

Marine

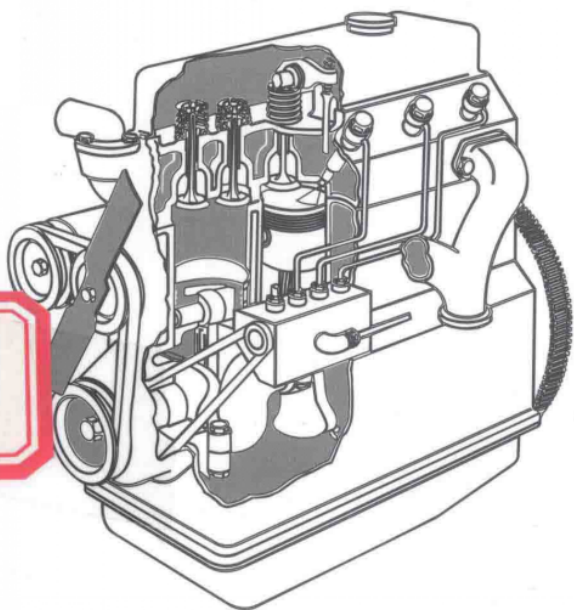
Diesel

Engine

船用柴油机

结构与燃烧性能研究

张 建 唐文献 编著

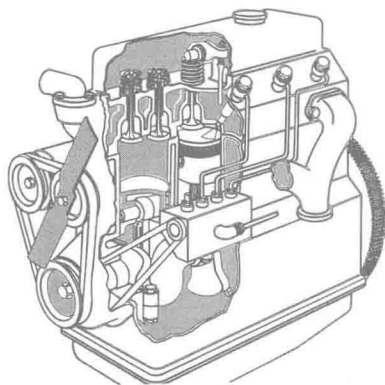


上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

船用柴油机

结构与燃烧性能研究

张 建 唐文献 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书以船用柴油机为对象,系统地阐述了其运动部件动力学分析特性、典型结构强度特性和疲劳特性、活塞温度场特性、燃烧特性以及关键零部件典型加工工艺的研究分析方法和过程。

本书既可供从事船用柴油机设计的工程技术人员参考,也可供相关专业的研究人员及在校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

船用柴油机结构与燃烧性能研究 / 张建,唐文献编
著. —上海:上海交通大学出版社,2016
ISBN 978-7-313-15384-5

I. ①船… II. ①张… ②唐… III. ①船用柴油机—
结构—研究②船用柴油机—燃烧性能—研究 IV.
①U664.121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 160581 号

船用柴油机结构与燃烧性能研究

编 著:张 建 唐文献

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海宝山译文印刷厂

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:266 千字

版 次:2016 年 7 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-15384-5/U

定 价:49.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:17

印 次:2016 年 7 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-64366274

前 言

船用柴油机因其热效率高、经济性好、容易启动、适应性强而广泛的运用于各种船舶、舰艇中,其已发展为民用船舶、中小舰艇和常规潜艇的主要动力装置。由于起步较晚,国内船用柴油机技术发展相对比较落后,虽然近年来国内加大柴油机技术的研究力度并引进国外先进技术,但总的来说国内柴油机技术与国外还有较大的差距。船用柴油机的结构和燃烧特性是柴油机技术里的关键部分,因此对船用柴油机的结构特性和燃烧特性进行研究具有很重要的意义。

本书是作者多年从事船用柴油机研究的成果总结,既可供从事船用柴油机设计的工程技术人员参考,也可供相关专业的研究人员及在校师生参考。全书共分为7章,第一章首先阐述了船用柴油机的结构组成和原理,然后详细地介绍了当前船用柴油机关键部件的研究现状;第二章阐述了船用柴油机动力学特性和分析方法;第三章阐述了船用柴油机的几种典型结构及其强度分析方法和分析过程;第四章着重阐述了船用柴油机典型结构的疲劳分析方法和分析过程;第五章阐述了船用柴油机活塞流固耦合分析方法和分析过程;第六章阐述了船用柴油机的燃烧性能分析方法和分析过程;第七章阐述了船用柴油机关键部件典型加工工艺的研究。

由于时间仓促,且作者水平有限,书中难免有遗漏之处,敬请各位同行和广大读者批评指正。

作 者

2015年7月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 船用柴油机结构组成与工作原理	3
1.2.1 船用二行程柴油机结构与工作工程	4
1.2.2 船用四行程柴油机结构与工作过程	5
1.3 船用柴油机关键部件性能研究进展	6
1.3.1 柴油机机体研究现状	6
1.3.2 柴油机曲轴研究现状	7
1.3.3 柴油机连杆研究现状	9
1.3.4 柴油机活塞研究现状	10
1.3.5 柴油机燃烧特性研究现状	12
第二章 船用柴油机运动部件的动力学特性	15
2.1 动力学特性分析方法	15
2.2 柴油机运动件动力学理论计算	15
2.2.1 曲柄-连杆机构运动学	15
2.2.2 曲柄-连杆机构动力学	17
2.3 柴油机运动件多体动力学计算	20
2.3.1 建立曲轴系统刚体模型	20
2.3.2 建立曲轴系统柔性体模型	22
2.3.3 仿真结果及分析	29
2.4 本章小结	37

第三章 船用柴油机典型结构的强度分析	39
3.1 船用柴油机典型结构的强度分析方法	39
3.1.1 船用柴油机机体结构强度分析方法	39
3.1.2 船用柴油机曲轴结构强度分析方法	49
3.1.3 船用柴油机连杆结构强度分析方法	50
3.1.4 船用柴油机活塞结构强度分析方法	56
3.2 船用柴油机机体结构强度	58
3.2.1 机体结构与工作过程	58
3.2.2 机体有限元建模	64
3.2.3 机架、机座装配强度	68
3.2.4 机架、机座热膨胀特性	70
3.2.5 极限侧向力下的机架结构强度	72
3.2.6 基于轴承力下的机座结构强度	73
3.2.7 加工工艺对主轴承变形的影响	76
3.2.8 接触特性评估	77
3.2.9 贯穿螺栓结构强度	79
3.3 船用柴油机曲轴结构强度	84
3.3.1 曲轴结构与工作过程	84
3.3.2 基于解析法强度校核	86
3.3.3 基于有限元法强度校核	102
3.4 船用柴油机连杆结构强度	112
3.4.1 连杆结构与工作过程	112
3.4.2 连杆组受力分析	113
3.4.3 连杆组材料属性	114
3.4.4 连杆有限元模型简化	115
3.4.5 边界条件定义	116
3.4.6 载荷步定义	118
3.4.7 连杆的应力评价	119
3.4.8 连杆接触面的评估	122
3.5 活塞热机耦合特性	124
3.5.1 活塞结构与工作过程	124

3.5.2	活塞热机耦合建模	128
3.5.3	活塞热机耦合分析结果	133
3.6	船用柴油机典型结构的屈曲稳定性分析	145
3.6.1	连杆屈曲稳定性	146
3.6.2	活塞杆屈曲稳定性	149
3.7	本章小结	152
第四章	船用柴油机典型结构的疲劳特性	154
4.1	船用柴油机典型结构的疲劳特性分析方法	154
4.2	船用柴油机机体的疲劳特性	155
4.2.1	疲劳破坏与材料的疲劳特性	155
4.2.2	机架、机座疲劳分析建模	156
4.2.3	疲劳分析结果评价	160
4.2.4	贯穿螺栓疲劳分析	161
4.2.5	疲劳因素对机体疲劳强度的影响	162
4.3	船用柴油机曲轴的疲劳特性	165
4.3.1	载荷计算	165
4.3.2	有限元模型建立	167
4.3.3	曲轴材料	167
4.3.4	疲劳模型创建	168
4.3.5	简化载荷法曲拐强度及疲劳计算	169
4.3.6	协同法曲拐强度及疲劳计算	171
4.3.7	结果分析与讨论	175
4.4	船用柴油机连杆的疲劳特性	175
4.4.1	连杆疲劳破坏与疲劳特性	176
4.4.2	连杆应力状态及计算方法	176
4.4.3	连杆疲劳分析	178
4.4.4	螺栓疲劳分析	181
4.5	船用柴油机活塞的疲劳特性	184
4.5.1	工作应力特性	184
4.5.2	活塞材料属性	185

4.5.3	载荷输入	186
4.5.4	疲劳分析影响因素	187
4.5.5	活塞疲劳分析结果	188
4.5.6	活塞螺栓动态疲劳强度	190
4.6	本章小结	194
第五章	船用柴油机活塞流固耦合特性	195
5.1	活塞流固耦合特性分析方法	195
5.2	活塞流固耦合特性	197
5.2.1	活塞流固耦合模型	197
5.2.2	活塞流体域建模	198
5.2.3	活塞固体域建模	200
5.2.4	活塞流固耦合分析结果	204
5.3	本章小结	207
第六章	船用柴油机燃烧性能	208
6.1	船用柴油机燃烧性能分析方法	208
6.1.1	性能分析技术路线	208
6.1.2	扫排气、燃烧特性分析方法	210
6.1.3	喷雾特性分析方法	211
6.2	船用柴油机工作过程	211
6.2.1	扫排气过程	211
6.2.2	喷雾过程	212
6.2.3	燃烧过程	213
6.3	扫排气、燃烧特性	215
6.3.1	计算模型	215
6.3.2	网格划分	216
6.3.3	初始条件及边界条件	218
6.3.4	船用柴油机扫排气特性	218
6.3.5	船用柴油机燃烧特性	225
6.4	喷雾特性	231

6.4.1	计算模型	231
6.4.2	网格划分	232
6.4.3	初始条件及边界条件	232
6.4.4	船用柴油机喷雾特性	233
6.5	本章小结	234
第七章	船用柴油机关键部件典型工艺研究	235
7.1	曲轴红套工艺分析方法	235
7.1.1	曲臂感应加热中耦合场实现方法	235
7.1.2	ANSYS 磁-热耦合仿真实例	238
7.2	曲轴红套工艺分析	242
7.3	红套工艺的制定	251
7.4	本章小结	252
参考文献		254

第一章 绪 论

1.1 背景与意义

柴油发动机是一种把内能转化为机械能并输出的动力机械,柴油发动机是一种热机,也是一种内燃机。柴油发动机与其他类型的内燃机相比最大的优点是扭矩更大、功率更高、热效率好,同时还具备良好的经济性能。因此大功率的二行程低速柴油机在大型货运船舶中发挥着中流砥柱的作用。

船用的大功率柴油发动机主要包括低速柴油发动机、中速柴油发动机和高速柴油机,其中低速柴油机指的是转速小于 300 r/min 的柴油机。由于其具备转速低、油耗小、功率大、经济实惠等优点被广泛地应用于大型的船舶主机中,低速柴油机另一个较为突出的地方在于其结构相对简单、工作寿命长、工作过程可靠而且还具备能使用劣质燃油的显著特点。在转速方面,由于船舶动力装置的螺旋桨工作效率与自身的转动速度成反比,所以当螺旋桨的转速变低,其工作效率则会反而越高。因此低速柴油机的低转速这一特点可以使得其输出的螺旋桨推进效率得到提高,从而使得在相同转速情况下时,船舶的航行速度也会得到提高。在燃油消耗率方面,低速柴油机的油耗较其他类型的柴油机更低,目前,低速机的最低油耗已经接近达到 123 克每马力小时,这也让船舶的运行成本相对较低;在结构设计方面,由于低速柴油发动机的结构设计较其他机型更为简洁,因此具有较高的可靠性和更长的工作使用寿命的优势。据资料显示,当前世界上建造的 2 000 吨级的船舶中有 70% 是使用低速柴油机作为船舶主机的,而在远洋货轮、油轮以及 LNG 船等大型船舶中低速柴油机占据绝对的优势。

目前,国内制造的船用大功率柴油机几乎都是购买国外设计产品的专利进行加工建造,在关键技术上严重缺乏自主知识产权,在技术层面上也缺少应有的创新性,无法跟上先进国外先进技术的更新换代。长此以往只会增加对

国外技术的依赖性,使得国内技术无法实现实质意义上的进步,从长远发展目标来看,关键装备应该更快地由中国制造变成中国设计。

随着船用柴油机设计和制造技术的发展,船用柴油机将在性能参数上、产业规模角度和国际格局方面不断发展前进。首先是低速柴油机的性能参数上,为了实现功率的提升,柴油机的结构性能参数在不断变大,例如最大爆发压力、活塞的平均位移速度、气缸缸径等重要参数。性能的提升也会伴随着对机体材料与强度要求的提高,因此机体组的结构强度与刚度也会更好,且整体亦能满足轻量化的要求。从国内的产业规模上来看,伴随着国内大型船舶工业的发展,对低速柴油机的市场需求也在不断扩大。资料显示 2011 年国内船舶建造完成约 6 770 万吨,对应如此大的市场完成量所需要的船用低速柴油机的马力逼近 1 600 万,近两年低速柴油机的市场需求也在不断增大。从国际格局上来看,近年来亚洲逐渐成为国际船舶工业的中心区域,相应的船用低速柴油机制造加工业也相对集中在中、日、韩这三个国家。因此船用低速柴油机的设计与制造会在东亚地区达到进一步的发展与繁荣局面。

目前,国内自主研发的低速船用柴油机仍然在起步阶段,很多设计过程都需要不断地去摸索与探讨,并在这过程中不断地积累设计与仿真经验。本书选择船用低速柴油机零部件疲劳特性仿真分析作为研究内容,对现阶段低速柴油机的自主研发具有一定参考价值,也有助于 CAE 仿真技术在机械设计领域的经验积累与应用推广。

随着 CAE 技术的不断成熟与革新,有限元分析与仿真技术在产品的设计过程中逐渐扮演着重要作用。特别是在大型结构件的研制过程中,由于产品体积重量过大、制造成本高等特殊性,设计阶段不断的修改完善模型无法进行不断的实时的试制更新,此时有限元仿真技术的优势就得到了很好的发挥。在低速柴油机机体的研制阶段,有限元技术便得到高效的应用:概念设计阶段,应用有限元法建立机体组的不同模型来对比分析各种机体组方案优缺点,从而确定柴油机机体组总体的结构方案;在机体组的详细设计阶段应用有限元技术建立机体的局部零件模型,对设计的零件进行建模分析,校核零件的静强度、疲劳寿命等;在柴油机的样机试制阶段,针对加工制造以及装配阶段出现的问题进行预仿真分析可以高效地解决机体组装配加工等实际工艺问题。因此在像船用低速柴油机机体组这类大型产品的研制过程中,有限元技术可以极大地缩短研发周期,降低研发成本同时提高研发的效率。

现阶段国内的发动机行业的发展仍然远远落后于西方发达国家,发动机作为机器与设备的核心有着不可或缺的作用。在船用低速柴油机方面国内制造的船用低速机也几乎是购买国外设计产品的专利进行加工建造,严重缺乏自主知识产权,在技术层面上也缺少创新性,无法跟上国外先进产品的更新步伐。长此以往只会增加对国外技术的依赖性使得国内技术无法实现实质意义上的进步。因此在不断引进国外技术的同时,还要积极为走出去的战略做好准备。低速柴油机的自主研发与制造可以使得民族工业实现长足地发展,并在研发过程中不断积累实践经验,从而真正实现船用柴油机技术的自主性和创新性。

作为船舶的零部件之一,柴油机仍是目前船舶设备不可或缺的心脏模块,船舶的性能水平往往和其配备的柴油机性能息息相关,例如柴油机的功率、油耗等参数都关系到船舶整体性能。柴油机制造技术的提高也不断带动船舶配套工业的均衡发展,船用柴油机设计与制造技术的进一步的提高,将会有利于配套船舶制造业实现实质性的飞跃。

1.2 船用柴油机结构组成与工作原理

就整体构造而言,船用柴油机在结构组成上均包括两大机构与五大系统:曲柄连杆机构、配气机构、燃油供给系统、润滑系统、冷却系统、启动系统和增压系统。曲柄连杆机构包括活塞连杆组、曲柄飞轮组等主要运动部件;配气机构由气门组、气门传动组等零部件组成。燃油供给系统的功用是按照一定的需求向柴油机缸内提供适量的燃油,以便燃烧做功;润滑系统主要由机电泵、机油散热器、机油滤清器等组成,为柴油机内部各摩擦副提供润滑保证运动件的可靠性与耐久性;冷却系统的功用是对柴油机的高温零件进行冷却,保证零部件的正常工作;启动系统则主要包括启动机、传递机构和相应的启动装置,以提供外力使柴油机由静止状态转入工作状态。

柴油发动机的工作原理与汽油发动机相比有许多类似的过程,例如在它们的每一个工作循环内都会包含:进气、压缩、做功、排气四个过程。然而它们也具有很多的不同点,例如由于柴油机所使用的燃料为黏度较大的柴油,因此较汽油更加不容易蒸发,再者柴油机的自燃温度要比汽油稍低,因此柴油机

的发火方式与汽油机相比就显得不同。当然,它们最大的不同之处在于:柴油发动机气缸内的燃气是压燃的方式,而并非由火花塞点燃;另一方面,柴油机作业时,吸入气缸内的气体即是空气而非汽油机中吸入的燃油混合气。以上特点可以使得二行程低速柴油机具备大功率、大扭矩和较高的经济性等显著的特点与优势。

1.2.1 船用二行程柴油机结构与工作工程

在结构组成上,二行程柴油机也具有自身的特殊性,例如活塞连杆部的十字头组和活塞杆都是四行程柴油机所不具备的结构,因此其在工作工程上也具有一定的特殊性。

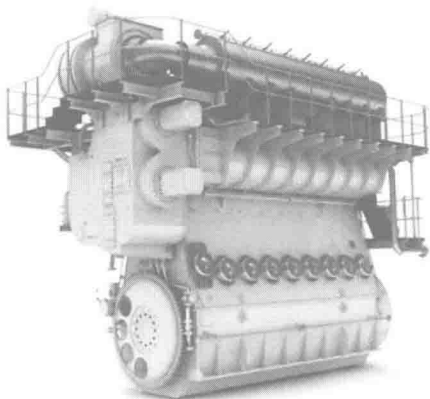


图 1.1 船用二行程柴油机

船用二行程低速柴油机(见图 1.1),它的工作行程主要包括两个,第一行程是进气及压缩行程,第二行程是做功和排气行程。在进气压缩行程中,活塞沿竖直方向往复向下运动至下死点前约 39.5° (曲柄转角)位置时,气缸体中的扫气口开始张开,新鲜的压缩空气气流便开始进入气缸内,由于扫气口设计成一定的特殊形状,新鲜空气的气流进入气缸的过程中可以形成旋转的气流,从而实现清扫气缸内的废气的特殊作用,进

气过程会一直持续到下死点后约 39.5° (曲柄转角)的位置时停止,在这段时间内活塞组件会沿竖直方向由下死点向上止点处运动,与此同时扫气口也逐渐达到关闭状态。随着活塞组件的运动,缸内的新鲜空气不断地被压缩直至上止点的状态,此时压缩空气的温度将趋于 600°C 左右。当活塞组件完全位于上止点状态时,燃油此时便经高压喷油泵喷出并被均匀雾化进入气缸的燃烧室中,由于上止点状态时空气已经被高度压缩,它的温度已经超过燃油的自然温度,燃油会立即发生爆燃,燃油爆燃时燃烧室中的最大爆发压力降可接近 20 MPa ,紧接着做功行程随即启动。气缸内燃烧的气体不断膨胀使得活塞组件沿竖直方向向下死点位置运动,当活塞组件运动到下死点位置的前 39.5° 时气缸体的扫气口开始随着曲轴的转动而打开,在扫气口打开前夕排气过程开始,

随着排气阀门的打开燃烧的废气由排气阀门排出气缸体,废气随后会再经过柴油机的排气歧管进入缸体一侧的涡轮增压器组件。随着活塞组继续向下止点的运动,气缸体缸内的压力随之不断减小直至趋向小于增压压力时,增压器将新鲜空气开始进入缸内达到将废气彻底扫出的效果。最后排气阀门被关闭,排气过程也随之结束进而完成一整个工作循环。

1.2.2 船用四行程柴油机结构与工作过程

四行程柴油机(见图 1.2)的工作是由吸气、压缩、做功和排气这四个行程来完成的,这四个过程构成了一个工作循环,活塞连杆组完成四个行程才能完成一个工作循环。第一行程为吸气行程。它的任务是使气缸内充满新鲜空气。当吸气行程开始时,活塞位于上止点,气缸内的燃烧室中还留有一些废气。当曲轴旋转时,连杆使活塞由上止点向下止点移动,同时,利用与曲轴相联的传动机构使进气阀打开。随着活塞的向下运动,气缸内活塞上面的容积逐渐增大,气缸内的空气压力低于进气管内的压力,因此外面气体就不断地充入气缸。当活塞向下运动接近下止点时,冲进气缸的气流

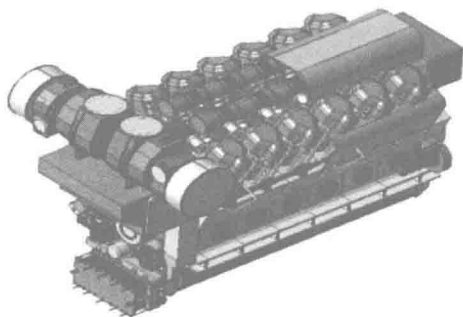


图 1.2 船用四行程柴油机

仍具有很高的速度,惯性很大,为了利用气流的惯性来提高充气量,进气阀在活塞过了下止点以后才关闭。随即开始第二行程,压缩行程。压缩时活塞从下止点向上止点运动,这个行程的作用是提高空气的温度,为燃料发火做准备,并为气体膨胀做功创造条件。当活塞上行,进气阀关闭以后,气缸内的空气受到压缩,随着容积的不断变小,空气的压力和温度也就不断升高,压缩终点的压力和湿度与空气的压缩程度有关,即与压缩比有关。压缩行程结束后做功行程开始。在这个行程开始时,大部分喷入燃烧室内的燃料都燃烧了。燃烧时放出大量的热量,因此气体的压力和温度便急剧升高,活塞在高温高压气体作用下向下运动,并通过连杆使曲轴转动对外做功。随着活塞的下行,气缸的容积增大,气体的压力下降,工作行程在活塞行至下止点,排气阀打开时结束。第四行程是排气行程。排气行程的功用是把膨胀后的废气排出去,以

便充填新鲜空气,为下一个循环的进气做准备。当工作行程活塞运动到下止点附近时,排气阀开起,活塞在曲轴和连杆的带动下,由下止点向上止点运动,并把废气排出气缸外。在四行程柴油机的四个行程中,只有第三行程才产生动力对外做功,而其余三个行程都是消耗功的准备过程。为此在单缸柴油机上必须安装飞轮,利用飞轮的转动惯性,使曲轴在四个行程中连续而均匀地运转。

1.3 船用柴油机关键部件性能研究进展

1.3.1 柴油机机体研究现状

船用柴油机机体在结构上偏大,工作状态时所受载荷也较为复杂,仿真模拟时工作量巨大,因此对船用柴油机机体的进行准确的仿真分析难度大。目前,在国内外广大学者也已经对柴油机机体开展了大量相关的研究和试验探索。

昆明理工大学邢正双等对新型卧式双缸柴油机进行了多体动力学及机体结构强度研究,对机体的刚、柔性体模型进行了仿真与对比分析,同时对机体进行了强度分析,最后对机体进行了动态特性试验研究,为机体的结构改进提供一定的修改依据。大连海事大学的张博雄等以 6S50MC 型船用柴油机为仿真模型,综合考虑了主轴承力、十字头组件的横向力以及缸内爆发压力等因素,对柴油机机体进行了模态仿真以及动态响应仿真,算出了柴油机机体的固有频率与振型,并进一步对柴油机的关键振动模块的速度与位移进行了仿真,得到了该型柴油机的振动规律,为柴油机的结构性能优化设计提供了一定分析依据。李欣等对某高强度 V 型柴油机进行了系统动力学分析,并将获取的动态载荷应用于机体的有限元分析,计算了机体在外力下的动态响应,得出了 V 型柴油机机体隔板处应力历程与由不同侧缸的最大爆压所引起隔板对称位置应力分布趋势大致相反的结论。Nenad Vulić 等以船用四行程柴油机为仿真模型,根据克罗地亚船级社规范具体分析了柴油机曲轴的结构强度,提出了适用于船级检验的通用有限元方法。A. V. Hansen 等应用线弹性力学和三维有限元法对二行程柴油机的焊接结构强度进行了研究,探讨了残余应力对焊接强度的影响。N. Lalor 等对柴油机机体组件进行了模态仿真分析,总结

出了机体模态振动的三个类型,探讨了整体运动模态、机体油底壳模态和其他局部区域的模态。

在柴油机疲劳特性方面,中北大学的张连铎等对某柴油机机体的疲劳寿命预测方法进行了研究,分别开展了机体在机械载荷作用下的动态应力应变数据获取方法的研究、机体的疲劳寿命预测分析方法研究以及疲劳危险部位影响因素敏感度研究。并最终得出了一种比较可行的柴油机机体疲劳预测方法,以及机体易发生疲劳的薄弱位置,校核了机体的疲劳强度满足设计要求,为柴油机机体的结构设计提供了参考。大连交通大学的张晓艳等以某型机车柴油机为仿真模型,对其机体进行了相关的疲劳仿真分析,在对结构主应力和等效应力进行相关的应力幅值计算后提出了较为合理的应力幅值的计算方法,为机车柴油机的设计制造提供了参考依据。孙耀国、杜海明等基于材料的S/N曲线,根据四缸柴油机的工作特性对某型柴油机机体的疲劳特性进行了分析,仿真得出了该型机体的疲劳薄弱区域,并从应力场的角度对比讨论了疲劳安全系数与静强度的相同点与不同点。M. M. Rahman等应用随机载荷法研究了表面处理方式对二行程柴油机活塞和缸套疲劳寿命的影响,探讨了微观结构对机体结构强度与疲劳特性的影响,并针对机体的微观结构提出了增强疲劳寿命的可行性措施,为缸套的设计提供了参考依据。M. Shariyat等针对CNG内燃机为研究对象,对其进行了燃烧、传热以及动力学仿真分析,研究了热机耦合条件下的疲劳寿命,并与实验测量数据进行了对比讨论,实验结果和分析结果达到了很好的一致性,最后以此提出了针对内燃机的疲劳分析规范与准则。

1.3.2 柴油机曲轴研究现状

自80年代末以来,多体动力学技术发展迅速,出现了很多应用方法,且应用到了多体系统的分析中。首先出现的多刚体动力学是将运动机构中的各个运动构件视为刚体进行计算分析,随后产生的刚柔耦合多体动力学以及多柔体动力学是多体动力学与有限元等技术的结果。随着技术的发展,柴油机动力学的分析变得越来越方便和精确。对于曲轴的强度计算基本上都是针对其疲劳强度进行的计算,首先求出在曲轴危险区域(如曲柄销与曲臂的倒角处,主轴颈与曲柄的过渡圆角处和曲柄销油孔附近)的最大等效应力,然后将该曲轴所允许的疲劳强度值与危险点处的最大等效应力值进行比较得到安全系

数,从而评价曲轴强度。曲轴的可靠性和寿命影响着柴油机的整个工作状态,柴油机疲劳寿命研究,也成为研究的热点技术。同时曲轴红套工艺所涉及的感应加热技术也是研究的难点和重点。

在曲轴动力学方面:国外 Yasin Yilmaz 利用多体多力学理论对平衡块配置对主轴承载荷及曲轴弯曲应力的影响进行了详细的研究;国内郝志勇利用多体动力学软件 Adams 建立六缸柴油机刚体与柔体的模型,对比分析了不同柴油机模型的各部件之间的主要作用力,分析了曲轴系统柔体动力学模型和刚体动力学模型的各自的特点及优缺点,最后用实测结果证实,柔体模型能更好的反映出柴油机曲轴系统实际的动力学特性。

在曲轴强度方面:国外 Gul Cevik 针对曲轴破坏一般发生在倒角处,利用有限元软件建立单拐模型,对曲轴倒角处进行应力计算及疲劳分析,对比分析了倒角处滚压前后的疲劳强度,并用实验证明了滚压能提高疲劳极限;国内王良国建立曲轴的单拐有限元模型,对曲轴在交变载荷下的疲劳强度进行了详细的校核,最后针对该曲轴进行疲劳试验,并充分验证了曲轴有限元分析和计算结果的正确性。

在曲轴疲劳方面:国外 Do-Hyun Jung, Hong-Jin Kim, Young-Shik Pyoun 等通过获取曲轴弯曲疲劳极限的 $S-N$ 曲线,对曲轴进行可靠性评价。为了进一步评价,进行了原始曲轴的弯曲测试和失效模式分析,经过计算得出试样的数目、加载力和测试时间。基于试验结果,采用 Weibull 分析对曲轴的形状和比例系数进行了评估。同样的,计算出在 50% 置信水平下的 B_{10} 寿命和平均无故障时间,为提高曲轴的可靠性建立了基础。国内张国庆等利用 $S-N$ 和局部应变法计算了曲轴的疲劳寿命;武秀根基于疲劳累积损伤法则,建立曲轴整体有限元模型,对其疲劳寿命进行了数值研究。

在曲轴红套工艺方面:国外 Y. Favennec、S. C. Chen、C. A. Santos 和 Eduardo N. Dvorkin 等人研究了加热参数对工件温度的影响,他们研究的共同点是建立的电磁场、温度场模型比较符合实际情况,对材料物理参数的变化进行了恰当的处理,通过有限元方法对模型进行了离散,得到的理论值与实验结果较为相近;国内杨晶等人仿真分析了连铸方坯的感应补热过程中温度场分布情况,建立了二维耦合场模型,对连铸方坯温度演变的规律做出了较为详细的定性分析;王玉会等人利用 ANSYS 软件对连铸坯热送直轧整个过程进行了模拟,对连铸直轧感应补偿加热过程的仿真计算具有一定的借鉴意义。