

剪切干涉仪及其应用

徐德衍 编著

.3

机械工业出版社

前 言

干涉术、干涉仪在现代测试技术中的地位举足轻重、令人瞩目。剪切干涉仪是干涉仪中极为重要的一类。近二十年来,随着激光与计算技术的飞速发展,剪切干涉仪理论、技术、应用亦在不断扩展。它的重要性和优越性越来越被更多的科技人员所理解、认识和重视。

为了使广大光学工作者了解、熟悉、掌握、运用剪切干涉仪的独特性能、基本理论、制作技术、评价方法及应用范围,以利于解决面临的各种各样待测任务,本人根据从事剪切干涉技术研究的体会并结合有关资料写成此书。

在编写中,没有涉及与剪切干涉仪有关的全部内容,而是着重描述研究较深、应用最广的横向剪切干涉仪。本书编写思想是,力求面向光学工厂有一定文化水平的广大工人和技术人员,使之在解决检验、装调、验收等各种实际工作中发挥应有的效能;对此法虽有所了解,尚缺乏实践的光学和激光研究单位从事检测、计量、象质评价的工作人员,提供更多的技术细节、实施途径及应用实例,使之成为得心应手的参考书。同时对培养即将从事工作的大专院校光学专业学生独立承担和解决光学检测及物理实验能力定有补益。书中某些章节对高等院校光学教师以及从事激光与红外技术、信息处理与全息术、实验力学等领域的工程技术人员或许会有一定的参考价值。总之,想把本书写成对需要了解、使用剪切干涉仪的同行是一本入门的读物;对已有所了解、尚缺

乏实践的同行是一本实用的参考书。这一思想能否实现或实现了多少，留待读者品评。

本书承中国科学院上海光学精密机械研究所所长王之江教授、天津大学精仪系主任张以谟教授审定目录和指导，兵器工业部三七八厂张炳勋高级工程师、上海光学仪器研究所副所长钱振邦同志给予热情帮助。编写中，得到中国科学院上海光学精密机械研究所有关同志的支持与协助，副研究员邹海兴同志为全书审定花费了大量精力并提出许多有益的建议，陈淑琴同志为本书尽快脱稿付出了辛勤劳动，在此一并深致谢忱。

专论干涉仪的著作，国内前辈和同行从未出版过，即使在国际书林中，亦属凤毛麟角；专论剪切干涉仪的著作国内外均未所见。因之，常因内容布局取舍、背景主题兼备等所苦。在此，将此初试，奉献予读者。限于学识浅薄，经验有限，书中谬误疏漏定会存在，敬请读者不吝赐教，以求改正。

徐德衍

目 录

前言

第一章 剪切干涉仪概述	1
§ 1.1 剪切干涉仪的产生	1
§ 1.2 剪切干涉仪的发展简史	3
§ 1.3 剪切干涉仪的特点	6
§ 1.4 剪切干涉仪的应用概况	8
第二章 光干涉的基本理论与技术	11
§ 2.1 光的波动性及其数学描述	11
§ 2.2 波动方程中特征量的基本概念与意义	13
§ 2.3 光的干涉现象与相干条件	19
§ 2.4 光干涉的普遍规律	21
§ 2.5 干涉条纹宽度与形状	25
§ 2.6 分光方法与分光元件	31
§ 2.7 平板干涉及其重要性	38
§ 2.8 白光干涉	48
§ 2.9 剪切干涉的初步知识	52
§ 2.10 剪切干涉仪中的白光光源与激光光源	58
第三章 波前横向剪切干涉仪	63
§ 3.1 引言	63
§ 3.2 波前剪切干涉仪的主要类型与特点	63
§ 3.3 横向剪切干涉仪的基本原理	72
§ 3.4 由横向剪切干涉条纹求解未知波面形状	87
§ 3.5 剪切量、参考点与灵敏度	104
§ 3.6 影响剪切干涉图形对比度的因素	112
第四章 棱镜式横向剪切干涉仪	126

§ 4.1	棱镜剪切干涉仪的基本原理	126
§ 4.2	棱镜剪切干涉仪的几种型式	129
§ 4.3	棱镜固有象差的消除	137
§ 4.4	棱镜剪切干涉仪的结构与使用	139
§ 4.5	剪切干涉条纹判读与解析	147
§ 4.6	一些具体问题及措施	158
第五章	平板式横向剪切干涉仪	164
§ 5.1	引言	164
§ 5.2	单平板剪切干涉仪	165
§ 5.3	双平板剪切干涉仪	184
§ 5.4	三平板环路剪切干涉仪	187
§ 5.5	四平板横向剪切干涉仪	201
§ 5.6	横向旋转剪切与横向平行剪切的数理关系	202
第六章	光栅式横向剪切干涉仪	207
§ 6.1	引言	207
§ 6.2	光栅检验法概况	207
§ 6.3	朗奇检验原理	209
§ 6.4	朗奇光栅横向剪切干涉仪	215
§ 6.5	非球面的朗奇检验	237
§ 6.6	朗奇检验中的两个问题	243
第七章	剪切干涉仪的应用	248
§ 7.1	概述	248
§ 7.2	光学材料均匀性检验	252
§ 7.3	光学元件检验与测量	257
§ 7.4	光学系统装校、准直与检验	269
§ 7.5	在非球面检验中的应用	277
§ 7.6	光学传递函数的自相关测量	304
§ 7.7	在激光参量测试中的特殊用途	322
§ 7.8	在信息处理及全息术中的应用	329

§ 7.9 在气体动力学研究中的应用	342
§ 7.10 在其它方面的应用	348
第八章 剪切干涉术的新近发展	358
§ 8.1 引言	358
§ 8.2 显微剪切干涉仪	359
§ 8.3 全息剪切干涉仪	361
§ 8.4 散斑剪切干涉技术	365
§ 8.5 红外剪切干涉仪	368
§ 8.6 声光剪切干涉仪	370
附录	374
I 某些干涉光路干涉条纹的标尺因子及波长转换	374
II 梯形棱镜剪切干涉仪工艺技术要求	376
III 用 BASIC 语言编制解析剪切干涉图程序的流程图	380
主要参考文献	388

第一章 剪切干涉仪概述

§ 1.1 剪切干涉仪的产生

光学在现代科学技术中占有重要地位。在光学应用中，光干涉有其特殊的意义。许多精密测试工作，都是依靠光干涉方法实现的，对于某些测试任务的解决，干涉法甚至是唯一可行的理想方法。六十年代以来，由于激光的出现，以及光电子学和计算技术的飞速发展，大大扩展了干涉仪的应用范围和能力。今天，很难想象，哪一个精密物理实验和精密计量部门，未曾应用过光干涉计量技术。

干涉仪出现距今已有一百多年历史，尽管干涉仪的发展日趋完善、多样、复杂，但这并未使最初经典干涉仪，诸如菲索(Fizeau)干涉仪、雅敏(Jamin)干涉仪、迈克尔逊(Michelson)干涉仪等原型的应用失去作用。而是一方面最大限度地揭示和挖掘它们的应用潜力，另一方面，在原型基础上改型和发展，以适应现代科学技术发展中名目繁多的要求。

但是，无论经典干涉仪，还是改型后的新型干涉仪，一个共同的基本原理是，用一个标准波面与被测波面之间形成干涉图样（例如，干涉条纹弯曲量，或者干涉条纹变化量等）作为度量的依据。

除球面菲索干涉仪和不等臂泰曼-格林(Twyman-Green)干涉仪之外，大多数干涉仪至少需要一个或几个高精度的

标准镜面，作为产生和传递标准（参考）波面的依据和手段。其标准镜面口径至少需要等于甚至大于被测元件或系统的口径。当被测元件或系统口径超过一定范围，例如，大于 $\phi 300\text{mm}$ 时，干涉仪的造价颇高，难度极大，甚至不大可能制造。因此，这种要求明显地限制了较大光学镜面或系统的干涉检验。另外，一般说来，普通干涉仪的价格昂贵，使用效率低，工作环境（温度、湿度、振动、气流等）要求较苛刻，而且，往往需要专门技术人员操作，调整花费时间，仪器又不能随身携带随处使用，因此，在应用上受到很大的限制。

利用不等臂干涉仪检验大型镜面，由于振动等外界干扰，干涉图样时而呈现强烈的抖动，在防振条件较差的光学检验台上，或是在天文台址以及大型光学发射系统或接收系统作现场检调时，尤其如此。因而，这类干涉仪器也限制了应用于检验大型镜面或系统的可能性。此外，如果检验非球面，不等臂干涉仪应备有专为被检验对象设计的光学系统波前校正器。这种补偿器光学系统的计算、磨制、装调、检验都需要付出相当代价，并非易事。

光学技术人员渴望寻求一种对外界干扰不甚灵敏，制作简单、携带方便、操作容易、造价低廉的干涉仪，能够检验大口径普通镜面、特殊镜面或大范围的气动流场等等。

另外，运转中的激光器，输出波面参数与性能的干涉检验，很难想象可以预先制作一个与之相比较的标准激光波面。

所有这些，导致一种不需要标准波面的波前剪切干涉仪^①应运而生。

① “剪切”一词，译自英文“*Shearing*”、俄文“*Сдвиг*”，国内译名尚未统一，诸如被译为“错位”、“切变”、“剪移”等，建议统一译为“剪切”。

这种干涉仪的基本原理是，以被检验波前与其自身的、被剪开的波前之间在重叠范围内相干涉，来评价被检验波前本身的缺陷。

已经实现的剪切干涉仪，有几种类型。就波前的剪切方式而言，可以分为横向的，径向的，旋转的，翻转的等。按剪切量固定与否，可以分为固定剪切干涉仪和可变剪切干涉仪两种型式。

从使用观点出发，横向剪切干涉仪获得了最为广泛的应用，因此，在描述剪切干涉仪时，在不特别指明的情况下，一般就是指横向剪切干涉仪，这是本书将要介绍的主要内容。

§ 1.2 剪切干涉仪的发展简史

1856年，雅敏设计的干涉仪或许是世界上最早的干涉仪，后来被称为雅敏干涉仪。

第一台剪切干涉仪是由维茨曼(Waetzman)于1912年设计的平板剪切干涉仪，并付诸于透镜象差的测定^[1]。

1926年，意大利物理学家朗奇(Ronchi)将低频光栅置于光束会聚点附近观测透镜象差^[2]，这种由光栅衍射分离出许多衍射波叠加产生的干涉，也被视为波前横向剪切干涉仪。

利用晶体双折射作用将光束分成两部分的干涉仪，也属于剪切干涉仪。早在1931年，苏联著名物理学家列别捷夫(Лебедев)用偏振干涉仪在苏联首先实现了光波剪切干涉^[3]，1938年，鲁奴维尔(Lenouvel)兄弟用渥拉斯顿(Wollaston)偏光片设计了一台剪切干涉仪，并在同年发表了他们的成果^[4]。后来，人们应用不同形式的偏光镜，实现不同形式的剪切。在用光学传递函数概念评价光学系统象质之

后，自相关法测量光学系统传递函数的一种方式，就是用偏光剪切干涉仪进行的〔5〕。

应该指出的是，鲁奴维尔兄弟为剪切干涉仪小型化设计做出了开创性的工作。除了上述成果外，1938年，他们还发表了棱镜剪切干涉仪的研究成果〔4〕。在今天，他们设计的棱镜剪切干涉仪仍然被人们沿用。遗憾的是，后来几年里是剪切干涉仪发展史上的沉寂时期，并没有引起人们的关注。无怪乎1964年8月，在澳大利亚悉尼(Sydney)召开的国际光学会议上，诺马斯基(Nomarski)指出，应该把发明棱镜剪切干涉仪的荣誉奉送给鲁奴维尔兄弟〔6〕。

以前，某些光学工作者误认为，贝茨(Bates)于1947年基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪设计了第一台剪切干涉仪，并在一些书刊中以贝茨的剪切干涉仪作为经典的剪切干涉仪加以叙述。

贝茨剪切干涉仪的特点在于，过去，马赫-曾德尔干涉仪用于平行光路中，而贝茨把它应用于检验透镜的会聚光路中，并成为可变剪切干涉仪的雏型。由于贝茨剪切干涉仪的某些缺点，后来，德鲁(Drew)改进型的贝茨剪切干涉仪〔7〕，不仅在两支光路中自动地进行了完全补偿，而且简化了标准镜面数量，成为后来又一种类型棱镜剪切干涉仪的基础。

一些年来，关于棱镜剪切干涉仪的简化、改型、创新及应用成为某些光学工作者的中心课题。尤其是布朗(Brown)、桑德斯(Saunders)等人做了大量工作〔8、9〕，使得从随机可变剪切改进为固定剪切，从试验装置转为市售产品。用两块或几块棱镜胶合在一起构成剪切量固定的棱镜剪切干涉仪，向小型化迈进了关键的一步。在这方面，布赖斯(Bries)〔10〕、默蒂(Murty)〔6、11〕等人也曾做过相应的工作。

以雅敏干涉仪的一块简单平面平行平板玻璃，以及后来发展的两平板、三平板剪切干涉仪，在激光出现以后，从理论和应用上，取得了迅速的发展。默蒂最早于1964年报导过用He-Ne激光做光源的单平板剪切干涉仪^[12]，因而，又有人称之为“默蒂干涉仪”。与此同时，默蒂与马拉卡拉(Malacara)^[13]及凯利(Kelley)和哈根维斯(Hargeaves)^[14]等人又做过进一步研究。稍后，谷口纪男^[15]、卢里(Lurie)^[16]及瑞利(Riley)和高斯诺(Gussinow)^[17]从应用角度出发，对被测波面剪切干涉条纹表达式及解析方法进行过有价值的数学推导与描述。这为平板剪切干涉仪的各种应用提供了理论依据。

剪切量可调的可变棱镜剪切干涉仪，在某些应用中更为有利。其中，默蒂^[6]及尼索南(Nyyssonen，后来改名为D. N. Grimes)^[18]在棱镜分光面之间采用油膜方案是实现剪切量连续可调的可行方法；古斯塔弗逊(Gustafsson)与卡拉瓦基(Karawacki)^[19]以及哈瑞哈兰(Hariharan)^[20]分别以调节棱镜或两平板间空气间隔方式达到可变剪切也是一种可取方案。另外，哈瑞哈兰与森(Sen)^[21]以及王之江^[22、23]设计的三平板环路剪切干涉仪，剪切量可调、剪切方式可变，可以进行多种功能测量，并为自相关测量光学传递函数提供了可能。

值得指出的是，横向剪切干涉图形判读并不象普通干涉仪那样简单、直观，这正是未被某些人采用的主要原因之一。然而，剪切干涉仪的发展史，也正是伴随解析剪切干涉图形各种方法不断完善的历史。在这方面，德鲁^[24]，布朗^[8]，桑德斯^[9、25、26]，马拉卡拉和门德茨(Mendez)^[27]等人，从解析法到作图法求解波面都做过不同程度的讨论，并

给出了干涉图形解析的若干实例。达顿(Dutton)^[28]、尼索南与杰克(Jerke)^[29]、里默(Rimmer)^[30]等人用计算机自动处理一维剪切干涉图形,并把这一方法推广到两维剪切干涉图形的处理上。这对非旋转对称波前的解析具有重要意义。最近,波兰的杜吉克(Dugik)对一般剪切干涉图形的数学描述与网格求解法^[31],苏联的哈里托诺夫(Харитонов)^[32]以及果什科夫(Горшков)等人^[33],在自动处理剪切干涉图形及非球面剪切干涉图形的波面求解与误差分析等工作,都具有实际的参考价值。

剪切干涉仪日趋发展,显示了方兴未艾的势头;而新兴现代光学技术的发展,为剪切干涉仪的进一步发展与应用开拓了新的场地,诸如全息剪切干涉仪,激光散斑剪切干涉仪,激光显微剪切干涉术,红外剪切干涉仪等等相继出现,使剪切干涉仪的内容和意义更加广泛、更加丰富了。

§ 1.3 剪切干涉仪的特点

剪切干涉仪是干涉仪的重要的一类,它既具有普通干涉仪的某些特性,又有它本身的某些独特性能。现归纳如下:

1) 所有干涉仪都是以光波长的倍数或分数为度量单位,精度高,灵敏度高。

2) 各种干涉检验方法,大都可以进行定量检验。剪切干涉仪也能进行定量检验,获得定量结果。只是由于没有标准波面,被测波面变化与干涉条纹弯曲的对应关系,不如普通干涉仪条纹那样明显、直观。分析波面变形比较麻烦,不象普通干涉仪那样方便。这是剪切干涉仪的主要缺点。

3) 普通干涉仪检验镜面或系统,一般受到标准镜口径的限制。大部分剪切干涉仪,不受口径大小的限制,从原理上

讲,可以检验任意尺寸的 镜面或 系统。加上一定的辅助元件,可使检验范围十分广泛。

4) 一般说来,普通干涉仪必须使用单色光源或准单色光源才能获得 对比度良好的干涉图样。对于某些剪切干涉仪,由于相干的两束光之间程差很小,接近于等程干涉,因而对光源无特殊要求,一般仪器用的白炽灯泡即可清晰观测到彩色剪切干涉图样。如果适当控制光源狭缝宽度,非常容易得到对比度很高的剪切干涉图样。

5) 普通干涉仪一般是非等程干涉,对空气扰动、地面振动等外界干扰相当灵敏,在无防振措施的工厂、车间、现场使用尤其如此。剪切干涉仪属于等程干涉,对外界干扰不甚灵敏,无防振条件下也能清晰、稳定地观测干涉条纹。

6) 普通干涉仪因标准镜面反射率已定,对被测镜面反射率有相应的要求,若被测表面反射率与标准表面反射率差异较大,条纹对比度将明显降低。对棱镜剪切干涉仪来说,对被检验镜面或系统无反射(透过)率要求。在光学车间的加工过程中,随时擦干净镜面,便可以进行剪切干涉检验。原因很简单,一强光进入干涉仪分成等强度的两束较强的光,一弱光进入干涉仪,同样分成等强度的两束较弱的光,因而,总可以得到对比度良好的干涉图样。

7) 各种(棱镜、平板、光栅)剪切干涉仪,结构都十分简单,加工制作容易,与普通干涉仪相比,成本费用极其低廉。由于体积小,简单,因而携带方便,随处可以使用。调整也较简单、方便,毋须专门的操作人员,一般工人很容易掌握、使用。

由以上可知,尽管剪切干涉仪存在某些不足,也确实有其特色及可取之点。因此在选取检验方式时,应权衡各方面的

利弊，确定廉价、简易而又满足要求的检验方法。

目前，剪切干涉仪的日趋发展和广泛应用，正说明它是一种可取的检验方法。

§ 1.4 剪切干涉仪的应用概况

由上节可知，剪切干涉仪几乎完全克服了普通干涉仪的缺点，并且又具有其独特之处。因而，已成为干涉计量学中一个重要方面。

剪切干涉技术与剪切干涉仪的应用较为广泛。

在光学检验中，它可以用来检验一般光学零件、大型光学镜面及各种光学系统的质量。例如，美国口径 2.1 m 望远镜主镜^[34]，苏联口径 1.05 m 球面反射镜^[35]及口径 6 m 巨型望远镜的非球面主镜^[36]都曾应用剪切干涉仪进行过检验，并相应地给出了定量结果。我国曾把口径为 1.2 m 的大型平面镜应用剪切干涉仪，采用“康蒙”(Commun)方案作为主要检验方法之一。最近，剪切干涉法也应用于我国 1.58 m 天体测量望远镜主镜的检验。

在光学测量中，应用剪切干涉仪可以测量光学零件参数，检验仪器精度和评定光学仪器装配质量等。例如，测量平行平板的平行差，调校准直系统，鉴定扩孔后激光束的准直性，测量准平面波的波面曲率半径，检查光学系统中零件装校的中心偏差及装夹变形等。

应用剪切干涉法，可以检验各种大尺寸光学材料：玻璃、晶体等均匀性及其它缺陷。

特别应该指出的是，剪切干涉仪在监测激光束波面，尤其对监测运转中的高功率钕玻璃多级放大器的激光束波面有其特殊的意义，成了获得激光光束性能及参量的重要手段之

一〔37〕。

众所周知，实现计算光学传递函数的两大方法之一即是自相关法。在光学传递函数测量上，实现自相关法的手段，就是各种不同形式的剪切干涉法：有多板复杂型的〔38〕、单板简单型的〔39〕、光栅型的〔40〕、偏光棱镜型的〔5〕；有固定剪切的〔41〕、可变剪切的等等。所有这些不同类型的剪切干涉仪，在不同目的的光学传递函数测量中，都获得了实际应用。

剪切干涉仪在特殊光学元件，尤其是在非球面检验中的应用是一个重要方面。因为人们很难制作一个理想的待测非球面波形与实际的非球面波面进行“零检验”，但可以通过理想的非球面波形的理论剪切干涉图形与实际检验出的剪切干涉图形进行比较，得出非球面的面形偏差。另外，为了检验非球面而设计的波前补偿器，其设计、制作、装校等方面的质量，将从与设计的非球面波形的符合程度中反映出来。这也只能用上述类似的方法检验。

以前，气体动力学的流场研究，渴望在一个较宽阔的范围内提供更多的信息。这对于传统的马赫-曾德尔干涉仪是较困难的。剪切干涉仪的应用，尤其在激光出现以后，为这一领域的研究展现了新的前景。

近年来，剪切干涉术已扩展到全息术、光学信息处理、激光散斑以及红外技术等各个领域，并获得了重要应用。与剪切干涉术相关的新方法、新技术、新仪器亦在不断地出现。

至今，剪切干涉术的应用还在不断地开拓。例如，最近人们推荐用剪切干涉仪精确控制焦点位置，以便测量单透镜材料的折射率〔42〕，为透镜折射率无损快速测定提供了一种

简易可行的新方法。

前不久，基南 (Keenan) 研究了一种不用标准参考面而接近绝对准确的测量光学表面的新方法〔43〕，其实质是将变形的面形与纯数学表面相比较。他提醒人们，之所以获得如此高的精度，原因在于使用了不会受标准面干扰的伪剪切干涉法，因为“标准面”本身就是一个误差源。

第二章 光干涉的基本理论与技术

光干涉的基本概念、理论与技术，对于研究和应用任何一种干涉仪都是必需的。过去，这方面内容虽然在某些光学书籍中曾有过不同程度地描述，但是，为了使本书易于看懂，仍有必要对后面几章常用的有关这方面的内容作一系统而又简略的回顾与归纳。

§ 2.1 光的波动性及其数学描述

光是一种波动。由于光波是电磁场的振动，所以把光波称做电磁波。不仅光波是电磁波，比光波波长长的微波，无线电波；比光波波长短的X射线、伦琴射线都是电磁波。

许多光学现象都是光波电场引起的，光波的磁场并不起主导作用，所以，用振动曲线描述光波时，通常略去磁场的作用。

为了从数量上分析光波振动规律，必须把任何一个光波的运动状态用简谐运动来描述，即光波按正弦曲线规律作周期性的起伏振动。

如以 x 坐标表示光波运动的位移量，以 y 坐标表示振动的

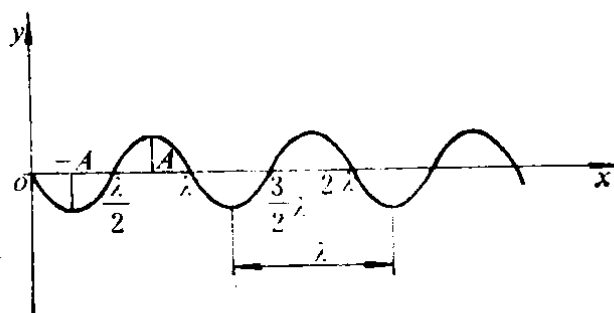


图2-1 光波振动示意图