



双频激光干涉仪

关信安 袁树忠 刘玉照 编著

中国计量出版社

双频激光干涉仪

关信安 袁树忠 刘玉照 编著

中国计量出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了双频激光干涉仪的原理、结构和应用。全书共分六章，内容包括双频激光干涉仪的物理基础及其光学、电子、机械等系统的工作原理，仪器的结构和整机的设计、安装、调试、鉴定、误差分析，以及双频激光干涉仪在精密测量长度、角度、直线度、平面度、机械振动、定位等中的应用。

本书可供从事激光的研究和应用，从事精密仪器设计、工艺和测量的工程技术人员阅读，还适用于高等院校有关专业的师生参考。

双 频 激 光 干 涉

信安 袁建忠 刘玉照 编著

责任编辑 陈小林

中国计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/32

印张 10.375

字数 235 千字

印数 1—5 000

1987年3月第一版

1987年3月第一次印刷

统一书号 15210·675

定价 2.45 元

序

双频激光干涉仪是六十年代末七十年代初问世的一种新型的激光干涉仪。它是以稳频的双频氦氖激光器作为光源，按照拍频原理工作的。在专用的电子计算机配合下，它能在较差的环境中，以相当高的精度完成其他常规激光干涉仪所不能完成的测量工作，成为激光干涉仪中的佼佼者。由于它较高的经济效益，因此受到有关行业特别是工业部门的重视，得到了较大的发展。

考虑到有关双频激光干涉仪的资料比较零散，而且至今还没有一本专著可供参考，因此，我们在完成了2m双频激光测长机的研制任务后，参考国内外有关方面的资料，结合我们的经验，写成了此书。

本书在出版过程中，得到了计量出版社汤永厚同志的大力支持；沈寿春教授审定了本书的编著大纲；叶声华、陈永江、张永年、吴云龙、何开钧、黄金华、张文德和胡广大等同行提供了许多有价值的资料；本书写成后，承蒙中国计量科学研究院长度处陈允昌高级工程师、清华大学精仪系殷纯永、丁慎训老师审稿，提出了宝贵的修改意见，从而提高了该书的质量；在本书的审编过程中，中国计量出版社陈艳春、刘瑞清和陈小林同志也花费了不少心血。对此，作者一并表示衷心的感谢。

由于我们的经验、水平所限，本书的缺点和不妥之处在所难免，望同行和广大读者批评指正。

作 者

1982年10月于南开大学

目 录

第一章 引言	(1)
§ 1-1 双频激光干涉仪的特点及其经济价值	(1)
§ 1-2 双频激光干涉仪在国内外的的发展简况	(4)
第二章 双频激光干涉仪的物理基础	(6)
§ 2-1 光的干涉	(6)
一 波与干涉	(6)
二 两个频率相差很小的波的干涉——拍	(8)
三 相干光的获得	(9)
§ 2-2 迈克尔逊干涉仪	(12)
§ 2-3 相干长度和时间相干性	(14)
§ 2-4 光的偏振	(16)
一 自然光和偏振光	(16)
二 光在反射和折射中的偏振现象	(17)
三 双折射现象与偏振器	(17)
四 波片和椭圆偏振光	(21)
五 偏振光的干涉	(23)
§ 2-5 多普勒效应	(25)
§ 2-6 双频激光干涉仪的工作原理	(28)
一 原理图	(28)
二 参考信号的产生	(30)
三 测量信号的获得	(31)
第三章 仪器的光学系统	(35)
§ 3-1 光源——双频氦氖激光器	(35)
一 塞曼双频氦氖激光器的工作原理	(35)
二 塞曼双频氦氖激光器的设计与制造	(45)

三 其他形式的双频氦氖激光器	(84)
§3-2 激光的高斯光束传播和扩束准直	(92)
一 激光束的高斯分布	(92)
二 高斯光束的干涉	(97)
三 高斯光束的扩束准直	(100)
§3-3 偏振分光棱镜	(105)
一 偏振分光镜的分光原理	(105)
二 偏振分光镜的设计	(106)
三 偏振分光镜膜层的镀膜及性能测试	(108)
四 偏振分光镜的胶合	(110)
§3-4 角锥棱镜	(111)
一 角锥棱镜的术语定义及光路	(111)
二 角锥棱镜的一些反射特性	(113)
三 角锥棱镜的加工误差对反射性能的影响	(115)
四 角锥棱镜的几何尺寸	(121)
五 角锥棱镜对偏振光的影响	(126)
§3-5 光路布局	(127)
一 误差分布公式和“空程误差”	(128)
二 几种布局和特点	(132)
§3-6 倍频和相位细分	(135)
一 一般的光学倍频技术	(135)
二 双频激光干涉仪中的倍频光路	(136)
三 光学相位细分技术	(137)
第四章 仪器的电子线路	(143)
§4-1 电子线路方块图	(143)
§4-2 稳频器	(144)
一 稳频的必要性	(144)
二 稳频器的工作原理	(144)
三 稳频器电路	(153)
四 稳频器电路的一些改进	(161)

§ 4-3 光电转换及放大整形电路	(167)
一 光电转换及放大整形电路之一	(168)
二 光电转换及放大电路之二	(171)
§ 4-4 专用电子计算器	(171)
一 减法器	(172)
二 倍频器	(185)
三 乘法器	(195)
四 可逆计数器	(217)
五 显示值稳定电路	(240)
§ 4-5 氦氖激光器的供电	(243)
第五章 安装、调整、鉴定及误差分析	(246)
§ 5-1 安装	(246)
一 安装的原则	(246)
二 测量轴线的选择	(246)
三 减少空程误差	(248)
四 减少所用的光学元件的数目	(249)
五 减少空气扰动的影响	(250)
六 保护激光束及光学元件的措施	(251)
§ 5-2 调整	(253)
一 调整的目的	(253)
二 调整的原则	(255)
三 调整的方法	(257)
§ 5-3 鉴定	(263)
一 鉴定的环境及必备的测试仪器	(263)
二 鉴定项目、要求与方法	(264)
三 现场鉴定实例	(264)
§ 5-4 测试误差的分析	(267)
一 一般测量仪器精度的分析方法	(268)
二 双频激光干涉仪的精度分析	(269)
三 双频激光干涉仪测长误差分析实例	(269)
第六章 双频激光干涉仪的应用	(277)

§6-1 空气折射率的修正	(277)
一 空气折射率的间接测量及波长修正	(278)
二 空气折射率干涉仪	(280)
§6-2 测量角度和平面度	(283)
一 角度测量	(283)
二 平面度测量	(285)
三 测量范围和精度	(286)
§6-3 测量机床直线度	(287)
一 测量原理	(287)
二 平行度的测量	(289)
三 垂直度(直角度)的测量	(290)
§6-4 测量机械振动	(292)
一 测量原理	(292)
二 振幅测量的电路原理	(293)
三 振动频率测量的电路原理	(295)
四 振动周期测量的电路原理	(296)
§6-5 定位	(296)
一 机床定位	(297)
二 用于光栅刻划	(299)
三 用于 x - y 精密定位台	(301)
§6-6 多路双频激光干涉仪与带双频激光干涉仪的 三坐标测量机	(303)
一 多路测量	(303)
二 三坐标测量机	(306)
§6-7 其他应用	(307)
附录1 HP5526A 和 SORO METRILAS M100 型双频 激光干涉仪的资料	(309)
附录2 国内几种双频激光干涉仪(测长机)的资料	(314)
附录3 不同条件下的 $\frac{\partial n}{\partial t}$ 和 $\frac{\partial n}{\partial p}$ 数值表	(323)

第一章 引言

§ 1-1 双频激光干涉仪的特点及其经济价值

激光的出现，赋予古老的光干涉度量学以新的活力。用稳频的氦氖激光器作为光源，由于它的相干长度比氪灯长得多，干涉仪的测量范围可以大大地扩展；而且由于它的光束发散角小，能量集中，因而它产生的干涉条纹可用光电接收器接收，变为电讯号，并由计数器一个不漏地记录下来，从而提高了测量速度和测量精度。我国自行设计与制造的以氦氖激光器为光源的光电光波比长仪，可以在 20 分钟之内把 1 米线纹尺上 1001 条刻线依次自动鉴定完毕，精度达到 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ ，就是激光干涉仪成功的例证。

但这种常规的激光干涉仪并非完美，它的一个根本弱点是受环境影响严重。在测试环境恶劣，测量距离较长时，这一缺点十分突出。其原因在于它是一种直流测试系统，必然具有直流光平和电平零漂的弊端。图 1-1(a) 表示当激光干涉仪可动反射镜（类似于图 2-7 中的 M_2 ）移动时，光电接收器输出的信号。这时光电信号都超过了计数器的触发电平而被记录下来。但是，如果激光束强度发生变化，就有可能使光电信号低于计数器的触发电平而使计数器停止计数，如图 1-1(b)。使激光束强度或干涉信号强度变化的原因主要是空气湍流、机床的油雾、切削屑对光束的干扰，结果光束发生偏移或波面扭曲。这种无规的变化较难通过触发电平的自动

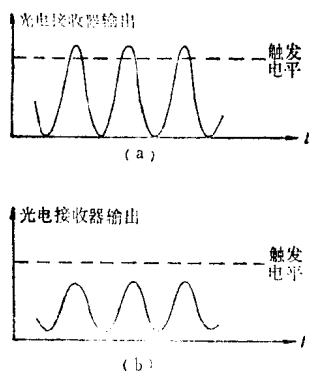


图 1-1 常规激光干涉仪
光平变化对计数的影响

调整来补偿，因而限制了这种干涉仪的使用范围。只有设法用交流测量系统代替直流测量系统，才能从根本上克服常规激光干涉仪的这一弱点，而这一交流测量系统正是本书所要详细讨论的双频激光干涉仪。

双频激光干涉仪的简单原理图如图 1-2。光源是一支能发射两个光频率的激光器，其中一个频率为 f_1 ，另一个频率为 f_2 。

f_1 和 f_2 的差别不大，通常为 1 MHz 左右，而且它们是振动方向互相垂直的线偏振光。我们设法取出其中小部分来拍频（一种特殊的干涉现象）形成参考信号，其频率为 $f_2 - f_1$ ；其余大部分被偏振分光镜 S 分为两束，光频为 f_1 的一

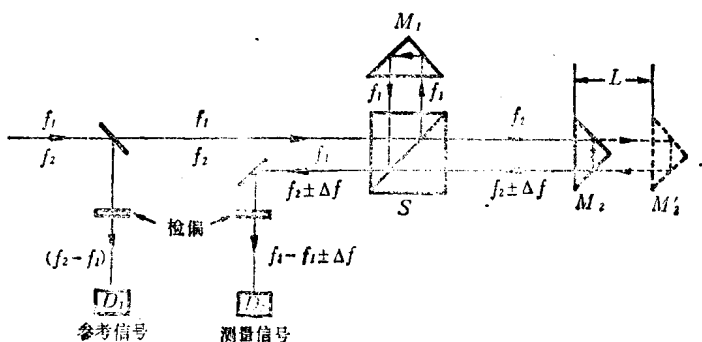


图 1-2 双频激光干涉仪简单原理图

束被反射到固定棱镜 M_1 ，光频为 f_2 的一束透射到可动棱镜 M_2 ，最后这两束光又沿同一条轴线经过拍频后，射入光电接收

器 D_2 ，形成测量信号。当 M_2 不动时，光电接收器检测到的频率为 $f_2 - f_1$ ；而当可动棱镜移动时，从它那里反射回来的光频却包含了多普勒频移 $\pm \Delta f$ ，这时光电接收器检测到的频率不再是 $f_2 - f_1$ 而是 $f_2 - f_1 \pm \Delta f$ 。我们在下一章将论证，正是多普勒频移 $\pm \Delta f$ ，它反映了可动棱镜移过的距离 L 的大小。用减法器把测量信号的频率与参考信号的频率相减后取得 $\pm \Delta f$ ，并用计数器对 $\pm \Delta f$ 进行累计得 N ，便求出 L 的数值为：

$$L = N \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2} \int_0^t \Delta f dt \quad (1-1)$$

由此可见，和常规的激光干涉仪一样，双频激光干涉仪也是一种以波长作为标准对被测长度进行度量的仪器。所不同者，一方面是当可动棱镜不动时，前者的干涉信号是介乎于最亮与最暗之间的某个直流光平，而后的干涉信号则是一个频率为 $f_2 - f_1 \approx 1\text{MHz}$ 的交流信号；另一方面当可动棱镜移动时，前者的干涉信号是一个在最亮与最暗之间缓慢变化的信号，而后者则是使原有的交流信号的频率增加或减小了 Δf ，结果依然是一个交流信号。因而对双频激光干涉仪来说，可用放大倍数较大的交流放大器对干涉信号进行放大，这样即使光强衰减 90%，仍然可以得到合适的电信号。由于这一特点，双频激光干涉仪既可以在恒温、恒湿、防震的计量室内检定量块、量杆、刻尺、微分校准器、旋转工作台和坐标测量机，也可以在普通的车间内为大型的机床的刻度进行定标；既可以对几十米的大量程进行精密测量，也可以检验手表零件的微小运动；既可以用于一般的几何量，诸如长度、角度、平面度、直线度、垂直度的测量，也可以用于一些特殊的场合，诸如半导体光刻技术的微定位和计算机存储盘上记录槽间距的测量等等。总之，双频激光干涉仪的

发明使激光干涉仪最终摆脱了计量室的束缚，更为广泛地应用于工业生产和科学研究中，使古老的光干涉计量学焕发了青春。

§ 1-2 双频激光干涉仪 在国内外的的发展简况

双频激光干涉仪首先由美国 HP 公司研制成功并获得专利权。第一批定型产品为 5500A，于 1970 年投放市场，它的量程达到 61m，测量精度为 5×10^{-7} ，测量速度达 330mm/s。其后 HP 公司又研制了其他派生的产品，如 5501 A, 5525 A, 5525 B, 5526 A，其中以 5526 A 性能最为优越。它除了能测长度以外，还能测速度、角度、平面度、直线度和垂直度，还可以用来测震及进行 X-Y 微动台的定位，用途极为广泛。其他国家也在这方面做了不少的工作，但投入市场的只见有法国 SORO 公司和日本横河公司的产品，前者的型号为 METRILAS M100，最大的测量距离为 30 m，测量精度为 1×10^{-7} ，除测长度外还能测速度和角度。横河的双频干涉仪则与美国 HP 公司产品性能完全一样。有关 5526 A 及 M100 的资料请参阅附录 1。

从七十年代中期开始，我国的研究机关、高等院校和工厂对双频激光干涉仪作了大量的研制工作。第一台样机是由中国计量科学研究院长度室研究成功，并于 1976 年 4 月经国家鉴定通过的，指标的对比表明（见表 1-1），其主要性能已经达到当时的国际水平，经过改进已投入小批量生产。与此同时，清华大学也研制成功了 SJD-I 型双频激光多功能干涉仪，并小批投产，此后他们又研制了 SJD-II 型带空气折射率自动补偿的双频激光干涉仪样机。在此基础上，新添光学仪器厂研制成计量室专用的 JD-16 三米双频激光测长

表 1-1

项 目	我国第一台样机	1976年的国际水平	比较结果
可测长度范围	0~61m	0~61m	达 到
仪器的准确度	5×10^{-7}	5×10^{-7}	达 到
仪器的最小分辨率	0.08 μ m	0.01 μ m	稍 差
最高测量速度	300mm/s	330mm/s	接 近
允许光强损失	仪器接收部位光斑面积可遮去 2/3	仪器接收部位光强允许损失 85%	接 近

机，南开大学等单位研制成专用的两米双频激光测长机，分别于1979年2月和1979年10月经鉴定通过。此外，上海市标准计量管理局、北京科学仪器厂、哈尔滨量具刃具厂、沈阳仪器仪表研究所、广州机床研究所、北京一机部机床研究所等单位，根据各自需要，先后制成不同型式的双频激光干涉仪。这些仪器在科研和生产中发挥了重要作用。有关资料、图片请参阅本书附录2。

第二章 双频激光干涉仪的物理基础

§ 2-1 光的干涉

一、波与干涉

(1) 波动方程

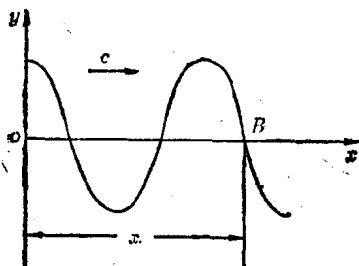


图 2-1 波的传播示意图

在图 2-1 中, 一个余弦波沿 x 轴传播, 波速为 c , 则其波动方程为:

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

(2-1)

式中 A 为振幅, ω 为圆频率, t 为时间, x 为

考察点 B 到原点的距离。波动方程可换写成另外的形式:

$$y = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = A \cos 2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2-2)$$

式中, $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$, T 和 f 为周期和频率, $\lambda = cT$ 为波长。

(2) 波的干涉

几个波源产生的波, 可以同时以一种介质中传播。如果它们在某些点上相遇, 则相遇点质点的振动是各波所引起的振动的合成。一般情况下振幅、频率、位相都不相同的几个波在某一点迭加合成是很复杂的。我们只讨论两个频率相同、振

动方向相同，位相相同或位相差恒定的波源所发出的波的迭加。满足这些条件的两列波在空间任一点相遇时的位相差也是恒定的，因而在空间某些地方的振动始终加强，而在另一些地方的振动始终减弱或完全抵消，这种现象称为波的干涉。能产生干涉的波源称为相干波源。

设位于 S_1 点和 S_2 点的两个相干波源的振动为：

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ y_2 &= A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

则距两波源各为 r_1 和 r_2 的某一点的合振动为：

$$y = A \cos(\omega t + \varphi)$$

式中， A 是合振动的振幅， φ 是合振动的初始位相。

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\left(\varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}\right)} \quad (2-4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin\left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + A_2 \sin\left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)}{A_1 \cos\left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + A_2 \cos\left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)}$$

$$\text{令} \quad \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} = \Delta\varphi$$

称 $\Delta\varphi$ 为两个相干波在所研究点的位相差。由式 (2-4) 看出，当

$$\Delta\varphi = \pm 2k\pi \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

合振幅 A 最大。当

$$\Delta\varphi = \pm (2k + 1)\pi \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

合振幅 A 最小。

$$\varphi_1 = \varphi_2 \text{ 时, } \Delta\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda}\delta, \delta = r_1 - r_2 \text{ 代表两列波的波}$$

程差，这时可得出：当两列相干波在空间相遇合成时，在波程差等于 0 或等于波长的整数倍的各点，振幅最大；在波程差等于半波长的奇数倍的各点，振幅最小。

二、两个频率相差很小的波的干涉——拍

两个振动频率不同的波，即使振动方向相同，合振动也是很复杂的，一般不会产生干涉。但是当振动方向相同、频率相差很小的两列波在同一方向上传播时，便可产生一种特殊的干涉，如图 2-2 所示。图 2-2(a) 表示分振动的情况，图 2-2(b) 表示合振动的情况。从图 2-2(b) 中看出，在给定点上合成波的振幅不是恒定的，而是随时间变化的，这种现象

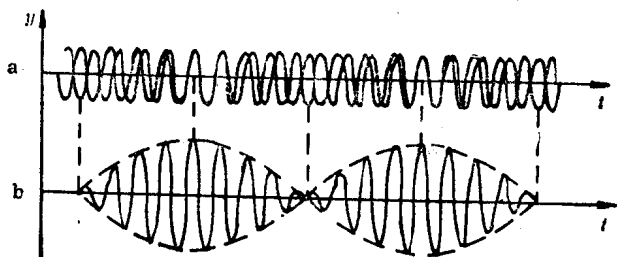


图 2-2 频率稍有差别的波的干涉（拍）

就称为拍。

在振动中的某一点，在波列 1 上振动位移为：

$$y_1 = y_m \cos 2\pi\nu_1 t$$

在波列 2 上的振动位移为：

$$y_2 = y_m \cos 2\pi\nu_2 t$$

它们的合振动位移则为：

$$y = y_1 + y_2 = y_m (\cos 2\pi\nu_1 t + \cos 2\pi\nu_2 t) \quad (2-5)$$

利用三角公式，可把上式化成：

$$y = \left[2y_m \cos 2\pi \left(\frac{\nu_1 - \nu_2}{2} t \right) \right] \cos \left(\frac{\nu_1 + \nu_2}{2} t \right) \quad (2-5')$$

$\bar{\nu} = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$ 是这两列波的平均频率。合振幅按以下频率随时间变化：

$$\nu_0 = \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} \quad (2-6)$$

如果 ν_1 接近 ν_2 ，则这一项很小，振幅变化就很慢。拍的合振幅最大值处在

$$\cos 2\pi \left(\frac{\nu_1 - \nu_2}{2} t \right) = \pm 1 \quad (2-7)$$

故每秒出现的拍为 ν_0 的两倍。

双频激光干涉仪就是利用两个频率相差很小的光波的干涉来工作的。

三、相干光的获得

对一般光源来说，即使两个光源的强度、形状、大小完全相同，它们所发出的光也不会相干，这是由光源发光本质所决定的。但是我们可以利用分波阵面或分振幅的方法来获得相干光。

(1) 分波阵面法

将一个点光源发出的光，分成两束细光束，再通过不同的路程而聚集在一起。由于点光源的振动在任一时刻都有确定的位相，所以在相交点上，频率相同，振动方向相同，并能保持恒定的位相差，因此可以产生干涉现象。这种将一个点光源发出的光分成两束细光束获得相干光源的方法，称为分波阵面法。

杨氏双狭缝、菲涅尔双棱镜和双面镜以及洛埃镜等实验