

计量光栅在测量位移中的应用

— 莫尔条纹技术 —

朱 应 时

摘要：本文系统地介绍计量光栅的特点和测量位移的原理；并且还介绍了莫尔条纹读数系统中的一般的读数头的结构，其中特别介绍了两倍、四倍和多倍的读数系统。最后介绍我们在莫尔条纹技术应用上的几项效果显著的成果。

一、概 述

莫尔条纹是一种光学现象，当光束通过某种周期性结构的物体后，使光束在一定的空间平面上相应地形成相位的或幅度的周期性变化。如果将这种具有相近似的周期性变化的两束光进行“干涉”，就会形成肉眼可看得见的明暗相间的光花样，这种光花样称为莫尔条纹。莫尔条纹实际上是一种光学的“放大”现象，因而具有广泛的应用，其中特别引人注目的是：用光栅作“莫尔”元件而产生的莫尔条纹可用来测量线位移和角位移。

莫尔条纹用于测量位移有其下列独特的优点：

1. 测量精度高

计量光栅一般地是由精密刻划机刻制出来的，其刻线精度比较高。莫尔条纹是由许多刻线综合作用而形成的，对刻划误差具有消除或平均作用。所以莫尔条纹信号代表的位置精度要比光栅上单根刻线的位置精度高。

2. 读数速率高

莫尔条纹的取数速率一般取决于光电接收元件和使用的电路的时间常数。取数速度的范围可从每秒零至数十万次，因此被测件

可以是静止的，也可以是快速运动的，莫尔条纹这种快速取数的特性非常适合对位移进行动态测量。

3. 分辨率高

常用的刻线节距为10微米~50微米，再加上将每个条纹细分60~100等分的电子学细分技术，是很容易做到1微米~0.1微米数量级的分辨率。目前已经研究成功了所谓“超干涉仪”的莫尔条纹读数系统，每个条纹间隔代表0.14微米。相当于 0.25λ （若波长 $\lambda=0.54$ 微米）。这比一般光波干涉仪条纹的分辨率还高一倍

4. 读数能数字化自动化

莫尔条纹信号是接近正弦形的，比较适合电路上的处理，由于目前数字电路比较成熟，因此测量位移的莫尔条纹信号可用数字形式显示出来，还可用数码形式输给专用计算机直接将测量的结果打印出来。

二、莫尔条纹测量位移的原理

利用莫尔条纹测量位移的核心元件是光栅。光栅不但具有按波长分光的本领，而且还对位移具有“敏感”的作用。当一束平面光波通过光栅后，光波的相位（除零级衍射波外）或幅度将发生变化，这种相位或幅度的变化与光栅的刻线周期有着对应关系，这

是光栅测量位移的基础。

用作计量位移的光栅称为“计量光栅”。计量光栅一般分为相位光栅和振幅光栅两种。其中每种都有透射和反射的两种类型，并且都能产生莫尔条纹，但是两者产生莫尔条纹的原理是不同的。

1. 相位光栅测量位移原理

当一束平面波以 i 的入射角射入透射的相位光栅 G (图 1), 经其衍射后衍射角为 θ_n 的第 n 级衍射波在空间任一点 c 上的相位为:

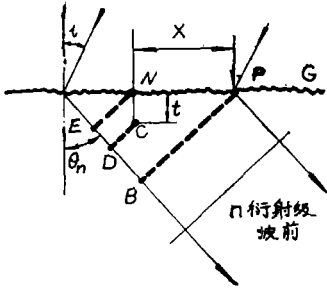


图 1

$$\begin{aligned} \varphi_c^{(n)} &= \varphi_p^{(n)} - \frac{2\pi(BE - DE)}{\lambda} \\ &= \varphi_p^{(n)} + \frac{2\pi t}{\lambda} \cos \theta_n - \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_n. \end{aligned}$$

其中 λ —— 光波波长。

同理衍射角为 θ_m 的第 m 级波在 c 点上的相位为:

$$\varphi_c^{(m)} = \varphi_p^{(m)} + \frac{2\pi t}{\lambda} \cos \theta_m - \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_m.$$

因此，这两束衍射波在该点的相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_c &= (\varphi_p^{(n)} - \varphi_p^{(m)}) + \frac{2\pi t}{\lambda} (\cos \theta_n \\ &\quad - \cos \theta_m) - \frac{2\pi x}{\lambda} (\sin \theta_n - \sin \theta_m) \end{aligned}$$

根据光栅的光谱最大值方程，将相位差 $\Delta\varphi_c$ 改写成如下形式:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_c &= (\varphi_p^{(n)} - \varphi_p^{(m)}) + \frac{2\pi t}{\lambda} (\cos \theta_n \\ &\quad - \cos \theta_m) - (n - m) \frac{2\pi x}{w} \end{aligned}$$

式中 n 和 m 为衍射级次; w 为光栅节距(在物理光学上称光栅常数)。对于一定的参考点和给定的衍射级来说: 上式中第一、第二两项都是常量, 因此可以看出, 在 c 点, 给定的两束衍射波的相位差与位移 x 成线性的关系。若这两束衍射光符合相干条件, 在 c 点就要发生干涉; 即光栅在 x 方向上连续移动时, 在 c 点就可产生光强的交替变化, 这种由相位变化导致光强度的变化就是测量位移的基础。在光栅衍射的一侧加上一个“指示器”, 使给定的两束衍射波前之间形成一个微小的特定的角度以满足在视场中形成具有一定宽度的莫尔条纹, 并除掉其余衍射级的影响。这种“指示器”可用光栅、分光镜、或双折射晶体。在用光栅时, 通常把作指示器的光栅称为“指示光栅”, 而和指示光栅配对的那个光栅称为“标尺光栅”。指示光栅和标尺光栅的节距一般是相等的、接近的、或具有整倍数关系的。如果把标尺光栅和指示光栅面对面的, 刻线几乎相平行地放在一起 (如图 2 所示), 假定这两块光栅是一样的,

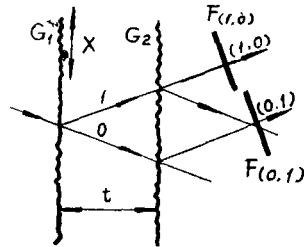


图 2

并且衍射光大部分集中在 0 级和 +1 级上, 当光线通过 G_1 衍射出 1,0 两束光射到第二块光栅 G_2 上时, 每一束光又进行一次衍射, 可以发现: 强度占优势而相近的两束衍射光 (1,0) 和 (0,1) 以相同的方向射出; 它们各自的波前 $F_{(1,0)}$ 和 $F_{(0,1)}$ 相互平行。当光栅 G_1 相对 G_2 沿 x 方向移动时, 光束 (1,0) 相对于 (0,1) 的相位发生变化, 光栅移过一个节距时, 其相位恰好变化 2π 弧度, 此时在出射光的光场上亮度均匀地变化一周, 这

就是莫尔条纹信号。将 G_1 相对 G_2 转动,使两者的刻线交叉一个很小的角度,便可获得垂直于刻线方向的具有一定宽度的莫尔条纹。

2. 振幅光栅测量位移原理

当平行光射入振幅光栅上时,光栅的“黑线条”将光吸收或反射,而“白线条”允许光线通过,在接近光栅表面的平面上形成与光栅刻线周期相对应的明暗相间的光花样(图3)。当光栅沿x方向移动时光栅表面附近参考点c上的光强度将交替变化,这种光强的变化就是测量位移的基础。由于光栅刻得较密(一般刻线密度为20~100条/毫米),光花样也很微细,这种光花样无法使用,通常采用刻线节距与标尺光栅相等、或相近的指示光栅实现多狭缝取光。如果将指示光栅与标尺光栅面对面重合在一起,使两者的刻线交叉一个小的 θ 角度,在平行光的照明下,出射光一侧的光场中将出现明暗相间的莫尔条纹。条纹宽度近似为 w/θ ,调整 θ 值便可得到任意宽度的莫尔条纹。这种莫尔条纹实际上就是上述微细光花样的放大象。

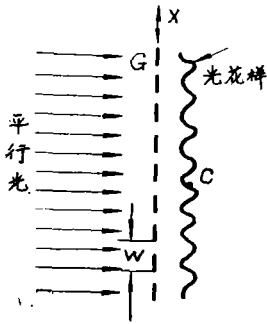


图3

当黑白光栅刻线密到一定程度时,衍射现象十分明显,只有减小指示光栅与标尺光栅之间的间隙才能得到一定对比度的莫尔条纹。光栅刻线愈密,间隙必然愈小,在实际应用中间隙愈小愈容易造成擦伤光栅的事故。在这种情况下,利用光栅的菲涅耳衍射成象效应,可使两者之间的间隙加大。所谓光栅的菲涅耳象就是平行光法向射入光栅上;在离光栅表面大约是 $n \frac{w^2}{\lambda}$ 远的各个平

面上出现和光栅线周期一样的明暗相间的光花样。当 $n = 1$ 时,称为光栅的第一菲涅耳象面,在此象面上光花样的周期与黑白光栅的刻线周期相同,只是相位差 π ,如果把指示光栅放在这个象面上,就好像放在标尺光栅表面上一样,可得到对比度较好的莫尔条纹。

三、莫尔条纹读数系统

莫尔条纹读数系统的作用就是将光栅的位移转换成近似正弦形的莫尔条纹光电信号。尽管莫尔条纹读数系统已经发展成多种形式,但基本上由光源产生平行光的透镜组、光栅付(标尺光栅和指示光栅)、限光光阑(狭缝),集光透镜(有的系统无此透镜)和光电接收器等几种元件组成。通常,除标尺光栅外,其余的元件结合在一起,构成组件,称为莫尔条纹读数头。常用的莫尔条纹读数头有用在相位光栅上的“光谱仪系统”(图4)和用在振幅光栅上的“法向入射系统”(图5)两种形式。

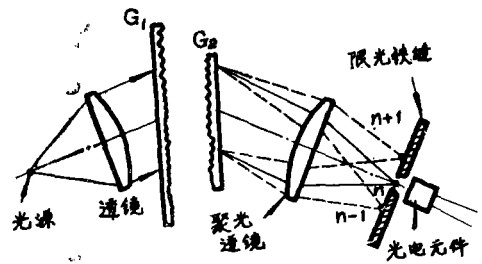


图4

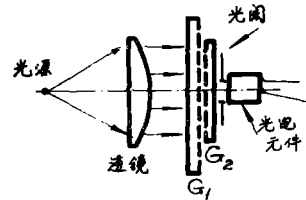


图5

有些莫尔条纹读数系统除了能取出莫尔条纹光电信号外,还具有光学细分信号的作用,这种读数系统可在光栅移动一个刻线节距过程中获得两个以上周期的莫尔条纹信号,下面重点介绍几种具有细分作用的莫尔

条纹读数头。

1. 二倍频成象读数系统

图 6 说明一个二倍频成象系统的原理，光源 S 通过透镜 L_1 产生平行光照明光栅 G，光栅的另一侧放置物镜 L_2 和反射镜 M，照明光栅的光线经过物镜投至反射镜，再由反射镜返回至物镜 L_2 ，使光栅的象正好和光栅重合，由于此成象系统的倍数为 -1，光栅象的运动和光栅相反，能形成二倍频的莫尔条纹信号。

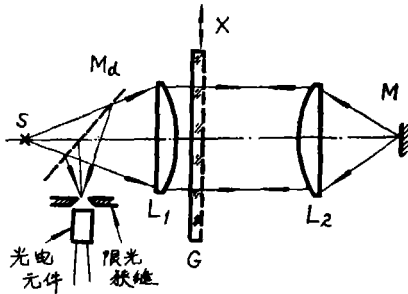


图 6

2. 四倍频读数系统

图 7 所示的莫尔条纹读数头中，凹球面反射镜 M 的曲率中心位于光栅表面 c 点上，白炽灯光源 S 经 L_1 发出的平行光经过半透镜 M_d 反射至靠近光栅的透镜 L_2 后，(L_2 的焦点 F 正好处在凹面镜的反射面上) 经过光栅 G 的衍射形成许多光点 $F_0, F_{-1}, F_{+1}, F_{-2}$ 和 F_{+2} 等等；这些光点相对应的衍射级为 0、-1、+1、-2、+2 等等。-1 和 +1 的光反回至光栅表面再次进行衍射后，经 L_3 在它的焦面上形成一系列的灯丝象，中心的那个象 D 是由光栅的 -1 和 +1 级光束形成的，而前者由 F_{-1} 反射而来，后者由 F_{+1} 反射而来，所以这两束光 (-1, -1) 和 (+1, +1) 在 D 点处产生干涉。当光栅沿 x 方向移动时，D 点处形成亮暗交替变化的莫尔条纹信号。经推导光强度的变化为：

$$I_{(x)} = I_0 + I \cos 8\pi x/w$$

式中 I_0 —背景的强度，

I —交变光强度的幅值。

上式表明：光栅移过一个光栅节距，光强度

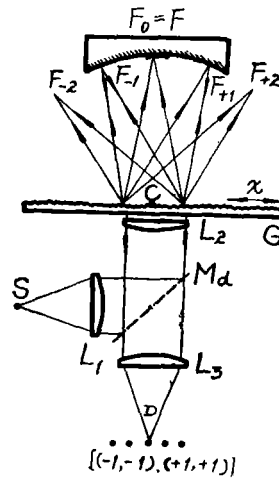


图 7

$I_{(x)}$ 变化四个周期，即获得四倍频的莫尔条纹信号。

3. 多倍频莫尔条纹读数系统

图 8 所示系统采用具有对称闪烁作用的反射相位光栅，所谓对称闪烁就是在 $m_1 = m$ 和 $m_2 = -m$ 的两个衍射级上获得较大并且接近等值的集光效能。

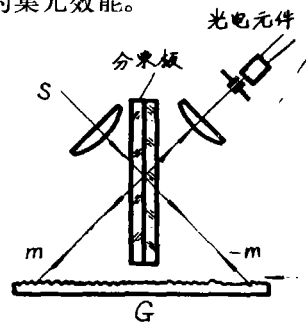


图 8

系统中反射衍射光栅上面放置一块分束板（即半反射半透射的），其分束面垂直于光栅表面，且平行于光栅刻线方向。一束平行光射入分束板被分成两束，它们以等值而符号相反的入射角射入光栅表面，经衍射后，以 m 和 $-m$ 衍射级方向，经过等长的光程相遇于分束面上，再经分束板的作用，在选定的方向上只有某种波长相等的两束光射出来，在这个方向上可以观察到亮暗变化的莫尔条纹信号。这种条纹的频率比光栅的刻线频率提高 $2m$ 倍。据称用这种系统对 600 条/毫米的反射光栅进行实验，应用其 ± 4 、

± 5 和 ± 6 衍射级获得了对比度为 80% 左右的莫尔条纹信号, 条纹的一个周期分别等于 0.21、0.17 和 0.14 微米。它对位移的灵敏度已经超过了迈克尔逊干涉仪。

四、我所在莫尔条纹技术上的应用

莫尔条纹技术工作, 在我所已经开展好多年了。我们利用莫尔条纹的光电信号控制圆分度刻划机, 控制光栅刻划机, 检测圆光栅和码盘的刻划分度误差。另外还用于测量精密小丝杆, 拾取光学轴角编码器的高位数的光电信号等。下面简单介绍莫尔条纹控制圆分度机、控制光栅刻划机以及检测圆光栅和码盘的工作。

1. 莫尔条纹控制圆分度刻划机

一般的圆分度刻划机是用精密蜗轮作为分度基准的, 由于工艺上的限制, 这样的刻划机通常只做到 1 秒左右的精度。我所利用圆光栅的多头取信号获得高精度的莫尔条纹光电信号的原理, 改装了一台原精度低于一秒的圆分度刻划机, 刻出的圆光栅的精度比原来的提高近一个数量级, 图 9 (a) 的曲线就是用莫尔条纹控制刻出的一块圆光栅的直径误差曲线, 后来又采用这种原理与昆明机床厂合作研制了 0.2" 圆分度刻划机, 图 9 (b) 是它刻出的一块圆光栅的误差曲线。这种圆分度机提高分度精度的工作原理是这样的, 在圆分度机的主轴上同心地安装上一块称为动

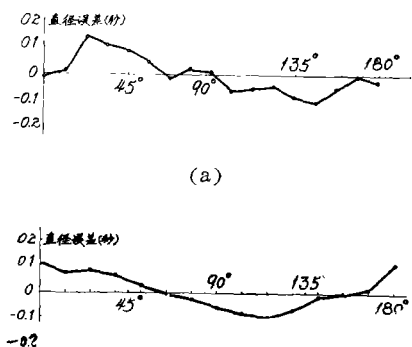


图 9 (b)

光栅的圆光栅, 其刻线稍许偏离中心, 切于一个半径为 0.6 毫米小圆, 在动光栅上面装一块与动光栅一样的圆光栅称为静光栅, 它与动光栅同心, 这种条件下, 在圆光栅上形成同心环莫尔条纹, 在圆光栅的刻划圆周上以一定间隔分布十个大视场莫尔条纹读数头, 从中获得莫尔条纹光电信号进行相加平均, 平均掉或大大减小圆光栅中的长周期误差、中周期误差、短周期误差和一些局部的“突跳”性误差, 因而这种信号具有很高的精度, 用以作为圆分度机的分度定位基准。由于莫尔条纹是空间的正弦信号, 所以这种刻划机既能进行间歇刻划又能连续刻划。

2. 莫尔条纹控制光栅刻划机

光栅刻划机的关键机构是分度机构。分度机构的精度直接决定着光栅的质量。为了获得高分辨本领的光栅。我所的光栅刻划机采用了由反射衍射计量光栅和分束棱镜组成的莫尔条纹读数系统 (图 10), 把从这系统中得到正弦光电信号用来控制光栅机。图 10 的莫尔条纹读数系统是顾去吾同志研制成功的, 由于这个系统实际上是一个等光程干涉系统, 所以可用普通的白炽灯作光源, 并对气压、温度、湿度、振动等环境要求比迈克尔逊干涉仪低得多。由此可见, 这个干涉系统是一个既简单而又可靠的系统, 再加上电子学系统又不复杂, 故称“简易干涉系统”。在这种简易干涉控制系统中的 600 条/毫米的反

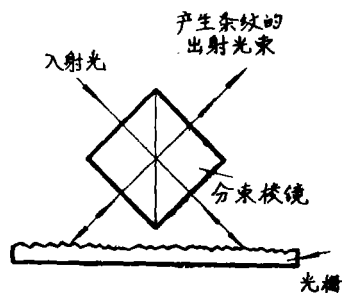


图 10

射衍射计量光栅 (刻线的槽形是对称的, 俗称样板光栅) 安装在放置被刻光栅的工作台上, 含有分束棱镜, 光源, 光电接收元件的

读数头固定在机座上。当装有计量光栅的滑座移动时光电元件就能输出正弦形的光电信号，由于采用+2级和-2级形成的莫尔条纹，所以莫尔条纹变化一个周期相当于移动0.41微米，在一个分度过程中滑座所走的距离由条纹计数器控制，由于这种莫尔条纹精度高，加上机械环节的精度也很高，所以分度定位精度优于0.02微米。在这台光栅机上刻出了面积为70×100平方毫米，分辨本领为30万的光栅，这种光栅即使在高级次使用时，罗兰鬼线的强度也低至可忽略不计。

3. 莫尔条纹检验圆光栅及码盘的分度误差

码盘和圆光栅是两种新的圆分度元件，为了获得这两种圆分度元件的分度误差，用原有的测量光学度盘的方法不能满足要求。我们采用了莫尔条纹信号的比相原理研制了一台码盘、圆光栅光电检验仪，仪器的工作原理是这样的：在仪器的精密主轴上装一块精度比较高的圆光栅，多头取得平均莫尔条纹光电信号作为分度的基准信号，被检圆光栅或码盘和输出基准信号的圆光栅同轴旋转，基准信号与被测圆光栅中取得的被测信号一起输入相位计。由于基准信号的相位与转角之间保持着正确的关系，而被测信号中存在着刻划误差，因此相位与转角之间有着相应的误差，当两者比相时，它们的相位差有变化，相位计输出的直流电压也具有相应的变化，这种变化表示着被测的圆光栅或码盘的刻划误差。误差是由记录仪画出曲线，再将曲线作对径平均处理便可得出被测圆光栅或码盘的直径误差。

本仪器经多次测试证明，单次测量中误

差为 $\pm 0.08''$ ，对精度比较高的被测件可用组合测试的方法提高测量精度，图11是本仪器

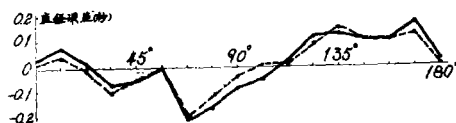


图 11

对一块圆光栅两次组合测试的直径误差曲线（一次组合测试有四个测回）。

参 考 文 献

- [1] J. Guild, *Inference System of the Crossed diffraction gratings*, Oxford, 1956;
- [2] J. Guild *Diffraction grating as measuring scales*. Oxford, 1960;
- [3] L. A. Sayce, *J. Sci. Instrum.* 5, (1972), 3, 193—198;
- [4] S. Haundel, *Measurement and Control*, 2, (1963), 2, 51—56;
- [5] A. H. McIlraith, *Machine shop magazine* 23, (1962), 4, 203—213;
- [6] Г. Н. Рассубова, Ф. М. Гирасимов, *Оптика и спектроскопия*, XIV (1963), 3, 406—413; 4, 559;
- [7] H. de. Lang, *Philips Technical Review*, 30 (1969), 6, 149—165;
- [8] 邹自强, *机床通讯*, 1975, 第3期;
- [9] 光机所、十六所, *光学机械*, 1974, 第5期;
- [10] 杨厚民, *简易干涉控制光栅刻划机*, 1973.