

文章编号: 1001-3806(2008)05-0474-03

高精度控制光电光栅刻划机的光栅外差干涉仪

王 芳^{1,2}, 齐向东^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为提高光电式光栅刻划机的控制精度, 设计了一种自准直式激光光栅外差干涉仪的新型测量系统。以光栅衍射和偏振光学为理论基础, 结合电子学的相关知识对系统进行了理论分析, 设计了基准光栅, 并进行了大量的实验研究。由实验研究可知, 这种利用光栅的自准直衍射和以光栅栅距作为计量基准的干涉测量系统, 具有受环境因素的影响低, 结构简单、装调方便等优点; 采用双频激光得到的测量信号增益大, 信噪比高; 该系统用于光栅刻划, 得到的栅线间距刻划偏差优于 10nm, 在 3mm 行程内累积误差约为 0.3 μ m。结果表明, 该系统具有纳米级分辨力, 用于实时测量控制系统, 测量误差很小, 完全达到了中阶梯光栅等特种光栅对刻划机的高精度分度要求。

关键词: 测量与计量; 光栅干涉仪; 位移测量; 自准直衍射; 刻划机; 双频激光

中图分类号: TH744.3 **文献标识码:** A

Grating heterodyne interferometer of high accuracy controlling photoelectric grating ruling engine

WANG Fang^{1,2}, QI Xiang-dong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to heighten the manipulative accuracy of the ruled engine, a new measurement system auto-collimating grating heterodyne interferometer was proposed. Based on the diffraction and polarization of grating and some theories of the electronics, the system was analyzed. After the benchmark grating was designed, and lots of experiments were carried out. Because the interferometer measurement system takes grating constant as the measurement standard, the effect of environment on measurement accuracy is reduced. Thanks to the auto-collimation diffraction, the structure is simple and steady, and easy to assemble and adjust. Moreover, using the dual-frequency, high gain and signal-to-noise ratio can be obtained. Using the interferometer system to control the ruled engine, the biased error for ruling span is less than 10nm, and the cumulative error is about 0.3 μ m within 3mm displacement. The results show that the resolution of the interferometer system is small to nm scale, and it can be used in the real-time measurement control system and that it achieves high accuracy that the special diffraction gratings such as echehon gratings request to a ruling engine completely.

Key words: measurement and metrology; grating interferometer; displacement measurement; auto-collimating diffraction; ruling engine; dual-frequency laser

引 言

衍射光栅是光谱仪器的核心器件。近年来, 虽然全息法制作光栅得到了广泛的应用, 但对于红外光栅、中阶梯光栅等特殊光栅, 必须采用机械刻划的方式来制作。目前, 中阶梯光栅和变栅距光栅成为了分析仪器领域关注的热点, 但制作难度大是亟待解决的问题。

以刻线密度 79 line/mm 的中阶梯光栅为例, 闪耀角为 63.3°, 波长范围 180nm~800nm, 它的使用级次为 28~125, 这就相当于常规机械刻光栅在一级使用时刻线密度要达到 4000 line/mm~5000 line/mm, 甚至更高。这对光栅刻划机而言是一种挑战。

早期的光栅刻划机已经不可能进行如此高要求的光栅刻划。对光栅刻划机而言, 除机械本身的精度之外, 控制精度也是非常重要的。国外, 如美国 Optimerix 公司的第 1 代分步重复刻划机就是用激光定位的^[1]。但是激光干涉仪^[1-2]以波长为计量单位, 要求的环境条件太苛刻。典型要求包括温度控制到 ± 0.05 °C, 对温度和气压变化要连续补偿, 且在光路中要没有空气扰动^[3]。

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大基金资助项目 (2006BAK03A02)

作者简介: 王 芳 (1982-), 女, 硕士研究生, 现从事光栅刻划机控制方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: chinagrating@263.net

收稿日期: 2007-07-26; 收到修改稿日期: 2007-09-04

国内,自上世纪 80 年代以来采用光栅干涉仪^[1,4]来控制光电式刻划机。这种传统的光栅干涉仪采用普通光源照明,接收干涉条纹的振幅信息,它的结构简单、造价低廉、调整方便,使刻划机光电控制系统简化^[5-7]。利用光强度信号虽然具有较高的测试精度,但干涉场中放置光电探测器的个数和它们之间的相位关系,要经过严格的计算,有很大的局限性;普通光源的频谱很宽,不同级次的衍射光互相干涉,会产生不同频率的谐波成分,导致干涉场中的条纹的对比度下降,降低了计量精度。因此,对高性能的光电式刻划系统进行研究具有重要的现实意义。

鉴于阶梯光栅、变栅距光栅和宽波段中红外光栅等对刻划机的高精度要求,笔者提出一种自准直式激光光栅外差干涉仪,用于提高光电式光栅刻划机的控制精度。该系统把干涉测量基准由光波转换为光栅常数,而仍应用光拍频的细分方法,利用光栅的对称级次的衍射光形成干涉,构成等光程干涉仪,提高了系统的稳定性;激光双频起了调制作用,可以采用交流放大器来避免直流漂移等问题。本文中通过对自准直式激光光栅外差干涉仪原理和实验分析,得出此系统具有纳米级分辨力,用于实时测量控制系统,计量误差很小,完全达到了中阶梯光栅等特种光栅对刻划机的高精度分度要求。

1 光栅外差干涉仪的设计

1.1 系统分析

自准直式激光光栅外差干涉仪的原理结构见图 1。

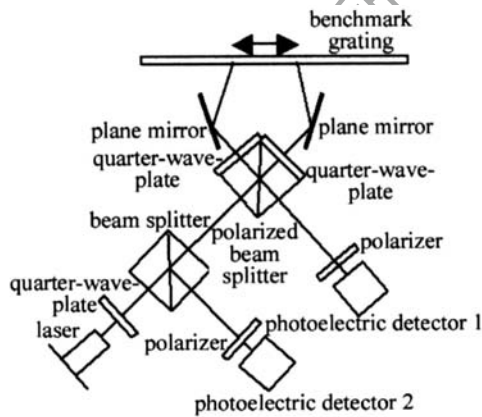


Fig 1 Grating heterodyne interferometer of auto-collimating type

纵向塞曼 He-Ne 激光器^[2]输出两频率 (f_1, f_2) 的左旋和右旋圆偏振光,经过 $\lambda/4$ 波片变成振动方向垂直的两束线偏振光。线偏振光入射到分束器 (beam splitter, BS) 上被分为两部分:一部分光被反射,作为干涉仪的参考信号;另一部分透过 BS,再经一系列元件得到系统的测量信号。最后两路信号通过锁相倍频后输入减法器,实现两组连续脉冲的相减,得到计量信号。

参考光路:含有频率 f_1, f_2 的反射光束入射到检偏器上,检偏器的主截面方向要与两正交的线偏振光的振动方向各成 45° 。根据马吕斯定律,这两束正交的线偏振光在检偏器主截面上的分量产生拍频,它等于激光所产生的两个光频的差值即 $f_1 - f_2$ 。设参考光路中两频率光的波动方程为:

$$\begin{cases} E_1 = |E_{n1}| \exp[-i(2\pi f_1 t)] \\ E_2 = E_{n2} \exp[-i(2\pi f_2 t)] \end{cases} \quad (1)$$

合成光强函数为:

$$I_r = E_r^2 = (E_{n1} + E_{n2})(E_{n1}^* + E_{n2}^*) \quad (2)$$

式中, E_{n1}, E_{n2} 分别为两束参考光振幅, E_r 为合成光的振幅。

由于光电探测器的频响限制,并借助于带通滤波器,直流及光频分量被消除。假设两束参考光振幅 $E_{n1} = E_{n2} = E_r$,则光电探测器 2 实际接收到的拍频干涉参考信号光强 I_r :

$$I_r = |E_r|^2 \cos[2\pi(f_2 - f_1)t] \quad (3)$$

测量光路:透过 BS 的偏振光束 f_1, f_2 被偏振分束器 (polarized beam splitter, PBS) 分开,分别入射到基准光栅上,调整光路中的两片平面反射镜的角度以调整两路光入射到基准光栅上的角度,使其满足 ± 4 级时自准直入射角,从而干涉仪两个臂垂直两路光自准直返回 PBS。当基准光栅移动时,衍射光频率变为 $f_1 + \Delta f_1, f_2 + \Delta f_2$ (Δf_i 为多普勒频移量,它包含了基准光栅的位移信息)。再经检偏器后产生干涉。同理,由光电探测器 1 接收到拍频测量信号的光强 I_m 为:

$$\begin{aligned} I_m &= |E_m|^2 \cos[2\pi(f_2 + \Delta f_2 - f_1 - \Delta f_1)t] = \\ &|E_m|^2 \cos[2\pi(f_2 - f_1 \pm \Delta f)t] \end{aligned} \quad (4)$$

可见光电探测器 1 处输出一组频率为 $(f_2 - f_1) \pm \Delta f$ 的连续脉冲,光栅的位移量 s 可由 I_r 和 I_m 的位相差 Δf 求得:

$$\pm \Delta f = [(f_2 - f_1) \pm \Delta f] - (f_2 - f_1) \quad (5)$$

其中两路光的位相差也即拍频频率 Δf 为:

$$\Delta f = |\Delta f_2 - \Delta f_1| \quad (6)$$

1.2 位移转换

由光栅多普勒效应^[8-9]可得光栅的衍射主极大所对应的多普勒频移量 Δf_k 为:

$$\Delta f_k = kv/d \quad (7)$$

可见,光栅衍射光的多普勒频移与光栅常数 d 成反比,与运动速度 v 及衍射级次 k 成正比,而与入射光的方向和波长无关。采用 ± 4 级自准直衍射,则有:

$$\Delta f = |\Delta f_2 - \Delta f_1| = |\Delta f_{-4} - \Delta f_{+4}| = 8v/d \quad (8)$$

设基准光栅的位移量为 s ,则有:

$$s = \int_0^t v dt = \int_0^t \frac{d}{8} \Delta f dt = \frac{d}{8} \int_0^t \Delta f dt \quad (9)$$

基准光栅、刻划光栅毛坯及工作台固定在一起,它们的位移量相同,由计量脉冲的数目得到,即:

$$s = (N + \epsilon) d/8 \tag{10}$$

(10)式即为双频激光光栅干涉仪的位移转换原理公式。式中 N 为计量脉冲整数, ϵ 是小数。由此可见,采用 ± 4 级衍射光相当于 8 倍的光学细分,光栅每移动 $d/8$ 时,拍频信号相位变化为一个周期,即有一个计量脉冲。利用后续电路对得到的脉冲信号进一步细分,可使测量灵敏度提高几十倍到上百倍。

1.3 基准光栅设计

干涉仪系统选用美国的 Agilent5517B Laser Head 双频激光器, Agilent10780C Receiver 光电接收器,基准光栅由作者设计研制。采用基准光栅对称级次的自准直衍射,要求衍射光能量对称闪耀在 ± 4 级上,闪耀波长为 632.8nm。为此设计了槽型为等腰三角形的对称闪耀光栅。同时考虑到光栅的槽距与光波长相当,光栅具有很强的偏振效应。设计的基准光栅,在波长 632.8nm 处 TE 波、TM 波的衍射效率要相同或尽可能相近,将系统由此引入的计量误差减至最小。

图 2 中给出了刻槽密度 300 line/mm 光栅的 -4 级衍射和 600 line/mm 光栅的 -2 级衍射对 TE 波、TM 波及非偏振光的衍射效率曲线。

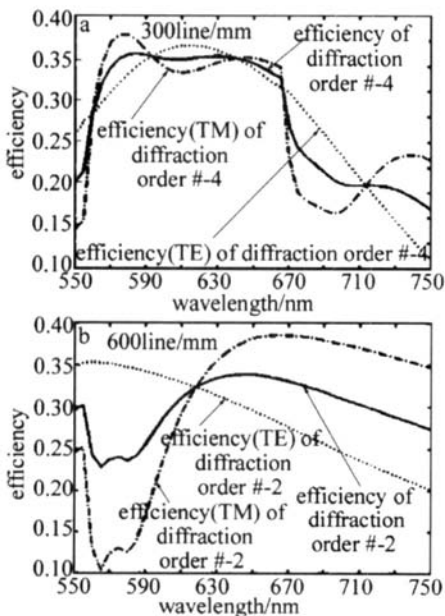


Fig 2 Curve of diffraction efficiency with wavelength

由图可见,在 632.8nm 处,光栅刻槽密度为 600 line/mm 的 -2 级衍射光,TE 波、TM 波的衍射效率相差 5%。对于 300 line/mm 光栅的 -4 级衍射光,TE 波、TM 波的衍射效率相差 0.5%,并且在波长 632.8nm 附近变化平缓。

通过对不同刻线密度光栅的不同级次衍射效率进行理论计算和对比,发现槽型为等腰三角形的对称闪

耀光栅,刻槽密度为 300 line/mm, ± 4 级自准直衍射时,TE 波、TM 波的衍射效率是最接近,也是较高的,并且可以达到较高倍的光学细分。同时它的栅距制造误差小于 0.3 μm ,周期误差小于 0.03 μm ,罗兰鬼线强度小于 0.1%。可以满足系统要求。

2 实验结果

为了检测系统在实际应用中的动态性能,用它控制 4 号光电式光栅刻划机,进行各种线密度光栅刻划实验,对干涉仪系统进行了测试。这里给出了刻线密度为 600 line/mm 和 2400 line/mm 光栅的实验结果。图 3 为单个刻线间距的测量值与理想值的偏差,图 4 为数条刻线的累积误差曲线。

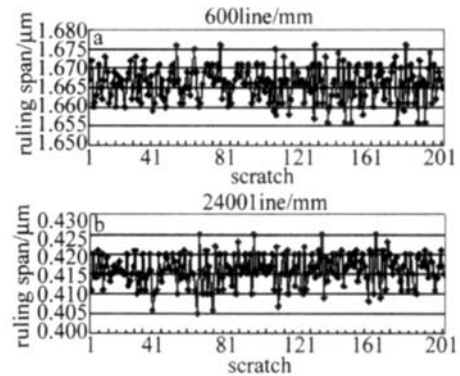


Fig. 3 Biased error curve for ruling span

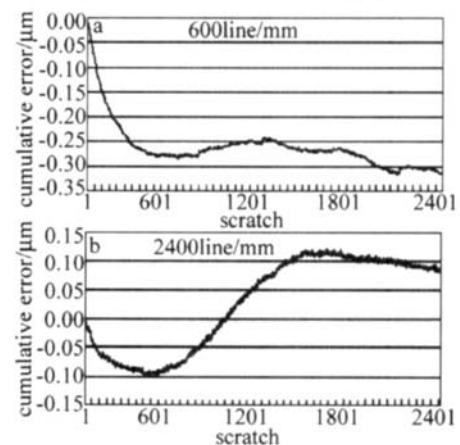


Fig. 4 Cumulative error curve for ruling span

由图 3、图 4 可以看出,系统计量的刻线间距偏差优于 10nm,在 3mm 的行程内累积误差约为 0.3 μm 。可以满足光栅的偶然误差小于 $d/10$,周期误差小于 $d/100$ 的刻划要求。

测试结果是在未对光栅刻划室进行严格控制的情况下得到的,且对计量数据也未作任何补偿和修正。实验动态测试结果和理论估计情况基本一致。若完成对整个刻划机的机械结构改造,并对各种环境严格控制,及对计量结果进行相应补偿,可得到更高的刻划精度。

(下转第 526 页)

尺度(见图 6b)的变化。由于地表反照率较高(0.52),当光学厚度很小时,卷云衰减地表反射,使大气顶向外的反射率随光学厚度增大而减小,但当光学厚度增大到一定程度(比如 1),卷云将增加地球向外的辐射,使大气顶的背景辐射增强,反射率将随光学厚度增大而增大(见图 6a)。在 $1.064\mu\text{m}$ 附近,冰的折射率虚部很小(见图 3),反射率随卷云有效尺度的变化不明显(见图 6b,此时光学厚度为 1),只有对小粒子而言,这种变化关系较为明显:反射率随粒子有效尺度增大而减小。

3 结论

采用逐线积分法和离散纵标方法,耦合卷云单次散射特性,模拟计算了由实心六棱柱状冰晶粒子组成的卷云在波长为 $1.064\mu\text{m}$ 时的反射率特性,得到有卷云存在条件下 $1.064\mu\text{m}$ 激光对地观测时的反射率与入射光源的位置、观测天顶角和卷云参量(云光学厚度、粒子尺度等)的定性分析。

主要结论如下:(1)在 $1.064\mu\text{m}$ 附近,散射相函数在 22 和 46 附近出现明显的峰、晕值。(2)卷云存在时,在 $1.064\mu\text{m}$ 附近反射率随卷云光学厚度的增大而增大,随有效尺度的变化不明显;而且当观测天顶角与太阳入射天顶角相等时,会出现明显的“镜面反射”现象。(3)卷云在 $1.064\mu\text{m}$ 附近对激光的主要影响是散

射,吸收在消光中占了很小的部分;其次,卷云的散射明显改变了光辐射的空间分布,散射的方向变化主要由卷云的散射相函数以及光线入射角度和观测角度决定。这一点给实际工程应用(比如激光测距、激光对大气的探测等)提供了理论基础。

参考文献

- [1] SASSEN K. The polarization lidar technique for cloud research: a review and current assessment [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1991, 72: 1848-1886.
- [2] L DU KN, TAKANO Y, OU S C, *et al* Laser transmission through thin cirrus clouds [J]. Appl Opt, 2000, 39 (27): 4886-4894.
- [3] OU S C, TAKANO Y, L DU KN, *et al* Laser transmission-backscattering through inhomogeneous cirrus clouds [J]. Appl Opt, 2002, 41 (27): 5744-5754.
- [4] YANG P, L DU KN, WYSER K, *et al* Parameterization of the scattering and absorption properties of individual ice crystals [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 105: 4699-4718.
- [5] ZHAO Y J, WELH L. Scattering properties of cirrus clouds in the shortwave spectral region [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2 (3): 169-174 (in Chinese).
- [6] HU Y X, WIELCKIB. δ -Fit: a fast and accurate treatment of particle scattering phase functions with weighted singular-value decomposition least-squares fitting [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2000, 65 (3): 681-690.
- [7] STAMNES K, TSAI S C, *et al* A numerically stable algorithm for discrete-ordinate method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media [J]. Appl Opt, 1988, 27 (13): 2502-2509.

(上接第 476页)

3 结论

综上所述,可以构建一套高精度控制光电式光栅刻划机的系统。本系统以精密的光栅栅距作为计量标准,采用双频激光作为光源,由基准光栅的自准直衍射光束相干产生测量信号,具有一系列优点。实验证明此系统控制光电式光栅刻划机的分度运动,配合专门的硬件电路,使整个分度系统简洁、实用,计量误差很小,完全达到了中阶梯光栅等特种光栅对刻划机的高精度分度要求。

目前,已经建立了一套测量平台,相应的刻划机机械结构改造工作正在进行之中,相信很快就可以投入到光栅刻划工作中使用。由于其优良特性,在精密计量方面有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] ZHU Sh J, ZHOU H X, BAO X Ch, *et al* Diffraction grating [M]. Beijing Mechanical Industry Press, 1986: 172-179, 205-219 (in Chinese).

- [2] YN Ch Y. Modern interferometric measuring technique [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999: 149-177 (in Chinese).
- [3] ZHOU W L. Technology and application in high precise measurement of grating interferometer [J]. Implement Technology, 1994, 28 (1): 37-42 (in Chinese).
- [4] ZHU M Ch, ZHOU Zh F, ZHANG T. Research of the He-Ne laser beat-wave interferometer [J]. Laser Technology, 2004, 28 (5): 531-533 (in Chinese).
- [5] HAO D F. Theory of diffraction grating interferometer [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 1986: 3-40 (in Chinese).
- [6] L N D J, JIANG H, YN Ch Y. Nanometer interferometer using grating Doppler effect [J]. Chinese Journal of Laser, 2002, 27 (12): 1080-1084 (in Chinese).
- [7] DOBOSZ M. High-resolution laser transducer of linear displacements [J]. Opt Engng, 1992, 31 (3): 500-503.
- [8] SHIL, MA Ch X, HU D J. Study of the photoelectric ruling control on the fabricating of the high density diffraction grating [J]. Optical Technique, 2004, 30 (3): 340-342 (in Chinese).
- [9] DOBOSZ M. Application of a divergent laser beam in a grating interferometer for high-resolution displacement measurements [J]. Opt Engng, 1994, 33 (3): 897-901.