

广发军工·参军策（卷二十）

舰船综合电力推进系统

分析师：胡正洋 S0260516020002
021-60750639
huzhengyang@gf.com.cn

分析师：赵炳楠 S0260516070004
010-59136613
zhaobingnan@gf.com.cn

本期《参军策》，我们将介绍舰船综合电力推进系统，对比分析国内外综合电力推进系统发展状况及应用领域，分析其技术难点及未来应用空间。

本期观点：

- **舰船动力装置：传统动力系统与电力推进系统。**

舰船动力装置作为舰船的“心脏”，其技术的发展一直受到各国海军的普遍重视。舰船电力推进系统采用电动机驱动推进器的驱动模式，原动机与轴系间无刚性连接，原动机产生的机械能首先转化为电能，通过电力传输和变换，电力经由配电板、变压器、变频器等设备，最终由电动机将电能转化为机械能，驱动推进器。

- **国外电力推进系统：跨越三个世纪的兴衰与变革，交流综合电推已在新一代主战舰船上应用。**

受“战争需求+技术变革”驱动，第二次世界大战前后，传统电力推进技术曾较为广泛地应用于美国“萨拉托加号”航母等大型舰船。随着大功率电力电子器件、电力电子拓扑结构和变频调速技术的飞速发展，传统电力推进也质变为“综合电力推进系统”。近十年来全球全电推进船舶数量出现指数级增长，2009年7月，英国45型驱逐舰服役，成为世界上首艘采用综合电力系统的水面主战舰船；2013年10月，美国DDG 1000驱逐舰下水；这些舰船的下水与服役表明美国和英国等世界海军强国已经在主战舰船上实现了交流综合电力系统的工程化应用。

- **舰船综合电力推进系统是未来的发展趋势，国内综合电力推进系统发展前景日趋明朗。**

舰船综合电力推进系统实现了舰船电力和动力两大系统的融合，在优化舰船总体布局、提高舰船可操作性和灵活性、降低舰船振动和噪声、提升舰船经济可承受性等方面优势明显，也是未来高能武器上舰的必由之路。我国在综合电力推进系统的研发和应用方面起步较晚，近年来一些高校和科研院所所在研发设计方面取得了突破，海军工程大学马伟明院士团队首创舰船中压直流综合电力系统，实现了我国舰船动力从落后到领先国外的跨越，综合电力推进系统是未来海军大型水面舰艇发展的必然趋势。

- **风险提示**

综合电力推进上舰进度低于预期；军费持续低于预期。

相关研究：

广发军工·参军策（卷十八）：精确制导产业链	2017-09-05
广发军工·参军策（卷十七）：海军装备及其产业链	2017-08-25
广发军工·参军策（卷十六）：陆军和陆军装备	2017-07-24

目录索引

舰船动力系统概述：从机械推进到电力推进.....	5
传统舰船动力系统：机械推进.....	5
舰船电力推进系统：电动机驱动推进，舰船动力电气化.....	6
国外电力推进系统：跨越三个世纪的兴衰与变革.....	8
舰船电力推进兴衰史：主要受“战争需求+技术变革”驱动.....	8
电力推进系统迎来全球应用爆发期.....	10
国外海军舰船的应用趋势：综合电力推进系统.....	11
国外电力推进系统主要供应商.....	13
舰船综合电力推进系统是未来发展趋势.....	16
舰船综合电力推进系统：实现电力和动力两大系统有机融合.....	16
舰船综合电力推进系统具有多方面应用优势.....	18
舰船综合电力推进系统是高能武器上舰的必由之路.....	22
综合电力推进系统发展的关键技术问题.....	24
国内综合电力推进系统发展前景日趋明朗.....	27
国内技术发展现状与应用现状.....	27
综合电力推进系统的应用空间.....	29
相关上市公司.....	31
湘电股份（600416）.....	31
中国动力（600482）.....	31
风险提示.....	32

图表索引

图 1: 舰船推进装置示意图	5
图 2: 舰船电力推进系统基本结构	7
图 3: 典型的舰船电力推进系统	7
图 4: 吊舱式电力推进装置	7
图 5: 舰船电力推进系统的功能分类	8
图 6: 舰船电力推进系统发展重点事件回顾	9
图 7: 舰船电力推进系统的兴衰与变革历程	9
图 8: 全球全电推进舰船数量变化趋势	10
图 9: 全球各类型电力推进舰船占比 (2013)	10
图 10: 世界各类型电力推进舰船平均总功率 (MW)	11
图 11: 美国海军舰船电力推进系统发展历程	12
图 12: 各国海军舰船综合电力推进系统应用现状	12
图 13: ABB 的 Azipod 电力推进系统系列	13
图 14: 西门子电力推进系统相关解决方案	14
图 15: 通用电气电力推进系统相关配套产品	15
图 16: 罗尔斯·罗伊斯电力推进系统产品线	16
图 17: 军用舰船综合电力推进系统	16
图 18: 舰船综合电力推进系统实现途径	17
图 19: 综合电力推进与机械推进的机舱/轴系布置比较	19
图 20: 船舶航运成本构成	21
图 21: 不同推进方式的推进效率比较	21
图 22: 三用工作船不同推进方式燃油消耗量比较	21
图 23: DDG-51 驱逐舰航行时间分配的最高要求与实际情况对比	22
图 24: 美军舰载激光武器击毁空中目标	22
图 25: 美军电磁轨道炮试验画面	22
图 26: 舰载武器系统电力需求增长趋势	23
图 27: 未来舰船的电力需求/分配示意图	24
图 28: 舰船发电能力增长 VS 电力需求增长	24
图 29: 智能化能量管理系统功能模块构成	26
图 30: 综合电力推进系统发展的关键技术问题	27
图 31: 我国自行设计制造的电力推进船舶	29
图 32: 世界运输船队发展趋势	30
图 33: 世界运输船舶拆解趋势	30
表 1: 各类型传统舰船动力系统特点	6
表 2: 各类型传统舰船动力系统特点	8
表 3: 美英海军电力推进系统相关的典型项目	11
表 4: 典型大型军舰电力推进系统制造商	12

表 5: ABB 近年来部分船舶电力推进系统订单情况.....	14
表 6: 综合电力推进系统的主要组成部分及作用.....	17
表 7: 综合电力推进系统的主要类型及特点.....	18
表 8: 舰船综合电力推进系统的标志性技术.....	18
表 9: 综合电力推进系统带来的舰船机动性优势.....	19
表 10: 3.5 万吨散装货轮传统与综合电力推进方式能源-动力系统造价对照表.....	20
表 11: 美国海军 DD-21 计划对舰船采用机械推进与 IPS 的成本比较.....	20
表 12: 美国海军计划分三个阶段实现舰载激光武器部署.....	23
表 13: 未来舰船各舰型推进和辅助负载功率需求估计.....	23
表 14: 某单体护卫舰两种推进方式下的安装功率需求比较 (单位: MW).....	24
表 15: 高功率密度电动机特点及发展趋势.....	25
表 16: 近年来电力推进领域国家级科研项目.....	27
表 17: 我国在电力推进领域的技术发展进程.....	28
表 18: 我国发展舰船综合电力推进系统相关政策.....	29
表 19: 综合电力推进系统应用领域及船型.....	31

舰船动力系统概述：从机械推进到电力推进

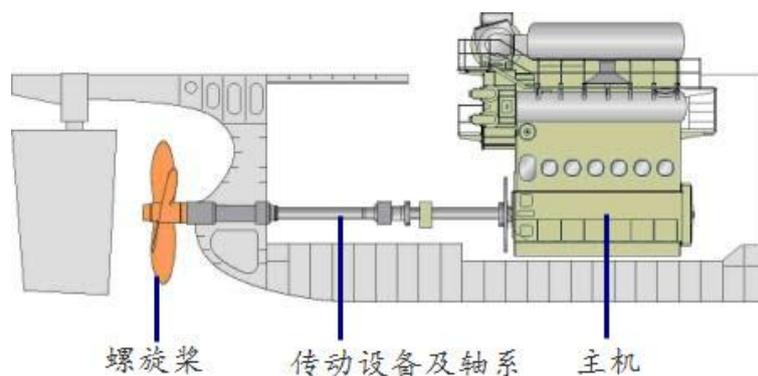
舰船动力装置作为舰船的“心脏”，其技术的发展一直受到各国海军的普遍重视。舰船动力装置的主要任务是发出一定功率，产生各种能量，实现能量转化和分配，是保证舰船的正常航行、安全正常作业、停泊，保证人员正常工作、生活与安全的全部机械设备和系统的综合体。

目前应用的推进系统主要有两类：**机械式直接推进（柴油机、燃气轮机、热机联合直接推进等）和电力推进**。机械式直接推进是通过刚性连接的传动轴和齿轮系将原动机的机械能传递到舰艇的推进器。电力推进是利用发电机将高速原动机的旋转机械能量转换为电能，通过电力传输线将电能传递到舰船后部的推进电机，驱动推进电机工作，推进电机与螺旋桨直接连接，从而将电能转换为螺旋桨旋转的机械能来推进舰船运动，电力推进又区分为采用独立的推进动力电站为推进电动机供电的传统电力推进、采用综合电站同时为推进电动机和其他用电设备（武器）供电的综合电力推进。

传统舰船动力系统：机械推进

传统舰船动力系统主要由**推进装置、辅助装置、舰船管路系统、甲板机械、遥控及自动化设备组成**。推进装置是最重要的组成部分，包括主机、传动设备、舰船轴系和推进器。主机是推进舰船航行的动力机械，包括柴油机、燃气轮机等；传动设备用于断开或接通主机传递给传动轴的功率，可实现推进器的减速、换向和减振，包括离合器、齿轮箱和联轴器等；舰船轴系用于将主机的功率传递给推进器，包括传动轴、轴承和密封装置等；推进器将主机发出的能量转换成推力，如螺旋桨。

图1：舰船推进装置示意图



数据来源：《船舶动力系统》（徐筱欣），广发证券发展研究中心

根据推进装置主机类型不同，舰船动力系统可分为**蒸汽动力系统、柴油动力系统、燃气动力系统、核动力系统**。蒸汽机在19世纪初至20世纪初是世界航运船舶最重要的原动机，之后逐渐被汽轮机取代；20世纪60年代后，汽轮机又逐渐被热效率更高的柴油机所取代；燃气轮机在20世纪50年代开始在商船上作为主机，但未得到大规模应用，目前主要在军用舰船上使用。

表1: 各类型传统舰船动力系统特点

类型	优势	劣势
汽轮机	单机功率比活塞式发动机大。 机组振动小、噪声低。 磨损部件少，工作可靠性大。 可使用劣质燃油，滑油消耗率也很低。	装置的总重量、尺寸大。 燃油消耗大，装置效率较低，额定经济性仅为柴油机装置的 1/2-2/3。 机动性差，备车时间长。
柴油机	具有较高的经济性。 重量轻。 具有良好的机动性，操作简单、启动方便、正倒车迅速。	柴油机的尺寸和重量按功率比例增长快，因此单机组功率受到限制。 噪声和振动较大。 中、高速柴油机的运转部件磨损较严重。 传统的柴油机在低速时稳定性差，过载能力较差。
燃气轮机	单位功率的重量尺寸较小，机组功率也较大。 良好的机动性，从冷态启动至全负荷时间仅需几分钟的时间。	不能反转，倒车时必须设置专门的变向设备。 必须借助于电机或其他起动机机械启动。 叶片工作可靠性较差，寿命短。 进、排气管道尺寸较大，舱内布置困难，甲班上有较大的管道通过切口，影响船体强度。
核动力	以少量的核燃料能释放出巨大的能量，可以保证舰船以较高的航速航行很远的距离。 不需要进、排气装置。	重量、尺寸较大。 操纵管理、检查系统比较复杂。 造价昂贵。

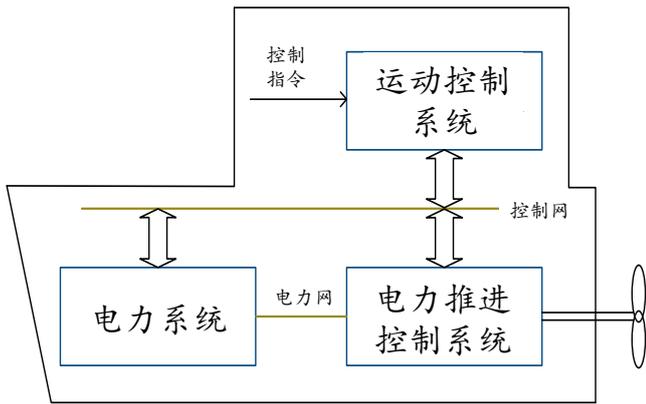
数据来源: 《船舶动力系统》(徐筱欣), 广发证券发展研究中心

舰船电力推进系统: 电动机驱动推进, 舰船动力电气化

舰船电力推进系统采用电动机驱动推进器的驱动模式, 原动机与轴系间无刚性连接。电力推进系统中, 原动机产生的机械能首先转化为电能, 通过电力传输和变换, 电力经由配电板、变压器、变频器等设备, 最终由电动机将电能转化为机械能, 驱动推进器。对比机械推进, 电力推进在整个动力系统中能量传输形式为机械能-电能-机械能, 通过电缆和电力设备进行能量传输, 替代了机械推进传动轴系的刚性连接。

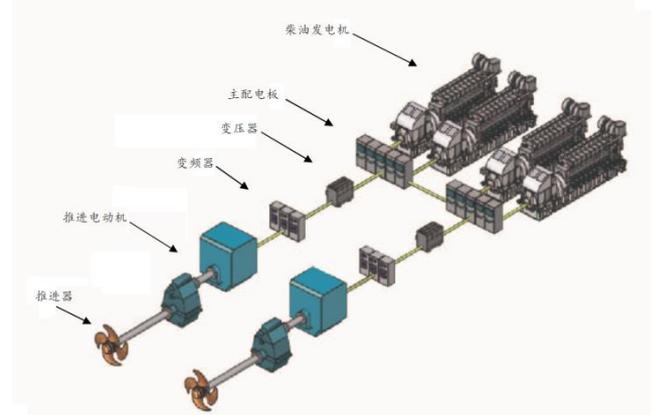
舰船电力推进系统由运动控制系统、电力系统和电力推进控制系统组成。运动控制系统(操纵器, 含发令车钟功能)由驾驶室控制台专职指挥人员进行舰船的航向、航速等信号指令设定; 电力系统由发电机组组成, 提供推进电动机所需的电力以及全船其它设备的电力供应, 并通过电缆及变压器将电力分配到各个负载; 电力推进控制系统包括变压器、变频器、推进电机等, 根据指令要求, 控制推进速度和舵角。

图2：舰船电力推进系统基本结构



数据来源：《船舶电力推进系统》（汤天浩），广发证券发展研究中心

图3：典型的舰船电力推进系统



数据来源：ABB，广发证券发展研究中心

舰船电力推进系统分为单轴、双轴和多轴系统，吊舱式推进装置促进了多轴推进系统的应用。根据舰船推进所需功率可选择一台电动机单独驱动和多台电动机联合驱动的方案，采用多机多轴驱动可以提升舰船操控性能和容错能力。吊舱式推进装置可以根据需要在船下任意位置放置，易于实现多轴推进，在要求可靠性和操控性的舰船上应用广泛。

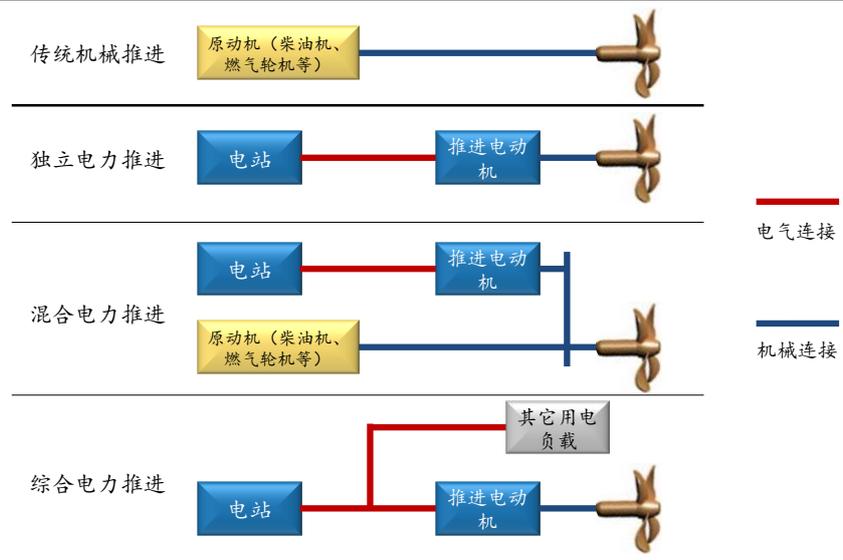
图4：吊舱式电力推进装置



数据来源：ABB，广发证券发展研究中心

舰船电力推进系统从功能上可分为三类：独立电力推进、混合电力推进和综合电力推进。独立电力推进即采用独立的推进动力电站为推进电动机供电，是电力推进系统发展的初期形态；混合电力推进即在以大功率机械直接推进为主的动力系统中加入小功率电力推进，舰船在低速巡航时采用电力驱动，满足舰船巡航时的经济性和低噪声需求，更高航速下采用直接驱动；综合电力推进即舰船上的所有原动机都用于产生电力，然后分配至推进、船上用电和作战系统，在舰船运行的全速范围内完全由电动机驱动推进器。

图5: 舰船电力推进系统的功能分类



数据来源: 《船舶电力推进技术》(乔鸣忠), 广发证券发展研究中心

舰船电力推进系统的主要动力源是推进电动机, 目前主要有直流推进电机、交流推进电机、永磁推进电机。舰船的航速和推进轴功率的变化范围很大, 舰船用推进电机应具有高可靠性、大容量、低转速、高转矩、高功率密度、宽调速范围和调速性能等特点, 从而能够适应不同工况运行要求。

表2: 各类型传统舰船动力系统特点

类型	结构特点	应用特点
直流推进电机	包含换向器和电刷, 以保证定子和转子两个磁场垂直, 形成旋转的电磁力矩	优势: 控制简单、调速性能好、技术成熟、控制器和驱动系统成本最低 劣势: 因为有换向器和电刷, 所以需要定期维护, 导致使用不方便、可靠性和效率较低, 且生产工艺复杂、体积重量较大、造价高
交流推进电机	由定子所通的交流电产生旋转磁场带动转子旋转	随着电力电子技术和现代控制技术进步, 交流推进电机的调速性能已可与直流推进电机相媲美。此外, 交流推进电机极限容量大、总损耗降低(效率相比同等级直流推进电机通常高 2%-3%)、可采用较高电压(电压可达 7.5kV)、结构简单、维护方便、成本低廉
永磁推进电机	用永磁体取代传统电机的励磁绕组和磁极	没有励磁绕组和励磁损耗, 效率高、体积小

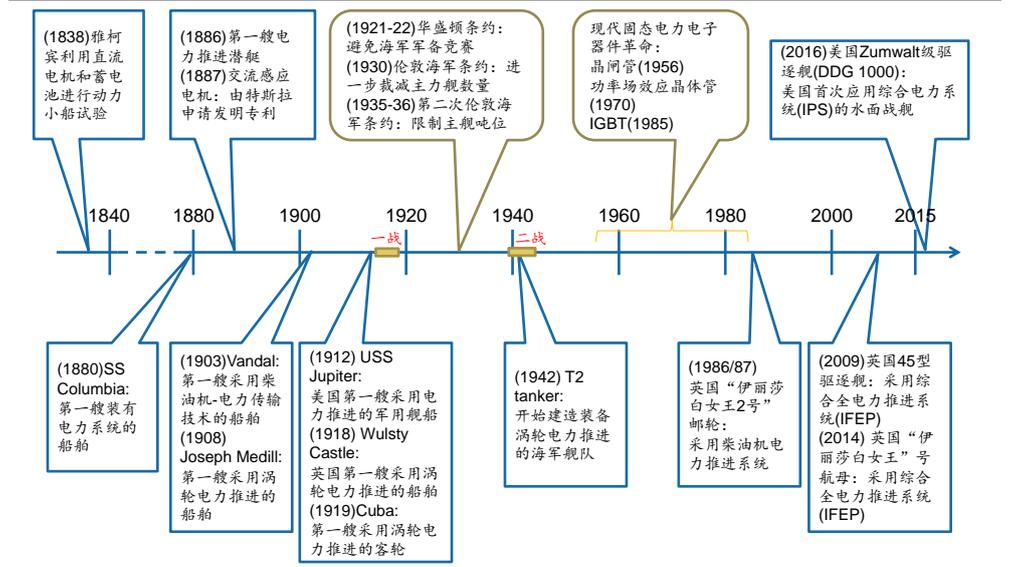
数据来源: 《船舶电力推进技术》(乔鸣忠), 广发证券发展研究中心

国外电力推进系统: 跨越三个世纪的兴衰与变革

舰船电力推进兴衰史: 主要受“战争需求+技术变革”驱动

舰船电力推进的概念始于19世纪30年代, 目前已经成为舰船动力系统的主要实现形式之一。1838年, 俄国科学家雅柯宾首次利用直流电机和蓄电池, 做了一条小船的动力试验, 形成了“电力推进”的概念。19世纪末至20世纪初, 电力推进开始在船舶上得到广泛应用。舰船电力推进在20世纪经历起伏发展, 现在已经成为舰船动力系统的主要实现形式之一, 广泛应用于军民领域。

图6: 舰船电力推进系统发展重点事件回顾



数据来源: 《The Marine Vessel's Electrical Power System: From Its Birth To Present Day》(E Skjong), 广发证券发展研究中心

舰船电力推进系统的发展在全球范围内受战争需求和技术变革影响巨大。第二次世界大战前后, 传统电力推进技术曾较为广泛地应用于美国“萨拉托加号”航母等大型舰船。随着大功率减速齿轮箱技术的发展, 传统电力推进逐渐被机械推进取代, 仅少量应用于核潜艇、豪华游轮、破冰船等部分特种船舶。20世纪80年代, 随着大功率电力电子器件、电力电子拓扑结构和变频调速技术的飞速发展, 舰船电力推进技术性能逐步提高, 其优势重新凸现, 传统电力推进也质变为“综合电力推进系统”。

图7: 舰船电力推进系统的兴衰与变革历程

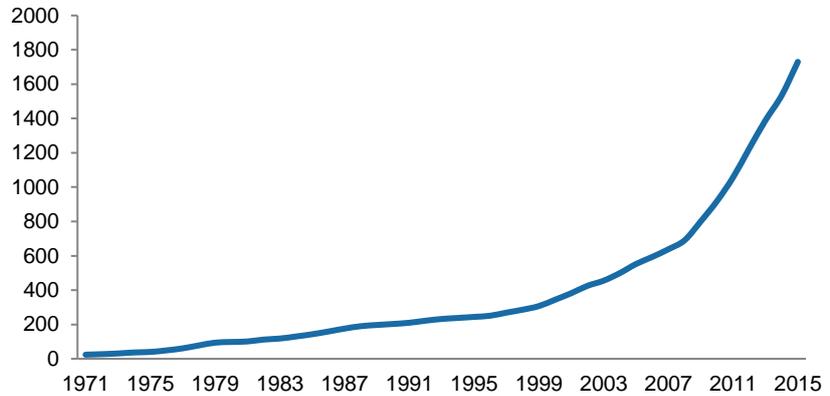


数据来源: 《The Marine Vessel's Electrical Power System: From Its Birth To Present Day》(E Skjong), 广发证券发展研究中心

电力推进系统迎来全球应用爆发期

近十年来全球全电推进船舶数量出现指数级增长。根据Clarkson公司的数据，在过去十年里（2004-2014）安装电力推进系统的船舶数量以每年12%的速度增长，这一数字比全球船队数量的增长速度快3倍。

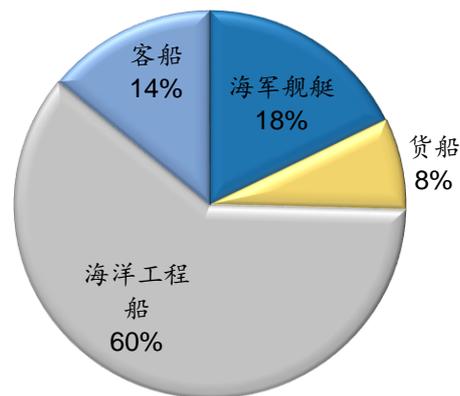
图8：全球全电推进舰船数量变化趋势（艘）



数据来源：中国产业信息网，广发证券发展研究中心

全球电力推进舰船中，海洋工程船占据三分之二，海军舰艇次之，占比接近20%。随着海洋工业的发展，石油和天然气勘探和开采进入更深的水域，船只需准确地保持在井口上方或靠近固定平台的位置，因此依赖电力推进的动力定位（DP）控制系统得到广泛应用，这促进了采用电力推进的海洋工程船的数量增长。

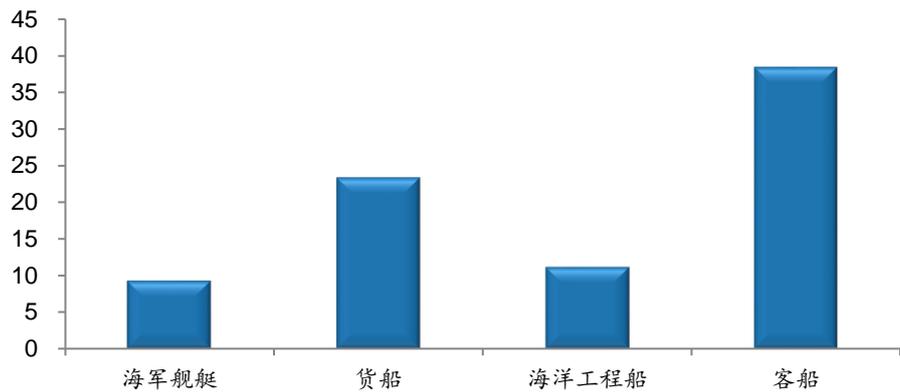
图9：全球各类型电力推进舰船占比（2013）



数据来源：《Electrical Propulsion in the Low Carbon Economy》（Ian Whitelegg），广发证券发展研究中心

不同类型舰船的功率需求不同，电力推进客船平均总功率最高，电力推进军舰平均总功率较低。电力推进客船的平均总功率接近40MW，其中总功率最高超过120MW；电力推进军舰的平均总功率在10MW左右，低于客船、货船和海洋工程船，但近年来电力推进系统在军舰上的应用功率不断增加，如英国伊丽莎白女王级航母安装功率突破了100MW。

图10: 世界各类型电力推进舰船平均总功率 (MW)



数据来源: 《Electrical Propulsion in the Low Carbon Economy》(Ian Whitelegg), 广发证券发展研究中心

国外海军舰船的应用趋势: 综合电力推进系统

1990年代后, 世界各国有关舰船电力推进众多项目的实施极大促进了综合电力推进系统的发展。美英两国在概念演进和实践中最为活跃, 1988年美国海军与GE签订合同研制水面战舰IED(综合电力推进)装置, 在1994年提出了综合电力系统(IPS)的概念, 并在1995年与洛克希德·马丁公司签订了建造陆基试验用的主力战舰的实尺发电/推进系统合同; 英国国防部于1994年正式开始综合全电力推进系统(IFEP)的应用研究, 并于1996年成立电船计划管理局, 负责协调发展和采购未来英海军水面舰艇的IFEP系统。

表3: 美英海军电力推进系统相关的典型项目

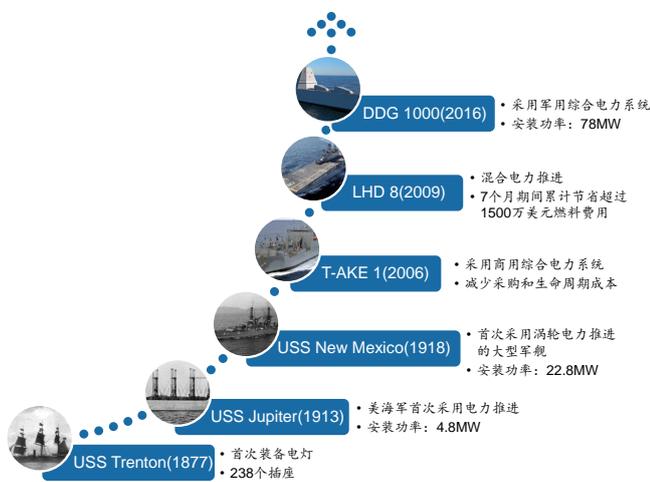
国家	时间	事件
美国	1986	提出“海上革命”计划, 发展舰船综合全电力推进系统。
	1988	启动综合电力推动(IED)项目, 意图通过将舰船电力推进系统和日用电力系统进行合并来提高作战舰艇的性能。1990年后, 综合电力推动项目将注意力转移到提高舰船费效比上, 通过设备的通用性、简易性、标准化来实现未来舰艇的高性能与低成本, 这就是舰船综合电力系统(IPS)。
	1997	推出DD-21海上火力支援舰概念, 成立了DD-21计划执行办公室(PEO), 计划在DD-21对陆攻击驱逐舰上采用全电力推进系统。
	2002	提出“电力海上力量之路”计划: 1) 在综合全电力推进的基础上, 使用更先进的原动机和辅助机械实现广泛电气化的舰船、战斗舰艇上应用综合电力系统实现“电力舰”; 2) 在“电力舰”的基础上实现应用高能武器和先进探测设备的“电力战舰”。
	2006	将DD-21项目更名为DDG-1000, 并于2007年开始建造, 这是美国第一艘应用综合电力系统(IPS)的水面战舰。该型舰目前计划建造3艘, 首舰朱姆沃尔特号于2016年10月正式服役, 二号舰麦可·蒙苏尔号和三号舰林登·约翰逊号正在建造中。
英国	1994	正式开始IFEP(综合电力推进)项目的应用研究。
	1996	成立电船计划管理局, 负责协调发展和采购未来海军水面舰船的综合电力推进系统。
	2000	英国国防部与BAE公司正式签署合同, 建造首批3艘45型驱逐舰, 45型驱逐舰是英国皇家海军第一艘综合电力推进系统(IFEP)战舰。该型舰共建造6艘, 首舰Daring号于2009年7月正式服役, 最后一艘Duncan号于2013年12月正式服役。

2008 签署建造伊丽莎白女王级航母的合同，伊丽莎白女王级航母采用综合电力推进系统（IFEP）。该型舰计划建造2艘，首舰伊丽莎白女王号于2017年6月试航，预计2020年形成初始作战能力。二号舰威尔士亲王号正在建造中。

数据来源：《舰船电力系统》（兰海），广发证券发展研究中心

美国和英国等世界海军强国已经在主战舰船上实现了交流综合电力推进系统的工程化应用。美、英等世界海军强国自上世纪80年代开始进行综合电力系统的理论探索与关键技术研究。2009年7月，英国45型驱逐舰服役，成为世界上首艘采用综合电力系统的水面主战舰船。2013年10月，美国DDG 1000驱逐舰下水。这些舰船的下水与服役表明美国和英国等世界海军强国已经在主战舰船上实现了交流综合电力系统的工程化应用。

图11：美国海军舰船电力推进系统发展历程



数据来源：Office of Naval Research，广发证券发展研究中心

图12：各国海军舰船综合电力推进系统应用现状



数据来源：Office of Naval Research，广发证券发展研究中心

军用舰船推进系统对可靠性要求高，目前国外企业在电力推进相关设备研发制造方面已经积累了工程应用经验。通过对国外典型电力推进军舰进行分析，英国的罗尔斯·罗伊斯公司在电力推进用燃气轮机及推进器方面、芬兰的瓦锡兰公司在电力推进用柴油发电机组方面、法国的科孚德机电公司在电力推进用推进电机方面均具有技术优势，是各国新型电力推进军舰的主要供应商。

表4：典型大型军舰电力推进系统制造商

军舰	综合电力推进系统相关设备制造商	排水量	总安装功率
伊丽莎白女王级航母	罗尔斯·罗伊斯公司：两台 MT30 燃气轮机（70 兆瓦）	70600 吨	109.6 兆瓦
	瓦锡兰公司：两台 16V38B 柴油发电机组、两台 12V38B 柴油发电机组（39.6 兆瓦）		
	科孚德机电公司：四台先进感应推进电机（AIM）		
DDG 1000 驱逐舰	罗尔斯·罗伊斯公司：两台最大功率 36 兆瓦的 MT-30 燃气轮机	14564 吨	78 兆瓦
	和两台 4.5 兆瓦等级的 RR4500 辅助燃气轮机		
45 型驱逐舰	科孚德机电公司：两台先进感应推进电机（AIM）	满载 7350 吨	43 兆瓦

科孚德机电公司：两台先进感应推进电机（AIM）

瓦锡兰：三台 16V32 柴油发电机组，一台 18V200 辅助柴油发电机组

西北风级两栖攻击舰

罗尔斯·罗伊斯公司：Mermaid 电力吊舱式推进器（每具功率 7.5 兆瓦，共 15 兆瓦）

科孚德机电公司：Mermaid 推进器的电动机与配套电力转换设备

数据来源：维基百科，中新网，腾讯网，广发证券发展研究中心

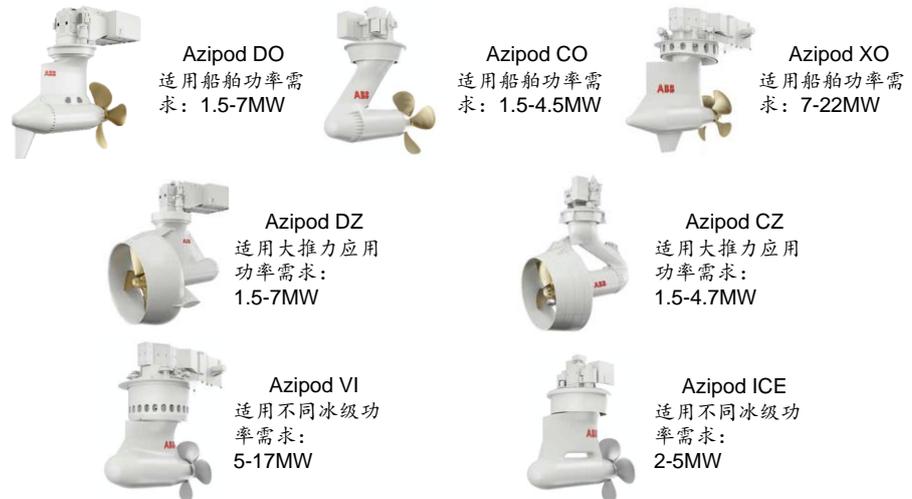
国外电力推进系统主要供应商

ABB：率先采用吊舱式电力推进系统，民用船舶电推领域先驱。

1990年，ABB的Azipod全回转吊舱式电推系统成功在芬兰海事管理局的“Seili”号航道破冰船上应用，这是该公司电推系统首次装船。此后，ABB不断对其进行不断改进和创新，至今已经形成了能够应用于多种船型和多种功率需求的型号系列。

Azipod系统能够覆盖1.5MW-22MW的功率需求，其2015年的新型号Azipod D采用了新型混合式冷却系统，能够将电机性能提升45%，可降低高达25%的装机功率，同时可大幅降低能耗。

图13：ABB的Azipod电力推进系统系列



数据来源：ABB，广发证券发展研究中心

Azipod推进系统在民用船舶领域市场占有率高，已应用于全球大约三分之二的现代化大型邮轮、破冰船和高冰级货轮上。2013年，ABB在邮轮领域接获Azipod系统订单共1.8亿美元；2014年，ABB在豪华邮轮电站和Azipod推进系统方面的接单金额达到2亿美元，在冰区加强型船和破冰船配套领域相关订单金额达到9亿美元。在我国，Azipod已应用于先进的客滚船烟台铁路轮渡、最先进的海洋科学综合考察船“科学号”、超大型打捞起重船“华天龙”号、第一艘极地科考破冰船等各类船舶项目中。2011年，ABB在我国上海建立Azipod系统全球生产基地。

表5: ABB近年来部分船舶电力推进系统订单情况

船东国家	数量	船型	订单内容	订单金额	订单日期
挪威	2艘	Breakaway-Plus级邮轮	全回转吊舱推进 (Azipod XO) 和动力系统	6000 万美元	2015 年
俄罗斯	2艘	破冰船	Azipod 推进系统和整套电力系统	2500 万美元	2013 年
印度	1艘	深水铺管船	电力和推进系统	1200 万美元	2013 年
巴西	7艘	钻井船	整套电力系统 (包括船用推进器)	1.6 亿美元	2013 年
挪威	2艘	深海勘探船	电力与推进系统	2600 万美元	2013 年
俄罗斯	1艘	破冰船	电力推进 (2台 7.5 兆瓦 Azipod 推进装置) 和能源高效的电力系统	3500 万美元	2012 年
巴西	2艘	深水铺管船	能源效率型电力与推进系统	1800 万美元	2012 年
美国	2艘	邮轮	电源和 Azipod 推进系统	6000 万美元	2012 年
俄罗斯	2艘	破冰船	整套电力和推进系统	4000 万美元	2011 年
挪威	2艘	游轮	电力和推进系统 (Azipod XO)	5000 万美元	2010 年

数据来源: 国际船舶网, 广发证券发展研究中心

西门子: 电力推进配套设备齐全, 提供一站式系统集成服务。

西门子根据不同客户的需求, 推出了一系列电力推进系统解决方案SISHIP, 包括已经广泛应用于各类船舶上的低压和中压电力推进系统, 使用永磁电机技术的SSP吊舱式电力推进, 以及适用于游艇等小型船舶的经济型电力推进系统等。西门子提供的配套设备包括发电机、发电机功率适配器、变压器、变频器、驱动设备、以太网交换机等, 同时也可提供电力推进系统、动力定位系统、电站管理系统、监测报警与控制系统和全集成自动化系统等系统解决方案。此外, 西门子可为新一代潜艇提供直流驱动器和基于永磁同步电机的推进设备。

图14: 西门子电力推进系统相关解决方案



数据来源: 西门子, 广发证券发展研究中心

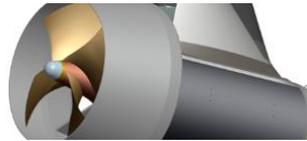
西门子船舶电力推进系统已经应用于世界多个国家, 是民用船舶电力推进市场有力竞争者。2015年, 全球首艘电力推进汽车渡轮于挪威投运, 西门子为其提供全套电力推进系统以及充电设备, 能够使燃油成本降低60%; 此外, 西门子作为我国第一

艘大型深水物探船“海洋石油720”的电力推进系统机械和电气总承包商，使得其航速较其他物探船提升了30%以上。

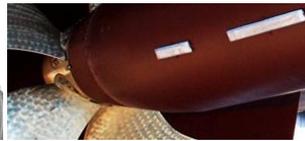
通用电气：收购科孚德机电，成为世界一流电力推进系统供应商。

科孚德机电（Converteam）的前身是法国知名企业阿尔斯通（Alstom）机电部，于2005年成为独立的公司个体，于2011年被通用电气斥资32亿收购90%股份，经整合后更名为电能转换业务部（Power Conversion）。通过此举收购，通用电气弥补了其在船舶电力电气系统集成技术短缺，配合原有部门船用动力配套设备和控制系统组件技术，现在已经成为了世界一流的电力推进系统供应商。

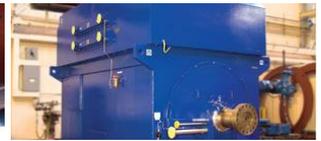
图15：通用电气电力推进系统相关配套产品



紧凑型吊舱推进系统
• 节省空间，高效率



大型吊舱推进系统
• 高效率，高机动性能



燃气和蒸汽轮机发电机
• 模块化结构，效率>98%



中压/低压驱动系统
• 高效率、高可靠性、高功率密度



高压绕线转子感应电动机
• 满足挑战性应用标准



大型低速船用电动机
• 降低运行费用和维修要求

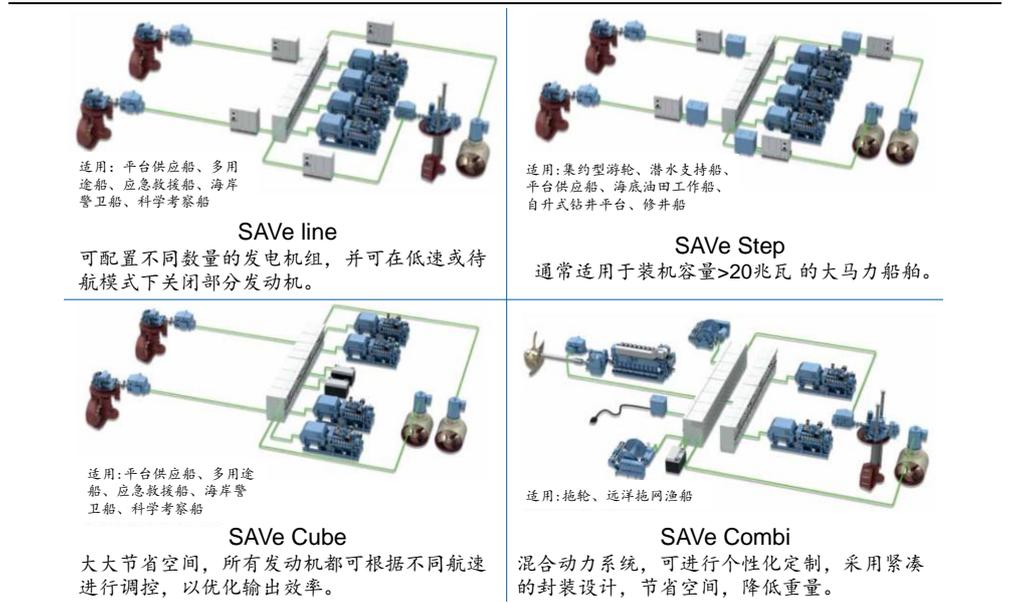
数据来源：通用电气，广发证券发展研究中心

通用电气的船舶电力推进系统广泛应用于军民领域。美国海军“马金岛”号两栖攻击舰（LHD-8）采用了通用电气的混合电力推进技术，根据该舰的首次部署情况估算，在七个月期间累计节省了超过1500万美元的燃料费用。据美国海军预计，该舰全寿命周期将节省燃料费用达2.5亿美元。

罗尔斯·罗伊斯：船舶推进装置和整合动力系统及服务的首选供应商。

罗尔斯·罗伊斯可为客户提供全面的系统解决方案，尤其在发电、输电系统和混合动力推进系统方面，拥有较成熟可靠的方案和技术。过去十年罗尔斯·罗伊斯在船舶推进系统全线产品的研发投入已超过60亿英镑，产品覆盖全回转推进器、侧向推进器、吊舱式电力推进器、喷水推进器等，开发了“美人鱼”（Mermaid）吊舱式电力推进系统，主要针对对象为近海工程和冰区航行船舶。在系统集成方面，其有着丰富的电推系统产品线，能够满足不同船型需求。

图16: 罗尔斯·罗伊斯电力推进系统产品线



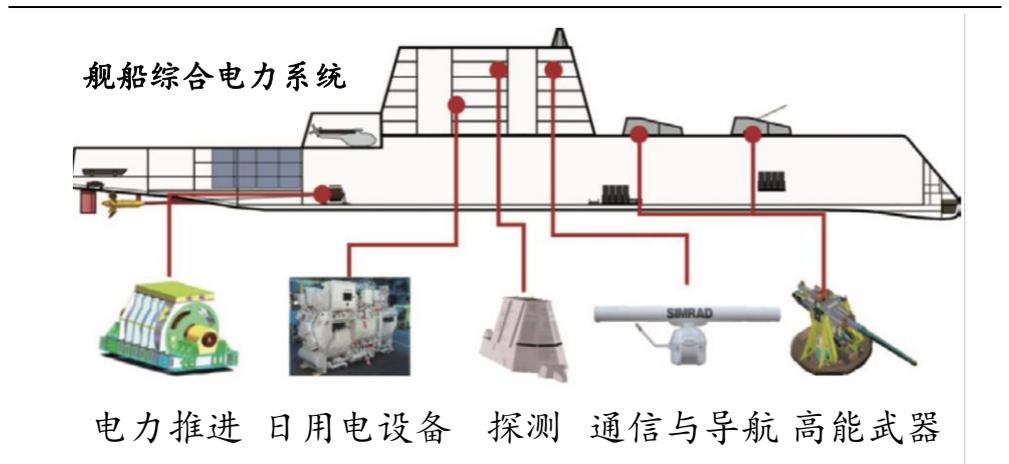
数据来源: 罗尔斯·罗伊斯, 广发证券发展研究中心

舰船综合电力推进系统是未来发展趋势

舰船综合电力推进系统: 实现电力和动力两大系统有机融合

舰船综合电力推进系统始于20世纪90年代中期, 实现了舰船电力和动力两大系统的融合。20世纪90年代末至本世纪初, 美英等国陆续完成陆上系统演示验证并开始进行工程应用。综合电力推进系统通过电力网络为推进系统、高能武器系统、通信、导航与探测系统和日用设备等提供电能, 实现了全舰能源统一供应、分配、使用和管理, 是全电化舰船的标志。

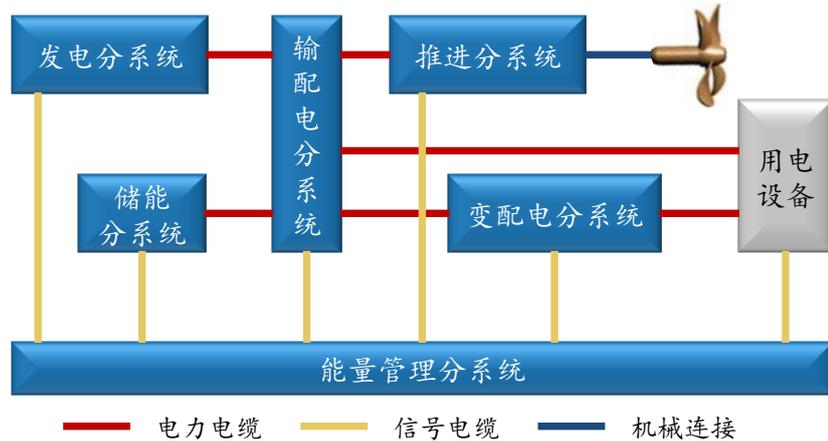
图17: 军用舰船综合电力推进系统



数据来源: 《舰船综合电力系统中的机电能量转换技术》(马伟明), 广发证券发展研究中心

综合电力推进系统给舰船动力系统带来了两大主要变化。其一，综合电力推进系统取消了传统动力系统的减速齿轮箱和长轴系，以电气连接取而代之，也不再要求将原动机和螺旋桨布置在同一轴线上。其二，综合电力推进系统可整合并合理分配全船各分系统的能量，满足在极短的时间内提供高能武器发射所需高品质、大容量的电能，适应未来战场的需要，这是传统电站无法比拟的。

图18：舰船综合电力推进系统实现途径



数据来源：《舰船综合电力系统中的机电能量转换技术》（马伟明），广发证券发展研究中心

舰船综合电力推进系统包含电能产生、分配、管理、功率变换、电力推进系统和舰载用电设备等环节。由发电机产生的电力通过电缆送到一个配电装置，该配电装置将电力分为两个配电系统：一个用于舰船推进，一个用于其它用电负荷。配电装置可以时刻改变两个系统间的功率分配以满足舰船变化的负荷需求。舰船推进系统用电通过电动机驱动装置，能够转换为推进电动机所需的电压和频率，从而使得推进电动机以合适的转速带动推进器，推进舰船在水中航行。

表6：综合电力推进系统的主要组成部分及作用

组成部分	作用
原动机	把其他能转化为机械能的设备，拖动发电机转子旋转产生电能。美国水面舰艇多用燃气轮机；美国潜艇和大部分航母采用蒸汽轮机，由核反应堆产生热能，再产生蒸汽；在其他最高航速要求不高的舰艇上则采用柴油机。
发电机	将原动机产生的机械能（高转速）转为电能。
配电装置	对电源进行分配、切换、保护、监视、控制，将电力分配至推进系统和各非推进用电设备，可以分为总配电板、应急配电板、动力配电板、照明配电板等。
电动机驱动装置	根据舰船上电力推进电动机的需要改变电能的电压和频率，从而达到操作要求并达到想要的航速。
推进电动机	将来自于电动机驱动装置的电功率转换为适合舰船推进器的低转速的机械功率。
推进器	以低转速推进舰船在水中航行，包括轴驱式、回转式、吊舱式等。

数据来源：《舰船电力系统》（兰海），广发证券发展研究中心

综合电力推进系统按照电制不同，主要可分为交流系统和直流系统。由于交流设备的可用现货更多，因此采用交流系统所需资金投入和生命周期成本更少，目前综合电力推进的工程应用中交流系统应用居多。但是直流系统具有震动和噪声低等优势，因此具有广阔的应用前景。另外，还可根据综合电力推进系统的电压等级将其

划分为低压、中压、高压系统，分别应用于不同总功率需求的舰船。

表7: 综合电力推进系统的主要类型及特点

分类标准	类别	特点
电制	交流系统	1)由于投入到制造交流设备(发动机、电动机、变压器等)的制造商更多,因此交流设备可用现货更多,目前因此采用交流系统所需资金投入和生命周期成本更少。 2)交流电制在民用船舶电力推进系统应用成熟,应用范围广。
	直流系统	1)解决了交流发电机组并联需电压的频率、相位和幅值相同的苛刻条件,降低了对原动机调速特性的要求。 2)系统更紧凑,功率密度更高,可满足未来高功率负载的电力需求。 3)震动和噪声低,适用于对声音和震动有严格限制的舰船,如某些军舰。
电压等级	660V 电压等级	适用于负荷需求小于 5MW 的小型舰船。
	6.6kV 电压等级	适用于负荷需求在 5-20MW 范围内的中型舰船。
	11kV 电压等级	适用于负荷需求在 20-70MW 范围内的舰船。
	13kV 电压等级	适用于负荷需求达到 100MW 及以上的大型高速舰船。

数据来源:《船舶电力推进、电力电子和海洋能源》(朱景伟),广发证券发展研究中心

根据各组成分系统的标志性技术,军用舰船综合电力推进系统可划分为第一、二代。世界各国已经进行工程应用的为一代舰船综合电力系统,适合于吨位较大(6000吨以上)的舰船,如美国DDG 1000、英国45型驱逐舰;欧美各国正在开展二代技术探索研究,目标定位于1000吨以上全系列舰船。电制方面,一代技术是基于中压交流系统,二代技术是基于中压直流系统;推进系统方面,一代技术采用基于IGBT/IGCT的推进变频器驱动先进感应电机,二代技术采用基于高度集成组件或碳化硅的推进变频器驱动永磁或高温超导电机;储能系统方面,一代技术没有应用储能,二代技术采用超级电容、集成式惯性储能或复合储能;能量管理系统方面,一代技术采用基本型,二代技术采用智能型。

表8: 舰船综合电力推进系统的标志性技术

组成分系统	一代综合电力推进系统	二代综合电力推进系统
发电分系统	中压交流工频同步发电	高速集成中压整流发电
输电分系统	中压交流工频输电	中压直流输电
变配电分系统	交流变压器或直流区域变配电装置	直流区域变配电装置
推进分系统	推进变频器	基于 IGBT/IGCT 的推进变频器
	推进电机	先进感应电机
储能分系统	无	永磁或高温超导电机
能量管理分系统	基本型能量管理系统	超级电容、集成式惯性储能或复合储能
		智能型能量管理系统

数据来源:《舰船综合电力系统中的机电能量转换技术》(马伟明),广发证券发展研究中心

舰船综合电力推进系统具有多方面应用优势

综合电力推进系统控制灵活,舰船机动性能强。舰船操纵方面,采用综合电力推进易于实现由驾驶室直接进行舰船的操纵,灵活可靠;推进电机控制方面,其转速易于调节,在正反转各种转速下都能提供恒定的转矩,动态响应快,易于得到不同工况下的最佳工作特性;设备选择方面,可以选择体积小、重量轻的中高速发电机

组，增加设备选择灵活性，同时能提高舰船生命力。

表9: 综合电力推进系统带来的舰船机动性优势

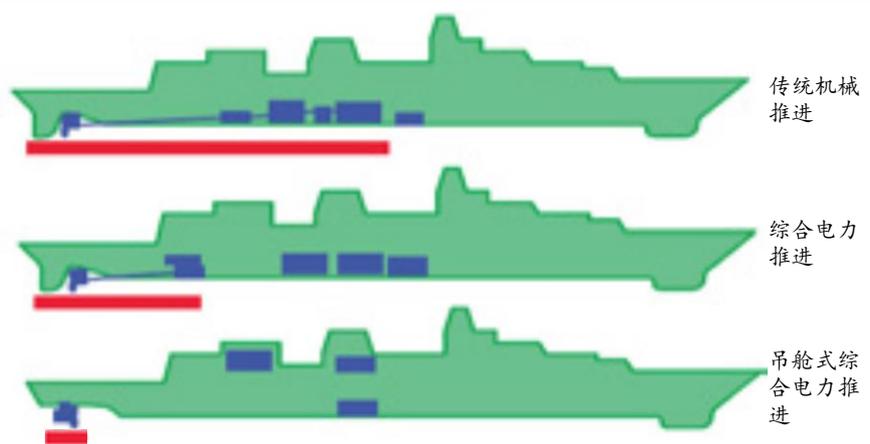
优势	技术性能介绍
舰船操纵灵活可靠	采用综合电力推进易于实现由驾驶室直接进行舰船的操纵，只需在驾驶室操纵发电机或电动机的磁场或改变晶闸管的触发角，大大减少误操作的可能性。
推进电机控制系统性能强	具有较好的拖动特性，包括：1) 低速特性；2) 快速性；3) 恒功率特性；4) 恒电流特性；5) 堵转特性，能够迅速适应舰船不同工况的要求。
设备选择灵活，生命力强	一个推进器（螺旋桨）可由两台及以上发电机组供电，可以采用体积小、重量轻的中高速不反转发电机组，增加了设备选择灵活性，当部分机组损坏时，其余机组仍可照常工作，生命力强。

数据来源：《舰船电力系统》（兰海），广发证券发展研究中心

采用综合电力推进能够降低舰船噪声和振动，满足舰船对于隐蔽性和舒适性的要求。发动机是船舶的主要振动源，采用电力推进后，发动机安装在弹性底座上，通过电缆带动发电机，以恒定转速运行，具有良好的调速特性，它既与轴系上的电力推进系统没有任何机械联系，与船体也无直接联结，能够大大减少振动和噪声，有利于规避敌方雷达声纳的搜索，提高舰艇生存能力，这一点对于要求隐蔽性的军用舰船显得尤为重要，也能够提高军舰对舒适性的要求。

采用综合电力推进能够节省舰船内部空间，有利于扩大舱容。机械推进系统的大型主机及其轴系占据了巨大的空间，其刚性的连接制约了全船的布置，传统船舶的轴系长度往往占到船长的40%左右。采用电力推进的船舶省却了传动轴系、减速齿轮箱，代之以电缆，使动力装置各种设备的安排更加合理，获得更大内部空间，简化了动力系统的结构，极大的提高了舰船总体布局的灵活性，优化了船体空间利用率。全电系统通过模块化设计，可以实现标准化和系列化，针对不同种类的舰船，进行不同模块的搭配组合，有利于减少动力装置型号数量，提高装备保障性。

图19: 综合电力推进与机械推进的机舱/轴系布置比较



数据来源：《新一代航母电力推进系统技术展望》（张启平），广发证券发展研究中心

舰船采用综合电力推进系统能够有效降低采购成本，提升舰船经济可承受性。民用船舶如果参照我国陆用能源-动力系统的造价进行类比，未来国产化的船舶综合电力推进系统在充分借助社会资源的基础上，有望将配套成本控制到和传统的机械推进方式十分接近甚至更低；军用舰船根据美军对DD-21计划进行的研究结果显示，

采用综合电力系统（IPS）后将能够降低舰船购置成本达千万美元级。

表10: 3.5万吨散装货轮传统与综合电力推进方式能源-动力系统造价对照表

推进方式	项目	简介	造价（万元）
机械推进	大功率船用低速主机	选用 MAN-B&W 6S42M 主机, 功率约 6500kW, 转速 136rpm	2800
	柴油发电机系统	500kW 的柴油发电机组 3 套组	600
	尾轴系统	-	40
	螺旋桨	采用单机单桨	100
	成本合计	-	3540
综合电力推进	柴油发电站系统	2500kW 6kV 高压柴油发电机组(320 万/套)3 套, 成本核算参照无锡百发的 SP3400 大功率柴油发电机组, 船用型在其标准价格上再上浮 20%计算	1150
	高压发电机组并网控制系统	-	110
	变频调速系统	选用 3500kVA 的 6kV 高压变频调速系统 2 套 (按 1500 元/kW 计算)	1050
	吊舱推进系统	采用 2 台 3200kW 6kV 交流同步电动机作为主推进电机, 每台电机加吊舱成本按 100 万元/套计算, 吊舱控制系统 50 万元	250
	变压器	整船低压配电变压器 1 套(2000kVA)	30
	螺旋桨	采用双机双桨	100
	成本合计	-	2690

数据来源: 《迎接船舶推进技术的变革》(尹涛), 广发证券发展研究中心

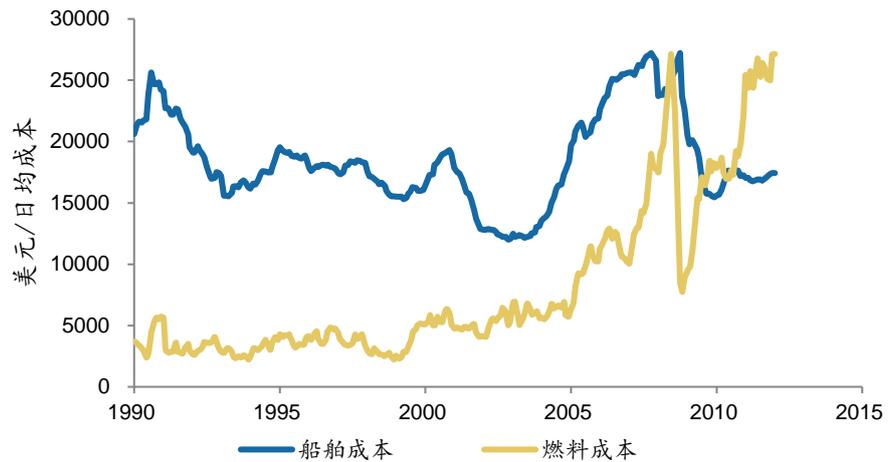
表11: 美国海军DD-21计划对舰船采用机械推进与IPS的成本比较

项目	机械推进	综合电力系统 (IPS)
舰船购置成本	基线	降低 1280 万美元
设备成本	基线	-0.5%~-11%
安装成本	基线	-8%
可制造性 (减少施工时间和工时)	基线	降低舰船成本的 1%

数据来源: 《Integrated Power System for Marine Applications》(Doerry Norbert H), 广发证券发展研究中心

船舶的航运成本模型近年来出现较大变化, 燃料成本占比不断上升。20世纪90年代中期, 船舶航运成本中, 船舶成本可达燃料成本的3倍以上, 随着近些年资本成本的下降和燃料价格的升高, 燃料成本已经超过船舶成本, 降低燃料成本成为降低船舶航运成本的切入点。传统机械式推进中, 舰船大部分航行时间都是采取的低速巡航状态, 全电推进舰船解除了原动机和推进器的机械耦合关系, 可以根据舰船的航速变化、舰船上电力负荷的变化、排水量变化更加灵活的调整原动机和发电机组的运行数量, 有利于原动机始终工作在最佳工况, 避免怠速工况, 因此提高了原动机工作效率, 降低了燃油消耗。

图20: 船舶航运成本构成

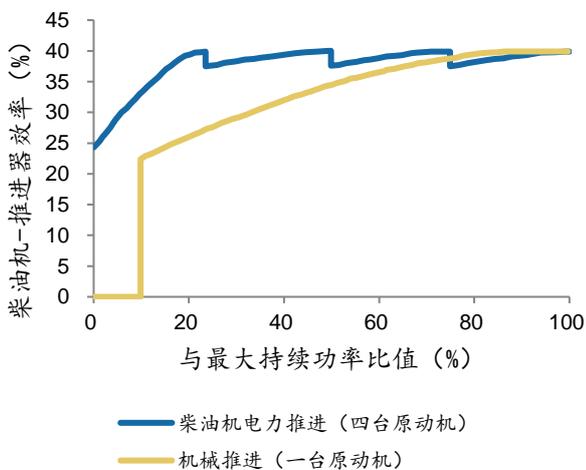


数据来源: ABB, 广发证券发展研究中心

综合电力推进系统可使用多台原动机, 在不同电力需求下维持较高的推进效率。电力推进所采用的电动机在5%-100%额定功率范围内均具有较高的效率(约95%), 而内燃机只有在85%-90%额定功率范围内能达到最高效率。相较机械推进采用一台原动机驱动, 电力推进可采用多台原动机, 基于电力需求的变化调整原动机的开启和关停, 从而在各种运行工况下均维持较高的效率。

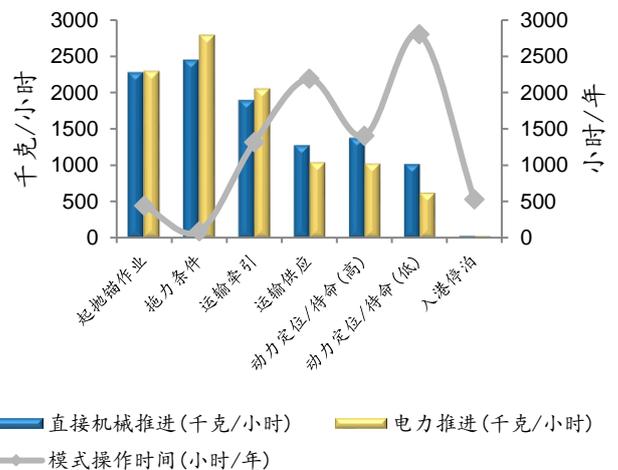
舰船采用综合电力推进系统能够降低燃料消耗、节省舰船运行成本。在舰船的不同工作模式下, 仅当舰船发动机接近满功率运行时采用机械推进的效率稍高, 其余模式下采用电力推进的效率均高于机械推进。根据ABB公司对某三用工作船的分析, 在一年时间内, 采用机械推进需消耗燃油11293吨, 采用电力推进则消耗燃油9397吨, 一年内节省燃油1896吨。根据美国海军数据, 驱逐舰采用全电力推进, 在30年全寿命期间将比机械推进节省16%以上的燃料费。

图21: 不同推进方式的推进效率比较



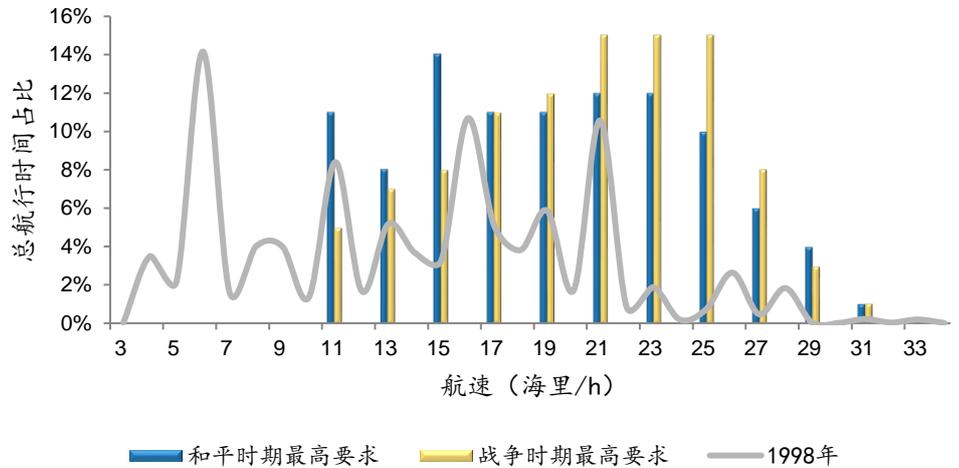
数据来源: 《船舶电力推进系统》(汤天浩), 广发证券发展研究中心

图22: 三用工作船不同推进方式燃油消耗量比较



数据来源: ABB, 广发证券发展研究中心

图23: DDG-51驱逐舰航行时间分配的最高要求与实际情况对比



数据来源: 《Propulsion System Choices for modern Naval Vessels》(Hubert F. Ohmayer), 广发证券发展研究中心

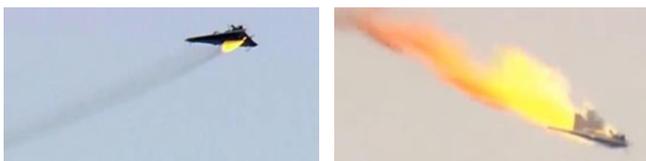
舰船综合电力推进系统是高能武器上舰的必由之路

高能武器是一种新概念武器,能够利用光、电磁脉冲、高功率微波等先进技术直接杀伤目标和破坏设备。高能武器主要包括高能激光武器、高功率微波武器、电磁轨道炮等。2012年8月,美国海军进行舰载激光武器拦截试验,装载于DDG 105号导弹驱逐舰上的激光武器成功使用高能激光持续照射靶机,使其燃烧并坠毁。2015年3月,美国海军首次公开一种由BAE公司研制的能够以7倍声速发射炮弹的电磁轨道炮,能以最高8690km/h的速度将一枚10kg的炮弹发射到161km远的目标,足以穿透165mm厚的钢板。

图24: 美军舰载激光武器击毁空中目标



装载于DDG 105号导弹驱逐舰上的激光武器



靶机被激光击中发生燃烧并坠毁

数据来源: 中国日报, 广发证券发展研究中心

图25: 美军电磁轨道炮试验画面



数据来源: 网易军事, 广发证券发展研究中心

舰载高能武器电力需求大,将导致舰船电力需求激增。舰载高能武器呈现高功率、

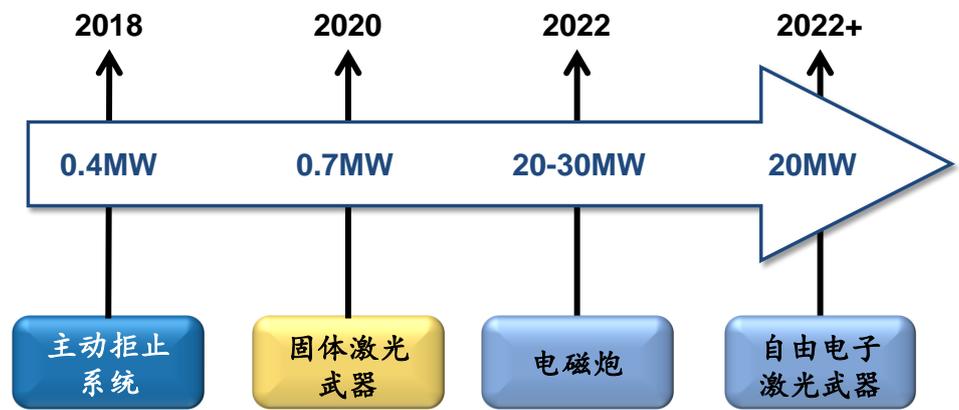
电力需求大的特点。近年来，发射功率在数万瓦至数十万千瓦的战术高能激光武器井喷式出现，成为当前各国研究的热点；高功率微波武器大约需要电力5MW；电磁弹射器平均需要电力10MW。高能武器上舰将极大地改变平台的能量供需结构，舰船的平台设计应首先考虑武器系统的需求来统筹全舰的能源系统。

表12: 美国海军计划分三个阶段实现舰载激光武器部署

阶段	激光武器功率及类型	部署目标
2017年前	重点发展 60-150kW 光纤和板条固体激光器	以执行近距防御性作战(约 1.6km)为主，主要打击目标包括光电传感器、小型舰船、无人机、火箭弹等
2022年前	发展 300kW-700kW 固体激光武器	增强作战距离，具备 16km 级拦截水面及空中目标能力
2025年后	发展兆瓦级自由电子激光武器	具备摧毁超声速巡航导弹和弹道导弹能力

数据来源：《高能激光武器发展态势》（李怡勇），广发证券发展研究中心

图26: 舰载武器系统电力需求增长趋势



数据来源：Electric Ships Office，广发证券发展研究中心

未来舰载高能武器电力需求将与推进电力需求不相上下，为舰船综合电力推进系统提供强力牵引。尽管当前水面舰船的总功率达到了数十兆瓦，但现役的多数舰船采用传统的机械推进方式，约占80%的原动机（主机）功率用来通过减速齿轮箱带动螺旋桨推进舰船航行，另外约占20%的原动机（辅机）功率用来发电，供给全舰的日常用电及舰载设备用电，仅有小部分的能量用于武器和探测设备。这种状况无法满足未来新概念高能武器的发展要求，电磁轨道炮、激光武器等高能武器为综合电力推进系统提供了强力牵引。

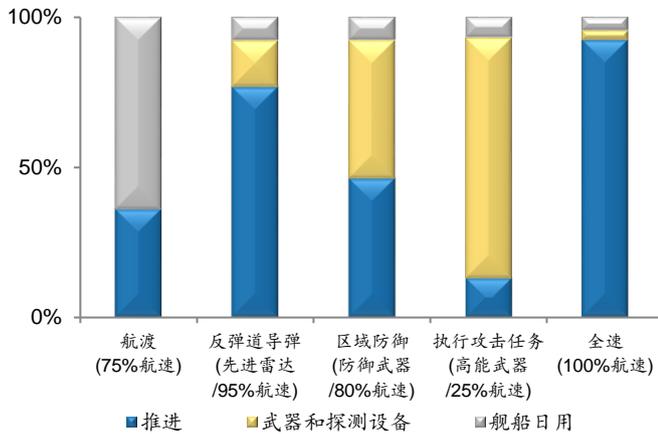
表13: 未来舰船各舰型推进和辅助负载功率需求估计

舰型	排水量 (吨)	总功率 (MW)	推进功率 (MW)	轴数	船用辅助负载 (MW)				抗冲击要求
					靠岸	系泊	巡航	执行任务	
护卫舰	4500	44	38	2	1.8	2	3.65	3.48	有
驱逐舰	6500	46	40	2			2		有
水面舰	9200	53	46	2			4.25		有
巡洋舰	18000	40	32	2			9		有
两栖舰	25800	36	30	2	4.95	4.95	5.65	5.85	有

航空母舰	26500	100	80	2		10.7			有
军用货船	41500	44	40	2	1.83	2.05	4.05	6.05	无

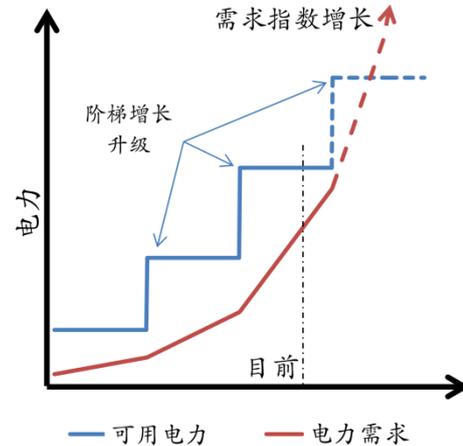
数据来源：《舰船电力推进原动机的探讨》（吴金源），广发证券发展研究中心

图27：未来舰船的电力需求/分配示意图



数据来源：《新一代航母电力推进系统技术展望》（张启平），广发证券发展研究中心

图28：舰船发电能力增长VS电力需求增长



数据来源：Electric Ships Office，广发证券发展研究中心

若采用综合电力推进系统，舰船总安装功率需求小于机械推进，执行任务时的机组功率利用率高于机械推进。对于大部分时间运行于50%的全功率下的军用舰船而言，综合电力推进系统可以使原动机最好地高效工作，使能量在各设备之间统一动态分配，充分发挥电能的优势，实现能量灵活调配、合理高效利用，使舰船能源利用效率达到最大化。

表14：某单体护卫舰两种推进方式下的安装功率需求比较（单位：MW）

推进类型	速度要求	总机械功率需求		总电功率需求		总安装功率需求	执行任务时功率利用率
		舰船推进	高能武器	舰船推进	舰船日用		
机械推进	全速	38.0	/	/	4.0	52.0	64.4%
	执行任务	19.5	10.0	/	3.5		
综合电力推进系统	全速	/	/	38.0	4.0	42.0	79.8%
	执行任务	/	10.0	19.5	3.5		

数据来源：《综合全电力推进舰船的负荷需求分析》（余又红），广发证券发展研究中心

舰船综合电力推进系统是未来使用舰载高能武器的必由之路，是军用舰船电力系统的发展方向。综合电力推进系统的特点是将舰船电力和动力两大系统融合，从全舰角度统筹能源分配，实现在舰船推进、舰船日用以及舰载武器和探测设备之间的电力合理分配，提高能源利用率，满足高能武器上舰需求，相较传统推进系统优势明显。

综合电力推进系统发展的关键技术问题

从分系统和系统集成角度来看，舰船综合电力推进系统存在六大关键技术问题：

- **高功率密度发电模块化技术：**未来舰船发电分系统以大容量和高功率密度为主要特点，为满足未来的工程应用要求，主要需要解决中高压多相交流发电机整流集成发电技术、交直流电力集成多绕组发电机发电技术以及高功率密度和高品质舰船集成发电技术。
- **高功率密度电动机及其变频调速技术：**目前，先进感应电机（AIM）、永磁电机、超导电机被公认为高功率密度推进电机，感应电机比永磁电机或超导电机在技术上更加成熟，永磁电机比感应电机更适合舰船使用要求，超导电机则具有比永磁电机更高的功率密度和更好的静音性能。针对高功率密度电机，需要对其进行调速系统设计，如直流推进电动机的最优调速控制技术、多相永磁交流同步电动机的变频调速系统等。

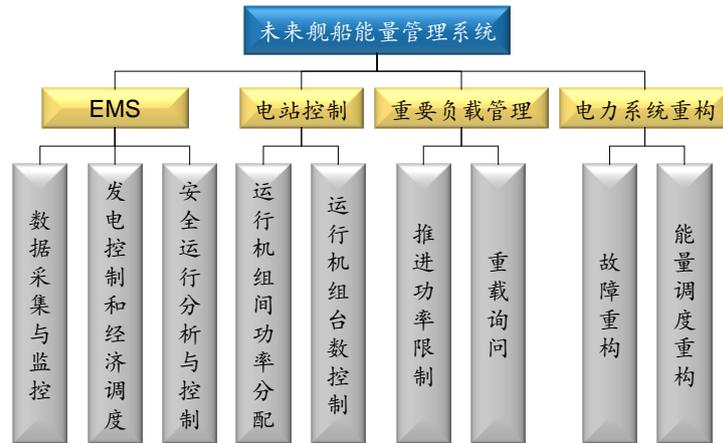
表15: 高功率密度电动机特点及发展趋势

电动机类型	特点及发展趋势
先进感应电机 (AIM)	AIM 是阿尔斯通公司结合 1995 年美国海军综合推进系统的合同研制的，采用针尖冷却技术和谐波做功技术等几项重要技术，功率密度很高、噪声和振动特性良好，完全适于舰上使用。目前该型电机已经应用于英国 45 型驱逐舰、伊丽莎白女王级航母和美国 DDG 1000 驱逐舰。
永磁电机	现代永磁电机采用稀土材料励磁，不仅使电机尺寸大大减小、重量减轻，而且维护方便、运行可靠、效率提高。与同容量的异步电动机相比，永磁电机效率提高 4%-13%，功率因数提高 5%-20%。但由于电机冷却的问题，10-30MW 额定功率的永磁电机的设计仍面临极大的困难。
超导电机	电力推进用超导电机通常做成超导同步电机，超导电机定子通常是无槽的，意味着气隙中可放置更多定子线圈，同时可提高气隙磁密。若将定子内径增加至 1.3 倍，气隙磁密提高至 2T，则超导同步电机的功率为相同体积传统同步电机功率的 4.7 倍。美国超导公司 (ASC) 已经为美国海军开发出 36.5MW、120rpm 的超导同步电机。

数据来源：《舰船综合电力系统若干问题分析》（杨青），广发证券发展研究中心

- **智能化能量管理技术：**未来舰船需要在大功率探测装置、高能武器（如电磁炮、激光武器）、其它大脉冲能源装置、重要设备（如舰载机电磁弹射装置）以及推进装置之间实现电能的快速切换，综合电力推进系统需要有足够的控制能力以保持系统的稳定。当高能武器和探测设备需要使用大量电能时，需要对其它系统的用电进行限制（此时综合电力推进系统迅速将推进装置接近100%的能量切换到武器系统中，而后再切换回推进装置，切换的全部电能将可能高达100MW以上）。

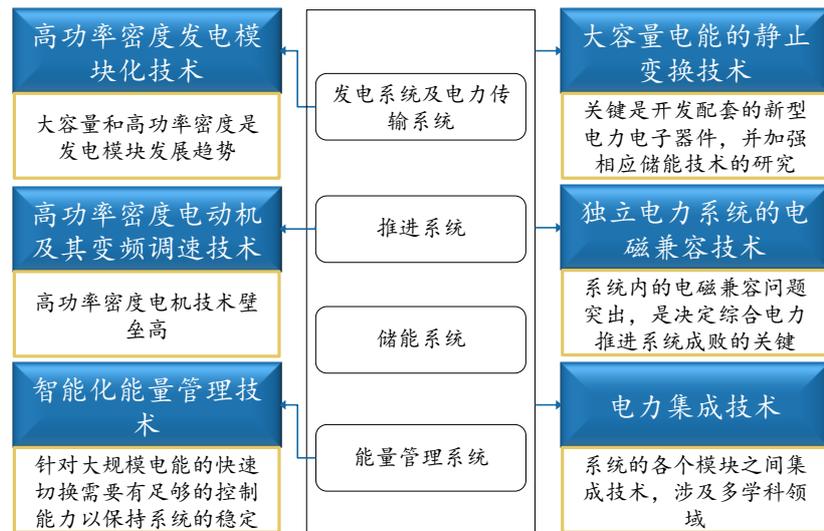
图29: 智能化能量管理系统功能模块构成



数据来源: 《舰船综合电力系统若干问题分析》(杨青), 广发证券发展研究中心

- **大容量电能的静止变换技术:** 实现大容量电能静止变换技术, 关键是开发配套的新型电力电子器件。美国海军研究局使用氢氧化物、集成电路、电力半导体、电力电子技术对模块化电力电子标准组件进行设计和制造; 采用宽带隙半导体材料(如碳化硅)代替硅, 以提高电力电子标准组件的运行温度和电压。此外应特别加强从连续电能到脉冲电能静止变换器的开发与研究, 并加强相应储能技术的研究。
- **独立电力系统的电磁兼容技术:** 舰船电力设备分布密集, 电力系统容量有限, 系统内的电磁兼容问题十分突出, 直接关系到系统和用电设备的可靠安全运行, 这也是决定综合电力推进系统成败的关键。因此需要进行的关键技术研究包括: 电力集成化模块中的电磁干扰、舰船直流电力系统电磁兼容、舰船交流电力系统电磁兼容、舰船壳体及电缆屏蔽网形成的地电网对电力系统电磁兼容性能的影响、整个综合电力推进系统电磁兼容性等。
- **电力集成技术:** 综合电力推进系统的设计涉及到多个学科领域, 是多种技术的综合应用, 舰船的作战需求也对系统提供电能的要求不断提高, 高品质和高功率密度是最关键的性能, 因此需要对构成系统的各个模块及模块之间的集成技术进行研究, 以达到系统的最优化设计。

图30: 综合电力推进系统发展的关键技术问题



数据来源: 《舰船动力发展的方向: 综合电力系统》(马伟明), 广发证券发展研究中心

国内综合电力推进系统发展前景日趋明朗

国内技术发展现状与应用现状

我国在综合电力推进系统的研发、制造和应用方面起步较晚, 近年来一些高校和科研院所在研发设计方面取得了突破。近年来国家在舰船电力推进领域实施了一系列科研项目, 国内各科研院所及高校如中船重工712所、海军工程大学等均在电力推进相关领域进行了技术攻关。其中, 海军工程大学马伟明院士团队首创舰船中压直流综合电力系统, 实现了我国舰船动力从落后到领先国外的跨越; 中船重工712所先后成功研制国内第一套具有自主知识产权的低压兆瓦级电力推进系统及核心设备、国内第一套中压3MW级电力推进系统及核心设备以及10MW船用电力推进系统及关键设备。

表16: 近年来电力推进领域国家级科研项目

项目来源	项目名称
国防科工局	舰船动力基础科研项目电力推进课题
国家科技部	科技支撑计划项目《船用电力推进系统开发及应用研究》
国家工信部	高技术船舶科研项目《船舶综合电力推进系统工程化技术研究》
国家科技部	重大科技专项子课题《深水油田工程支持船 3MW 级电力推进系统国产化研究》

数据来源: 中船重工712所, 广发证券发展研究中心

表17: 我国在电力推进领域的技术发展进程

发展途径	单位	项目及成果
中外合作 研发	中船重工 711 所	2013 年 2 月, 与 ABB 公司联合为当时国内最先进的渔政船提供动力集成系统。711 所作为动力系统集成单位, 将向农业部东海区渔政局新建 3000 吨级渔政船提供整套电站系统、推进系统和全船自动化系统, ABB 为该船配备全套电力推进系统以及 Azipod 吊舱推进器。
	上海海事大 学	2014 年 6 月, 与 GE 公司合作建设的船舶电力推进实验室正式启动, 这是国内首家全尺寸电力驱动实验室, 拥有全世界最先进的高转矩密度大功率中压电机、脉宽调制变频器以及模拟设备等。
自主研发	海军工程大 学	于 2003 年提出了我国发展综合电力系统应采用直流 4-5kV 的技术路线 (美国 2007 年提出“中压工频交流-中压中频交流-中压直流”的技术路线, 英国 2008 年提出“中压工频交流-中压直流”的技术路线), 不仅解决了交流发电机组并联需电压的频率、相位和幅值相同的苛刻条件, 而且降低了对原动机调速特性的要求, 克服了因原动机性能落后制约我国综合电力系统发展的瓶颈问题。 发电模块: 攻克了几百千瓦至数十兆瓦级整流发电机的集成优化设计、高效冷却等关键技术, 提高了我国舰用发电机的单机容量、集成化程度、运行效率和功率密度。 电力推进模块: 创造性地提出采用三次谐波注入和蒸发冷却技术的多套多相绕组大功率推进电机系统方案; 研制成功大容量新型感应推进电动机及其配套的变频调速装置, 实现了我国舰用电力推进系统的高功率等级、高功率密度和高效率, 满足了大型舰船模块化应用的需求。
		于 2012 年研制成功我国首台兆瓦级高温超导电机, 实现了从百千瓦级到兆瓦级的飞跃, 突破了多项关键技术。这标志着我国已经具备了兆瓦级高温超导电机设计、制造能力, 成为国际上少数几个掌握高温超导电机关键技术的国家之一。
	中船重工 712 所	于 2012 年研制出容量等级为 8 兆伏安 (MVA) 的高压变频调速系统, 并实现满功率稳定运行, 该系统能大幅降低电机能耗, 可节能 30% 以上。 于 2015 年首次成功完成 10MW 等级大功率船用电力推进系统及关键设备的研制, 所有关键设备均取得 CCS (中国船级社) 产品检验证书。这意味着我国自主研发的船用电力推进系统由 5MW 等级一举迈向 10MW 等级。

数据来源: 中国知网, 广发证券发展研究中心

我国综合电力推进系统在民用领域实现自主研发制造, 已经在国际上具备技术竞争能力。近年来我国先后自行设计建造了国内首艘电力推进清扫船“世纪之光”号、首艘电力推进游览船“黄埔”号、首艘千吨级小水面线双体船“北调991号水声测量船”, 2010年, 中船重工712所一举击败西门子、ABB等国际知名公司以及两家日本本土公司, 成为日本GT499T散货船电力推进系统的供货商 (合同额约1.2亿日元), 标志着我国电力推进系统已经具备国际竞争力。

图31: 我国自行设计制造的电力推进船舶



我国首艘电力推进清扫船“世纪之光”号



我国首艘电力推进游览船“黄埔”号



我国首艘千吨级小水面线双体船“北调991号水声测量船”



首艘由我国集成的日本电力推进船舶“GT499T散货船”

数据来源:《船舶电力推进系统》(汤天浩),广发证券发展研究中心

我国在综合电力推进系统上游的电力电子器件和相关设备国产化已经有了长足进步,有助于降低综合电力推进系统造价。无论主要的电力电子器件,还是移相变压器、变频器、推进电机,国内厂家都可以研制生产。第3代电力电子器件IGBT(变频器中的重要器件)及其应用产品已实现国产化,2014年国内首条203.2mm(8英寸)IGBT芯片生产线在中国南车株洲研究所正式下线投产,性能达到世界先进水平。不同功率等级的国产移相变压器、变频器和推进电机已在多型船的推进装置上应用,性能稳定可靠,维护保养方便,性价比明显超过进口设备。

综合电力推进系统结构和控制复杂,其综合控制技术是我国科技攻关、产业创新的重点方向。2005年以来,在国家863计划、国家海工装备研发计划、交通部和上海市11项重大科研项目资助下,上海海事大学、中船重工704所等单位投资2.9亿元建设了国际先进的10MW级大功率电力推进试验平台和电站中试平台,在国内率先研发出电力推进船舶综合控制系统及成套产品。

综合电力推进系统的应用空间

国家相关政策为我国舰船综合电力推进系统发展提供驱动力。“中国制造2025”等国家政策提出发展高技术船舶、提升我国高技术船舶的国际竞争力,同时针对综合电力推进系统配套设备核心技术以及设备国产化提出了发展要求。此外,在国家政策引导下,内河船舶采用LNG作为燃料并匹配电力推进技术将成为未来的发展趋势。

表18: 我国发展舰船综合电力推进系统相关政策

时间	发布机构	政策文件	要点
2015.05	国务院	《中国制造2025》	将“海洋工程装备及高技术船舶”列为十大重点发展领域之一,提出突破豪华邮轮设计建造技术,全面提升液化天然气船等高技术船舶国际竞争力,掌握重点配套设备集成化、智能化、模块化设计制造核心技术。

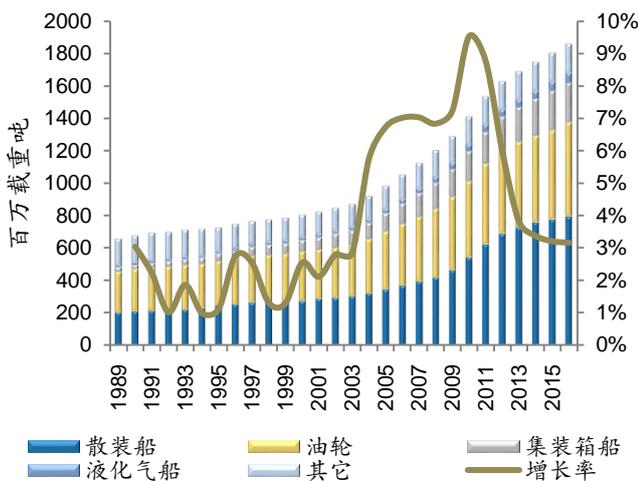
2015.12	工信部	《船舶配套产业能力提升行动计划（2016-2020）》	电力推进系统方面，开发 20MW 级船舶电力推进系统及低谐波变频器、永磁电动机和断路器等关键设备系列化产品，具备工程应用条件。到 2020 年，具备电力推进系统集成供货能力，产品系列完善，部分品牌产品国内市场占有率达到 30%。
2014.04	财政部	《内河船型标准化补贴资金管理办法》	对新建 LNG 动力示范船给予资金补贴。
2015.03	发改委、外交部、商务部	《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》	“21 世纪海上丝绸之路”战略为我国相关企业在船舶、海工装备等方面的发展提供了新的机遇。

数据来源：国务院，工信部，财政部，商务部，广发证券发展研究中心

综合电力推进系统是未来大型水面舰艇发展的必然趋势。 根据2015年版《中国的军事战略》白皮书，我国海军战略将逐渐向近海防御与远海护卫型结合转变。舰船综合电力系统是舰船动力平台的第三次革命，是未来中国海军发展的必然趋势。从动力驱动系统的角度看，目前我国的常规潜艇、核潜艇等水下舰艇已经初步实现了电力驱动；未来将重点突破护卫舰、驱逐舰等大型水面舰艇及其他军辅船的动力驱动能力。随着新型感应推进电机和新型变频器等核心技术的突破，电力推进子系统的理论分析、样机制造、系统集成以及功能试验考核等关键核心技术的完成，我国全电化舰船技术能够赶上世界发达国家的研制水平，未来舰船用综合电力系统将在海军舰艇领域迎来广阔的发展空间。

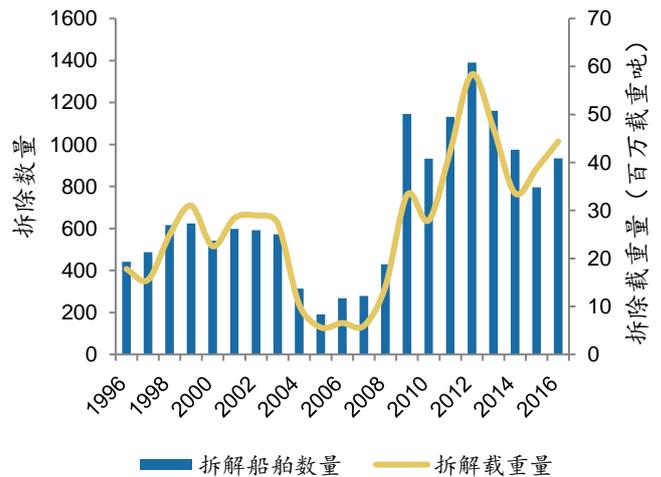
综合电力推进系统在油轮、LNG船等高附加值船舶及技术要求较高的舰船上应用是必然趋势。 以LNG船为例，全球LNG运输船队截至2017年中期共有465艘，将于2019年达到600余艘，近几年全球新造的LNG船中，采用电力推进装置的艘数占比和容积占比均已超过50%。随着国内对于高附加值船舶发展的重视，综合电力推进系统的应用空间可期。

图32：世界运输船队发展趋势



数据来源：Clarksons，广发证券发展研究中心

图33：世界运输船舶拆解趋势



数据来源：Clarksons，广发证券发展研究中心

表19: 综合电力推进系统应用领域及船型

应用领域	综合电推应用优势	典型船型
高机动性船	实现船舶的快速机动和自由巡航, 并具有静音、低振动等特点。	军舰、航母、豪华游船、商务艇、渔政船、海监船等
多用途多功能船	操作灵活, 辅助用电方便、工况适应性好。	搜救打捞船、功能复合型船、消防船、浮油回收船等
特种船	发挥电推低速大推力、低振动、堵转特性、匀低速、定位精确等优势。	破冰船、拖轮、科考船、测量船、渔船等
工程船及海工装备	特种作业设备多, 功率需求大, 采用电力推进, 可发挥综合电站优势, 适应多工况特点。	挖泥船、大型疏浚船、半潜式钻井平台、物探船、铺管船、多功能海工船等

数据来源: 《电力推进船舶发展方向浅析》(李丹), 广发证券发展研究中心

相关公司

湘电股份 (600416)

湘电动力成立, 员工持股实现混改。公司2017年6月29日公告, 公司投资设立的军工板块新公司“湖南湘电动力有限公司”已完成相关登记手续。湘电集团、上市公司、湖南国企改革发展基金企业以及员工持股计划各出资2.7、15.3、3.9、0.9亿元。湘电动力成立后, 将加快引进湖南军民融合装备技术创新中心和战略投资者。湘电动力的设立, 作为军工产品及其衍生的军民融合产品的研发、制造、销售基地, 打造军工产业平台。经营团队和核心骨干持股, 为未来综合电推等军工业务布局优质高效的生产管理模式。

加速布局综合电力系统业务。2016年9月20日公司完成定增, 募集资金用于收购控股股东湘电集团军工相关资产, 并投资建设舰船综合电力系统系列化研究和产业化项目。公司年报中表示, 公司将加快水面舰船综合电力系统、水下电力推进成套设备升级换代。我们认为, 湘电动力成立后, 综合电力推进系统产业化有望加速。

合作海军工程大学, 技术转化促进军品业务爆发。公司本次投资设立的湘电动力将引进湖南军民融合装备技术创新中心作为公司股东。创新中心由湖南省政府与海军工程大学联合组建, 开展海军工程大学科技成果转化及产业化等活动。海军工程大学马伟明院士团队在航母电磁弹射系统、综合电推系统方面取得了丰硕成果, 技术水平领先国外“十年以上”。引进创新中心作为湘电动力股东后, 公司的综合电力系统等军品业务有望快速发展。

中国动力 (600482)

中船重工集团动力业务平台, 打造综合动力服务商龙头。公司已成为中船重工集团旗下舰船动力业务平台, 从单一化学动力转变为涵盖燃气动力、蒸汽动力、化学动力、全电力、海洋核动力、柴油机动力、热气机动力的七大综合动力业务上市平

台。公司积极推进以军为本、以军促民、海陆并进的业务布局，积极推进内部资源优化整合，以军工业务为基础，深耕民品非船业务。当前公司参与研发及建设的海洋核动力平台示范工程，为实现我国海洋核动力“零”的突破奠定基础，未来市场空间较大。

受益于海军战略转型，以新型舰船动力提升装备实力。中船重工集团是海军舰艇动力的主要承研承制单位，充分受益于两机专项、海洋强国战略和海军转型及装备升级需求，各类舰船动力装备需求持续增长，其中新型燃气轮机、全电推进等动力装备发展空间较大，将带动公司军品业务快速增长。

民品业务持续开拓，内部专业化整合提升综合竞争力。

公司成立中国船柴公司整合集团内所有低速机业务，在制造成本、生产规模、服务体系等方面均形成规模效应，进一步提升柴油机业务的影响力和竞争力。同时，公司的中高速柴油机、化学动力等业务板块也有望进行整合。随着国企改革和院所改制的推进，股权激励将覆盖上市公司及下属子公司核心骨干，经营管理水平进一步提升，公司盈利水平有望实现新的跨越。

风险提示

综合电力推进上舰进度低于预期；军费持续低于预期。

广发军工行业研究小组

- 胡正洋：首席分析师，北京大学经济学硕士、上海交通大学机械工程及自动化学士，5年证券从业经历，2016年进入广发证券发展研究中心。
- 赵炳楠：分析师，哈尔滨工业大学工学学士和硕士，6年军工企业工作经历，3年证券从业经历，2015年进入广发证券发展研究中心。
- 袁晓宣：联系人，海军工程大学国防经济学士和硕士，4年海军装备部工作经历，2017年进入广发证券发展研究中心。
- 彭 雾：联系人，复旦大学微电子与固体电子学硕士，2016年加入广发证券发展研究中心。
- 滕春晓：联系人，上海交通大学机械工程硕士、南京大学工业工程学士，2017年加入广发证券发展研究中心。

广发证券—行业投资评级说明

- 买入：预期未来12个月内，股价表现强于大盘10%以上。
- 持有：预期未来12个月内，股价相对大盘的变动幅度介于-10%~+10%。
- 卖出：预期未来12个月内，股价表现弱于大盘10%以上。

广发证券—公司投资评级说明

- 买入：预期未来12个月内，股价表现强于大盘15%以上。
- 谨慎增持：预期未来12个月内，股价表现强于大盘5%-15%。
- 持有：预期未来12个月内，股价相对大盘的变动幅度介于-5%~+5%。
- 卖出：预期未来12个月内，股价表现弱于大盘5%以上。

联系我们

	广州市	深圳市	北京市	上海市
地址	广州市天河区林和西路 9号耀中广场A座1401	深圳福田区益田路6001 号太平金融大厦31层	北京市西城区月坛北街2 号月坛大厦18层	上海浦东新区世纪大道8号 国金中心一期16层
邮政编码	510620	518000	100045	200120
客服邮箱	gfyf@gf.com.cn			
服务热线				

免责声明

广发证券股份有限公司（以下简称“广发证券”）具备证券投资咨询业务资格。本报告只发送给广发证券重点客户，不对外公开发布，只有接收客户才可以使用，且对于接收客户而言具有相关保密义务。广发证券并不因相关人员通过其他途径收到或阅读本报告而视其为广发证券的客户。本报告的内容、观点或建议并未考虑个别客户的特定状况，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的投资建议。本报告发送给某客户是基于该客户被认为有能力独立评估投资风险、独立行使投资决策并独立承担相应风险。本报告所载资料的来源及观点的出处皆被广发证券股份有限公司认为可靠，但广发证券不对其准确性或完整性做出任何保证。报告内容仅供参考，报告中的信息或所表达观点不构成所涉证券买卖的出价或询价。广发证券不对因使用本报告的内容而引致的损失承担任何责任，除非法律法规有明确规定。客户不应以本报告取代其独立判断或仅根据本报告做出决策。

广发证券可发出其它与本报告所载信息不一致及有不同结论的报告。本报告反映研究人员的不同观点、见解及分析方法，并不代表广发证券或其附属机构的立场。报告所载资料、意见及推测仅反映研究人员于发出本报告当日的判断，可随时更改且不予通告。本报告旨在发送给广发证券的特定客户及其它专业人士。未经广发证券事先书面许可，任何机构或个人不得以任何形式翻版、复制、刊登、转载和引用，否则由此造成的一切不良后果及法律责任由私自翻版、复制、刊登、转载和引用者承担。