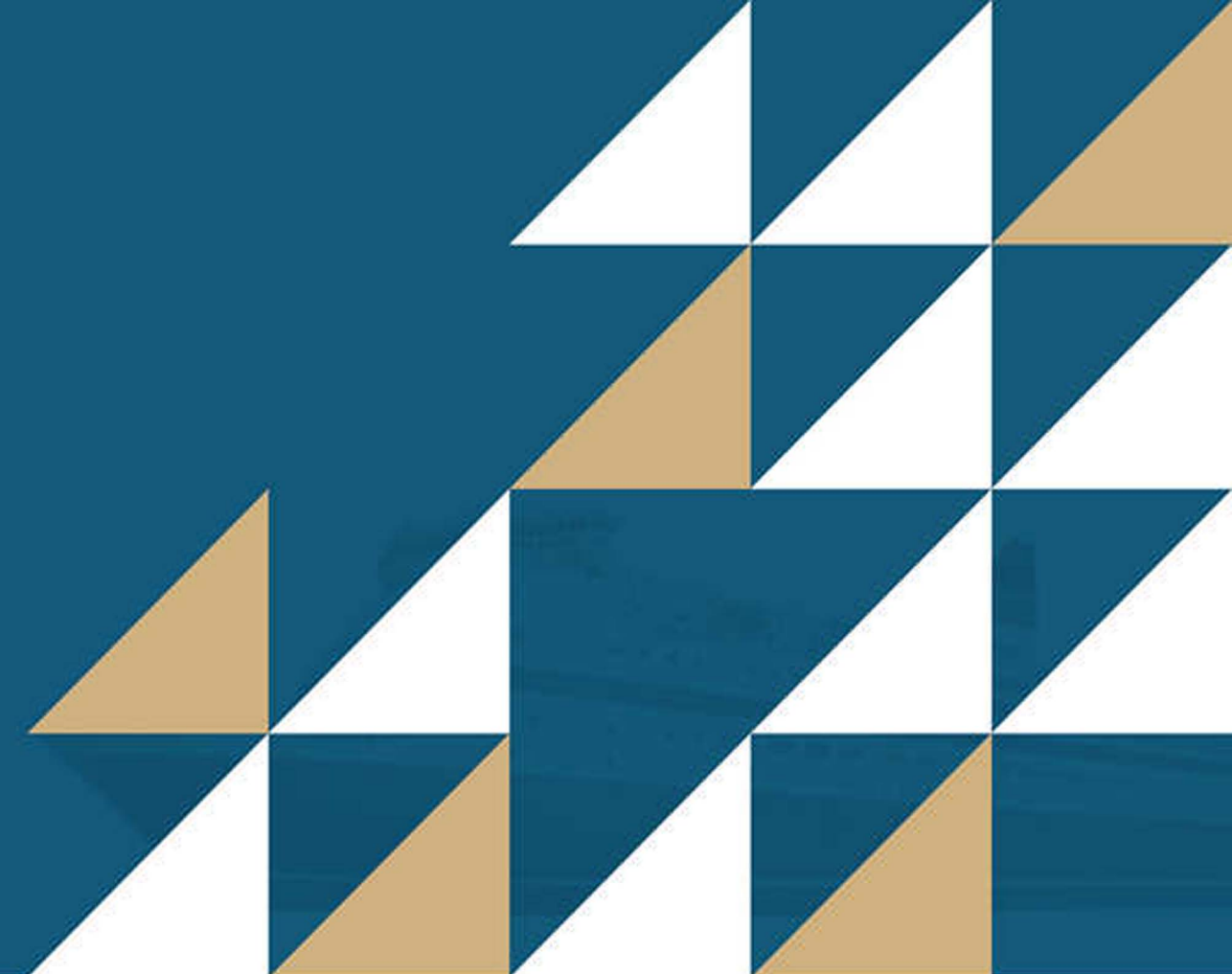




船用低速柴油机燃烧与性能

王筱蓉 唐文献 姜根柱 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

船用低速柴油机 燃烧与性能

王筱蓉 唐文献 姜根柱 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

船用低速柴油机燃烧与性能 / 王筱蓉, 唐文献, 姜根柱著. —北京:
北京理工大学出版社, 2017. 7

ISBN 978 - 7 - 5682 - 4583 - 8

I. ①船… II. ①王… ②唐… ③姜… III. ①船用柴油机 - 低速
柴油机 IV. ①U664. 121. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 196259 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / [http: //www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 13. 5

责任编辑 / 封 雪

字 数 / 202 千字

文案编辑 / 党选丽

版 次 / 2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

责任校对 / 周瑞红

定 价 / 68. 00 元

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

柴油发动机优于汽油机等其他内燃机，表现在其能耗低、热效率高、动力强劲、良好的经济性等方面，这些优势使其成为现代最重要的船舶主机。据可靠数据统计，在1998年，世界各国造船总计为1 080艘，其中有1 078艘为柴油机船舶，占造船总量的99.8%，而这一状况在未来10年或更长的时间内，从根本上不会发生太大的改变。21世纪以来世界造船产量每年以7%~10%的速度增长，2007年世界船舶完工量已达近8千万载重吨，其中90%左右均由中、日、韩三国制造完成，中国造船完工量达到近1.9千万载重吨，占世界造船总量的23%，位列世界第三。

柴油机在燃烧过程中，因其热效率高，缸内局部燃烧温度增加，最大爆发压力大，在生成完全燃烧产物的同时也会产生一系列废气及环境污染物，对生态环境造成严重的危害。船用柴油机排放的主要污染物包括CO、HC、NO_x、SO_x和PM，即碳烟、未燃燃油、硫酸盐等。它们对生态环境与人体健康会造成严重危害。其中危害性最大、最直接的NO_x、SO_x和PM，已成为现代船舶柴油机限排、减排主要的控制对象。

国际海事组织（International Maritime Organization, IMO）针对《MARPOL公约》（即《国际防止船舶造成污染公约》）进行了修正，在原有的基础上增加了附则Ⅵ，对船舶柴油机NO_x的排放提出了严格的要求，附则Ⅲ规定的到2016年的NO_x排放的限值比现行的附则Ⅱ标准降低了近80%。而今后国际法规对船舶柴油机有害污染物的排放限制将会更加严苛，意味着对船舶制造商有着更高的标准和要求。作为IMO的缔约国，我国自2005年3月起已颁布了关于实施《MARPOL公约附则Ⅵ》的通报，标志着相关排放法规正式与国际接轨。



国务院最新的防止船舶污染海洋环境管理条例规定：从2010年3月起，在中华人民共和国海域内，船舶排放物（如废物、有害气体等）的标准必须在国际条约、相关法规的规定之内，进一步对船舶柴油机的污染物排放给出明确的界定，使中国远洋船舶柴油机排放限制标准与国际法律法规同步，并始终维持在较高的水平。

21世纪柴油机电控技术的发展进入鼎盛时期，而电控技术在船舶柴油机中的应用，不仅改善了整机的工作性能，同时还提升了对排放要求的控制，在减少排气污染、降低油耗、改善动力性、提高可靠性的基础上，使柴油机综合性能得到全面的优化与提升。而高压共轨燃油喷射系统成为现、当代应用最为广泛的可由电子单元对其进行控制的燃油系统，它能够使喷射压力维持恒定，通过电子控制可以对喷射压力、喷射持续期、喷油始点等重要控制参数进行灵活柔性的调整。高压共轨燃油系统的优势及特点表现在：① 可对喷油压力、喷油始点、喷油持续期进行独立的变化调节，处于不同工况下的发动机，随着喷射压力与喷入油量的变化可灵活控制，从而实现在低转速时维持较高的喷射压力，降低排放和提高燃油经济性的目的；② 高压喷射的连续性与稳定性，使燃油液滴细化得更好，提升了油、气混合质量，改善了燃烧，提高了排放的性能；③ 电控单元（ECU）可获得合理的喷油量与喷油持续期，精准控制喷射过程，多级喷射策略得以实现，在燃烧过程优化的同时降低燃烧噪声及有害物的排放；④ 结构简单，适应性强，可靠性高，易于匹配，有广阔的市场前景。综合以上船用柴油机的发展现状、限制节能减排的重要性，以及电控技术发展应用的成熟性，在进气系统和燃烧系

统的性能已经确定的情况下,优化柴油机喷油特性以达到控制改善整个燃烧过程,降低排放就成了关键所在。

船用低速二冲程柴油机的性能主要取决于气缸内的气体流动、燃油的燃烧及燃烧参数的合理匹配。本书第2~5章以某船用低速二冲程柴油机为研究对象,对其扫气过程、燃烧过程进行仿真研究,将仿真所得的缸压曲线与试验值进行对比,验证了仿真的正确性;在对仿真结果进行分析的基础上,分析了部分控制参数对性能的影响,获得温度、燃油、 NO_x 排放的分布云图,以及缸内温度、燃烧放热率、 NO_x 生成历程等曲线。在此基础上研究了米勒循环、喷油正时和喷油参数对船用低速柴油机燃烧性能的影响,为船用低速柴油机的开发提供参考。

船用柴油发动机的动力性能和燃油经济性等受到诸多因素的影响,最终排放性能取决于燃烧程度的好与坏,而喷油(雾)特性对于柴油机整体燃烧过程有着决定性的影响。本书第6~8章研究了船用柴油机的喷油特性对整机综合性能的影响,包括不同喷油规律、多次喷射参数以及喷油器参数对船用低速柴油机燃烧过程的影响规律,通过参数优化改善柴油机的燃烧过程,在降低柴油机有害物排放的同时又能满足其对动力性与经济性的要求。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的背景与意义	3
1.2 国内外研究现状	7
1.2.1 柴油机燃烧性能的国内外 研究现状	7
1.2.2 燃料喷射系统的发展和现状	9
1.2.3 柴油机燃油喷射优化技术 国内外研究现状	11
1.2.4 喷油器参数的国内外研究现状	15
1.2.5 内燃机燃烧过程数值模拟的 发展和现状	16
1.2.6 喷油嘴改进的国内外研究现状	21
1.2.7 燃油喷雾的国内外研究 现状	24
1.3 主要研究内容	29
第 2 章 船用低速柴油机数学模型的建立	31
2.1 基本控制方程	34
2.2 湍流模型	37
2.2.1 湍流概述	38
2.2.2 湍流的数值模拟方法	38
2.3 两相流模型	41
2.4 燃油喷雾模型	44
2.4.1 射流雾化模型	45
2.4.2 液滴破碎模型	48
2.4.3 液滴撞壁模型	49



2.5 燃烧模型	51
2.5.1 层流 - 湍流特征时间燃烧模型	51
2.5.2 点火模型	52
2.5.3 NO_x 排放模型	54
2.6 耦合喷孔内流的燃油雾化模型的建立	54
第3章 船用低速柴油机仿真模型的建立及 扫排气过程分析	59
3.1 研究对象和计算模型	61
3.1.1 研究对象	61
3.1.2 计算模型	61
3.1.3 网格划分	62
3.1.4 计算初始及边界条件的确定	64
3.2 换气过程模拟和结果分析	65
3.2.1 数学模型	65
3.2.2 换气过程模拟结果分析	65
第4章 船用低速柴油机燃烧特性仿真与 验证	71
4.1 计算模型	73
4.2 模型验证	75
4.3 仿真结果分析	76
4.3.1 缸温分析	76
4.3.2 缸内燃油、温度、 NO_x 的分布	77
4.3.3 放热率及排放	80
4.3.4 综合性能分析	81

第 5 章 船用低速柴油机燃烧特性影响因素的分析	83
5.1 米勒循环强弱对船用低速柴油机性能的影响	85
5.1.1 米勒循环强弱对缸内压力的影响	87
5.1.2 米勒循环强弱对缸内温度的影响	87
5.1.3 米勒循环强弱对缸内放热的影响	92
5.1.4 米勒循环强弱对 NO_x 排放的影响	96
5.1.5 米勒循环强弱对综合性能的影响	100
5.2 喷油正时对船用低速二冲程柴油机性能的影响	100
5.2.1 喷油正时对缸内压力的影响	101
5.2.2 喷油正时对缸内温度的影响	102
5.2.3 喷油正时对 NO_x 排放的影响	106
5.2.4 喷油正时对综合性能的影响	109
5.3 喷射方向对船用低速柴油机性能的影响	110
5.3.1 喷射方向对缸内压力的影响	112
5.3.2 喷射方向对缸内温度的影响	113
5.3.3 喷射方向对 NO_x 排放的影响	116
5.3.4 喷射方向对综合性能的影响	119
第 6 章 喷油规律对船用低速柴油机性能的影响分析	123
6.1 三种喷油规律的计算	126



6.2	不同喷油规律对燃烧特性的影响分析	129
6.3	不同喷油规律对各流场的影响分析	132
6.4	不同喷油规律对排放性能的影响分析	136
6.5	不同喷油规律对柴油机综合性能的影响分析	139

第7章 多次喷射对船用低速柴油机性能的影响分析 143

7.1	不同预喷率对船用柴油机性能的影响	145
7.1.1	不同预喷率对燃烧特性的影响	146
7.1.2	不同预喷率对排放特性的影响	148
7.1.3	不同预喷率对综合性能的影响	149
7.2	不同预/主喷间隔角对船用柴油机性能的影响	150
7.2.1	不同预/主喷间隔角 θ 对燃烧性能的影响	151
7.2.2	不同预/主喷间隔角 θ 对排放性能的影响	151
7.2.3	不同预/主喷间隔角 θ 对综合性能的影响	153
7.3	多次喷射影响参数正交化数值分析	154
7.3.1	多次喷射参数正交化方案的确定	154
7.3.2	多次喷射参数正交化对船用柴油机性能影响的数值分析	155

第 8 章 喷油器参数对船用低速柴油机燃烧过程的影响	159
8.1 喷孔个数对船用低速柴油机燃烧过程的影响	161
8.1.1 喷孔个数对缸内液态燃油量的影响	162
8.1.2 喷孔个数对缸内燃油、温度及 NO_x 分布的影响	162
8.1.3 喷孔个数对放热率和缸内平均压力的影响	167
8.1.4 喷孔个数对缸内平均温度和 NO_x 生成量的影响	169
8.1.5 喷孔个数对综合性能的影响	170
8.2 喷孔夹角对船用低速柴油机燃烧过程的影响	171
8.2.1 喷孔夹角对缸内燃油、温度及 NO_x 分布的影响	172
8.2.2 喷孔夹角对放热率和缸内平均压力的影响	178
8.2.3 喷孔夹角对缸内平均温度和 NO_x 分布的影响	180
8.2.4 喷孔夹角对综合性能的影响	181
8.3 喷孔方向对船用低速柴油机燃烧过程的影响	183
8.3.1 喷孔方向对缸内燃油、温度及 NO_x 分布的影响	184



8.3.2	喷孔方向对放热率和缸内平均压力的影响	189
8.3.3	喷孔方向对缸内平均温度和 NO_x 生成量的影响	190
8.3.4	喷孔方向对综合性能的影响	191
8.4	喷孔布置方式对船用低速柴油机燃烧过程的影响	192
8.4.1	喷孔布置方式对缸内燃油、温度及 NO_x 分布的影响	193
8.4.2	喷孔布置方式对放热率和缸内平均压力的影响	197
8.4.3	喷孔布置方式对缸内平均温度和 NO_x 生成量的影响	198
8.4.4	喷孔布置方式对综合性能的影响	199
	参考文献	200

第1章 绪 论





1.1 研究的背景与意义

柴油机具有热效率高、比油耗低、功率覆盖面宽、使用寿命长等显著优点，常被用作船舶推进动力。柴油机的原理是将柴油的化学能转化为曲轴的机械能。20 世纪 50 年代后，几乎所有的船舶主机都使用柴油机，如军舰、客货轮船、民用船舶、中小型舰艇及常规潜艇等。根据其在船舶中的作用不同，船用柴油机分为用作船舶推进动力主机和用来带动发电机、空气压缩机等的辅机。图 1.1 所示为典型的船用低速柴油机。随着我国海军逐渐强大、海洋装备业的发展以及国际贸易的增加，各类军舰及船舶的需求量增大，船市需求的增加带动了船用主

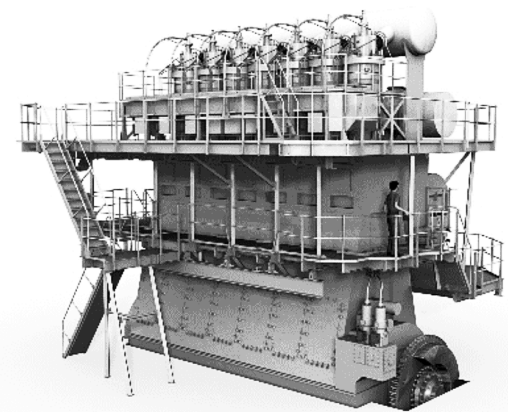


图 1.1 船用低速柴油机

机及辅机的大发展,“十一五”期间我国船用柴油机产业获得了快速的发展,造机产能及产量大幅增长,成绩斐然。我国船用低速柴油机生产企业由2005年的三家增加到2010年的14家,生产能力从250万马力^①增至570万马力。

虽然我国船用柴油机在“十一五”期间取得了较大的成绩,但距市场需求仍有较大差距,据有关部门统计,我国在2008—2011年的三年年均船用柴油机进口额高达23.3亿美元。按照我国2011年船用柴油机的需求来算,当年仍有50%左右的主机需从国外进口,这说明我国船用柴油机生产能力还有待加强。

在船用柴油机技术方面,我国长期受制于人。目前主要靠技术许可的方式引进国外品牌,MAN B&W、瓦锡兰等是我国以技术许可方式引进的最多的船用柴油机品牌。由于大多数企业过于注重引进技术,对引进的技术消化吸收不足,而侧重于制造工艺技术的改进和应用,以及自身制造能力的提升,因而我国在船用柴油机方面自主研发能力十分薄弱。目前尚没有自主研发的船用低速柴油机品牌;中速机虽有几个系列的自主机型,但总体技术水平与国外企业尚有较大差距。为改善我国船用柴油机自主研发能力薄弱的面貌,国家实施了一系列船用动力系统研发项目,并成立船舶动力系统国家工程试验室来逐步提升我国船用柴油机的研发能力。

近年来,随着环境污染的日趋严重,人类环保意识的提高,大气污染物的排放受到了国际社会和各国政府的重视,就船舶柴油机的排放而言,根据有关部门的统计,全球每年约有1 000万t的氮氧化物,850万t的硫氧化物的废气污染来自船舶柴油机,而在海岸线400 km以内营运的海上船舶超过70%,船舶排放的大气污染物相当严重,尤其是在船舶流通量较大的港口、海峡等海区,这些地区的主要污染源几乎就是船舶排

^① 1 马力 = 735.499 W。

放的废气。为防止来自船舶的空气污染，国际海事组织（IMO）以《MARPOL 公约》附则（Tier）的形式出台了《防止船舶造成大气污染规则》，该规则已于2005年5月19日实施，在MARPOL 73/78附则中有关于船用柴油机 NO_x 的排放限制的规定，这一规定主要应用于2000年1月1日后建造的（定义为安装龙骨或者类似结构的日期）、安装在船舶上、功率超过130 kW的柴油机；对于2000年1月1日以后改造的功率超过130 kW的柴油机也具有同样的效力。船用柴油机排放的主要污染物如图1.2所示，在这些污染物中， NO_x 的排放将受限于严格的IMO排放法规（2011年TierII，2016年TierIII），如图1.3所示。按照排放法规的规定，2011年1月1日以后建造或装船的柴油机的 NO_x 排放需满足TierII，比Tier I降低20%，2016年1月1日后安装的柴油机在指定的硫排放控制区时，其 NO_x 排放需满足Tier III，相比Tier I降低80%。

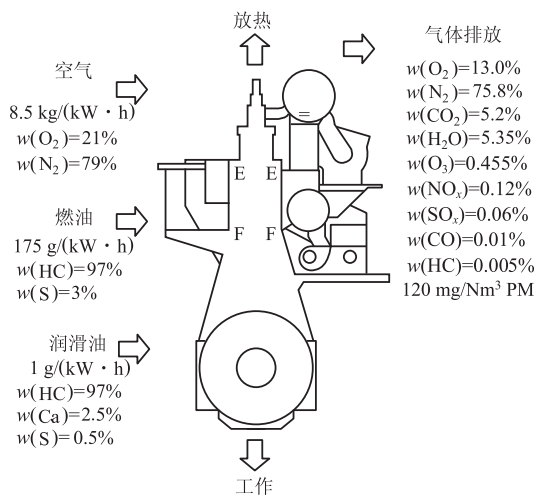


图 1.2 船用柴油机排放的主要污染物

另一方面，柴油机的运转离不开石油资源，而石油资源却是不可再生资源，两者之间相互影响，密不可分。自1973年第一次大规模的石油危机爆发以来，人们就认识到了石油资源的有限性。据现有条件