

光栅衍射效率的理论计算及实验验证

黄 蕾

摘要: 本文给出了一组可用于计算任意光栅绝对衍射效率的积分方程。通过解这些方程给出了三类光栅的效率曲线: 红外光栅、可见光栅和掠入射光栅。本文还分析了光栅槽形顶角对光栅衍射效率的影响, 并研究了掠入射光栅槽形衍射面角的选择问题, 最后, 给出了一些计算效率值的实验结果。

一、前 言

衍射效率是衍射光栅的一个重要参数。目前, 国内还没有一整套较完整的计算光栅衍射效率的理论方法, 各光栅生产和研究单位只能参考工作中积累的经验及国外有关同类产品资料, 这就使有关光栅衍射效率的研究工作无法进行。本文在这方面进行了探讨, 计算出了一系列光栅绝对衍射效率理论曲线, 并给出了一些实验数据。

目前, 已有多种计算光栅衍射效率的方法, 其中以积分法应用最为广泛。所谓, 积分法就是指通过解一组积分方程来得到效率的理论值。即使是积分法, 也有各种不同形式的程分方程及数值解法。我们参考有关资料, 从电磁场方程出发, 利用边界条件推导出了一组积分方程, 同国外一些参考资料提到的方程形式完全一致, 方程形式如下:

$$E_{//} \text{时: } \frac{du^i}{dn} = -\frac{1}{2}\phi(x) + \int_0^a N(x, x') \phi(x') dx' \quad (1)$$

$$H_{//} \text{时: } -\frac{du^i}{dn} = \frac{1}{2}\phi(x) + \int_0^a N(x, x') \phi(x') dx \quad (2)$$

其中 $\frac{du^i}{dn} = -i[\beta_0 + k \sin \theta] f'(x) \exp[-i\beta_0 f(x)]$

k 为波数, $\beta_0 = \cos \theta$ θ 为定向角, d 为光栅常数

$$N(x, x') = \frac{1}{2d} \sum \{ [\text{sgn}(f(x) - f(x')) - \frac{\alpha_n}{\beta_n} f'(x)] \exp$$

$$[i\beta_n |f(x) - f(x')| + inK(x - x')]\}$$

由 (1)(2) 两式解出相应的 $\phi(x)$ 后, 得衍射场振幅:

$$B_n = \frac{1}{2id\beta_n} \int_0^a \exp[i\beta_n f(x) - inKx] \phi(x) dx$$

则第 n 级的绝对衍射效率 $e_n = |B_n|^2 \cos \theta_n / \cos \theta$

注: 本文作者的导师为张庆英

采用PMM法 (Point-matching method) 解上述微分方程, 本文编制了一个FORTRAN程序, 在IBM-PC 机上进行调试和计算, 得出了几类不同光栅的衍射效率理论曲线, 与国外资料介绍的结果及实验工作的结果基本一致。

二、可见波段光栅

在可见波段, 本文计算了闪耀波长分别在2537 Å和5461 Å线数为1200线/mm两种光栅的负1级效率曲线, 见图1、图2。此外, 在可见波段还计算了闪耀波长为5145 Å 600线/mm光栅的负5级效率曲线见图3。

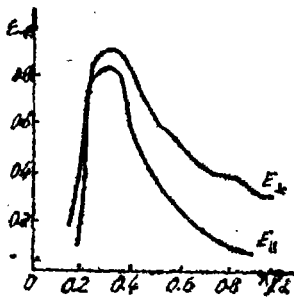


图1 1200线/mm的负1级效率曲线 $\lambda_B = 2537 \text{ \AA}$

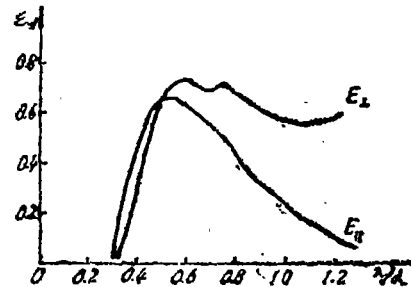


图2 1200线/mm的负1级效率曲线 $\lambda_B = 5461 \text{ \AA}$

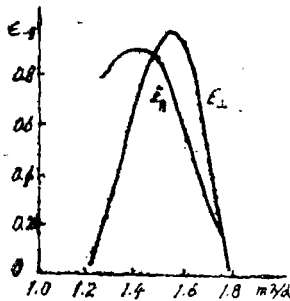


图3 600线/mm光栅负5级效率曲线

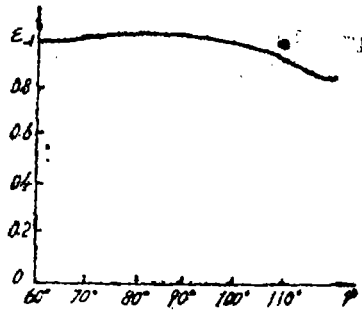


图4 槽形顶角 φ 对衍射效率的影响

三、红外波段光栅

在红外波段, 本文以闪耀波长在 $5.3 \mu\text{m}$ 的120线/mm光栅为例, 计算了刻划刀顶角 (也即为光栅槽形顶角 φ 对光栅闪耀效率的影响, 见图4。可以看出, φ 在 $70^\circ \sim 100^\circ$ 范围内时闪耀效率最佳。此外, 在红外波段, 我们还计算了常用的三种线数100线/mm, 120线/mm, 150线/mm三种光栅闪耀波长分别为 $5.3 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 的效率值, 这里只给出120线/mm的效率曲线见图5、图6。

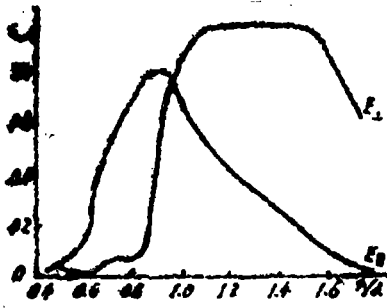


图5 120线/mm光栅效率
曲线 $\lambda_B = 5.3\mu\text{m}$

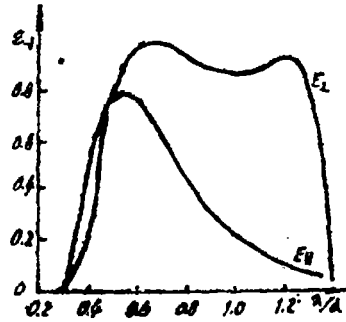


图6 120线/mm光栅效率
曲线 $\lambda_B = 10.6\mu\text{m}$

四、掠入射光栅

掠入射光栅的入射角在 $85^\circ \sim 90^\circ$ 范围内。掠入射光栅的槽形选择问题，在理论上一直未解决，在实际制造中，通常取光栅工作表面的法线为入射光线与某一级数衍射光线之间夹角的角平分线，如图7所示。针对这个问题，本文计算了1200线/mm、1800线/mm、2400线/mm三种光栅、闪耀波长为 5145\AA 、入射角为 85° 时，衍射效率随光栅刻槽衍射面与光栅平面夹角 θ 的变化曲线见图8。

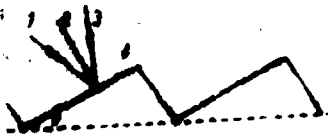


图7
1—入射光线 2—法线
3—衍射光线 4—衍射表面

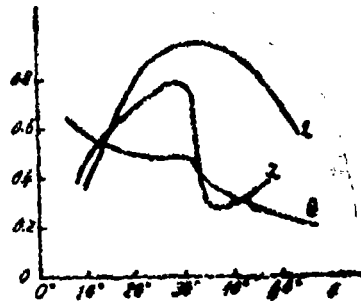


图8 效率随 θ 值变化曲线
1—2400线/mm 2—1800线/mm
3—1200线/mm

由图8可以看出2400线/mm光栅特性最佳。 θ 值对效率的影响是很大的，对2400线/mm、1800线/mm光栅来说 θ 取 30° 为最佳，对1800线/mm光栅 θ 值应取小些，图9给出了这三种光栅闪耀波长为 5145\AA ， θ 值分别为 30° 、 30° 和 10° 时效率随入射角 θ 的变化曲线。

受检测设备的限制，在此本文只能给出部分计算结果的实验测定值，见表1

理论效率值与实测值之间有一定的差别，这个差别是多种原因引起的，诸如理论模型中将光栅表面当成无限电导率表面，制造中产生的实际槽形与理论槽形的偏差等等。由上表可见，红外光栅的误差最小，非常接近实测值。

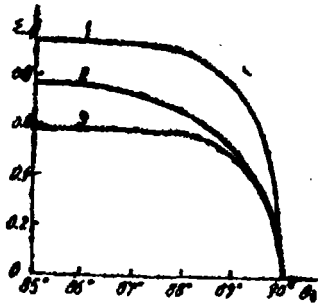


图9 掠入射光栅效率随入射角的变化

- 1—2400线/mm
- 2—1800线/mm
- 3—1200线/mm

表1 绝对衍射效率测定值与理论值比较

光栅类别	光栅线数	理论效率	实测效率
可见光栅	1200线/mm	88%	75%
红外光栅	100线/mm	98%	92%
	120线/mm	99.9%	95%
	150线/mm	99.8%	96%

综上所述，采用本文所述的积分方程及程序来计算光栅的衍射效率是完全可行的，这就为光栅衍射效率的研究提供了理论基础。

参 考 文 献

- [1] 郭硕洪，电动力学，人民教育出版社
- [2] R. Petit, Topics in Current Physics, 1980
- [3] E. G. Loewen, M. Neviere and D. Maystre, Appl. Opt., 1977, 16, No10
- [4] 祝绍箕等，衍射光栅，机械工业出版社

Theoretical Calculation of Diffraction Efficiency
of Gratings and Its Experimental Test

Huang Lei

Abstract

In this paper, we give a set of integral equations which can

be used to calculate diffraction efficiency of grating of any kind. By solving these equations, we give some efficiency curves of gratings of three kinds infrared, visible and grazing incidence gratings. Also, we analyze the influence of apex angle of grating figure and the choice of diffraction plan, angle of grazing incidence gratings. At the end of this paper, some of the experimental data are presented.