

# 第 1 章 总论

## 1.1 电力推进概述

### 1.1.1 电力推进的概念

现代船舶是利用能源带动动力机械装置做功进行水上航行的交通工具。船舶动力机械不仅需要动力，而且需要做功的装置，一般可分为动力供应原动机和推进动力装置（即被动工作机）两部分。原动机将燃料的化学能转变为机械能或者电能，转变为工作机使用的形式，带动其做功。自从高效的内燃机和涡轮机诞生以来，就取代了蒸汽机，目前柴油机在船舶上占有统治地位，大型船舶以及军舰多采用涡轮机。传统船舶主要是柴油机推进船舶，它利用燃料化学能转变为机械能直接带动螺旋桨实现船舶推进，推进柴油机兼有原动机和推进工作机的双重功能。目前我国仍然以这种推进方式为主，而发达国家只占 70%，已有 30%采用了电力推进。正是因为柴油机直接推进方式，才难以获得优良的个性化精确节能的推进特性，导致其推进性能粗糙且能效较低，并显示出不合时代的能量使用模式。利用电能做功已经成为现代先进的能量使用模式和精确控制的模式，并成为潮流，大电网已经取代了柴油机直接做功的模式，包括船舶在内，都以精确的电力推进作为发展方向。将原动机和工作机分开，由原动机带动发电机发电产生电能供应用户、由电动机及其配套的动力机械装置将电能转变为机械能做功。可见，现代先进的能量使用模式应该分为两部分：利用能源转变为电能的原动机和利用电能做功的被动工作机。这种能量使用模式在船舶上就是电力推进。

船舶电力推进是指由电动机带动船舶推进器或螺旋桨、进行船舶推进的技术，而不是由原动机或动力装置（例如风帆）直接带动推进器的模式，也就是把电动机作为船舶推进主机、依靠电力带动推进器的模式。与电力推进相对应的还有电磁推进，是通过固定在船体上的磁体所形成的磁场与流过海水中的电流相互作用产生电磁力，以其反作用而得到推进动力。它是超导技术的一种应用，是直接利用电磁力进行推进的方式。电力推进也可以采用超导技术，即制成超导电动机来带动螺旋桨工作。超导电力推进和电磁推进，是超导技术应用于船舶推进的两种不同的方式。不管哪一种方式，都是利用电流与磁场的相互作用产生电磁力，从而实现船舶推进。只是超导电磁推进不需要螺旋桨，而超导电力推进与常规电动机带动螺旋桨的方式一样，不同之处仅仅在于采用超导电动机。

现代动力船舶的运动是由推进器（如螺旋桨）与舵机共同完成的。螺旋桨承

担推进任务，它是船舶运动、产生航速的主动力和原动力；利用舵机可改变船舶的运动方向，具有操纵船舶航向的功能，是船舶运动的必要装置和辅助动力。

### 1.1.2 电力推进与热力机直接推进的差异

不考虑人力划桨，可以作为船舶推进的动力装置有三种：风帆、热力机和电动机。作为现代动力船舶的显著特点是采用强大的动力机械。热力原动机就是现代船舶的标志和开拓者。长期以来，热力原动机都是利用化石燃料的化学能，直到现在才开始利用生物燃料，且数量较少。可以说，从自带能源的动力船舶诞生以来，船舶动力机就是利用燃料化学能转变成热能、再转变为机械动力的热力机。它包括蒸汽机、内燃机和涡轮机。蒸汽机已被现代船舶和火车淘汰。目前主要采用内燃机和涡轮机。前者包括柴油机和汽油机，它们可利用柴油汽油酒精天然气及其混合燃料。汽油机由于安全因素在我国船舶上少见。涡轮机包括燃气轮机和蒸汽轮机，主要用于大型船舶。在当今船舶上，柴油机广泛应用于中小型船舶，目前柴油机船舶占有统治地位。这不仅是因为主流船舶大都采用柴油机作为推进主机、直接进行机械式推进，而且在于将其作为船舶辅机、即发电机组的原动机，以及在众多工程船舶上作为提供电力推进电源的发电机组的原动机。

从推进角度看，由于传统船舶采用热力机的目的是作为船舶非人力的动力推进装置，且作为唯一的船舶推进能源与动力，它与满足其他用户的用电需求的发电机组的原动机不同，且具有大型化的特征，是船舶的主要耗能装置，所以也称为船舶主机，而将传统船舶作为发电机组原动机的柴油机称为辅机。传统船舶的显著特点就是采用热力原动机直接进行船舶推进，现代船舶的特点则是电力推进。由于推进主机具有动力心脏的重大作用，所以一般习惯按照推进主机来进行船舶分类，将采用不同的动力机作为推进主机的船舶直接称为柴油机船舶、燃气轮机船舶或者电力推进船舶。

作为推进动力机，电动机是排在风帆和热力机之后的第三代动力机。电力推进与热力机推进的重大差异在于：推进主机是电动机，而不是热力原动机；推进方式是采用电气传动的方式，而不是由热力机与螺旋桨刚性轴连接，直接进行机械式推进，电力推进经过了电的环节。正是因为多了这一个环节，所以产生了一个传统习惯的偏见：认为机械式直接推进的能量效率高。实际上那仅仅是过去的技术，在现代电力推进技术面前，传统机械式推进的劣势凸显，不仅在控制性能上难与电力推进媲美，而且在能量效率方面也十分逊色，因此才出现了新型远洋电力推进船舶、电力战舰、潜艇、现代电力推进航母，以至于陆用电力坦克。

从能源与推进两方面来看，热力机直接推进、例如柴油机推进，其热力原动机同时扮演两种角色：能量生产者与推进装置，而在电力推进中的热力机仅仅只是作为原动力提供者及电源的生产者、并不是推进的执行者或者推进装置。由此可见，热力机直接推进是以机械方式将原动机直接与螺旋桨对接，而电力推进则

是将热力机与发电机相连,然后再以电的方式与电动机和螺旋桨相连,可称为机械硬连接与电气软连接的差异,由此,带来革命性的变化。在本质上,体现了专业化分工,从而可充分发挥各自的优势,必然可优化推进性能和大幅度提高能量效率。让启动、正反转、调速、制动性能较差的柴油机仅仅只是承担发电任务,以恒向恒速的方式工作,让控制性能优良的电动机来执行推进任务,各自的工作条件都得以优化,且工作任务单一,各得其所,恰到好处。

## 1.2 现代综合能源电动船舶概述

### 1.2.1 综合能源电动船舶的概念

显然,无论什么动力装置都需要能源,电力推进需要电源和电能生产装置,所以仍然离不开热力原动机和作为能源的燃料。所谓原动机是指利用燃料热能、水力和风力产生动力的机械,包括将太阳能转变为电能的光伏电池。所谓能源是指能够提供能量的燃料、核能、风能、太阳能等。目前主要能源仍然以化石燃料为主,以生物燃料、核动力、水力、风、光能等为辅。

由于地球上化石燃料即将枯竭,而人类社会对于能源的需求与日俱增,所以供求矛盾十分突出,能源危机已经威胁到人类生存和发展,因此有人提出了世界第四次工业革命或者技术革命的主要目的是解决能源问题。正是因为如此,在船舶和水上运输方面,综合能源电动船舶被提到议事日程。

综合能源电动船舶是指:采用目前已知的实用的多种安全能源和发电装置组成新型综合船舶电站,构成综合电力推进系统,以电能供应全船用户实现集中统一管理、以电力方式驱动推进主机——电动机实现船舶电力推进的全电动船舶,能够实现这种目标的技术就是综合能源电动船舶的电力推进技术。

综合能源是指以能源装置为载体和分类标准的多种能源的集合,在本质上是指多种能源与将能源转换为电能的多种装置的集合体,包括太阳能、风能、生物燃料、化石燃料的化学能等及其发电装置。在能源种类上要求尽可能采用清洁绿色的能源,而所谓安全能源是指排除核能,因为它具有一定的不可控性和产生一定安全隐患的副作用。由定义,本书将以风能、光能、岸电以及化石燃料为主体,它们的特点是:风光能及其装置“低能”且不稳定但潜力最大,可为主攻方向;燃料“高能”而稀缺,可为突击力量;岸电以蓄电池为标志且可储存风光能,是扩大风光能应用的不可或缺的因素,可为关键因素。

所谓船舶综合电力推进系统是一种新型系统,是指将传统的热力机直接推进船舶的推进动力与电站动力合二为一,形成一个同时为电力推进负载和其他用户集中供电的集成化电力系统,且能实现全船能源综合利用与统一管理,以“电推”带替“热力机油推”,并且以综合电力推进系统取代传统电推系统,这是当前国内

外船舶领域的主要发展方向。

由定义可知，采用现代多种综合能源是综合能源电动船舶与传统船舶的区别性特征。从严格意义上说，近代动力船舶基本上没有采用过综合能源。自从船舶以燃煤和燃油为动力，就放弃了风帆和风能，更没有大幅度利用太阳能和生物能。作为近代意义上的船舶，一般都只是采用单一能源作为动力，而谈不上以取代燃油为目标大幅度地利用综合能源。虽然常规潜艇依靠蓄电池进行水下推进、依靠柴油机进行水面推进，表面上是采用电和油两种能源，然而电能主要是在水面航行时由柴油机发电为蓄电池充电而获得的，而难以经常性利用岸电充电，且没有利用风光能。因此，常规潜艇不符合现代综合能源电动船舶的标准。核动力船舶虽然也采用燃油发电机组作为备用，但也没有大幅度利用综合能源。由此可以说传统船舶可能采用两种能源，但没有从取代燃油动力角度来利用综合能源。船舶为了提高运行可靠性，对于推进能源进行了加倍配置，例如增加燃油机组数量。同时，由船舶规范规定入级船舶必须设置应急照明系统，即必须配备蓄电池电源以及应急照明灯具系统，蓄电池充电主要由船舶电站解决，也可采用岸电充电，但相对较少。从能源看，传统船舶只有燃油，但具备多种电源，包括蓄电池应急照明电源以及燃油发电机组的交流电源。可见，传统船舶能源单一，而综合能源电动船舶具有能源多样化的特征，两者差异明显。正是因为能源紧缺，才将现代意义上的大幅度利用综合能源及其电动船舶提上议事日程。

定义中的综合能源只是针对电动船舶，为什么不包括柴油机直接推进船舶呢？原因在于：综合能源与综合电推系统具有必然联系和重大优势，后者不仅是全电力推进，而且是全电力供应，电能是现代能源使用主流模式；多种综合能源需要统一能源形式，而立足于电能可轻易实现转换而统一，且更有利于高效方便的使用；电力推进性能更优、效率更高；一个简单的道理是综合能源无法以机械能方式与柴油机并联推进。目前实用而安全的能源和装置主要有燃油燃气（包括生物燃料）及热力原动机、核能及装置、蓄电池及岸电（包括多种发电）、燃料电池及其原材料、风能、太阳能及其发电装置等。对于核能，由于其具有较大的不可控性和副作用，特别是在日本福岛核事故以后，人们普遍认为其不够安全，更加慎用，本书将不考虑核能。其他能源都属于安全能源。从长远看，太阳能前景广阔，风能是太阳能的一种形式，或广义太阳能、燃油燃煤天然气等化石燃料都是过去的太阳能化石形态，生物燃料是生物生长过程储存的太阳能，且生成极慢，氢气等可以与氧气进行化学反应的燃料需要由太阳能转化的能源制造。从使用角度看，太阳能装置以光伏电池的形式利用太阳能，且可采用蓄电池储存电能，从而可以简单地将光能转变为电能以化学能方式储存起来。机械能与电能可以借助于发电机和电动机轻易实现相互转变，并且能够以电能的方式简单方便地实现能量远距离传输和使用。可见它们都能够在电能的基础上统一，从而构成以电能生产传输和使用为主流模式的现代能源供应与应用的基本格局。正是由于现代综合

能源可以方便地转变为电源，所以船舶动力机械的原动机和工作机的两个方面就可以在电能的平台上简单地统一起来，同时由于电力推进的机械电气性能与节能水平远远优于热力机械式的推进，所以全电力推进就成为综合能源电动船舶的一种必然选择，一种高效率和高性能的工作模式。相对于柴油机直接机械式推进船舶而言，综合能源与电力推进具有天然匹配性，使得综合能源船舶只是针对全电动船舶。全电动是现代能源模式与综合能源以及综合电力推进系统相结合的必然结果。

概括现代综合能源电动船舶特征，即采用现代综合能源及节能技术与现代船舶技术及电推技术相结合；大幅度利用安全清洁绿色的风光能，并与岸电和燃油结合，组成多种能源综合船舶电站；采用现代综合电力推进技术；进行全电力推进。这既是区别于传统船舶的本质性特征，也是综合能源船舶的现代化特征。

### 1.2.2 综合能源的运行原理

多种能源组合在一起必须要有一种运行机制。弄清综合能源的运行原理可以反过来看为什么柴油机推进不具备这种机制。柴油机不仅在推进环节不如电动机，而且在能源组合环节也难以形成一种共同的工作平台。柴油机推进是将燃油化学能转变为热能、再转变为机械能来进行推进，而多种能源不能转变为机械能来并联推进，并且不能进行相互可逆转换，因此，机械式推进不具备上述电推的优点。燃油化学能不能简单与太阳能统一，不能相互转变，也不能与机械能相互可逆转变，且难以与电动机、蓄电池等装置简单地配套。一个简单的道理是太阳能装置可以直接带电动机、而不能带柴油机，加上机械式推进存在的固有劣势，导致柴油机推进船舶缺乏简单地利用综合能源、特别是利用风光能的基础。可见，电能可以构成一种共同的运行平台和机制：实现多种能源的相互转换，能够以柔性的方式与推进电动机连接，而且能与推进要求简单地实现统一。

同时，从现实情况来看，目前传统船舶或主流模式都采用柴油机直接推进。虽然配备了蓄电池，但是蓄电池和燃油能源基本上都是各自独立存在，即能源和电源没有统一。实际上传统船舶存在两种柴油机能源和一个应急电源，即推进主柴油机、辅机发电机组组成的电站以及蓄电池。辅机电站作为电力用户的电源，而蓄电池仅仅作为应急照明灯及其重要低压仪器仪表的电源，主推进柴油机则是螺旋桨的动力来源。可见，过去传统的船舶不仅没有、而且难以采用综合能源。这也正是综合能源只是针对电动船舶的原因。

以上不仅说明综合能源需要统一为电源的道理，而且预示着蓄电池在利用综合能源中的重大作用。蓄电池是综合能源运行原理的重要基础。其原理在于以储能方式增加利用风光能的数量且取用岸电，并且改变传统发电与用电同步模式。目前，风光能不稳定不连续，不能以发电和用电同步的方式来满足需求，而必须利用昨天的风光能，以蓄电池储存风光能的方式来满足用户连续性需求。因此，

电能和蓄电池不仅能够与风光能简单地统一，而且可解决风光能发电与用户用电同时性的矛盾，构成利用综合能源的另一个技术基础：储存能量。因此，目前利用综合能源必须利用蓄电池，这样才能增加利用风光能的机会、时间和数量。为了寻求燃油替代能源，综合能源应该以风光能为重点和主体，原因在于：燃料电池商业化有待时日，因多方面原因而难成主体，且不考虑核能，而生物燃料生长较慢，同时可将其归于燃油之中，如此，利用风光能和包括水力发电在内的岸电与燃油就必然是近期使用安全综合能源的主攻方向，并且应该逐步使其成为主力，因为燃油接近枯竭，而风光能前途无量。为了简化问题，本书将利用同一种能源生产装置的生物燃料、燃气归于燃油，同时不考虑核能，再将燃料电池归于蓄电池，且包括超级电容器，这样所谓的综合能源装置将集中于风、光、岸电、燃油发电机组，它们成为能源主流模式。

概括以上分析，说明了综合能源的运行原理，也就是将多种能源统一于电能，以构成推进动力装置的工作平台，同时满足电站与电推两方面的需求，形成综合能源的综合性电站与综合电力推进系统的相结合，这就是综合能源电动船舶的技术基础。综合电站提供了多种交直流电源，而现代电力推进可轻易实现与两种电源的配套，这种配套优势构成了综合能源船舶推进模式多样化的技术基础。原因在于：即使是将所有能源都转变为电源，也有交直流不同的形式，需要统一电源与电制，且可形成交直流两种类型的等效电源，还需要与电推方案配套。这对于传统船舶的电推技术仍然是困难的且难以优化，而对于现代电推技术却轻而易举，因为现代推进控制策略和电动机可与交直流两种电源直接配套，且具有多样化的优化方案。这得益于开关电源逆变技术和交流电动机的变频控制技术。它们不仅构成综合能源船舶的技术平台，而且也成为其现代化的标志。进而，由于综合能源最终立足于电能，所以全电力推进顺理成章就成为综合能源船舶另一个标志。

### 1.3 现代综合能源电动船舶的主要特征及其与传统船舶和汽车的差异

由综合能源的概念可知，现代综合能源船舶的主要特征是大幅度利用综合能源和采用全电力推进。为理解这个特征，可与传统船舶以及电动汽车进行对比。在一定意义上它可相当于混合动力电动汽车，或者说混合能源汽车就是一个综合能源的例子，即一方面采用蓄电池取用岸电，另一方面配备内燃机和燃油，形成电油结合能源，构成混合动力，可作为综合能源的一种类型。显然，由于汽车的受光面积较小且运行速度较高，所以难以大幅度利用风光能。由电力推进和电动船舶的定义来看，现代综合能源电动船舶必须是采用电动机作为推进主机来构成推进动力装置，由电动机带动船舶推进器或螺旋桨、进行船舶推进的技术和船舶，

而不是由原动机构成动力装置直接带动推进器的模式，概括为以电动机为主机、依靠电力进行推进的模式。然而，对于电动船舶和电动汽车都是有一个共同的问题，即是否全电动。这里存在一个电动船舶的过去与现代的差异，以及电动船舶与电动汽车的差异。常规潜艇采用“电油”双电源和机械电力混合推进，蓄电池电力推进与柴油机直接推进并存，而现在的电动船舶则是取用岸电的蓄电池与燃油机组并存，却采用全电力推进。与此类似的是现代电动汽车，虽然也是电油双能源，然而在推进方式上，不一定是全电动，存在两种推进模式。一是串联电推模式，即由发动机发电带动电动机进行推进，或者由取用岸电的蓄电池带动电动机进行推进。发动机不直接进行推进，这就是一种全电动模式，即双能源单电推。二是并联混合动力推进模式，即以发动机的机械式推进与蓄电池与电动机的电力推进两结合，也就是一种机电混合推进模式，即双能源机电混合推进。

可见，混合能源不等于混合动力推进，由于船舶与汽车差异悬殊，所以不能仿照汽车的混合动力推进模式，即并联运行模式，原因在于：船舶推进机械轴较长、加上原动机体积较大，且与轴系采用刚性硬连接方式，导致难以进行两种推进动力机械的空间布局；大型原动机的直接推进的性能极差且耗能高，导致原动机直接推进模式被电力推进所取代。因此，所谓现代综合能源船舶仅仅限于综合能源供电，而不是指混合动力推进方式，即在现代综合能源船舶的概念下，就是指全电力推进的电动船舶，而不考虑采用混合动力推进问题。可见，与电动汽车相比，在推进方式上，综合能源电动船舶相当于混合能源串联电推汽车模式，可概括为多种能源供电模式加全电力推进模式。

传统电动船舶也有全电力推进和混合动力推进两种类型，后者例如常规柴油机蓄电池潜艇。前者例如自航渔轮、挖泥船、航标工作船、起重船等工程船舶，采取一电两用的方式，工程作业不航行、航行不进行工程作业，采用电力推进。在分类上，仍然将两种类型都归类于电动船舶和电力推进的技术范畴。也正是在全电力推进这一特点上，才凸显出现代电动船舶和现代综合能源船舶的特征，形成与传统电动船舶的区别性和现代特征。

由综合能源电动船舶的定义可以看到，所谓综合能源是指能够进行电力推进的能源，而不是一般性用途的备用电源。同时在概念上，综合能源的使用是指同时在一条船舶上使用多种综合能源，而不是在不同船舶上使用不同能源，例如燃料电池和酒精船舶。由定义还可以看到，综合能源的构成具有比汽车更加广泛的内容，不是一个简单的电油混合的问题，而是可以采用汽车不能大幅度采用的能源。综合能源是问题的一方面，其能源和能量转换方式是另一方面问题，例如燃油和酒精都是综合能源，然而其能量转换装置都可以是内燃机，太阳能的转换则是采用光伏电池。此外综合能源与电源是不同的内容，在电源中，还有直流电源和交流电源的区别。因此在明确了现代综合能源电动船舶的综合能源及全电力推进的主要特征以后，综合能源和船舶电站的组合构成方式就成为主要课题。综合

能源的构成配套方式取决于其工作原理和配套数量关系，而船舶电站的组合构成及控制方式取决于电源的性质特点及配套关系，两者都同时与船舶电能需求和推进控制模式相关。由以上的这些因素，就可以对现代综合能源电动船舶进行分类，由此可以成为分类标准。

## 1.4 现代综合能源电动船舶基本分类和主流模式

### 1.4.1 分类原则概述

以多能源和全电力推进特征为基点进行分类，可以不考虑传统电推模式，以及机电混合推进，而是将注意力集中到具有综合能源的现代电力推进模式及船舶上来，由此，可简化问题。参考文献[1]罗列出新旧电推模式类型，取其中的综合能源全电推类型就可以得到现代综合能源电动船舶模式。现代综合能源电动船舶的基本分类就是这种船舶的总体方案类型划分。总体方案包括能源供给和电推方案两方面的内容，能源供给包括能源组合和电站构成两部分；电推方案包括电源转换与推进电动机控制策略两部分。为了简化，可以首先将能源供给和电推方案两方面内容分开来进行单独分析和分类，然后再将结果叠加起来，形成总体方案。

#### 1.4.1.1 能源供给与电站分类

能源供给包括能源组合和电站构成两大课题，且涵盖了能源转变为电源、电制统一、电参数控制调节等基本问题。对于电动船舶，能源供给就是电源供应，即供电问题。能源组合包括能源选择与组合的类型，是指由哪些能源构成船舶的综合能源，它由需求、用途、目的、方法、造价等多方面的因素来决定。它是指船舶所选择的能源及和组合的方式，例如可选择风光能与蓄电池、岸电组合，也可以不采用风能，能源组合由需求与能源特性决定。能源选择的标准在于能源转换为电源的方式和装置、电源性质和能源密度高低强弱（以质量能量密度来衡量）情况。目前，能源的高低强弱情况为：核能、特种液体燃料、燃油、燃气、生物燃料、岸电（即蓄电池，因为它决定取用岸电数量）、风光能等。根据不同情况，船舶采用综合能源的比重和数量完全不同。不考虑核能，以上能源组合可形成的主要类型有：风光能岸电；气电，即燃料电池与蓄电池；电油，即蓄电池与热力发电机，风光电油气等组合。其中，油可以包括所有液体燃油和生物燃料酒精等，气是指液化气、天然气和氢气等。

为了简化问题，将利用同一种能源生产和转换装置的能源归纳为一种类型。将所有液体燃油和气体燃料，包括生物燃料、燃气、液化气、天然气等，都归于燃油，它们的能源装置是热力机，且能源生产转换方式相同，所以都可以归类于燃油加热力机的类型。再将燃料电池归于蓄电池、且以蓄电池代表岸电，并将超级电容器也归于蓄电池。这样综合能源的主体将是风能和太阳能及其装置、岸电



及蓄电池、燃油及热力发电机组。显然蓄电池与燃料电池也可以形成气电结合，且性能优良，但燃料电池难以商业化，所以气电模式不是主流。由此，剔除次要因素，概括能源组合的主流模式是：“风光电”，即风、光能与取用岸电的蓄电池组合；“电油”、即取用岸电的蓄电池与热力发电机组；“风光电油”，即以热力发电机为主，与蓄电池及岸电、风、光能组合。以上没有考虑发电机组带动电动机的电力推进模式，因为它是单一能源，与综合能源模式具有极大差异。

综上所述，确定了能源组合分类的四个原则，一是以能源转换生产装置为标准划分能源种类，且进行归类简化；二是按照能源与能量转换装置的种类或者电能生产装置的种类组合类型来划分综合能源及其电站类型和船舶模式；三是考虑能源发展前景，抓住安全主流能源；四是只确定大类型，以其包容具有基本相同点的小类型。采用以上原则有以下的理由：

第一，由现代能源使用模式决定，综合能源船舶的能源使用的优化方案是以电能供应电动机来实现电力推进，由此决定综合能源必须转变为电源。综合能源必须与其电能转换生产装置统一，离开了电能转换装置，即使是有能源也无用处。能源装置可以理解为能量源，是产生和供应能量的设备，综合能源则是能量装置的原材料。可见，同一装置使用不同的能源，例如燃油和酒精，这与主流模式的综合能源及其船舶的概念是有一定差异的。综合能源船舶是指在将能源进行了归类以后，采用多种能源装置的船舶，即能源装置多样化船舶，其综合能源的概念应该是指能量装置与其可使用的综合能源的集合，且主要是指能量生产装置。而同一装置使用的综合能源则是特指单纯的能源种类，是将能量装置剔除以后的概念。显然主流模式以能量装置分类更加科学，因为对于船舶利用综合能源而言，能量装置作为能量生产及电能供应的工具和手段具有关键性作用，在总体上决定所能够利用的综合能源的种类和数量，决定最基本的供求关系。对于船舶能源安全而言，能源装置是计算可靠性的基础。单纯从同一内燃机利用综合能源来看，利用生物燃料虽然可减少化石燃料的使用，然而从能源及其转换装置两结合的角度看，从船舶利用风光能的目的来看，内燃机是无能为力的。要想增加综合能源的份额，关键在于增加能源装置，能源装置的种类多样化标志着船舶能源供应充足性和能源安全性。可见，以能源转换及电能生产的装备为基础、将能源与能源装置结合起来的进行分类是具有科学根据的，可简化问题、抓住关键。

第二，从能源发展前景来看，由于化石燃料即将枯竭，而生物燃料严重不足，只有风光能可以说是用之不竭的绿色能源，因此，将目标主要集中于能源发展前景最广阔的风光能是完全正确的，同时，也必须注意它的能源转换装置是区别于内燃机的。由于风光能装置低效，其供应量与实际需求差距甚远，导致目前难以全面脱离高能化石燃料，因此，抓住风光能、珍惜化石燃料，实现逐步由风光能与化石燃料两结合向未来的风光能过度是完全必要的。同理，对于燃料电池，由于其燃料相对稀缺而不是能源主体，所以，为了简化，将其归

并于动力蓄电池。

第三,抓住主流模式的大类型有利于简化问题。大类型的主要能量装置是相同的,所以其主要工作原理也相同,而辅能源装置即使是不同,也不影响基本特性,由此,还可以将大类型简化为最基本的模式,从而便于抓住本质特征。

能源组合是电站构成的基础。电站构成是指如何将能源转变为电源且统一电制,构成统一电站。能源组合确定了基本电源种类,接下来就需要将它们统一为一种电源,要考虑电源为何种类型、选择何种电压、控制策略等问题。电站可以统一为直流电,也可以为交流电,其方法是整流和逆变。显然将交流电整流为直流电更加简单方便,同时因为蓄电池的存在需要充电环节,所以能够简单地配套,再加上目前占有统治地位的电动机控制策略都需要直流电源,因此,综合多种因素,可将直流电源作为电站主流模式。总之,可形成两种等效电源,由电源性质就可以决定电站分类标准。可见,电站构成包含着能源转换及电制统一两个课题,后者需要进行电源变换。

#### 1.4.1.2 电源转换与推进控制策略分类

从电推方案的角度来看分类原则,本质是一个如何用电的问题。电推方案包括电源转换和推进电动机控制策略两方面课题。由于推进电动机的作用是把电源的电能转化为机械能传递给螺旋桨,因此,它必须满足用户工作要求,同时也必须从控制策略的需求出发对电源提出电流种类和电气参数的要求,而电源往往难以满足这些要求,于是需要由电源转换来实现供电与用电的对接,进而由控制策略来实现对于电动机的控制。可见,电推方案在总体上包括对于电动机的最佳控制和对于电源的最佳转换两个方面内容。显然,推进的电源转换不同于电制统一的电源转换。

由于确立了全电力推进的基点,所以,可完全不考虑机械推进和机电联合推进的问题。从电源转换和推进控制策略两方面来看,后者主要针对于电动机,针对于用电方式;前者针对于电源种类和参数的适配。按照用电方式分类,实际上是按照电动机种类分类,只有直流电机、交流电机和永磁电机三类,所以控制策略也有三类,因为控制策略是与电动机配套的。所谓按照控制策略分类,在本质上是指按照满足不同电源和电动机的配套要求、以及电机种类要求的启动调速制动停止换向的控制原理、方式和设备进行分类。所谓控制策略,即如何使电机满足负载对于转矩和转速的要求,并同时达到节能目标的控制程序和方式。具体而言是如何选择启动、调速、制动和换向的方式来实现对于电机全过程的控制,以及为实现控制策略而采用的技术、方法及设备的总和。电机控制的重点和关键是调速,任务是将电源转换成适应于电动机的电力供应给电动机、再传递给用户,控制方法是改变电源和电机电路参数,以获得最佳控制特性。在本质上是一个电气传动的问题,综合性目的是在满足电气和机械特性要求的前提下达到高度节能的目标。而改变电路参数的方法就是实现控制的技术和手段。

虽然按照电动机种类分类,推进控制策略可分为直流电机、交流电机和永磁电机三种模式,但在实际上,因为永磁电机的控制可以分为直流和交流两大类型,所以在本质上,基本控制策略可以分为直流和交流两大类型。一般而言,推进电动机和控制策略必须与一定供电电源配套,按照传统方法,即交直流电动机都分别与同类型电源配套。然而由于变频技术的发展,交流电动机及一些控制策略也要求供应直流电,例如V/F变频变压法、矢量法等。由于目前交流电系统十分成熟,而直流发电机和电动机基本上被淘汰,或者说交流电系统成为主流模式,所以决定了发电和电动环节都采用交流电系统,特别是在电动机环节均采用变频调速技术,包括所谓的直流变频和交流变频调速系统,因此,推进控制策略的主流模式就是交流电动机变频控制。这种控制策略有需要直流电源的,也有需要交流电源的,且前者占有主导地位,因此,可将直流电制作为电源的主流模式。可见,可以淘汰直流发电机,但不能没有直流电源。结合电站的基本电源模式来看,也有交流和直流两种类型,所以在一般情况下,电站与推进控制方式完全可以轻而易举地实现对接。当然,问题并非如此简单,由于综合能源的构成种类及比例不同,电源和电制统一的方式也不同,所以对于具体船舶,电源电制以及控制策略的方案必然有优劣差异,需要进行具体分析。然而,由于电站的主流模式是直流电源,而主流的交流电动机变频推进控制策略也要求直流电源,因此可以把立足于直流电源的交流变频控制策略作为主流模式,称为直—交变换变频模式。

综上所述,将能源供给与电推方案相结合,分析电源转换方式,综合能源电动船舶只能是交—交变换变频、直—直变换变频或非变频、直—交变换变频、交—直—交变换变频等。所谓交—直—交的含义是:由交流电源整流为直流电,由直流电进行交流变频。必须指出,这里的电源转换不同于电站为了电源和电制统一而进行的电源变换。它有两种含义,一是对于交流电动机的变频控制而言,需要将电站直流电或者恒频交流电转变为变频电源以驱动电动机,二是在更多的意义上是指由电站电源性质转变为推进电动机电流的性质。例如,上述的直—直变换变频或非变频是指以直流电供应给直流电动机,按照直流方式进行控制;也可以向变频器供应直流电,再通过变频器形成变频交流电源去驱动交流电动机。

#### 1.4.2 主流模式

综上所述,将能源供给和电推方案两者结合起来,就可以构成现代综合能源电动船舶的主流模式。从能源供给模式看,首要的课题是能源组合内容。能源组合的主流模式是:风光能岸电;电油、即蓄电池加燃油机组;风光能加电油,即以燃油机组为主,与蓄电池加岸电、风光能配套。概括为风光电、电油混合、风光电油三种模式。显然后者是前两者的叠加,可以归并为第二种类型,即有燃油发电机组的类型,而第一类为无发电机组的类型。第二个课题是电站构成方式,包括采用交流还是直流、选择何种发电装置及控制策略等。

第一种类型没有热力发电机组，还可划分为更小的类型。太阳能发电和取用岸电的蓄电池都是直流电。风能发电一般采用频率隔离型变速恒频模式，且主要是因为风力发电为变频交流电，所以一般需要将交流电整流为直流电，再转变为恒频交流电，进行上网，因此它也可以作为直流电源对待。所以三者都是直流电源。这样就可以简单地与蓄电池形成配套方案。蓄电池的作用在于保持工作连续性，三者构成一个等效直流电源。由此，将多种电源统一为直流电制就顺理成章了。三者的构成比例可由连续工作时间来决定，形成一定时间的不间断电源或电站。

第二、三种类型都有发电机组，且一般以此为主能量源，两者都具有不同性质的电源。不考虑直流发电机，所以发电机组一般是交流电，它与风光能装置及蓄电池配套，必然存在交直流电统一的课题。统一的方法是整流和逆变，显然逆变复杂，整流简单，且由于蓄电池的存在而必须设置充电环节和直流电环节，而使整流具有综合配套价值。同时，对于主流模式的交流电动机变频控制策略而言，需要与直流电源配套，因此，综合考虑，整流为佳。由此决定第二、三种类型船舶最简单的方案也是直流电电源，如此，可将直流电源和电制作为电站能源供给的一种主流模式。后面还可以看到直流电制具有许多优点。当然电制统一还有很多内容，在这里只是进行简单而概括性说明，以便于理解分类原则。显然，综合能源电站与单一发电机组带电动机的电力推进方案是不同的。后者因为没有直流电环节而可以采用交—交变频模式带电动机。对于综合能源电站必须考虑蓄电池的存在，因为它能扩大风光能的利用、并优化综合能源的使用，所以不能单纯考虑电制统一问题。

综上所述，对于现代综合能源电动船舶，为了充分利用风光能，必须设置蓄电池，由于蓄电池的存在而决定电站的电源供给主流模式必然是直流电。

再来看电推方案，它包括电源转换和推进控制策略两个主要课题。控制策略由推进电动机决定。推进电动机包括直流、交流和永磁电动机，在本质原理上可分为交流或者直流电动机及其相应的驱动方式和控制策略。对于主流模式，不考虑直流电动机，而以交流电动机、包括所谓的交流方波驱动的永磁无刷直流电动机和交流正弦波驱动的永磁无刷交流电动机为主，且都采用变频控制技术，形成所谓直流变频和交流变频模式，而在原理上都是交流变频，所以，控制策略的主流模式是对于交流电动机的变频控制模式。

变频技术有多种分类。由电源的差异可形成交—交、直—交、交—直—交等主流模式。交—交针对单一发电机组带交流电动机的模式，且因为它不能与风光能发电装置及蓄电池直流电源配套，在这里不考虑，至少不作为主流模式。直—交针对风光电模式，因为只有直流电源。交—直—交针对风光电油模式和电油混合模式，因为其直流电必须由发电机组的交流电而来，所以需要整流环节，当然不一定采用传统的整流技术，而可以采用更加节能的间接型矩阵模式

来获得直流电源。可见，以上两种模式都同时具有交直流两种电源，且交一直一交意味着电源转换过程有直流电环节，从而可理解为电站为直流电源。因此，这与风光电模式的直流电源完全一样，从而进一步说明直流电制和直一交变换变频模式，以及交一直一交变换变频模式可作为主流模式。

必须指出，直一交、交一直一交模式是不同的，不仅是因为原始供电电源不同而区别于有无整流环节，而且因为两者的控制策略不同。直一交模式可以采用V/F法、矢量法、直接转矩控制法等控制策略，交一直一交模式显然可以采用与其相同的控制策略，而且还可以采用间接型矩阵变换式的交一直一交变频控制策略，它与传统交一直一交PWM变换器不同的是中间直流环节可不采用大容量储能器来滤波，且可直接与蓄电池配套，具有多种优势。可见，交一直一交模式包括两种结构和控制策略，一是传统交一直一交PWM变频器，即背靠背电压型PWM变换器，实质上是由交一直整流与直一交变频两部分组成，因此，它完全等同于由直流电源进行变频。二是间接型矩阵变换器和间接空间矢量调制算法两结合的矩阵变换及变频控制，具有虚拟整流环节和虚拟逆变环节，但整体属于间接型矩阵式变换及变频。

概括以上的多种控制策略，仍然都可以归于交流变频控制策略，由此可见，交流变频控制和直一交以及交一直一交变换是电推方案的主流模式。然而，既然推进电动机交流化和变频控制成为主流，那么，为什么还有所谓直流变频呢？实际上，无论是所谓直流变频还是交流变频在原理上都是交流变频，只是两者的驱动波形不同，一个是方波，一个是正弦波，以至于在习惯上将方波变频称为直流变频；同时，由于直一直模式意味着可以采用直流电带直流电动机，因此，为了简化和区别，将所谓直流变频归于实质上的交流变频之中，而不考虑直一直模式与直流电动机的配套，至少是不将其列为主流模式。由于电动机具体控制策略比较复杂，将在后面专题说明，所以这里主要说明分类的大原则大界限，且针对电推方案主流模式，确定其交直流的性质和是否采用变频控制策略的大界限。

立足于电源供给方案的直流电源主流模式和电推方案的交流电动机变频控制策略主流模式，电源转换的方案就水到渠成了。在电源与电推方案的所有可能的组合形式中，剔除非主流模式，就可以得到电源转换的主流模式，这就是：直一交变换变频、交一直一交变换变频等。

在确定了能源供给方案和电推方案以后，就可以将两者结合起来，构成现代综合能源电动船舶的主流模式，或者说是现代综合能源电动船舶的总体方案。也就是立足于综合能源的不同组合和电源统一方式形成的电源供给模式、与电推方案的推进电源转换及推进控制策略叠加，就可以形成综合能源电动船舶的主流模式：蓄电池加风光电充电模式的直一交变换变频模式；取用岸电的蓄电池加燃油发电机组的交一直一交变换变频模式；蓄电池加风光能岸电燃油综合能源的交一直一交变换变频模式。三者分别如图1-1至图1-3所示。由于综合能源电动船舶

必然采用全电力推进的模式，所以对此不必特别说明，为了简化，只需要说明电源供给和转换模式即可，即以电源供给和转换作为决定船舶模式的主导性决定性因素，而将三者简称为风光电直—交模式、电油混合能源和风光电油综合能源交—直—交模式，或者进一步简化为风光电模式等。由于电源组合和电站构成以及电推方案控制策略的内容十分复杂，所以将在后面的控制策略专门章节中去叙述。同时必须指出，这些主流模式只是一种简化的示意说明，仅仅为了便于相互区别。

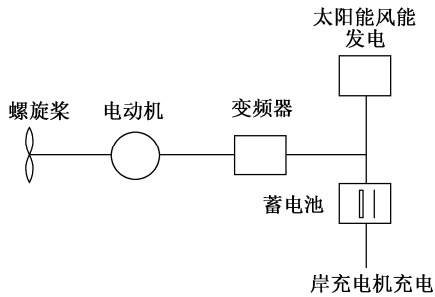


图 1-1 风光电直—交模式电力推进

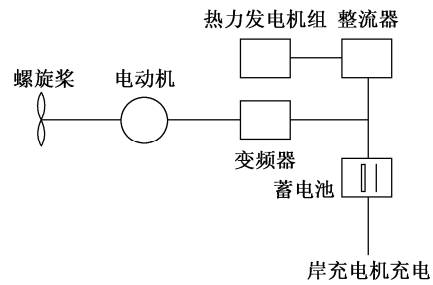


图 1-2 电油混合能源交—直—交模式电力推进

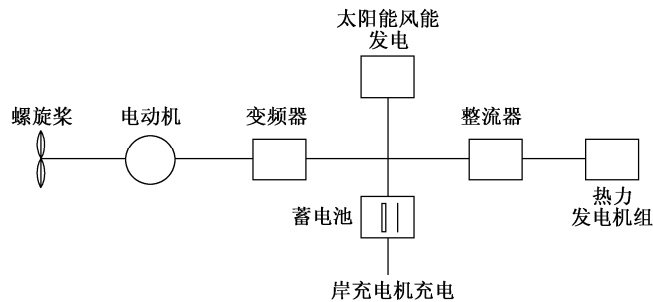


图 1-3 风光电油综合电源交—直—交模式电力推进

## 1.5 主流模式的特点对比及用途概述

### 1.5.1 主流模式的特点

分析综合能源船舶的主流模式与传统船舶的差异，至少有如下的区别性特点。

(1) 以增加清洁绿色能源为重点利用多种能源，根据船舶用途和多种条件，可形成不同能源组合模式，从而区别于单一能源船舶。

(2) 风光电模式在运行原理上，实际上只有直流电源，多种电源叠加的结果相当于一个等效直流电源。电油混合和风光电油综合能源模式同时具有交直流两

种电源,能够以整流和间接型矩阵变换的两种方式将混合电源和电制统一为直流电,多种电源叠加的结果也可相当于一个等效直流电源。由此形成以上三种主流模式的电制都为直流电,从而区别于传统交流电制。其中,间接型矩阵变换方式最简单,不需要采用任何传统的电源变换方式,可理解为是直接形成直流电与交流电并联运行的模式。

(3)以蓄电池为中心和基础构成船舶的直流电电站,并将这种等效直流电源和电制作为综合能源形成的电站主流模式。蓄电池处于电站中心地位,发挥特殊作用,并且作为推进动力使用,从而区别于传统船舶仅仅将其作为应急备用照明电源。

(4)采用现代综合电力推进技术,将传统主机与辅机以电的方式统一,形成综合电力系统,对于船舶所有用户进行集中统一供电和管理,从而区别于传统专用电站电推的电动船舶。其综合电力系统不仅表现于用电的统一,而且表现于采用多种综合能源和将传统应急照明蓄电池改变为动力蓄电池参与推进和储存岸电及风光能,进入了优化资源配置广开能量来源的新领域。

(5)采用全电力推进方式进行船舶推进,区别于机械式推进和机电联合推进。以交流变频为推进控制策略的主流模式,且形成交流电动机与电站直流电源配套的直—交和交—直—交的电源变换变频主流模式。

分析以上的特点,是沿着这样的思路和理由而发展形成的。为了利用风光能满足实际连续应用的需求,针对风光能不连续不稳定的特点,配备动力蓄电池,以储能方式提高利用效率,广开能源。蓄电池可取用岸电,并改善电站刚性发挥多种特殊作用。然而由于目前风光能难以全额满足船舶需求,而不得不考虑取用一定份额的燃油。由此,构成了综合能源船舶的风光电油的最佳组合:风光能是主攻方向,蓄电池是关键,燃油机组是保险措施。

在船舶电站的构成中,由于电站电源和电制需要统一,而必须进行电源转换,因为整流方式简单易行且有蓄电池,所以可将综合能源船舶电站的电制统一为直流电。而直流电制具有多种优势,例如,可回交流避频率以及发电机组并联的多种麻烦和严格要求。由此,可采用蓄电池以直流电充电放电的方式与多种能源建立电气联系,并与多种电源共同组成电站,形成一个整体的直流电源。这与传统船舶必备的蓄电池低压系统与动力电站完全形成两个独立系统的特征形成显著的差异。可概括为,在主流模式的能源方面形成了多种能源和电源的特点,而在电站方面,形成了具有动力蓄电池的船舶电站、一种新型船舶电站,而蓄电池处于电站中心地位。这一特点构成与传统船舶电站的区别性特征。由这种特点引出了新功能和新用途,即由蓄电池在电站中处于中心地位而形成了新的机制和作用,所谓中心地位是指其作为联系各种电源与用户的关键因素和枢纽,所谓新的机制是指发挥稳定电参数的重大作用。这种作用表现在三种主流模式之中,显而易见,例如蓄电池可以对难以保持恒定供给的风光能发电装置随时进行补偿,以稳定电





工作环境和环保节能效果以及廉价清洁的能源,有利于船舶和水体环境保护。可见,在特定需求上,电油混合具有特殊价值,而蓄电池具有不可替代性。同样的需求还表现于旅游船和轮渡船,后者更是“左右逢源”,因为岸电充足,燃油机组只是保险。具有同样功能的还有风光电油模式,只是造价较高。

由上例,可以看到风光电油与电油混合两种模式因为用途和使用条件的差异而可获得新的特殊的使用价值,形成以下的结论:凡是短途运行和有岸电支持的情况,只要能够取用岸电且采用快速充电措施,则必然优于机组发电,因为岸电具有静音环保清洁而廉价的优势。对于长途,蓄电池取用岸电为辅,而以发挥其他作用为主,例如动态补偿作用。对于风光电油模式,因为蓄电池可以储存风光能,所以即使是应用于长途大型船舶也仍然具有一定价值。总体来看,三种有蓄电池的模式,不管是取用岸电还是取用风光能,都是对船舶进行能量补充,都是在一定程度上以绿色能源取代燃油,所以都具有存在价值,而优于单一能源。

综上所述,由于采用综合能源,特别是采用蓄电池构成电站基础,所以必然获得多种功能,由多种功能必然获得多种用途,从而优于单一燃油船舶。进一步还可以看到,由于蓄电池的存在,加上不同的能源组合,可形成传统的单一能源船舶所不具备的新型功能和特性。主要表现在综合能源优势互补上,可从静态负荷及能量的供应和动态负荷及瞬时功率的供应两方面补强电站,而提高供电质量。例如在风光电模式中,蓄电池可储存风光能和岸电,传统船舶做不到,而在许多情况,都可以以岸电为主,这意味着即使是在无风的雨天,蓄电池都可以成为保证连续工作的关键性因素,而风光能的加盟显然增加了能源支柱,提高了供电可靠性和环保节能效果。在后面两种模式中,由于有燃油发电机组,所以发电机必然成为主力。显然蓄电池不是主要能源,但在发电储电、配电用电的多个环节中,处于电站的中心地位,所有运行都与之有关,对它进行特殊设计,就可以发挥功率调节器作用,在运行中作为发电机组的补充,来稳定电站的参数,从而提高电站运行质量,其原理在于满足了电站对于动态负荷和功率的供应。

概括以上两种互补功能,综合能源电动船舶不仅在能源供应和能量平衡方面形成了多支柱,而且在功率供应和功率平衡方面形成了多支柱。这两种作用可以同时表现在有燃油机组模式中,蓄电池如果取用岸电,则是能源供给支柱,而如果不取用岸电,则可作为功率供给支柱。后者的原理是:蓄电池与发电机组并联运行,以取用岸电为辅,即对于船舶能源供给贡献较小,然而它可以供应功率而对电站功率平衡有贡献。例如当定位和恒速航行的船舶遇到风浪,电动机矢量闭环控制需要电站快速增加输出功以抵消风浪作用,然而发电机组反应较慢,因为它是瞬时功率发生器,系统复杂惯性大,蓄电池则不同,是储能器,已经完成了生产过程,可以快速与发电机组共同供电,此时相当于双电源供电,显然优于单一燃油机组,可快速满足瞬间动态负荷和功率的供应任务提高供电质量,保持船舶状态。可见,蓄电池取用岸电可增加能源,而功率调节和平衡作用的产生则是

因为蓄电池不断处于充放电的过程。显然，单一能源船舶没有这种功能和用途。

#### 1.5.2.2 主流模式对比

综合能源电动船舶的主流模式由电推方案与供电电源两方面的因素组成，这也就是船舶的总体方案。它有三种主要类型：风光电、电油混合和风光电油综合模式。在风光电模式中，可以形成蓄电池与太阳能或者风能两两组合模式，为了简化问题，而是将其归于风光电模式。实际上，所谓单一蓄电池模式，包括燃料电池，可以作为风光电模式的一种特例，属于同一类型。单一蓄电池电动船舶是风光电模式的基础。风光电模式是以岸电弥补风光能的不连续性，以满足实际应用的连续性需求。然而由于风光电能源的能量密度较低，所以船舶续航力不及有燃油发电机组的类型。由此显示出三种主流模式船舶在性能和用途上的长途和短途差异。

后面两种有发电机组的模式可以应用于长途，因为它拥有高能燃料。采用燃油的根本目的在于弥补风光电模式能量的不足以提高船舶续航力，但是又不放弃取用岸电和风光能的方案，从而取代部分燃油以获得一定的环保节能效果。风光电油模式可视为风光电模式与电油模式的集合，在性能上也介于两者之间，有发电机的两者都可以兼顾环保和高续航力的双重指标，但由于后者采用风光能，所以环保性能更佳，且无需过于依赖岸电，只要风光能充足即可，且更加廉价，更加适应于没有岸电的长途运行情况，而电油模式则对岸电的依赖程度更大，适应于岸电充足的情况，例如码头密集的地方。

在风光电油模式中，可以采用蓄电池，也可以不采用。不采用蓄电池就是风光油模式，即不利用蓄电池功率源的作用，也不考虑储存风光能的问题，而仅仅是实时在线利用风光能，这是大型长途船舶利用风光能的一种模式。由此形成风光油模式，两者同样可归于一种类型。不过，由于没有蓄电池而没有充电环节，所以可将风光能发出的直流电逆变为交流与发电机组并联运行，这就形成与陆上完全一样的利用风光能模式，其电站的电制为交流电，构成交—交变频模式。当然由于没有蓄电池，所以也就不能发挥其对于电站的补偿作用，且因不能储存风光能而难以扩大其利用（因为不能利用过去的风光能）。这种发、用同步模式可能形成供不应求与一时过盛的共存现象，成为技术遗憾，同比陆上没有这种情况，因为风光能发电可上网，而船舶必须自己使用，这就是两者差异。正因为如此，才没有将其作为主流模式。对于风光电油模式，可按照有无蓄电池的差异来决定电站组成和输出供电模式：有蓄电池的模式，因为需要与蓄电池配套，所以以统一为直流电为佳，形成交—直电源变换和直流电源模式，以此为主流模式。而没有蓄电池的模式，具有两种选择，交、直流均可，因为不考虑蓄电池因素，所以可仅按推进电动机来选择电源。统一为直流电，则形成交—直电源变换和直流电源模式，这与有蓄电池的类型一样，因为风光能电源同样是直流电源，所以缺乏蓄电池不足为怪。统一为交流电，则与发电机组的交流电并联运行，采用交—交

电源变换和交流电源模式。对于电油混合模式，作为一种模式必然有蓄电池，统一为直流电，则与风光电油模式一样，而一般不统一为交流电，这是因为既然蓄电池存在，就必须进行充电，而充电必然需要直流电，如果再逆变，则导致程序复杂化，而极不合理，因为充电电源如果是岸电，则逆变复杂麻烦，如果是船电则完全无理。这是与风光电油模式不同之处。

同时必须指出，既然风光能发电与蓄电池同为直流电，那么为什么有蓄电池时，要将机组交流电整流为直流电，而没有蓄电池时，要将风光能的直流电逆变为交流电呢？原因在于：风光能发电只有单方向输出，而不像蓄电池的电能需要双向传递，所以它必然需要充电过程。考虑这一因素以后的电制统一方式简繁差异较大。同时风光油模式同样可整流，且为主流模式，而逆变只是提供一种选择。

三种主流模式在推进系统的机械传动结构上相同，区别于传统热力机直接式推进和机械电力混合推进模式，称为全电力推进模式。在控制策略和电源变换方面，风光电模式只能是直—交变换变频控制策略，而后两者因为有发电机组，所以主流模式是交—直—交变换变频控制策略，它们也可以采用与前者的完全一样的策略，即直—交变换变频控制策略，只需要增加整流环节即可，还可以采用间接型矩阵控制的交—直—交变换变频控制策略，具有更多的优势和选择。

三种主流模式都有蓄电池，因为需要优化综合能源的使用及构成电站，且需要取用岸电与风光能及发电机组互补，属于优化的方案。同时采用风光能可全天候获得能源，利用蓄电池可储存风光能，并能取用岸电保障连续性。因此，风光电模式是最低保持连续性且环保性能最优的类型，无需自带燃料，具有不可比拟的污染零排放和低噪声优势。然而，由于三种能源“低能”，导致续航力较小，决定其必然工作于短途，且极大地依赖于岸电，若在此基础上加上小型发电机组构成最高连续性保证和能源保险，将更加优化，且不同于大型机组。后面两种有大型燃油机组的模式，在工作范围续航力航速方面更具优势，但环保节能的性能不如前者，可以工作于各种环境。因为可取用岸电和风光能，所以与单一燃油船相比，更加环保节能。风光电模式造价较高，续航力较低，适用范围较小。电油混合模式可兼顾续航力、造价和一定环保效果，可取用岸电，应用范围广泛，是目前适用的高性价比类型。风光电油模式是锦上添花，可应用于高档需求。可见，这些模式具有不同的优势和劣势，形成了各自不同的特色和用途。但总体上看，都是目前实用模式。这里有一个问题，即为取用岸电增加蓄电池，可能导致载重量增加而得不偿失。其实不会，一般船舶都需要压载，以降低船舶重心高度，其压载纯属于无效压载，蓄电池可取而代之，且可适当增加载重量，见第4章。

如何应用这些主流模式，需要根据实际情况进行选择。港口密集、岸电充足，则采用电油混合模式，以蓄电池进行快速充电与发电机组互补，既廉价高效，又环保节能，显然优于单一燃油机组船舶。这就是混合能源船舶，与混合能源汽车一样具有优势。更为重要的是：同比，船舶可以大幅度利用风光能，而汽车由运

行特点、规模、空间和载重量的限制，必然难以大幅度利用风光能。

## 1.6 现代综合能源电动船舶的工程哲学

### 1.6.1 树立正确的科技哲学理念

所谓综合能源电动船舶的工程哲学，即科技哲学问题，是从科技哲学的角度来看综合能源电动船舶的一般性学理和哲理，回答其存在的必要性、必然性及其发展趋势等问题。与电动汽车一样，电动船舶是一种工程，属于科技的一个小领域，从科技哲学的角度来看这种工程，所以简称为工程哲学。探讨工程哲学问题的目的在于希望由一般性的基本科技规律认识上升到哲学认识，再由哲学认识指导特殊科技领域的探讨，以便于少走弯路。总体上看，研究综合能源电动船舶的电力推进技术，必须站在国家宏观大局的高度和深入到微观工作原理的层面去研究问题，力求站在工程哲学的高度，从时代要求、现代理念和自然辩证法的角度去把握发展规律，在现代化高度上整合现代能源工程、电气工程和船舶工程，从而使综合能源船舶的电力推进的设计过程从基于经验向基于设计科学转变，使其成为我们主动按照思维规律奔向科学目标的创造过程。

综合能源电动船舶是立足于当前人类社会发展的现实需要而产生的。当前人类社会正处于一个重大的转型阶段，能源危机、工业化污染使地球村的气候变暖，威胁着生存环境，迫使我们不得不进行结构调整和增加方式转变。其中首当其冲是如何解决能源危机问题。当前人类社会的主要能源是化石燃料，预计在未来 60 年，它将枯竭。那么，替代能源将是什么？因此，当今社会和科技发展趋势是：在继蒸汽机、电机和计算机的三次工业革命或者技术革命以后，目前正在进行第四次技术革命。其目的是实现能源革命，解决人类社会的能源危机问题，而人类社会正在实现由传统工业文明向包括现代工业文明在内的生态文明转变的第三次转移，这是继狩猎采摘原始文明向农耕文明、继而向工业文明两次转移以后的更深刻变革，是比信息革命更加深刻的革命和人类社会根本性转型。

其实，所谓能源危机的本质不是能源本身匮乏，而是人类技术和理念、哲学观技术观的匮乏缺失和不科学。就当前的能源而言，核能和太阳能是取之不尽用之不竭的，这是因为太阳正常的核反应至少还可以维持数十亿年。而人类对于太阳能的利用少得可怜，而且在不正确的理念指导下缺乏整体社会的厉行开源节流和加速攻克太阳能技术的紧迫感。那巨额的军费开支只需要部分分流于太阳能技术的开发，今天的能源形势就不会是这样。核能对于人类具有一定的不可控性，且在人类社会恐怖主义存在的情况下，具有较大负面作用，加上传统工业文明对于地球气候的恶性改变的负作用导致自然灾害频发趋势，加剧了核能的不可控制性。特别是在日本福岛核事故发生以后，人们心存疑虑，使得许多国家正在加以

限制。就太阳能而言，显然不能说是能源匮乏问题，而是技术匮乏问题，同时，就综合能源电动船舶的使用推广而言，还缺乏珍惜化石燃料，广泛利用风光能的紧迫感和相应的船舶技术配套，最根本的在于习惯于传统生活方式，而缺乏对于综合能源电动船舶、特别是风光能船舶树立正确的哲学观技术观的紧迫感，也没有采取更大的推进举措。例如，一方面推行低碳经济生活，一方面容忍大量燃放烟花爆竹、上坟烧纸；一方面强调保护水体，一方面却不能制止许多船舶向水体排放垃圾；一方面强调利用风光能，而发展陆用风光能照明路灯，一方面却难以推出风光能船舶。这不符合技术常理，也说明缺乏低碳生活的紧迫感。就汽车与船舶比较，由运行速度和空间规模的差异悬殊决定汽车不能够大幅度利用风光能，而船舶可以大幅度利用风光能，然而船舶却没有迈出相应的步伐。

### 1.6.2 未来船舶的能源出路和撑起水上的一片蓝天

当燃油枯竭时，未来船舶的能源出路在哪里？在当前社会转变中，如何撑起水上的一片蓝天？综合能源电动船舶应该成为探路者，而首先应该努力成为以风光能取代燃油的水上先锋。综合能源电动船舶工程在本质上是一个能源革命和船舶电站的革命。就能源而言，当前的技术难题是：风光能装置低效，而尽管船舶的空间相对于汽车大得多，但相对于需求，却难以满足，出路在于：风光能装置升级，推出新型船舶形式。前者例如太阳能装置升级，以碳纳米电子技术取代硅微米电子技术，以纳米碳光伏电池取代微米硅光伏电池，推出新型太阳能装置。目前普遍认为碳石墨材料有望实现这一目标，将使太阳能电池尺寸缩小 10 倍以上，意味着同比可获得 10 倍以上的能量。在期待这一突破的同时，目前可以做的工作是推出新型船舶形式和利用磁悬浮风力机，以扩大风能的利用。

新型船舶形式例如采用双体船形，增加上层建筑的面积而形成下部细长的流线型。磁悬浮风力发电机可利用微风，从而提高风能利用率。此外，就船舶电站的革命而言，动力蓄电池是一个支点，同时它也是能源革命的一个支点。目前太阳能技术主攻方向是热能和光伏电池，此外，储能是一个重大着力点，就是利用蓄电池储存能量。储能这一措施与地球上能量存在形式具有完全相同的特征——储存，地球上的能量大都来自于储存形态的太阳能，生物、化石燃料都储存太阳能。生物在取用太阳能进行实时同步使用以外，都必须储存太阳能，光伏电池将太阳能转变为电能，除了使用以外，就是利用蓄电池储存，以备未来之用。从技术上看，能源革命的一个重大着力点在于储存太阳能，正因为如此动力蓄电池是一个支点。这一普遍规律在综合能源电动船舶上的使用，就是利用蓄电池作为船舶电站的中心环节，将多种能源统一为电源，组成电站，并且储存岸电和风光能，以扩大能量来源。因此，无论是从能源革命还是从综合能源船舶来看，如果以风光能为重点，那么蓄电池自然就是一个重要的支点。幸好目前已经出现了可担当重任的磷酸铁锂动力电池，因为它具有安全高效抗滥用能力极强的特性。

在确立了以太阳光能，包括广义太阳能的风能为重点的能源战略以后，回顾地球上的能源模式，可以得到一个基本规律，就是在线实时利用太阳能和储存太阳能同步，这就要求解决高效太阳能装置和储存装置的技术问题。一是要求高效转换，二是高效储存太阳能，双管齐下可能就是解决能源危机的两个重大突破口，幸好可以取代以主流硅材料为标志的微电子时代的以碳材料为标志的纳电子时代正在拉开序幕，碳纳米太阳能装置和风光能的储能装置——以石墨为负极的磷酸铁锂电池正是实施突破的两个支点和利器。按照这种思路，不仅可以缓解能源危机，而且可以解决综合能源电动船舶的能源供应问题。反过来从工程哲学的角度看，以高效在线实时利用和储存太阳能的方式解决能源问题，综合能源电动船舶是走在一条具有普遍规律性的正确道路上。

综合能源船舶除了多种能源和电站以外，还有全电力推进的问题，本质是能源使用模式问题，对于船舶就是热力机的机械推进和电力推进的问题。传统柴油机推进是一个与陆上能源使用主流模式——电动不同的方式，这种方法的一般性学理和哲理何在？自从第二次工业革命电机诞生以后，就形成了世界动力传动的普遍主流模式——电动，即普遍采用原动机发电，以电能供应用户。为何在船舶上就例外呢，非得原动机直接推进呢？在陆上为什么不采用这种驱动方式呢？说明电动模式是先进的，其优良的电气和机械特性及高效环保节能的特点是难以企及的。按照普遍规律，应该说船舶发展滞后了。实际上，电推技术由其综合优势而必然成为发展方向，这同时也说明必然在科技哲学上选择符合普遍规律的全电动方式，它区别于机械推进和机械电气混合推进。其具体学理在于尽管在能量传递链条上多了发电和电动环节，但是在推进控制环节比机械推进多了许多节能因素，导致两者相抵以后的能量总效率比机械推进高得多。当今的电动汽车和电动船舶以及混合能源电动车船的以电代油就是证据。

同时，全电力推进结合风光能的利用、以及取用岸电，其总体能量效率会更高。原因在于：风光能不增加能量效率计算式中的分母项，仅仅只增加分子项；而岸电是大型化供电供热统一的现代能源综合利用模式，能量效率极高，达80%以上，完全不同于船舶柴油发电机组的能效30%以下的水平，这具有必然性，原因在于船舶不像陆上实现供电供热的统一，所以难以大幅度回收利用热能。因此，取用岸电是一个重大的节能和环保措施，电油混合模式若能够取用岸电，则必然优于柴油机推进和燃油机组的电推。这显然没有技术难度和价格障碍。然而它的实现牵涉能源生产、消费模式和电推充电需要的基础设施配套建设问题。这里有理念和建设滞后的问题。需要突破，要让码头加油站变成充电站，且让充电像加油一样的快速方便，要像取消陆上小型火电站一样，在水上取消船舶内燃机推进和“高碳能源”，推动综合能源电动船舶的普及推广，从而迎来船舶环保节能和人性化的明天，找到未来船舶的能源出路和撑起水上的一片蓝天。

## 1.7 船舶电力推进的发展趋势

研究综合能源电动船舶,必须研究电动船舶。电力推进有近百年的历史,在第二次世界大战以前开始兴起且在战争中流行,战后至上世纪70年代因技术局限进入萧条期,80年代以后迎来发展高峰。经历了一个由直流电到交流电,由机电电器式的调速方式到电力电子调速方式,由机械电气混合推进到全电力推进,由潜艇和工程船舶到全部船舶领域的发展过程。目前船舶电力推进已经成为发展方向,电推技术的发展趋势大致有几个方面<sup>[21]</sup>:①以交流电力推进系统取代直流电系统和交直流推进系统;②由高效感应电动机向永磁电动机和高温超导电动机发展;③发展综合全电力推进系统 IFEP;④对于潜艇以燃料电池系统取代铅酸蓄电池系统;⑤大幅度利用清洁绿色的风光能以及其他能源,发展综合能源电动船舶<sup>[27]</sup>。

综合电力推进系统即统一主机和辅机而以电能为能量传递使用模式,它立足于综合电力系统 IPS,IPS 包括发电及推进、日用配电、区域配电、系统检测及控制四个子系统,全部采用模块化设计,可满足各种需求并节省大量费用。其关键技术有:①全船电力系统总技术,包括发电、配电、电力变换、电力控制、能量储存五个模块技术;②推进电动机,包括高效率和高性能的电动机;③船舶电力推进系统的适装性,即与船舶各系统的匹配性和兼容性,以及对于船舶海洋环境的适装性。除此以外,立足于电力推进技术的新型轮机形式或者集成式成套电力推进产品也进入成熟阶段。其中最成功的是 ABB 公司开发的吊舱式电力推进装置 AZIPOD,它将电动机安装在一个流线型壳体内,螺旋桨在壳体的前端,操纵十分方便,可低速运行,又可以作为转向装置。由文献[21]介绍:大型旅游船舶 Elation 号采用 14000 千瓦的 AZIPOD,同比姊妹船,航速提高 0.5kn,推进效率可提高 8%,回转半径减小 30%,从全速前进到全速后退只需要 20 秒。

电力推进技术在发展中,民用船舶与军舰呈现出较大差异,主要是由于用途和耗能需求的规模不同,而对于综合能源的利用理念和方式形成较大的不同。军舰以战斗力为主,且船舶大型化、用户高能化导致对于能量的需要量极大,例如先进的激光弹、电磁弹等高能武器需要极大的能量和功率输出,因此难以利用低能能源,其综合能源可能是核能与燃油及其装置或者燃料电池与高能液体燃料。显然不能利用低能的风光能装置。民用船舶则完全相反,用途与运行模式不同,需求量较小,且船舶具备利用综合能源的空间,所以利用综合能源有必要也有可能。

目前采用综合能源的船舶不多,由伟肯(苏州)电气传动有限公司提供的资源显示,2009年1月23日,美国 Foss 公司与其他公司合作制造了世界上首艘混合能源 5000 马力交流电推拖船,可通过岸电和船电对蓄电池充电。国内也有一些综合能源船舶出现,但风光能源的比例较小。然而以电力推进取代热力机直接推进

却迎来了发展的高潮。例如现代核潜艇，它将核反应堆产生的热能通过热交换器传递给介质，例如热蒸汽或惰性气体，再推动汽轮机发电，利用电动机进行推进，而不是过去的利用汽轮机进行直接推进，其性能更好效率更高。例如。文献[2]提供了美国新旧潜艇方案对比资料，过去的方案是两台汽轮机直接进行机械式主推进，而由一台电动机实现应急电力推进，具有常规运行和应急运行的两套方案，具有机械推进和电力推进两种模式；现在由一台大型永磁电动机实现全电力推进。其改进是：以大型双汽轮发电机取代小型汽轮发电机；以直流配电取代交流配电；一台大型永磁电动机全电力推进取代两台直接推进的汽轮机和一台小型应急推进电动机。其永磁电机在方案中显示了极高的可靠性；而直流配电显示了直—交型永磁无刷电机的电力推进模式。

除此以外，在民用单一能源船舶方面大量采用了电力推进的方案。参考文献[2][15]提供了国外部分大型船舶的电力推进例子。并指出，自 20 世纪 80 年代以来，新建客轮、油轮、破冰船约有 30%左右采用了电力推进，近年还有许多货轮油轮也采用了电力推进。其发展趋势的主要特点有：①客轮、油轮、破冰船与工程船等民用船舶广泛采用电力推进；②发达国家大力采用电力推进的下一代新型战舰并取得重大进展；③出现了新型发配电和电力推进方案，以及推进动机多样化和大功率化及变频调速等趋势。毫无疑问，电力推进必将取代热力机直接推进。正如本书所列的有关综合电推的文献所指出的那样，综合电力推进系统将是船舶推进模式及能源使用模式的革命，必将成为船舶的发展方向。而综合能源船舶的综合电力推进系统以及全电动船舶将迎来一个发展的春天，并将引起船舶能源供给模式的革命。