

物理光学中多光束叠加强度求解方法的探讨

张宝武 孔 明 许新科 华杭波 王君竹 曹丽霞
(中国计量大学计量测试与仪器学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要 大学物理光学中多光束相遇叠加强度的求解问题占据了课程内容的很大比重, 涵盖了叠加原理、干涉、衍射、互补屏原理、复振幅、共轭波和偏振等理论和概念。为了使非光学特色工科大专院校的学生在有限的课程学习期间内快速方便地解决多光束叠加强度求解问题, 有效地对实际的干涉测量设备原理进行分析, 总结了一套“叠加强度求解六步法”的程序化解题流程, 通过杨氏实验、单矩形孔夫琅禾费衍射、巴比涅互补屏系统和一个复杂习题解答为例对该方法的使用进行了充分举例说明, 有效地论证了该方法的有效性和通用性。

关键词 物理光学; 叠加原理; 杨氏实验; 干涉; 衍射; 互补屏

DISCUSSION ON THE METHOD OF SOLUTION TO MULTI-BEAM SUPERPOSITION INTENSITY IN PHYSICAL OPTICS

ZHANG Baowu KONG ming XU Xinke HUA Hangbo WANG Junzhu CAO Lixia
(College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018)

Abstract In university physical optics, how to solve the problem of the superposition intensity of multi-beam occupies a large proportion of the course content, which covers the superposition principle, interference, diffraction, complementary screen principle, complex amplitude, conjugate wave and polarization. In order to enable the students of engineering colleges and universities without optical characteristics to solve the problem of multi beam superposition intensity within a limited course learning period conveniently, and analyze the principle of actual interferometer equipment effectively, a set of programmed “six-step solution method to superposition intensity” was summarized. The method is fully explained by taking Young’s experiment, single square hole Fraunhofer diffraction, the Babinet complementary screen system and a complex exercise as examples. Conclusion is the set of programmed method has good universality.

Key words physical optics; superposition principle; Young’s experiment; interference; diffraction; complementary screen principle

随着国家一流专业计划及工程教育专业认证的有序推进, 课程教学和设计作为最基本的教学

单元, 是培养学生的最主要阵地, 是支撑“一流”专业建设的骨干, 亦是践行“以学生为中心、产出为

收稿日期: 2022-09-02; 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 中国计量大学教改课题(HEX2023005), 国家市场监督管理总局科技计划项目资助(2022MK220), 浙江省高等教育“十三五”教学改革项目(jg20190195)

通信作者: 张宝武, 中国计量大学计量测试与仪器学院副教授, zhangbaowu@126.com。

引文格式: 张宝武, 孔明, 许新科, 等. 物理光学中多光束叠加强度求解方法的探讨[J]. 物理与工程, 2024, 34(2): 98-103.

Cite this article: ZHANG B W, KONG M, XU X K, et al. Discussion on the method of solution to multi-beam superposition intensity in physical optics[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(2): 98-103. (in Chinese)

导向和持续改进”的认证核心理念的核心单元^[1]。为了顺应认证要求,每位教师都需要以学生能力提升为导向,发掘自身课程特点,更好地进行课程备课和设计。21 世纪是光电技术时代,以光学为基础的新课题、新方法、新技术以及新材料不断出现。以迈克耳孙干涉仪和 F-P 干涉仪为代表的光学干涉测量技术在各种精密、超精密加工、微位移测量、纳米计量、重力测量、深空探测和偏振光学等领域发挥着至关重要的作用^[2-5]。因此,光学课程成为各个工科大专院校必开的课程,即便不是单独成课,光学课程也会随着大学物理课程进入大学生的知识体系中。提起光,我们一般都是特指能够激起视觉的物质,其本质由麦克斯韦于 19 世纪的经典电磁理论确定为一种电磁波^[6,7]。至今,它已经从经典光学发展到了基于激光技术的现代光学,理论也随之进入到量子阶段。由于光学科目的特殊性,除非是以光学知识为本特色的本科院校设置有从几何光学到物理光学再到量子光学等完整的光学课程体系,一般的大专院校的光学课程通常仅限于传统的几何光学和物理光学,其后再无其他专门讨论光学的延续课程,可谓是独树一帜。因此,如何在有限的光学教学时间中给学生打下坚实的基础成为每位光学授课教师十分关心的问题。

笔者在多年的授课中发现,学生对于光的叠加、干涉和衍射知识的理解不透彻,对于如何解决叠加强度的相关问题比较困难,而这一部分又是传统光学中占比最重的^[8-10]。鉴于此,笔者就相关问题总结了一套线性叠加范畴内的解题方法,暂时定名为“叠加强度求解六步法”,总结成文抛砖引玉,与同行交流。

1 叠加强度求解六步法详解

光学知识已指出两列(或多列)光波在相遇点产生的合振动是各个光波单独在该点产生振动的矢量和,即图 1 所示的多光束 $\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{E}_3, \dots, \tilde{E}_n$ 在 P 点相遇叠加如式(1)所示。

$$\begin{aligned} \tilde{E}(P) &= \tilde{E}_1(P) + \tilde{E}_2(P) + \tilde{E}_3(P) + \\ &\quad \tilde{E}_4(P) + \dots + \tilde{E}_n(P) \\ &= \sum_n \tilde{E}_n(P) \end{aligned} \quad (1)$$

那 P 点强度求解的六步法详解如下:

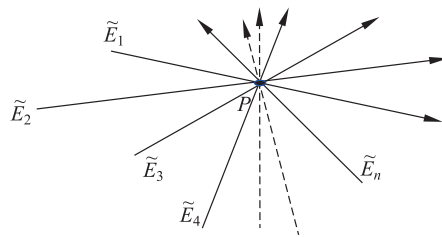


图 1 多光束相遇叠加

第一步:确定光源点 S 和考查点 P,以及光源点与考查点之间光波传播路径 $\overline{SP}$ 的具体走向和数目 N。

第二步:表示出第 j 条从光源点至考查点之间光路的光程 Δ_j 或者相位 δ_j 。

第三步:表示出第 j 条光路的复振幅表达式 $\tilde{E}_j$

$$\tilde{E}_j = \mathbf{A}_j \exp(ik\Delta_j) \text{ 或 } \tilde{E}_j = \mathbf{A}_j \exp(i\delta_j) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{A}_j$ 为振幅部分, k 为波数, i 为虚数单位。

第四步:对第三步中所有光路的复振幅表达式取和,求得所有光路的光波在考查点 P 处叠加后的总复振幅表达式 $\tilde{E}$

$$\tilde{E} = \sum_{j=1}^N \tilde{E}_j \quad (3)$$

第五步:对第四步的总复振幅表达式 $\tilde{E}$ 取相位复共轭函数 $\tilde{E}^*$

$$\tilde{E}^* = \left(\sum_{j=1}^N \tilde{E}_j \right)^* \quad (4)$$

第六步:将第四步的总复振幅表达式与第五步的相位复共轭取乘积得考查点 P 处的总强度 I

$$I = \tilde{E} * \tilde{E}^* = \left(\sum_{j=1}^N \tilde{E}_j \right) \left(\sum_{j=1}^N \tilde{E}_j \right)^* \quad (5)$$

在实施上述六步法的时候要注意以下几点:

(1) 在光波叠加理论中,光程和光程差具有关键性的作用。因此,在第二步中描述每一条光路的光程时要充分考虑引起光程变化的各种因素,例如,相邻两条光路之间光程的关联性、每一条光路中折射率的变化、小孔自身相位的变化等。

(2) 在第三步中要充分考虑每一个小孔的具体性质,例如衍射时的矩形孔/屏、单缝/细丝和圆孔/屏,及各个小孔自身尺寸的变化等,此时要联合衍射理论和互补屏原理充分表达出振幅部分 $\mathbf{A}_j$ 。

(3) 在第三步中要充分考虑振幅部分 $\mathbf{A}_j$ 的偏振性。

(4) 本方法暂时仅限于线性叠加问题。

2 案例分析

下面我们依次通过杨氏实验、单矩形孔夫琅禾费衍射、巴比涅互补屏系统和一个复杂习题的解答为例来充分说明“叠加强度求解六步法”的实施,其中振幅部分 A_j 具有相同的方向。

2.1 杨氏实验的强度求解六步法分析

如图 2 所示的杨氏实验, S_1 和 S_2 两个小孔沿 x 方向相距 d 设置, S_1S_2 连线的中点 O 为坐标原点, yOz 在纸面内, xOz 垂直于纸面, P 点为观察点, 波长为 λ_0 。单色平行光沿 z 正方向入射至 S_1S_2 两个小孔后在 P 点相遇叠加。系统所处环境的折射率为 n , 求 P 点的强度。

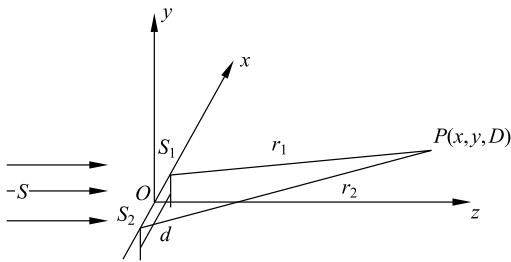


图 2 杨氏实验

根据“叠加强度求解六步解法”, 我们解题过程如下:

第一步: 由于是平行光入射, 则光源点 S 位于 z 轴 $-\infty$ 处, 考查点 P 点为图示点, $S \sim P$ 之间的光波传播路径有两条, 分别为 $\overline{SS_1P}$ 和 $\overline{SS_2P}$ 。

第二步: 考虑到系统环境折射率 n , 则 $\overline{SS_1P}$ 的光程为 $\Delta_1 = n(-\infty + r_1)$, $\overline{SS_2P}$ 的光程为 $\Delta_2 = n(-\infty + r_2)$ 。

第三步: 设 S_1 的振幅部分为 A_1 , S_2 的振幅部分为 A_2 , 联合波长 λ_0 可得 $\overline{SS_1P}$ 的复振幅表达式为 $\tilde{E}_1 = A_1 \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda_0} n (-\infty + r_1) \right]$, $\overline{SS_2P}$ 的复振幅为 $\tilde{E}_2 = A_2 \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda_0} n (-\infty + r_2) \right]$ 。

第四步: 考查点 P 的总复振幅为

$$\begin{aligned} \tilde{E} &= \tilde{E}_1 + \tilde{E}_2 \\ &= A_1 \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda_0} n (-\infty + r_1) \right] + \\ &\quad A_2 \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda_0} n (-\infty + r_2) \right] \end{aligned}$$

第五步: 总复振幅的相位复共轭表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{E}^* &= (\tilde{E}_1 + \tilde{E}_2)^* \\ &= A_1 \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda_0} n (-\infty + r_1) \right] + \\ &\quad A_2 \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda_0} n (-\infty + r_2) \right] \end{aligned}$$

第六步: 考查点 P 的总强度

$$\begin{aligned} I &= \tilde{E} * \tilde{E}^* \\ &= |A_1|^2 + |A_2|^2 + \\ &\quad 2A_1 \cdot A_2 \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} n (r_1 - r_2) \right) \end{aligned}$$

这个强度表达式与教科书上的结果是一致的, 其中最主要的结论就是相邻两条光路之间存在固定的相位差 δ

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n (r_1 - r_2) = \frac{2\pi}{\lambda_0} d \sin \theta \quad (6)$$

其中, θ 为 P 的方向角, 在衍射课程中, 它为衍射角, $\sin \theta$ 为 P 点的方向余弦。这样, 在考虑振幅部分 A_1 和 A_2 之间夹角 α 的情况下, 第六步的最后强度可以表示为 $I = |A_1|^2 + |A_2|^2 + 2A_1 A_2 \cos \alpha \cos \delta$ 。在此基础上, 我们可以扩展为多光束叠加干涉。

2.2 单矩形孔夫琅禾费衍射的强度求解六步法分析

对于衍射课程, 所有教科书基本上都是以惠更斯——菲涅耳——基尔霍夫——索末菲——巴比涅这五个科学家的工作为主线进行安排的, 再最后总结出衍射和干涉的区别。总的来说, 干涉和衍射都是光波叠加的结果, 干涉是有限个光波叠加而衍射是无限多个光波叠加。单矩形孔衍射后 P 点的夫琅禾费强度为

$$I = \tilde{E} * \tilde{E}^* = I_0 a^2 b^2 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad (7)$$

其中, a 和 b 分别为矩形孔的边长, $\alpha = \frac{k a l}{2}$, $\beta =$

$\frac{k b m}{2}$ 。对此, 我们仍然可以基于上述杨氏实验的

结论采用本文的六步法求得。

为了说明本文方法的普适性, 我们以教材上的分析图形为基础入手分析。

如图 3 所示夫琅禾费衍射系统, 空气环境中 (设折射率为 1) 无穷远处的点光源 S 照射一个透光孔为衍射孔, C 点是衍射孔径的中心点, Q 为衍射孔径内的任意一点。由于透镜 L_2 紧贴衍射屏, 因此可以近似地认为 Q 点和 J 点重合, C 点与 O 点重合。 Q 点和 C 点在 x 和 y 方向上的直线距离分别记为 $d_x = x_1$ 和 $d_y = y_1$ 。对比杨氏实验, Q

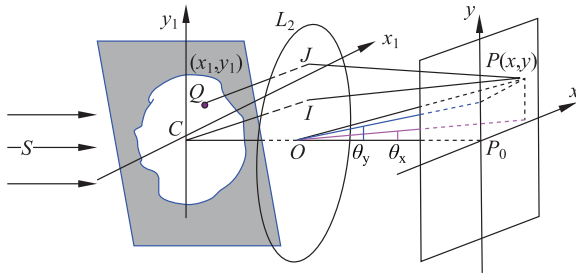


图3 夫琅禾费衍射系统图

点和C点可以等价地认为是两个宽度无限小,相距为 x_1 和 y_1 的小孔。

第一步:由图2可知无穷远的点光源S和空间点P之间有无数多条光路,其中过Q点的一条为 $\overline{SQJP}$,过中心点C的一条为 $\overline{SCOP}$ 。

第二步: $\overline{SCOP}$ 的光程为 $\Delta_1 = -\infty + \overline{CP}$, $\overline{SQJP}$ 的光程为 $\Delta_2 = -\infty + \overline{QP}$ 。

第三步:考虑到衍射知识,Q点和C的振幅部分A都记为 $\tilde{E}_0$,则过Q点光路的复振幅表达式为 $\tilde{E}_Q = \tilde{E}_0 \exp[ik(-\infty + \overline{QP})]$,过C点光路的复振幅表达式为 $\tilde{E}_C = \tilde{E}_0 \exp[ik(-\infty + \overline{CP})]$ 。

为了运算方便,我们借用杨氏实验的结果,可以设过C点的光路相位为0,则过Q点的光路相位相对于过C点的光路相位增加了 δ 。根据衍射知识可知, $\delta = kx_1 l + ky_1 m$,其中, $l = \frac{x}{f} = \sin\theta_x$

为P点的x方向余弦为 $m = \frac{y}{f} = \sin\theta_y$ 为P点的y方向余弦。

第四步:考查点P的叠加复振幅为 $d\tilde{E} = \tilde{E}_Q + \tilde{E}_C$ 。由于Q点是衍射孔径之内的任意一点,而中心点C是固定不动的。因此,当Q点在整个衍射孔中变化时就会给出无穷多条光线,则其中的任何一条都如第三步一样以过C点的光线为基础来表示相位。当Q点取完衍射孔径之内的所有位置后,总的叠加效果就是P点的总复振幅 $\tilde{E}$ 。在Q点取点过程中C点被多取了一次,也就是复振幅多表达了一次,所以需要去掉一次。由于是无穷多条光线的叠加,则这个总复振幅的表达式必须通过积分来获取,即

$$\begin{aligned}\tilde{E} &= \iint_{\Sigma} (d\tilde{E} - \tilde{E}_C) dx_1 dy_1 \\ &= \tilde{E}_0 \iint_{\Sigma} \exp[ik(x_1 l + y_1 m)] dx_1 dy_1.\end{aligned}$$

第五步:总复振幅的相位复共轭表达式为

$$\tilde{E}^* = \tilde{E}_0^* \left(\iint_{\Sigma} \exp[ik(lx_1 + my_1)] dx_1 dy_1 \right)^*$$

第六步:考查点P的总强度为

$$\begin{aligned}I &= \tilde{E} * \tilde{E}^* \\ &= I_0 \left(\iint_{\Sigma} \exp[ik(lx_1 + my_1)] dx_1 dy_1 \right) \\ &\quad \left(\iint_{\Sigma} \exp[ik(lx_1 + my_1)] dx_1 dy_1 \right)^*\end{aligned}$$

如果衍射孔是 $a \times b$ 大小的单矩形孔,即这个孔在 x_1 方向上的区域为 $[-0.5a, 0.5a]$, y_1 方向上的区域为 $[-0.5b, 0.5b]$ 。由积分知识可知,规则的矩形结构的面积分可以分解为两个相互垂直的矩形边长的线积分的乘积,因此总复振幅表达式可以改写为

$$\begin{aligned}\tilde{E} &= \tilde{E}_0 \iint_{\Sigma(a \times b)} \exp[ik(lx_1 + my_1)] dx_1 dy_1 \\ &= \tilde{E}_0 \int_{-0.5a}^{0.5a} \exp(iklx_1) dx_1 \int_{-0.5b}^{0.5b} \exp(ikmy_1) dy_1\end{aligned}$$

积分后为

$$\tilde{E} = \tilde{E}_0 ab \frac{\sin(0.5kal)}{0.5kal} \frac{\sin(0.5kbm)}{0.5kbm}$$

它的相位复共轭表达式分解为

$$\begin{aligned}\tilde{E}^* &= \tilde{E}_0^* \left[\iint_{\Sigma} \exp[ik(lx_1 + my_1)] dx_1 dy_1 \right]^* \\ &= \tilde{E}_0^* \left[\int_{-0.5a}^{0.5a} \exp(iklx_1) dx_1 \cdot \int_{-0.5b}^{0.5b} \exp(ikmy_1) dy_1 \right]^*\end{aligned}$$

积分后为

$$\tilde{E}^* = \tilde{E}_0^* ab \frac{\sin(0.5kal)}{0.5kal} \frac{\sin(0.5kbm)}{0.5kbm}.$$

最终,考查点P的总强度为

$$I = \tilde{E} * \tilde{E}^* = I_0 a^2 b^2 \left(\frac{\sin\alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin\beta}{\beta} \right)^2$$

其中, $\alpha = 0.5kal$, $\beta = 0.5kbm$ 。这个结果与教科书上的表达式一样,其中最主要的结论就是任何一个衍射孔都会构成自己独特的衍射光强分布。当这个衍射被作为整体考虑时,这个光强分布就可以认为是通过单孔的一条光束的总强度。这个总光强的开方结果可以看做是这个衍射孔的振幅。如果两个衍射孔并列使用,则可以认为是在单缝衍射基础上构成了双缝干涉,因此直接使用杨氏实验的结论处理即可。

2.3 巴比涅互补屏系统的强度求解六步法分析

巴比涅互补屏原理内容的引入使衍射知识的

理论和应用大为扩展,可以直接由孔衍射解决屏衍射问题。由原理可知,光波被一对互补屏 a 和 b 各自作用后,对于空间同一个点来说,屏 a 产生的复振幅和屏 b 产生的复振幅除了相位相差 π 以外,其他方面都一样。由此可知,我们在遇到屏衍射问题时,在应用强度求解六步法时要注意第二步在表达光路光程时,可以先依据其互补屏的孔衍射理论复制表示出一部分复振幅,然后再增加一个 π 相位项即可得屏衍射的全部复振幅。

例如,在求解一个矩形屏衍射后某点的强度时,首先得到矩形孔的复振幅,然后,在此基础上增加一个 π 相位,即 $\tilde{E} = \exp(i\pi)$ 得到矩形屏的复振幅,进而得到强度。

2.4 一个复杂习题的强度求解六步法解答

如图 4 所示,波长为 λ_0 的单色平行光波垂直入射到一个三缝衍射系统上,其中,缝宽分别为 a , a 和 $2a$,不透光部分分别为 $2a$ 和 $3a$,中间缝 2 上盖有一个能产生 π 相位变化的滤波片,系统所处环境的折射率为 n ,求狭缝系统后 P 点的夫琅禾费衍射强度分布。

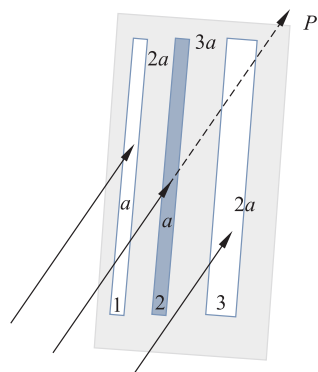


图 4 三缝衍射系统

解:本题是干涉和衍射混合的多光束叠加求强度问题,首先,单孔衍射已经告诉我们每个狭缝会单独产生衍射,形成一个单缝衍射的强度,因此每一条光路的振幅部分就是单缝衍射的振幅。其次,本题系统本质上就是杨氏双光束干涉叠加基础上再加一条光束进行叠加,因此,可以直接利用杨氏实验中双光束干涉叠加的相位差结果进行分析。根据“叠加强度求解六步法”,我们解题分析如下:

第一步:由于是平行光入射,则光源点 S 位于 $-\infty$ 处,考查点 P 点为图示点, $S \sim P$ 之间的光传播路径有三条,分别为 $S1P$ 、 $S2P$ 和 $S3P$ 。

第二步:以杨氏实验为基础,设第 1 狭缝的相位为 0,则第 2 狭缝增加了 δ_{21} ,由于第 2 狭缝上盖有能产生 π 相位变化的滤波片,所以,在第 1 狭缝基础上外加一个 π 相位后第 2 狭缝的光束相位表达式为 $\delta_{21} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} 3a \sin\theta + \pi$;第 3 狭缝相对于第 1 狭缝增加了 $\delta_{31} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} 7.5a \sin\theta$,其中 θ 和 $\sin\theta$ 的含义如前文。

第三步:以单缝衍射为基础,则第 1 狭缝的衍射振幅为 $A_1 = \tilde{E}_0 \left(\frac{\sin\alpha_1}{\alpha_1} \right)$,其中 $\alpha_1 = \frac{\pi n}{\lambda_0} a \sin\theta$;第 2 狭缝的衍射因子为 $A_2 = \tilde{E}_0 \left(\frac{\sin\alpha_2}{\alpha_2} \right)$,其中 $\alpha_2 = \frac{\pi n}{\lambda_0} a \sin\theta$;第 3 狭缝的衍射因子为 $A_3 = 2\tilde{E}_0 \left(\frac{\sin\alpha_3}{\alpha_3} \right)$,其中 $\alpha_3 = \frac{\pi n}{\lambda_0} 2a \sin\theta$ 。联合第二步,三条光路的复振幅表达式分别为 $\tilde{E}_1 = A_1 \exp[i0]$, $\tilde{E}_2 = A_2 \exp[i\delta_{21}]$, $\tilde{E}_3 = A_3 \exp[i\delta_{31}]$ 。由相位差表达式可知 $\delta_{21} = 6\alpha_1 + \pi$, $\delta_{31} = 15\alpha_1$ 。

第四步:考查点 P 的总复振幅为

$$\begin{aligned} \tilde{E} &= \tilde{E}_1 + \tilde{E}_2 + \tilde{E}_3 \\ &= A_1 + A_2 \exp[i\delta_{21}] + A_3 \exp[i\delta_{31}] \end{aligned}$$

第五步:总复振幅的相位共轭表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{E}^* &= (\tilde{E}_1 + \tilde{E}_2 + \tilde{E}_3)^* \\ &= A_1 + A_2 \exp[-i\delta_{21}] + A_3 \exp[-i\delta_{31}] \end{aligned}$$

第六步:考查点 P 的总强度

$$\begin{aligned} I &= \tilde{E} * \tilde{E}^* \\ &= |A_1|^2 + |A_2|^2 + |A_3|^2 + 2A_1A_2 \cos(\delta_{21}) + \\ &\quad 2A_1A_3 \cos(\delta_{31}) + 2A_3A_2 \cos(\delta_{31} - \delta_{21}) \end{aligned}$$

最后整理得

$$\begin{aligned} I &= \tilde{E} * \tilde{E}^* \\ &= I_0 \left(\frac{\sin\alpha_1}{\alpha_1} \right)^2 \left[2 + 4\cos^2\alpha_1 - 2\cos(6\alpha_1) - \right. \\ &\quad \left. 8\cos\alpha_1 \sin(12\alpha_1) \sin(3\alpha_1) \right], \end{aligned}$$

其中 $\alpha_1 = \frac{\pi n}{\lambda_0} a \sin\theta$ 。

3 结语

本文介绍了一套求解空间某一点处多光束叠加强度的程序化方法,即“叠加强度求解六步法”。

该方法可以解决光波经过各种干涉和衍射装置作用后多光束在空间某一点的叠加强度值,其中涵盖了叠加原理、干涉、衍射、互补屏和偏振等理论。在实际应用的干涉仪原理分析方面,本文六步法仍然适用,只要理清光源至观察点的光路数目以及其光程即可。

参 考 文 献

- [1] 沈常宇, 沈为民, 李晨霞, 等. 基于专业认证理念的光学原理课程教学改革[J]. 大学教育, 2022, 1: 13-16.
SHEN C H, SHEN W M, LI C X, et al. The teaching reform of the course of optical principle based on the idea of professional certification[J]. University Education, 2022, 1: 13-16. (in Chinese)
- [2] 姜悦, 吴官东. 基于迈克耳孙干涉仪与线阵 CCD 的金属丝杨氏模量测量方案[J]. 物理与工程, 2019, 29(4): 93-96.
JIANG Y, WU G D. A method of measuring Young's modulus of wire based on Michelson interferometer and linear CCD[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(4): 93-96. (in Chinese)
- [3] 谢子昂, 吴平, 张师平, 等. 光学相干断层扫描技术引入大学物理课堂教育浅析[J]. 物理与工程, 2021, 31(2): 93-99.
XIE Z A, WU P, ZHANG S P, et al. Brief analysis on introduction of optical coherence tomography into college physics education[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(2): 93-99. (in Chinese)
- [4] 周国全. 一种正三角形结构的双光束干涉装置[J]. 大学物理, 2021, 40(4): 22-39.
ZHOU G Q. A double-beam interference apparatus with a regular triangle structure[J]. College Physics, 2021, 40(4): 22-39. (in Chinese)
- [5] 施羿含, 罗海军, 张栋. 基于迈克耳孙干涉仪及双空气劈尖测量液体折射率[J]. 大学物理, 2021, 40(8): 78-80.
SHI Y H, LUO H J, ZHANG D. Measurement of liquid refractive index based on Michelson interferometer and double air wedge[J]. College Physics, 2021, 40(8): 78-80. (in Chinese)
- [6] BORN M, WOLF E. Principles of Optics[M]. New York: Pergamon Press, 1981.
- [7] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [8] 吕太国. 干涉和衍射的联系与区别[J]. 物理与工程, 2010, 20(1): 19-25.
LV T G. Connection and difference between interference and diffraction[J]. Physics and Engineering, 2010, 20(1): 19-25. (in Chinese)
- [9] 刘志国, 黄喜强, 张伶俐, 等. 关于“光的偏振”教学的一些尝试[J]. 物理与工程, 2020, 30(3): 84-88.
LIU Z G, HUANG X Q, ZHANG L L, et al. An attempt on teaching “polarization of light”[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(3): 84-88. (in Chinese)
- [10] 刘长菊, 丁豹, 谭玉彬, 等. 狭缝宽度对双缝后光场分布的影响[J]. 物理与工程, 2018, 28(6): 100-106.
LIU C J, DING B, TAN Y B, et al. The influence of slit width on light superpositions through double-slit studied by MATLAB[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(6): 100-106 (in Chinese)