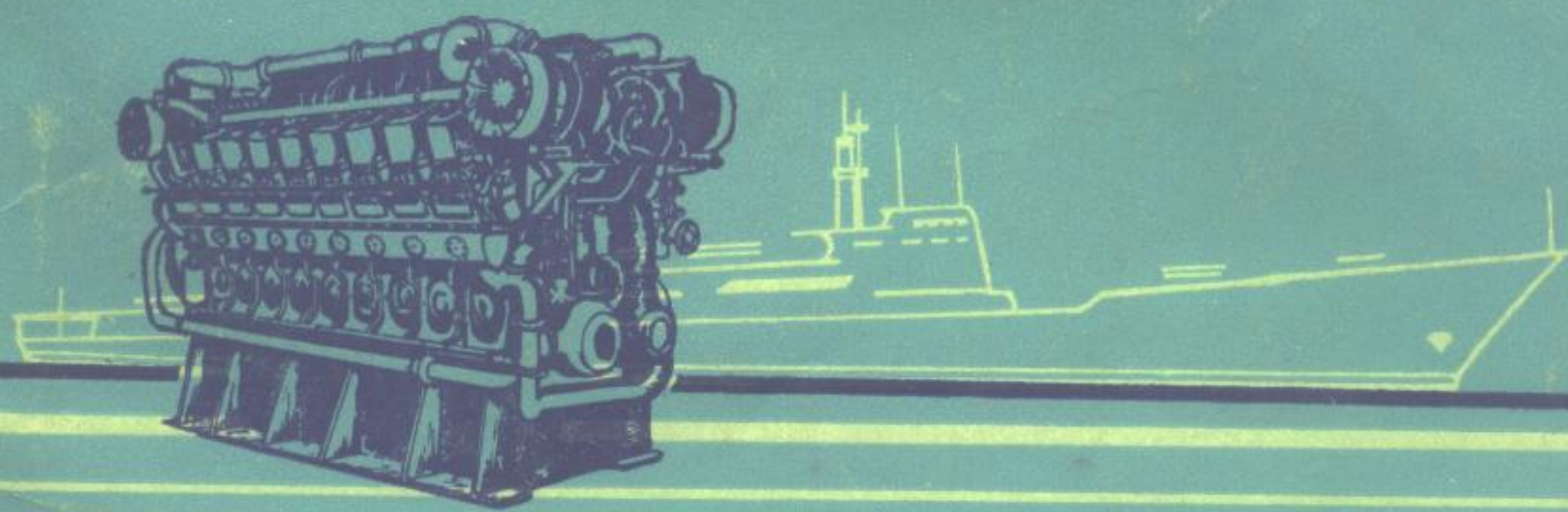


船用柴油机设计手册
(七)
试验与测量

船用柴油机设计手册

(七)

试验与测量



国防工业出版社

U664.121-62

船用柴油机设计手册

(七)

试验与测量

《船用柴油机设计手册》编辑委员会 编

本篇主编：鲁景正、邱耀先、徐景福

执笔人员：第一章：贺继增、张 熹、李法琳、何德平、梅家福、赵晔英

第二章：卫永茂、周康成、李景培、韩宝荣

第三章：孟庆铎

第四章：田栋茂

第五章：徐景福、蒋浩明

第六章：邱耀先、金福民、庞珊庆、房自发、任延庆

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是《船用柴油机设计手册》的第七篇，本篇主要介绍柴油机设计、研制过程中的试验与测量技术。

本篇共分六章，从柴油机设计、研制工作的实际需要出发，介绍了柴油机零部件的各种强度试验、换气流道试验以及单缸、多缸和首制样机的试验方法。对整机试验台的建造原则，试验中各种数据的测量技术以及所需的仪器、设备和装置等也都作了扼要的说明。为便于应用，在介绍试验与测量技术的同时还列出部分实例，以供参考。

《船用柴油机设计手册》共有八篇及附录一章，现按篇分册出版，共九个分册。第一篇设计总论，第二篇总体设计，第三篇船用柴油机工作过程计算，第四篇动力计算，第五篇船用柴油机主要零部件，第六篇系统和附件，第七篇试验与测量，第八篇材料，最后一册为“附录”。

本书主要供船用柴油机设计研究人员使用，也可供柴油机制造和使用部门工程技术人员及高等院校有关专业的师生参考。

2R 10/37

船用柴油机设计手册

(七)

试验与测量

《船用柴油机设计手册》编辑委员会 编

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

*

787×1092¹/₁₆ 印张 19⁷/₈ 450 千字

1982年7月第一版 1982年7月第一次印刷 印数：0,001—2,200册

统一书号：15034·2318 定价：2.05元

《船用柴油机设计手册》编辑委员会

领 导 成 员

张有萱	夏 桐	沈岳瑞	李渤仲
陈时雄	余运生	孙全柱	李忠仁
刘 仁	熊 琳	刘 颖	胡国栋
于康庄	赖灵淮	谭汉雄	朱国信

《船用柴油机设计手册》编辑工作组

刘 锦	张连方	方 商	商云祥
邱耀先	华裕达	潘荫琪	殷志成
程华峰	徐景福	茅建国	

前 言

柴油机已经有将近一个世纪的发展历史，但迄今技术上仍处于不断改进和发展阶段。柴油机在各种类型军民船舶中应用极为广泛。根据国外不完整的统计资料，1976年新建的2000吨以上民用船舶中，柴油机动力已超过一千万马力，占船舶主机总马力的72%，并且有继续上升的趋势。中小型运输船，工程船及渔轮中柴油机的应用更为普遍。在舰艇中，虽然近年来燃气轮机的发展在一定范围内取代了柴油机，但在中、小型战斗舰艇中，柴油机因其经济性较好以及其它原因，仍被广泛采用。大量军用辅助舰船中，柴油机更是主要动力。因此，大力发展柴油机制造工业和不断提高船用柴油机性能和技术水平是发展我国内河和海洋运输事业，建设强大海军和开发海洋资源的一项重要措施。

我国在解放前几乎没有船用柴油机制造工业。解放后随着国民经济和国防建设的发展，船用柴油机工业也获得迅速的发展。在“独立自主、自力更生”社会主义建设方针的指引下，1958年我国年青的船机科研设计队伍开始自行研制了多种型号舰船用柴油机，其中包括远洋运输船舶所用的低速重型柴油机，以及大功率中、高速柴油机，有多种型号通过了国家鉴定，已进行正式生产，装备了许多舰船，累积了一定的研究、设计新型船用柴油机的经验。

现在我国社会主义革命和社会主义建设进入了一个新的时期，党中央领导全国各族人民开始了新的长征。为了实现新时期的总任务，全国科学大会制定了科学技术发展的近期和远景规划，号召科学技术要走在国民经济和国防建设的前面。船用柴油机工业及其科学技术也进入了以高速度向现代化进军的阶段。

在这一新的阶段中，船用柴油机科研和设计工作应认真总结建国以来正、反两方面的经验，并在“独立自主、自力更生”的基础上，有分析、有批判地学习国外的先进技术。在统一领导、全面规划的前提下，研究发展更多的、符合我国国情的各种类型舰船用柴油机及其附属设备，尽快地把我国舰船用柴油机的技术提高到世界先进水平，为实现国民经济和国防建设现代化作出应有的贡献。《船用柴油机设计手册》就是为了适应这一新形势的要求，总结我国多年来的研究设计经验，及本着“洋为中用”的原则适当地选用了一些国外可靠的设计方法和资料编写的，为我国从事船用柴油机的广大科研、设计、教学、生产和使用人员提供必要的船用柴油机研究、设计的技术知识和资料。

本手册的读者对象是具备一定基础理论知识和实际经验的本专业从业人员，其中有些篇章也可供与船用柴油机有关的其它专业人员参考，以及作为大专院校有关专业学生的辅助学习资料。

本书共分八篇。第一篇是设计总论，其内容是介绍船用柴油机发展简史和当前发展趋势，阐明设计指导思想 and 设计程序中的有关问题，其中特别强调船用柴油机的三化问题；介绍各种类型舰船对柴油机设计的技术要求。第二篇是总体设计，介绍船用柴油机在总体设计阶段所要考虑的各种技术问题，提供各种设计方案比较用的资料和计算方法。第三、

四两篇是有关工作过程和动力学方面的计算方法。第五篇是船用柴油机主要零部件设计、计算和专用试验方法的介绍。第六篇是船用柴油机各种系统及其有关附件的设计。第七篇是船用柴油机在研制过程中各种试验研究方法的详细介绍。第八篇是有关船用柴油机使用材料和油料的介绍。最后附录一章是国内外有代表性的各种类型船用柴油机参数总表、剖面图、有关标准资料、国际单位与公制单位的换算以及电算程序。每篇暂以分册形式出版，以便读者选用。全手册出齐后，再发行一部分合订本。

我们准备在第一版出版以后，通过科学研究和广泛的学术交流，逐步形成我国自己的、比较完善的船用柴油机研究设计方法，积累丰富的设计资料和数据，在以后的版本中修订和补充，使有助于尽快的提高我国船用柴油机技术，赶超国外先进水平。

由于本手册系第一次编写，内容不完善的地方一定很多，希望读者在使用中发现需要补充和修订的地方随时取得联系，以便在今后再版时加以修订和充实。

本手册的编写是在国内有关船用柴油机科研、设计的领导机关、院校、科研设计单位和生产单位的大力协同下进行的，共有 100 余人参加了各篇、章、节的编写，为了对编写的内容负责，篇、章的主要编写人员都有署名。编辑委员会借此出版机会，特向各有关单位领导的大力支持和有关同志的热情帮助表示深切的感谢。

《船用柴油机设计手册》编辑委员会

目 录

第七篇 试验与测量

第一章 柴油机零件强度试验	1
第一节 概述	1
第二节 光弹性试验	4
(一) 光弹性试验在柴油机设计中的作用	4
(二) 平面光弹性的基本原理和光弹性条纹图的识别	5
(三) 光弹性材料和模型的制作	10
(四) 各种光弹性试验方法	15
第三节 电阻应变试验	34
(一) 概述	34
(二) 电阻应变测量技术	37
(三) 柴油机主要零部件的应力测量示例	40
第四节 脆漆涂层试验	50
(一) 脆漆涂层法的特点及适用范围	50
(二) 脆漆涂料的配制	50
(三) 涂漆工艺	51
(四) 加载试验	51
(五) 定标	52
(六) 致冷法的应用	52
(七) 陶瓷脆性涂层	52
第五节 模型的电阻应变试验	53
(一) 概述	53
(二) 模型材料及模型制作	54
(三) 模型试验技术	58
(四) 塑料模型在研究其它结构性能方面的应用	64
第六节 受热零件温度场热电比拟试验	64
(一) 概述	64
(二) 热电比拟的基本原理	64
(三) 边界条件的计算及确定	66
(四) 热电比拟试验技术	68
(五) 热电比拟试验示例	70
第七节 柴油机零件的疲劳试验	74
(一) 概述	74
(二) 疲劳试验的方法	75
(三) 疲劳试验机	77
(四) 零件疲劳试验技术	82
(五) 试验结果的整理	85
第八节 激光全息干涉法	85
(一) 概述	85
(二) 全息干涉计量	86
(三) 激光全息光弹性技术	88
(四) 全息干涉法测量表面位移	94
(五) 全息振动分析法	98

第二章 柴油机换气与气道试验	106
第一节 二冲程换气过程的模型试验	106
(一) 观察气流的试验	106
(二) 测取扫气效率的试验	109
第二节 换气过程实机试验	117
(一) 示踪气体法	117
(二) 单样取气法	118
(三) 双样取气法	122
第三节 气口流量系数的测量	124
(一) 静态流量系数的测取	124
(二) 动态流量系数的测取	126
第四节 气道试验	126
(一) 概述	126
(二) 稳定流动模型试验	126
(三) 拖动和发火运转试验	132
第三章 柴油机试验台	135
第一节 试验台及其厂房设计概述	135
(一) 一般原则	135
(二) 设计前应具备的技术资料和对设计的要求	136
(三) 试验台基础的估算	137
(四) 隔室控制	138
(五) 试验台与厂房的通风	139
第二节 试验台各系统	141
(一) 试验台各系统布置的基本要求	141
(二) 滑油系统	141
(三) 燃油系统	143
(四) 冷却水系统	144
(五) 排气系统	146
(六) 起动系统	146
(七) 管系估算及安装要求	147
第三节 设备选型	148
(一) 泵类选型	148
(二) 冷却器选型	148
(三) 空气压缩机和起动空气瓶选型	148
(四) 测功器选型	151
(五) 其它设备选型	155
第四章 单缸和多缸试验机及其试验	156
第一节 试验机的种类和作用	156
(一) 单缸试验机	156
(二) 多缸试验机	157
(三) 油料试验机	157
第二节 单缸与多缸试验机的设计特点	157
(一) 单缸试验机	157
(二) 单缸试验设备的布置	157
(三) 多缸试验机	158
第三节 单缸试验机的模拟	159
(一) 脉冲增压柴油机进排气系统的模拟	159
(二) 用小缸径的单缸试验机模拟大缸径的柴油机	162

(三) 部分工况的模拟	162
(四) 热负荷的模拟	162
第四节 性能试验	162
(一) 单缸机的性能试验	162
(二) 多缸试验机的性能试验	168
(三) 热平衡试验	170
第五节 零部件结构强度和磨损测量试验	171
(一) 零部件试验	171
(二) 零部件磨损测量试验	171
第六节 燃用劣质油的试验	172
(一) 试验设备	172
(二) 试验方法与注意事项	173
第五章 首制样机试验	175
第一节 概述	175
第二节 磨合试验	175
第三节 各缸工作均匀性调试	178
第四节 起动换向试验	178
第五节 机械效率的测定	180
第六节 速度特性试验和推进特性试验	182
(一) 概述	182
(二) 试验方法	183
(三) 柴油机安全功率使用范围的确定	184
(四) 推进特性试验	185
第七节 负荷特性试验与万有特性试验	188
(一) 负荷特性试验	188
(二) 万有特性试验	188
第八节 其他性能试验	190
第九节 停缸试验	191
(一) 试验前的准备工作	191
(二) 试验方法	192
第十节 停增压器试验	192
(一) 试验前的准备工作	192
(二) 试验方法	192
第十一节 耐久试验	193
(一) 耐久试验时间及运转工况的要求	193
(二) 耐久试验中的几项具体规定	193
(三) 耐久试验合格与否的一般原则规定	194
第六章 数据的测量	195
第一节 有效功率及转速的测量	195
(一) 测功器的类别和比较	195
(二) 测功器的特性及选用	195
(三) 测功器的误差与校准	196
(四) 扭矩的测量	197
(五) 转速的测量	201
第二节 温度的测量	203
(一) 柴油机试验常用温度计的选择	203
(二) 柴油机试验常用温度计的安装	205

(三) 用热电偶测量柴油机运动零件的温度	207
(四) 用易熔合金测量柴油机零件的温度	212
(五) 热塞法测量温度	213
(六) 燃气瞬时温度的测量	214
第三节 压力的测量	215
(一) 在液体介质及气体介质中的压力测量	215
(二) 压力表的安装及选用	216
(三) 爆发压力的测量	218
第四节 示功图及压力波的测取	220
(一) 机械式示功器	220
(二) 气电示功器	221
(三) 电子式压力指示器	225
(四) 示功通道尺寸的选取	231
(五) 示功图及压力波的标定	232
(六) 上死点的确定	233
第五节 油、水流量及耗量的测量	234
(一) 燃油消耗量的测量	234
(二) 冷却水及滑油流量的测量	240
第六节 空气流量的测量	241
(一) 节流式流量测量装置	241
(二) 标准孔板及标准喷嘴的设计	246
(三) 双扭线气体流量计	251
(四) 测频式流量测量设备	253
第七节 位移的测量	254
(一) 喷油器针阀升程的测量	255
(二) 高压燃油泵齿条位移的测量	257
(三) 气阀升程的测量	258
(四) 高压燃油泵出油阀位移的测量	258
第八节 烟度的测量	259
(一) 烟度计	259
(二) 取气	263
(三) 滤纸	263
(四) 烟度值的相互比较	264
第九节 柴油机排气成分的分析	265
(一) 排气分析的用途	265
(二) 取气	266
(三) 气相色谱分析法	266
(四) 基于化学吸收的排气分析法	269
(五) 红外线气体分析法	271
第十节 柴油机及模型试验动态过程摄影	271
(一) 用高速照相机作连续分幅摄影	271
(二) 用普通照相机作逐幅闪光摄影	273
(三) 应用高速快门的逐幅摄影	273
(四) 柴油机燃烧过程摄影	274
(五) 流体流动过程的摄影	275
第十一节 柴油机整机振动测试技术和分析方法	277
(一) 振动测试的目的	277
(二) 振动测试系统	277
(三) 仪器的选用	280

(四) 仪器的校准	280
(五) 振动测量参数及测点布置	281
(六) 振动分析	283
第十二节 柴油机整机噪声测试技术和分析方法	285
(一) 测试内容与方法	285
(二) 空气噪声、结构噪声的测试系统	288
(三) 声级的加、减和换算	291
第十三节 巡回检测与数据处理	293
(一) 数字集中检测装置	293
(二) 数据处理系统	294
第十四节 测量误差和仪表主要特性	297
(一) 测量误差	297
(二) 间接测量的误差计算	299
(三) 电测法的误差分析	300
(四) 测量仪表的主要特性	301
(五) 国家标准 GB1105-74 (内燃机台架试验方法)	301
参考资料	302

第七篇 试验与测量

第一章 柴油机零件强度试验

第一节 概 述

为加速柴油机产品研制进度，应在设计研制过程中对各主要零部件进行强度试验，即对零件在与其相关部分彼此隔离的条件下，分析它的强度特性。这样便于对零件进行多种设计方案的分析比较，深入的研究各种因素对应力分布与承载能力的影响，从而得出较为合理的设计方案，有时更可得出强度计算分析的新方法。

在柴油机使用过程中，某些零件在强度方面有时会发生事故，对于事故原因的分析 and 结构的改进，试验亦为必要的手段之一。

近年来，由于电子计算技术的迅速发展而使柴油机零件强度的理论分析日益完善，但边界条件往往不易确定，致使计算结果达不到要求的精度。此外，计算结果也需要试验的验证。因此，在合理化的设计中，计算分析应与试验工作配合进行。

零件强度试验分成两大部分：

(1) 零件的应力分析 主要是采用实验应力分析的方法分析零件在规定载荷作用下的应力状态，其中包括确定在实机工作条件下的负荷及应力；

(2) 零件强度判据的研究 确定零件承载能力的极限，其中包括对材料在特殊环境下的强度研究。

柴油机零件强度试验研究工作的一般程序如下：

- (1) 提出任务；
- (2) 确定待解决问题的性质，如方案比较、事故分析，评定现有结构、验证理论计算结果等；
- (3) 提出试验方案及预期结果；
- (4) 制订试验大纲；
- (5) 制定实施计划；
- (6) 进行试验；
- (7) 讨论并鉴定成果，提出报告。

目前用于实验应力分析的方法很多，其中常用的有：光弹性法，脆漆涂层法，电阻应变法，激光全息干涉法等几种。

(1) 光弹性法 光弹性试验有：平面光弹法，三向光弹法和光弹贴片法三种。对平板型的零件和轴对称零件（如活塞顶）用平面光弹法可得到满意的结果。对于其他类型的零件（如气缸盖，曲轴等）可用平面模型进行定性分析，供方案选择时参考。模型可以修改，反复使用，因而试验周期较短、见效快，特别适用于数量较多的方案比较。三向光弹

法适用于形状复杂、不能简化成平面问题的零件。用这种方法可得到零件任一截面应力的分布状态。用偏光显微镜可测得小区域的应力分布（如小圆角的过渡部分）。但在这种方法中，模型制作工作量较大，试验周期较长，同时模型还不能重复使用，所以这种方法特别适用于在粗选的基础上对少数较好方案作进一步的分析比较，以便配合计算分析作理论性研究或者配合事故分析作有关结构的详细应力分析等。这种方法所得的试验结果的精度主要取决于边界条件的模拟近似程度。

光弹贴片法可用于模型，亦可用于实际零件上，对其材料却不限。这种方法既可在试验室内应用亦可在现场进行。在现场应用时，可得出零件在实际工作载荷作用下的应力状态，但只限于用于光线可达的部位。这种方法对静态应力与动态应力均可适用，但只限于固定零件。

(2) 电阻应变法 由于应变片尺寸日益缩小，所以实际测出的数据可接近测点的应变值。用这种方法时，测量对象可以是模型，也可以是零件实物；应变值可以是静态的，也可以是动态的。特别值得注意的是：用这种方法能进行运动零件、燃烧室内侧、冷却水套内表面等部位的实际工作载荷的测量。在动态测量中可得到应力波形图以供进一步分析之用。该方法由于应变片尺寸小，成本低，易于掌握，又可以直读等优点故获得广泛的应用。

这种方法的局限性是：凡不能贴片和引线的地方都不能测量；容易受到测试现场的电干扰；只能逐点测量，不能得到应变分布的全场显示。

(3) 脆漆涂层法 脆漆涂层法是实验应力分析诸法中最简单的一种。为配合电测法可用脆漆涂层法预先确定高应力区及主应力方向，以缩小贴片的范围，减少贴片数目。在精度要求不高的情况下，可用来作定性分析，找出应力分布的大致规律，得出初步的结论。在涂层精度较高的情况下，也可用来作定量分析。陶瓷基涂层的发展，使脆漆涂层法扩展到高温应力的分析。

脆漆涂层法所得到的裂纹图给出应变分布的全场显示，比较直观。但这种方法与其他方法比较，精度较低，不能直读，不能连续记录，受环境（温度，湿度…）影响较大。

(4) 激光全息干涉法 用激光全息干涉法（或称激光全息干涉测量术）可以测量非透明物体表面的位移场，并由此而得出物体表面的应变和应力分布。此外，用这种方法还可以研究物体振型和频率，在疲劳问题以及无损检验方面也获得应用。在目前发展阶段，激光全息干涉法尚仅限于在试验室内进行，也就是说零件或模型只能在模拟条件下进行试验。因此试验结果的准确程度决定于边界条件的模拟。为了得到清晰的干涉条纹图，要求有一个稳固的防震台，并且试验场地附近不应有强烈的振源。由于目前激光管功率有限，因而视场不能太大，不能得出大面积内的位移分布。用这种方法只能限于激光所及的部位。这种方法只能用于较小变形而不能用于变形较大的零件。对研究组合零件非线性影响时则不适用。

各种常用方法的比较见表 7-1-1-1⁽¹⁾。

由上述可以看出：各种试验方法都各具有优缺点，并适用于各种不同的场合。因此在对零部件强度进行综合研究时，若能将各种手段配合使用，就可更完满地解决问题。例如对气缸盖的全面试验分析就可按下列内容进行：

表7-1-1-1 常用的实验应力分析方法

	应力状态				方法的特性				应用范围								
	单向(表面)		两向(表面)		三向(内部)		主应力方向指示	能否全场显示	使用场合(试验室, 现场)	产品研制			事故分析			其他工作	
	静态	动态	静态	动态	静态	动态				方案选择	设计改进	实机试验	应力测量	残余应力	产品检验	改进措施评定	材料研究
最大灵敏度 $\mu\epsilon$	测量范围 $\mu\epsilon$																
脆漆涂层法	松脂基						是	是	试验室								
	陶瓷基						是	是	试验室								
电阻应变法	单片						否	否	试验室								
	应变花						是	否	试验室								
	动态						否	否	试验室								
	半导体应变片						否	否	试验室								
光弹法	二向						是	是	试验室								
	三向						是	是	试验室								
	贴片						是	是	试验室								
全息干涉法																	

(1) 利用光弹性法求出缸盖的全场应力分布, 得出形状系数、高应力区等, 还可进行多方案选择;

(2) 利用应变电测法测出选定部位的工作应力, 得出其值的大小、变化规律以及影响因素等等;

(3) 实际零件在实机条件下, 用模拟载荷作用进行静态应变电测, 得出在实际边界条件下的应力分布和影响因素;

(4) 用激光全息干涉法得出在温度和机械负荷作用下的变形状况;

(5) 用热电比拟法得出温度场, 通过温度实测得到实际边界条件, 还可计算出由温度引起的热应力;

(6) 对气缸盖进行常温或实际工作温度下的疲劳试验, 可得出实际气缸盖的承载能力, 以及试验各种提高承载能力方面的工艺与设计措施, 配合材料在模拟实际应力状态下的疲劳试验, 可得出气缸盖疲劳强度的设计方法。

第二节 光弹性试验

(一) 光弹性试验在柴油机设计中的作用

光弹性试验法是建立在物理光学和弹性力学基础上的一门实验技术, 是实验应力分析的组成部分之一。它可以直接在零件上进行应力测量, 但主要还是通过相似的力学模型进行试验。光弹性模型由特殊光学性质的透明材料制造, 模型受模拟载荷作用后, 在偏振光场中, 可以观察到干涉条纹图, 再借助弹性理论, 可以求得模型边界和内部各点应力的大小和方向。然后, 根据相似理论, 将模型应力换算成原型应力。

光弹性具有如下特点: 直观性强, 一张应力条纹图就能使设计人员对零件应力分布的全貌一目了然, 且不受载荷复杂性和结构复杂性的限制。柴油机机身、气缸盖一类的复杂结构, 以及增压器叶轮在离心力作用下的应力, 均可用光弹性法进行应力分析。由光弹性应力条纹图, 可直接得到边界应力的分布, 它可以精确测量一点的应力, 这对研究曲轴圆角及油孔一类的应力集中问题, 效果尤为显著。光弹性试验法还可测量模型内部某一截面上的应力分布, 这是其他实验方法所不及的。此外, 还可以将光弹性塑料片贴在零件表面上以测量零件表面的应力和应变, 这就是光弹性贴片法。新发展的热光弹法可以研究活塞、气缸盖等受热零件的热应力分布, 借此使其设计更趋合理, 以适应柴油机热负荷提高的需要。动光弹性法可用来研究受冲击载荷的气阀等动应力的传递过程。利用激光全息光弹性和散光光弹性新技术, 还可以研究过盈配合应力及接触应力的分布。光弹性试验在精度上能满足柴油机设计的需要, 但光弹性试验步骤较多, 需一定的周期; 此外, 除光弹贴片法外, 大多数光弹性试验还是通过模型来进行的, 因此存在一定模拟误差。

由于光弹性法有以上优点, 故在柴油机研究和设计上得到普遍应用^[2]。它可以对柴油机零件进行详尽的应力分析, 研究设计的合理性和进行强度校核。由于光弹性试验大多在模型上进行, 故在产品初期设计初期可用来进行多种设计方案的比较, 寻求较佳方案, 进行优化设计。它也可用来探讨零件形状的改变对应力分布的影响。例如, 将曲轴过渡圆角、曲柄宽、曲柄厚及回转半径等相对连杆轴颈的直径化为无因次量, 进行一系列试验; 研究曲

轴结构参数的变化对应力集中和应力分布的影响，为设计提供指导性公式和图谱。在柴油机研制过程中，当发现零件有损坏时，也可借助光弹性法分析损坏的原因，从而采取有效的对策^[8]。

由光弹性法所得的应力条纹图，可为有限元法的计算提供单元划分的依据。应力条纹密集区应划分较密的单元，从而在不增加计算机容量的情况下，使应力集中部位的数据有更为精确的结果。光弹性法和有限元算法相辅相成，互相校核和补充，使柴油机设计得更为合理^{[2][4]}。

光弹性法本身又分很多种类，目前应用得较多的类型是：平面光弹性、三维光弹性、热光弹性、散光光弹性、激光全息光弹性、贴片光弹性和动光弹性等。而在柴油机设计中，有平面问题，更多的是三维问题，尚有热负荷和冲击问题。对于各种不同的问题，可以选用各种不同的光弹性方法。在我国，光弹性法已广泛应用于柴油机设计上，分析的对象亦较广泛，有机身、气缸盖、连杆、曲轴、喷油器和增压器等。近来，激光技术已引入到光弹试验中，并成功地研制了激光全息和激光散光光弹性仪，从而把光弹性技术又向前推进了一步。随着断裂力学在柴油机设计中的应用，光弹性法已成为研究裂纹尖端强度因子的有效方法之一^[6]。利用光弹性模型，只要将激光全息光弹性仪稍加改变，就能满足激光全息干涉法测量的需要。此法可用来测量位移，也可用来测量增压器叶片及叶轮的振型，从而可研究日益受到重视的柴油机刚度问题^{[6][7]}。

(二) 平面光弹性的基本原理和光弹性条纹图的识别

1. 平面光弹性基本原理^{[8]~[12]}

(1) 暂时双折射现象 自然光经过起偏振镜，可得到单方向振动的平面偏振光。当平面偏振光垂直入射到受外载荷作用的平面模型某一点上时（图7.1.2.1），将沿着模型在该

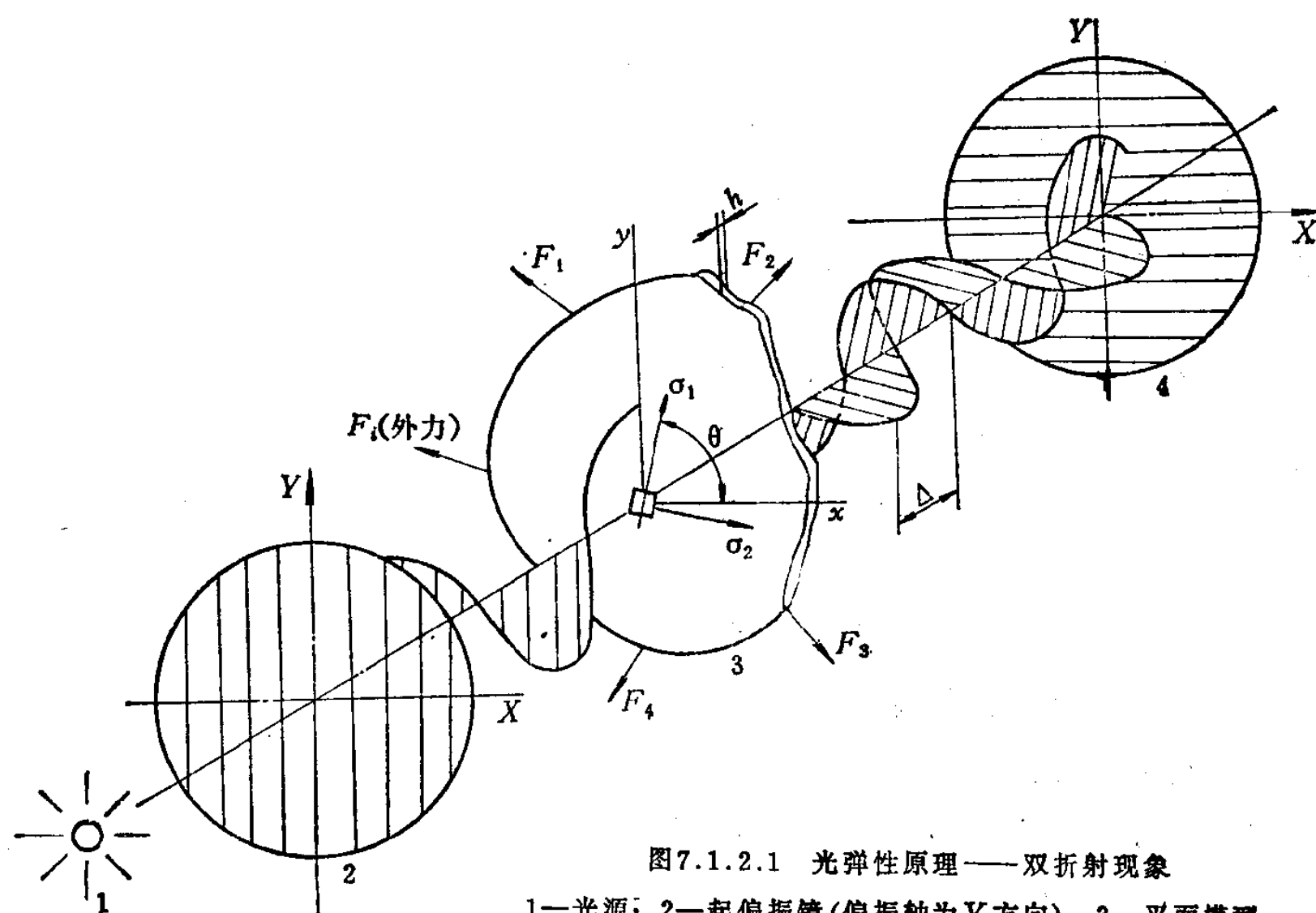


图7.1.2.1 光弹性原理——双折射现象

1—光源；2—起偏振镜（偏振轴为Y方向）；3—平面模型；
4—分析镜（偏振轴为X方向）。

点的两个主应力 σ_1 和 σ_2 ，分解为两束速度不同的平面偏振光。通过模型后，产生相对光程差 Δ ，这就是双折射现象。实验证明：相对光程差 Δ 与该点的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 及模型的厚度 h 成正比，这叫应力光性定律，其表达式为：

$$\Delta = Ch(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (7.1.2.1)$$

式中 C ——应力光学常数。

并且，当外载荷移去时，这一双折射现象也随之消失，故称为暂时双折射现象。

具有相对光程差的上述两束平面偏振光，通过检偏振镜(又叫分析镜)时发生干涉。当检偏镜和起偏振镜的偏振轴正交时，干涉后的光强度 I 可表达为：

$$I \propto a^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi\Delta}{\lambda} \quad (7.1.2.2)$$

式中 a ——光的振幅；

θ ——主应力与偏振轴的夹角；

λ ——光的波长。

在式(7.1.2.2)中，当光强 $I = 0$ 时，即会出现干涉条纹。

由式(7.1.2.2)可知，出现两类光强为零的干涉条纹，分别称为等差线和等倾线。

(2) 等差线 当相对光程差 Δ 为波长 λ 的整数倍时，即 $\Delta = N\lambda$ ($N = 0, 1, 2 \dots$)时，光强 $I = 0$ ，出现第一类干涉条纹。在模型上，当某些点的光程差等于波长整数倍时，所形成的暗条纹称为等差线条纹。每一条等差线上的主应力 σ_1 和 σ_2 的差值分别为：

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N \frac{f_\sigma}{h} \quad (7.1.2.3)$$

式中 $f_\sigma = \frac{\lambda}{C}$ ，称为材料条纹值(公斤/厘米)，相当模型材料为1厘米厚时所产生的 $N = 1$ 级等差线条纹的主应力差值。它表达了光弹性材料的光学灵敏度。

当两偏振镜的偏振轴互相正交或平行时，其背景分别是暗的或明的，称为暗场或明场。由暗场或明场分别得整数级和半数级的等差线条纹图，即 $N = 0, 1, 2, \dots$ 级及 $N = 0.5, 1.5, 2.5, \dots$ 级的干涉条纹。图(7.1.2.2)为连杆在拉伸载荷作用下，明场和暗场的等差线干涉条纹。以上所述均为以单色光为光源时的情况。若用白光作为光源，可得彩色的等差线，并且条纹级数相等的点，其颜色也相同，故该类等差线又称等色线。

(3) 等倾线 由式(7.1.2.2)可知，当 $\theta = 0^\circ$ 或 90° 时，将出现第二类干涉条纹，每根干涉条纹上的各点，其主应力方向均相同，也就是在同一根干涉条纹上，各点主应力倾角相同，这种干涉条纹称为等倾线；并且如将偏振轴正交的起偏振镜和检偏振镜作同步回转，可得各种角度的等倾线。图7.1.2.3为曲轴在弯曲载荷作用下的等倾线。由等倾线可以作出主应力迹线，主应力迹线上每点的切线和法线方向，分别表示该点的两主应力方向。图7.1.2.4为曲轴主应力迹线。

(4) 透射式光弹性仪 透射式光弹性仪分为两类。一类为平行光式光弹性仪，另一类为漫射式光弹性仪。这里介绍的是常用的、平行光式光弹性仪。图7.1.2.5为平行光式光弹性仪的光路图。平行光式光弹性仪的主要特点是：利用大视场的准直透镜获得平行光，模型置于平行光场中进行观测，其精度比漫射式光弹性仪的高。国产409-II型光弹