

全国高校船舶类专业“九五”重点规划教材

船舶热力系统分析

姚寿广 编著



科学出版社
www.sciencep.com

全国高校船舶类专业“九五”重点规划教材

船舶热力系统分析

姚寿广 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是全国高等院校船舶类专业“九五”重点规划教材。本书围绕船舶热(动)力系统,介绍了提高设备和系统性能的各种现代静、动态分析技术及应用,书中反映了作者多年来在船舶热(动)力系统领域上的教学经验和科研成果。

全书共分七章,主要内容有:绪论、工质热力性质计算及数据库、热力系统分析的理论基础、热力系统的静态模拟分析与优化技术、船舶典型热力系统的模拟分析与优化、热力系统动态分析及仿真基础、船舶典型热力系统动态分析及仿真。

本书可作为高等院校热能与动力工程、轮机工程、过程装备与控制等专业本科生和研究生的教材,也可作为造(修)船及航运部门从事研究和设计的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

船舶热力系统分析/姚寿广编著. —北京:科学出版社,2003
(全国高校船舶类专业“九五”重点规划教材)
ISBN 7-03-010180-4

I. 船… II. 姚… III. 船舶系数:热力系统-系统分析-高等学校-教材 N. U664.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 010117 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:包惠红
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:新者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年1月第 一 版 开本:720×1000 B5
2003年1月第一次印刷 印张:21
印数:1—2 000 字数:422 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈兰各〉)

前 言

当今船舶的发展越来越像一座海上航行的现代化城市,其动力装置系统作为这座城市的动力核心和能源中心,包含了数量众多的热力装置和机电设备,这些装置与设备间有着密切的联系和相互影响,构成了一个复杂的船舶总能热力系统,并消耗着大量的能源。综合利用好各类能量,合理安排好船舶上的功利用和热利用之间的关系与转换,以提高能量的利用水平,减少对环境的污染,就需要对船舶热力系统运用现代系统分析方法和工具进行分析和优化,加大船舶能源利用的广度和深度的研究。为此,原中国船舶工业总公司船舶动力教材委员会将《船舶热力系统分析》一书列入了全国高校船舶类专业“九五”重点规划教材,作者按照教材委员会通过的“船舶热力系统分析”教学基本要求,以自己多年来从事船舶热力设备及系统分析和模拟的教学和科研实践为基础,并结合该领域国内外相关文献资料撰写了本书。

在本教材的编著过程中,作者力图能体现以下几个原则:

(1) 先进实用:由于现代热力系统分析与优化理论与技术是一门在迅速发展的学科分支,新方法和新内容不断涌现,因此本书在取材上着重介绍对船舶热力系统具有实用且相对成熟的现代系统分析技术。

(2) 深入浅出:由于船舶热力系统具有涉及范围广、综合复杂程度高的特点,对其运用现代系统分析技术进行分析和优化,不仅需要读者有较为宽广的热力系统分析的基础理论知识和建模分析能力,而且还需要读者对船舶热力系统本身有较为全面的了解,为此作者在本书的撰写过程中,一方面通过对船舶典型热力系统的详细介绍和分析,使读者对船舶热力系统有较为全面的认识,另一方面避免繁杂的理论推导,深入浅出地介绍现代系统分析技术,这样不仅可满足本专业高年级本科生和研究生的教学需要,同时也照顾到相近专业学生和船舶和航运部门技术人员的学习参考。

(3) 与计算机相结合:由于现代系统分析和优化技术是和计算机的发展和运用密切相关,因此本书实际也可看成是计算机辅助船舶热力系统分析基础,因此,书中一方面紧紧围绕计算机辅助设计、分析和优化,给出了所需的基础数据库建立的详细内容,另一方面还介绍了有关具体内容分析的概念、算法和流程图。利用这些内容,读者可通过上机实习来提高利用计算机解决实际问题的能力。

本书在编写过程中参考了不少兄弟院校编写的著作和教材,亦得到不少院校和船厂同行们的支持和帮助,在此表示诚挚的谢意。

最后还要对我的夫人张林琳女士表示最衷心的感谢,没有她多年来持之以恒的关心、支持和奉献,本书的写作和出版是不可能的。

由于船舶热力系统及分析涉及到的理论和技术面广,加上现代系统分析和优化技术运用到船舶热力系统中类似的教材和专著还是空白,本书可以说是首次尝试。鉴于作者本人知识水平有限,经验不足,时间也比较仓促,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评和指正。

主要符号表

物理量

A	能量耗; 面积	f	回热度或摩擦系数
A_r	紊流动能增加率	G	质量流速或自由焓
B	转子阻尼	ΔG_0	标准反应自由焓
C	比热; 热容流率比	g	比自由焓或重力加速度
C_p	摩尔定压比热容; 定压热容流率	g_c	冷却空气量的百分数
c_p	定压比热	g_t	油-气比
c_p^0	理想气体定压比热容	g_t^0	标准生成自由焓
D	直径或相对密度	g_v	注汽量(蒸汽量与空气量之比)
d	空气的氮氧比	H	焓
d_e	当量直径	$\dot{H}$	热焓流量
E	焓	H_u	燃料热值
E_a	燃油自燃过程的活化能	ΔH^0	标准燃烧焓
E_{ch}	化学焓	ΔH_0	燃料氧化反应的标准反应焓
E_d	扩散焓	h	比焓; 水位高度;
E_t	燃料的摩尔焓		对流传热膜系数
$(E_t)_0$	燃料标准摩尔化学焓	h_c	瞬时对流传热膜系数
E_h	焓焓	h_i^0	标准生成焓
E_l	焓损失	I_p	理想气体定熵压力函数 (对数相对压力)
E_{ph}	物理焓		理想气体定熵比容函数
E_q	热焓	I_v	理想气体定熵比容函数
E_u	热力学能焓(内能焓)	J	转子惯性
e	比焓	K	传热系数或平均动能
e_t	燃料的单位质量焓值	K_t	通道摩擦系数
F	自由能	k	比热比

k_j	j 组分的气液平衡常数		标准绝对熵
k_t	紊流动能	ΔS_0	标准反应熵
L	管长	s	比熵
L_0	理论空气量	$s(T)$	比熵函数
L_{syn}	理论烟气量	s_R	熵产
M	分子量(千摩尔质量)	T, t	温度
m	质量; 质量流量; 锅炉蒸汽蒸发量	T_c	临界温度
Nu	努塞尔数	T_r	辐射温度
n	摩尔数; 转速	T_s	饱和温度
P	功率; 管子中心距	$T_{\text{ad}}, t_{\text{ad}}$	绝热理论燃烧温度
P_c	有效功率	$T(I_p)$	温度函数
Pr	普朗特数	$\Delta T_m, \Delta t_m$	对数平均温度(差)
p	压力	$\Delta T_{\text{min}}, \Delta t_{\text{min}}$	窄点温度(差)
p_c	临界压力	U	热力学能(内能)
p_k	冷凝压力	u	比热力学能(比内能)
p_r	相对压力	v	比容
p_s	饱和压力	v_c	临界比容
p_t	紊流动能产生率	v', v''	饱和液相与饱和汽相比容
Q	传热量	$\bar{V}$	流速
Q_h	燃料高位热值	V_m	单位摩尔比容
Q^0	标准热效应	v_r	相对比容
Q_l	燃料低位热值	W	功
Q_b^0	燃料应用基低位发热值	w	比功
R	气体常数; 热阻	w_l	功损失
Re	雷诺数	w_s	轴功
R_M	通用气体常数	x	干度
r	汽化潜热	x_i	质量成分(份数)
S	熵	y_i	i 组分的摩尔(容积)成分(或百分数)
S^0	基准状态绝对熵;	Z	压缩因子
		z_c	临界压缩因子
		α	余气系数
		β	燃料系数

ϵ	传热效率; 紊流动能耗散率	π_T	膨胀比
ϵ_a	灰体热辐射系数	ρ	密度
ϵ_c	压缩比	ρ_c	临界密度
ξ_c	燃烧(室)效率	θ	对比态温度
$\hat{\xi}_c$	焓损系数	χ	对比态比容
η_c	压气机效率	σ	斯蒂芬-玻尔兹曼常数
η_e	焓效率	σ_c	燃烧室恢复系数
η_i	设备效率	σ_E	排气系统恢复系数
η_k	回收率	σ_R	回热器恢复系数
η_t	热效率	σ_{Kc}	中冷器恢复系数
η_T	涡轮机效率	σ_{in}	进气系统总压恢复系数
λ	导热系数	τ	时间
μ	动力黏度	ϕ	辐射换热系数
ν	运动黏度	φ	保温系数
π_c	增压比	λ	导热系数
		ω	角速度

下 标

a	空气	gr	过热
B	锅炉	gb	管壁
bh	饱和	gm	混合
bj	水冷壁金属	gz	管组
c	冷	H	高温
ch	化学	H、h	热参数
c	临界参数; 冷参数	hq	含汽
cr	临界	irev	不可逆
eco	最经济	ide	理想
f	燃料	i,s	孤立系统
fw	给水	i,in	进口(入口)
fj	附加	ign	点火
G	鼓风机	inj	喷射
g	烟气或燃气	js	金属
		jb	金属壁

L	饱和液体参数	si	经济器入口
L、l	低温	so	经济器出口
lb	水冷壁(蒸发区)	sur	环境
lt	炉膛	st	蒸汽
min	最低(小)	su	过热
max	最大	sys	系统
m	平均	T	温度
opt	最佳值	tot	总量
out、o	外部； 出口	u	热力学能(内能)
P	压气机	v	蒸汽
ph	物理	w	壁面或水
q	热量	x、xj	下降管
qb	汽包	yx	有效
rev	可逆	zf	蒸发
s	饱和态参数	0	基准状态； 环境状态
sat	饱和	φ	曲轴转角
sm	经济器		

目 录

前言

主要符号表

第一章 绪论	1
1-1 船舶热力系统的组成及主要特点	1
1-2 船舶热力系统分析的主要内容和方法	8
第二章 工质热力性质的计算及数据库	12
2-1 工质热力性质的计算方法	13
2-2 常用工质热力性质的计算模型及处理方法	24
2-3 工质热力性质数据库系统	61
第三章 热力系统分析的理论基础	67
3-1 基本概念	68
3-2 能量的形式和基准状态	70
3-3 热力学第一定律和能量平衡	73
3-4 热力学第二定律和能质概念	76
3-5 焓分析的基本概念及表达式	79
3-6 热力系统的过程焓分析	88
第四章 热力系统的静态模拟分析与优化技术	96
4-1 热力系统模拟的基本概念	96
4-2 系统模拟的数学模型解算方法	108
4-3 热力系统的单元模型与模拟	111
4-4 系统最优化设计方法	120
4-5 热力系统的能量合成与最优化	122
第五章 船舶典型热力系统的模拟分析与优化	141
5-1 船舶常用热力设备及系统焓分析	141
5-2 船舶动力余热利用系统模拟分析与优化	168
5-3 船舶燃气轮机热力系统的模拟分析与优化	212
5-4 典型单元设备及复杂系统的模拟分析	259
第六章 热力系统动态分析及仿真基础	273
6-1 概述	273
6-2 热力系统动态分析建模及仿真的基本方法	278

第七章 船舶典型热力系统的动态分析及仿真	288
7-1 船舶锅炉蒸发系统的动态特性分析及仿真	288
7-2 增压柴油机系统的整体模拟及仿真分析	313
参考文献	323

第一章 绪 论

1-1 船舶热力系统的组成及主要特点

1-1-1 船舶热力系统的组成

当今船舶发展得像一座海上航行的现代化城市,动力装置是这座城市的动力核心和能源中心,它包含着数量众多的机械设备及系统,这些机械设备间有着密切的联系和相互影响,它们构成了复杂的能量系统。船舶如何从一次能源——燃料的化学能中取得更有利的能量利用总效果,怎样安排好船上热利用和功利用之间的关系与转换,如何总体综合利用好各类能量,以提高能量利用水平和适应船舶各方面的能量要求,是本书关心和讨论的船舶总能热力系统。所谓总能热力系统,是指由若干动力机械、热交换设备、连接管网和其他辅助机械组成,并用于实现能量转换、热量传递或完成某些特殊反应过程的系统。热力系统中各组成部分之间存在着机械、气动、热力、传热传质及其他多种形式的联系。

热力系统广泛存在于能源、电力、船舶、机械、冶金及石油化工等各领域,在船舶热力系统中主要包括:

- ① 锅炉蒸汽轮机动力系统。
- ② 核动力蒸汽发生器系统。
- ③ 柴油机动力系统。
- ④ 燃气轮机动力系统。
- ⑤ 热流体网络系统。
- ⑥ 各种联合循环系统。
- ⑦ 各种能量回收系统。

这些热力系统通常由高温、高压和高速设备有机地结合在一起。一台设备、一个过程的改变都会造成多方面的影响。系统的稳定工作是各部分相互匹配、平衡的结果。

随着科学技术的进步,热力系统不断地向大型化、复杂化方向发展。这不仅对热力系统运行的安全性、经济性、机动性等方面提出了更为严格的要求,而且还要求热力系统具有最大的可靠性。因此目前热力系统分析方面的研究工作得到了很大的重视。

下面以国内设计和建造的某 12800 吨集装箱船为例,介绍一个典型船舶柴油机总能热力系统。

该船以柴油机动力装置为基础,排气余热系统是选用一套余热回收汽轮发电装置,即通过余热锅炉产生蒸汽,饱和蒸汽满足全船油舱加热保温和生活日用等需要,过热蒸汽到汽轮发电机组回收电能,在主机常用功率下,对外供电可达500kW,足够满足船舶航行所需的电网负荷。同时对该装置增设吸收式溴化锂溶液的制冷和热泵装置,由于制冷和热泵都属逆向循环,因此设计一套装置既可用于制冷又可用于供热。这些装置充分有效地利用主机气缸套冷却液余热,使主机冷却热作为该装置中发生器和蒸发器的热源,从而达到夏天制冷,冬天供热保温,其他季节提供饱和蒸汽。其典型的柴油机装置总能热力系统原理示意图如图1-1所示。

从以上典型例看出,现代船舶不仅需要有机热机提供推进船舶运动的推进机械能,船上还需要电站和汽站供应所需的电能和蒸汽热能,船上这些能量——推进机械能、电能和热能具有不同的数量和质量。针对船舶总能热力系统进行热力系统分析的目的就是要充分根据船上轮机机械所耗燃料的化学能,按其能量的数量大小和质量高低,先做功后用热的“按质用能”原则,进行全面、合理的综合利用,使燃料化学能通过燃烧转变成热能,再利用热能在热机中转化成推进机械能或电能的同时,通过余热回收设备利用主机的余热来产生船舶所需的蒸汽热能、电能或提供船上加热、制冷和采暖热源,形成一个船舶功利用(机械功、电)和热利用有机联系的能量系统,使船舶所需燃料消耗的化学能得到最大限度的利用。船舶上所形成的这种能量系统也称之为动力装置总能系统。

根据船用主要热机种类,可得如下几种热机的总能热力系统。

1. 柴油机的基本总能热力系统

图1-2所示是采用柴油机的基本总能热力系统。柴油机基本总能热力系统中针对柴油机动力系统的能量利用可进一步挖掘潜力,达到最大限度地利用余热能量的数量和质量,在满足各种品位热量利用的前提下,如果利用品位尚较高的排气,把排气通过一个热能装置回收机械能或电能,则能量的质量和数量可得到充分的利用。这种后置的热能装置可以采用不同的热机,但一般多采用按朗肯循环工作的汽轮机装置,如图1-1介绍的总能热力系统。

由于余热的品位一般都不高,因此陆用工业企业生产的低温余热,国外大多采用有机工质代替水的朗肯循环。船上考虑到安全、价格等因素,目前在柴油机余热利用中采用的仍是用水作为工质的朗肯循环。

在回收低温热量方面,除了常规的缸套冷却水作真空制淡外,日益发展起来的热管换热器、高效节能的热泵技术、吸收式制冷装置等均是冷却液余热利用的有效手段和设备。这样柴油机总能热力系统的效益还将得到提高。优良的柴油机总能热力系统,其能量利用率可高达70%~75%。当然相应的系统也愈加复杂。采用柴油机余热利用的总能热力系统要结合具体船舶航区和航运特点、投资费用、折旧和维修管理费用、润滑油消耗等综合技术经济分析,在回收年限不超过国家规定值时,该总能系统是可行的,因此采用何种总能热力系统须经详细的热力系统分析。

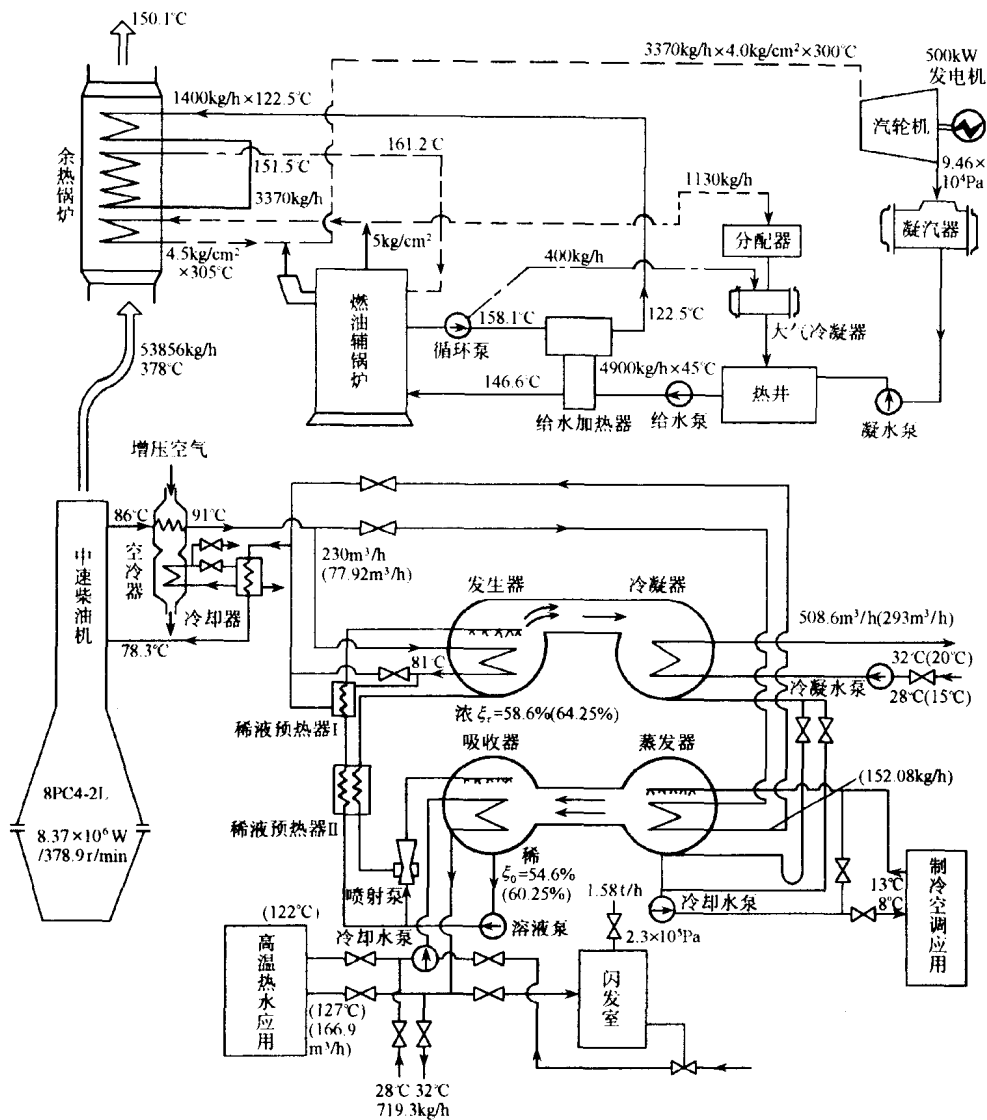


图 1-1 12800 吨(700 箱)集装箱船柴油机装置总能系统原理示意图

2. 燃气轮机的基本总能热力系统

图 1-3 所示是采用燃气轮机的基本总能热力系统。燃气轮机发出机械能带动螺旋桨产生推进能的同时,本身放出排气。该排气通过如图余热锅炉产生蒸汽或热水供全船使用,或者通过热交换器加热空气供全船使用。

燃气轮机排气的温度在 400~550℃ 左右,品位较高,且其排气量较大,若利用排气能量仅生产生活加热等的船用低压饱和蒸汽,显然是一种有效能的浪费。和上述柴油机总能热力系统一样,通过一个后置热能装置回收机械能或电能,就更能充

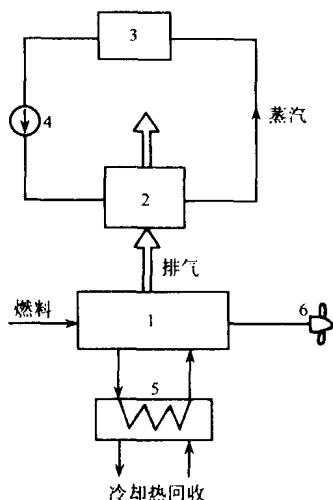


图 1-2 柴油机的基本总能系统

1. 柴油机; 2. 余热锅炉; 3. 用汽设备;
4. 给水泵; 5. 冷却液热交换器; 6. 螺旋桨

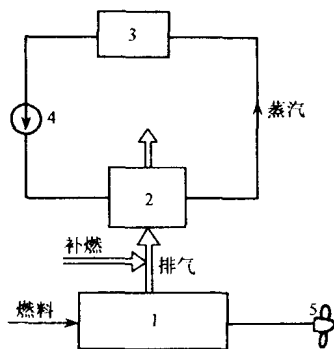


图 1-3 燃气轮机的基本总能系统

1. 燃气轮机组; 2. 余热锅炉;
3. 用汽设备; 4. 给水泵; 5. 螺旋桨

分地利用能量的数量与质量。这样不但可以增加动力或电力输出,同时又能满足船用加热和生活杂用等蒸汽需要。这将有效地提高功利用中总的能量利用率。后置系统通常也是采用按朗肯循环工作的汽轮机装置。燃气轮机与后置的蒸汽轮机装置组成燃气-蒸汽联合循环装置。一般燃气-蒸汽联合装置比简单燃气循环装置效率提高 10% 左右。

图 1-4 是船用斯贝型燃气-蒸汽联合循环示意图。它是通过燃气轮机的排气在余热锅炉里放热,从而产生蒸汽在蒸汽轮机中做功,如图 1-4 所示燃气轮机做功和蒸汽轮机做功通过公用齿轮箱带动螺旋桨推进船舶。由于合理地利用燃气轮机排气做功推进,联合循环的耗油率可降低到 $200 \sim 218 \text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。燃气-蒸汽联合循环的燃气轮机总能热力系统是一种很有前途的节能型轮机装置,它可以广泛地应用于大型和中型水面舰艇及远洋商船。

3. 蒸汽轮机基本总能热力系统

图 1-5 所示是采用蒸汽轮机的基本总能热力系统。燃料在蒸汽锅炉里产生蒸汽供汽轮机发出机械能,机械能带动螺旋桨产生推力。如图 1-5 所示的蒸汽轮机的总能系统常采用抽汽式汽轮机,即在汽轮机内的抽汽口抽出适当数量的蒸汽,用来作给水加热、制冷空调等供热系统的热源。

1-1-2 船舶热力系统的主要特点

无论船舶热力系统如何变化,一般均具有以下几个方面的特点:

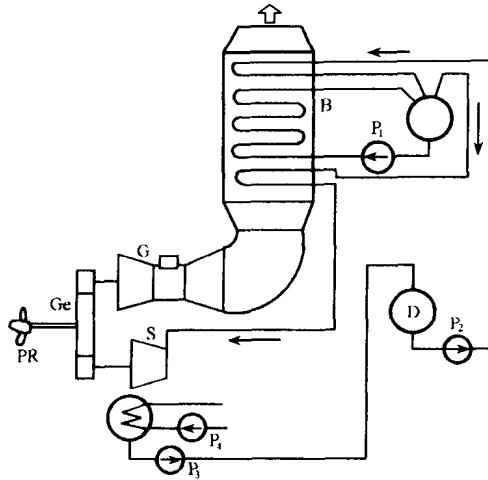


图 1-4 船用斯贝型燃气-蒸汽联合循环示意图

G. 燃气轮机; S. 蒸汽轮机; B. 余热锅炉; Ge. 齿轮减速箱; PR. 螺旋桨; D. 除氧器;
 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 . 分别为再循环泵、给水泵、凝水泵和冷却水泵

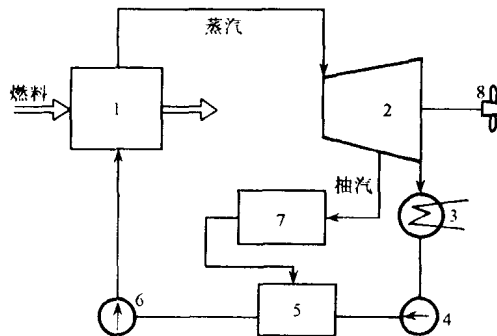


图 1-5 蒸汽轮机的基本总能系统

1. 蒸汽锅炉; 2. 汽轮机; 3. 凝汽器; 4. 凝水泵; 5. 热井; 6. 给水泵; 7. 用汽设备; 8. 螺旋桨

1. 集合性

船舶热力系统是由许多单元按照一定的方式组合起来的,即所谓系统的“集合性”。例如,蒸汽动力系统是由锅炉、汽轮机、冷凝器、泵及各种加热器等单元组成的;余热回收系统是由各种换热器、余热锅炉、热机热泵等单元组成的。

2. 关联性

船舶热力系统的各个组成部分之间是相互联系和相互制约的,即所谓系统的“关联性”。这种关联性是具有一定规律的,就是系统中各单元设备不是随意的组合或无序的堆积,而是按照其性能上的特点和规律匹配联结起来的。

3. 目的性

船舶热力系统总是具有其特定的功能,即所谓系统的“目的性”。按照功能的不同,可分为热能的产生、转换、输送、利用或回收系统,可以供应生产和生活所需要的电力、动力、热量、冷量、蒸汽、海水淡化或软化水等,也可以回收生产过程中的余热或工质。因此它们可以由少数几个设备构成的单功能的简单系统,也可以是由许多单元组成的多功能复杂系统。

4. 环境适应性

船舶热力系统总是存在并活动于一个特定的环境之中,与环境不断地进行物质和能量的交换,即所谓系统的“环境适应性”。热力系统都有输入和输出。外界环境向系统提供物料和能量,这些物料和能量在系统中流动,形成物流和能流,并不断受到加工、转换、处理或利用。同时,系统也要向环境输出物料和能量。在热电联产系统中,外界向系统提供燃料的化学能,系统通过锅炉先将燃料的化学能转化为蒸汽的热能,再通过汽轮机将蒸汽的部分热能转化为机械能,并进一步通过发电机转化为电能输出;此外汽轮机的排汽或抽汽同时向外界供热。系统和环境不仅有输入和输出的相互作用,而且系统在进行能量转换的整个过程中总是受到环境条件的制约。正是由于系统与环境之间的相互作用和制约,以及系统内部能量的转化和转移过程,才确定了系统的特殊功能。

5. 层次性

系统和单元之间具有相对性。一般说来,一个系统总是另一个更大系统的一部分,或称为大系统的子系统;而子系统又是由更小的子系统所构成的,即所谓系统的“层次性”。对于工程目的而言,通常将热力系统划分为单元设备或单元过程为止就足够了。因此,任何一个热力系统都可以看成是由一系列单元热工设备或单元热力过程按一定的联结方式组成的网络。当然,为完成同样的功能,系统可以有不同的组成单元和结构。

船舶热力系统除了具有以上一般系统的特征之外,还可以从系统的静态和动态分析角度考察它的特点。

从静态分析角度可以归结为单元过程特点和再循环结构特点:

1) 单元过程特点。对于热力系统,在设备空间中所发生的基本过程,不外乎是物质的传递、热量的传递、动量的传递、能量的转换及燃烧反应等现象。这些现象连同设备的结构、进出设备的物料以及所传输的能量一起,就确定了设备空间中所形成的“状态”和进行的“过程”。我们所期望的,就是通过这些状态和过程而达到某种特定的目的。按照这些特定的目的,可以将单元过程划分为:传热过程、流动过程、燃烧过程、热功转换过程等有限的几种。这对于建立单元过程的数学模型,进而进行船舶热力系统的分析与综合是十分有益的。

2) 再循环结构特点。如果系统中没有物流或能流的反馈,这样的系统结构称为“树”结构;如果系统中有物流或能流的反馈,这样的系统结构称为“再循环”结