integrated Drive),其目的是发展具有巨大潜力的推进系统,以满足迫切需要的声特性指标。随着冷战的结束,美国海军舰艇对抗的作战方向改变了,声特性要求也不再存在。受海军预算和综合电力驱动(OIP)方案被证实成“先进的水面舰艇机械”ASMP中综合电力系统(OIP)为舰艇设备的高性能和高成本之间的矛盾。

1992年夏季,美国海军海上系统司令部调查并总结了DD-31新一代驱逐舰(DD-31)的技术范围,“先进的水面舰艇机械”项目完成了机械推进舰艇和综合电力系统舰艇的比较。通过八个创新措施即扩展系统结构上的优点,鼓励通用性、利用可生产性,减少基础设施,降低材料成本,减少人员配备,降低能源费用和降低作战系统费用,证明综合电力系统舰艇中反映这些创新的要求。研究表明,采用综合电力系统后舰艇采购经费节省1280万美元,年维护费用减少34%,吨位排水量减少14%,轮机部门人员配备减少13%。

冷战结束后,美国海军的作战方向由在远洋与苏联海军展开对抗转变为在指定区域或内陆发挥作战能力,要求与沿海的俄罗斯舰队、内陆的陆军部队及空军的战斗机空袭等。在冷战结束条件下,再加上作为冷战时期的主力驱逐舰,舰艇使用寿命一般都已到退役年限,这样就形成了美国第21世纪水面舰艇发展路线图,即DD-31计划,其中包括一个驱逐舰级(DD-31)和一个巡洋舰级(CG-31)。DD-31为对舰设计舰艇建造,经历了数年的概念设计(设计编号DD-31-1001)。1995年,美国海军正式宣布建造首级以美国海上作战的DD-31舰,即首级宙斯盾

综 合电力系统有一系列的优点。集成的电力和推进系统可以提高舰艇设计的灵活性,优化舰船水上部分的布置,从而极大地提高了武器系统的效率;采用模块化结构和避免采用减速齿轮、推进轴系,使电力系统更为可靠,最终提升了舰船的生命力;解除能源与推进器之间的机械联系,采用电力驱动和对燃气轮机发电机进行隔声安装,有利于降低噪声和振动水平。



| 0.1 美国海军综合电力系统(IPS) |

0.1.1 DDG - 1000 驱逐舰

对于美国海军而言,电力推进并不是新生事物。从1912年的“木星”号运煤船(后来改装成美国海军第一艘航空母舰“兰利”号),到后来的“新墨西哥”级战列舰、“田纳西”级战列舰、“列克星敦”级航空母舰等均成功地采用了电力推进。在第二次世界大战期间,美国海军建造了300多艘水面舰船,分别采用6000轴马力的柴油机电力推进或12000轴马力的汽轮机电力推进,到1944年,美国海军共有870艘汽轮机电力推进船和940艘柴油机电力推进船。二战后,由于机械加工技术的进步,特别是齿轮传动装置加工能力的提高,蒸汽轮机和柴油机向大型化发展,而当时电力推进限于技术水平,尺寸大而笨重、效率低、成本高,限制了其广泛应用。在二十世纪五六十年代,电力推进主要用于那些对推进定位和机动性有特殊要求的舰船,如破冰船、布缆船和科学考察船等,在此期间,水面舰船主要采用机械推进系统。大约从1975年起,在水面舰船方面美国再度开始对电力推进感兴趣。

1986年,美国海军针对当时的水面舰船提出“海上革命”计划,考虑将来只建造一种称为“舰队主力战舰”的多用途水面舰船,舰上将采用综合电力驱动



IED(Integrated Electric Drive),其目的是发展具有最大程度可购买的推进系统,以满足迫切需要的声特性指标。随着冷战的结束,美国海军与苏联海军在远洋地区对抗的作战方向改变了,声特性要求也不复存在。受海军预算的约束,这个综合电力驱动 IED 方案被改编成“先进的水面舰船机械”ASMP 中的一部分——综合电力系统 IPS,力图解决设备的高性能和低成本之间的矛盾。

1992 年夏季,美国海军海上系统司令部调查并描绘了 DD-51 后一代驱逐舰(DD-21)的技术范围,“先进的水面舰船机械”项目完成了机械推进舰船和综合电力系统舰船的比较。通过八个创新措施即扩展系统结构上的优点,鼓励通用性,利用可生产性,减少基础设施,降低组件成本,减少人员配备,降低能源费用和降低作战系统费用,证明综合电力系统能集中反映这些创新的要求。研究表明,采用综合电力系统后舰船采办费节省 1 280 万美元,年燃油费用减少 24%,满载排水量减少 14%,轮机部门人员配备减少 13%。

冷战结束后,美国海军的作战方向由在远洋与苏联海军展开对抗转变为如今在指定区域或内陆发挥作战能力,要求与沿海的海军陆战队、内陆的陆军部队以及空军的战斗机交换情报,进一步加强舰队的联合作战能力。在这种背景条件下,再加上作为冷战时期的主力驱逐舰“斯普鲁恩斯”和“佩里”级导弹护卫舰都已到退役年限,这样就形成了美海军 21 世纪水面舰船系列研究计划,即 SC21 计划。其中包括一个驱逐舰级(DD-21)和一个巡洋舰级(CG-21)。DD-21 为对陆攻击型驱逐舰。经历了数年的概念设计和论证研究以后,2001 年 3 月 2 日,美国海军正式宣布建造适应未来海上作战的 DD-21 舰。但布什政府上台后,大力推广军队转型工作,DD-21 遭到了“不够转型(条件)”的批评。

2001 年 11 月 1 日,美国海军宣布 DD-21 更名为 DD-X,以便更准确地反映新计划的研制目标——能担负海军海上火力支援和对陆攻击作战任务的一级驱逐舰。

Northrop Grumman 系统公司已被美国海军授予为 DD-X 工程 29 亿美元的设计开发项目合同的总承包商,其中包括价值 2 亿 7 千 5 百万美元的综合电力系统。

2006 年 4 月,DD-X 计划正式更名为 DDG-1000,第一艘舰计划于 2013 年交船,被命名为“朱姆沃尔特”号,二号舰(DDG-1001)和三号舰(DDG-1002)的合同也已于 2011 年与巴斯钢铁厂签订并开始建造。

DDG-1000 排水量达到了 14 000 t,相当于二战时的重型战列巡洋舰。“阿里·伯克”级(DDG-51)电源功率只有 8 MW,而 DDG-1000 的电源功率达到了 80 MW。在武器方面,它装备了多功能雷达和“先进舰炮系统”。雷达综合了空间搜索和目标照射的功能,舰炮则为两门 155 mm 火炮,可发射火箭助推、GPS 导



航、覆盖范围为 100 n mile 的炮弹以及卫星制导导弹,为海军陆战队的两栖作战提供了强大的火力支援。

DDG-1000 配置了两台 MT30 燃气轮机(Rolls Royce 公司波音 777 客机发动机的船用改进型)和两台较小功率的燃气轮机(每台 4 MW)。MT30 燃气轮机带动 36 MW 发电机组,给驱动电机供电。四台燃气轮机作为发电机组的原动力,可随时关闭和开启,以使其完成高效率的运行,同机械推进相比,可节省 15% ~ 20% 的燃油。由于减少了原动机,取消了减速齿轮,并由电力驱动取代了液压驱动,从而减少了工作量,缩减了舰员人数,节约了舰船的全寿命周期费用。而且,由于电力推进比机械推进更安静,使得舰船的隐身性能大提高了。

在推进电机的选择上,DDG-1000 采用的是已在 45 型驱逐舰上使用过的先进感应电机,功率在 35 ~ 36 MW,是 45 型舰上电机功率的两倍。而本来准备上舰的 36.5 MW 永磁电机由于技术风险较高,已被取消。不过,即使永磁电机上舰成功,由于两种电机在尺寸上的差异,如果使用,全舰还要重新进行设计,但是有可能用在下一代舰船上。革命性的 36.5 MW 高温超导电机虽然比以上两者的功率密度更高,体积更小,输出功率更高,也受到了更大的推崇,但由于样机刚刚研制成功,稳定性还需进行测试,上舰的前景依旧不明朗。

然而,性能无比强大的 DDG-1000“朱姆沃尔特”级驱逐舰很可能只造 3 艘。根据美国《海军时报》披露,按照 2010 年美国海军提交的“30 年造舰计划”,美国海军未来将采购 88 艘大型水面舰艇,其中包括 69 艘驱逐舰和 19 艘巡洋舰,同时还引进 66 艘濒海战斗舰,以期达到支持美国海军长期作战能力的目标。

曾长期负责美国海军事务的助理国务卿鲍勃·沃克指出,“朱姆沃尔特”级驱逐舰并不符合美国海军未来的作战需求。沃克认为“30 年造舰计划”的重点非常突出,对于大型舰艇,“30 年造舰计划”更青睐于技术成熟且已成规模投产的 DDG-51“伯克”级驱逐舰,这是由于美国研制的新型 AMDR 相控阵雷达不仅性能潜力与战斗适应性比现有的“宙斯盾”雷达更好,而且不会像“宙斯盾”雷达那样只能部署在大型舰艇平台上,因此在很大程度上美国海军就淡化了对“朱姆沃尔特”级驱逐舰的需求。另外,大量采用新技术也导致“朱姆沃尔特”级驱逐舰的造价高昂,在美国军费预算趋紧的情况下,不可能大量建造。为了满足美国海军反导作战的需求,价格较低的 DDG-51“伯克”级驱逐舰比 DDG-1000“朱姆沃尔特”级更有优势。

0.1.2 DDG-51 驱逐舰

DDG-51“伯克”级驱逐舰已经接近其中期。该级舰是在 20 世纪 70 年代中



期到80年代为对付当时的威胁而设计的。这些舰从1991年投入使用以来,显示出高度的灵活性,现在已有近60艘舰投入使用,其战斗系统也已持续得到改进和修正。DDG-51型舰采用4台通用电气LM2500型燃气轮机作为主机,而以3台Rolls-Royce机组作发电用。

DDG-51“伯克”级驱逐舰首制舰于1991年交付使用,并将于2026年退出现役,即现在正处于其一生的半途。表0-1列出了DDG-51型舰队的规模和寿命期限。

表0-1 DDG-51型驱逐舰小计

	舰艇数目	服役时间	退役时间
阶段 I	21	1991—1997	2026—2032
阶段 II	7	1998—1999	2033—2034
阶段 II A	34	2000—	2034—

阶段 I 和阶段 II 采用相同的燃气轮机。阶段 II A 的舰加长了 5 ~ 8 ft^① (1.4 ~ 2.4 m), 排水量也从阶段 I 时的 8 300 t 增加到 9 200 t。在阶段 II A 中, 舰船日用燃气轮机发电机 SSTG 的额定功率也因电气负载的增大而增大。阶段 II A 的大多数舰采用高功率的发电机 SSGTG。阶段 II A 时的 RR-501-K 型 SSGTG 额定功率为 3 000 kW, 而阶段 I 和 II 时为 2 500 kW。

在现有 DDG-51 型舰上改用综合电力系统(IPS)的安装费用太高,在费用上并不合算。但是除全 IPS 方案外,还有其他较为合算的现有舰船改装方案(即安装费用较低的方案)。英国皇家海军在其 23 型护卫舰的柴电燃联合装置(CODLAG)方面积累了丰富的经验。这种柴电燃联合装置在巡航速度以下用电力推进;在更高的航速时则用机械推进。美国在 LHD-8 号舰上也曾采用混合电驱动装置。

为了使这些平台在 21 世纪的前半期富有生命力,必须降低其营运用费。人力费用、维修费用和燃料费用是营运用费中最主要的三项费用。大多数水面舰船在其整个服务期间只有很少时间在全速或接近全速下运行,1/3 以上的航行时间消耗在航速 12 kn 及其以下,这还不到最高航速的一半,由于航速的三次方与功率成正比,所以其功率只是总功率的很小一部分。虽然现在的机械传动系统是相当有效的,但是主燃气轮机在低功率时却效率不高。通过混合电力驱动方

① ft 英尺, 1 ft = 0.304 8 m。



案,即安装在轴上的辅助电力推进系统可以利用船舶日用发电机的多余容量,可以减少舰船主机的运行时间,使这一辅助电力驱动的电力双向流动,即可以用适中的代价为舰船日用负载提供附加的发电容量。此外它还可以使各轴之间的发电容量交叉转换。

DDG-51 型舰采用混合电力驱动系统可以取得显著的效益。纯电动运行方案可显著地节省燃油消耗,并能够减少推进燃气轮机每年的保养费用。稍为复杂一些的电动-发电运行方案可以大量减少燃油的消耗,并能附加节省燃气轮机发电机 GTG 每年的保养费用。它还有通过推进衍生的船舶日用电力增大总发电能力的潜力。研究假设了 1 套 12 kn 的系统和相应的运行特性,对于纯电动运行方案,每年每舰可节省燃油 4 800 桶;而对于电动-发电运行方案,每年每舰可节省燃油 8 900 桶。每年的保养费用,对于 LM2500 可节省 17%;对于 501-K34,可节省 22.5%。

针对阶段 II A 的 34 艘 DDG-51 型舰,美国海军与 GE Marine 公司签订了合同,致力于研究和开发混合电力驱动系统。目前已为 DDG113 舰和 DDG115 舰提供,相关产品,其系统标准配置包括下列部件:

- (1) 3 台燃气轮机发电机(GTG, 5.3 MW);
- (2) 4 台燃气轮机推进发动机(GTM, 25.1 MW);
- (3) 2 台永磁同步机(PMSM, 2.6 MW);
- (4) 能量存储模块(ESM, 2.2 MW, 340 K Whr), 能量存储模块与重要负荷母线相连以做备用,同时平衡脉冲负荷对发电机母线的影晌;
- (5) 2 个推进轴(PS)通过减速装置与原动机连接;
- (6) 静态非主要负荷(NVL)与左右舷连接(4 MW, 2 MVar 共计);
- (7) 2 MW 功率因数校正负荷连接作为重要负荷(VL),此负荷可在左右舷之间进行转换;
- (8) 6 MW 的脉冲负荷,其脉冲时长为 0.1 s。

0.1.3 LHD-8 两栖攻击舰

Northrop Grumman 船舶系统公司英格尔斯造船厂建造了 WASP 级两栖攻击舰、多用途直升机登陆舰(LHD)。WASP 级两栖攻击舰(LHD1)排水量为 40 500 t,舰长 844 ft(257 m),用于支持美国海军陆战队在 海外区域的空中和两栖攻击行动。

LHDr 设计包括全长飞行甲板,舰岛位于右舷。LHD-1 到 LHD-7 采用蒸汽动力推进系统。由于蒸汽动力推进系统的维护成本和人力成本很高,在 20 世