

内燃机结构强度研究

内燃机杂志编辑部编

内容提要 本书由二十六篇专论组成,以期较全面地反映我国近几年来在内燃机结构强度研究技术方面的进展。所收集的文章点面结合,使本书既方便读者入门,又具有一定的系统性和深度。

全书分机械应力分析、热负荷研究、扭转振动问题三个部分,较详细介绍了内燃机零部件机械应力、温度分布、热应力、疲劳强度、扭转振动等方面的测试和分析技术,其中包括温度和应力实测、光弹、热电模拟、有限元素法等具体方法,涉及活塞、曲轴、缸盖、气门、缸套、连杆、燃烧室等零部件。

读者对象为从事内燃机生产、设计、试验、研究和教学工作的专业人员。对其它类似领域内从事实验力学、测量和模拟试验、以及数值计算的有关专业人员亦有参考价值。

在本书编辑过程中得到了上海柴油机厂、北京内燃机总厂、沪东造船厂、资阳内燃机车厂、上海交通大学、复旦大学、711所、上海市内燃机研究所等单位的热情帮助,在此仅表感谢。

内燃机结构强度研究

内燃机杂志编辑部编

(限国内发行)

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $3^{1/4}$ ·字数499千字

1977年5月北京第一版·1977年5月北京第一次印刷

印数 00,001—16,000·定价1.70元

*

统一书号:15033·(内)683

目 录

我国内燃机结构强度研究的概况和展望·····	魏恭隆 (1)
------------------------	-----------

第一部分 内燃机零件的机械应力分析

光弹性及其在内燃机研制中的应用·····	浙江大学 杨槐堂 谢贻权 (10)
内燃机零件复杂三维光弹模型整体铸造 ·····	711 所光弹组 上海市内燃机研究所结构强度组 (22)
135型柴油机活塞光弹性试验研究 ·····	711 所 光弹组 上海市内燃机研究所结构强度组 上海柴油机厂135设计组 (30)
气缸盖应力状态预测·····	武汉水运工程学院光弹试验组 (39)
实验应力分析中的遥测应变技术·····	华东电子仪器厂 钱建楣 丁金涛 合肥通用机械研究所 唐鹭千 上海市内燃机研究所 施力强 (44)
95系列柴油机曲轴结构强度的电测试验·····	上海市内燃机研究所结构强度组 (57)
4100型柴油机曲轴疲劳强度的研究和提高 ·····	北京内燃机总厂 刘泽芝 朱英杰 (62)
6105 Q 型高速柴油机连杆应力的计算、实测与分析 ·····	上海工农动力机厂设计科 上海交通大学230教研组 复旦大学数学系 执笔人 陈大荣 吴志兴 (73)

第二部分 内燃机零件的热负荷研究

活塞的温度测量及其应用·····	上海市内燃机研究所 高政冠 (107)
气缸盖及喷油嘴的温度测量·····	上海柴油机厂技术测量组 陈我武 (126)
180型柴油机油冷活塞的试验研究 ·····	上海市内燃机研究所 施力强 (132)
预燃室喷嘴运行时的温度状况·····	上海市内燃机研究所 施力强 上海柴油机厂 陈月芬 (145)
内燃机活塞温度和热流分布的热电模拟·····	上海市内燃机研究所 施力强 (149)
内油冷铸铝活塞温度场的热电模拟试验 ·····	铁道部资阳内燃机车工厂 西南交通大学 执笔人 焦善庆 (163)
活塞放热系数计算方法 ·····	铁道部资阳内燃机车工厂 西南交通大学 执笔人 焦善庆 (171)
气缸盖温度场的电模拟预测·····	武汉水运工程学院光弹试验组 (183)
用有限元素法计算内燃机活塞温度场的研究	

IV

180型柴油机活塞温度场的计算

.....上海柴油机厂大马力设计组 上海市内燃机研究所结构强度组 (209)

计算轴对称稳定温度场及放热系数

.....复旦大学计算数学专业赴沪东造船厂毕业实践小组 (213)

热光弹性法.....南京工学院光弹性组 711所光弹性组 (220)

柴油机零件热负荷状态的计算和分析

.....沪东造船厂造机技术组 张晓冷 金燮元 陆庆琨 (231)

第三部分 内燃机扭转振动问题

内燃机装置的扭转振动问题.....上海交通大学 朱孟华 (249)

电感调频式电子扭振仪.....上海市内燃机研究所扭振仪试制组 (278)

V型发动机的偏振问题(上)

.....上海交通大学 李渤仲 陈之炎 张金兴

上海柴油机厂 杨寿藏 符锡候 骆周全 徐至平 (287)

V型发动机的偏振问题(下)

.....上海交通大学 李渤仲 陈之炎 张金兴

上海柴油机厂 杨寿藏 符锡候 骆周全 徐至平 陈我武 (308)

我国内燃机结构强度研究的概况和展望

魏 恭 隆

内燃机结构强度研究是怎么回事？它在内燃机研制过程中有什么重要性？我国内燃机结构强度研究工作的的发展和前景如何？这些都是我国内燃机战线上广大工人、技术人员和领导同志日益关切的问题。

内燃机结构强度研究可以概括为：应用现代力学（尤其是实验力学）的研究成果，来研究内燃机主要零部件的强度（或者说应力状态），从而为“最佳化”结构设计提出科学依据。这个关系可以较清楚地表现在图 1 上。

现代实验力学的研究范围十分广泛，目前与内燃机专业有关的主要有热应力、机械应力、振动和疲劳。为了进行这些方面的研究，实验力学所采取的测试技术也在内燃机结构强度研究中得到了普遍的应用。内燃机结构强度研究首先是在大型强载柴油机中开展起来的，这是自然的事。因为这类柴油机一般说来不仅承载负荷大，而且批量小，制造周期长，成本昂贵，从人力、物力和时间等各方面的经济性讲，都要求研制工作“一次成功”，而不可能通过多次样机反复研制。这就必然地要求在样机前的设计过程中，对一系列关键零部件进行各种模型研究以及单缸机试验。我们可以把这一研制阶段称之为“先期研究”。对于大批量生产的中小型内燃机，过去一般说来强化程度不高，可以根据经验（统计资料）来设计，通过多次样机试验和实际使用来考查，结构强度研究（特别是先期研究）的迫切性是有限的。但是，随着中小型内燃机不断向高速高功率强化发展，情况已经发生了重大的变化。对于热负荷和机械负荷都很高的中小型强化内燃机，它所发生的问题总是错综复杂的。还象过去那样，直接通过样机这类综合性试验来考查它，事实上已是不可能的了。新的情况要求我们建立新的设计思想，必须把结构强度研究放在研制工作的重要地位上。内燃机结构强度的重要作用及其在内燃机研制工作中的地位，可以概括为三点（参阅图 1）：

1) 通过对关键零部件的强度研究，为设计其合理的结构型式提出依据，或通过各种方案比较，提出最佳方案。这一工作主要是先期研究。

2) 当零部件发生故障和破坏时，研究其破坏形式和原因，提出防止再破坏的改进措施。

3) 通过大量的结构强度研究，得以制定新的产品设计规范和计算方法，选择合理的安全系数和许用应力。显然，在载荷和应力分析日益精确的基础上，可以有效地选择最低安全系数值。

一句话，内燃机结构强度研究的作用，就是在既定的性能要求下，保证充分的寿命和可靠性，而又最大限度地节约材料，这就是所谓“最佳化设计”、“最低安全系数”或“最佳方案”的涵意。当然，要达到这一目的，结构强度研究只是必要条件；作为充分条件，另一方面还有赖于材料强度的研究。

这里，特别值得强调先期研究的巨大意义：

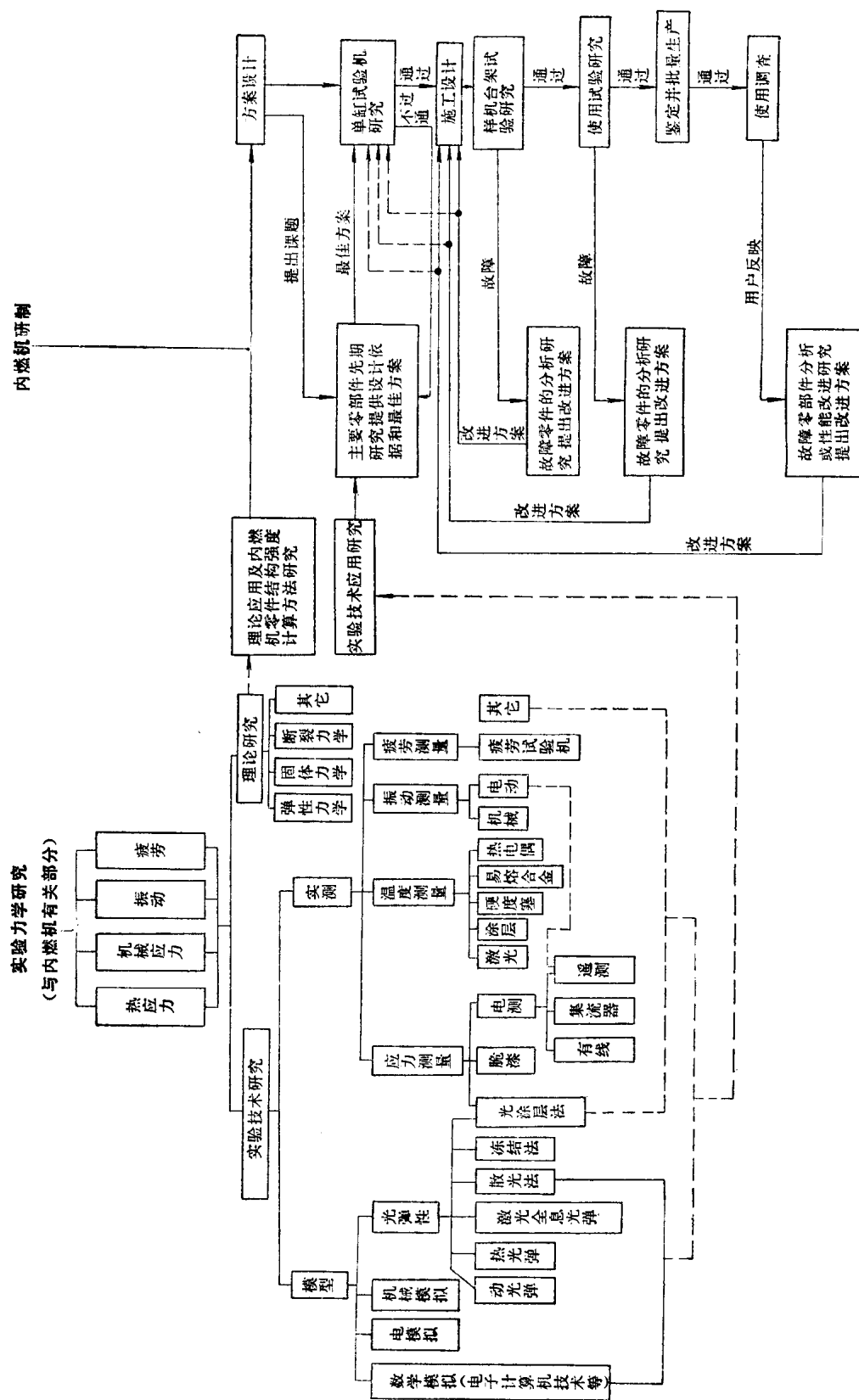


图 1 内燃机结构强度研究的内容及其在内燃机研制中的地位

1) 虽然在设计内燃机时要进行必要的理论分析和计算,但是现代技术的发展和实践证明,对内燃机零件进行理论应力分析往往是很困难的,而仅靠计算方法来确定内燃机零件的应力和变形,尚未见先例。因为内燃机主要零件的结构、运动及其所受载荷较复杂,理论应力分析的简化步骤、计算中的假设条件都使得其结果与实际相差较大。特别目前内燃机教科书上的计算方法,大多还是几十年前的产物,更不能适应现代内燃机强化的特点。因此,通过试验研究乃是研制内燃机的基本途径。

2) 当然,试验研究可以在样机或实际产品中进行,但是正如前述,在整机上各种因素错综复杂,要找出零件故障的原因不是一件容易的事。特别,如果许多零件交替故障,问题就更为复杂了。此外,许多测试手段在整机上进行,实验技术还有许多限制和困难。凡此种种,势必使试验工作旷日持久,而提不出有效的改进方案。而在整机上进行多方案探索,则整个试验就更为复杂和困难了。另一方面,即便最后找出了零件故障的原因,由于受到内燃机既定的各种结构乃至生产工艺装备的限制,往往无法采用许多有效的改进措施,只能修修补补,难以彻底解决问题。这方面的经验和教训,许多工厂和研究单位在自己以往的实践中都是体会很深的。

3) 因此,最有效的研制方法就是采用模型技术或在单缸机上开展先期研究。它具有如下优越性:

- ① 可以迅速而经济地进行多方案的比较;
- ② 可以几乎不受限制地采用多种测试技术进行研究,从而互相校核,提高了研究的准确性;
- ③ 由于研究的因素可以在人为的控制下,较为单一,测试手段又充分,从而可以及时地发现问题,解决问题;
- ④ 在整机上进行,一个零件的故障也可能引起整个机器的损坏,先期研究无此弊病;
- ⑤ 由于以上,先期研究既省时又节约。

这些优越性已为我国内燃机结构强度研究的实践所证实。不妨举出二个例子。

例 1: 1967 年上海柴油机厂在研制 12V135G-2 型柴油机时,耐久试验中发现有 50% 活塞在活塞销座处发生裂纹,严重影响产品出厂,按照过去的常规,必须设计制造几种不同改进结构的活塞,再在样机上进行耐久对比试验,然后选择较好结果的一种方案,而这样的方案还不一定是最佳方案,并且要耗费巨大的人力物力和时间。该厂在 711 所、上海市内燃机研究所的协作下,采用了三维光弹性模型试验,找出了活塞销座处应力集中是产生裂纹的主要原因,并经过三个典型改进方案的光弹性比较,迅速找到了一种“弹性活塞销座”的最佳方案,使活塞最大应力值比原结构降低了 40%。这种新结构活塞采用到 12V135G-2 型柴油机上后,经过多年生产实践的考验,未再发生过活塞裂纹等结构强度问题。目前,这种活塞已被推广到 135 系列所有变型(包括增压强化柴油机)中,效果也很满意。

例 2: 长春汽车研究所自 1971 年底开始进行提高 6130 型和 4115 型柴油机曲轴疲劳强度的研究。研究的第一部分是采用光弹和电测方法,对多种 6130 型柴油机曲轴单拐结构方案进行应力分析,结果找到了二种比较合理的曲拐结构,分别使应力集中程度下降 17.9 和 20%。研究的第二部分是用自己设计的机械谐振式曲轴疲劳试验机进行各种曲轴强化工艺效果的试验。疲劳机上的几个星期试验,“再现”了实际运转几年或十几年的工况。结果证明,采用圆角高频淬火可提高 6130 型柴油机曲轴弯曲疲劳强度 17% 以上,采用圆角切线滚

压可提高 4115 型柴油机曲轴弯曲强度 80% 以上。从而解决了这二种柴油机曲轴断轴率较高的质量问题。

然而，目前尚有少数同志对内燃机结构强度研究，尤其是先期研究，有几种似是而非的认识。

其一，认为结构强度研究是可有可无的，没有它也可以设计，有它是“锦上添花”。诚然，我们有过不进行结构强度研究的发动机设计，但是，这是以发动机性能指标不高为前提的，即便这些性能不高的发动机，它的结构强度可靠也是前人研究的成果，从而我们才可以通过结构统计值或参考样机的选择来进行设计。所以，问题在于要进行什么样的设计？如果只满足于“统计设计”，那就无异于永远跟在洋人或古人后面爬行。**“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”**设计要有所突破，要有所创造，要达到前人没有达到的高峰，只有通过自己的科学实验，舍此决无捷径。

其二，认为结构强度研究“远水解不了近渴”，靠它来设计来不及。诚然，我们的技术工作要高速度，问题是我们要哪个速度？是只管出图纸或“第一台样机”的设计速度呢？还是使产品真正有效地为社会主义建设服务的整个研制速度？显然，党和国家所要求的是后一个速度。要争夺后一个速度，必须把冲天的革命干劲和严格的科学态度辩证地结合起来。**“无产阶级的最尖锐最有效的武器只有一个，那就是严肃的战斗的科学态度。”**我们许多同志有过这样的实践体会，样机出来了，暴露一大堆问题，长期不能过关，最后还是不得不回过头来进行有关试验研究。他们说得好：“什么问题你在开头放过了，到时候这个问题还会找到你的。”所以，先期研究初看起来可能使出图慢一点，但是“磨刀不误砍柴工”，先期研究的成果应用于内燃机设计后，就会把较少的问题留给以后样机试验和使用试验，从而大大加速了整个内燃机研制过程。

应该指出，我们强调先期研究，并不意味着以后的样机（多缸）试验和使用实践是不重要的。先期研究毕竟是“模拟”性的，它与真实性的差距应由样机试验乃至使用实践来考核；先期研究毕竟是较“单项”的，各个单项的综合效果还必须由样机试验乃至使用实践来检验。同样，我们强调先期研究，也并不意味着理论和计算工作是可以忽视的，从大量实验研究和建立起来的理论，可以具有较普遍的指导意义；由于电子计算机技术的应用，计算作为先期研究的一个重要环节的作用正在不断增长，从某种意义上讲，它是一种“数学模拟”技术了。我们之所以强调先期研究，不仅因为它在研制过程中具有上述独特的作用，更因为，在以往的较长时间内它在某种程度上被忽视了。

当然，在先期研究中选择什么测试手段和模型技术，应紧密结合生产实际，根据不同机型不同问题而异，而不是为研究而研究，五花八门越多越好。例如，一般说来，如果定性地了解应力分布情况采用脆漆较方便；解决应力集中并给出内外应力场，进行设计方案比较，采用光弹性较适宜；要定量地分析应力状态，了解发动机复杂运行下零件的受力规律，电测是必要的途径，等等。再如，测量点的选择也要分别情况：为了考核强度防止破坏，重点测最大应力；为了减轻重量、节省材料，要加强测最低应力；如果研究变形，测点应多些；若是几个方案的比较，只需测几个相对值就够了，等等。

当然，要使结构强度研究在内燃机研制和生产中发挥更大的作用，许多测试技术还有待于精益求精。毕竟，内燃机结构强度研究在我国还是一项新生事物，在前进道路上出现这样或那样问题是不足为怪的。

我国内燃机结构强度研究开始于大跃进年代,而真正开展起来取得成效,还是无产阶级文化大革命以来的事。内燃机结构强度研究在两条路线、两条道路的阶级斗争的风浪中成长。广大工人、技术人员和革命干部,在党的领导下,在毛主席的革命路线指引下,坚持科研为无产阶级政治服务,与生产劳动相结合,自力更生,艰苦奋斗,使我国内燃机结构强度研究蓬勃开展起来,取得了一个又一个的丰硕成果。

活塞温度场测量是进行得较早的一项。1959年交通部船舶科学研究所首先在14110/133型柴油机(10马力1200转/分)上采用易熔合金测定了活塞温度。1963年前后,上海市内燃机研究所首先采用三氟氯乙烯解决了偶丝间绝缘问题(现在更改进采用聚酰亚胺)。1963年西安交通大学在1-145型柴油机上成功地进行了热电偶连续引线测量活塞温度,这种方法的局限性在于不适于高速柴油机。1963~1965年这段时期内,711所、上海市内燃机研究所、上海汽轮机厂等单位采用易熔合金、热电偶对碰触头接触法等进行了高速柴油机活塞温度场的研究,取得了有效的成果。1964年,上海交通大学首先进行了热电模拟温度场研究,以后上海市内燃机研究所在上海交通大学研究的基础上解决了加电压的合理方式问题,找到了电流-热流公式,把热电模拟技术提高了一步,并与实测、电子计算机技术进行了综合对比研究,提高了模拟精度;此外,711所、铁道部科学研究院机车车辆研究所、大连热力机车研究所等单位也都开展了热电模拟的试验研究。采用硬度塞测量活塞温度的工作开展较迟,六十年代中期,长春汽车分公司曾采用此法测量过CA-10型发动机的活塞温度,以后1967~1970年天津内燃机研究所在上柴 $\times\times$ 型、天动146型、济柴190型以及沪东船厂6ESDZ75/160B型等柴油机上进行了广泛的测试和研究,获得了较好的成绩。近年来,上海市内燃机研究所与复旦大学等单位协作,采用有限元素法进行活塞温度场的研究,从而为比较精确地确定温度场边界条件提供了一种可行的方法。总之,目前各种测量活塞温度场的技术均已比较成熟,许多单位都可以独立地进行了。

光弹性技术在内燃机上应用,最早可以追溯到长春光学机械研究所为国产东风轮主机的机架进行光弹试验。这是1961~62年的事。1962年长春汽车研究所开始应用光弹性研究6120型柴油机曲轴,1963年上海交通大学尝试过光弹连杆的研究,但是,光弹技术在内燃机零件研究中第一个成功的例子,还是上述1967年上海柴油机厂、711所和上海市内燃机研究所协作改进135型柴油机活塞的研究。近年来,浙江大学、山东工学院、南京工学院、天津内燃机研究所等单位也积极地开展了内燃机零件光弹性研究。711所和南京工学院704实验室开展了热光弹的研究,初有成效。711所、天津内燃机研究所等单位在三维应力测量中,采用斜射法原理,引进高级偏光显微镜的应用,在技术上和精度上都有所提高。概括一句,目前,平面光弹技术已较成熟,三维光弹技术也已基本过关,内燃机上主要零件,如活塞、缸盖、机体、曲轴、连杆等均有单位成功地进行了光弹性分析。光弹性技术日益成为内燃机专业分析零部件破坏事故和多方案结构设计的一个经济而有效的手段。

应力电测,在大跃进年代,上海交通大学、上海市内燃机研究所和长春汽车研究所等单位就开始了这方面的工作。主要是摸索测量的基本方法。最早应用于内燃机零件研究的可以提及1960~61年一机部机械科学研究院对 $\times\times$ 发动机连杆进行静态测量。但是动态测量工作的进展比较慢。从技术上讲有两个基本困难。第一个困难是温度障碍。目前常温下应力应变测量已较普及,高温还有一定困难,主要是高温应变片生产问题。首先胶水等要耐高温,特别活塞等零件要经得起高温燃气的冲击;同时,需要温度自补偿,以消除热输出。1971~1972年

沪东船厂测定 6ESDZ75/160B 型柴油机缸盖热应力, 测温可达 400°C , 是目前较高的水平。第二个困难是信号传递问题。在往复运动件(活塞、连杆等)的测量中, 可以采用有线法(引线法), 即用特殊耐弯曲疲劳的导线直接从被测物体上将应变信号引到应变仪。这种方法不仅在接导线上往往要加上弹簧等保护措施, 从而限制了它所能适用的工作频率及摆幅的大小, 而且, 其适应的机型转速一般也只能在 1500转/分 以下, 即使如此, 导线使用寿命也只有几小时。较早采用有线法的, 除了上述西安交大测活塞温度外, 1968 年大连热力机车研究所首先用来测量 24/275 型中速柴油机的连杆应力。在旋转运动件(曲轴等)上广泛采用引电器(集流器、滑环)来传递信号。目前采用的有炭刷引电器、水银引电器以及调频制的感应引电器。华东电子仪器厂已成批生产炭刷式引电器(五环)。天津大学与天津内燃机研究所协作研制的引电器(八环), 性能赶上国外同类型产品。北京内燃机总厂研制一种银-石墨端面接触式引电器, 具有 20 环。较早应用引电器测量曲轴应力的, 是长春汽车厂 1965 年测量解放牌发动机曲臂应力。1969~1971 年上海市内燃机研究所测量了 695 型柴油机曲轴圆角应力。此外, 长春汽车研究所、一机部漯河机械研究院、北京内燃机总厂和 711 所等单位均已掌握这项测试技术, 积极开展了曲轴应力的测量和研究。这种方法的缺点是安装部位受到限制, 允许转速也受到一定限制。所以, 动态测量最好的方法是无线电遥测法。它是将一微小型发射机装在被测运动件上, 应变片感受的信号由它射频调制发射, 经天线将信号送入接收机进行解调后记录。它最好地克服了信号传递的困难。国外在 1965 年左右开始应用于内燃机零件应力测量, 我国 1969 年上海市内燃机研究所在无锡柴油机厂 4120F 型柴油机球铁连杆上第一次采用了遥测技术, 取得了一定的效果。近年来进行这一研究工作的还有铁道科学研究院、戚墅堰工艺研究所、西安交通大学等单位。目前国内单通道方案(一个发射机测一点)已作为仪器生产, 多通道方案(一个发射机同时载波几个信号)正在研制中。可以说, 遥测的原理和技术均已初步解决, 有待于通过广泛应用实践来考验和提高。

内燃机零件的疲劳研究开展较迟, 1965 年左右长春汽车研究所研制了谐振式弯曲疲劳试验机, 并对 NJ-70 型、CA-10 型等汽油机球铁曲轴进行了研究。文化大革命后, 他们更对 4100、6120、6130、4115、495 等型柴油机曲轴进行弯曲疲劳强度研究, 取得了显著的成果。其它单位多在 70 年代以后才开始这方面工作, 目前, 西安交大、郑州柴油机厂、湖北柴油机厂、北京内燃机总厂以及上海市内燃机研究所等单位均建立了疲劳试验机, 有的已有研究报告发表。现在日益明确疲劳是高速机械损坏的主要形式, 国外有统计资料称 90% 以上机器是由于疲劳破坏的。但是, 目前我国内燃机行业的疲劳研究工作还只限于研究曲轴断裂, 其它零件除了北京内燃机总厂进行了 4115 型柴油机连杆疲劳对比试验外, 尚未见开展; 研究方法也还限于在谐振式弯曲疲劳试验机上耐久试验。显然, 是很不够的。

振动, 众所周知, 在扭转振动方面的理论研究和测量工作, 上海交通大学许多年来进行了有效的努力。大型柴油机的扭振测量和减振措施等基本上都已解决。采用电子计算机的计算程序也已完成。中小型柴油机近年来高速强化后, 扭振问题也日益严重, 在这个新领域内有待于开展大力研究。上海柴油机厂和上海交通大学所进行的凸轮轴偏振的研究, 是一个可喜的成果。至于机械振动的研究, 无论整机还是零部件都已提到日程上来了。这不仅是振动本身, 而且密切关系到噪音和可靠性。但是, 目前只有少数单位采用盖克仪等简单仪器测位移、加速度等, 个别单位在缸套穴蚀研究中采用新型传感器测量过有关振动指标, 但总的说来, 研究工作几乎还是一个空白点。

其它如腌漆技术远在 1962 年 711 所就在东风轮主机研制中有所应用，等等，不一赘述。

以上就是我国开展内燃机零件结构强度研究工作的一个梗概。总的讲来，还是处于创业阶段。与国外水平有差距。与我国内燃机工业迅猛跃进的要求相比，更是任重道远。“创业难”，难就难在需要做的工作很多，需要解决的问题也很多，在千头万绪中，如何根据社会主义建设的需要分清轻重缓急，抓住主要矛盾，使我国内燃机结构强度研究工作尽快地更上一层楼，是值得认真讨论的。

就我们所知，我国内燃机结构强度研究的主要发展方向是否可以提出如下几点：

1) 开展我国内燃机工况和载荷状态的调查研究。

准确地确定各种使用条件下内燃机运转工况和载荷状态是零部件强度设计和研究的前提。目前，这方面的调查研究很少，缺乏各种工况和外载荷数据，不仅强度计算只能根据假设条件或陈旧的外国资料进行，设计有较大盲目性；而且零部件强度的试验研究也缺乏准确模拟的依据。因此，许多强度问题在设计中没有解决而隐藏起来，随后在样机和使用试验中表现出来，造成产品定型困难，研制周期很长。毫无疑问，进行这类调查研究，必须有一个普及测试技术和强度研究的相辅过程。二者都是当务之急。

柴油机零件的损坏事故的调查、分析和统计工作，也是一个重要方面。根据大量统计的零件损坏特点，不仅为结构强度研究提供了丰富的课题和根据，而且从统计中也可找出一定规律和对策，以指导设计。

2) 加强更准确地模拟实际工况的测试技术的研究。

例如，在光弹性方面目前还都是属于静光弹测试，但是内燃机零件承受的是动载荷，乃至还有热载荷，因此，更切合实际工况的动载光弹、热光弹等等就急待于研究开发。再如在疲劳试验方面，目前的试验机是固定载荷、对称循环的弯曲疲劳试验，但内燃机零件在运行中承受的载荷是不断变化的，而且是复杂的（不仅仅是弯曲），这就要求对它们进行随机疲劳试验，研制能产生非对称循环乃至产生随机波的疲劳试验机是十分必要的。其它如活塞动态应力直接测量、电测热应力模拟试验、电子液压振动试验装置（可以产生超低频振动、随机波振动等，从而可以模拟各种实际条件进行试验）等等都是值得研究的课题。

提高现有试验设备（包括校验设备）精度的研究，也是重要的一翼。

3) 尽速地采用先进技术手段来进行强度研究。

例如，激光技术是一门新兴的先进技术，在强度研究中有广阔的应用天地。激光全息摄影光弹性，可同时分别得出模型上的等色线、等厚线和等倾线的图形，因而可以比较容易地分解出主应力来；还可以采用高速激光摄影来研究动态问题。在疲劳研究方面采用激光和超声全息摄影技术研究疲劳裂纹的扩展、早期预测疲劳寿命或监视主要件疲劳累积损伤等。激光全息测振，可以用来测定振动物体在稳态下的振幅分布，也可以用作瞬态测量，精度好且可不与振动物体接触。其它如激光测量活塞温度、激光测量应力（测定位移→应变→应力）等等，不一而足。

再如，随着晶体管 and 大规模集成电路的发展，遥测技术已经成为现实了。不仅如前述可以测定应力，而且可以遥测活塞温度和振动。遥测的关键在于电子器件的小型化和可靠程度，这方面与国外还有一定差距。国外遥测发射器已做到体积仅 4 厘米³，使用温度范围 -50°~150°C，所受重力加速度可达 30000g 以上，发射与接收之间距离可达 150 米，可测和发射大到 2500 微应变和小到 2 微应变，测量温度可达 600°C。

其它如采用电子计算机进行有限元素法计算和数据处理；应用电子显微镜或电子探针等分析零件断口，以查明零件破坏原因等等都有着巨大的意义。

4) 使测试技术和强度研究简化自动化。

例如光弹性自动扫描的研究，即采用光电转换装置（如光电倍增管等）将测得的条纹值用数字显示出来，并可绘成条纹图形，以至输入电子计算机直接变为应力，从而提高实验精度，加快实验速度。

再如，许多零件的强度计算或测量数据处理，应尽快与工程数学部门结合，建立标准计算程序，从而可以更有效地应用电子计算机技术。

这项工作的进行，对推广和普及结构强度研究是有很大意义的。

5) 开拓强度研究的新领域。

例如，在模型研究中，采用硅橡胶、铝、铝粉增强环氧树脂以及纸板等机械模拟、模拟实际工况的专题零件试验台等都还有待尝试。

再如残余应力的测定和研究是十分重要而迫切的，它可以作为零件故障原因的重点是在工艺方面，还是在结构方面的主要判据。残余应力的测量可以用电测，也可以用X射线法，国内已有单位掌握了这些技术手段，但至今在内燃机零件的研究中还没有应用。而像热应力、内应力、自重应力、接触应力等测量技术的研究，目前都还是待拓的新领域。

其它如疲劳的程序试验方法在航空方面已广泛应用，在内燃机零件研究方面的前景如何……等等，都值得认真探索。

除了上述五个方面以外，将有关实验力学的理论与测试技术应用到具体的内燃机强度研究中，还有许多细节而重要的问题，像应变片有效的装置方法、正确地温度补偿等等，也都有着许多创造性劳动的天地。

不言而喻，要完成上述任务决非轻而易举。“思想上政治上的路线正确与否是决定一切的”。必须高举毛泽东思想的伟大红旗，坚持无产阶级政治挂帅，自力更生，艰苦奋斗，必须充分发动群众，实行三结合，在党的一元化领导下，贯彻共产主义大协作（包括其它专业的配合，如必要的仪器设备的研制和生产等等）。这里，还有着广泛而细致的技术组织和管理任务。分别轻重缓急，统筹规划安排，组织力量攻关，经常协调交流。现代科学技术的发展已经使技术组织和管理成为一门极其重要的学科了。

同样，不言而喻，上述任务如果得以加速完成，我国内燃机工业必将有一个巨大飞跃，登上世界先进水平的高峰。

第一部分 内燃机零件的机械应力分析

光弹性及其在内燃机研制中的应用

浙江大学 杨槐堂 谢贻权

提要 光弹性技术已逐渐为广大工程设计人员所采用。本文除介绍光弹性的基本原理和方法外,着重阐述这一方法在内燃机零部件强度设计中的应用。

随着我国社会主义建设事业的发展,在航空、交通运输等部门对于发动机的要求越来越高。特别是设计制造大功率、高速发动机时,除了保证结构的安全可靠外,还必须尽量地减轻重量。因此,了解发动机主要承力构件(例如曲轴、连杆、活塞、增压器叶轮等)在机械载荷与热载荷作用下的应力大小及其分布规律,对于设计人员作出合理设计是非常重要的,是必不可少的。然而,由于发动机零部件形状和载荷形式比较复杂,要进行力学理论分析甚为困难,很有必要借助于实验方法,即实验应力分析的方法来完成。

目前在实验应力分析中光弹性法是普遍采用的技术之一。它在设计方案的比较、应力集中的测量,特别是对于复杂零件的应力分布规律全貌(包括构件内部的应力)的了解尤为优越。因此,对于设计人员来说,熟悉和应用光弹性法这一工具是非常必要的。

一、光弹性试验的基本原理和方法

光弹性是光测弹性力学的简称,它建立在物理光学和弹性力学的基础上。

光弹性试验是属于模型试验。概括地说,它是用具有特殊光学性质的透明材料作成模型置于光弹性仪的光学系统中,当模型承受载荷时便可获得图1所示的干涉条纹图;然后根据这些条纹借助于弹性理论,求出模型边缘和内部各点应力的大小,再换算成实物上对应的应力。

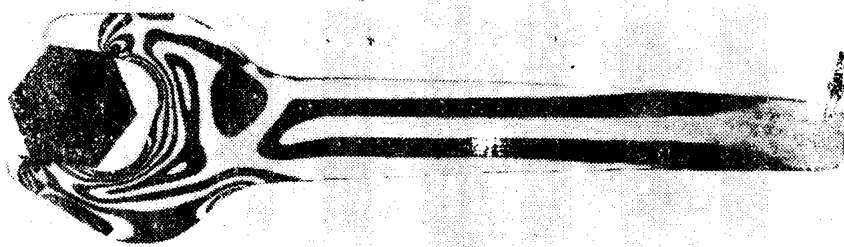


图1 光弹性干涉条纹图

制作光弹性试验模型的材料在光学上有些特殊的要求。这种材料应是透明的,在初始状态是光学各向同性的,在受力后成为光学各向异性,沿各个方向的折射率的大小不相等;当偏振光射入模型时就被分解为两束平面偏振光,这两束偏振光的波动平面分别平行于模型内的主应力 σ_1 和 σ_2 ,并以不同的速度透过模型,因此射出时即产生一光程差。这种现象与光

学晶体所显示的双折射效应完全相同，但这里的双折射是人工的，由模型内各点的应力状态所控制。赛璐璐、环氧树脂塑料等都是明显具有这种特性的材料。

人工双折射效应把力学和光学这两个物理现象建立了联系。经研究指出，具有人工双折射效应的弹性体中，主应力方向与主折射率方向相一致；同时主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 和主折射率 n_1 、 n_2 、 n_3 之间具有下列关系：

$$\left. \begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1 \sigma_1 + C_2 (\sigma_2 + \sigma_3) \\ n_2 - n_0 &= C_1 \sigma_2 + C_2 (\sigma_3 + \sigma_1) \\ n_3 - n_0 &= C_1 \sigma_3 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 n_0 为未受力时材料的折射率， C_1 和 C_2 为常数。

1. 平面光弹性

在上述基础上，我们先来了解平面问题的光弹性试验。在弹性力学中的平面问题包括平面应力状态和平面应变状态，象图 2 中的受力体，其应力分析只是座标 X 、 Y 的函数而与座标 Z 无关 ($\sigma_z = 0$)，为一典型平面应力状态，可用平面模型进行试验。

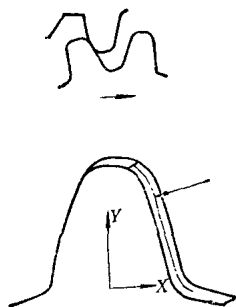


图2 平面问题

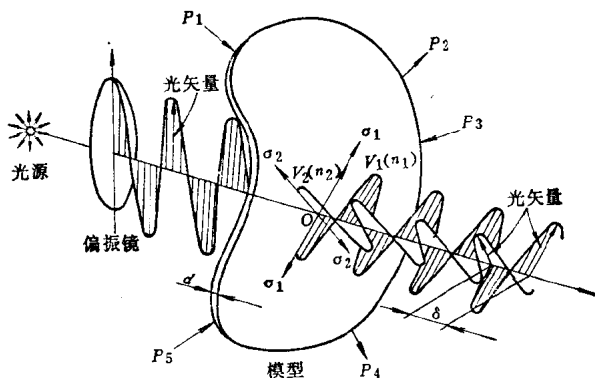


图3 受力模型的双折射现象

我们考察一个厚度 d 的平面模型，模型上某点 O 的两个主应力为 σ_1 和 σ_2 ，相应的主折射率为 n_1 和 n_2 。设 V_0 代表光波在空气中的传播速度，则光波沿两主方向的传播速度分别为

$$V_1 = \frac{V_0}{n_1}, \quad V_2 = \frac{V_0}{n_2}$$

如图 3 所示（图中用一矢量代表偏振光的振动方向和振幅）。这两束偏振光通过模型后产生光程差

$$\delta = \left(\frac{d}{V_1} - \frac{d}{V_2} \right) V_0 = d(n_1 - n_2)$$

将公式(1)代入，得到

$$\delta = C (\sigma_1 - \sigma_2) d \quad (2)$$

上式建立了应力与光程差之间的联系，称为应力-光性定律，即光程差与主应力差值 $\sigma_1 - \sigma_2$ 成正比，与模型厚度 d 成正比； $C = C_1 - C_2$ 称为应力光学系数，它与模型的材料、光源的波长有关。

光程差 δ 可以通过干涉的方法测得。实现干涉的必要条件是必须把从模型透射出的两束平面偏振光波会合于同一平面内波动。最简单的干涉装置如图 4 所示，即在模型前后各安置一偏振镜（偏振镜就是能获得平面偏振光的镜片。当光线通过它时，平行于某一方向的分量都

通过, 垂直的分量都被阻止, 成为只能在某一平面内波动的平面偏振光)。前一个偏振镜又叫做起偏振镜, 后一个偏振镜又叫做检偏振镜 (或分析镜)。

光线通过第一块偏振镜 P_1 后, 该平面偏振光的波动方程为 $P_1 = a \cos \omega t$ (其中 a 为振幅, ω 为频率, t 为时间)。令 P_1 与某一主应力的夹角为 θ , 则 P_1 沿两应力主轴的分量分别为

$$a \cos \theta \cos \omega t \text{ 和 } a \sin \theta \cos \omega t$$

通过模型后这两光束将产生光程差 δ , 相应的波动为

$$a \cos \theta \cos \omega t \text{ 和 } a \sin \theta \cos \left(\omega t - \frac{2\pi\delta}{\lambda} \right)$$

其中 λ 为波长。第二块偏振镜的作用是使这两束光波通过 P_2 的分量产生干涉, 因此它亦称分析镜。当两偏振镜的主轴 P_1 和 P_2 正交时, 通过 P_2 的波动方程为

$$P_2 = a \sin \theta \cos \theta \left[\cos \omega t - \cos \left(\omega t - \frac{2\pi\delta}{\lambda} \right) \right]$$

即

$$P_2 = a \sin 2\theta \sin \frac{\pi\delta}{\lambda} \sin \left(\omega t - \frac{\pi\delta}{\lambda} \right) \quad (3)$$

光强度与振幅平方成正比, 于是通过 P_2 的光强度 I 为

$$I = 2a^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi\delta}{\lambda}$$

或

$$I = 2a^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi C(\sigma_1 - \sigma_2)d}{\lambda} \quad (4)$$

由于模型内部各点的主应力方向与主应力差值是连续的, 而且各不相同, 因而光强度亦各点不同, 观察时将会看到明暗相间的干涉条纹。这些干涉条纹可分为两类:

第一类干涉条纹是当 $\theta = 0^\circ$ 和 90° 时, 由于光的消失而出现的。这些条纹代表了主应力方向与偏振镜光轴方向相同的一系列点的轨迹, 称为等倾线 (图 5)。图 5b 中等倾线上标记的参数就代表了线上各点主应力的方向角。

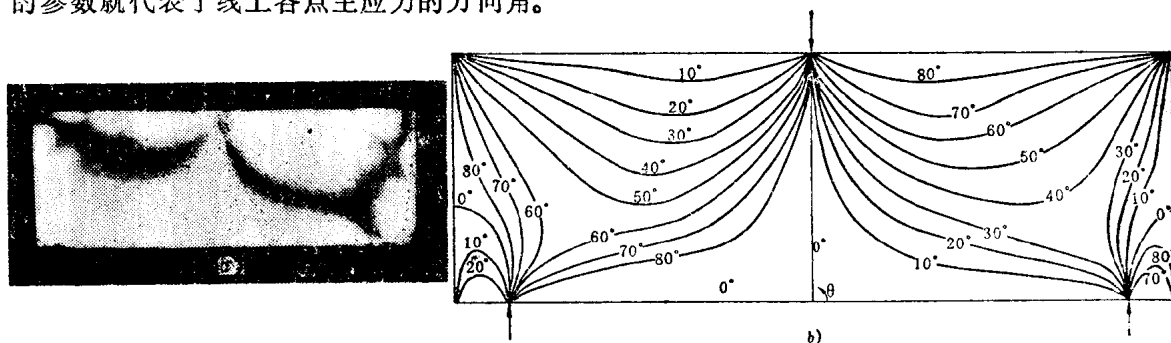


图 5 简支梁在集中载荷作用下的弯曲

a) $\theta = 30^\circ$ 的等倾线照片; b) 等倾线图

⑤ 这里忽略了通过模型的公共光程差, 它对于光弹性效果没有影响。

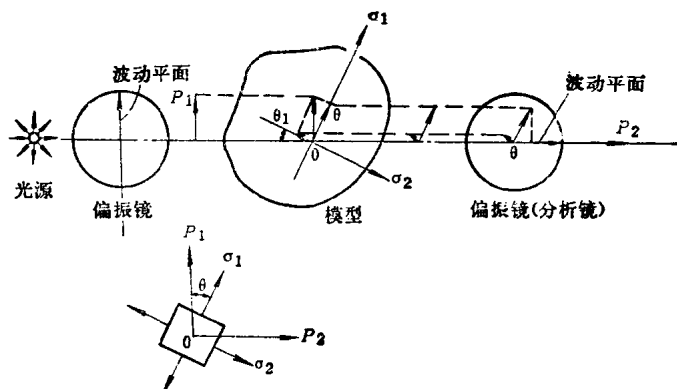


图 4 平面偏振光干涉系统

第二类干涉条纹是当

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n\lambda/cd \quad (n=0, 1, 2\cdots) \quad (5)$$

时出现。它代表主应力差值相等的一系列点的轨迹，称为等差线。令 $\sigma_0 = \lambda/C$ ，则等差线上每一点的主应力差值

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n \frac{\sigma_0}{d} \quad (6)$$

式中 n 称为条纹序数； σ_0 称为材料条纹值，可以通过应力状态已知的简单试验进行测定。常用的环氧树脂光弹性塑料的 σ_0 约为 12~15 公斤/厘米·条。

以上的讨论是对单色光源讲的。如果采用白光作光源时，也就是同时用所有不同波长的可见光作为光源，当光程差等于某一波长或其整数倍时该光波就消失，而其余光波仍可不同程度地通过，因而可获得一幅彩色的等差线（或称等色线）图（见本书封面及参见图 5）。

根据等色线的色彩变化，可以确定条纹序数的高低。光程差为零的区域，所有光波都被干涉而呈黑色，其条纹序数为零。随着光程差的增加，色序总是按黄→红→绿的规律变化，指明了条纹序数增加的方向，从而可确定其他各条等差线的条纹序数。

必须指出，采用图 4 的平面偏振光试验装置，等倾线和等差线同时出现，对测量带来不便。采用圆偏振光，其光向量为—旋转矢量，不具有方向性，可以把等倾线去除，图 1 与封面上的等色线图就是在图 6 所示的圆偏振光试验装置上得到的等差线。在偏振光后面安置一块 $\frac{1}{4}$ 波片（即产生光程差为 $\frac{1}{4}$ 波长或相位差为 $\frac{\pi}{4}$ 的镜片），当波片主轴与偏振光成 45° 时，偏振光通过波片后沿波片的主轴分解成两束互相垂直的光波为

$$\frac{\sqrt{2}}{2} a \cos \omega t \text{ 和 } \frac{\sqrt{2}}{2} a \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\sqrt{2}}{2} a \sin \omega t$$

它们合成的矢量为—无方向性的旋转矢量。模型后的 $1/4$ 波片是为了补偿第一块波片而设置的。

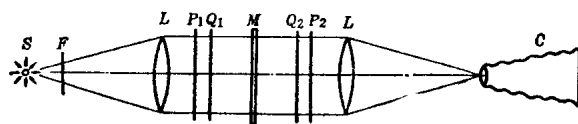


图 6 圆偏振光光弹性试验装置

S—光源；F—滤色片；L—透镜；P₁—偏振镜；Q₁、Q₂— $1/4$ 波片；
M—模型；P₂—分析镜；C—照相机

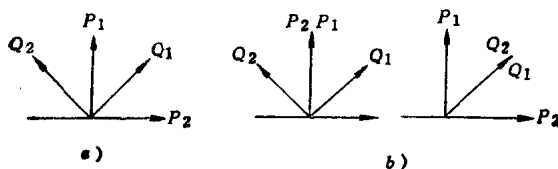


图 7 明、暗背景光学元件布置方案

a) 暗视场；b) 明视场

当偏振片与 $1/4$ 波片的光轴相对位置配置不同时，可以获得明的或暗的视场。采用图 7a 的正交系统可以得到暗视场（或称暗背景），它可以获得 $n=0, 1, 2, \cdots$ 的整数级条纹。当采