

基于梁弯曲理论的聚焦镜压弯技术研究

朱丽娟^{1,2} 薛松¹ 卢启鹏¹ 彭忠琦¹

(¹ 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

(² 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

Research of bending of focusing mirror base on elastic bending of beams

ZHU Li - juan^{1,2}, XUE Song¹, LU Qi - peng¹, PENG Zhong - qi¹

(¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(²Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

【摘要】分析了通过压弯技术实现聚焦镜的基本原理,该技术以梁的弹性弯曲变形理论为基础,通过对基底施加力偶矩,获得各种聚焦镜。建立了柱面镜、超环面镜和椭圆柱面镜的压弯力学模型。利用有限元方法对超环面镜的压弯力学模型进行分析。

关键词: 聚焦镜; 压弯技术; 有限元

【Abstract】The theory of the fabrication of focusing mirror by bending was considered. It based on the theory of elastic bending of beam. The focusing mirror was obtained by applying a suitable combination of end couples on the strip. The mechanical modelings of cylinder mirror, toroidal mirror and elliptical cylinder mirror were given. The modeling of toroidal mirror was analyzed by finite element analysis method.

Key words: Focusing mirror; Bending; Finite element analysis

中图分类号: TH122 文献标识码: A

1 引言

光束是同步辐射装置的重要组成部分,它的主要作用是对同步光进行准直、聚焦、单色化等一系列处理,使其满足各项实验的要求。光束的光学系统主要由准直镜、前置聚焦镜、单色器和后置聚焦镜组成,聚焦镜是光束线的重要组成部分。大多数的同步辐射实验,样品与光源的距离在 10 米以上,在这样一个距离范围内,即使光源的发散角很小,从光源射出的光束到达样品时,光束的横截面也会变得很大,造成辐射光通量的浪费。聚焦镜的主要作用就是用来缩小光斑,增加光子密度,使光束能够被下游的光学元件很好地接收,减少辐射光通量的浪费。聚焦镜的实现是光束线技术的关键之一。

2 聚焦镜

图 1 是光束线的成像原理图。一束水平发散角为 α_h , 垂直发散角为 α_v 的同步光以掠入射角 θ_i 照在距离光源 p 的聚焦镜上,经过聚焦光束汇聚到距离镜子 q 的像点,光源和像点各位于椭球面的两个焦点上,若要获得与光源完全匹配的像斑,则聚焦镜表面形状须与所在位置的椭球面相同。考虑到加工难度与加工成本,常以圆柱面镜、超环面镜代替,对于聚焦精度要求较高的光束,可采用椭圆柱面聚焦镜。

柱面聚焦镜可以由平面镜压弯成型,易于实现,但它只能在一个方向上聚焦,一个点将被成像为一条直线,受像差影响大。

由两个互相垂直的柱面镜组成 Kirkpatrick - Baez 镜系统可以实现两个方向的同时聚焦。由柱面镜压弯成型的超环面镜,具有两个相互垂直的曲率半径,也可以实现两个方向的同时聚焦。椭圆柱面聚焦镜是非球面镜,受球差影响小,可以实现更高的聚焦精度。

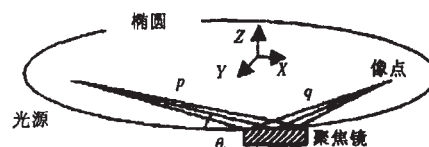


图 1 光束线成像原理图

Fig. 1 Image of beamlines

2.1 聚焦镜的面型参数

理想的聚焦镜应具有两个相互垂直的聚焦半径,能够在两个方向同时聚焦。聚焦镜中心两个方向的曲率半径^[2]为:

$$R_1 = \frac{2p}{\left(1 + \frac{1}{M}\right) \sin \theta_i} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{2p}{1 + \frac{1}{M}} \sin \theta_i \quad (2)$$

其中: θ_i 为掠入射角, p 为物距, M 为聚焦镜放大率。 p 和 M 越大, R_1 和 R_2 就越大, θ_i 越大, R_1 越小, R_2 越大。当光线垂

直入射时, R_1 和 R_2 相等, 聚焦镜可采用球面镜, 由于材料对短波段光线的强烈吸收, 光束线上的聚焦镜一般工作在掠入射角很小的条件下, R_1 远大于 R_2 。

要将从光源发出的光尽可能多地聚焦到像点, 聚焦镜的长度应不小于光在镜面上的照射长度, 光在聚焦镜上的照射长度^[2]为:

$$L = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{M} \right) \frac{\alpha_h^2 p}{8\theta_i^2 + \alpha_h^2} + \frac{\alpha_v p}{\theta_i} \quad (3)$$

式中: α_h 和 α_v 为聚焦镜接收的同步光的水平发散角和垂直发散角。发散角越小, 物距越大, 照射长度越长, 所需镜子工作长度越长, 考虑各种误差的影响, 实际的镜子长度要比照射长度大得多。

2.2 聚焦镜的像差

根据赛德尔像差理论, 单色像差有: 球差、慧差、像散、场曲和畸变。光束线上的聚焦镜主要受到球差、慧差和像散的影响^[3]。聚焦镜的球差与照射长度、物距、像距、掠入射角及面形精度等有关。慧差与照射宽度、物距、像距、掠入射角、离焦量等有关。当聚焦镜的曲率半径满足 $R_2/R_1 = (\sin \theta_i)^2$ 时, 系统消像散, Kirkpatrick-Baez 镜系统、超环面镜和椭圆柱面镜中心点曲率半径能够满足这一条件, 非中心点的像散也很小, 产生的像散对实际结果的影响可以忽略。

3 光束线聚焦镜压弯技术

聚焦镜的长度一般在几百毫米以上, 采用研磨方式加工难度非常大, 同时加工成本也很高, 采用压弯技术相比之下更容易实现, 成本低, 压弯方向的半径可调节, 易于在线调试。特别是对于热载荷较大的前置系统可以比较方便的修正由于热变形产生的焦点移动。

3.1 聚焦镜压弯技术原理

压弯技术是一种以梁的弯曲变形理论为基础的聚焦镜成型技术。根据材料力学知识, 梁的挠曲线方程^[4]为:

$$EI(x) \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x) \quad (4)$$

式中, E 是梁的杨氏模量, I 是梁截面对中性轴的转动惯量, M 是镜子承受的弯矩, $\frac{d^2 y}{dx^2}$ 表示镜子压弯之后在 x 点处的曲率半径。设镜子变形曲线方程为 $y = f(x)$, 代入公式(4)得到:

$$Ef''(x) = \frac{M(x)}{I(x)} \quad (5)$$

任意曲面均可以写成幂级数形式, 令力矩和转动惯量沿着镜长方向变化就可以得到所需面型的聚焦镜。

3.2 柱面镜压弯原理

柱面镜压弯方向的曲率半径为常量, 另一方向曲率半径为无穷大。采用平面镜做基底, 如图 2 所示, 对长度为 L 、宽度为 w 、厚度为 t 的平面镜两端施加相等的力矩, $M(x) = M$, $I(x) = \frac{1}{12} wt^3$, 得到柱面镜的曲率半径为 $\frac{1}{\rho} = \frac{12M}{Ewt^3}$ 。柱面镜易于实现, 在精度要求不高时可以代替椭圆球面聚焦镜。

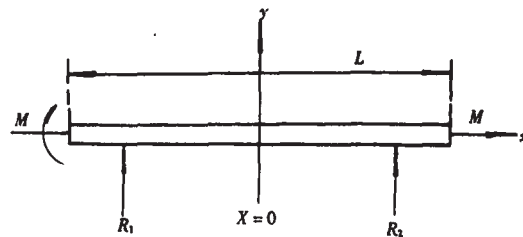


图 2 柱面镜压弯示意图

Fig. 2 Notation for discussing the bending of cylinder mirror

3.3 超环面聚焦镜的压弯

超环面镜具有两个互相垂直的曲率半径, 且两个方向半径均为常量。如图 3 所示, 采用柱面镜做基底, 柱面镜由研磨方法加工而成。对基底施加相等的力矩, 任意一点转动惯量 $I(x) = I(0) = I_0$, 力矩 $M(x) = M$, 得到超环面镜压弯方向的曲率半径为 $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_0}$ 。超环面镜可以对光线子午方向和弧矢方向同时聚焦, 产生的像散很小, 与柱面镜相比聚焦精度更高。



图 3 超环面镜压弯示意图

Fig. 3 Notation for discussing the bending of toroidal mirror

3.4 椭圆柱面聚焦镜的压弯

椭圆柱面镜压弯方向的曲率半径是沿着镜子长度方向变化的如图 4 所示, 椭圆柱面的方程及其曲率半径表示成级数形式为:

$$y = a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + \dots \quad (6)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = 2a_2 + 6a_3 x + 12a_4 x^2 + \dots \quad (7)$$

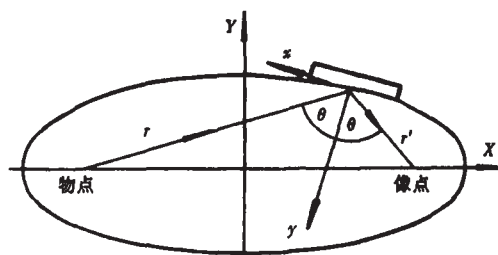


图 4 椭圆柱面镜的几何示意图

Fig. 4 Geometry and notations for the elliptical mirror

其中: a_i 为方程系数^[5]。将公式(7)代入公式(4), 得到:

$$E(2a_2 + 6a_3 x + 12a_4 x^2 + \dots) = \frac{M(x)}{I(x)} \quad (8)$$

采用变截面镜为基底, 使转动惯量随着 x 变化, 对基底施加不对称的力矩, 可以使压制结果与理论描述较精确地符合。令镜子的高度为常量, 则镜子的宽度变化方程应为:

$$b(x) = \frac{12}{Eh^3} \frac{M(x)}{2a_2 + 6a_3 x + 12a_4 x^2 + \dots} \quad (9)$$

若镜子的宽度为常量, 要得到椭圆柱面镜, 镜子的高度变化方程为:

$$h^3(x) = \frac{12}{Eb} \frac{M(x)}{2a_2 + 6a_3 x + 12a_4 x^2 + \dots} \quad (10)$$

基于 FLUENT 的离心吸纤维风机改进研究

徐志斌 李立人 张磊 姚新红(上海理工大学 动力学院, 上海 200093)

Optimization design in a centrifugal fan based on FLUENT

XU Zhi-bin, LI Li-ren, ZHANG Lei, YAO Xin-hong

(College of power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【摘要】某离心吸纤维风机存在着耗能大,效率不高,风压不均等问题。用 Pro/E 软件为该离心风机造型,应用 Fluent 软件进行三维数值模拟,详细得到风机内部流场情况。根据气动流场以及离心吸纤维通风机的特殊功用,进行优化设计,证明改进设计是成功的。提出了几点关于使用 Fluent 软件在设计计算中应注意的问题。对该类风机设计有良好的借鉴作用和现实意义。

关键词:离心风机;数值模拟;叶轮;Fluent;优化

【Abstract】There are not enough efficiency and uniform pressure in a centrifugal fan which consume the ability strongly. Pro/E software should be applied to draw the centrifugal fan. The interior flow of centrifugal fan was simulated by means of FLUENT software and the results of the numeric simulation were provided. According to the aerodynamic flow field and the special function of this centrifugal fan, the optimization design should be used. Moreover, several advice which should be take care were advised when applying CFD software. This paper can provide theory basis for the design and improvement of this fan.

Key words: Centrifugal fan; Numerical simulation; Blade; Fluent; Optimization

中图分类号:TH122 文献标识码:A

1 引言

离心通风机是目前应用十分广泛的一种气体输送机械设

备。目前我国的风机设计以及应用现状,对于风机的优化和节能设计的潜力巨大。传统风机设计是以实验为基础的设计,通过反复的设计计算和实验来确定最终设计改进方案,设计周期

★来稿日期 2006-04-23

3.5 超环面聚焦镜的压弯有限元分析

超环面镜镜基长 0.75m,宽 0.06m,高 0.05m,材料采用硅晶体。用梁单元 beam188 建立有限元模型,对模型进行结构静力学分析,得到的挠曲线(不考虑重力、温度等因素影响)如图 5 所示。



图 5 超环面镜挠曲线

Fig 5 Deformation of toroidal mirror

对结果进行采样,得到误差曲线如图 6 所示,所得压弯结果能够满足光束线的要求。

4 结论

对超环面镜压弯力学模型进行有限元分析,得到有限元分析结果与理论值的误差曲线,理想条件下误差小于 8nm,证明通过压弯技术实现的聚焦镜能够满足光束线的要求。

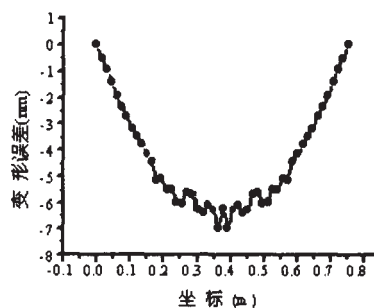


图 6 有限元分析结果与理论值的偏差

Fig 6 Deformation error between FEA and theoretical

参考文献

- 1 Koch EE, Eastman DE, Farge Y. Handbook of Synchrotron Radiation[M]. New York: North-Holland Publishing Company. 1983. 1~58.
- 2 Susini J. Design parameters for hard x-ray mirrors: the European Synchrotron Radiation Facility case[J]. Opt Eng. 1995. 34(2). 361~376.
- 3 Lai B, Cerrina F. Shadow: a synchrotron radiation ray tracing program[J]. Nucl. Instr. and Meth. 1986. A246: 337~341.
- 4 刘鸿文. 材料力学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社,1992:136~283.
- 5 Howells MR, Camble D, Duarte RM et al. Theory and practice of elliptically bent x-ray mirrors[J]. Opt Eng. 2000. 39(10): 2748~2762.