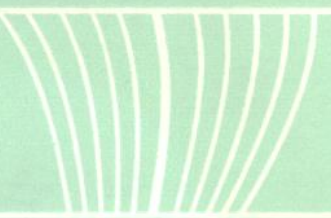




干涉仪的理论基础及应用



〔苏〕Ю. Б. 考洛米佐夫 著

李承业 吴景文 秦南荣 译



技术标准出版社



77.8411
186

干涉仪的理论基础及应用

〔苏〕Ю. Б. 考洛米佐夫 著

李承业 吴景文 秦南荣 译

鲁绍曾 薄国华 审校

技术标准出版社

1110478

Ю. В. КОЛОМИЙЦОВ
ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ
ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ
ТЕОРИИ ПРИМЕНЕНИЕ

干涉仪的理论基础及应用

Ю. В. 考洛米佐夫 著
李承业 吴景文 秦南荣 译
鲁绍曾 薄国华 审校

技术标准出版社出版
(北京复外三里河)

北京印刷三厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 $11\frac{1}{4}$ 字数 280,000
1982年9月第一版 1982年9月第一次印刷
印数 1—5,500

书号: 15169·3-204 定价: 1.65 元

科技新书目

35—143

说 明

激光的出现，电子技术的迅速发展，使干涉仪的应用范围大大扩展。随着各类新型干涉仪的出现，对于干涉仪的理论和工程技术问题的研究具有更加重要的意义。原作者据此需要，搜集近二十年来世界各国学者在干涉仪领域中所取得的新成就，系统全面、深入浅出地写成本书。在我们读到的几本干涉仪专著中，该书是一本很有使用价值的书，而且本书的撰写和内容很适合我国科技人员当前的实际水平。

原书中的一些明显错误，在中译本大都已作了改正。本书译校后曾请陈跃煌、蒋勋两同志校阅，并经鲁绍曾、薄国华两位同志审校，在此一并致谢。由于水平所限，错误难免，敬请广大读者批评指正。

1980年

原 序

精密测量在现代科学技术领域中，迅速增长，是众所周知的，有许多精密的测量工作，都是靠干涉法来实现的。对于一系列测量问题的解决，干涉法是唯一可能的方法。近些年来，由于新光源（激光）的出现和电子技术的发展，大大地扩展了干涉仪的应用范围。随着大量的新型干涉仪的问世，对于干涉仪的理论和工程技术问题的研究，有了更加重要的意义。这些问题包括研究干涉条纹对比度降低和干涉条纹扭曲的原因；探索对各种类型干涉仪的光学和机械部件所提之技术要求的依据；以及在各种给定状态下，对这些部件所提之装调精度要求的依据；查明测量误差的来源……等等。

但是，在以前出版的罗曼诺娃(М. Ф. Романова)《光干涉及其应用》(1937年)和查哈里也夫斯基(А. Н. Захарьевский)《干涉仪》(1952年)的书中，对于上述这类问题中的许多问题，都没有给出足够完备的答案。在这两本书中，自然没有包括关于最近十几年来所生产的大量干涉仪的内容（特别是关于激光和全息干涉仪）；甚至连关于干涉仪与光电装置相结合的可能性，都没有提到。所以，出版一本关于干涉仪方面的新书，是有益的。

呈献这本书的目的，是向从事于干涉仪研制和使用的工程技术和科学研究工作者，以及工厂计量室的工作人员，介绍干涉仪的工程技术理论基础和它们的各种可能用途（如：长度测量、形状与微观几何表面的检查、光学系统和空气动力气流的研究、物质折射率的测量）。没有讨论供光谱研究用的各种干涉仪，因为在不久前发表的一系列专题论文中，对于这类干涉仪都有所介绍；本书也没有涉及供测量应力用的偏振干涉仪。

本书的基本部分，是综述刊载在各种期刊文献中的有关干涉

仪方面的报道。此外，提供了一些新的，在干涉仪理论方面初次进行研究的某些部分。同时，阐明了一些通常在发表的文献中不予叙述的，可是却具有一定实用价值的问题，如：选择光学零件参数的依据、对调整的要求等等。由于受到篇幅的限制，本书没有阐述各种干涉仪的结构，只是简要地介绍了它们的使用方法。

本书是供那些对高等院校物理教程中的光干涉部分有所了解的读者使用的。为了使这本书易懂，在第一章中还是援引了一些基本公式和干涉现象的基本概念。

作者

目 录

说明

原序	(I)
----------	-------

第一章 光干涉概述	(1)
-----------------	-------

§1 基本概念与基本量	(1)
-------------------	-------

§2 相干性	(6)
--------------	-------

§3 两个相干光源所发生的干涉现象	(7)
-------------------------	-------

干涉条纹的宽度与形状	(7)
------------------	-------

波前分光法	(10)
-------------	--------

振幅分光法	(12)
-------------	--------

第二章 平板干涉	(14)
----------------	--------

§4 平行平板上的干涉现象	(14)
---------------------	--------

平板上光程差的计算	(14)
-----------------	--------

等倾环的获得	(16)
--------------	--------

条纹对比度与平板楔形度之间的关系	(19)
------------------------	--------

§5 楔形板上的干涉现象	(20)
--------------------	--------

楔形板的光程	(20)
--------------	--------

光源为有限尺寸时等厚条纹的对比度	(22)
------------------------	--------

定域面	(25)
-----------	--------

在定域面以外观察干涉图样	(29)
--------------------	--------

§6 平面与球面之间空气层上的干涉现象	(32)
---------------------------	--------

牛顿环的获得	(33)
--------------	--------

表面曲率半径的测量	(34)
-----------------	--------

§7 平板上的多光束干涉现象	(35)
----------------------	--------

透射光的强度	(37)
--------------	--------

反射光的强度	(38)
--------------	--------

§8 两块平板上的干涉现象	(40)
---------------------	--------

白光等倾条纹的获得	(41)
-----------------	--------

平板厚度之差的测量	(43)
-----------------	--------

第三章 白光干涉特性和补偿器	(45)
§9 概述	(45)
§10 两束干涉光路中的玻璃厚度不等问题	(47)
用空气进行玻璃补偿	(47)
消色差条纹的获得	(49)
对光学零件平面平行性的要求	(50)
§11 用插入其它牌号的玻璃进行玻璃厚度不等的补偿	(53)
零次消色差条纹的获得	(53)
复消色差条纹的获得	(54)
§12 测量和调整用的玻璃补偿器	(55)
转动平板式补偿器	(56)
双楔补偿器	(57)
消色差补偿器	(59)
复消色差补偿器	(61)
第四章 几种主要干涉仪的光路和性能	(63)
§13 可以将其光路系统简化为一块空气平板的干涉仪	(63)
斐索干涉仪	(63)
迈克尔逊干涉仪	(63)
法布里—珀罗标准具	(70)
§14 具有两块平板的干涉仪	(73)
雅敏干涉仪	(73)
詹德尔—马赫干涉仪	(78)
§15 菲涅尔型干涉仪	(82)
瑞利干涉仪	(82)
迈克尔逊星体干涉仪	(87)
林尼克星体干涉仪	(89)
§16 全息干涉仪	(90)
第五章 干涉图样对比度降低的原因	(95)
§17 对比度的精确定义	(95)
视场对比度和视场指定点上的对比度	(95)
对比度的测量值和真实值	(97)
§18 光源的非单色性	(99)
两条窄谱线	(99)
一条宽谱线	(100)

§19	干涉光束的光强不相等性和漫射光的存在	(103)
§20	干涉光束偏振状态的差异	(106)
	自然光与线偏振光之间的干涉	(107)
	两束线偏振光之间的干涉	(108)
§21	对比度与光源尺寸之间的关系	(112)
	楔形板与非涅尔双镜之间的相似性	(113)
	在厚楔板情况下的条纹位移	(114)
§22	干涉光束之间的不平行性	(119)
§23	波面畸变	(124)
	球面形状的畸变波 (W_0)	(125)
	柱面形状的畸变波 (W_2)	(127)
	具有局部平面偏差的畸变波 (W_2)	(129)
§24	光阑的不正确安装	(133)
第六章	对干涉仪光学组件和机械组件的要求	(141)
§25	对不同类型干涉仪组件要求的分析	(141)
	干涉仪的结构原则	(141)
	干涉仪的用途	(141)
	干涉仪光学组件到干涉场的距离	(143)
	主要光学零件和辅助光学零件	(144)
§26	对主要光学零件制造质量的要求	(144)
	反射镜和平板表面	(144)
	光学零件的厚度和楔形度	(152)
	光学零件的玻璃选择	(154)
§27	对主要光学零件的安装精度要求	(155)
	零件沿光轴偏移	(155)
	零件在垂直于光轴方向的偏移	(157)
	干涉仪反射镜的偏转	(159)
§28	对准直光管和干涉仪接收部分的要求	(160)
	准直光管离焦的影响	(160)
	干涉仪接收部分畸变的影响	(162)
§29	对机械组件的要求	(165)
	结构刚性	(165)
	温度变化	(165)
	调整装置	(168)

干涉仪的安装调试和使用	(171)
安装调试的步骤	(171)
测量条纹移动和弯曲的方法	(174)
第七章 测量长度的干涉仪	(177)
§31 概述	(177)
§32 测量线纹尺和量块的特制干涉仪	(179)
全苏计量科学研究院的基准干涉装置	(179)
全苏计量科学研究院的通用干涉仪	(181)
§33 绝对测量量块长度的干涉仪	(185)
柯氏干涉仪	(185)
英国国家物理研究所(NPL)干涉仪	(191)
黑尔格—华茨型干涉仪	(191)
§34 比较测量量块长度的干涉仪	(194)
技术光波干涉法	(194)
接触式干涉仪	(196)
双接触干涉仪	(197)
卡尔达雪夫干涉仪	(197)
ИКМ-10 型干涉仪	(198)
§35 测量零件外部尺寸的干涉仪	(201)
МНН-11 型多光束干涉显微镜	(201)
用玻璃平晶测量球径和圆柱直径的干涉方法	(203)
测量球径和圆柱直径的 ИЗК-57 型干涉仪	(204)
§36 测量零件内部尺寸的干涉仪	(209)
用塞规测量透明环规内径的干涉方法	(210)
不接触比较测量孔径从 8 至 30 毫米的干涉内径测微计	(211)
比较测量孔径从 5 至 12 毫米的 ИГ-88 型干涉内径测微计	(215)
绝对测量法	(218)
§37 测量小位移的干涉指示仪	(220)
灵敏度倍增的不接触干涉指示仪	(222)
双头干涉测微计	(225)
§38 测量大位移的激光干涉仪	(226)
光学系统原理	(226)
布朗—布维尔干涉仪	(228)
ИПЛ 型干涉仪	(229)

K-H 公司的干涉仪	(230)
H-P 公司的干涉仪	(231)
第八章 检查表面形状与微观几何特征的干涉仪	(233)
§39 检查平面的干涉仪	(233)
玻璃样板法	(233)
斐索型干涉仪的应用	(235)
高灵敏度的 HKII-100 型干涉仪	(237)
全息干涉仪	(237)
光电方法	(239)
检查大表面轮廓直线性的干涉仪	(240)
§40 检查球面的干涉仪	(242)
球面玻璃样板	(242)
不接触法检查中等直径的球面干涉仪	(244)
检查大凹面的不等臂激光干涉仪	(250)
检查小直径球面的干涉仪	(251)
§41 检查复杂形状表面的干涉方法和仪器	(254)
检查球面的玻璃样板和干涉仪	(254)
检查任意表面形状的方法	(256)
二次曲面的检验	(258)
圆柱表面的检验	(260)
沟槽表面的检验	(262)
§42 干涉显微镜	(265)
林尼克干涉显微镜	(265)
干涉图样的对比度	(268)
获得直条纹的条件	(270)
显微物镜孔径的作用	(273)
查哈里也夫斯基单物镜干涉显微镜	(275)
检查光洁度的其它方法	(276)
§43 显微干涉轮廓仪	(277)
林尼克显微干涉轮廓仪	(277)
圆柱透镜的位置和焦距的计算	(279)
狭缝的允许宽度	(281)
光学零件的制造和装配精度对条纹对比度和形状的影响	(282)
检查零件内表面光洁度的显微干涉轮廓仪	(283)

带有光谱分光镜的显微干涉轮廓仪	(285)
低灵敏度的显微干涉轮廓仪	(287)
第九章 其它用途的干涉仪	(288)
§44 研究光学系统的干涉仪	(288)
泰曼干涉仪	(288)
林尼克法	(290)
才尔尼克法	(291)
§45 测量物质折射率的干涉仪	(292)
瑞利干涉仪	(292)
雅敏干涉仪	(294)
固体的折射率测定	(296)
§46 测定透明物体均匀性的干涉仪	(297)
迈克尔逊—泰曼干涉仪	(297)
詹德尔—马赫干涉仪	(298)
剪切式干涉仪	(299)
全息干涉仪	(301)
串联式干涉仪	(303)
§47 研究透明微物的干涉显微镜	(305)
МБИН-4型生物干涉显微镜	(305)
双焦干涉显微镜	(307)
环形光路式干涉显微镜	(308)
第十章 提高干涉测量灵敏度的方法	(310)
§48 三光束干涉仪和四光束干涉仪	(310)
瑞利型三光束干涉仪	(311)
洪辰格三光束干涉仪	(314)
哈利哈伦和森四光束干涉仪	(316)
§49 目测高灵敏度双光束干涉仪	(319)
双透射式双光束干涉仪	(320)
兰奇光路	(322)
多次反射的镜面机构	(322)
§50 光电法测量程差的变化	(324)
测量小程差的调频法	(324)
消色差条纹对准法	(327)
文献目录	(333)

第一章 光干涉概述

为了使本书易于看懂，在本章内援引了一些后面几章将要用到的有关光干涉方面的简明知识，并且为一些基本概念与基本量下了定义。

§1 基本概念与基本量

利用光干涉原理的测量仪器，称为干涉仪。众所周知，在一般条件下，当两束或几束光线同时照射到一个屏幕上的时候，它们的总合照度，将等于这些光束分别发出的个别照度之和。而在发生干涉现象时，上述定律就不成立了。这时，光能量的分布情况，将变为：在屏幕的一些区域上，总合照度将大于个别照度之和，而在另一些区域上，则小于个别照度之和。关于光干涉的一般问题，在一些物理光学教程里〔8，23，72〕，都有详细的阐述。这里仅对于干涉现象的一些基本概念，予以简要的介绍。

根据波动理论，在空间坐标位置 r 点上的光波振动 s ，可由下述公式来表示：

$$s = a \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{r}{v} \right) \quad (1)$$

式中 a ——振幅， T ——振动周期，
 t ——时间， v ——光的传播速度。

通过符号 φ 来表示位于正弦符号内的量值 $\frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{r}{v} \right)$ ，并称之为振动相位。同时，把被选为座标起点 ($r=0$) 位置上的振动相位 $\varphi_0 = \frac{2\pi t}{T}$ ，当作起始相位。

还经常用到振动频率 ($\nu = \frac{1}{T}$), 以及圆周频率或周期频率 ($\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$) 的概念。

把等于振幅平方的量 ($I = a^2$), 看作是振动的强度 (I)。如果将一段时间间隔内的振幅认为是一个常量的话, 则在这段时间内的能量, 将与振动的强度成正比。

在指定的瞬间, 具有相同振动相位的诸点的几何位置, 称为波面; 而波面的传播方向, 则称为光线。在均匀的各向同性介质中, 光线与波面的法线方向相重合。小尺寸光源辐射的波面, 具有球面形状。假如光源位于无穷远 (例如, 将光源置于准直光管物镜的焦面上), 就可以把它所发出的光线看作是平行光束; 而这时的波面, 可看作是平面波面。

由于反射或折射的结果, 波面往往发生畸变, 而呈现比较复杂的形状。光线及与光线相垂直的光振动所在的平面, 称为振动面; 在足够长的观察时间内, 只在一个平面内振动的光, 称为线偏振光。从大多数光源发出的所谓自然光, 在暂短的时间间隔内 (大约每经 10^{-8} 秒), 它们的振动面无规则地改变着方位, 并且在观察时间内, 振动面处于任意一种方位的几率都是相等的^①。

在不同的介质中, 波面的传播速度 (v) 是不相同的。在真空中, 光速具有最大值 ($c = 3 \times 10^8$ 米/秒)。

在一个周期 T 的时间内, 波面传播的距离, 称为波长 (λ)。在一些物理常数表中, 通常列出真空中的波长值, 即 $\lambda = cT$ 。对于可见光谱区, 辐射波长的范围为: 从 0.4 微米 (光谱紫色区的边缘) 到 0.7 微米 (光谱红色的边缘)。对于同一种光辐射, 当它通过不同的介质时, 其波长是不同的; 而周期 T , 则在任何介质中都保持不变。

① 此句原文不够明确, 已根据原意, 有所增改——译者注。

真空中的光速与给定介质中的光速之比 $\left(n = \frac{c}{v}\right)$ ，称为该介质的折射率。从几何光学得知：

$$n = \frac{\sin i}{\sin i'}$$

式中： i ——光线（从空气，或确切地讲，从真空）进入介质表面的入射角； i' ——折射角。

折射率与辐射波长的关系，照例是随着波长的减小而增大。介质的两条夫朗和费(J. Fraunhofer)谱线 F 与 C 的折射率之差，亦即 $n_F - n_C$ ，称为该介质的平均色散。

在20°C和标准大气压力下，对于可见光谱区的所有波长，空气的折射率 n_a 大约等于1.000 27(空气的平均色散，等于小数点后第6位的某一个数)。在许多情况下， n_a 都采用整数“1”；可是，在进行绝对测量①时，却往往不得不考虑到折射率 n_a 对压力、温度和湿度的依从关系。而且，这种关系对于不同的波长是不一样的。

光程 (l)——光线在某一介质中通过的距离 r 与该介质折射率 n 的乘积，即 $l = rn$ 。如果一束光线通过其折射率分别为 $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_k$ 的 k 种介质，则总光程将为：

$$L = \sum_{i=1}^k r_i n_i \quad (2)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, k$

方程式 (1)，也可以写成下列形式：

$$s = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{L}{\lambda} \right) \quad (3)$$

两束光线所通过的光程 L_1 与 L_2 之差，称为这两束光线的程差 (Δ)，

① 所谓绝对测量，就是直接以光波波长为标准对长度量值进行高精度测量。

② 原文连加号内两个下角符号有误，已改正——译者注。

$$\Delta = L_1 - L_2 \quad (4)$$

程差 Δ 与波长 λ 之比, 称为干涉级次 (p),

$$p = \frac{\Delta}{\lambda} \quad (5)$$

干涉级次既可能是整数, 也可能是小数。

两个振动的相位差 (δ) 为:

$$\delta = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = 2\pi p \quad (6)$$

当振幅分别为 a_1 和 a_2 、相位差为 δ 、具有相同的振动方向和相同振动周期的两个振动

$$s_1 = a_1 \sin \omega t$$

$$s_2 = a_2 \sin(\omega t + \delta)$$

彼此相互叠加时, 则形成一个具有同样周期的合振动:

$$s = A \sin(\omega t + \gamma)$$

并且:

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \delta \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{a_2 \sin \delta}{a_1 + a_2 \cos \delta} \quad (8)$$

合振动的强度 I 与两个单振动的强度 I_1 和 I_2 之间的关系, 由下述公式表示:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (9)$$

上式是双光束干涉理论的基本公式。从公式 (9) 和公式 (6) 可以得出下述结论: 当 $\delta = 0; \pm 2\pi; \pm 4\pi \dots$, 或当 $\Delta = 0; \pm \lambda; \pm 2\lambda \dots$ 的时候, 合振动的强度具有最大值 $I_{\max}$, 而当

$\delta = \pm \pi; \pm 3\pi; \pm 5\pi \dots$, 或当 $\Delta = \frac{\lambda}{2}; \frac{3\lambda}{2}; \frac{5\lambda}{2} \dots$ 的

时候, 合振动的强度具有最小值 $I_{\min}$, 此时:

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} = (a_1 + a_2)^2 \\ I_{\min} &= I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} = (a_1 - a_2)^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在两个单振动的强度相等的情况下，亦即 $I_1=I_2=I'$ 的情况下，则有：

$$I=4I'\cos^2\frac{\pi\Delta}{\lambda}=4I'\cos^2\frac{\delta}{2} \quad (11)$$

并且， $I_{\max}=4I'$ ； $I_{\min}=0$ 。从式(11)可见：当改变相位差 δ 时，强度按正弦定律变化。

其相位差按等差级数分配的一系列振动的合成，将在§7加以讨论。特别值得注意的是三个或四个具有任意相位差的振动的合成情况。这类情况将在§48予以介绍。

通常，在干涉场(即观察到干涉图样的平面)的不同位置上，相位差 δ 具有不同的值。在干涉场上，处于同一条线上的、具有相同相位差 δ 的诸点的几何位置，称为干涉条纹；而两个相邻条纹中心之间的距离 b ，称为条纹宽度。从一个条纹过度到相邻条纹，对应于相位差 δ 变化 2π (或对应于程差 Δ 变化 λ)，而与条纹的宽度无关。

当两个彼此交角为 θ 的平面光波相互叠加的时候，就会出现一些直线的、平行于波面交线的明暗相间的干涉条纹。条纹宽度与波长 λ 成正比，而与 $\sin\theta$ 成反比，即：

$$b=\frac{\lambda}{\sin\theta}\approx\frac{\lambda}{\theta} \quad (12)$$

如果 $\theta=1'$ 或 3×10^{-4} 弧度， $\lambda=6\times 10^{-4}$ 毫米，则 $b=2$ 毫米。当改变程差 Δ 时，干涉条纹向垂直于它们本身长度的方向移动。程差 Δ 改变一个波长 λ 的量值，就会引起条纹移动等于一个条纹宽度的距离。在实践上，不难做到以 $\frac{1}{20}\sim\frac{1}{10}$ 条纹宽度的

精度测定出条纹的位移量，也就是说，不难做到以 $\frac{\lambda}{20}\sim\frac{\lambda}{10}$ 或 $0.03\sim 0.06$ 微米的精度测量出程差 Δ 的变化量 (与条纹宽度无关)。