

现代船舶动力装置的 节能与排放控制技术

李 斌 著

大连海事大学出版社

XIANDAI CHUANBO DONGLI ZHUANGZHI DE JIENENG YU
PAIFANG KONGZHI JISHU



定价:21.00元

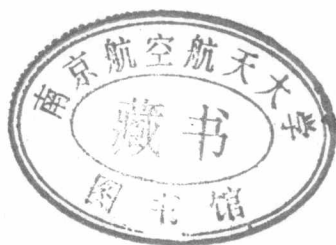
UG64
1052-2



NUAA2013069331

现代船舶动力装置的 节能与排放控制技术

李 斌 著



大连海事大学出版社

2013069331

© 李 斌 2013

图书在版编目(CIP)数据

现代船舶动力装置的节能与排放控制技术 / 李斌著. —大连:
大连海事大学出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-5632-2832-4

I. ①现… II. ①李… III. ①船舶机械—动力装置—节能—
研究 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 030948 号



大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连美跃彩色印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷

幅面尺寸:170 mm × 230 mm 印张:7.75

字数:189千 印数:1~500册

责任编辑:沈荣欣 封面设计:王 艳 责任校对:蒋宗彦

ISBN 978-7-5632-2832-4 定价:21.00元

1888808108

序

进入 21 世纪以来,能源与环境问题已成为人类面临的最严峻的问题。资源耗竭的危险正逐步逼近,各种环保法规和排放标准日益严格。节能与排放控制已经成为现代船舶动力装置领域研究的核心课题。

为了保证船舶运输业的可持续发展,相关的国际组织、各国政府、设备制造商、部件供应商、大学、研究机构与航运公司都在积极采取措施,从各种不同的方面应对能源和环境问题给船舶运输业带来的挑战,主要包括各种排放控制措施、节能措施、新能源的开发和使用、新型船舶推进装置的开发和使用等。

作者长期以来一直从事船舶动力装置节能和排放方面的教学和研究工作。本书以作者 2009 年在欧洲工作和学习期间,收集和掌握的大量有关船舶动力装置节能和排放控制方面的最新资料为基础编写而成。全书的内容非常广泛,涉及了世界能源供应和环保法规对船舶动力装置的影响;船舶有害气体排放和控制;船舶动力装置的系统节能;当前船舶柴油机技术的最新进展;电力推进和新能源在船舶动力装置上的应用等等。

本书是国内第一部系统地论述船舶动力装置节能和排放控制方面的最新技术的专著,有助于业内人士了解和掌握当前船舶动力装置的现状和发展趋势,对于我国船舶动力装置节能和排放控制方面的研究也有着积极的意义。

大连海事大学校长



2011 年 6 月

前 言

石油产品是船舶动力装置的主要燃料。自 1973 年第一次石油危机以来,石油价格不断上涨,燃料在船舶营运成本中所占的比重日益增加。节能一直是船舶动力装置领域研究的核心课题。

现代工业发展造成的环境污染日益严重,已危及人类自身的生存。但随着人类环境意识的增强,各种环保法规也陆续出台。船舶动力装置对于环境造成的污染,主要是废气排放中的氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)、二氧化碳(CO_2)和颗粒物等。为了控制船舶运输业造成的大气污染,国际海事组织(IMO)以及某些国家和地区都制定了日益严格的排放标准。应当说,排放控制已经成为现代船舶动力装置发展的第一驱动力。

当前,一次能源正在逐步耗尽,关于全球石油顶峰的多个不同预测值汇集于 2010 年附近。为了控制船舶造成的大气污染,2008 年,国际海事组织对 MARPOL(73/78)公约 1997 年的新增附则 VI《防止船舶造成大气污染规则》进行了进一步的修订,第二阶段(Tier II)的排放限制法规已于 2011 年 1 月 1 日开始实施。关于船舶温室气体(CO_2)排放限制的有关法规也正在制定当中。现在节能与排放控制已从相互独立的两个课题变为一个课题密切相关的两个方面。

针对能源和环境问题给船舶运输业带来的挑战,从保证船舶运输业可持续发展的角度出发,相关的国际组织、各国政府、设备制造商、部件供应商、大学、研究机构与航运公司都在采取措施积极应对,包括新能源的开发和使用、新型船舶推进技术在内的各种节能减排的新技术也被不断推出。

作者长期以来一直从事船舶动力装置节能和排放方面的教学和研究工作。2009 年,作者作为访问学者在丹麦斯文堡国际海运学院(Svendborg International Maritime Academy, SIMAC)工作和学习一年,其间,参观了 MAN 柴油机公司、Aalborg 工业集团等世界顶级船舶设备制造公司,接触了有关绿色船舶项目,并收集了大量有关船舶动力装置节能和排放控制方面的最新资料,也了解了欧盟在船舶动力装置领域进行的一系列大规模合作研究项目,真切地感受到国内船舶制造领域的研发能力和技术储备与世界先进水平的差距。

全书共分 6 章:第 1 章主要论述当前的世界能源供应和环境法规对船舶动力装置的影响;第 2 章讨论船舶柴油机的有害排放及控制问题;第 3 章涉及能量综合利用的原则和动力装置的系统节能;第 4 章主要介绍了欧盟对船舶柴油机

潜力的研究情况及气体燃料柴油机和柴油机的增压技术的最新进展;第5章论述了船舶电力推进技术和电力机械联合推进;第6章主要讨论风帆助航和燃料电池技术在船舶应用情况,最后探讨了核动力在民用船舶的应用问题。本书涉及船舶动力装置领域大量的最新技术,可作为相关专业学生的学习用书和相关专业技术人员的工作参考书。

在本书的写作过程中,得到了大连海事大学孙培廷副校长的鼎力支持,并提出了许多中肯的意见,使笔者在学识上受益匪浅。大连海事大学王祖温校长欣然为本书作序。本人在此表示衷心的感谢!限于本人学识有限,书中难免有不足和疏漏之处,祈请读者不吝指正。最后,向在本书写作过程中予以支持的轮机学院领导和同事,向书中参阅、引用了大量有关资料的MAN Diesel & Turbo公司和Wartsila公司以及其他国内外作者致以衷心的感谢!

作 者

2012年5月8日

目 录

第 1 章 世界能源供应和环境法规对船舶动力装置的影响	(1)
1.1 绪 论	(1)
1.2 世界能源供应现状	(2)
1.3 矿物燃料燃烧对环境造成的影响	(6)
1.4 船舶动力装置面临的挑战和发展	(6)
第 2 章 船舶柴油机的有害排放及控制	(10)
2.1 船舶柴油机的排放与危害	(10)
2.2 控制船舶柴油机排放的有关法规	(14)
2.3 船舶柴油机有害排放的控制措施	(18)
2.4 CO ₂ 排放和绿色船舶	(29)
第 3 章 能量综合利用和轮机系统节能	(39)
3.1 能量综合利用的原则	(39)
3.2 船舶柴油机本身的节能技术	(42)
3.3 轮机系统的节能	(45)
第 4 章 船舶柴油机技术的最新发展	(54)
4.1 欧盟对船舶柴油机潜力的研究(HERCULES 计划)	(54)
4.2 燃气柴油机技术的普及和推广	(58)
4.3 柴油机的增压技术的发展	(68)
第 5 章 船舶电力推进技术	(73)
5.1 电力推进	(73)
5.2 吊舱式电力推进装置	(78)
5.3 电力机械联合推进	(82)

第6章 新能源在船舶动力装置上的应用	(92)
6.1 风帆助航	(92)
6.2 燃料电池技术的船舶应用	(99)
6.3 核动力在民用船舶上的应用探讨	(107)
参考文献	(110)

第 1 章 世界能源供应和环境法规对船舶动力装置的影响

能源与环境问题是人类目前面临的最严峻的问题。能源资源储量有限,而能源消耗量却逐年增加,资源耗竭的危险正逐步逼近,这种危机感已成为人们的共识;环境污染日趋恶化,严重地制约了经济的发展,已危及人类自身的生存。人类面临的能源与环境问题同样是船舶动力装置面临的挑战。石油产品是船舶动力装置的主要燃料,而船舶柴油机的排放则是大气污染的重要污染源。日益严峻的世界能源供应形势和越来越严格的环境排放法规,都对船舶动力装置的发展有着重大的,甚至是决定性的影响。

1.1 绪论

随着世界经济日益全球化,国际贸易的地位不断提高。海上运输占全球货物运输的 95% 以上,已成为世界经济全球化的一个重要支柱。船舶动力装置的运行,已经和全球的经济、能源和环境密不可分。

2008 年,全球能源市场和航运市场都在动荡中共同经历了一个不寻常的年份。

2008 年布伦特原油即期平均价格保持了连续 7 年的增长,达到平均每桶 97.26 美元,比前一年增长了 34%。然而,平均价格背后隐藏了全年巨大的价格起伏,年初价格略低于每桶 100 美元,7 月初升至每桶 144 美元。在全球原油价格达到这一历史顶点之后,则不寻常地进入暴跌,一路下降至年底的每桶不足 40 美元。

2008 年,波罗的海干散货运价指数 BDI(Baltic Dry Index)也与世界经济同步,走出了最富戏剧性的曲线。2008 年 5 月 20 日,BDI 指数攀高到 11793 点的历史高位,却在 12 月 5 日跌至 663 点,创 22 年新低。

2008 年 10 月,国际海事组织(IMO)海洋环境保护委员会(MEPC)在国际海事组织伦敦总部举行的第 58 次会议上,通过了修订《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL 公约)的附则 VI,对船舶有害气体排放提出了更严格的限制。2011 年 7 月,国际海事组织 MEPC 第 62 次会议上,具有强制性的国际航行船舶温室气体(GHGs)减排措施,以 MARPOL 公约附则 VI 修正案的方式,由缔约国一致通过。

如何看待日益严峻的石油供应的形势,如何应对越来越苛刻的排放法规的

限制,将决定着船舶主推进动力装置的发展方向,这是我们现代轮机管理人员不得不面对和研究的一个重要问题。

1.2 世界能源供应现状

1.2.1 世界一次能源消费的消费情况

受经济发展和人口增长的影响,世界一次能源消费量不断增加。根据统计,1973年世界一次能源消费量仅为57.3亿吨油当量,到2008年已接近113.0亿吨油当量。在30多年内能源消费总量翻了一番,年均增长率为1.8%左右。

过去30多年来,北美、中南美洲、欧洲、中东、非洲及亚太等六大地区的能源消费总量均有所增加,但是经济、科技与社会比较发达的北美洲和欧洲两大地区的增长速度非常缓慢,其消费量占世界总消费量的比例也逐年下降,北美由1973年的35.1%下降到2008年的24.8%,欧洲地区则由1973年的42.8%下降到2008年的26.2%。其主要原因:一是发达国家的经济发展已进入到后工业化阶段,经济向低能耗、高产出的产业结构发展,高能耗的制造业逐步转向发展中国家;二是发达国家高度重视节能与提高能源使用效率。亚太地区占全球能源消费增长的87%。煤炭连续3年登上一次能源消费增幅榜首。中国是目前世界上第二位能源消费国。中国的能源消费增长连续5年减缓,但仍占全球能源消费增长的75%。近十年的能源消费情况如表1-1所示。

我们所使用的能源中,矿物燃料(即石油、天然气和煤炭)占了80%以上,预计到2030年,虽然能源消费总量会有所提高,但矿物燃料仍将在一次能源里占主导地位,图1-1是2008年各种一次能源的消费分布情况。

2008年,全球一次能源消费整体微增1.4%。低于过去十年的平均水平,为2001年以来最小增幅。石油依旧是全球最主要的燃料,尽管由于煤炭和天然气消费量的增加,在过去十年里石油消费量有所下降,但石油消费量仍处于第一位。全球天然气消费增长了2.5%,占全球一次能源的市场份额的

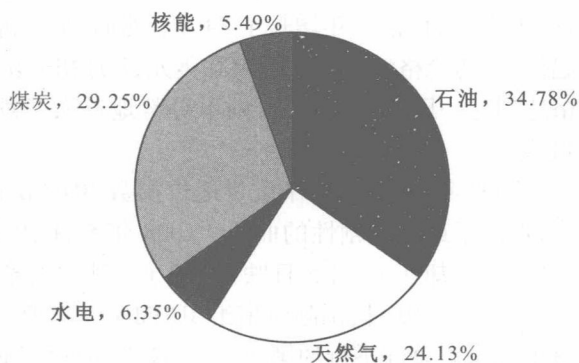


图 1-1 2008 年各种一次能源的消费分布

24.1%,是目前欧洲的主要燃料。煤炭消费增长上升了3.1%,在亚太地区,煤炭占据了主导地位,且市场份额仍在继续扩大,该地区的煤炭消费占全球的61.5%,任何地区的任何其他燃料消费都无法达到如此之高的比例。核电发电

表 1-1 世界各地一次能源消费量 (单位:百万吨油当量)

年份 地区	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2007-2008 变化情况	2008 年占 总量比例
北美洲总计	2635.0	2680.0	2747.8	2688.4	2728.7	2751.9	2803.6	2819.2	2803.2	2849.4	2799.1	-2.0%	24.8%
中南美洲 总计	447.8	448.7	459.5	462.3	465.7	470.0	490.9	511.6	538.4	563.5	579.6	2.6%	5.1%
欧洲及欧亚 大陆总计	2759.9	2757.1	2806.9	2827.9	2835.3	2877.2	2925.9	2937.7	2978.7	2956.9	2964.6	<0.05%	26.2%
中东总计	373.9	384.2	399.5	424.4	444.2	463.4	492.6	533.2	555.1	577.6	613.5	5.9%	5.4%
非洲总计	266.9	273.7	276.1	281.5	289.1	302.3	318.2	323.5	327.5	341.0	356.0	4.1%	3.2%
亚太地区 总计	2405.0	2477.7	2572.8	2638.7	2739.8	2945.8	3227.6	3430.0	3617.9	3816.0	3981.9	4.1%	35.3%
中国大陆 总计	917.4	934.7	967.3	1000.6	1058.3	1229.3	1429.0	1572.2	1722.6	1862.8	2002.5	7.2%	17.7%
世界总计	8888.5	9021.5	9262.6	9323.1	9502.8	9810.5	10258.8	10555.3	10820.8	11104.4	11294.9	1.4%	100.0%

量下降 0.7%,水电发电量则增长了 2.8%,可再生能源强劲增长,风能和太阳能装机总量分别上升了 29.9% 和 69%,双双超过十年平均值。但由于其基数较低,总量仍较小。

1.2.2 世界能源的储量和供应

根据 2009 年 6 月发布的《BP 世界能源统计 2009》,截至 2008 年年底,全球原油剩余探明储量为 1.258 万亿桶(不含加拿大油砂);按 2008 年的年开采速度计算,可开采 42 年,以同样方式计算,现有天然气储量能满足 60 年的开采,而煤炭依然是全世界储量最丰富的燃料,现有煤炭储量可开采 122 年。

根据目前世界能源资源状况,应当说世界的能源仍比较丰富,在 2030 年之前,矿物燃料仍将是世界的主要能源,石油、天然气和煤炭将占到一次能源的 80% 以上。

随着人类认识的加深和科技的进步,世界石油、天然气和煤炭等资源量的探明储量日益增长,开采规模越来越大,产量也在逐步上升。然而,地球的能源资源毕竟是有限的,全球石油顶峰的到来和能源资源的最终枯竭是一个不争的事实。而关于全球石油顶峰有多个不同预测,石油顶峰的预测值汇集于 2010 年期间。目前,全球 98 个大小不同的产油国中,64 个已达石油顶峰。这些国家的产油量正在下降,而且无力改变这个趋势。同时,由于勘探和开采难度的加大,成本也在大幅度增加。

1.2.3 世界能源的市场与价格

能源的价格是由一次能源储量,开发成本和供求关系等多方面的因素所决定的。

世界人口增长和经济规模的扩大,必然导致能源需求的增加,而能源的消耗必然导致储量的下降,新探明和开发的油气田多在海洋和气候恶劣地区,其勘探和开发的成本都大大高于普通陆基石油,这些基本要素决定了能源价格的总体趋势必然会不断升高。以布伦特原油即期平均价格为例,2008 年布伦特原油即期平均价格保持了连续 7 年的增长,达到每桶 97.26 美元,比前一年增长 34%,如图 1-2 所示。与此相似,其他能源资源的价格也在不断上涨。

尽管能源价格的总体趋势会不断升高,但由于世界政治、经济各种因素的影响,也会出现较大的波动。近年来,原油价格在高速增长的世界经济带动下不断上涨,在 2008 年 7 月初创造了每桶 144 美元的历史最高纪录,石油输出国组织也在大幅增产,但随之而来的金融危机和经济衰退改变了世界能源市场的紧缺局面,世界经济和石油消费同时放缓,导致库存增加、价格大幅回落,油价到年终跌落至 40 美元以下。然而,经济危机是暂时和阶段性的,在危机过后,长期的经济发展仍然会使能源的价格进一步升高。

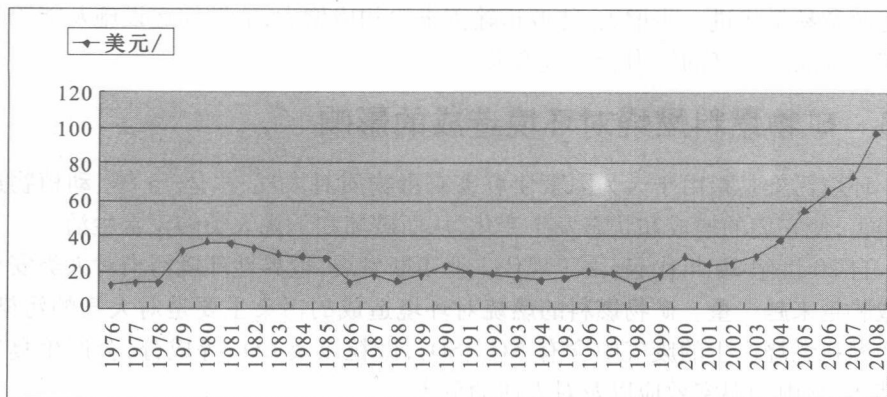


图 1-2 历年布伦特原油平均价格

1.2.4 能源的运输

全世界各类能源的储量,开采量和消费量非常不平衡。如全世界剩余石油探明可采储量为 1 708 亿吨,主要分布在中东地区,约占 60%;中东和欧洲是世界天然气资源最丰富的地区,两个地区占世界总量的 75.5%;煤炭则主要分布在欧洲、北美和亚太三个地区,三个地区合计占世界总量的 92% 左右。

通过对比各地区石油产量与消费量可以发现,世界各地的石油产量和消费量有很大的差别,中东地区的石油产量为 12.54 亿吨,只消费了 3.07 亿吨,需要向外输出约 9.47 亿吨,而亚太地区的石油产量为 3.81 亿吨,却消费了 11.83 亿吨,需要进口约 8.02 亿吨,非洲和中南美洲的石油产量也大于消费量,北美和欧洲则分别存在着 4.61 亿吨和 1.04 亿吨的产消缺口,如图 1-3 所示。

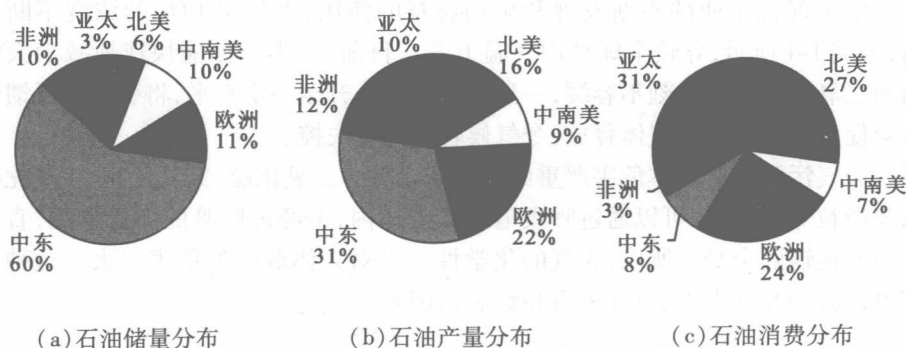


图 1-3 2008 年世界各地的石油探明储量、产量和消费量

在各类化石燃料中,只有煤炭储量基本集中分布在亚太地区 and 北美洲这类最主要的能源消费中心。

由于世界各地能源资源开采量和消费量的不平衡,就存在着能源贸易及运输的问题。随着世界一些地区能源资源的相对枯竭,世界各地及国家之间

的能源贸易量将进一步增大,能源运输需求也相应增大,能源储运设施及能源供应安全等问题带来的压力会日益增大。

1.3 矿物燃料燃烧对环境造成的影响

环境污染是指由于人为因素使有害有毒物质对大气、水体、土壤、动植物造成损害,使它们的构成和状态发生变化,从而破坏和干扰人类的正常生活。

自 20 世纪 20 年代起,由于现代工业不断发展,世界性环境污染对人类安全的威胁越来越严重。矿物燃料的燃烧对环境造成的污染主要是对大气的污染,矿物燃料燃烧产生的废气中含有 NO_x 、 SO_x 、微粒以及 CO_2 等成分,会产生臭氧层破坏、酸雨和温室效应以及对人体的危害。

大气臭氧层主要作用之一是吸收太阳光中的紫外线,保护地球上的人类和动植物免遭紫外线的伤害。臭氧层被大量损耗后,吸收紫外辐射的能力大大减弱,导致到达地球表面的紫外线明显增加,给人类健康和生态环境带来多方面的危害。目前已受到人们普遍关注的主要有对人体健康、陆生植物、水生生态系统、生物化学循环、材料以及对对流层大气组成和空气质量等方面的影响。

酸雨可使土壤和河流酸化,并且经过河流汇入湖泊,导致湖泊酸化。湖泊酸化以后不仅使生长在湖中和湖边的植物死亡,而且威胁着湖内鱼、虾和贝类的生存,从而破坏湖泊中的食物链,最终可以使湖泊变成“死湖”。酸雨还直接危害陆生植物的叶和芽,使农作物和树木死亡。

温室气体包括二氧化碳、甲烷、一氧化二氮、氢氟碳化物、全氟碳化物、六氟化硫等。燃烧化石燃料、农业和畜牧业、垃圾处理等都会向大气中排放温室气体。由于现代工业的不断发展和矿物燃料的使用,大气中 CO_2 的浓度不断升高,如图 1-4 所示,导致全球平均气温上升。目前,人类如何能快速地减少大气内的二氧化碳问题已刻不容缓,一旦全球温度上升至一定水平,将引发正反馈效应会促成更多的温室气体释放,令气候转变完全失控。

大气污染物对人体危害严重的多达几十种。二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳以及微粒等污染物,可以通过呼吸道进入人体内,不经过肝脏的解毒作用,直接由血液运输到全身。所以,大气的化学性污染对人体健康的危害很大。这种危害可以分为慢性中毒、急性中毒和致癌作用等。

1.4 船舶动力装置面临的挑战和发展

船舶运输是目前最有效的运输方式,在世界范围内,95% 以上的货物是通过船舶运输的。其主要的动力装置——船舶柴油机的热效率在热机中是最高的,这就意味着船舶柴油机产生的 CO_2 排放量是最低的,如图 1-5 所示。

由于在世界范围内船舶数量众多,船舶柴油机的功率巨大,因此,船舶柴油

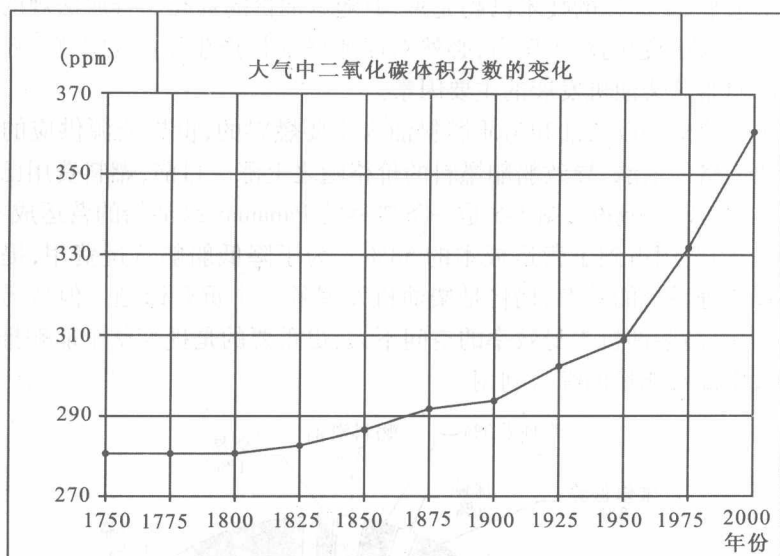


图 1-4 大气中二氧化碳浓度的变化

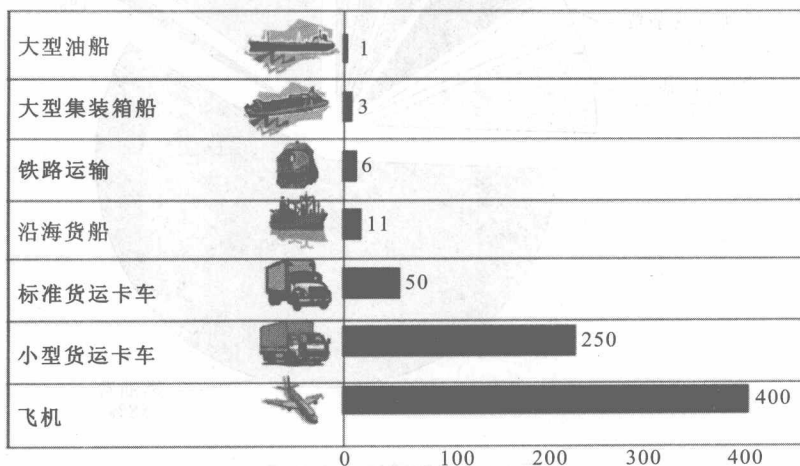


图 1-5 不同运输工具的相对 CO2 排放(相对值)

机所消耗的能源和产生的排放数量也是非常巨大的。据统计,船舶柴油机消耗能源约占世界能源的 3%,船舶柴油机的 NO_x 排放约占全球 NO_x 排放的 7%, SO_x 排放约占全球 SO_x 排放的 4%, CO_2 排放量占整个世界 CO_2 排放量的 2.7%。随着世界经济和海上运输业的发展,船舶数量的增加,船舶造成的大气污染也越来越受到重视,船舶柴油机的排放控制法规也越来越苛刻。

船舶柴油机经过一百多年的发展,尽管现代船用柴油机已经发展到一个很

高的技术水平,柴油机的技术已趋完善,但随着油价的提高和排放法规的日益苛刻,能源与环境问题的双重压力,必然对船舶柴油机产生重要的影响,甚至成为近年来影响船舶柴油机发展的主要因素。

船舶柴油机是以柴油和劣质燃料油为主要燃料的,世界能源供应的日趋紧张和能源价格的上涨,导致船舶燃料的价格随之上涨。目前,燃料费用已占船舶营运成本的 50% ~ 60%,图 1-6 是一条典型的 Panamax 级油船的营运成本分析,其中,燃料的费用占到了营运成本的 58%。为了降低船舶营运费用,提高船舶柴油机及推进系统的效率,仍将是柴油机发展的一个重要课题。但从另一方面来看,目前提高柴油机本身效率的空间不大,更重要的是提高整个船舶推进系统的综合效率以及能量的综合利用。

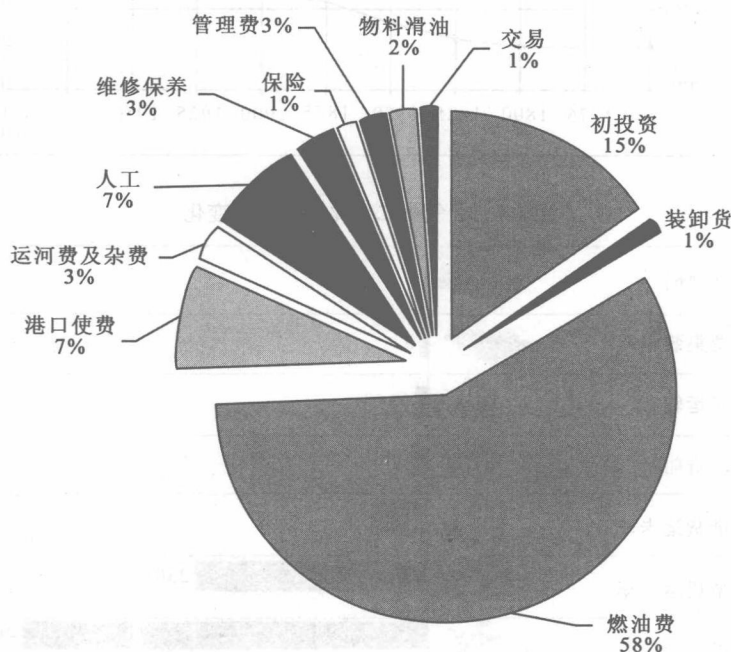


图 1-6 船舶营运成本分析

对船舶柴油机排放的控制是柴油机发展的另一个重要课题,目前对船舶柴油机排放的控制主要是对柴油机排放中的氮氧化物排放和硫氧化物排放的控制,进一步的排放控制还可能涉及排放中的有害颗粒和 CO_2 的排放。对船舶柴油机排放的控制不仅涉及柴油机气缸内的工作过程,而且和柴油机的结构、运行工况、工作参数、使用燃料以及各辅助设备和系统的工作质量都有关系。可分为机内处理和机后净化。机内处理方法的关键是有效的控制燃烧过程,以寻求同时满足排放标准和提高柴油机的热效率。采用机后净化处理方法虽然不会影响