

# 船舶联合动力装置

〔苏〕 A. Γ 库尔仲 著

施奕瑶 译 华绍曾 校

国防工业出版社

254108

# 船舶联合动力装置

[苏] A. Г. 库尔仲

Б. С. 尤多文

施奕瑶译

华绍曾校



国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书研究了各种主要类型的船用联合动力装置,叙述了联合动力装置的理论和设计基础、热力计算和重量尺寸计算的方法以及技术决定的选择和优化方法。对各类联合动力装置的发展也作了预测。书中还引用了大量苏联和其它国家较典型的联合动力装置实例,也是较有价值的参考资料,本书是作为苏联高等造船院系《船舶动力装置》专业的教学参考书,同时也作为从事船舶动力装置专业的科研设计部门、造船厂、使用单位等的科研和工程技术人员的参考书。并且对于陆用热电站、其它工矿企业的动力部门的研究设计方面也有一定的参考价值。

СУДОВЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ  
А. Г. КУРЗОН  
Б. С. ЮДОВИН  
ИЗДАТЕЛЬСТВО «СУДОСТРОЕНИЕ»  
1981

### 船舶联合动力装置

〔苏〕 А. Г. 库尔仲  
Б. С. 尤多文  
施奕璠 译  
华绍曾 校

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张9<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 201千字

1986年11月第一版 1986年11月第一次印刷 印数: 1,001— 900册  
统一书号: 15034·3030 定价: 1.90元

## 译 者 的 话

随着世界造船事业的发展,出现了许多不同类型的联合动力装置。促使它们出现的背景各不相同,例如,有的是为了满足船舶运行的不同工况,如破冰船在自由海域和厚度不同的冰区航行,对动力装置功率的要求相差悬殊;有的是为了节约燃料,如快速集装箱船主机功率大,随主机大量高温排气带走的能量可以在附加动力装置中利用;有的是为了节约重量尺寸指标,或者是上述几个方面的综合需要,如军舰艇的动力装置,低速和高速航行时工况相差极为悬殊,为增加续航力而需要节约燃料,为多装武器装备和电子设备而需要大量压缩动力装置和船体结构等的重量尺寸等等。为了较好地满足对联合动力装置的各种要求,就必须解决好联合动力装置的理论、设计、计算、优化等问题。到目前为止,虽然已经有不少文章涉及到联合动力装置的理论 and 实践方面的问题,但还没有一本书籍比较系统而完整地反映联合动力装置发展的全貌。库尔仲教授和尤多文讲师合著的《船舶联合动力装置》一书,还是这一领域里第一本教学参考书。联合动力装置也是我国造船界关心的问题之一,因此我们把这本书翻译出来,介绍给我国的读者们。我们希望这本书对造船专业大专院校师生,对动力装置的科研设计、制造安装、使用维修等方面的科技人员,都能起到一定的参考作用。

由于我们的水平有限,译文不可避免地存在缺点和错误,希望读者批评指正。

## 作 者 的 话

现代联合动力装置是船舶动力中，一个相当新的机型，但又是迅速发展的领域。在短期内已形成了联合动力装置的几种主要型式——燃气-蒸汽轮机联合动力装置，蒸汽-燃气轮机联合动力装置，柴油机-蒸汽轮机联合动力装置，柴油机-燃气轮机联合动力装置，带加速机的联合动力装置等等。目前，联合动力装置已获得了广泛的应用。今后，随着各种联合动力装置的发展和现代化，它在运输动力中的作用将会持续地增长。

本书阐述了联合动力装置的理论 and 设计基础。并按造船院校和造船系动力专业大学生的教科书要求编写此书。应该指出，有关船舶联合动力装置的专业书，在苏联和国外都未曾出版。

作者只能对联合动力装置最主要的型式加以叙述。考虑到大学生在开始学习联合动力装置时，已熟悉了热力学、蒸汽锅炉、涡轮机、柴油机、冷凝器、蒸汽轮机装置、燃气轮机装置的理论 and 设计的基本知识。所以本书主要是研究和阐明由基础发动机和装置所组成的联合动力装置的基本特殊规律和性质。这些组成部分——蒸汽轮机装置、燃气轮机装置、柴油机-电动装置、涡轮机组、蒸汽锅炉装置和冷凝装置等的理论 and 设计方法基础是其他相应课程的主题。本书只是使用这些基础和方法。仅仅在对发展联合动力装置的理论 and 设计有意义，和要进行概括时，方做某些新的探讨和研究。

编写本书时，作者依据的是自己以前有关船舶动力装置的著作〔24—29，73—79〕，和苏联及外国作者的论著（部分示于参考文献），应该指出，主要的是下列专题学术作品〔11，16，19〕。选择联合动力装置的型式及对其分类和评定，大多数能反映出作者的观点。对读者的批评意见，将致以谢意并诚恳接受。

第二～六章，第 1.3，1.4 节和结束语是由阿·格·库尔仲教授编写；第七～八章第 1.1 节是由勃·斯·尤多文讲师编写；第 1.2 节为共同编写。

作者谨向恩·普·马勒赫（Н. П. Малых），阿·符·莫霍夫（А. В. Мохов），格·德·谢杰勒尼柯夫（Г. Д. Седелников）工程师表示谢意，感谢他们帮助准备本书的手稿。

# 目 录

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 第一章 联合动力装置在船舶动力中的地位                            |     |
| 船舶动力装置设计的一般问题 .....                            | 1   |
| 1.1. 各种用途船舶动力装置的运行状况 .....                     | 1   |
| 1.2. 联合动力装置的主要特点及其在船舶动力中的地位 .....              | 5   |
| 1.3. 船舶动力装置参数的优化基础 .....                       | 10  |
| 1.4. 联合动力装置的效率 .....                           | 24  |
| 第二章 船舶燃气-蒸汽轮机装置 .....                          | 27  |
| 2.1. 现代燃气-蒸汽轮机装置的主要型式 .....                    | 27  |
| 2.2. 热线图 .....                                 | 30  |
| 2.3. 燃气-蒸汽轮机装置的机械系统 .....                      | 39  |
| 2.4. 蒸汽轮机和燃气轮机发动机的理论循环和系统 .....                | 43  |
| 2.5. 燃气-蒸汽轮机联合发动机 .....                        | 53  |
| 2.6. 燃气-蒸汽轮机联合装置的效率 .....                      | 59  |
| 第三章 燃气-蒸汽轮机装置的设计问题 .....                       | 69  |
| 3.1. 燃气-蒸汽轮机联合装置的设计和计算特点 .....                 | 69  |
| 3.2. 主燃气-蒸汽轮机装置参数的技术-经济优化的一般性<br>问题 .....      | 72  |
| 3.3. 两套主燃气-蒸汽轮机装置的优化经验 .....                   | 77  |
| 3.4. 辅助燃气-蒸汽轮机装置的优化 .....                      | 85  |
| 3.5. 有关燃气-蒸汽轮机装置重量和外形尺寸简述 .....                | 96  |
| 第四章 柴油机-蒸汽和柴油机-蒸汽轮机联合<br>动力装置 .....            | 100 |
| 4.1. 柴油机船主要耗能和耗电设备 .....                       | 100 |
| 4.2. 柴油机的余热 .....                              | 102 |
| 4.3. 余热利用供热系统 (柴油机-蒸汽联合装置) .....               | 107 |
| 4.4. 借余热汽轮发电机利用废气能源 (柴油机-蒸汽轮机<br>联合装置-电) ..... | 109 |

|       |                                       |     |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 4.5.  | 再生能源的综合利用 .....                       | 113 |
| 4.6.  | 柴油机-蒸汽轮机联合装置的一般设计程序 .....             | 117 |
| 4.7.  | 柴油机-蒸汽轮机装置的优化经验 .....                 | 119 |
| 第五章   | 余热利用回路及其组成部件的设计和<br>计算问题 .....        | 123 |
| 5.1.  | 余热利用回路系统 .....                        | 123 |
| 5.2.  | 有关分组的组成、计算和优化的规定 .....                | 130 |
| 5.3.  | 余热汽轮发电机和辅汽轮发电机 .....                  | 132 |
| 5.4.  | 废热锅炉、辅锅炉和发电机 .....                    | 139 |
| 第六章   | 有关蒸汽-燃气轮机装置的简述 .....                  | 144 |
| 6.1.  | 蒸汽-燃气轮机装置的工作过程及其系统 .....              | 144 |
| 6.2.  | 最简单的蒸汽-燃气轮机装置 .....                   | 147 |
| 6.3.  | 高经济性的蒸汽-燃气轮机装置 .....                  | 152 |
| 6.4.  | 高增压蒸汽锅炉的效率 .....                      | 156 |
| 6.5.  | 有关蒸汽-燃气轮机装置效率的评价 .....                | 163 |
| 第七章   | 带加速机的联合动力装置 (КУФ) .....               | 165 |
| 7.1.  | 带加速机的联合动力装置的特点及其主要发展阶段 .....          | 165 |
| 7.2.  | 现代的带加速机联合动力装置 .....                   | 166 |
| 7.3.  | 加速程度及其对带加速机联合动力装置特性的影响 .....          | 191 |
| 7.4.  | 基本动力装置和加速装置并联运行 .....                 | 200 |
| 7.5.  | 带加速机联合动力装置的机动运行 .....                 | 220 |
| 第八章   | 带加速机联合动力装置的设计问题 .....                 | 226 |
| 8.1.  | 带加速机联合动力装置的设计特点和主要设计<br>解决方法的选择 ..... | 226 |
| 8.2.  | 确定带加速机联合动力装置的重量 .....                 | 241 |
| 8.3.  | 联合动力装置中基本动力装置和加速装置之间的<br>最佳功率分配 ..... | 253 |
| 结束语   | .....                                 | 277 |
| 参考文献  | .....                                 | 280 |
| 符号和缩写 | .....                                 | 285 |

# 第 一 章

## 联合动力装置在船舶动力中的地位 船舶动力装置设计的一般问题

### 1.1. 各种用途船舶动力装置的运行状况

各种用途船舶的动力装置,具有其本身特殊的运行工况。上述特殊的运行工况系受船舶航速图谱、船的结构及其营运条件所确定。动力装置负荷图谱与航速图谱的关系,用船舶阻力曲线形式阐明。对于排水型船和新支承原理的船舶,其上述关系也相异。

图 1.1. 所示为船的运动阻力与航速平方成正比,而动力装置的功率与航速立方成正比时,航速和负荷图谱的比较实例。

排水型运输船主要是以近似于全速的计算

航速营运。这种航速是在船舶设计时,根据专门的技术经济

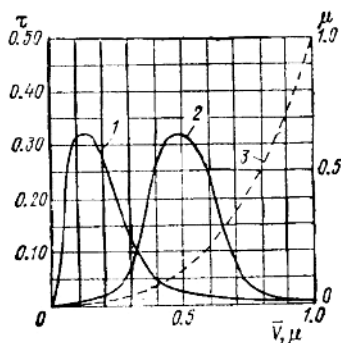


图1.1. 船舶轻型动力装置负荷和航速图谱

- 1—根据动力装置负荷的航行时间分配;
- 2—根据船舶航速的航行时间分配;
- 3—动力装置负荷与船舶航速的关系曲线。

论证结果而选择，所以是近似于最佳航速。在其他相等条件下，航速还受动力装置燃油价格制约，燃油价格升高时，就降低航速。

根据 10 艘《索菲亚》型油船的营运结果，其航行时间(%) 分别如下：

|         |       |
|---------|-------|
| 全速····· | 93.44 |
| 中速····· | 3.32  |
| 低速····· | 0.63  |

这型油船动力装置的平均负荷为 96%。高速集装箱船，由于其动力设备功率大，但又由于要节省动力装置的燃油，经常降低功率营运。集装箱运输船动力装置主要工况负荷的下限为 75%，油船为 85%。

冰区航行的运输船和破冰船很少使用全速航行，其动力装置仅在自由水域能保证全速。动力装置的功率是根据极端营运条件选择的，所以这类船舶具有很大的储备功率<sup>[79]</sup>。

烧有机燃油的动力装置的军舰，为了增大续航力，仅在极有限的时间内保持近似全速的航速，大部分时间是使用部分负荷<sup>[77,84]</sup>。

四型船舶的航行时间分配在图 1.2.上用曲线 1~4 表示。果然，位于曲线图的两端的是油船动力装置的分配曲线 2，和轻型舰的分配曲线 1（曲线 1 系根据[94]数据绘制，并反映四十年代美国舰队驱逐舰的使用经验）。现代军舰因动力装置的经济性提高，和增加燃油储备，动力装置的平均负荷提高，根据资料[15]，外国舰队的现代护卫舰大多使用 15~25 节航行，其相应的动力装置负荷约为 10~35%。

冰区运输船的航行时间分配 4，是《保尔·波诺马廖夫》柴油机-电动机船的航行时间分配（《阿姆古艾玛》型<sup>[79]</sup>），

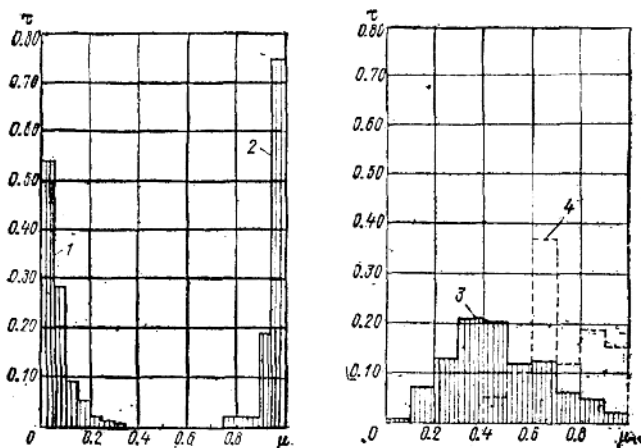


图1.2. 各种用途船舶根据动力装置负荷的航行时间分配

1—四十年代美国舰队驱逐舰；2—《索菲亚》型油船（1965年）；3—《叶尔马克》破冰船（1974~1977年）；4—《保尔·波诺马廖夫》号破冰运输船（1976年）。

并反映出其年度营运经验；分配是双峰值型的，即动力装置有两种常用工况，位于负荷范围 60~70 和 80~90%；第二最大值符合船舶在重冰区的周期性运行。

《叶尔马克》柴-电破冰船（曲线 3）的最大常用负荷范围为 30~50%，在此范围内的航行时间超过 40%。

图 1.3. 同样是航行时间分配，但以累积曲线形式表示。这时，纵坐标上表示的不是时间，而是累积时间的总和。在许多情况下，这种表示工况图谱的形式，是非常方便又一目了然。从累积曲线图可直接而又明显地看出，动力装置的 50% 航行时间，对于轻型舰艇是在不超过 5% 负荷下运行<sup>[15, 94]</sup>，《叶尔马克》破冰船的动力装置是在 45% 负荷下运转，

《保尔·波诺马廖夫》破冰运输船的动力装置在 70% 负荷以下运转，而油船的动力装置以 96% 负荷运转。或者说，例如，动力装置超过 80% 的负荷，在军舰上实际是不使用。《叶尔马克》破冰船上有 7% 航行时间使用，破冰运输船上有 36% 航行时间使用，而油船上有 98% 航行时间使用。

船舶动力装置的使用条件还取决于负荷变换的经常性、变化幅度、连续换向的频繁度和倒作工况相对持续时间。

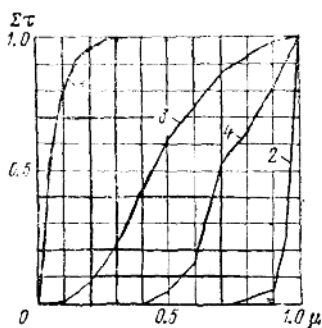


图 1.3. 根据动力装置负荷的船舶航行时间分配累积曲线图

符号见图 1.2.

对于普通运输船舶的动力装置，其特征是负荷稳定。在有几台主机时，通常均处在使用状态。机动工况系属偶然性。例如《索菲亚》和《布拉格》型油船，机动航行约为总航行时间的 3%，其中倒作小于 0.4%。

对于破冰运输船和破冰船，由于动力装置储备功率大，运转设备的组成是不固定的。例如，苏联生产的《阿姆古艾玛》型<sup>[78]</sup>冰区航行柴油-电动机船的动力装置，约 75% 航行时间是用四台主机中的三台运行，25% 航行时间是两台主机运行。《伦尼》型冰区航行的芬兰油船上(1976年)，两台主机中的一台是备用的，仅在冰区使用<sup>[104]</sup>。

《叶尔马克》型破冰船的动力装置，计有 9 台主机，约 45% 时间内使用台数不多于 4 台，75% 时间内使用台数不多

于 6 台。为了提高装置的经济性和保持发动机的寿命, 柴油机破冰船的操作人员应根据航行条件的变化, 经常变换处于运行的柴油机台数。《莫斯科》和《叶尔马克》型破冰船上, 运行设备组成变换的平均间隔为 12~14 小时<sup>[73]</sup>。

变化的冰的强度和密度, 以及当船楔进冰层时为使船脱离冰块的动力, 迫使冰区航行船舶的动力装置经常而又急剧地变换其运行负荷, 包括经常倒俵。运输船舶在重冰区独立航行时, 动力装置的倒俵次数达每小时 30 次, 破冰船的次还要多<sup>[70]</sup>。

以通常形式或累积形式绘制的负荷变化图谱, 给出了有关动力装置工况稳定性最完整的概念。负荷图谱是船舶动力装置最主要特性, 该特性对动力装置的选型、螺旋桨结构、传动装置结构、热力系统、主机设计点、主要设备的寿命、调节方法和燃油消耗标准等的选择产生决定性的影响。

负荷图谱一般是以分配时间的柱式图解或多边形形式表示, 它也能以表格形式或从某些分配的分析函数形式给定, 例如  $\tau(\mu)$  或  $z(\Delta\mu)$ , 此处  $\tau$ —动力装置给定负荷  $\mu$  所用的航行时间部分;  $z$ —给定变化值  $\Delta\mu$  所占动力装置负荷变化总数部分。根据条件  $\sum \tau_i = 1$  和  $\sum z_i = 1$ ; 则有  $\mu \leq 1$  和  $\Delta\mu \leq 1$ 。在用分析法解决课题时, 可以简化动力装置工作的某些综合指数。例如, 主机的效率加权平均值, 平均负荷, 平均出力, 及其寿命。动力装置的负荷图谱与课题形式无关, 是根据统计材料绘制, 因而具有概率特性。

## 1.2. 联合动力装置的主要特点及其在 船舶动力中的地位

出现联合动力装置的原因 现代船舶燃气轮机和燃气轮

机装置具有外形尺寸小、重量轻、起动迅速、组装性、辅机和系统等简单的特征。同时，燃气轮机也有缺陷，如寿命和使用期限较短，对燃油质量要求较高，燃气轮机倒作相当困难（虽然这类系统已经建成），抛弃大量高温（300~500℃）气体，从而降低动力装置的效率，并形成高温区等。

就重量和外形尺寸而论，蒸汽轮机装置不如燃气轮机装置。蒸汽轮机要求大量辅机和系统，不能迅速起动。但是蒸汽轮机可靠性高、修理间隔期长，使用期限长（等于船的使用期），适宜用低质廉价燃料（锅炉用重油，含硫重油，必要时还可用煤），能轻易又安全地作任何机动，而不会发生喘振和脱流等。

柴油机装置在一定条件下，能保证高经济性，当利用排气余热时，经济性还可进一步提高，柴油机和余热利用蒸汽推进轮机相结合很有前途。然而从外形尺寸、重量、振动、噪音和其它特性观点出发，柴油机装置不如蒸汽轮机装置和燃气轮机装置；此外，柴油机装置对燃油质量也比较敏感。

力求集中不同类型装置（例如蒸汽轮机装置和燃气轮机装置或柴油机装置和燃气轮机装置等）的优点，促进创立综合性装置，这种综合性装置就称为船舶联合动力装置。在这种装置中有蒸汽轮机部分和燃气轮机部分，或柴油机部分和蒸汽轮机部分等等。采用联合动力装置能促使把低速、中速和全速的高经济性组合在一起。在一定条件下，采用联合动力装置能降低动力装置的总重量。

**联合动力装置的型式和分类** 由两台（或两台以上）不同类型的热机（蒸汽轮机和燃气轮机，内燃机和燃气轮机，内燃机和蒸汽轮机，核电装置和燃气轮机等）生产船舶运动和其他船舶设备所需能源，或仅为船舶运动生产能源的装置

称为联合动力装置。

联合涡轮装置系由蒸汽轮机和燃气轮机，或由两台不同型号的燃气轮机组成。这种装置可分为两类：

1) 蒸汽轮机和燃气轮机（或两台不同的燃气轮机）之间用机械联接，而装置的这两部分在热力方面相互独立，这一类有最大实际意义的是带加速机的联合动力装置（见第七、八章）；

2) 不同类型发动机（蒸汽轮机和燃气轮机等）之间从热力方面联接，装置的两部分按共同的热力循环运行（见第二～六章）。

热力联接的联合涡轮装置又可分成三组。

第一组联合涡轮装置，燃气轮机是主体部分，装置的蒸汽部分组成燃气轮机排气余热利用的附属部分（余热利用回路）。这种联合涡轮装置称为燃气-蒸汽轮机动力装置，其符号为 ГПТУ（例如，见图 2.3.）。这型装置发展极为顺利，对多种类型船舶的应用很有前途。燃气-蒸汽轮机装置成功地应用于苏联《斯米尔诺夫船长》号快速滚装船上<sup>[81, 86]</sup>，应用于某些外国轻型舰艇上<sup>[80, 85]</sup>，也应用于一些外国设计中。

第二组联合涡轮装置，蒸汽轮机装置是主体，联合装置的燃气轮机部分用作蒸汽锅炉的增压；此外，有时用于获得较小的附加功率。这类联合涡轮装置称为蒸汽-燃气轮机装置，其符号为 ППТУ（见图 6.1.）。这类装置已在轻型舰艇上应用<sup>[81]</sup>；目前正在论证将蒸汽-燃气轮机装置应用于运输船舶<sup>[10, 25]</sup>。

在蜗轮机内以蒸汽燃气混合物作为工质膨胀作功的联合蜗轮装置属于第三组（见第 2.2. 节中《燃气-蒸汽轮机装置的其它型式》）。

柴油机-蜗轮联合动力装置，柴油机和蜗轮机之间可以热力联接，或机械联接。前一种情况是柴油机-蒸汽和柴油机-蒸汽轮机联合动力装置（见第四章），后一种情况是柴油机-燃气轮机联合动力装置（见第七章）。目前，有许多带有充分利用余热的蒸汽余热利用回路的柴油机装置；蒸汽用于耗热设备，或用于余热利用汽轮发电机生产电能，或用于制冷等。有关柴油机-燃气轮机联合动力装置，可作为实例的是国外1969~1976年建造的柴油机-燃气轮机破冰船，船上柴油机承担主要负荷，而燃气轮机是保证加速，和保证动力装置输出全功率（见表7.1., 第1、2栏）。

从发动机组合型式及其相互间的联接观点，对联合动力装置作了上述分类。还有其他分类原则：如按燃料种类；倒作方式等（这方面在相应章节中阐述）。

**对船舶联合动力装置的附加要求** 除对所有船舶动力装置提出的一般要求外，如可靠性、生命力、保证船舶必要的机动性、热力和经济效益、重量和外型尺寸小、振动噪音指标和技术使用方便等，对联合动力装置，因其结构特殊，提出了一系列特殊要求。

由于联合动力装置是不同发动机或装置的组合，相互间热力或机械联接，实质上联合动力装置比同样功率，和同样用途的单机种动力装置要复杂。因此，很重要的是组合联合动力装置的基础装置，要使其结构和热力循环简单。希望联合动力装置由经过营运检验，及批量生产的设备配套。对联合动力装置，这些要求和单机种（一元的）动力装置比较，能较简单地得到满足，因为联合动力装置的特性不仅受组成它的基础动力装置特性的制约，还与其合理组合有关系（如相互联接方法，功率分配等）。

为了简化营运,联合动力装置必须用统一的燃油运行(这对带加速机的联合动力装置特别重要)。采用统一燃油能简化联合动力装置,能提高船舶的实际自持力,减少两种燃油动力装置所产生的很多管理困难。

联合动力装置的结构,必须使其组合的各动力装置能不受时间限制地独立运行,并保证船舶必要的机动。发动机能独立运转,会提高联合动力装置的可靠性和灵活性。使组成联合动力装置的任一动力装置能紧急投入运行也是很重要的。

动力装置独立运行转换为联合运行,和反之,或由组成动力装置的一台发动机转换为另一台运行,必须是操作简单并能遥控。主要操作(负荷转移,轴系同步,离合器接通和断开等)必须是自动化的。组合发动机独立带动螺旋桨运转的要求,在带加速机的动力装置和燃气-蒸汽轮机装置中原则上是能得到满足的。在较简单的蒸汽-燃气轮机装置中这种要求同样能完成,但会增加装置的复杂性。

联合动力装置的结构及其在船上的布置,应允许迅速而又方便地更换使用寿命较短的设备。这种要求首先是针对带加速器联合动力装置中加速燃气轮机的涡轮压缩机组,同样也是对燃气-蒸汽轮机装置的燃气轮机机组而提的。

联合动力装置客观上适宜于采用外部倒传设施——调距桨、倒作减速器、电动传动装置。此时,联合动力装置运行系统在正传和倒传时是同样的。发动机(任何一台)带动螺旋桨独立运行不会遇到困难。采用倒传发动机会导致更复杂的技术问题。

考虑到联合动力装置的相对复杂性,其在船上的应用必须要得到一种或几种决定性指标的足够收益作为补偿(如效