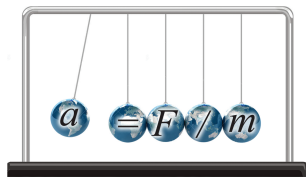


文章编号:1005-4642(2025)06-0015-05



普通物理实验

双物体漫反射全息照相实验研究

朱 玲, 张 权, 王中平

(中国科学技术大学 物理学院, 安徽 合肥 230026)

摘 要:提出了使用双物体漫反射全息照相实验原理进行全息照相实验的方法. 根据实验原理和目的, 设计双物体漫反射波前记录光路, 搭建波前记录实验装置, 制作双物体全息图. 用参考光分别照射全息图正面和背面, 再现双物体虚像; 用细激光束按原参考光方向分别照射全息图正面和背面, 再现全息图不同面的双物体实像.

关键词:双物体漫反射; 全息照相; 波前记录; 波前再现

中图分类号: O438.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.06.002

全息即光的全部信息, 包含了决定光波动特性的参量: 振幅和相位. 振幅表示光的强弱, 相位表示光在传播中各质点所在的位置及振动的方向. 全息照相能够记录光的振幅和相位信息, 并在一定条件下再现包含物体全部信息的三维像. 用光的干涉方法记录物光与参考光发生干涉产生的干涉条纹图像, 该图像的感光记录即为全息图, 当用照明光照射全息图, 由衍射效应再现物体波前, 形成与原物体相似的三维像, 这种波前记录和波前再现的过程就是全息照相^[1]. 高相干性激光光源的出现, 使全息照相技术进入蓬勃发展时代, 并在信息处理、全息干涉计量、全息光学元件、全息显示、高密度存储等领域得到广泛应用.

单物体漫反射激光全息照相是典型的光学实验, 是物理实验教学中常见的实验内容, 各高等院校普遍开设该实验^[2]. 随着现代光学技术的发展, 全息照相在现代光学领域中的应用越来越广泛, 为了使光学实验教学能够与现代技术发展相适应, 同时也为了更好地培养学生自主设计和实践创新能力, 本文经过多次研究、实践, 成功实现了双物体漫反射全息照相, 制作的全息图像信息丰富, 实验现象有趣生动, 有利于激发学生的学习兴趣.

1 实验原理

1.1 干涉法记录双物体物光波前

物光波前信息包括光的振幅和相位, 目前的感光记录介质仅对光强(振幅)产生影响, 无法体现相位的变化, 设法将相位信息转换成强度的变化以便于记录, 该方法即为光的干涉法^[3]. 来自物体的光波即物光(o 光)与 1 束与之相干的参考光(r 光), 在记录介质处相干叠加, 在记录介质各点处, r 光相位均相同, 但 o 光的相位则不同, 因此 o 光和 r 光在记录介质各点处的相位差不同, 相干后干涉条纹亮暗程度就具有差异, 记录介质记录了这种差异, 即记录了物光相位的分布, 同时也记录了物光的振幅分布.

设 xOy 平面为全息照相记录介质平面. 2 束传播到记录介质的物光波前分别为 $o_1(x, y)$ 和 $o_2(x, y)$, 传播到记录介质的参考光波前为 $r(x, y)$, 3 束光的波前复振幅分别为

$$o_1(x, y) = O_{10}(x, y) \exp[j\varphi_{10}(x, y)], \quad (1)$$

$$o_2(x, y) = O_{20}(x, y) \exp[j\varphi_{20}(x, y)], \quad (2)$$

$$r(x, y) = R_r(x, y) \exp[j\varphi_r(x, y)]. \quad (3)$$

2 束物光波前和 1 束参考光波前在 xOy 平面相干叠加后的复振幅为

“第 12 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期: 2024-06-23; **修改日期:** 2025-01-23

基金项目: 安徽省级质量工程教学研究项目(No. 2022jyxm1823)

作者简介: 朱 玲(1972—), 女, 安徽霍邱人, 中国科学技术大学物理学院实验师, 学士, 主要从事大学物理实验教学工作. E-mail: zhuling@ustc.edu.cn

通信作者: 王中平(1976—), 男, 山东沂水人, 中国科学技术大学物理学院高级实验师, 博士, 研究方向为凝聚态物理. E-mail: zpwang@ustc.edu.cn

$$U(x, y) = o_1(x, y) + o_2(x, y) + r(x, y) = O_{10}(x, y) \exp[j\varphi_{10}(x, y)] + O_{20}(x, y) \exp[j\varphi_{20}(x, y)] + R_r(x, y) \exp[j\varphi_r(x, y)], \quad (4)$$

3 束光的波前在 xOy 平面相干叠加后的总光强为

$$I(x, y) = U(x, y)U^*(x, y) = (o_1 + o_2 + r)(o_1^* + o_2^* + r^*) = o_1 o_1^* + o_2 o_2^* + r r^* + o_1 o_2^* + o_2 o_1^* + o_1 r^* + r o_1^* + o_2 r^* + r o_2^* = O_{10}^2 + O_{20}^2 + R_r^2 + 2O_{10}O_{20} \cos(\varphi_{10} - \varphi_{20}) + 2O_{10}R_r \cos(\varphi_{10} - \varphi_r) + 2O_{20}R_r \cos(\varphi_{20} - \varphi_r), \quad (5)$$

式(5)中,前3项是物光波 o_1, o_2 和参考光波 r 的强度分布,视为常量,为记录介质提供背景光强;第4项是物光 o_1 和 o_2 的干涉项,第5项是物光 o_1 和参考光 r 的干涉项,第6项是物光 o_2 和参考光 r 的干涉项.后3项干涉项中分别包含了2相干光的振幅和相位关系,在第5项和第6项中,参考光 r 的振幅和相位均受到物光的调制(调幅和调相),其作用是将物光波前的相位分布转换为干

涉条纹的强度分布,因此干涉法实现了将空间相位调制转换成空间强度调制的功能^[4].

将记录介质(银盐干版)放置在3束光波前相干叠加的位置处,拍摄干涉条纹,然后对其进行线性(振幅透过率 t 随曝光量 E 变化关系曲线中的线性部分)冲洗获得全息图,全息图的振幅透过率函数 $t(x, y)$ 与曝光时的入射光强 $I(x, y)$ 成线性关系^[5]:

$$t(x, y) = t_0 + \beta E = t_0 + \beta[\tau I(x, y)] = t_0 + \beta' I(x, y) = t_0 + \beta'(O_{10}^2 + O_{20}^2 + R_r^2 + o_1 o_2^* + o_2 o_1^* + o_1 r^* + r o_1^* + o_2 r^* + r o_2^*), \quad (6)$$

其中, t_0 为未曝光银盐干版的透射率, β 为 $t-E$ 曲线中直线部分的斜率, τ 为曝光时间, $\beta' = \beta\tau$, 以上参量均为常量.

1.2 衍射效应再现双物体物光波前

用复振幅为 $r'(x, y) = R_0'(x, y)e^{j\varphi_0'(x, y)}$ 的再现照明光照射全息图,则全息图衍射场为

$$C(x, y) = r'(x, y)t(x, y) = r'[t_0 + \beta'(O_{10}^2 + O_{20}^2 + R_r^2 + o_1 o_2^* + o_2 o_1^* + o_1 r^* + r o_1^* + o_2 r^* + r o_2^*)] = r'(t_0 + \beta'R_r^2) + r'\beta'(O_{10}^2 + O_{20}^2) + r'\beta'(o_1 o_2^* + o_2 o_1^*) + r'r^* \beta'o_1 + r'r^* \beta'o_2 + r'r\beta'o_1^* + r'r\beta'o_2^* = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6 + D_7, \quad (7)$$

其中, $D_1 = r'(t_0 + \beta'R_r^2)$, 具有改变再现照明光 r' 振幅的作用,不改变 r' 的性质; $D_2 = r'\beta'(O_{10}^2 + O_{20}^2)$, 具有对 r' 振幅的调制作用; $D_3 = r'\beta'(o_1 o_2^* + o_2 o_1^*)$, 是2束物光的自相干场,物光 o_1 和 o_2 振幅相对较弱,且在观测时间 τ_H 内,对相干项 $2O_{10}O_{20} \cos(\varphi_{10} - \varphi_{20})$ 积分,其结果趋于0,因此认为 D_3 是噪声^[6]. 对于 $D_4 \sim D_7$, 如果再现照明光 r' 和原参考光 r 相同, D_4 和 D_5 可分别表示为

$$D_4 = R_r^2 \beta' o_1, \quad (8)$$

$$D_5 = R_r^2 \beta' o_2, \quad (9)$$

其中, R_r^2 为均匀的参考光强度,视为常量,因此式(8)和式(9)与原始物光表达式(1)和式(2)相比,只相差了常量因子 $R_r^2 \beta'$, 是原始物光 o_1 和 o_2 的准确再现,原始物光 o_1 和 o_2 是发散光,形成物体的虚像. D_6 和 D_7 分别表示为

$$D_6 = R_r^2 \exp(j2\varphi_r) \beta' o_1^*, \quad (10)$$

$$D_7 = R_r^2 \exp(j2\varphi_r) \beta' o_2^*, \quad (11)$$

其中, o_1^* 和 o_2^* 为原始物光的共轭光,是会聚光,形成共轭像,由于相位因子 $j2\varphi_r$ 的存在,使得共轭光的相位发生变化,因此再现共轭像位置会发生偏移.

1.3 全息图再现物像坐标关系

全息图位于 xOy 平面,物光 o 、参考光 r 和再现照明光 r' 分别用 (x_o, y_o, z_o) , (x_r, y_r, z_r) 和 (x_r', y_r', z_r') 表示,三者坐标关系如图1所示.

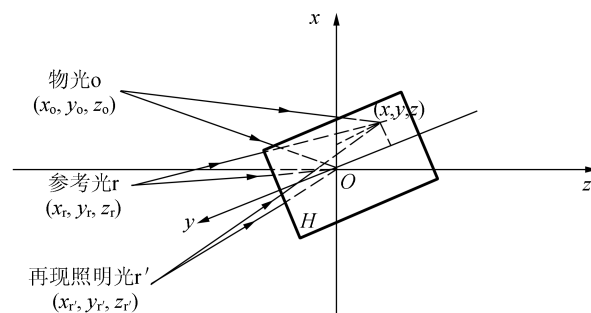


图1 坐标关系图

全息图像点 $n(x_n, y_n, z_n)$ 与图1中的物点、参考光和再现照明光坐标之间满足的物像关系为^[7]

$$\frac{1}{z_n} = \frac{1}{z_r'} \pm \mu \left(\frac{1}{z_o} - \frac{1}{z_r} \right), \quad (12)$$

$$\frac{x_n}{z_n} = \frac{x_r'}{z_r'} \pm \mu \left(\frac{x_o}{z_o} - \frac{x_r}{z_r} \right), \quad (13)$$

$$\frac{y_n}{z_n} = \frac{y_r'}{z_r'} \pm \mu \left(\frac{y_o}{z_o} - \frac{y_r}{z_r} \right), \quad (14)$$

其中, $\mu = \lambda_r' / \lambda_r$, λ 为波长; 符号“+”对应物光成像; 符号“-”对应原始物光的共轭光成像. 规定光波自左向右传播, z 在原点左边为负值, 右边为正值. 因此, 若 z_n 为负, 则为虚像; z_n 为正, 则为实像.

2 实验过程及分析

2.1 双物体漫反射全息图的制作过程

2.1.1 设计双物体漫反射波前记录光路

双物体为陶瓷小鹿(记作 A)和陶瓷小猫(记作 B). 光源为氦氖激光器(波长为 632.8 nm, 功率为 10 mW), 记录介质采用高分辨率银盐干版. 设计光路时需考虑以下因素:

1) 2 束物光和 1 束参考光的光程差、参物角、光强比等符合干涉条件及银盐干版记录条件;

2) 考虑再现虚像不被 0 级衍射光影响, 参物角不应过小;

3) 考虑两物体再现像位于全息图法线两侧以便于观察, 采用参考光垂直入射银盐干版, A 和 B 分别位于参考光左、右两侧;

4) 考虑 A 和 B 均有一虚一实再现像^[8], 采用再现照明光为原参考光, 有 $x_r' = x_r$, $y_r' = y_r$, $z_r' = z_r$, 代入式(12)~(14). 若式(12)~(14)取“+”, 有 $x_n = x_o$, $y_n = y_o$, $z_n = z_o$, 所得再现虚像与原物等大, 位置相同; 若式(12)~(14)取“-”, 可得再现共轭像的形成条件为

$$z_n = \frac{z_o z_r}{2z_o - z_r}, \quad (15)$$

其中, 当 $|z_r| > |2z_o|$ 时, $z_n > 0$, 再现共轭像和物体分居干版异侧, 是正立的实像. 因此, $|z_r| > |2z_o|$ 是获得共轭实像的必要条件^[9], 故 A 和 B 分别到干版的距离, 与参考光到干版的距离需要满足 $|z_r| > |2z_o|$.

考虑上述因素, 设计双物体漫反射波前记录光路如图2所示. 其中, S 为氦氖激光器, G 为曝光计时器, L_1 (分光比 $t:r=95\%:5\%$) 和 L_2 (分

光比 $t:r=50\%:50\%$) 为分光镜, M 为全反镜, F_1, F_2 和 F_3 为扩束镜, H 为干版, A 和 B 为物体.

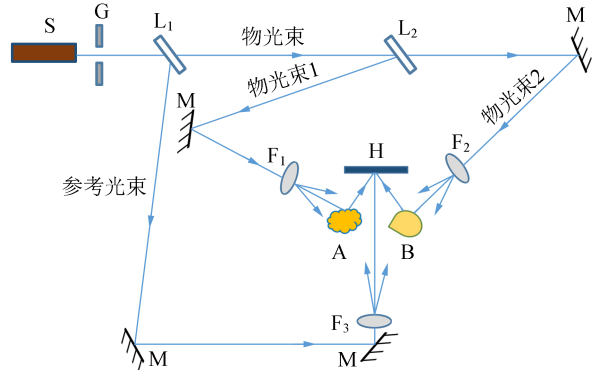


图2 双物体漫反射波前记录光路

2.1.2 双物体漫反射波前记录实验装置搭建

按照图2搭建波前记录实验装置, L_1 将激光束分为物光束和参考光束; L_2 将物光束分为 2 束光强一致的物光束 1 和物光束 2, 其中物光束 1 照射物体 A, 物光束 2 照射物体 B, 物体实物如图3所示. 调节参考光垂直 H, 3 束光的光程基本相等, 两物体漫反射中心光线与参考光夹角分别约为 30° (A, B 和参考光之间的夹角可以不同). 分别加入扩束镜 F_1, F_2 和 F_3 , 调整扩束镜位置, 使物体 A 和 B 的漫反射光强与参考光光强之比的范围为 $1:4 \sim 1:8$.



图3 双物体 A 和 B 的实物图像

2.1.3 制作全息图

实验装置搭建完成后, 将银盐干版 H 有银盐膜的一面(正面)朝向物体, 拍摄干涉条纹, 然后经显影、停显、定影、流水冲洗、烘干等处理, 制作出全息图, 如图4所示. 值得注意的是, 若要得到再现效果好的全息图, 除须选择合适的实验光路参量搭建实验装置, 还要防止扰动(曝光时保持光学平台稳定和实验室安静), 以及显影时银盐干版的灰度合适.

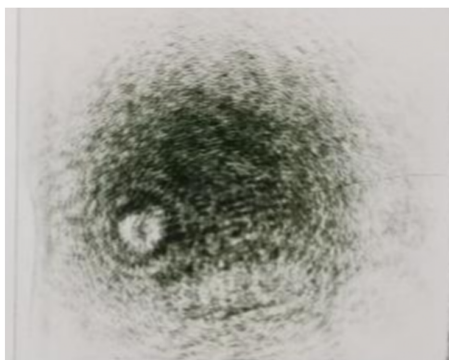


图 4 制作的全息图像

2.2 双物体漫反射全息图波前再现

2.2.1 双物体虚像再现

图 4 全息图记录了 2 束物光与 1 束参考光相互干涉而产生非常复杂且精细的干涉条纹,这些干涉条纹的亮暗差异程度记载了 2 束物光波的振幅和相位信息. 全息图外观看上去灰蒙蒙,但其却以参考光对物光编码的形式记录物光的全部信息. 全息图可看作是正弦型衍射光栅,采用再现照明光(本实验采用图 2 中的参考光)照射全息图,照明光受到光栅衍射,在全息图后方出现 0 级及 ± 1 级衍射光, $+1$ 级衍射光(物体 A 和 B 相对 0 级有各自 $+1$ 级衍射光)与图 2 两物体发出的光波一致,对应式(8)和式(9),是发散光,构成双物体再现虚像. 原参考光再现,由物像坐标关系式(12)~(14)可知,再现虚像是与原物体位置相同、大小相等的三维立体虚像. 设计双物体波前再现光路如图 5 所示.

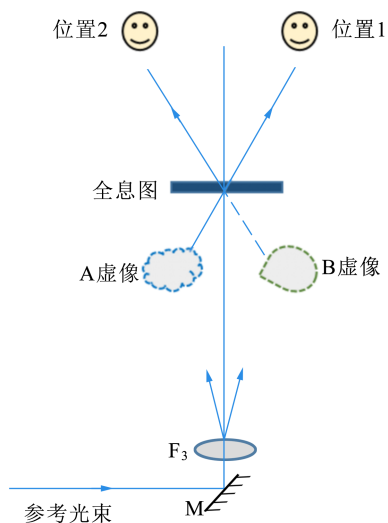
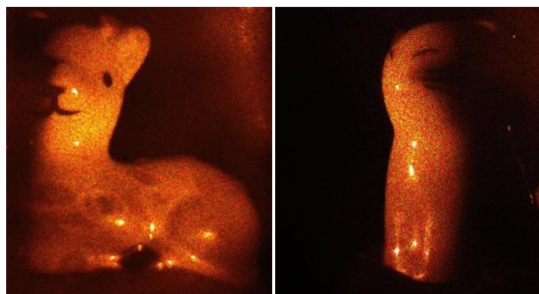


图 5 原参考光照射全息图再现双物体虚像光路

图 5 中,从位置 1 迎着光线看向全息图,透过全息图可在原物体 A 处观察到其虚像,同样在位置 2 处,可观察到物体 B 的虚像. 再现双物体虚像如图 6 所示.



(a) A 虚像

(b) B 虚像

图 6 再现双物体的虚像

2.2.2 双物体实像再现

全息图 -1 级衍射光(物体 A 和 B 相对 0 级有各自 -1 级衍射光)是两物体原始物光的共轭光,是会聚光,形成共轭像. 由物像坐标关系式(12)~(14)可知,再现共轭像的虚、实与再现条件和制作条件有关. 根据实验目的,需选取合适的 z_o , z_r 和 z_r' 的值.

本实验采用再现照明光为未扩束的细激光束^[10],沿原参考光方向照射全息图再现共轭实像. 移走参考光中的扩束镜 F_3 (图 2),在全息图后方用不透明白屏拦截全息图 -1 级衍射光所成的共轭实像,沿着激光传播方向观察白屏,可看到屏上 0 级两侧有双物体倒立实像和不清晰的正立实像,此正立实像即为共轭实像,如图 7 所示.

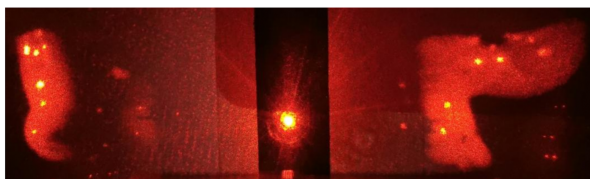
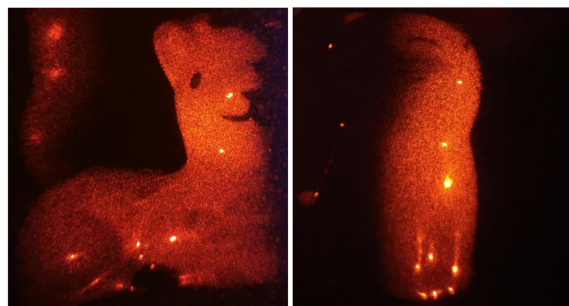


图 7 双物体再现实像

从图 7 中可以看出全息图 0 级背景光很强,共轭实像成像受到强背景光干扰,削弱了像的反差,故而像质模糊. 要解决这一问题,可采用光线斜入射光栅增大入射角的方法^[11]. 保持入射光线不变,转动全息图,此时衍射级 0 级不变, -1 级衍射角随着入射角变大而向外延展,由 -1 级衍射光构成的共轭实像避开了 0 级强背景光,增强了像的反差,因而能被清晰地观察到. 具体做

法是:逆时针转动全息图合适角度,在屏上能观察到清晰的 A 共轭实像;顺时针转动全息图,可观察到 B 共轭实像. 观察到的共轭实像是有光强和相位分布的三维立体图像,但此实像的凸凹状态与原物体相反,是赝实像,如图 8 所示. 图 7 中双物体倒立实像是物体虚像点衍射光的小孔成像^[12],此像有光强分布而无相位分布,是平面像而非立体像. 实验中,学生容易误认为此像为共轭实像.

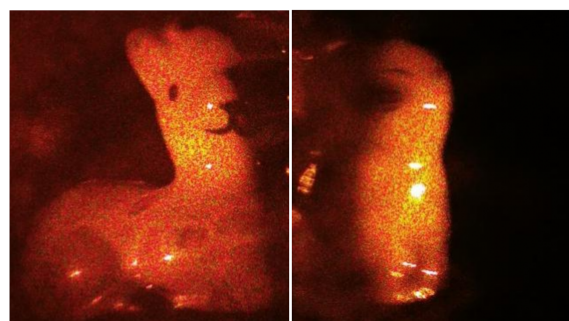


(a) A 共轭实像 (b) B 共轭实像

图 8 再现双物体的共轭实像

2.3 全息图背面朝向光束再现双物体虚、实像

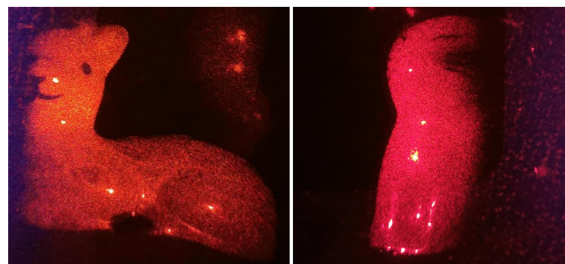
完成上述全息图波前再现实验后,又采取了另一种方法再现全息图的虚、实像. 在图 2 中,将全息图绕 H 中心轴旋转 180° ,即背面朝向光束^[13],在全息图法线两侧,迎着光线透过全息图,可分别看到 A 和 B 的再现虚像,此虚像由-1 级衍射光形成,如图 9 所示.



(a) A 虚像 (b) B 虚像

图 9 全息图背面朝向激光再现双物体的虚像

移走扩束镜 F_3 ,在全息图的后方用不透明的白屏成像,沿着激光传播方向观察白屏,能看到白屏上清晰、立体、正立的双物体实像,如图 10 所示,此实像是由+1 级衍射光会聚形成,与原物体相同,具有与原物体一致的光分布.



(a) A 实像 (b) B 实像

图 10 全息图背面朝向激光再现双物体的实像

3 结束语

本文阐述了双物体漫反射全息照相的实验原理及过程,设计了双物体波前记录光路并搭建了实验装置,用银盐干版作为记录介质,实现了 1 次曝光同时记录 2 个物体的漫反射波前,并分别用原参考光同时再现 2 个物体的虚像和用细激光束同时再现 2 个物体的实像. 经过对双物体漫反射全息照相的研究,给出了对多物体 1 次曝光成像的设计思路和方法,不仅提升和丰富了全息照相实验教学内容,同时还可以为学生提供更大的自主设计空间,激发学生的学习兴趣,培养学生的自主探究能力,提升学生的物理实验技能,拓宽学生的知识面.

参考文献:

- [1] 赵凯华,钟锡华. 光学(下册)[M]. 北京:北京大学出版社,2006:142-164.
- [2] 轩植华,霍剑青,姚焜,等. 大学物理实验(第三册)[M]. 北京:高等教育出版社,2006:57-62.
- [3] 朱玲,赵伟,代如成,等. 比累对切透镜双光束干涉实验测量光的波长[J]. 物理实验,2021,41(12):19-22.
- [4] 陈家璧. 信息光学简明教程[M]. 北京:电子工业出版社,2022:65-69.
- [5] 苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 成都:四川大学出版社,1995:2-6.
- [6] 林泽芸,叶沛林,余俊龙,等. 混合型双光束干涉全息照相的设计与探究[J]. 物理与工程,2023,33(2):143-151.
- [7] 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996:74-84.
- [8] 郭开惠,吴平,严映律,等. 全息照相再现成像的深入研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版),1999,35(2):43-47.

(下转 23 页)

- 2012,32(5):25-27.
- [4] 高峰,郭长立,白冰. 落体法测刚体转动惯量的误差分析[J]. 力学与实践,2019,41(3):345-348.
- [5] 王晓雄,蒋立勇. 刚体转动惯量实验的改进[J]. 物理实验. 2024,44(9):22-26.
- [6] 梁月鹏,胡润峰,刘福. 高精度激光多普勒在线测长系统设计及算法研究[J]. 红外与激光工程,2025,54(2):187-193.
- [7] 张兴慧,王楠. 水膜压力无线传感监测中的多普勒效应研究[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版),2020,36(6):24-28.

Measuring rigid body moment of inertia based on Doppler effect

SUN Shishuai¹, LIU Yang¹, YU Dan¹, LI Xiaolan¹, SUN Wenwen¹, LI Pengfei²

(1. College of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Century Zhongke Photoelectric Technology Co., Ltd, Chengdu 610000, China)

Abstract: This study introduced an innovative design for measuring the moment of inertia of rigid bodies using the Doppler effect principle in conjunction with the traditional falling-object method. The proposed approach achieved precise determination of the moment of inertia through accurate measurement of the falling object's acceleration, thereby addressing the limitations of conventional methods, such as significant errors in time/height measurements and systematic errors arising from neglecting acceleration effects. Experimental results demonstrated the feasibility and high precision of the Doppler effect-based experimental design, significantly enhancing the accuracy of rigid body moment of inertia measurements.

Key words: moment of inertia; Doppler effect; uniformly accelerated motion [编辑:龙玉梅]

(上接 19 页)

- [9] 郭开惠. 全息照相实验问题探究[J]. 物理实验, 1997,17(2):88-90.
- [10] 熊秉衡,葛万福. 全息照相的细激光束照明再现成像和分析[J]. 长沙铁道学院学报,1985(3):91-98.
- [11] 唐小村. 光线斜入射对光栅衍射的影响[J]. 实验技术与管理,2012,29(7):42-44.
- [12] 杨齐民,张文碧,钟丽云,等. 全息照片的细激光束成像原理[J]. 激光杂志,1999,20(6):39-41.
- [13] 黎亚楠,杨鹰,严霞,等. 探究不同散射介质中全息实像的清晰度[J]. 物理实验,2015,35(5):37-42.

Experimental research on double object diffuse reflection holography

ZHU Ling, ZHANG Quan, WANG Zhongping

(School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: A method for conducting holographic experiments utilizing the principle of double object diffuse reflection holography was proposed. Based on the experimental principle and objectives, a wavefront recording optical path for double-object diffuse reflection was designed, an experimental setup for wavefront recording was constructed, and a hologram of two objects was produced. By illuminating the front and back of the hologram with reference light, the virtual images of the two objects could be reconstructed. When the front and back of the hologram were irradiated with a thin laser beam in the direction of the original reference light, the real images of the two objects on different sides of the hologram could be reconstructed respectively.

Key words: double object diffuse reflection; holography; wavefront recording; wavefront reconstruction [编辑:龙玉梅]