

光栅副+1级和-1级 莫尔条纹的位相关系

吴新民

摘要: 分析了衍射光栅副的±1级莫尔条纹之间的位相关系与光隙副间隙等因素的关系,从而可利用±1级莫尔条纹提高信号质量。

一、序 言

在细栅距幅光栅的莫尔条纹信号测量系统中,实际大部分采用法向入射系统的短焦距的光电接收或直接接收,这种系统的优点是接收系统简单,但缺点为莫尔条纹信号的正弦性不好,特别是对比度比较差,造成了信号不稳定,影响测量系统的可靠性。目前,国内外极大部分采用幅光栅的莫尔条纹系统。如果将信号质量提高,这是一件很有意义的工作。

在细栅距的幅光栅系统中,衍射效应是很明显的,其能量约占总能量的10~40%,这种衍射光是造成莫尔光电信号对比度不好和正弦性很差的根本原因。

如何去掉一些无用的衍射级次,采用一些有用的衍射级次来提高莫尔条纹信号的质量,是研究莫尔条纹的重要方面。本文旨在研究±1级莫尔条纹之间的位相关系与哪些因素有关,从而控制不利因素,直接采用±1级莫尔条纹信号来提高条纹的质量。

二、光栅副的莫尔光场

根据信息光学原理,一般幅光栅的莫尔条纹系统中,非相干照明下的莫尔花样是光栅副调制光场中的一种“节拍”现象,它可用低于系统的原始节拍(即光栅副的空间频率)的信息分量来解释。光栅副出射面上的场分布,就是入射光的振幅与光栅矩形函数的傅氏展开之积所表征的光场。

在衍射起主要作用的光栅系统中,莫尔条纹的形成主要是照明在光栅副上的光束被衍射后,再进行干涉后而形成的,这种信号的强度可表示为如下形式:

$$\begin{aligned}
 I &= B_0 + \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_m \exp[C_m - 2m\pi P] \\
 &= B_0 + \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_m \exp\left[C_m - 2\pi m \left(\frac{x_1}{\omega_1} - \frac{x_2}{\omega_2}\right)\right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

上式中,各量 ω_1 , ω_2 , x_1 和 x_2 的意义在下节中说明; B_0 为莫尔条纹的背景强度, B_m 为第

m 级衍射条纹的幅值。

由(1)式可以看出,莫尔条纹的相位除了与位移有关外,还与 C_m 有关系,而 C_m 则是入射角 θ_1 ,间隙 t 、光栅 G_2 与光栅 G_1 的平行度 θ_2 的函数。为了有效利用 ± 1 级的莫尔条纹,必须弄清 $+1$ 级和 -1 级条纹之间的相对位相关系。

三、衍射光栅副 $+1$ 级与 -1 级莫尔条纹的位相关系

1. 分数位置与分数位移

如图1是两个互相叠放的光栅,一横截面与两光栅栅线截于 a 、 b 、 c 、 d 各点。假定 P 是 G_2 上任意一点, N 为 P 向 G_1 作垂线的垂足,则 P 点对光栅 G_2 的分数位置为:

$$f_P = cP/cd = x_2/\omega_2 \quad (2)$$

N 点对光栅 G_1 的分数位置为:

$$f_N = aN/ab = x_1/\omega_1 \quad (3)$$

P 点的分数位移为:

$$P_P = f_N - f_P \quad (4)$$

式中, ab 、 cd 分别是 G_1 和 G_2 在截面上的栅距 ω_1 和 ω_2 。

分数位置反映了某点在光栅刻线中的位置,而分数位移则反映了两光栅的相对位置状态。

2. 光束在光栅副出射点的位相

如图2是一对栅距相同的幅光栅组成的光栅副,栅距为 ω ,光栅副间隙为 t 。选取平行入射的光束中的一条光线 AB 进行考察。在 G_1 上取一点 O 为零相位点,并以 O 为原点建立直角坐标系, x 轴垂直于 G_1 的栅线, y 轴平行于 G_1 的栅线, N 为 C 在 G_1 上的垂足,其坐标为 (x, y) 。

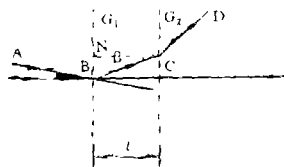


图2

入射光 AB 入射到 B 点,穿过 G_1 时,要发生 ϕ_n 的位相变化; G_1 的第 p 级衍射光经过光栅副间隙,光程为 $\frac{t}{\cos\beta}$,要发生 $\frac{2\pi}{\lambda} \frac{t}{\cos\beta}$ 的位相变化;这条光线在穿过 G_2 时,对于 $r-p$ 级衍射光,要发生 δ_o 的位相变化。这样,等级序列为 $(p, r-p)$ 的出射光线在 C 点处出射时位相为:

$$\phi_c = \phi_n + \delta_B + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{t}{\cos\beta} + \delta_o \quad (5)$$

式中 ϕ_n 是入射光在穿过 G_1 前,在 B 点的位相。

采用分数位置和分数位移来表示光束经 G_1 和 G_2 后在 C 点的位相为:

$$\phi_c = K_p + \frac{2\pi}{\lambda} (x \sin\alpha'' + y \sin\alpha') + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{t}{\cos\beta} + 2\pi r f + 2\pi p p \quad (6)$$

式中 f 、 p 分别表示 C 点的分数位置和分数位移。

K_p 是一个 $(p, r-p)$ 所独有的函数,它是由光栅副的结构所引起的位相差,但对一给定的光栅副来说,它是不变的。

α' , α'' 分别是 AB 和光栅副主中线平面和次中线平面的夹角, 当两栅线平行时, 它们都等于零。

在衍射幅光栅中, 大部分能量集中在 0 级和 ± 1 级上, 所以, 在研究光栅副时, 主要分析 $(0, +1)$, $(+1, 0)$, $(0, -1)$ 和 $(-1, 0)$ 四条光束, 我们把 $(-1, 0)$ 和 $(0, -1)$ 的衍射光束干涉形成的条纹称为 -1 级莫尔条纹, 把 $(+1, 0)$ 和 $(0, +1)$ 的衍射光束干涉形成的莫尔条纹称为 $+1$ 级莫尔条纹。

图 3 是一个产生 $+1$ 级和 -1 级莫尔信号的光路。 G_1 和 G_2 是两个完全相同的光栅, 它们的栅线互相平行, 法线成微小倾角 θ_j , L 为聚光透镜, $(0, -1)$ 和 $(-1, 0)$ 经 L 聚焦在焦面的 F_{-1} 处; $(0, +1)$ 和 $(+1, 0)$ 聚焦在焦面的 F_{+1} 处。

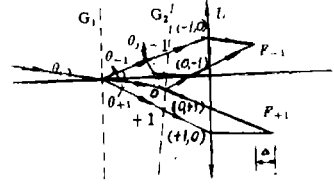


图 3

由于 $(0, +1)$ 和 $(0, -1)$ 两条衍射光线在 G_2 的出射面上相位相同, 所以, 要考虑 F_{-1} 处信号和 F_{+1} 处信号的位相关系, 实际上只需要考虑 $(-1, 0)$ 和 $(+1, 0)$ 两条衍射光在出射面上的位相关系。由 (6) 式及图 3, 运用光栅方程, 可以得到 F_{-1} 处和 F_{+1} 处莫尔条纹位相差表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta\phi = & \frac{2\pi t}{\lambda} [\cos(\theta_j - \theta_{-1}) - \cos(\theta_j + \theta_{+1})] + 2m\pi + \Delta' \\ & - \frac{2\pi t \cos\theta_j}{\omega} \left[\frac{\sin\theta_{-1}}{\cos(\theta_{-1} - \theta_j)} + \frac{\sin\theta_{+1}}{\cos(\theta_j + \theta_{+1})} \right] \\ & - \frac{2\pi t}{\lambda} \cos\theta_j \sin\theta_j \left[-\frac{\sin\theta_{+1}}{\cos(\theta_j + \theta_{+1})} + \frac{\sin\theta_{-1}}{\cos(\theta_j - \theta_{-1})} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中 m 为整数, Δ' 是由于 F_{-1} 和 F_{+1} 不在同一平面上所引起的位相差异, 但当 θ_j 和 θ_i 固定时, 它对 $\Delta\phi$ 的影响是不变的。

由 (7) 式可以看到, 其位相差异主要由光栅副间隙 t 、入射角 θ_i 和光栅 G_1, G_2 的平行度 θ_j 所决定, 并随它们一起变化。对于一对给定的光栅, 我们可以通过调整它们之间的值, 使 F_{-1} 处和 F_{+1} 处两路莫尔信号达到相位相反, 如果在 F_{-1} 处和 F_{+1} 处放置光电接收器, 获得这种信号, 再经差放, 可达到提高条纹对比度和减小噪音的目的。

参 考 文 献

- [1] 黄维实;《矩形光栅副的莫尔光场》, 上海交通大学校庆八十五周年学术报告论文
- [2] J. Guild, 《The Interference System of Crossed Diffraction Grating》, Oxford at the Clarendon Press, 1956
- [3] 张善锺等编;《计量光栅技术》机械工业出版社, 1985
- [4] 朱应时; 光学机械, 1981, No. 2

Phase Relation of ± 1 Order Moiré Fringes for Grating Pair

Wu Xinmin

Abstract

In this paper, we analysed the relations for the phase relation of ± 1 order Moiré fringes and the gap of grating pair etc. Thereby, it can use ± 1 order Moiré fringes to improve the quality of signal.