

光学干涉图的处理与判读

〔美〕A. H. 格恩瑟 D. H. 利本伯 编



机械工业出版社

光学干涉图的处理与判读

[美] A.H.格恩瑟 编
D.H.利本伯

曹天宇 译
董大年 校



机械工业出版社

本书是美国检测与材料学会的光学系浦激光器分委会组织的“干涉图的处理与判读”专题讨论会的论文集。全书收集了论文11篇，主要介绍易于推广的标称平面干涉图的人工判读方法；半自动和自动判读方法及其仪器设备；判读干涉图的象差模拟系统和实时测量的条纹扫描干涉仪与外差干涉仪。

Optical interferograms-reduction and interpretation

A.H.Guenther and D.H.Liebenberg, editors
American Society for Testing and Materials, STP606

光学干涉图的处理与判读

[美] A.H.格恩瑟 编
D.H.利本伯
曹天宇 译
董大年 校

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/8}$ ·印张 $5^{3/4}$ ·字数122千字

1986年5月北京第一版 1986年5月北京第一次印刷

印数 0,001-1,800·定价1.60元

统一书号:15033·6354

原版前言

“干涉图的处理与判读”专题讨论会于1978年1月11日在Ft. Lauderdale, Fla. 举行, 美国检测与材料学会 (ASTM) 电子学委员会F-1中的激光器分委会F01.20主办了这次会议。讨论会由分委会中的光学泵浦激光器学组组织安排。D.H. 利本伯 (洛塞拉摩斯科学实验室) 和A.H. 格恩瑟 (空军武器实验室) 担任了会议主席并承担了这本论文集的编辑。

译 者 的 话

光学干涉计量术在精密测量中占有重要的地位。激光技术、计算机技术与干涉计量技术的结合赋予光学干涉计量术以新的活力。在光学工程上,从光学零件的质量控制到光学系统的象质评价,从经典的光学技术到有待开发的现代的自适应光学工程,光学干涉计量术都是经常使用的可靠方法。

现代干涉计量术不仅保持原来可靠、直观和灵敏度高的优点,而且还发展了光学干涉图的处理与判读方法,使借助干涉方法实现定量测量进入一个崭新的阶段。本书不仅介绍了易于推广的标称平面干涉图的人工判读方法,而且还介绍了半自动和自动判读的方法及其仪器设备;不仅介绍了判读干涉图的象差模拟显示系统,而且还介绍了不需干涉图而直接实时测量的条纹扫描干涉仪与外差干涉仪。

我国一些单位已引进和使用条纹扫描干涉仪及条纹自动判读系统,也有的单位正在研制条纹扫描干涉仪及条纹自动判读系统,将促使我国干涉计量技术进入现代化阶段。本书不仅对从事现代干涉计量术应用与研究的人员提供一本新的参考书,而且对广大的使用平晶进行平面性测量的计量部门提供了一个较合理的手工判读方法,从而对我国平晶检定规程提出了挑战。但愿本书的出版能对光学干涉计量领域的科技工作者和检验人员有所裨益。

本书由曹天宁翻译,董大年校对。龙槐生对部分译稿提出过意见,周淑文、任晓俐也曾为本书做过一些工作,特此

一并表示谢意。由于本人水平有限，难免有错误与不妥之处，敬请读者指正。

1984年

序 言

虽然光学干涉计量术用于评定光学零件和光学系统的“质量”是一种古老而久经考验的技术，但是，激光的出现赋予光学干涉计量术新的活力和更为广泛的应用。这种现象的产生，部分是由于激光作为光源时在下列方面具有独特的优越性质：单色性、相干性、亮度和输出频率的可选择性。激光的发展对光学工业提出了严格的要求，要求有更高的均匀性、更细的表面粗糙度和更小制造公差的高精密而高质量的光学零件。人们只需观察和比较经滤光后的非相干光源和激光光源照明的光学零件所产生的强度分布，便可看到激光出现后带来的巨大变化。

光学干涉计量术除了用于保证和控制零件质量的传统使用方法外，激光还能以评价光束质量及其衰变情况而对光学系统作全面的波面分析。光学干涉计量术作自适应光学控制技术中的指示器是很有潜力的，因此，光学干涉计量术能恢复活力并增加功能在很大程度上应归功于激光。

当人们试图把光学干涉计量术从简单观察干涉图来非常主观判断零件通过或不通过的方法提高到精确评价波阵面，那么在判读、定标和测试过程中的困难与含糊变得更加突出了。

今日的要求——高质量的光学表面误差远小于一个光波波长（或 $\sim 500\text{nm}$ ）；对这些光学材料及其光学表面进行百分之百的检测；满足激光元件扩大生产的需要——都必需

改进精密干涉计量的技术。为满足以上的要求,现有干涉仪的种类、检测方法和结果判读在评价光学零件质量上都碰到了困难。“美国检测和材料学会”的“光学泵浦激光器”分委会学组(电子学委员会F-1激光器分委会F01.02)总结了一些光学检测方法和一种干涉图的人工判读方法来解决这些困难。这些方法都收集在本书附录中。我们承认这些方法只是开始致力于提供一套广泛适用的检验方法与判读方法,使生产厂家和用户足以鉴别贵重激光元件的质量。如果这些方法在鉴别激光元件质量方面确有使用价值,那么必将得到广泛推广、应用、充实和改进。

为时一天的“干涉图的处理和判读”专题讨论会和学习班自然是为了达到上述目的。我们的意图是请干涉计量术的各方面专家对已发表的判读方法提出一个鉴定性的评价,并对“美国检测和材料学会”今后的努力方向提出建议。

这个会议的专题论文集包括了从干涉计量术最简单的应用到先进的和有待开发的应用,例如波阵面分析和自适应光学,这将为全面发展光学干涉计量术打下基础。读者将逐步熟悉一套统一的定义和掌握光学干涉计量的可行方法,同时也将逐步了解存在的不确切和含糊不清的地方。希望本书不仅对行家而且对初学者都是有用的,并希望促进光学干涉计量界的交流。

随着干涉计量术的发展,我们希望几年后能再次探讨这个课题。编者欢迎对本书的目的和ASTM学会今后活动提出意见和建议。

“总结”一章在本书的结尾部分,它包括每篇论文的主要论点。内容相关的各篇论文放在一个专题单元内,以表明其共同点。编者建议先阅读“总结”部分,因为“总结”表

达了本论文集主要内容的总观点，并且指导读者选择他所感兴趣的专题单元。

A.H.Guenther

肯特兰空军基地，空军武器实验室，N.Mex.；专题会议主席及编辑

D.H.Liebenberg

洛塞拉摩斯科学实验室，Los Alamos，N.Mex.；专题会议主席及编辑

序言

- 一、标称平面波面的一种人工判读方法..... (1)
(A.T.格拉斯曼)
- 二、如何判读一幅干涉图..... (10)
(H.D.比斯辛格)
- 三、一种新的半自动的干涉图判读技术..... (27)
(C.A.赞诺尼)
- 四、零位干涉图的自动分析技术..... (39)
(R.C.摩尔)
- 五、干涉图的实时模拟..... (51)
(约瑟夫·杰瑞、戴维·霍姆斯、肯尼斯·泽林格)
- 六、分析干涉计量数据的计算程序..... (70)
(约翰·罗姆斯)
- 七、从干涉图计算波面的数学方法..... (86)
(C.R.海斯利特、W.H.斯旺纳)
- 八、用于激光核聚变系统光学分析的干涉图处理
与判读方法..... (99)
(V.K.维斯旺纳塞、J.E.索尼德、W.S.霍尔、I.利比尔曼、
G.劳伦斯)
- 九、由干涉图确定成象质量和波面形状..... (112)
(B.C.普勒特、S.G.雷诺兹、T.R.霍尔特)
- 十、分析干涉图的装置..... (128)
(戴维·罗逊威特、贝西·阿尔特)
- 十一、外差干涉计量术..... (135)
(N.A.马辛)

附录

I —— 标称平面波面干涉图的暂行判读方法

(ASTM 标记: F529-77T) (142)

II —— 激光棒波面变形的暂行检验方法

(ASTM 标记: F530-77T) (153)

III —— 激光圆片的波面变形和表面平行度的暂行检测方法

(ASTM 标记: F531-77T) (160)

总结

一、标称平面波面的一种人工判读方法

A.T. 格拉斯曼[⊖]

摘 要

干涉计量术是光学工业中广泛使用的一种检测手段,然而至今还没有统一的标准来分析测量结果。美国检测与材料学会电子学委员会F-1激光分委会F01.02把ASTM标称平面波面的判读(F529-77T)作为暂行标准,它确定了被检样品波峰到波谷最大的波面偏差值。把干涉图的实际条纹与等间隔直线的理想图样进行比较,可以得出定量的数据。这种比较方法是把一组直线叠加到干涉条纹上,测出干涉条纹与直线之间的偏差。通过三幅不同尺寸和波面误差的干涉图,在各实验室内用循环测试来评价这种方法,发现其精度与干涉图有关,对二幅干涉图,一幅在633nm时精度为 $1/20\lambda$,而另一幅干涉图精度为 $1/10\lambda$ 。这种方法有着广泛用途,并可以减少单位之间的争议。

关键词:干涉计量术、光学、检测、干涉图。

干涉计量术是光学工业中广泛使用的检测手段。干涉计量术中最费时间、争议最多的一点也许是干涉图的分析。以前对这种分析、分类方法和术语没有一致的标准,因而各个研究人员、质量管理人员、商人、顾客和学生都采用了他们自己的方法。各种不同的方法导致了相互间的混淆和争论。

美国检测与材料学会(ASTM)电子学委员会F-1激

[⊖] 副物理研究员、达顿大学研究所,达顿,俄亥俄25469。

光分委会 F01.02 在为干涉计量术测量光学特性制定标准时，已经觉察到这个问题。所以，在过去几年内，该分委会一直从事于建立干涉图分析的标准。第一个标准即 ASTM 标称平面波面的干涉图判读法 (F529-77T)，只限于那些简单的但却又是常见的和可用人工判读的标称平面波面干涉图。这个标准在《ASTM 标准 1977 年鉴》第 43 节中公布过，可以在 ASTM 处得到复印本。该分委会希望将来能为更新的自动判读方法制定标准。出版论文集订本的一部分动机就是希望该分委会了解新的方法，同时，鼓励使用这些新方法的人们在标准制订过程中进行合作。

这种检测方法假定干涉图是照片或其复制件，并且投影用的辅助设备也是简单的。进行判读所需要的唯一工具是一把尺子和一支铅笔，因而，即使在最小的光学车间或实验室，此方法也是可行的。一组参考直条纹叠加在干涉图上，然后通过比较来确定波面的偏差或光程差 (OPD)，但不能识别特定的象差。

举一个例子就能把这个方法讲清楚，有一幅干涉图，如图 1-1，画一孔径把不满足要求的那部分条纹划出在外。在决定孔径时，必须考虑到放大倍数。下一步是建立有一定斜度和间隔的参考干涉图，作为波面的最佳拟合平面。这可以通过计算平均条纹间隔来实现。如果波面有象散，干涉图中就会出现不均匀的条纹间隔。

把条纹垂直放置，并从左到右记为 1 到 N ，其中不包括长度小于孔径直径 70% 的条纹 (图 1-2)。然后在每一条记过数的条纹上画出中心线。用一直尺，在干涉图上方画一条穿过所有中心线的水平线。在图的底部画第二条平行的水平线。这二条水平线必须穿过所有计过数的条纹。然后量出水

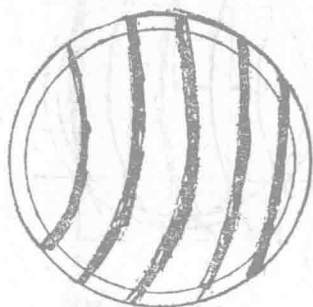


图1-1 带孔径的干涉图

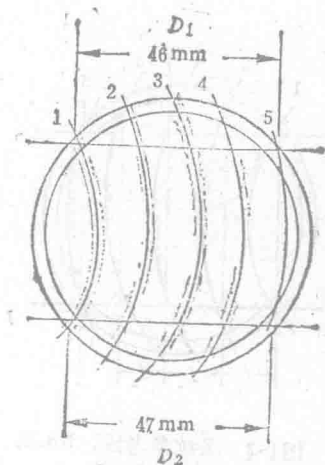


图1-2 计算参考条纹间隔, 条纹编号, 画中心线及水平线

平线的长度, 记上线长为 D_1 , 下线长为 D_2 , 则条纹的平均间距由下列方程求得:

$$f = \frac{D_2 + D_1}{2(N - 1)}$$

式中 f —— 平均条纹间隔;

D_1 、 D_2 —— 水平直线长度;

N —— 条纹数目。

现在参考直条纹的格栅就可以画出来了。画一条直线连接中央条纹的中心线与两条水平直线的交点, 这就是主参考线 (图1-3)。以已经求得的平均间隔为间隔, 对应每一条纹画出与主参考线平行的其它参考线。这些参考线组成了参考干涉条纹图。把每一条纹相对于参考线以左的偏差列表记录, 向右的偏差也作同样处理 (图1-4)。把左偏差极大值和

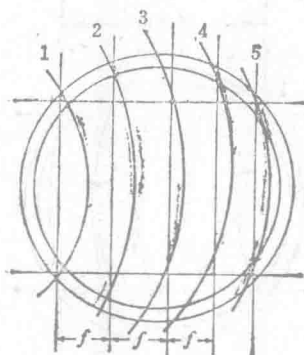


图1-3 条纹参考线, No.3
为中央条纹

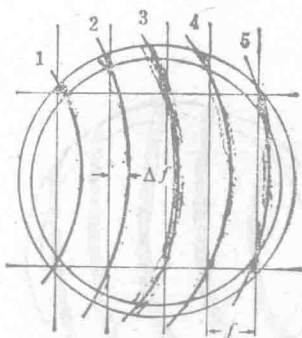


图1-4 条纹偏差的测量
(见文中的解释)

右偏差极大值的绝对值相加, 其和记为 $\Delta f_{\max}$, 以条纹为单位, 光程差就可以除以平均间隔 f 来求得:

$$\text{OPD}_f = \Delta f_{\max} / f$$

欲用波长来表示光程差, 必须知道所用干涉仪的类型: 波面的变形可能由光一次或多次通过被检物, 或者从被检物的表面反射所产生。单通道干涉仪的一个例子是马赫-泽德 (Mach-Zehnder) 干涉仪, 而双通道干涉仪的例子为泰曼-格林 (Twyman-Green) 干涉仪或斐索 (Fizeau) 干涉仪。OPD $_{\lambda}$ 的方程为

$$\text{OPD}_{\lambda} = \text{OPD}_f \frac{1}{n}$$

式中, n 是光线通过的次数, 或者是反射次数的两倍 (注: 此值仅在双光束干涉时才有效, 其中一束光是从被检物上反射回来的。对于高精度的多光束反射干涉仪, 此值无效)。

本方法只用一把直尺和一支铅笔，在实际的 n 通道干涉图与最佳参考干涉图比较的基础上，得出单通道的光程差。

这种人工方法除了具有所有干涉图分析中共有的一些误差外，也有一些特有的误差。最主要的问题来源于干涉图的质量。迈克尔逊^① (Michelson) 把可见度定义为条纹“锐度”的定量度量，它由下式求得：

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

式中 V ——可见度；

$I_{\max}$ ——光强极大值；

$I_{\min}$ ——光强极小值。

光源的不完全相干性，被检样品的双折射，条纹记录介质的非线性响应，两个干涉波面的强度不等或干涉仪臂长不等都会导致可见度的下降。由尘埃粒子、表面二次反射和其它原因所造成的有害的干涉条纹也同样可以使干涉图总的质量降低。

这个方法存在的问题有：要求分析人员找到并描出条纹的中心线，通过计算和观察确定参考干涉图适当的间隔和倾斜度。

按照ASTM的要求，已经做了这个方法的实验室试验，以确定这个标准的精度。一组同样干涉图（图1-5）寄到所有合作者，同时寄去的还有一份此方法的说明及报告表（见图1-6）。这些合作者是从政府、工业界和学术界挑选出来的，包括非分会的会员。

^① Born, Max and Wolf, Emil, *Principles of Optics*, 4th ed., Pergamon Press, Oxford, 1970, p.267.

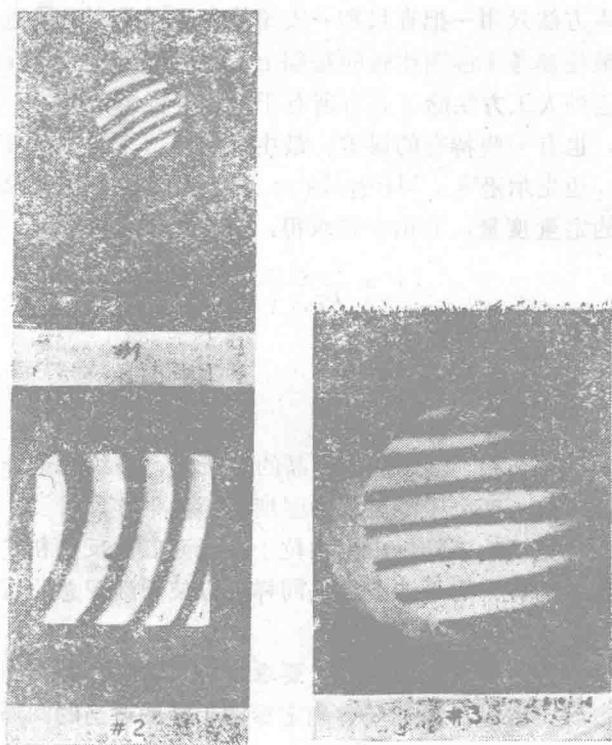


图1-5 循环测试的干涉图（用于检验ASTM的F529-77T方法）

循环测试中的八个合作者作了回答（见图1-7）。平均的和标准的偏差范围如下：从No.1干涉图的 0.072λ （ $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ ）到No.3干涉图的 0.0429λ 。有两种情况精度高于 $1/20\lambda$ ，而也有一种情况精度低于 $1/20\lambda$ 。干涉图本身的确表现出有差异。应该指出，这些干涉图是摄自双通道干涉仪，用了 $n=2$ 这个因子，这样可以比较正确地表示出高于还是低于 $\lambda/10$ 的精度。干涉图No.1和No.2具有差不多大小的