

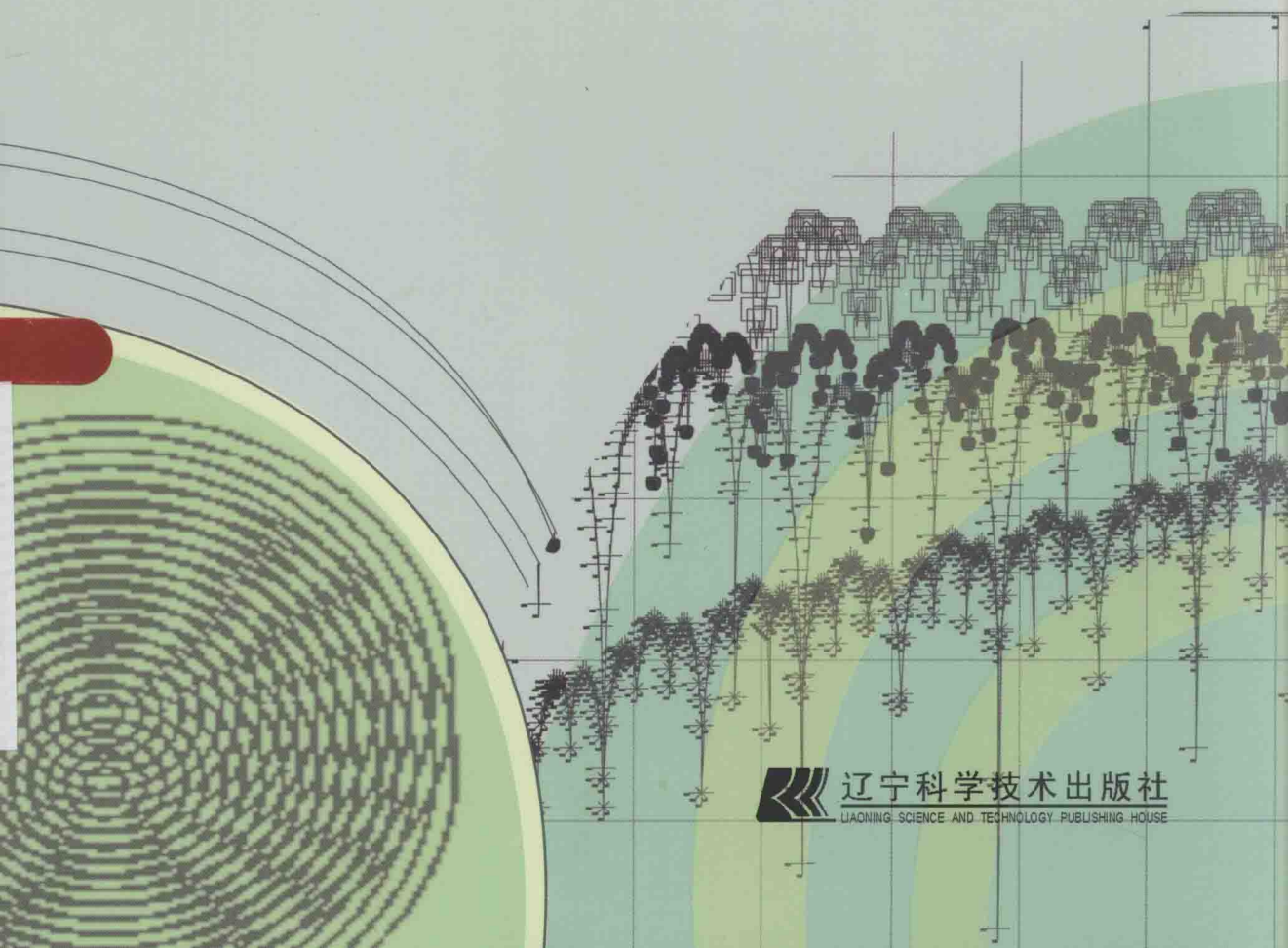


沈阳市优秀自然  
科学著作资助项目

# 光栅莫尔条纹纳米级细分技术

Nanoscale Subdivision Technology of Grating Moiré Fringe

常丽 著



辽宁科学技术出版社

LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

# 光栅莫尔条纹纳米级细分技术

常丽 著

辽宁科学技术出版社

沈 阳

沈阳市优秀自然科学著作资助项目

© 2015 常丽

图书在版编目(CIP)数据

光栅莫尔条纹纳米级细分技术 / 常丽著. —沈阳:  
辽宁科学技术出版社, 2015.6

ISBN 978-7-5381-9256-8

I. ①光… II. ①常… III. ①纳米技术—应用—计  
量光栅—研究 IV. ①O437.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第108795号

---

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路29号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳旭日印刷有限公司

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 185 mm × 260 mm

印 张: 6

字 数: 130千字

印 数: 1~1000

出版时间: 2015年6月第1版

印刷时间: 2015年6月第1次印刷

责任编辑: 李伟民

特邀编辑: 王奉安

封面设计: 嵘 嵘

责任校对: 李淑敏

---

书 号: ISBN 978-7-5381-9256-8

定 价: 30.00元

联系电话: 024-23284526

邮购电话: 024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

## 前 言

作者自攻读硕士研究生起就跟着导师金喜平教授从事莫尔条纹细分理论和光栅数显数控系统的研究。近年来,一直致力于光栅大量程纳米测量与定位及应用的研究。光栅因其具有精度高、成本低等优势,在传统的数显数控行业得到了非常广泛的应用。随着现代工业的飞速发展,对大量程纳米级位移测量与控制的需求不断扩大,基于光栅的大量程纳米级测量与控制的研究得到迅速发展。

作者近年来的研究重点是以应用广泛的低线密度光栅传感器为研究对象,以实际应用工况为前提,以实现低成本的大量程纳米级位移测量为目标,利用现代信号处理理论研究新型的莫尔条纹细分方法和光栅栅距在线测量方法。本书是作者多年的研究成果,书中详细阐述了所提出方法的原理及实现过程。在此基础上,进一步设计了新型光栅纳米测量装置,为实现产品化奠定了基础。

特别感谢沈阳市科学技术协会和辽宁省科学技术协会对本书的资助出版,同时非常感谢辽宁科学技术出版社的大力支持。

鉴于作者水平有限,书中的内容会存在某些研究不成熟等问题,恳请读者批评指正。

作 者

2014年5月

# 目 录

|     |                           |     |
|-----|---------------------------|-----|
| 1   | 绪论 .....                  | 001 |
| 1.1 | 莫尔条纹原理及应用 .....           | 001 |
| 1.2 | 莫尔条纹细分意义 .....            | 003 |
| 1.3 | 光栅纳米测量的研究现状及发展趋势 .....    | 004 |
| 2   | 莫尔条纹细分技术 .....            | 008 |
| 2.1 | 莫尔条纹细分基本原理 .....          | 008 |
| 2.2 | 传统的低倍莫尔条纹细分方法 .....       | 009 |
| 2.3 | 现有的高倍莫尔条纹细分方法 .....       | 011 |
| 2.4 | 莫尔条纹细分技术发展趋势 .....        | 016 |
| 2.5 | 本书的研究工作 .....             | 016 |
| 3   | 莫尔条纹特性分析 .....            | 018 |
| 3.1 | 光栅传感器特性分析 .....           | 018 |
| 3.2 | 莫尔条纹空间特性分析 .....          | 019 |
| 3.3 | 莫尔条纹时间特性分析 .....          | 024 |
| 4   | 基于时间信号的莫尔条纹小波细分法 .....    | 026 |
| 4.1 | 光栅传感器输出信号采集与处理 .....      | 026 |
| 4.2 | 小波细分法 .....               | 032 |
| 4.3 | 仿真与实验 .....               | 039 |
| 5   | 基于空间信号的莫尔条纹校正傅里叶细分法 ..... | 045 |
| 5.1 | 莫尔条纹空间信号采集与分析 .....       | 045 |

|     |                                 |     |
|-----|---------------------------------|-----|
| 5.2 | 基于傅里叶变换的细分原理 .....              | 048 |
| 5.3 | 基于CCD采集的空间信号的校正傅里叶细分法 .....     | 050 |
| 5.4 | 基于CMOS采集的空间信号的校正多相位傅里叶细分法 ..... | 059 |
| 6   | 光栅栅距动态测量 .....                  | 070 |
| 6.1 | 光栅栅距误差分析 .....                  | 070 |
| 6.2 | 现有的栅距测量方法 .....                 | 072 |
| 6.3 | 光栅栅距动态测量方法 .....                | 072 |
| 6.4 | 累积误差和细分误差修正 .....               | 083 |
| 6.5 | 动态栅距测量在实际应用中的意义 .....           | 085 |
| 7   | 新型光栅纳米测量装置 .....                | 086 |
| 7.1 | 两种细分方法适用的场合 .....               | 086 |
| 7.2 | 关键问题的进一步解决方案 .....              | 087 |
| 7.3 | 新型光栅纳米测量装置构建 .....              | 088 |
|     | 参考文献 .....                      | 090 |

# 1 绪论

## 1.1 莫尔条纹原理及应用

1874年,英国物理学家瑞利首先揭示出了莫尔条纹(Moiré fringes)图案的科学和工程价值,指出了借观察莫尔条纹的移动来测量光栅相对位移的可能性,为在物理光栅的基础上发展出计量光栅的分支奠定了理论基础。

莫尔条纹是光栅位移精密测量的基础,在实际应用中由两个空间频率相近的周期性光栅图形叠加而形成的光学条纹就是莫尔条纹,可以由遮光效应、衍射效应和干涉效应等多种原理产生。现代光栅是用精密的刻划机在玻璃或金属片上刻划而成的,光栅相邻刻线之间的距离称为光栅栅距,亦称光栅节距或光栅常数,光栅栅距是位移测量的基准。

光栅传感器由标尺光栅、指示光栅、光路系统组成,光栅传感器的光路形式有两种:一种是透射式光栅,它的栅线刻在透明材料(如工业用白玻璃、光学玻璃等)上;另一种是反射式光栅,它的栅线刻在具有强反射的金属(不锈钢)或玻璃镀金属膜(铝膜)上。

在生产实际中常用的低线密度透射光栅基本结构如图1.1(a)和图1.1(b)所示,它们分别为两块黑白型长光栅,两块光栅构成了一对光栅副。其中图1.1(a)所示的一块光栅作为测量的基准用,叫作标尺光栅或主光栅;另一块称为指示光栅。设透光的缝宽为 $a$ ,不透光的缝宽为 $b$ ,则 $a$ 与 $b$ 之和即为光栅栅距 $d$ ,两块光栅的栅距可以相等也可以不相等。将其中如图1.1(b)所示的一块光栅旋转很小的角度 $\theta$ 后,再将两块光栅相叠合,则两光栅栅线的夹角为 $\theta$ ,如图1.1(c)所示。当平行光垂直照射到两个光栅上时,就会在光栅后面某一方向上形成明暗相间的莫尔条纹现象,光栅莫尔条纹的相邻两个亮条纹或两暗条纹间的距离为莫尔条纹宽度 $W$ ,也称莫尔条纹间距。当两块光栅沿着垂直于栅线的方向作相对运动时,莫尔条纹便沿着与栅线近似相同的方向上相应的移动,光栅相对移动一个栅距,莫尔条纹则相应地移过一个条纹间距,莫尔条纹相应的移动一个条纹周期,如果两块光栅作相反方向的运动,莫尔条纹也随之向相反的方向运动,莫尔条纹对光栅栅距起到了光学放大的作用,通常通过莫尔条纹测量光栅位移,由光学元件可以提取莫尔条纹信号。

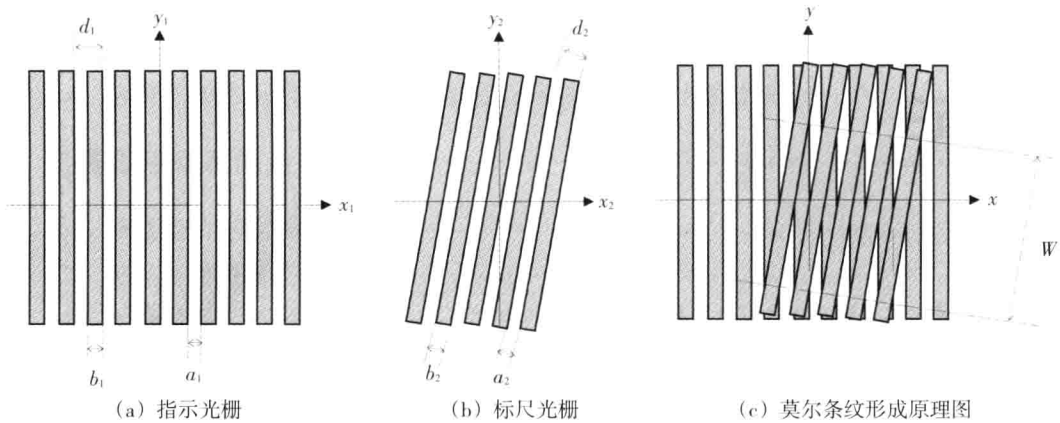


图 1.1 光栅传感器及莫尔条纹

所谓莫尔条纹细分是指以栅距为单位的测量精度不能满足要求时，需要对一个栅距内的位移即一个周期内的莫尔条纹信号进行插值，以求达到更高的分辨力和精度，细分也称为倍频、插补或插值。莫尔条纹现象是研究光栅测量系统的理论基础，深入研究莫尔条纹现象的形成机理、光场分布变化规律和光栅系统结构特性对莫尔条纹的影响规律对于提高莫尔条纹细分数和精度有着非常重要的作用。

莫尔条纹应用最广泛的领域是光栅位移测量，根据莫尔条纹原理可以实现直线位移和角位移的静态、动态测量，基于莫尔条纹数量与位移的关系实现精密位移测量，能够满足接触、非接触、小量程、大量程、一维、多维等各种需求的测量与控制反馈，广泛应用在程控、数控机床和三坐标测量机、精密测量与定位、超精密加工、微电子 IC 制造、地震预测、质量检测、形变、纳米材料、机器人、MEMS、振动检测等众多领域。

图 1.2 为各种莫尔条纹图形，说明莫尔条纹除了应用在位移（长度、角度）测量外，还广泛应用在数字跟踪控制、运动比较（两个相关运动部件间的关系）、形貌测量（人体轮廓测量、服装选型设计、工业零件或产品检测）、全息防伪加密以及莫尔偏析法（可测量焦距、折射率、楔角、温度梯度、溶液浓度、颗粒场分布）等领域。

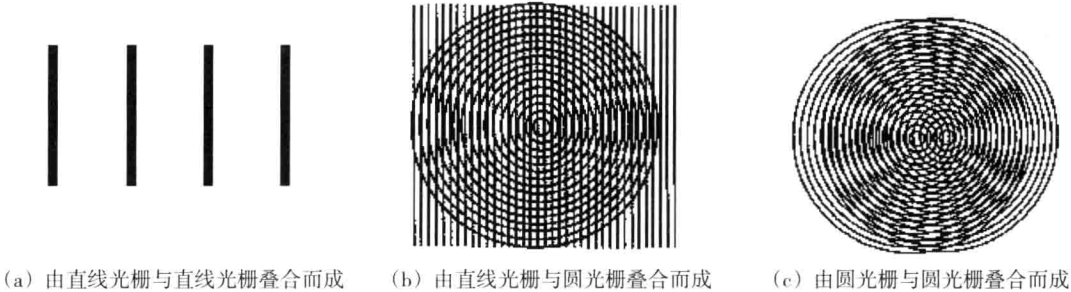


图 1.2 各种莫尔条纹图



## 1.2 莫尔条纹细分意义

光栅传感器测量位移的基本原理如图 1.3 所示, 光栅的位移是:

$$x = Nd + ad = N\frac{W}{\beta} + a\frac{W}{\beta} \quad (1.1)$$

式中,  $x$  为实际的位移值;  $N$  为移过的整数个栅距值;  $d$  为光栅栅距值;  $a$  为移过的非整数栅距值;  $W$  为莫尔条纹宽度;  $\beta$  为莫尔条纹对栅距的放大倍数。式 (1.1) 说明光栅位移等于整栅距位移值与非整栅距位移值之和, 也说明位移与莫尔条纹宽度的关系, 因此光栅高精度位移测量的关键是参数  $N$ ,  $d$ ,  $a$  的测量。

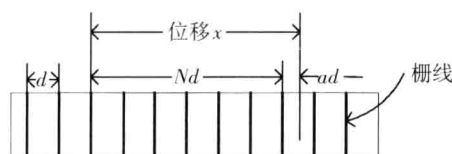


图 1.3 光栅测量位移原理

随着光栅位移测量从微米级向着纳米级 (0.1~100 nm) 发展, 关键参数的测量精度需要满足纳米级位移测量的要求。整栅距参数  $N$  通过计数器比较容易实现高精度测量。一般情况下, 光栅传感器采用等栅距光栅, 在低精度测量时, 栅距被认为是常数, 一般不需要测量, 即栅距误差在低精度测量时可以被忽略, 但在纳米级测量时其误差则不能被忽略, 为了达到纳米级测量需要测量出栅距的准确值并进行误差修正。非整数栅距值  $a$  的高精度测量实际上就是对莫尔条纹进行高倍纳米细分。综上所述, 光栅位移高精度测量的关键是高倍细分和栅距测量。

根据每毫米的刻线数光栅分为低线密度光栅和高线密度光栅, 高线密度光栅栅距小, 配合低倍数细分就可以实现纳米级细分, 而低线密度光栅则需要配合高倍数细分才能够实现纳米级细分。同高线密度光栅相比低线密度光栅具有量程大、成本低等优势, 本书以低线密度光栅为研究对象, 研究可实现纳米级的高倍莫尔条纹细分方法和栅距测量及误差修正等关键问题, 可为大量程纳米级位移的测量奠定一定的基础。高倍莫尔条纹细分方法研究的意义和价值不仅仅适合了低线密度光栅, 而且还可以用于高线密度光栅实现更高数量级的测量。

目前提高光栅测量精度基本是从以下两个方面入手:

(1) 通过提高光栅的刻线密度来实现, 但在制作工艺上难度很大, 成本也很高, 同时, 栅距越小, 对光学系统和机械结构的要求也就越严格, 光栅的极限运动速度也会随之降低; 目前国内外在长度计量领域内所用的光栅线数为 20~2 000 线/mm, 对应的栅距为 0.5~50  $\mu\text{m}$ , 全息光栅每毫米线数可以做到 6 000 线, 对应的栅距为 0.17  $\mu\text{m}$ , 但全息光栅的制作方法同样存在大量程光栅难以制作的问题, 因为很难得到两束非常宽的单色平行光, 所以全息光栅都比较短, 而且当光栅密度过高时, 对光源波长有相应的要求, 使应用受到限制。无论是刻划光栅、全息光栅, 还是它们的复制光栅, 都无法做得太长。

(2) 通过细分技术提高光栅位移测量精度。莫尔条纹对光栅栅距进行了光学放大,并且与栅距是一一对应的关系,莫尔条纹细分要解决的问题是当光栅处于一个莫尔条纹之内时即对应着一个栅距之内时,如何判断出其准确的位移值,这就需要对一个周期内的条纹信号进行插值即细分,以求达到更高的分辨力和精度。

## 1.3 光栅纳米测量的研究现状及发展趋势

纳米技术一般指纳米级(0.1~100 nm)的材料、设计、制造、测量、控制和产品的技术。纳米技术主要包括:纳米级精度位移和表面形貌的测量;纳米级表层物理、化学、机械性能的检测;纳米级精度的加工和纳米级表层的加工原子和分子的去除、搬迁和重组;纳米材料;纳米级微传感器和控制技术;微型和超微型机械;微型和超微型机电系统和其他综合系统;纳米生物学等。纳米级测量技术主要包括:纳米级精度的尺寸和位移的测量、纳米级表面形貌的测量。纳米测量技术与仪器是纳米科学和技术的一个重要分支。目前光栅位移测量主要朝着纳米级、大量程的方向发展,在大量程纳米级位移测量领域,激光干涉仪和光栅测量仪为常用的测量方法。由于激光干涉仪以稳频激光的波长为工作基准,而激光的波长与空气的折射率直接相关且激光干涉仪测量的是空间距离,因此激光干涉仪受测量环境影响较大。光栅测量仪的基准是光栅栅距,光程很小,影响因素主要是光栅的刻制误差和测试温度,这使得光栅测量仪更适应实际生产现场的大量程纳米测量。

### 1.3.1 目前纳米光栅传感器的研究现状

#### 1.3.1.1 纳米计量光栅测量技术

将刻线精度达到纳米量级的计量光栅称为纳米计量光栅,简称纳米光栅。与传统计量光栅传感器相比,纳米光栅具有两个重要的特点:一是刻线位置的误差能够达到纳米量级;二是刻线的宽度达到亚微米量级。这两个特点是纳米光栅能够达到纳米精度的必不可少的两个因素,互相依存,缺一不可,只有具备这两个因素,才能够达到纳米级的测量分辨力。

由于纳米计量光栅刻线精度很高,加上从纳米光栅上读取位置信息时都是采用大面积平均误差的方法,取出的是数千条线的位置平均值,所以误差曲线是十分平滑的,光栅位移测量系统可以达到很高精度。根据实验测量,在数毫米长度上,刻线误差可以达到 $\pm 2 \sim 20$  nm;在数十毫米长度上,可达 $\pm 20 \sim 80$  nm;在500 mm长度内,可达 $\pm 100 \sim 200$  nm。例如德国 HEIDENHAIN 公司采用三光栅和四光栅系统原理制作的光栅传感器,光栅线间距可以达到了 128 nm,但是这种光栅传感器受加工工艺的限制,价格也非常昂贵。

#### 1.3.1.2 纳米全息光栅测量技术

全息光栅是根据光的干涉原理制作的光栅。与纳米计量光栅相比较全息光栅具有很

高的空间分辨力，目前制作的最高工艺可达6 000线/mm，普通的全息光栅也具有1 500线/mm左右的空间分辨力，利用全息光栅高的空间分辨力作为长度测量基准可以实现位移的精密测量。

如图1.4所示，当一束平面单色波垂直入射全息光栅时，在光栅表面将发生衍射。将对称的两级衍射波通过反射镜叠加形成干涉场。当光栅作 $x$ 方向运动时，衍射波的位相将相应的发生变化，干涉条纹也将相应的移动，条纹的移动量与光栅的位移量是严格对应的。

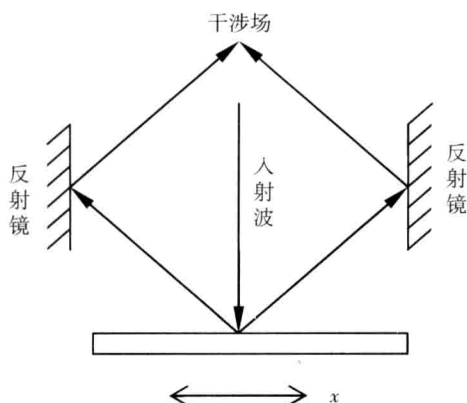


图1.4 全息光栅测位移原理

根据物理光学、傅里叶光学和多普勒效应都能推导出完全相同的结果，即位移计算公式为：

$$x = \pm \frac{N}{2} \cdot \frac{d}{m} \quad (1.2)$$

式中， $N$ 为条纹的移动数； $d$ 为光栅栅距； $m$ 为衍射波级次。

俄罗斯研制的LG100型全息光栅测量精度是 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ，测量分辨力可达0.1 nm。HEIDENHAIN的LIP401型全息光栅测量分辨力为5 nm，量程可达220 mm。由于环境对光栅测量技术的精度影响比较小，所以全息光栅在实际的测量中可以满足纳米级精度的使用要求。全息光栅位移测量系统能够达到纳米级的测量分辨力，因为全息光栅的制作原理是两束单色平行光干涉，因此全息光栅在测量位移时莫尔条纹的灵敏度是非常高的。但全息光栅的研制在大量程上同样受制作工艺的限制，因为技术上实现两束非常宽的单色平行光是非常困难的。因此，研究并开发一种高分辨力、高精度、大量程、性能稳定、性价比高的光栅式位移测量系统是很有必要的。

### 1.3.1.3 纳米炫耀光栅测量技术

炫耀光栅是根据在光栅刻槽的几何形状上光栅光谱的光能量具有不同级次的原理制成的。把光栅刻槽的剖面形状刻成如图1.5所示的锯齿形状，就能够使入射光衍射的光能量由零级移动到所需的级次上，从而解决了透射光栅的入射光强分布情况中入射光的大部分光能量都集中在了零级衍射（没有色散）的主极上这一问题，在其他的级次上，

特别是在较高的级次上光能量很小的弱点。把根据这种原理制作的光栅称为炫耀光栅。

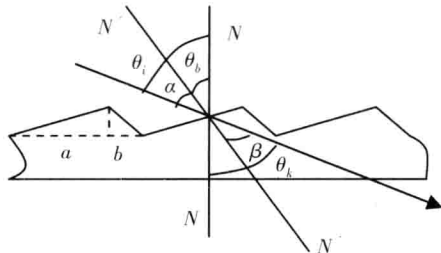


图 1.5 锯齿形炫耀光栅剖面

炫耀光栅测量结构原理图如图 1.6 所示，此测量系统由指示光栅  $G_1$ （炫耀光栅）和计量光栅  $G_2$  组成。当入射光束的入射角以一定的精确角度入射时，两条衍射光线的光线能量是相等的，且通过两光栅的空隙对称传播。计量光栅对这两条衍射光线进行第二次衍射，出射光线  $a, a'$  通过透镜，在四象限的光电接收元件的接收面  $D$  上相干形成莫尔条纹。当炫耀光栅相应的移动时，移动一个细光栅的栅距，对应的两束衍射光的光强波形相位差变化  $2\pi$ ，也就是说，明暗变化的干涉条纹移动一个周期，而且这种相位变化与计量光栅的栅距没有直接的关系。因为计量光栅的栅距比炫耀光栅的栅距要大很多倍，所以系统分辨力是由炫耀光栅的栅距决定的，能够大大提高测量精度。根据这种结构和气浮导轨以及红宝石探头研制的超精密测量仪，其测量量程为  $0 \sim 100\text{ mm}$ ，测量分辨力为  $1\text{ nm}$ 。纳米光栅传感器虽然可以达到纳米分辨力，但量程还不能满足大量程的需要。

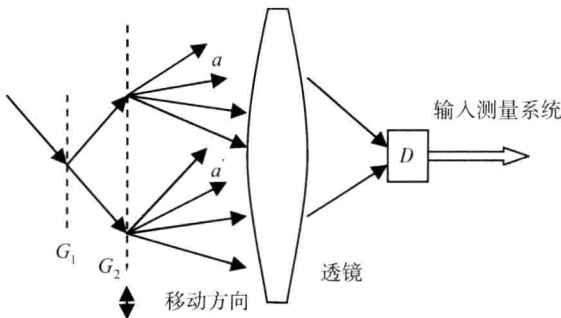


图 1.6 炫耀光栅测量原理

1.3.2 纳米测量研究发展趋势

在实际应用中，往往对纳米测量技术会提出既要测量范围大又要达到纳米级测量精度的要求。大量程纳米分辨力测量是光栅位移测量发展的必然趋势，未来的大范围高精度纳米测量要求在数十毫米以上的范围内达到至少亚纳米级的测量精度，光栅纳米测量不仅要求有高的细分倍数，而且要求细分均匀，使其具有较高的细分精度和较强的误差修正潜力。开发新的纳米测量理论和方法是一个亟待解决的问题。

随着纳米测量技术的发展，对工作环境的要求也更加严格。光栅纳米测量系统的分辨力高，对环境的变化非常敏感，工作环境对测量准确度的影响已成为非常重要的因素。所以建立适应光栅纳米测量的工作环境或进行环境误差修正也是一个亟待解决的问题。

目前实现光栅纳米级分辨力的理论和方法取得了较大的突破，但仅实现纳米级分辨力已不能满足要求，实现纳米级测量精度是未来研究的重点和难点。

## 2 莫尔条纹细分技术

### 2.1 莫尔条纹细分基本原理

光栅栅距是光栅测量位移的基准，细分是指对一个栅距内的位移进行准确测量，因为光栅位移测量是利用莫尔条纹对光栅栅距的光学放大作用和一一对应的关系实现的，因此也就是对一个莫尔条纹进行细分，称为莫尔条纹细分技术，该技术是光栅实现高精度测量的关键技术。图 2.1 为莫尔条纹光强的分布图，其可以由遮光原理、干涉原理和衍射原理或者其他原理产生，受生产工艺和器件参数极限的限制，栅线密度或条纹密度不能无限提高，进一步提高精度必须进行条纹内的细分，条纹细分就是通过光强信号判断在一个莫尔条纹内的任意位置  $x'$ ，实现位移测量时还需要进行辨别运动方向，辨向一般原理如图 2.2 所示，利用传感器输出的任意两路莫尔条纹信号之间依次相差  $90^\circ$  的相位超前与滞后的关系进行判断，如果  $A$  的相位超前  $B$  称为正向运动，则  $B$  的相位超前  $A$  称为反向运动。

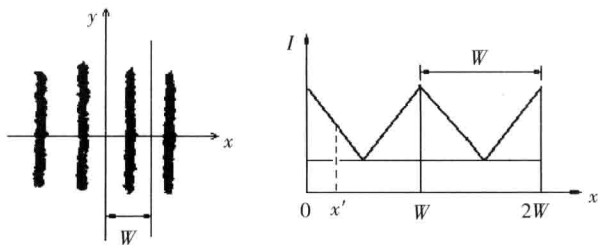


图 2.1 莫尔条纹细分原理

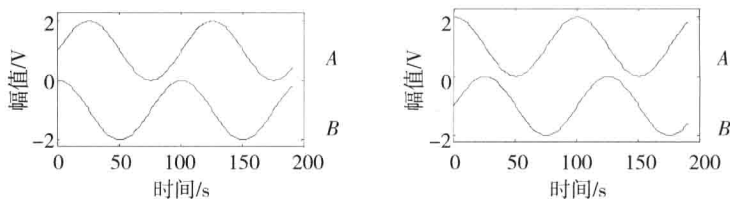


图 2.2 辨向原理

按照细分变量进行分类，莫尔条纹细分方法包括空域细分和时域细分。  
空域细分是指直接对空间莫尔信号进行细分，常用的细分方法包括分划板和读数鼓轮直接测微，四透分镜、阵列光电池等四倍频。

时域细分是指将空间莫尔信号调制到时间信号上,常用的细分方法包括调幅细分和调相细分,调幅细分包括相位细分和幅值细分,调相细分包括机械扫描和电扫描。

按照实现方式进行分类,莫尔条纹细分方法包括机械细分、光学细分和电子细分。

机械细分是指对于不满足一个光栅栅距的微小距离采用精密位移器件和小量程、高分辨率的测量系统对它进行测量。该方法的优点是对光栅莫尔条纹信号质量没有太高的要求,细分数可以很大,但缺点是使用非常麻烦,不具有普遍性。

光学细分是指使用光学技术改变光栅莫尔条纹信号产生的原理,使光栅位移传感器在一个栅距内输出多个周期信号。可以提高测量的分辨率,但是致使光栅传感器系统复杂,光栅传感器体积大,会削弱光强,导致光栅传感器不灵敏。

电子细分是指利用电子技术对光栅输出的电信号进行细分。这种方法设计灵活,可以根据不同的应用场合设计不同的分辨率,还可以将细分模块与显示、控制模块相结合。该种细分方法是光栅信号细分一个重要的发展方向,莫尔条纹信号的电子细分技术已成为光栅计量技术一个重要的组成部分。

电子细分方法主要包括幅值细分和相位细分,幅值细分主要是通过计算光栅输出电信号的幅值变化来判定位移量的大小,该方法的优点是细分数可以很高,缺点是对信号波形的质量要求较高,否则细分精度很难达到要求;相位细分主要是通过计算电信号的相位差来确定位移量的大小,该方法的优点也是细分数可以很高,缺点是对信号的相位要求严格,否则细分数尽管很高,由于误差太大,也没有实际的意义。电子细分法可由软件和硬件实现,主要是通过模数转换器采集光栅输出的电信号,然后在微处理器内进行滤波、计算、细分算法来实现细分,该方法的优点是可以实现较高的细分数,随着微处理器等电子器件的速度越来越快,该方法越来越具有优势。

通过电子细分技术提高光栅位移测量精度有更大的空间,也是研究的热点,目前已经提出了多种新型细分方法,但还存在很多关键问题需要解决,包括对信号波形质量要求高、速度慢、量程小、环境影响大、误差分离与修正困难等诸多问题,忽略这些问题在较理想的条件下单纯提高细分数并不能应用到实际生产中。

## 2.2 传统的低倍莫尔条纹细分方法

### 2.2.1 传统的光学细分方法

#### 2.2.1.1 光学成像二倍频

用负一倍光学成像系统,将主光栅栅线成像到它本身光栅表面上,用此像和主光栅本身形成莫尔条纹。由于像的运动方向与主光栅的运动方向相反,从而使莫尔条纹的频率提高1倍,达到光学成像二倍频。该方法要求一套成像质量较高的光学系统,应用受到一定的限制。

### 2.2.1.2 光学衍射四倍频

利用光的二次衍射级次分别获得  $(+1, +1)$ 、 $(-1, -1)$  的衍射光, 相互干涉而形成莫尔条纹, 把信号的频率倍增4倍, 即实现了光学四倍频。该方法采用工艺上较复杂的、反差好的相位反射光栅, 同时需要一套较复杂的光学系统, 调整比较烦琐。

### 2.2.1.3 基于闪耀光栅实现高倍频

采用具有对称闪耀作用的反射相位光栅 (也可用透射光栅), 利用高级次衍射光干涉法获得高倍频。若衍射级次取  $\pm 4$ ,  $\pm 5$ ,  $\pm 6$ , 可实现光学八倍频, 十倍频, 十二倍频。要求倍频数越大, 相应地要增大光栅的闪耀角, 刻槽加深, 工艺也更困难。

### 2.2.1.4 粗细光栅组合的光学倍频

采用栅距较小的细光栅作为指示光栅, 用栅距是细光栅整数倍的粗光栅作为主光栅, 它们形成莫尔条纹时, 莫尔条纹信号的频率取决于细光栅栅距, 这就相当于把粗光栅倍频了, 此方法的倍频数不能太大。

### 2.2.1.5 光学倍频器

利用光学转向系统使双光束干涉仪中的测量光线经可动的测量镜的多次反射后射出, 等效的光程被放大了, 该方法主要应用在激光光波干涉测量上。

## 2.2.2 传统的电子细分方法

### 2.2.2.1 三角波细分法

这种细分方法的基本原理是将莫尔条纹的 (正) 余弦信号进行  $|\sin\theta| - |\cos\theta|$  运算, 运算结果是将莫尔条纹信号转换为近似三角波的信号, 再根据三角波的幅值, 进行线性插值, 得到每个插值点相应的相位值, 从而可以得到光栅在一个信号周期内的位移值。

### 2.2.2.2 正切量化细分法

这种细分方法的原理是通过同步电路同时将两路莫尔条纹的 (正) 余弦信号进行 A/D 转换, 转换得到的莫尔条纹幅值 (即数字化电压值) 送入微处理器或计算机进行除法运算, 求出正切值, 然后通过查表法或者计算反正切运算可以获得相应的相位值, 从而得到光栅在一个莫尔条纹信号周期内的位移。

### 2.2.2.3 正、余弦结合细分法

这种细分方法是正切量化细分的改进, 这种细分方法中, 首先将一个完整的莫尔条纹信号周期以  $\pi/4$  间距分为8段, 每一段中以正切的幅值小于0.707倍峰值的 (正) 余弦信号作为被插值信号, 这是因为这段信号的斜率比较大, 做除法可以有效地降低误差。细分时, 应该先判断当前莫尔条纹信号所处的位置, 再查表得到细分值。

### 2.2.2.4 正弦量化细分法

这种细分方法的基本原理是将正弦信号进行量化, 然后再将转换结果进行归一化处理, 即除以当前莫尔条纹信号的峰值, 最后由计算机或微处理器根据相应的算法计算反正弦值或者通过查表法获得相应的相位值, 根据相位值可以间接地得到一个信号周期内的位移值。引入余弦信号的目的是为了实时辨向的方便。



### 2.2.2.5 新型莫尔条纹锁相细分法

这种细分方法解决了锁相环应用在矢量测量中的辨向、非整周期和静态测量3个关键性问题,将传统锁相倍频细分法和鉴相细分法的结合,通过两种方法结合,使锁相倍频法综合了传统锁相法和鉴相法的特点,新型莫尔条纹锁相细分法工作原理如图2.3所示。 $\sin\theta$ 和 $\cos\theta$ 为光栅传感器输出的正余弦信号, $\sin(\omega t)$ 和 $\cos(\omega t)$ 为信号发生器产生的高频调制信号, $\omega$ 为调制信号的角频率。对两路计数结果 $N$ 和 $N'$ 进行差分运算,则可获得:

$$N' - N = (nTf + nTv/d) - nTf = nTv/d = n\Delta x/d \quad (2.1)$$

式中, $d$ 为光栅栅距; $n$ 为倍频; $T$ 为单位时间; $f$ 为调制频率; $\Delta x$ 为光栅传感器移动位移; $v$ 为光栅传感器移动速度。

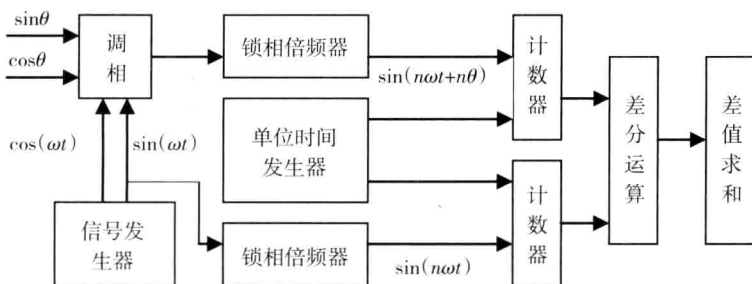


图2.3 新型莫尔条纹锁相细分法原理

采用高频调制信号 $\sin(\omega t)$ 和 $\cos(\omega t)$ 对光栅输出信号 $\sin\theta$ 和 $\cos\theta$ 进行载波调制等效于向标准光栅输出信号中引入了基频 $\omega$ ,这样调制后的信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 就解决了锁相倍频电路对输入信号的频率恒定要求。新型莫尔条纹锁相细分法发展于传统锁相细分和鉴相细分基础之上,具有跟踪速度快、细分倍数高等优点。

## 2.3 现有的高倍莫尔条纹细分方法

目前,国际上研究莫尔条纹及光栅传感器的最知名机构当属德国HEIDENHAIN,其拥有的基于衍射、干涉原理的光学条纹倍增技术、单场扫描技术、高倍细分技术及误差修正技术不仅实现了高精度测量,而且已经应用于实际中,属于世界最高水平。对莫尔条纹细分的研究及应用已经突破了纳米级迈向了皮米级研究,其高品质技术和产品是在精湛的光刻工艺、优质材料和先进的实验生产条件基础上实现的。

衍射光栅干涉测量系统按衍射次数分为一次衍射和二次衍射测量系统,随着级次的增加衍射强度迅速降低。图2.4是HEIDENHAIN公司最早绘制的一次衍射光栅干涉仪结构示意图。可以获得两路相位差为 $90^\circ$ 对称的正弦波信号。该结构采用全息照相法制作光栅传感器,使其长度限制在250 mm之内。