## 凹面光栅衍射效率测量值的影响因素及补偿方法研究

曹海霞<sup>1,2</sup>,巴音贺希格<sup>1\*</sup>,崔继承<sup>1,2</sup>,潘明忠<sup>1</sup>,陈少杰<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院长春光学机密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要通过仪器获得的凹面光栅的衍射效率是相对值,其测量值的精度受测量过程和补偿方法的影响。 为使效率测量值的测量精度得到进一步提高,有必要对测量值产生影响的主要因素进行深入研究。该文进一步考察了影响衍射效率测量精度的主要因素,针对待测凹面光栅根据待测波长的测试要求进行旋转造成光束截面变化而产生的问题,适当补充原理性方案,并在此基础上推导出了适用于凹面光栅的光束截面变化因子 k(0)的解析表达式。基于影响测量精度因素与理论值之间的非线性关系,提出采用二次非线性回归分析的方法对测量结果进行补偿,给出了提高衍射效率测量精度的补偿公式。实验结果表明,对光栅衍射效率的测量值进行进一步补偿后,使得补偿值与理论值之间的整体误差范围由±2.5%缩小为±0.3%以内,与线性回归分析方法相比,显著缩小了补偿值与理论值之间的差距,进一步保证了衍射效率的准确测量。将补偿过程嵌入测量程序,该方法能够实时补偿测量结果,满足仪器准确测量的要求。

关键词 凹面光栅;衍射效率;二次非线性回归分析 中图分类号:O433.4 文献标识码:A DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2013)11-3162-05

## 引 言

衍射光栅凭借其优异的性能已成为光谱仪器的核心分光 器件,使得光谱仪器在光谱分析、前沿交叉学科、社会民生 等领域都得到了广泛而深远的应用。1883年,Rowland发明 了兼具色散分光、聚焦和像差校正等综合功能的凹面光栅, 凹面光栅的出现,极大的促进了凹面光栅光谱仪器的发展。 光谱仪器中采用凹面光栅作为分光元件,光路结构简单,不 仅能够缩小仪器的体积,还能够提高仪器的光通量,符合光 谱仪器微型化和便携化的发展趋势<sup>[1-3]</sup>。随着凹面光栅在光 谱仪器应用领域中的重要性日益提高,人们对光栅的制造质 量提出了越来越高的要求,衍射效率作为光栅最重要的技术 指标之一,其检测技术的水平日渐成为人们最为关注的课题 之一。在实际测量中,主要是测量光栅的相对衍射效率,即 单色入射光根据待测波长的测试要求,在特定衍射级次的情 况下,探测器接收到的待测光栅的衍射光能量与一相同孔径 且具有相同镀层特性的参考反射镜的反射光能量之比<sup>[1-7]</sup>。 对光栅相对效率的测量原理<sup>[6]</sup>进行考察研究,发现影响效率 测量值准确性的因素主要有两个,首先是待测光栅对入射光 的色散作用导致出射光谱宽度发生变化;其次是待测光栅根 据待测波长的测试要求进行不同程度的旋转造成的光束截面 变化。上述两者均随着待测光栅的规格和入射波长的不同而 变化,这将必然导致测量结果的不准确,寇婕婷等<sup>[5]</sup>基于线 性回归分析的方法对测量结果进行了补偿,使误差范围控制 在±2.5%以内。本文通过对上述两个主要因素进行进一步 深入考察后,发现参考文献[5]的补偿结果仍有改进的空间。

本文主要做三方面工作:一是对测量原理进行详细分 析,对原理性方案做了适当补充并推导出凹面光栅光束截面 变化因子 k(0)的解析表达式;二是针对衍射效率测量精度影 响因素与理论值之间的非线性关系,提出采用二次非线性回 归分析的方法,建立提高测量精度的补偿公式;三是将补偿 过程嵌入测量程序,对待测光栅进行测量,得到的测量结果 验证了新补偿模型和补偿方法的有效性。

收稿日期: 2013-03-06, 修订日期: 2013-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(61108032),国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-1),中国科学院重大科研装备研制项目 (YZ200804),国家重大科学仪器设备开发专项(11YQ120023),吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)和吉林省科技发展计划 项目(20126012)资助

作者简介:曹海霞,女,1986年生,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: caohaixia132@163. com \*通讯联系人 e-mail: bayin888@sina. com

## 1 仪器工作原理

### 1.1 仪器及参数

凹面光栅衍射效率测试仪主要包括四个部分。其中光源 系统由氘灯和钨灯组成;前置单色器采用 Czerny-Turner 交 叉结构,在前置单色器的出射狭缝处连接光纤,通过光纤将 测量所需的单色光输入到测量单色器中;测量单色器由入 臂、放置待测凹面光栅或参考凹面反射镜的转台和出臂组 成;探测器接收待测光栅的衍射光能量和参考反射镜的反射 光能量。测量单色器中的电机精确控制转台的 3 个自由度 (方位、俯仰和滚转)来调整参考反射镜或待测光栅的位置; 光纤输出端安装在入射光臂上,探测器安装在出射光臂上。 为了满足不同规格凹面光栅衍射效率的测量,光纤输出端可 以在入臂上移动,探测器可以沿着出臂移动。仪器的主要结 构参数如下<sup>[5]</sup>:

光纤芯的直径为 0.44 mm;前置单色器中分光光栅的刻 线密度为 1 200 line • mm<sup>-1</sup>,反射镜焦距为 100 mm,出入臂 夹角为  $45^{\circ}$ ,光谱带宽为 6 nm;测量单色器中可放置待测凹 面光栅面积的范围是 15 mm×15 mm~110 mm×110 mm, 待测凹面光栅曲率半径范围是 130 mm~640 mm。

#### 1.2 原理性方案的补充

光栅的绝对衍射效率  $\eta'(\lambda)$  可以表示为:  $\eta'(\lambda) = E_{gd}(\lambda, k)/E_{gi}(\lambda)$ , 参考反射镜反射率  $r(\lambda)$  可以表示为

 $r(\lambda) = E_{rr}(\lambda)/E_{ri}(\lambda)$ 

式中, $E_{gi}(\lambda)$ 和 $E_{gd}(\lambda,R)$ 分别为光栅在波长为 $\lambda$ 的入射光的 光能量和波长为 $\lambda$ 的第k级衍射光的光能量, $E_{ri}(\lambda)$ 和 $E_{rr}(\lambda)$ 分别为参考反射镜在波长为 $\lambda$ 的入射光的光能量和反射光的 光能量<sup>[6]</sup>。定义光栅的相对衍射效率时默认 $E_{ri}(\lambda) = E_{gi}(\lambda)$ ,所以光栅的相对衍射效率 $\eta(\lambda)$ 表达式可以表示为<sup>[9]</sup>

## $\eta(\lambda) = \eta'(\lambda)/r(\lambda)$

根据上述分析并结合测量过程,发现在测量单色器中测 量待测凹面光栅时,光栅需根据入射波长的变化进行不同程 度的旋转,从而造成入射光束截面与衍射光束截面均发生变 化,导致 $E_{ri} \neq E_{gi}$ , $E_{rr} \neq E_{gd}$ ;测量参考凹面反射镜时,不存 在光束截面变化的问题。因此,在满足光栅效率原有原理性 方案<sup>[6]</sup>的同时,需对原理性方案进行适当补充,即在测量过 程中也要对待测光栅根据待测波长的测试要求进行旋转造成 的入射光束截面变化对测量结果产生的影响进行考虑。由此 得出,待测凹面光栅光束截面变化因子包括两部分。

## 2 影响因素分析与补偿算法

对测试仪的测量过程进行分析并结合实验验证,发现测 量单色器中的待测凹面光栅对具有一定带宽的单色光有色散 作用,因此输出的衍射光束的光谱宽度会发生变化;同时, 当测量单色器中控制方位的电机根据入射波长调整光栅转台 的方位时,待测凹面光栅的入射光束截面与衍射光束截面均 随之发生变化;而参考凹面反射镜不存在光谱宽度和光束截 面变化的情况。因此,有必要对上述两方面引入的误差进行 进一步研究分析<sup>[5]</sup>。

2.1 光栅色散产生的光谱增宽

对待测凹面光栅进行效率测量时,其入射光线与衍射光 线之间的夹角为固定值,此固定角称为偏离角<sup>[8]</sup>,  $\phi \gamma 表示$ 为偏离角。根据待测光栅的设计使用参数,旋转出臂实现偏 离角的设置。通过转台 3 个自由度的调整实现待测光栅不同 波长处衍射效率的测量。结合仪器的光路特点,在测量单色 器中,根据光栅方程得出波长  $\lambda$  与光栅衍射角  $\beta$  的对应关系 式为<sup>[9,10]</sup>

$$m\lambda = 2d\cos\frac{\gamma}{2}\sin\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) \tag{1}$$

式中, *d* 为光栅常数, *m* 为衍射级次。对于凹面光栅衍射效 率测试仪, 衍射级次取-1级。

根据线色散的定义,可以得出由待测凹面光栅色散造成 的出射光谱增宽宽度 △∞ 为

$$\Delta w = f \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{f \Delta \lambda}{d \cos \beta} \tag{2}$$

式中,f为出臂长度, $\Delta\lambda$ 为前置单色器的输出带宽。 2.2 光束截面变化分析

图 1 为参考凹面反射镜与待测凹面光栅的光束截面示意 图。设入射光束截面变化因子与衍射光束截面变化因子分别 为 $k_1(\theta) = k_2(\theta)$ ,两者合并称之为光束截面因子。如图 1(a) 所示, $A_{ri} = A_{rr}$ 分别为参考凹面反射镜的入射光束截面与反 射光束截面;如图 1(b)所示, $A_{st} = A_{sd}$ 分别为待测凹面光栅 的入射光束截面与衍射光束截面。对于反射镜来讲, $A_{ri} = A_{rr} = A_{r}$ ,则 $k_1(\theta) = A_{sd}/A_r$ , $k_2(\theta) = A_{sd}/A_r$ 。



Fig 1 The Schematic of beam cross-section (a): Beam cross-section of reference concave reflector; (b): Beam cross-section of testing concave grating

如图 1 所示, W 代表参考凹面反射镜及待测凹面光栅的 宽度,角度根据符号准则<sup>[11]</sup>进行标注。由图 1 可以发现在测 量单色器中测量参考凹面反射镜时,反射镜不需要旋转,不 存在光束截面变化的问题;而在测量待测凹面光栅的过程 中,光栅需根据待测波长的测试要求进行不同程度的旋转, 从而导致入射光束截面及衍射光束截面均发生变化。参考文 献[5]为简化起见,对光束截面变化因子的解析表达式进行 推导时只对待测光栅旋转造成的入射光束截面的变化进行了 考虑,未对衍射光束截面变化对测量值产生的影响进行考 虑,理论研究方面考虑不够完善,因此参考文献[5]给出的 补偿模型尚不完善,其补偿结果仍有改进的空间。为进一步 保证衍射效率的准确测量,分析测试仪的光路结构结合光栅 方程式(1),推导得到光束截面变化因子 k(θ)的完整解析表 达式为

$$k(\theta) = k_2(\theta)/k_1(\theta) = \cos(-\beta)/\cos(\beta - \gamma)$$
(3)

根据式(3)并结合式(1),得到光束截面变化因子  $k(\theta)$ 关于  $\lambda$ 和 d 的关系表达式如下所示

$$k(\theta) = \cos\left(-\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d\cos(\gamma/2)}\right) + \frac{\gamma}{2}\right) \Big|$$
$$\cos\left(-\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d\cos(\gamma/2)}\right) - \frac{\gamma}{2}\right)$$
(4)

2.3 补偿算法

回归分析是一种通过揭示变量之间的内在关系来反映某 种规律的数学分析方法,从而确定变量之间的数学表达 式<sup>[12]</sup>。

以Ⅳ型单色器凹面光栅为例,对参考文献[5]建立的模型进行改进。用自变量 x1 代表出射光谱增宽宽度,自变量 x2 代表测量值与光束截面变化因子的比值,因变量 y 代表 理论值。经过计算可以得出,y 与 x1 和 x2 表现为非线性关系,因此采用可以准确估计一个因变量与两个自变量之间关系的二次非线性回归分析的方法对测量结果进行补偿。

根据上述分析,建立二次非线性回归分析的补偿模型为

 $\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^2 + \beta_3 x_2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2$ (5) **其中**,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ , ...,  $\beta_5$  **是系数**  $\beta$  的最小二乘估计。

在得到自变量的 N 组实验数据之后, j = 1, 2, ..., N, 将数据表示为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{11}^{21} & x_{11}x_{12} & x_{12} & x_{12}^{2} \\ x_{21} & x_{21}^{2} & x_{21}x_{22} & x_{22} & x_{22}^{2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N1}^{2} & x_{N1}x_{N2} & x_{N2} & x_{N2}^{2} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_{1} \\ y_{2} \\ \vdots \\ y_{N} \end{bmatrix}$$
$$\Leftrightarrow \overline{X} = [\overline{x_{1}} \quad \overline{x_{2}}]^{\mathsf{T}}, \quad \overline{Y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} y_{j}, \quad \mathbf{\sharp} \mathbf{p} \quad \overline{x_{1}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_{j1}, \quad \overline{x_{2}} \end{bmatrix}$$
$$= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_{j2} .$$
$$\mathbf{5} \mathbf{R} \mathbf{4} \mathbf{4} \mathbf{N} \mathbf{p} \mathbf{0} \mathbf{6} \mathbf{\mathbf{F}} \mathbf{F} \mathbf{A}$$
$$\beta_{m} = (X^{\mathsf{T}} Y - N \overline{X} \overline{Y}) / (X^{\mathsf{T}} X - N \overline{X} \overline{X}^{\mathsf{T}}),$$
$$\beta_{0} = \overline{Y} - \overline{X}^{\mathsf{T}} \beta_{m} \qquad (6)$$
$$\beta_{m} = [\beta_{1} \quad \beta_{2} \quad \cdots \quad \beta_{5}],$$

3.1 数据处理

设 $M_0$ 为待测凹面光栅衍射效率的测量值,当待测光栅 一定时, $k(\theta)$ 和 $\Delta w$ 均随入射波长变化, $k_0(\theta)$ 为文献[5]计 算的光束截面变化因子,M为利用衍射效率计算软件得到的 对应波长的理论值。

 $eta = egin{bmatrix} eta_0 & eta_1 & \cdots & eta_5 \end{bmatrix}$ 

Ⅳ型单色器凹面光栅的刻线密度为 1 200 l・mm<sup>-1</sup>,入 臂长度为 200 mm、出臂长度为 188 mm、偏离角为 61. 6°。通 过仪器测量得到待测光栅在波长范围为 200~400 nm 的效率 测量值<sup>[5]</sup>,数据结果整理如表 1 所示。

Table 1	List of	data for	· testing	concave	grating
---------	---------	----------	-----------	---------	---------

$\lambda/nm$	$k_0(\theta)$	$k(\theta)$	$\Delta w/\mathrm{mm}$	$M_0$	М	$\lambda/\mathrm{nm}$	$k_0(\theta)$	$k(\theta)$	$\Delta w/\mathrm{mm}$	$M_0$	М
200	1.0734	0.844 8	1.7376	0.4054	0.4611	320	1. 107 9	0.7595	1.8728	0.3859	0.4301
220	1.0797	0.8303	1.7578	0.3892	0.4412	340	1. 112 9	0.7456	1.8991	0.4491	0.4702
240	1. 085 7	0.8159	1.7788	0.4269	0.4811	360	1. 117 7	0.7318	1.926 6	0.4257	0.4501
260	1.0916	0.8016	1. 800 8	0.4706	0.5211	380	1. 122 3	0.7180	1.9554	0.4230	0.4471
280	1.0972	0.7875	1.8237	0.4972	0.5310	400	1. 126 7	0.7043	1.9857	0.3833	0.4307
300	1. 102 7	0.7734	1.8477	0.4548	0.486 6						

从表1的数据可以看出,与k(0)相比,k<sub>0</sub>(0)在数值上偏 大,这是因为文献[5]没有考虑衍射光束截面的变化。测量 参考反射镜的过程中,不存在光谱宽度和光束截面变化的问 题,反射光能量没有损失。在测量待测凹面光栅的过程时, 光栅需根据待测波长的测试要求进行不同程度的旋转,出射 光谱宽度和光束截面均发生变化,导致部分入射光能量和衍 射光能量的损失,从而使得待测凹面光栅衍射效率的测量值 比对应的理论值偏低。

3.2 补偿测量结果

根据表1的实验数据,利用建立的二次非线性回归模型,得出补偿公式如式(7)所示

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \Delta w + \beta_2 (\Delta w)^2 + \beta_3 M_0 \times \frac{1}{k(\theta)} + \beta_4 \left( M_0 \times \frac{1}{k(\theta)} \right)^2 + \beta_5 M_0 \times \frac{1}{k(\theta)} \times \Delta w$$
(7)

根据式(6)得到二次非线性回归分析的补偿系数  $\beta_{\mathbb{N}} = \begin{bmatrix} 3 & 061 & 1 & 7 & 112 & 6 & -0 & 650 & 7 & -3 & 112 & 3 \\ & -4 & 660 & 6 & 1 & 600 & 3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$  把补偿系数带入式(7),得到测量结果的补偿值,此补 偿系数适用于同种规格凹面光栅效率测量值的补偿,其他规 格凹面光栅的补偿过程及补偿系数在此就不再赘述。将式 (2)、式(4)、式(6)和式(7)嵌入测试仪的测量程序中,在测 量过程中自动补偿由于出射光谱宽度和光束截面发生变化带 来的误差。

#### 3.3 结果比对

使用本仪器对 IV 型单色器凹面光栅进行测量,得到其效 率测量值;记录该待测凹面光栅的基本参数,如刻线密度、 闪耀波长、入臂长度、出臂长度、偏离角和待测波长范围等, 计算对应的自变量 x<sub>1</sub> 和自变量 x<sub>2</sub>,根据补偿系数 β 直接获 得补偿值;对待测凹面光栅的槽形进行检测,根据槽形剖面 图拟合槽形函数,利用相应软件计算得到待测光栅相对衍射 效率的理论值<sup>[13,14]</sup>。将其测量值、理论值和补偿值三者进行 比较,结果如图 2 所示。



for testing concave grating

由图 2 的数据对比结果可以看出,未经补偿的光栅衍射 效率的测量值与理论值的效率趋势基本一致,但数值上存在 偏差,个别波长处差别较大,不能准确反应待测凹面光栅的 性能指标。将补偿前后的待测光栅衍射效率进行比较,其对 应波长的偏差列于表 2。△ I 代表对应波长的理论值与测量 值之差,△II 代表理论值与采用参考文献[5]所述方法补偿的 测量结果之差,△III 代表理论值与本文方法补偿的测量结果

#### References

- [1] PAN Ming-zhong, LIU Yu-juan, CHEN Shao-jie, et al(潘明忠, 刘玉娟, 陈少杰, 等). Optics and Precision Engineering(光学 精密工程), 2012, 20(8): 1725.
- [2] TANG Yu-guo, SONG Nan, Bayanheshig, et al(唐玉国,宋 楠,巴音贺希格,等). Optics and Precision Engineering(光学 精密工程), 2010, 18(9): 1989.
- [3] KONG Peng, Bayanheshig, LI Wen-hao, et al(孔 鹏,巴音贺希格,李文昊,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(2): 0205001.
- [4] ZHU Shao-ji, ZOU Hai-xing, BAO Xue-cheng, et al(祝绍箕, 邹海兴, 包学诚, 等). Diffraction Grating(衍射光栅). Beijing: China Machine Press(北京: 机械工业出版社), 1986. 35.
- [5] KOU Jie-ting, WU Na, Bayanheshig, et al(寇婕婷,吴 娜,巴音贺希格,等). Optics and Precision Engineering(光学 精密工程), 2012, 20(6): 1225.
- [6] Bayanheshig(巴音贺希格). Graduate University of Chinese Academy of Sciences(中国科学院研究生院), 2004. 144.
- [7] KOU Jie-ting, Bayanheshig, TANG Yu-guo, et al(寇婕婷,巴音贺希格,唐玉国,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(7):

#### 之差。

从表 2 的对比数据可以看出,对于 IV 型单色器凹面光 栅,在波长 200 nm 处衍射效率的理论值与测量值之间的偏 差可达 5.57%,参考文献[5]的补偿结果可以使误差整体控 制在±2.5%以内,本文采用完善的光束截面变化因子,结 合二次非线性回归分析的数学方法对测量结果进行补偿,能 够使理论值与补偿值之间的误差整体控制在±0.3%以内, 保证了衍射效率的准确测量。

Table 2	List of	deviation	contrast	for	testing	concave	grating
				· · · ·	ee.seining	concare	

$\lambda/\mathrm{nm}$	$\Delta\mathrm{I}$ / %	$\Delta \parallel / \%$	$\Delta  \mathrm{I\!I\!I}  /  \%$
200	5.57	0.83	-0.15
220	5. 2	1. 29	0.13
240	5.42	-0.23	0.01
260	5.05	-0.88	0.23
280	3. 38	-0.34	-0.06
300	3. 18	0.07	-0.23
320	4.42	-0.38	0.02
340	2.11	0.49	0.06
360	2.44	0.08	-0.10
380	2.41	-0.40	0.15
400	4.74	-2.00	-0.05

## 4 结 论

为了提高测试仪的整机性能,本文对光栅衍射效率的测 量原理进行进一步研究,针对待测凹面光栅根据待测波长的 测试要求进行旋转造成光束截面变化而产生的问题,对原理 性方案做了适当补充。通过对凹面光栅衍射效率的测量过程 详细考察,给出了关于光谱宽度增宽及光束截面变化因子的 补偿模型并结合影响仪器测量精度的因素建立了补偿测量结 果的公式。由于理论值与自定义的两个变量之间表现为非线 性关系,因此采用二次非线性回归方法对测量结果进行补 偿,补偿之后使补偿值与理论值之间的误差范围由±2.5% 缩小为±0.3%以内,与线性回归分析的补偿结果相比,可 以提高测量值的测量精度,利于提升凹面光栅衍射效率测试 仪的整机性能。 0705002.

- [8] ZHANG Shan-wen, Bayanheshig(张善文,巴音贺希格). Optics and Precision Engineering(光学 精密工程), 2009, 17(5): 990.
- [9] LI Quan-chen, JIANG Yue-juan(李全臣, 蒋月娟). The Theory of Spectrometer(光谱仪器原理). Beijing: Beijing Institute of Technology Press(北京:北京理工大学出版社), 1999. 115.
- [10] WU Guo-an(吴国安). Design of Optical Spectrometer(光谱仪器设计). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 1978. 101.
- [11] KONG Peng(孔 鹏). Graduate University of Chinese Academy of Sciences(中国科学院研究生院), 2011, 24.
- [12] LI Ning, YANG Ci-yin, CAO Li-hua, et al(李 宁,杨词银,曹立华,等). Optics and Precision Engineering(光学 精密工程), 2011, 19 (10): 2319.
- [13] XU Xiang-dong, LIU Zheng-kun, QIU Ke-qiang, et al(徐向东,刘正坤,邱克强,等). Optics and Precision Engineering(光学 精密工程), 2012, 20(1): 1.
- [14] ZHU Hong-chun, Bayanheshig(朱洪春,巴音贺希格). Acta Optica Sinica(光学学报), 2007, 27(7): 1151.

# **Research on Influencing Factors and Compensation Method of Testing Results for Concave Gratings Diffraction Efficiency**

CAO Hai-xia<sup>1, 2</sup>, Bayanheshig<sup>1\*</sup>, CUI Ji-cheng<sup>1, 2</sup>, PAN Ming-zhong<sup>1</sup>, CHEN Shao-jie<sup>1, 2</sup>

- 1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
- 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The present paper aimed at the question that the beam cross-section changes according to the rotation of concave grating during the measuring process, and the appropriate supplement to the principle of the program was done. The appropriate supplement to the principle lay the foundation for the derivation of the beam cross-section  $k(\theta)$ , and the whole analytical expression of changes factor of the beam cross-section  $k(\theta)$  for concave grating was derived. Because of the relationship between the theoretical values and the factors which affect the diffraction efficiency measuring accuracy was nonlinear, the quadratic nonlinear regression analysis was introduced and the compensating formula was established. The results show further correction to diffraction efficiency measurements for concave grating, the range of differences between the compensated values and the quadratic nonlinear regression analysis significantly reduces the variation between the compensated values and the quadratic nonlinear regression analysis significantly reduces the variation between the compensated values and the theoretical values was reduced from  $\pm 2$ . 5% to less than  $\pm 0$ . 3%, compared with the linear regression analysis, and the quadratic nonlinear regression analysis significantly reduces the variation between the compensated values and the theoretical values, which further ensures the accurate measurement of the diffraction efficiency for concave gratings. The compensating process is embedded in the measurement program; this method is strongly real-time, which can satisfy the requirements of simple operation, testing speediness and preciseness.

Keywords Concave gratings; Diffraction efficiency; Quadratic nonlinear regression analysis

(Received Mar. 6, 2013; accepted May 28, 2013)

\* Corresponding author