



**MICROTOPOGRAPHY  
MEASUREMENT  
TECHNOLOGY**

**微观形貌  
测量技术**

惠梅 著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 微观形貌测量技术

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目 (CIP) 数据

微观形貌测量技术 / 惠梅著. —北京: 北京理工大学出版社, 2018.12  
ISBN 978-7-5682-6547-8

I. ①微… II. ①惠… III. ①表面形貌学-光学测量 IV. ①O485

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 287428 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)  
(010) 82562903 (教材售后服务热线)  
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 19

字 数 / 303 千字

版 次 / 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价 / 86.00 元

责任编辑 / 王美丽

文案编辑 / 孟祥雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 目 录

## CONTENTS

---

---

---

第一章 绪论 .....	001
1.1 形貌测量概述 .....	001
1.2 微观形貌测量 .....	003
1.2.1 机械触针轮廓术 .....	003
1.2.2 光学轮廓术 .....	006
1.2.3 光学探针轮廓术 .....	015
1.2.4 扫描电子显微镜 .....	020
1.2.5 扫描隧道显微镜 .....	022
1.2.6 原子力显微镜 .....	024
1.3 微观形貌测量技术应用及其发展 .....	025
第二章 相移干涉原理 .....	029
2.1 相移干涉术 .....	029
2.1.1 分步进相移干涉术 .....	031
2.1.2 线性连续相移干涉术 .....	034
2.2 最佳采样方式 .....	038
2.3 移相方式 .....	040
2.3.1 偏振移相 .....	042
2.3.2 光栅衍射移相 .....	042
2.3.3 倾斜玻璃板移相 .....	043
2.3.4 压电陶瓷移相 .....	043
2.4 相位计算 .....	047
2.4.1 相位提取算法 .....	047
2.4.2 相位解包裹算法 .....	048
2.5 影响测量误差的主要因素 .....	051

<b>第三章 相移提取算法</b> .....	055
3.1 经典相位提取算法 .....	056
3.1.1 最小二乘算法 .....	056
3.1.2 同步检测算法 .....	056
3.1.3 权重最小二乘算法 .....	057
3.2 快速相位提取算法 .....	058
3.2.1 传统快速相位提取算法 .....	058
3.2.2 传统快速相位提取算法精度 .....	059
3.2.3 改进快速相位提取算法 .....	065
3.2.4 快速相位提取算法及其分析 .....	067
3.3 特征多项式相位提取算法 .....	070
3.3.1 特征多项式 .....	070
3.3.2 高次谐波不敏感性分析 .....	071
3.3.3 多项式的离散傅里叶变换 .....	072
3.3.4 利用特征多项式构造算式 .....	074
3.4 非线性相移误差不敏感算法 .....	077
3.4.1 基于 Lissajous 图的最小二乘拟合算法 .....	078
3.4.2 对基于 Lissajous 图的相位提取算法的改进和发展 .....	081
<b>第四章 相位解包裹算法</b> .....	087
4.1 传统相位解包裹的数学描述 .....	090
4.1.1 一维数学模型 .....	090
4.1.2 二维数学模型 .....	091
4.2 顺序扫描解包裹 .....	093
4.3 快速离散余弦变换解包裹 .....	096
4.3.1 二维非权重模型 .....	096
4.3.2 二维权重模型 .....	099
4.4 数值模拟相位解包裹算法 .....	103
4.4.1 基于参考相位阈值的相位解包裹算法 .....	103
4.4.2 基于一维 FFT 的相位解包裹算法 .....	104
4.4.3 运用 Zernike 多项式的相位解包裹算法 .....	105
4.4.4 基于相位跳变线估测的相位解包裹算法 .....	110

4.4.5 基于理想平面拟合的相位解包裹算法	111
4.5 路径相依型相位解包裹算法	112
4.5.1 Goldstein 枝切算法	112
4.5.2 质量导引路径相依型算法	118
4.6 最小范数二维相位解包裹算法	120
4.7 解包裹相位图平滑处理	123
<b>第五章 干涉显微测量</b>	<b>127</b>
5.1 干涉显微镜	127
5.2 微分相衬干涉显微测量系统	132
5.2.1 微分相衬干涉显微镜	133
5.2.2 图像采集电路	134
5.2.3 相移驱动系统	135
5.3 微分相衬干涉显微成像光路	135
5.3.1 光路结构	135
5.3.2 数学模型	136
5.3.3 被测相位	139
5.3.4 干涉图像	141
5.4 测量数据处理	141
5.4.1 形貌计算	142
5.4.2 粗糙度参数的定义及计算	143
5.5 测量流程及软件框图	147
<b>第六章 微分相衬干涉显微测量</b>	<b>149</b>
6.1 测量系统光路的调整	151
6.1.1 检偏器零位的调整	151
6.1.2 1/4 波片快轴方向的调整	151
6.1.3 Nomarski 棱镜剪切方向的调整	152
6.1.4 Nomarski 棱镜零位的调整	152
6.2 工作台倾斜的软件调平	153
6.3 图像滤波与平滑	154
6.4 典型试件测量实例	158
6.4.1 台阶高度测量	158



8.5.2	1/4 波片的方位角误差	217
8.5.3	检偏器转角误差 (移相误差)	220
8.6	应用相位提取算法减小和消除相位测量误差	222
8.6.1	半周期四帧相位提取算法	222
8.6.2	无图像平滑滤波时相位提取算法实验验证	225
8.6.3	有图像平滑滤波时相位提取算法实验验证	230
8.7	测量系统的表面形貌计算误差	233
8.8	Normaski 棱镜对测量结果的影响	234
8.9	测量系统的其他误差分析	235
8.9.1	光源的影响	235
8.9.2	显微物镜数值孔径的影响	236
8.9.3	采样间隔的影响	236
8.9.4	样品倾斜对测量结果的影响	237
8.9.5	离焦对测量结果的影响	238
8.9.6	被测表面反射率及光波透入深度的影响	243
<b>第九章</b>	<b>光电传感器位移测量</b>	<b>245</b>
9.1	光电传感器数值读取	245
9.2	振幅能量式传感器	247
9.3	振幅相位式传感器	247
9.4	振幅频率式自动反射镜传感器	248
<b>第十章</b>	<b>光电传感器测角、标定和对中系统</b>	<b>251</b>
10.1	测角、标定和对中系统	251
10.2	零位对中	253
10.3	小角度切线位移	254
10.4	系统组成	255
10.4.1	总体结构	255
10.4.2	零部件的结构	256
10.4.3	空气静压轴承	256
10.4.4	光电传感器的定位	257
10.5	精度装调	260
10.6	误差与精度分析	262



# 第一章

## 绪 论

### 1.1 形貌测量概述

光学仪器是对人眼在宏观及微观领域观察能力的延伸。但传统光学仪器对物体影像的记录均为二维的平面图像，而使实物的立体性无法显示。因此，光学仪器在对人眼功能延伸的同时，丢失了人眼的极其重要的能力——深度视觉。如何对一个现实的物体成三维像并精确地测量其表面几何形态——表面形貌学（Surface Topography），是人们长期以来一直追求的目标。

最早的表面形貌测量方法起源于“比较测量”的思想，即直观的手工测量方法。1929年，德国科学家 G. Schmalz 第一次用光杠杆放大原理对物体表面形貌进行了定量测量。1936年 E. J. Albott 制成了第一台车间用表面轮廓仪。1940年英国泰勒-霍普森（Taylor-Hobson）公司成功研制了 Talysurf 表面轮廓仪，其原理是利用机械接触式的探头逐点获取物体表面的三维坐标。1941年，世界上第一台机械触针式表面粗糙度仪 Talysurf-1 问世，该粗糙度仪仍然是当今各类触针式表面轮廓仪的基本形式，采用跟随表面粗糙轮廓的被放大和数字化的针尖的垂直运动，来获得轮廓的有用的粗糙度参数，以确定的步长扫描并采集平行的轮廓即可得到三维形貌。在此基础上，英国兰克精密工业公司研制出测量精度更好、灵敏度更高的机械触针式表面轮廓仪，针尖小至  $0.1\ \mu\text{m} \times 2.5\ \mu\text{m}$ ，接触力降至毫克数量级。

随着激光器的发明和应用，采用激光探针代替机械探头成为趋势。20世纪70年代，英国雷尼绍（Renishaw）公司推出了世界上首个触发式激光测头，用激光探针三坐标测量机来测量汽车壳体，实现了对材料的无损检测，为坐标测量机行业带来了革命性变化。1975年，泰勒-霍普森公司研制出了 Talysurf-5

及 Talysurf-6 系列表面轮廓仪, 1984 年推出了同时测量表面粗糙度、形状和轮廓的 Form Talysurf 系列仪器, 并创建了评价表面粗糙度和形状的新的全球标准。在此基础上, 0.6 nm 分辨率的 Form Talysurf Inductive 电感式粗糙度轮廓仪上市, 实现了测量、分析、输出及打印的全自动完成。但无论是机械探针还是激光探针, 都未能完全摆脱其机械结构复杂、测量范围受机械装置尺寸限制以及逐点测量带来的测量效率低等缺点和不足。

由低效率的逐点测量向高效率的全场同时测量的转变成为人们努力的目标。其基本着眼点是将一空间图形编码投射到被测物面上。受物体表面形状的调制, 该空间图形编码将发生变形。用探测器接收变形的图形编码并对之进行解码, 即可获得物体表面形貌。按照这一思路, 1970 年, Takasaki 和 Meadows 首次报道了一种基于光学条纹图分析原理的测量技术——三维表面轮廓成像技术。用莫尔条纹阴影等高线图显示物体三维像, 即将莫尔条纹作为空间编码, 从受物体表面形貌调制的变形的莫尔条纹图中提取相位信息并转换为物体表面轮廓。由此创建了莫尔轮廓术。于是, 利用光学成像原理测量物体表面形貌的技术引起了各方面的重视, 并使这门技术向实用化迈开了步伐。莫尔轮廓术的测量原理如图 1.1 所示。

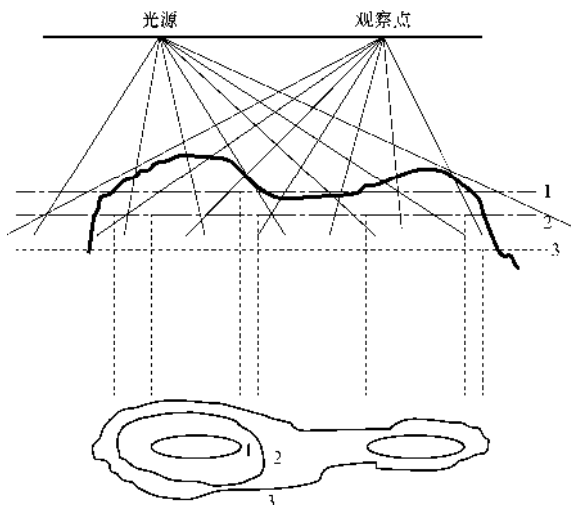


图 1.1 莫尔轮廓术的测量原理

注: 上面的数字 1、2、3 表示被测物体表面不同高度范围内所形成的莫尔条纹;  
下面的数字 1、2、3 表示相对应的物体表面形状的等高线

莫尔轮廓术的出现,奠定了光学成像法测量物体表面轮廓的基础,使得通过图像的测量可获得所需的物体三维信息,它具有如下特点:

(1) 实现了逐点式向全场同时测量的转变,使测量过程更直观,速度更快捷。

(2) 可进行与时间无关的再测量。

(3) 可测量物体的瞬间状态和材料的变形过程。

但是,莫尔轮廓术的应用仍然受到许多限制。最突出的问题是:由于莫尔法得到的仅仅是物体面形的等高线,因而无法判断物体的凹凸。除此以外,光栅的衍射使得测量结果难以精确地量化,也限制了该方法的实际应用。

近年来,在莫尔轮廓术的基础上,衍生出了许多基于光学成像原理的表面轮廓测量方法。例如,用一个正弦光栅取代莫尔法中的两个光栅,由分析莫尔条纹图转向直接分析投影在物体表面的光栅的变形光场,即条纹投影法。相移技术、频移技术及光载波技术也被引入变形条纹图的构造中,并对其进行数字图像处理以提取表面轮廓信息。所有这些方法的研究焦点在于不断提高测量的空间分辨率及测量精度、扩大物体的横向及纵向测量范围,并能实现快速、实时的自动测量。

## 1.2 微观形貌测量

微观形貌测量技术的研究由早期的定性测量逐步发展到定量测量,直至发展到与现代科学技术相结合的高精度定量测量。1951年德国Opton生产出测量表面粗糙度的干涉显微镜。1958年苏联研制出MNN-4型干涉显微镜,用来对物体表面微观形貌进行测量。近年来,基于各种原理的非接触微观形貌测量方法不断出现,在测量精度及测量速度方面均有了较大的提高。

微观形貌的测量方法有机械触针法、光学非接触法、SEM(扫描电子显微镜)、STM(扫描隧道显微镜)等。表1.1所示为国内外微观形貌测量技术各种测量方法的汇总。

### 1.2.1 机械触针轮廓术

机械触针轮廓术是开发较早、研究较充分的一种表面轮廓测量方法。利用具有微小圆弧半径( $0.1\ \mu\text{m}$ )的金刚石触针与被测面相接触并缓慢滑行,当触

表 1.1 微观形貌测量方法汇总

项目	测量方法	原理	被测参数	纵向分辨率	横向分辨率	纵向测量范围	备注		
非光学测量法	兰克-泰勒-霍普森轮廓仪	金刚石触针	机构位移	0.1 nm	0.2 μm	800 mm	英国国家物理实验室		
	阿尔法-台阶 500	金刚石触针	机构位移	0.1 nm	1 μm	800 mm	美国海军武器中心		
	扫描电子显微镜	电子透射	电场	10 nm	2 nm	2 μm	德国西门子公司		
	扫描隧道显微镜	量子力学	机构位移	0.001 nm	1 nm	75 μm	IBM 苏黎世实验室		
	原子力显微镜	纳米探针	力	0.01 nm	20 nm	10 μm	法国 DIJN 公司		
光学测量方法	结构光三角测量法	几何三角	光斑位置	0.1 mm	0.1 μm	15 μm	—		
	立体摄影法	摄影测量	空间坐标	0.1 mm	—	—	—		
	条纹投影术	莫尔成像术	位相	10 nm	—	1 m	—		
	全息三维测量术	干涉成像	位相	—	—	—	—		
	光学探针	共焦显微镜	共轭成像	机构位移	1~5 nm	1 μm	±250 μm	德国 Feinpruf 公司	
		离焦检测法	共轭成像	机构位移	1 nm	0.65 μm	±	HIPOSS 测量头	
	相域测量法	时域法	相位锁模法	电子锁相	位相	—	—	—	
			相位连续移动法	相位调制	位相	—	—	—	
			外差干涉法	频率调制	位相	0.1 nm	2 μm	< ±λ/4	—
			微分干涉法	干涉	斜率	0.1 nm	1 μm	4 μm	美国 Rochest 大学
空域法		傅里叶变换法	傅里叶光学	位相	—	—	—		
	空间载波法	光场调制	位相	—	—	—	—		

续表

项目	测量方法		原理	被测参数	纵向分辨率	横向分辨率	纵向测量范围	备注	
光学测量方法	相位测量法	空域法	相位阶梯步长法	相位调制	位相	—	—	—	
			Michelson干涉法	干涉显微	位相	0.1 nm	1 $\mu\text{m}$ (10 $\times$ )	< $\pm\lambda/4$	美国 Arisona 大学
			Mirau干涉法	干涉显微	位相	0.1 nm	1 $\mu\text{m}$ (10 $\times$ )	< $\pm\lambda/4$	美国 WYKO 公司
			Linnik干涉法	干涉显微	位相	0.1 nm	0.5 $\mu\text{m}$	< $\pm\lambda/4$	美国 Arisona 大学

注：表中所列纵向分辨率为所测物体深度方向分辨细节的能力；横向分辨率为所测物体平面方向分辨细节的能力。

针沿被测面移动时，被测面的微观凹凸不平使触针上下移动，金刚石触针的上下位移量由与触针组合在一起的电学式位移传感器测量，转换为电信号，经放大、滤波、计算后由显示仪表指示出表面轮廓数值，也可用记录器记录被测截面轮廓曲线。所测数据经处理即得到被测表面的轮廓。图 1.2 所示为机械触针轮廓仪原理。

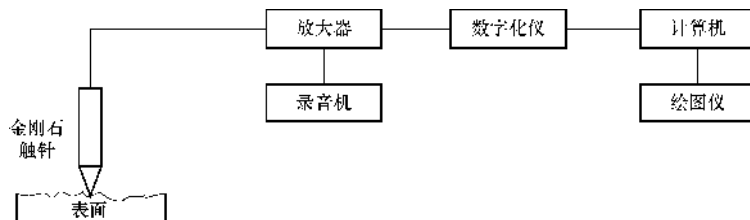


图 1.2 机械触针轮廓仪原理

一般将仅能显示表面粗糙度数值的测量工具称为表面粗糙度测量仪，同时能记录表面轮廓曲线的称为表面粗糙度轮廓仪（简称轮廓仪）。这两种测量工具都有电子计算电路或电子计算机，它能自动计算出轮廓算术平均偏差  $R_a$ 、微观不平度十点高度  $R_z$ 、轮廓最大高度  $R_y$  和其他多种评定参数，测量效率高，适用于测量  $R_a$  为 0.025~6.3  $\mu\text{m}$  的表面粗糙度。

机械触针轮廓仪纵向分辨率取决于与之配套的传感器，横向分辨率取决于被测面的高度斜率特性及触针针尖半径。将上述参数归结为简单的关系式

$$d > 2\pi(hr)^{1/2} \quad (1-1)$$

式(1-1)适用于呈正弦分布的沟槽表面,其空间周期为  $d$ 、峰值高度为  $h$ ,当触针尖端半径为  $r$  时,如果空间周期  $d$  满足式(1-1),那么这样的表面可被正确地测量;反之,若  $d$  小于此值,表面轮廓则不能被精确地测量。

机械触针轮廓仪的测量范围较大,并具有  $0.1\text{ nm}$  的纵向分辨率和  $0.2\text{ }\mu\text{m}$  的横向分辨率。由于触针要在一定的压力下与被测表面接触,虽然测量力不大( $1\text{ mg}$ ),但是被测表面单位面积上承受的接触压力却很大( $500\text{ kg/cm}^2$ )。当测量铝、铜等软金属表面或涂有光刻胶等镀膜表面时,往往会在被测表面上形成划痕,这不仅会产生较大的测量误差,而且影响到被测表面的质量。另外,受触针尖端圆弧半径、触针磨损及测量速度的限制,其测量精度有限,亦无法实现在线实时测量。因此,非接触、高精度、实时测量的表面轮廓测量方法及仪器已成为超精加工领域中急需解决的问题。

### 1.2.2 光学轮廓术

光学轮廓术的原理是以光学成像的方式测量物体表面形貌,如干涉外差显微镜、散焦和共焦显微镜、用单色相干光束反射的粗糙度漫射、各种相移显微镜和投影条纹等方法。这些方法中大多数是选择数个离散的表面图像,从物体表面轮廓信息载体中提取数据,该信息载体可以是散斑图、相片、全息干板、波面和条纹图等,结合在一起形成三维图像。光学测量法可实现表面轮廓的非接触及全场各点的同时测量,这是它的优势所在。机械接触式和光学非接触式轮廓仪的优缺点比较如表 1.2 所示。

表 1.2 机械接触式和光学非接触式轮廓仪优缺点比较

项目	机械接触式	光学非接触式
优点	1. 较大的横向和纵向测量范围; 2. 成本较低	1. 不损伤被测面; 2. 全场同时测量,测量时间短; 3. 在亚纳米区域灵敏度最高; 4. 可进行面测量
缺点	1. 易损伤被测面; 2. 逐点测量,测量时间较长; 3. 仅能进行线测量	1. 单波长测量法高度测量范围受波长限制; 2. 成本高

下面详细介绍几种典型的光学轮廓术。

### 1. 结构光三角测量法

在光学测量方法中，结构光三角测量法是一种传统的距离测量方法。将一个光点或一条窄光带投射到被测物体表面，基于三角几何光学原理，根据待测物上的漫反射光斑在光电探测器上的位置变化得到物体表面起伏信息。该方法的信息载体为散斑图。

图 1.3 所示为激光片光垂直照明三角法测量原理。激光束经柱状透镜扩束并准直后构成一片状光束，形成一条光带。这条光带垂直投射到被测物体表面上就形成了光条，在物面上的投影为一条亮线。由于物面的高低不同，每条投影线在 CCD 光敏面上的像为一曲线，计算该曲线上各像素点偏离标准像（基准线）位置的距离，便可以得到物体表面一个剖面的高度分布。

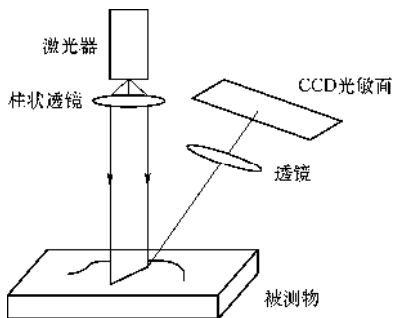


图 1.3 激光片光垂直照明三角法测量原理

结构光三角测量法原理简单，易于实现，但仍存在着测量效率低和对光源要求高等缺陷。另一个难以解决的问题是激光散斑问题。由于物面的微观起伏，在透镜平面上将会形成具有散斑形状的波面，经透镜成像后进一步在像面上叠加形成有散斑的片光像。该散斑对结构光三角测量法的测量精度具有重要的影响，是误差的主要来源之一。降低散斑效应以提高测量精度，一直是该领域普遍关注的问题。

### 2. 傅里叶变换轮廓术

傅里叶变换轮廓术通过傅里叶变换将时域条纹信号变换到频域，当有用的基频成分同其他的频域分量相互分离时，可以从频域中滤出包含物体高度信息的基频分量，经傅里叶变换、相位展开得到待测物体的高度信息。该方法结合了傅里叶变换与条纹图形数字处理技术，针对受物体表面形状调制的变形光栅场进行傅里叶分析、滤波及傅里叶逆变换，既而从变形条纹图中提取所

测形貌信息。

图 1.4 所示为傅里叶变换轮廓术的测量原理， $d$  为投影仪与 CCD 之间的距离， $L$  为 CCD 到参考平面的距离。正弦光栅条纹投影到待测物体表面，物体高度分布  $h(x, y)$  引起相位调制。

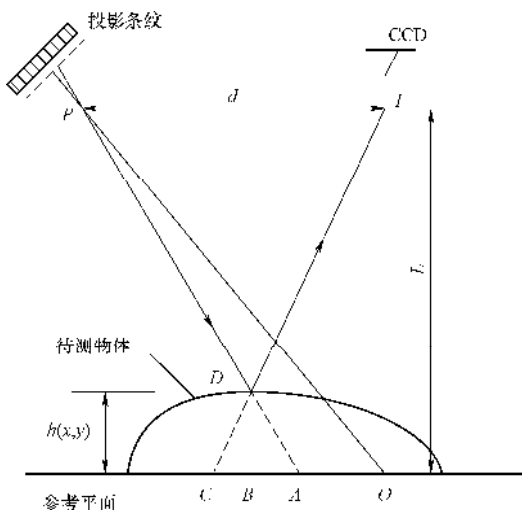


图 1.4 傅里叶变换轮廓术测量原理

正弦光栅图形投影到三维漫反射物体表面上时，由于受到物体高度的调制，基于正弦光栅投影的变形结构光场为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \quad (1-2)$$

式中， $a(x, y)$  表示背景光场； $b(x, y)$  表示物面非均匀反射率； $\varphi(x, y)$  表示物体高度分布； $f_0$  表示投影光栅的基频。在实际测量中， $a(x, y)$  和  $b(x, y)$  通常是缓慢变化的，则变形条纹的傅里叶频谱分布为

$$G(f, y) = Q_0(f, y) + Q^*(f - f_0, y) + Q^*(f + f_0, y) \quad (1-3)$$

式中， $Q_0(f, y)$  表示背景光场傅里叶频谱，即零频； $Q^*(f - f_0, y)$  表示  $1/2b(x, y)\exp[i\varphi(x, y)]$  的傅里叶频谱； $Q^*(f + f_0, y)$  表示  $Q(f + f_0, y)$  的共轭。投影光栅至参考平面上的相位分布为  $2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y)$ ，其中  $\varphi_0(x, y)$  为参考平面的原始相位，所以由物体高度引起的相位变化可表示为

$$\Delta\varphi = \varphi(x, y) - \varphi_0(x, y) \quad (1-4)$$

在远心投影光路条件下， $L_0 \gg h$  时，被测物体高度分布和调制相位  $\varphi(x, y)$  的关系为