

光波强衰场悬浮颗粒检测中的显微摄像术

王 晓 刘小青

(国防科技大学 204 教研室, 长沙, 410073)

摘要: 被烟尘、粉末、水雾等充斥的空间对光波有极强的衰减作用, 统称为强衰场。普通的摄像技术不可能从此类强衰场中获取清晰的图像。融合了显微光学原理和 CCD 摄像技术的显微摄像术与相应的技术手段配合, 可以摄取强衰场中悬浮颗粒的放大图像, 并实现远距离传输和多用户监测, 从而为强衰场悬浮颗粒检测实践了一条新思路。

关键词: 强衰场 显微光学 CCD 摄像 显微摄像术

Application of image pick-up microscopy for measurement of passive disturbing materials in photoelectric countermeasure

Wang Xiao, Liu Xiaoqing

(National University of Defense Technology, Section 204, Changsha, 410073)

Abstract: When a light beam goes through the space flooded with passive disturbing materials, such as heavy smog, water fog, aerosol etc., the light wave will be greatly attenuated. We call the space the strong-attenuation field. Our aim is to get the information of the small grains of 0.001mm size, but a conventional video camera can not take the clear pictures of the grains of the disturbing materials from the field, and can not provide the information about the parameters of single grain and the statistical characteristics of the group of the grains. In our system, the combination of CCD display technique and a special optical system named image pick-up microscopy, like the optical system of a microscope, is used to enlarge the image of the gain in the field. Then the picture can be transmitted over a long distance to process and to obtain the information of the characteristics of the grains. In this paper, the aberration of the optical system and manufacturing tolerance of the optical system have been analyzed. This is a new method to measure the passive disturbing materials in photoelectric countermeasure.

Key words: strong-attenuation field microoptics CCD image display technique microscopy image technique

引 言

随着当代高新科学技术的飞速发展, 各种性能卓越的光电武器装备不断涌现。其来势之猛, 超出了人们的想像。它们集光学、光电子学、物理电子学、计算机科学以及新材料、新工艺之大成, 突出表现了一个国家的国防和军事实力。海湾战争的事实清楚地说明了这一点。

面临超级大国诸多光电武器的威胁, 着力发展光电对抗装备是我们的当务之急。其中, 无源干扰手段特别符合我们的国情。它见效快, 普适性好, 效费比高, 因而格外受到重视。

毫无疑问, 无源干扰材料的颗粒大小、相对分布及颗粒的密集程度等参数, 决定了它们对信息光波的吸收或散射能力, 直接影响其在空中的驻留时间(俗称留空时间)和随风飘移速度(常称风移速度), 因而是实际干扰效果的决定因素。所以, 对这些参数的测量成为干扰材料研制和试验的关键一环。

一、技术难点

对光电对抗无源干扰材料的颗粒测量面临许多技术困难,这里先只讨论与本文主题密切相关的部分。

因为干扰材料就是被用来造成信息光波大幅度衰减的,其对入射光波的强烈吸收和散射使我们丧失了预期的光波信息。这就使得以光波作为颗粒信息载体的检测手段面临严重的困难。

众所周知,从强衰减介质——哪怕是从透明的强衰减介质(例如水)中获取目标的光学信息已经是很困难的课题,更何况我们所面对的常常是不透明的强衰减场(例如烟雾场)。

更有甚者,我们所要检测的目标是小尺寸的悬浮颗粒,而且其所在空间的强衰减本身就是由这些悬浮颗粒所组成的。换言之,待测目标与背景浑然一体。所以,就整体而言,目标与背景的对比度趋近于零,即信噪比甚低。从这方面说来,它比普通的从强衰介质提取目标信息的课题更难。例如,用光学手段从水中发现潜艇是一个难题,但毕竟潜艇这个目标与水背景是分离的两种客观存在的实体,二者对信息光波的不同表现总会构成一定的反差,即目标与背景会有相当的对比度。单从这一点看,此种探测比检测无源干扰场中干扰材料要容易些。

再者,无源干扰材料颗粒形状各异,而且极不规则,不宜运用流行的光学——数学方法做近似处理。加之待测颗粒尺寸跨度较大(例如 $0.001\sim 1\text{mm}$),相差三个量级。目前已有的基于夫琅和费衍射原理和米氏散射理论的检测技术都不能胜任。

待测空间悬浮颗粒分布十分密集,因而互相遮蔽的情况非常突出,致使通常的“投影面积检测法”不能被采用。再由于各类颗粒的物理属性(如质量密度)不同,故也不能沿用已有的“统计称重法”。

二、普通摄像技术的局限性

根据我们的认识,对无源干扰材料的检测系统应迅速提供以下信息:(1)颗粒的直观图像(适于人眼观察);(2)单颗粒参数——线度尺寸、周长、长短轴、质心位置、等效面积等;(3)统计参数——各类颗粒的大小分级、各级颗粒的相对比例、总遮光面积和空洞面积等;(4)以上三种信息随时间和空间的变化。

由于需求的信息量很大,且信息种类繁多,又是一个大空间范围的动态信息采集与处理问题,故决定采用 CCD 摄像技术和计算机处理,以便同时迅速地提供图像和大宗量数据。

大家知道,CCD 摄像机不仅能提供被摄物体的图像,而且可以实现从光学图像到视频信号的转换,从而为计算机处理做好准备。但是,普通摄像机不能用于本项测量系统,这是因为:

1. 它只能提供缩小的实像(即像比实际物体小),因为被摄物体总在摄像物镜的两倍焦距之外。这显然不符合我们的要求,因为我们要摄取的颗粒尺寸最小是 0.001mm ,已经远小于一般 CCD 光敏面像元的尺寸。若经摄像物镜后进一步缩小,则测量便无法进行。

2. 摄像物镜的像差设计与实际使用时的数值孔径互相冲突。按像差设计来考虑,物距大有利于提高像质。但在实际使用时,物距越大,则进入物镜的光能越少,即数值孔径越小。

三、变倍齐焦显微摄像系统

为克服普通摄像系统的缺陷,我们采用了变倍齐焦显微摄像系统,即用类似于显微物镜的系统取代普通摄像物镜,使待测颗粒经过显微物镜放大后成像于 CCD 器件的光敏面上。为了

实现显微物镜与 CCD 器件的最佳耦合, 应注意:

(1) 物镜放大倍率的选择应使待测颗粒经放大后适于 CCD 器件识别和处理。例如, 我们所用 CCD 器件光敏面数据是: 长 × 宽 = 7.95mm × 6.45mm, 相应像元数为 811 × 508。计算可知其光敏面对角线长为 10.24, 单个像元尺寸为 9.80μm × 12.70μm (对角线长 16.04μm)。

为了适于测量最小粒径(0.001), 物镜的倍率选为 β = - 20[×]。对其它粒径, 可分别选用 β = - 5[×], - 3[×], - 1[×] 的物镜。

(2) 设计物镜时其线视场应与 CCD 器件光敏面尺寸匹配。由上已知, 不论哪种倍率的物镜, 其反向光路的物方视场均为 10.24。在实际工作状态下, 其物方视场是 2y = 10.24 / |β|。

显然, |β| 越大, 则一帧图像所处理的范围越小。例如, 在 β = - 10[×] 时, 2y = 1.024。我们之所以不选用更高倍率的物镜, 原因亦在于此。

(3) 物镜数值孔径应尽可能大, 以便有更多的光能参与成像。

(4) 为保证不同粒径测量的快速切换, 物镜系列应严格满足“齐焦”要求。

四、显微摄像光学系统的设计

1. 像差设计

因低倍物镜设计较简单, 我们不予述及。这里只以十倍物镜为例, 说明其自动设计过程。从文献中选一个同类结构, 把材料用国产玻璃取代后, 将曲率半径作相应修改, 公式是

$$r' = [(n' - 1)/(n - 1)]r \tag{1}$$

式中, n, r 分别是原来的折射率和曲率半径, 而 n', r' 是更换玻璃后的相应量。得到如下初始结构:

| | | | | | | |
|----------------|----------------|------------------|----------|-----------------|-----------------|----------|
| r | 16.49 | - 12.87 | - 147.33 | 9.26 | - 9.35 | - 335.83 |
| d | 3.8 | 1.5 | 13.07 | 3.5 | 1.5 | |
| n _D | 1.5163 | 1.614 | 1 | 1.613 | 1.6725 | 1 |
| n _F | 1.52195 | 1.62494 | 1 | 1.62012 | 1.68747 | 1 |
| n _C | 1.51389 | 1.6096 | 1 | 1.61 | 1.6666 | 1 |
| glas | K ₅ | BaF ₇ | | ZK ₇ | ZF ₂ | |

按要求的光学特性计算像差后投入自动优化: 自变量共 7 个: c₁~ c₆, d₃。自变量增量: δc = 0.0008, δd = 0.04。边界条件: 前组正透镜边缘和负透镜中央厚度 ≥ 0.7, 后组的相应厚度 ≥ 0.5。受控质量指标 6 个, 情况如附表。

Table The controled indexes

| indexes | β | δL' _m | K' _{Tm} | x' _{sm} | ΔL' _{FC.707} | Δy' _{Fcm} |
|----------------------|----------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| initial values | - 0.1008 | - 0.148 | - 0.0273 | - 0.0297 | - 0.032 | - 0.002 |
| target values | - 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| tolerances | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 0 | 0 |
| optimization results | - 0.1 | 0.0007 | 0 | - 0.0102 | 0 | 0 |

以上优化过程是由同一个系数矩阵引导完成的, 它包含十次内循环迭代, 最大因子始终对应于自变量 c₅, 其收敛过程是:

$$29.18 \rightarrow 28.19 \rightarrow 26.25 \rightarrow 22.55 \rightarrow 15.86 \rightarrow 9.81 \rightarrow 6.69 \rightarrow 5.09 \rightarrow 3.46 \rightarrow 1.82 \rightarrow 0.31。$$

输出经过优化的自变量依次为: $r: 16.083, -10.809, -72.786, 9.400, -7.418, -169.27; d_3: 12.76$ 。

经过对色球差 $\delta L'_{FC}$ 的收缩和共轭距离调整, 得 $r: 16.453, -11.058, -74.41, 9.616, -7.589, -173.16; d_3: 13.05$ 。像差复算表明, 此结构已符合要求。

2. 加工及装配公差设计

单透镜的偏心误差(两表面光轴的相对平移、倾斜或既平移又倾斜)、胶合透镜各组元的偏心误差以及整个光学系统组装时的不共轴偏差等, 都会影响系统的成像质量, 其中有的影响会非常严重。但长期以来, 有关此类误差对像质影响的定量研究却少有问津。在实际设计中, 这些公差都是凭经验确定的。

我们在设计显微摄像物镜时, 采用微离轴方法和有限差分计算, 借助不共轴系统的计算机设计软件, 逐一考察各种误差造成的光能弥散, 以了解诸项误差的危害程度, 再定量分配公差。这种分配系以下述数学计算为基础。

假定选用综合切比雪夫积分型质量函数^[1] A' 作为像质指标, 依次计算它对各误差的有限差商 $\partial A' / \partial x_j$ ($j=1, 2, \dots, n$ 是误差序号), 如我们希望诸误差总效果是使 A' 变为 $(A' + \Delta A')$, 则可得

$$(\partial A' / \partial x_1) \cdot \Delta x_1 + (\partial A' / \partial x_2) \cdot \Delta x_2 + \dots + (\partial A' / \partial x_n) \cdot \Delta x_n = \Delta A' \quad (2)$$

令 $\partial A' / \partial x_j = a_j$, 即有

$$\sum_1^n a_j \cdot \Delta x_j = \Delta A' \quad (3)$$

我们在下面条件下求解(2)式:

$$\sum_1^n \Delta x_j^2 = \text{极小值} \quad (4)$$

运用拉格朗日乘子法, 以(2)式为约束, 求满足(4)式的条件极值, 可得:

$$\Delta x_j = a_j \cdot \Delta A' / \sum_1^n a_j^2 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

显然, 指定 $\Delta A'$, 即可由(5)式计算各单项误差。 $\Delta A'$ 的大小决定了容差的数值。

如果选用多项质量函数 f_i ($i=1, 2, \dots, m$) 来控制误差的分配, 则求解公式为:

$$\Delta X = B^T (BB^T)^{-1} \cdot \Delta F \quad (6)$$

式中,

$$\Delta F = (\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_m)^T \quad (7)$$

$$\Delta X = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)^T \quad (8)$$

变量

$$B = \begin{matrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \partial f_1 / \partial x_2 & \dots & \partial f_1 / \partial x_n \\ \partial f_2 / \partial x_1 & \partial f_2 / \partial x_2 & \dots & \partial f_2 / \partial x_n \\ \vdots & & & \\ \partial f_m / \partial x_1 & \partial f_m / \partial x_2 & \dots & \partial f_m / \partial x_n \end{matrix} \quad (9)$$

这里的质量函数当然不只局限于我们提出来的切比雪夫积分型函数。

我们按以上思想设计了专用软件, 实现了此类公差的自动设计与优化分配。限于篇幅, 有关解的数学分析及程序处理不能在此细述。

3. 远心光路的应用

众所周知, 调焦误差、机械与光学加工误差、镜头切换、外界震动等因素对像面位置都有影响。为避免其对成像测量精度的危害, 我们在摄像物镜后焦面上设置光阑, 构成物方远心光路, 使成像光束的中心光线方向恒定不变。这样做又带来一些新问题, 姑且不在此论。

无源谐振腔激光陀螺实验系统的研制

肖贵遐 盍星

(国防科技大学应用物理系, 长沙, 410073)

摘要: 报道了采用反射型谐振腔结构的无源谐振腔激光陀螺系统。在实验室环境下, 取得了漂移稳定性 1.7deg/h 的性能。指出了引起陀螺漂移的误差因素, 并提出进一步改善陀螺测量精度的措施。

关键词: 激光陀螺 谐振腔 谐振频率

The research of a passive resonator gyroscope system

Xiao Guixia, Ding Jingxing

(Department of Appl. Phys., National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

Abstract: A passive resonator laser gyroscope system composed of a reflective ring cavity is reported in this paper. The structure of the passive resonator is different from ordinary passive resonator: (1) there is only one lens in ring cavity to decrease the total loss of the cavity and to obtain much narrow resonative line width; (2) the intensity of the reflective light and the transmission light are minimum and maximum at the resonant centre respectively, so the SNR of reflective light can be greater than the SNR of transmission light; (3) the structure of the system is compatible with passive resonator optical fiber gyroscope. The system has advanced performance, and its stability of drift is 1.7degree/hour in lab environment. The major reason causing drift is noise and closed loop control error in control circuit.

Key words: laser gyroscope resonator resonance frequency

引 言

目前, 在惯性制导领域, 最具发展潜力的精密惯性转动传感器当属利用 sagnac 效应^[1] 研制得的光学陀螺。光学陀螺具有各种形式, 如有源谐振腔激光陀螺、无源谐振腔激光陀螺以及光纤干涉仪陀螺等。70 年代末出现的无源谐振腔激光陀螺^[2] 由于环形腔内无增益介质, 因而不存在有源谐振腔激光陀螺中由气体流动、磁场感应等与增益介质有关的效应引起的零点偏

五、结 论

运用显微光学原理与 CCD 技术结合, 实现了光波强衰场中悬浮颗粒的图像放大传输和形状大小的精密检测。实践证明了其正确和可靠。

参 考 文 献

1 王永仲. 新光学系统的计算机设计. 北京: 科学出版社, 1993: 293

作者简介: 王 晓, 男, 1971 年 11 月出生。硕士, 博士研究生。从事光电子技术学习和研究。

收稿日期: 1996-10-26