

大口径光学系统测试用双回转子孔径扫描装置设计与误差分析

赫英威¹ 李平² 冯国进² 王煜² 刘子龙² 郑春弟² 吴厚平² 李成² 沙定国¹

(¹北京理工大学光电学院, 北京 100081
²中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100013)

摘要 设计了一种新颖的双回转子孔径扫描装置,得到了可以覆盖大口径光学系统全口径的子孔径扫描光斑,从而满足了大口径光学系统光谱透射特性的测试需求。结合双回转扫描装置的结构参数误差,基于齐次坐标变换矩阵原理,建立了双回转扫描装置的数学模型,提出了一套分析子孔径扫描精度的方法,并且在设计双回转子孔径扫描装置中实现了应用。分析结果表明,当双回转子孔径扫描装置的回转半径 $\eta \leq 400$ mm 时,子孔径扫描精度 $\Delta\eta$ 为 $-0.007 \sim 0.028$ mm。提出的子孔径扫描误差估计方法、建立的扫描运动坐标转换模型和得到的误差数据结果可作为类似回转扫描机构的设计参考,也为基于双回转子孔径扫描方法的大口径光学系统光谱透射特性测试的深入研究提供了理论依据和数据基础。

关键词 光学测量;双回转子孔径扫描;齐次坐标变换矩阵;大口径光学系统;透射比

中图分类号 TB96 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0112004

Analysis of a Sub-Aperture Scanning Machine with Double-Rotating Arms for Large-Aperture Optical System Transmittance Measurements

He Yingwei¹ Li Ping² Feng Guojin² Wang Yu² Liu Zilong² Zheng Chundi²
Wu Houping² Li Cheng² Sha Dingguo¹

(¹School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
²Division of Metrology in Optics and Laser, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract For the purpose of large-aperture optical system spectral transmittance measurements, a novel double-rotating scanning machine with double-rotating arms (SSMDA) is designed. The sub-aperture scanning beam spot obtained from the SSMDA can cover full aperture of large optical system. By considering the structural parameters errors, mathematical models of the SSMDA based on homogeneous coordinate transformation matrixes are developed. A detailed methodology for analyzing the scanning errors $\Delta\eta$ is proposed and implemented in practical design process. The computational results of scanning errors $\Delta\eta$ carried out on the mathematical models are between -0.007 nm and 0.028 mm while scanning radius $\eta \leq 400.000$ mm. The proposed methodology, developed mathematical models and obtained computational results can be not only the design reference for similar machines but also the theoretical and data basis for large-aperture optical system spectral transmittance measurements based on double-rotating sub-aperture scanning method.

Key words optical measurement; double-rotating sub-aperture scanning; homogeneous coordinate transformation matrix; large-aperture optical system; transmittance

OCIS codes 120.0120; 120.3940; 120.7000

收稿日期: 2010-04-01; 收到修改稿日期: 2010-06-10

作者简介: 赫英威(1982—),男,博士研究生,主要从事精密测试与计量等方面的研究。E-mail: Jerryhe2008@yahoo.cn

导师简介: 沙定国(1943—),男,教授,博士生导师,主要从事近代光学与光电检测技术及仪器、光电信息传感与处理技术和精密测试与计量等方面的研究。E-mail: Shadingguo@bit.edu.cn

1 引 言

光学系统的透射比是指系统本身透射的光通量与入射的光通量之比,反映了光能量经过光学系统后损失的程度,和光学传递函数一样,是评价光学系统的一项重要指标^[1,2]。例如透射比较低时,对于目视光学系统,将使观察物体的主观亮度变小;对于成像光学系统,将意味着需要加长曝光时间,及系统信噪比的降低。尤其对于彩色还原要求高的系统,测试光学系统的光谱透射比显得尤为重要^[3]。

传统的光学系统透射比测试方法为:分别测试经过被测光学系统和未经过被测光学系统两种情况下准直光的辐射通量,将两次辐射通量做比即得到被测光学系统的透射比^[4]。传统的光学系统透射比测量装置一般采用点源平行光管作光源,在接收端用安装了光电探测器的积分球进行接收,如果要进行光谱透射比测试,还需要在光源处或接收器前使用单色仪进行分光来得到所对应的不同波长下的透射比^[5]。显然对于小型光学系统全口径透射比的测试,应用这套传统测试方法和装置是可行的。但对于作为天文观测、航天遥感尤其是军事装备等用途的大口径光学系统来说,这种传统的测试装置受到平行光管口径、接收积分球开口直径等诸多因素的限制,并不能满足光学系统口径日益增大的测试要求^[6~9]。针对这一需求,设计了一种新颖的双回转光路,与能够进行扫描运动的机械结构组成了一套双回转子孔径扫描装置(SSMDA),以子孔径方法在光度测量领域的应用为思路,找到了一种新的大口径光学系统透射特性测量方案。

本文讨论了双回转子孔径扫描装置的误差精度,它是保证大口径光学系统透射比测量精度的重要前提。基于齐次坐标转换矩阵原理,建立了双回转扫描装置的运动数学模型,提出了一套分析子孔径扫描精度的方法,并且在设计双回转子孔径扫描装置中实现了应用。

2 双回转子孔径扫描装置数学模型的建立

与图1中传统测量装置不同,双回转子孔径扫描装置的子孔径扫描光斑能够覆盖大口径光学系统全口径,如图2(a),(b)所示,探测装置接收出射光能量并对数据进行计算处理,如图2(c)所示。

双回转子孔径扫描装置如图3所示,主要由两部分组成:1)光学部分-反射镜M1~M4构成的光

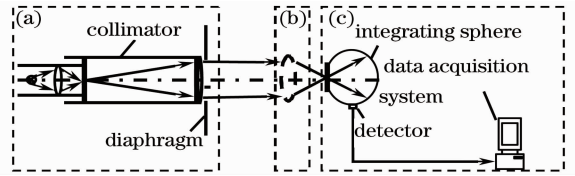


图1 传统光学系统透射比测量装置示意图。(a)光源,(b)被测光学系统,(c)探测及数据处理系统
Fig. 1 Schematic of traditional optical system transmittance measuring device. (a) light source, (b) optical system, (c) detection and data acquisition system

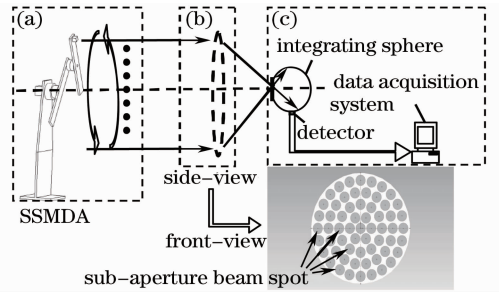


图2 大口径光学系统透射比测量装置示意图。(a)光源-双回转子孔径扫描装置,(b)大口径光学系统,(c)探测及数据处理系统
Fig. 2 Schematic of large aperture optical system transmittance measuring device. (a) light source—SSMDA (sub-aperture scanning machine with double-rotating arms), (b) large aperture optical system, (c) detection and data acquisition system

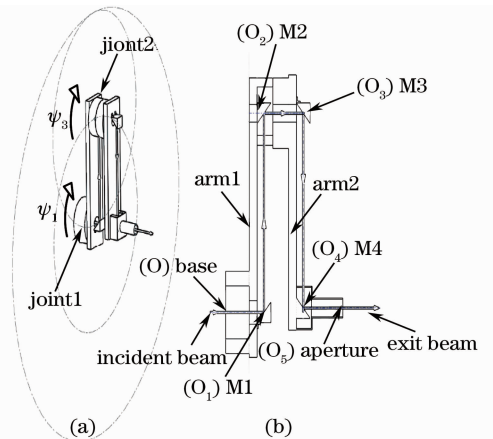


图3 双回转子孔径扫描装置图
Fig. 3 Sub-aperture scanning machine with double-rotating arms (SSMDA)

学反射光路和用于光束孔径调节的光阑;2)机械部分-装置基座,机械臂 arm1 和 arm2,由精密步进电机驱动的蜗轮蜗杆副构成的回转关节 joint1 和 joint2。这种双回转臂结构的特点在于结构紧凑,移动范围大,扫描速度快,易于控制和使用灵活^[10~15]。

双回转子孔径扫描装置的工作原理如图 3(b) 和图 4 所示,入射光束由基座端面中心入射,经反射镜 M1 至 M4 的光路转折后经可调光阑中心出射,出射光束方向与入射光束方向相同,在垂直于出射方向的平面上形成扫描光斑;机械臂 arm1 和 arm2 在回转关节 joint1 和 joint2 的驱动下改变扫描区域和扫描半径 η_r ,使光斑在扫描平面上进行不同半径圆域的子孔径扫描运动。

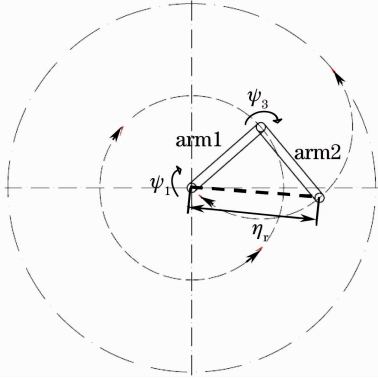


图 4 双回转子孔径扫描装置原理图
Fig. 4 Schematic of the SSMDA

在双回转子孔径扫描装置的构建和安装调试过程中,各结构参数是存在系统误差的。系统误差影响子孔径光斑在扫描平面上的坐标准确性即坐标偏差,总结坐标偏差的分布规律就能够得到双回转子孔径扫描装置的扫描精度。

参考图 3 中光路,在双回转子孔径扫描装置上建立如图 5 所示坐标系。基座坐标系 \sum 的原点 O 为入射光束与基座端面的交点;坐标系 $\sum_1, \sum_2, \sum_3, \sum_4$ 的原点 O_1, O_2, O_3, O_4 依次为光束与反射镜 M1, M2, M3, M4 的交点;坐标系 \sum_5 的原点 O_5 为出射光线与可调光阑端面的交点。

为了便于分析,假设扫描平面经过坐标系 \sum_5 的原点 O_5 。这样子孔径扫描光斑在基座坐标系 \sum 下的坐标即为坐标系 \sum_5 的原点 O_5 在基座坐标系 \sum 下的坐标 (x, y, z) ,其中 O 为坐标系 \sum 原点。

参看图 4, 5 和表 1, Γ_i 为转臂长; Γ 为点 O_4 到点 O_5 的距离,可理解为经反射镜 M4 反射后的出射光束到扫描平面的距离; ρ_i 为关节偏置量,即关节轴线在相邻两坐标系原点间的距离; ψ_i 为各关节转动角度。扫描半径 η_r 的误差由关节转动角度 ω_i 、转臂长 Γ_i 、关节偏置量 ρ_i 共同决定。分析出 ψ_i, Γ_i 和 ρ_i 的误差分布规律,就可以得到扫描半径 η_r 的误差分布规律。

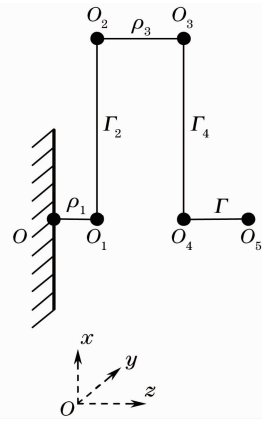


图 5 双回转子孔径扫描装置坐标系转换图

Fig. 5 Spatial coordinate transform of the SSMDA

表 1 双回转子孔径扫描装置坐标系转换矩阵各参数值
Table 1 Coordinate system transfer matrix parameters of the SSMDA

Coordinate \sum_i	Joint rotational angle $\psi_i/(\circ)$	Length of arms Γ_i/mm	Joint bias ρ_i/mm
1	ψ_1	/	ρ_1
2	/	Γ_2	/
3	ψ_3	/	ρ_3
4	/	Γ_4	/
5	/	Γ	/

根据以上参数建立扫描光斑在基座坐标系 \sum

下坐标 (x, y, z) 的公式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^4 \begin{bmatrix} \cos \psi_i & -\sin \psi_i & 0 & \Gamma_i \cos \psi_i \\ \sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 & \Gamma_i \sin \psi_i \\ 0 & 0 & 1 & \rho_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Gamma \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^4 \mathbf{T}_i \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Gamma \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{T}_i 为齐次坐标系转换矩阵^[16,17]。

双回转子孔径扫描装置的主要系统误差源可分为两类:1)长度量的系统误差 $\Delta\Gamma_2, \Delta\Gamma_4, \Delta\Gamma, \Delta\rho_1$ 和 $\Delta\rho_3$; 2)转动角度的系统误差 $\epsilon(\psi_1)$ 和 $\epsilon(\psi_3)$ 。首先,考虑第一类误差中 $\Delta\Gamma_i$ 和 $\Delta\Gamma$ 对扫描光斑坐标 (x, y, z) 的影响。结合(1)式和表 1 可得

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \Gamma_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \Gamma_2} \\ \frac{\partial z}{\partial \Gamma_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_1 \\ \sin \psi_1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

同理可得 $\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial y}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial z}{\partial \Gamma_4} \end{bmatrix}^T$ 和 $\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \Gamma} & \frac{\partial y}{\partial \Gamma} & \frac{\partial z}{\partial \Gamma} \end{bmatrix}^T$

的表达式。最后,可得长度参数 Γ_2, Γ_4 和 Γ 的精度方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_\Gamma \\ \Delta y_\Gamma \\ \Delta z_\Gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \Gamma_2} & \frac{\partial x}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial x}{\partial \Gamma} \\ \frac{\partial y}{\partial \Gamma_2} & \frac{\partial y}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial y}{\partial \Gamma} \\ \frac{\partial z}{\partial \Gamma_2} & \frac{\partial z}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial z}{\partial \Gamma} \end{bmatrix} [\Delta \Gamma_2 \quad \Delta \Gamma_4 \quad \Delta \Gamma]^T = \begin{bmatrix} \cos \psi_1 & \cos \psi_1 \cos \psi_3 - \sin \psi_1 \sin \psi_3 & 0 \\ \sin \psi_1 & \sin \psi_1 \cos \psi_3 + \cos \psi_1 \sin \psi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\Delta \Gamma_2 \quad \Delta \Gamma_4 \quad \Delta \Gamma]^T, \quad (3)$$

考虑到扫描装置的回转对称性,令

$$\begin{cases} \psi_1 \in [0, 2\pi) \\ \psi_3 \in [0, \pi] \end{cases}. \quad (4)$$

这样,根据长度量的系统误差值,就能按(3)式,

表 3 长度量系统误差对于光斑扫描坐标的影响

Table 3 Beam spot scanning coordinate errors due to the systematic errors of the length parameters

Values of the two angles $(\psi_1, \psi_3) / (^\circ)$	Normal coordinate $(x, y, z) / \text{mm}$	Coordinate errors $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) / \text{mm}$	Beam spot scanning coordinate errors $\Delta f_{\text{OH}_\Gamma} / \text{mm}$
(0,0)	(400.000,0.000,300.000)	(0.020,0.0.005)	0.019
(0,30)	(373.205,100.000,300.000)	(0.019,0.005,0.005)	0.018
(30,30)	(273.205, 273.205,300.000)	(0.014,0.014,0.005)	0.018
(30,60)	(173.205,300.000,300.000)	(0.009,0.015,0.005)	0.016
(60,60)	(0.205,346.410,300.000)	(0,0.017,0.005)	0.016
(60,90)	(-73.205,273.205,300.000)	(-0.004,0.014,0.005)	0.013
(90,90)	(-200.000,200.000,300.000)	(-0.010,0.010,0.005)	0.013
(90,120)	(-173.205,100.000,300.000)	(-0.009,0.005,0.005)	0.010
(120,120)	(-200.000,0.000,300.000)	(-0.010,0.000,0.005)	0.010
(120,150)	(-100.000,-26.794,300.000)	(-0.005,0.001,0.005)	0.006
(150,150)	(-73.205, -73.205,300.000)	(-0.004,0.004,0.005)	0.006
(150,180)	(0.000, 0.000,300.000)	(0.000,0.000,0.005)	0.005
(180,180)	(0.000,0.000,300.000)	(0.000,0.000,0.005)	0.005
(180,150)	(-26.794,-100.000,300.000)	(-0.001,-0.005,0.005)	0.006
(210,150)	(26.794, -100.000,300.000)	(0.001,-0.005,0.005)	0.006
(210,120)	(0.000,-200.000,300.000)	(0.000,-0.010,0.005)	0.010
(240,120)	(100.000,-173.205,300.000)	(0.005,-0.009,0.005)	0.010
(240,90)	(73.205,-273.205,300.000)	(-0.004,-0.014,0.005)	0.013
(270,90)	(200.000,-200.000,300.000)	(0.010,-0.010,0.005)	0.013
(270,60)	(173.205,-300.000,300.000)	(0.009,-0.015,0.005)	0.016
(300,60)	(300.000,-173.205,300.000)	(0.015,0.009,0.005)	0.016
(300,30)	(273.205,-273.205,300.000)	(0.014,-0.014,0.005)	0.018
(330,30)	(373.205,-100.000,300.000)	(0.019,-0.005,0.005)	0.018
(330, 0)	(346.410,-200.000,300.000)	(0.017,-0.010,0.005)	0.019
(360,0)	(400.000,0.000,300.000)	(0.020,0.000,0.005)	0.019

由表 3 可见,1)误差量 $\Delta \Gamma_2, \Delta \Gamma_4$ 和 $\Delta \Gamma$ 对光斑扫描坐标的影响各不相同;2)当 ψ_3 不变时,单一改变 ψ_1 值不会改变光斑扫描坐标偏差 $\Delta f_{\text{OH}_\Gamma}$ 。此时长

(4)式计算出扫描光斑坐标偏差为

$$\Delta f_{\text{OH}_\Gamma} = \frac{x \times \Delta x_\Gamma + y \times \Delta y_\Gamma + z \times \Delta z_\Gamma}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}. \quad (5)$$

表 2 列出了三个长度量误差源的系统误差值。

表 2 长度量误差源的系统误差值

Table 2 Systematic errors of the length parameters

Length parameter	Normal value /mm	Systematic error /mm
Γ_2	200	+0.01
Γ_4	200	+0.01
Γ	100	+0.005

任意选定 25 个双回转子孔径扫描装置的转动姿态,用(1)式计算理想条件下扫描光斑坐标,用(3)式计算误差影响条件下坐标偏差,用(5)式计算由于转臂长度的系统误差引起的光斑扫描坐标偏差,计算结果分别如表 3 所列。

度参数系统误差的影响为定值;3)当三个坐标系原点 O_1, O_4 和 O_5 在同一直线上时 $\Delta f_{\text{OH}_\Gamma}$ 最小。此时 $\Delta \Gamma_2$ 与 $\Delta \Gamma_4$ 的影响相互抵消,只有 $\Delta \Gamma$ 在影响

Δf_{OH_r} ; 4) 偏差坐标 Δz 不变, 这是因为在 z 轴方向上只受 $\Delta\Gamma$ 的影响。以上由数学模型算出的数据与实际情况相吻合, 说明这种分析方法可以作为继续深入研究的基础。

在双回转子孔径扫描装置中除了已经分析的三

个长度误差源之外, 还有误差源 $\psi_1, \psi_3, \rho_1, \rho_3$ 的影响。与分析长度误差源的方法相同, 可得 $\Delta\psi_i$ 和 $\Delta\rho_i$ 对光斑扫描坐标影响的公式, 考虑到表 1 中各参数量值, 由(1)式得

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \psi_1} \\ \frac{\partial y}{\partial \psi_1} \\ \frac{\partial z}{\partial \psi_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Gamma_4 (\cos \psi_1 \sin \psi_3 - \sin \psi_1 \cos \psi_3) - \Gamma_2 \sin \psi_1 \\ \Gamma_4 (\cos \psi_1 \cos \psi_3 - \sin \psi_1 \sin \psi_3) + \Gamma_2 \cos \psi_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \psi_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \psi_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \psi_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Gamma_4 (\cos \psi_1 \sin \psi_3 + \sin \psi_1 \cos \psi_3) \\ \Gamma_4 (\cos \psi_1 \cos \psi_3 - \sin \psi_1 \sin \psi_3) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

同理, $\left[\frac{\partial x}{\partial \rho_1} \quad \frac{\partial y}{\partial \rho_1} \quad \frac{\partial z}{\partial \rho_1}\right]^T = [0 \quad 0 \quad 1]^T$ 和 $\left[\frac{\partial x}{\partial \rho_3} \quad \frac{\partial y}{\partial \rho_3} \quad \frac{\partial z}{\partial \rho_3}\right]^T = [0 \quad 0 \quad 1]^T$, 结合(3)式可得

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \Gamma_2} & \frac{\partial x}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial x}{\partial \Gamma} & \frac{\partial x}{\partial \rho_1} & \frac{\partial x}{\partial \rho_3} & \frac{\partial x}{\partial \psi_1} & \frac{\partial x}{\partial \psi_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \Gamma_2} & \frac{\partial y}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial y}{\partial \Gamma} & \frac{\partial y}{\partial \rho_1} & \frac{\partial y}{\partial \rho_3} & \frac{\partial y}{\partial \psi_1} & \frac{\partial y}{\partial \psi_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \Gamma_2} & \frac{\partial z}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial z}{\partial \Gamma} & \frac{\partial z}{\partial \rho_1} & \frac{\partial z}{\partial \rho_3} & \frac{\partial z}{\partial \psi_1} & \frac{\partial z}{\partial \psi_3} \end{bmatrix} [\Delta\Gamma_2 \quad \Delta\Gamma_4 \quad \Delta\Gamma \quad \Delta\rho_1 \quad \Delta\rho_3 \quad \epsilon(\psi_1) \quad \epsilon(\psi_3)]^T. \quad (8)$$

这样光斑扫描坐标偏差量为

$$\Delta f_{\text{OH}} = \frac{x \times \Delta x + y \times \Delta y + z \times \Delta z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \frac{x \times \Delta x + y \times \Delta y + z \times \Delta z}{\sqrt{\eta_r^2 + z^2}}, \quad (9)$$

式中双回转子孔径扫描装置的扫描半径为

$$\eta_r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (10)$$

3 结构参数误差对双回转子孔径扫描装置精度的影响评估

从第 2 节分析可知, 双回转子孔径扫描装置的扫描半径 η_r 与基坐标系 \sum 的 z 轴方向为垂直关系, 扫描精度 $\Delta\eta_r$ 不受 z 轴方向上系统误差 $\Delta\rho_1$ 和 $\Delta\rho_3$ 的影响, 故可由(8)式得出

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \Gamma_2} & \frac{\partial x}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial x}{\partial \Gamma} & \frac{\partial x}{\partial \psi_1} & \frac{\partial x}{\partial \psi_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \Gamma_2} & \frac{\partial y}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial y}{\partial \Gamma} & \frac{\partial y}{\partial \psi_1} & \frac{\partial y}{\partial \psi_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \Gamma_2} & \frac{\partial z}{\partial \Gamma_4} & \frac{\partial z}{\partial \Gamma} & \frac{\partial z}{\partial \psi_1} & \frac{\partial z}{\partial \psi_3} \end{bmatrix} [\Delta\Gamma_2 \quad \Delta\Gamma_4 \quad \Delta\Gamma \quad \epsilon(\psi_1) \quad \epsilon(\psi_3)]^T =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \psi_1 & \cos \psi_1 \cos \psi_3 - \sin \psi_1 \sin \psi_3 & 0 & -\Gamma_4 (\cos \psi_1 \sin \psi_3 + \sin \psi_1 \cos \psi_3) - \Gamma_2 \sin \psi_1 & -\Gamma_4 (\cos \psi_1 \sin \psi_3 + \sin \psi_1 \cos \psi_3) \\ \sin \psi_1 & \sin \psi_1 \cos \psi_3 + \cos \psi_1 \sin \psi_3 & 0 & \Gamma_4 (\cos \psi_1 \cos \psi_3 - \sin \psi_1 \sin \psi_3) + \Gamma_2 \cos \psi_1 & \Gamma_4 (\cos \psi_1 \cos \psi_3 - \sin \psi_1 \sin \psi_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times$$

$$[\Delta\Gamma_2 \quad \Delta\Gamma_4 \quad \Delta\Gamma \quad \epsilon(\psi_1) \quad \epsilon(\psi_3)]^T. \quad (11)$$

扫描精度 $\Delta\eta_r$ 由(10)式可得

$$\Delta\eta_r = \frac{x \times \Delta x + y \times \Delta y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{x \times \Delta x + y \times \Delta y}{\eta_r} \quad (12)$$

结合图 4 和表 2 可得扫描半径 η_r 取值范围

$$\eta_r \in [0, \Gamma_2 + \Gamma_4] = [0.000, 400.000] \text{mm} \quad (13)$$

在选取精密步进电机驱动的蜗轮蜗杆副构成的回转关节时要考虑它们的系统误差对于 η_r 的影响。为能清晰看到关节 joint1 的系统误差对装置扫描精度 $\Delta\eta_r$ 的影响,假设 joint1 的系统误差为 $\epsilon(\psi_1) = 2.0 \times 10^{-4}$ rad,均不考虑系统误差 $\epsilon(\psi_3)$, $\Delta\Gamma_2$, $\Delta\Gamma_4$ 和 $\Delta\Gamma$ 。由(11),(12)和(13)式得数据如图 6 所示。

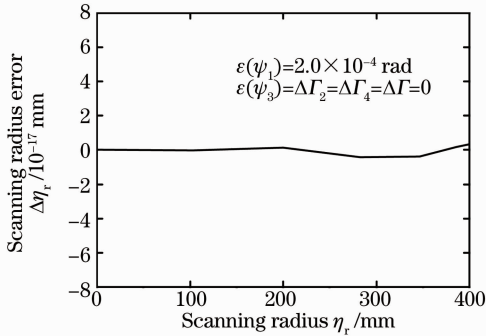


图 6 关节 joint1 误差 $\epsilon(\psi_1)$ 对于扫描精度 $\Delta\eta_r$ 影响
Fig. 6 Scanning radius errors $\Delta\eta_r$ due to the systematic errors $\epsilon(\psi_1)$ of joint1

同理,假设 joint2 的系统误差为 $\epsilon(\psi_3) = 2.0 \times 10^{-4}$ rad,均不考虑系统误差 $\epsilon(\psi_1)$, $\Delta\Gamma_2$, $\Delta\Gamma_4$ 和 $\Delta\Gamma$ 。由(11),(12)和(13)式可得关节 joint2 的系统误差 $\epsilon(\psi_3)$ 对装置扫描精度 $\Delta\eta_r$ 的影响,如图 7 所示。

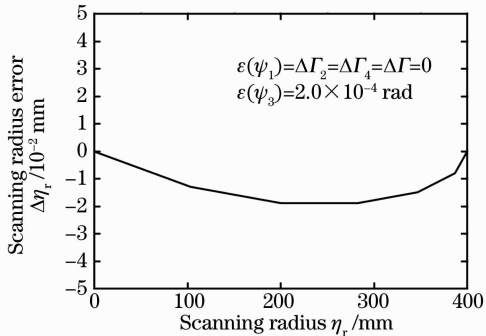


图 7 关节 joint2 误差 $\epsilon(\psi_3)$ 对于扫描精度 $\Delta\eta_r$ 影响
Fig. 7 Scanning radius errors $\Delta\eta_r$ due to the systematic errors $\epsilon(\psi_3)$ of joint2

由图 6 和图 7 可见, $\epsilon(\psi_1)$ 与 $\epsilon(\psi_3)$ 与对于扫描半径 η_r 的影响量级不同。在扫描半径 η_r 为 0.000~400.000 mm,关节 joint1 的扫描精度 $\Delta\eta_r$ 为 $-2 \times 10^{-17} \sim 2 \times 10^{-17}$ mm,关节 joint2 的扫描精度 $\Delta\eta_r$ 为

$-2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$ mm。关节 joint2 影响量级远大于关节 joint1。在选取关节组件时应首先满足关节 joint2 的精度要求,关节 joint1 的精度与关节 joint2 相同或略低即可。根据这一结论,选取 ψ_1 与 ψ_3 的系统误差参数 $\epsilon(\psi_1)$ 与 $\epsilon(\psi_3)$ 如表 4 所示。

表 4 关节 joint1 和关节 joint2 的系统误差值 $\epsilon(\psi_1)$ 和 $\epsilon(\psi_3)$

Table 4 Systematic errors $\epsilon(\psi_1)$ and $\epsilon(\psi_3)$ of joint 1 and joint 2

Joint1 rotational angle $\psi_1 / (^\circ)$	Systematic errors $\epsilon(\omega_1) / \text{rad}$	Joint2 rotational angle $\psi_3 / (^\circ)$	Systematic errors $\epsilon(\psi_3) / \text{rad}$
0	0	0	4.0×10^{-4}
30	4.0×10^{-4}	30	1.6×10^{-4}
60	3.8×10^{-4}	60	-1.7×10^{-4}
90	-2.4×10^{-4}	90	-1.9×10^{-4}
120	1.7×10^{-4}	120	-1.3×10^{-4}
150	2.1×10^{-4}	150	1.3×10^{-4}
180	-2.3×10^{-4}	180	1.5×10^{-4}
210	1.1×10^{-4}		
240	-2.1×10^{-4}		
270	1.9×10^{-4}		
300	2.0×10^{-4}		

结合(10)~(12)式,表 2 和表 4,在扫描半径 η_r 为 0.000~400.000 mm 时,扫描精度 $\Delta\eta_r$ 的分布规律如图 8 所示。

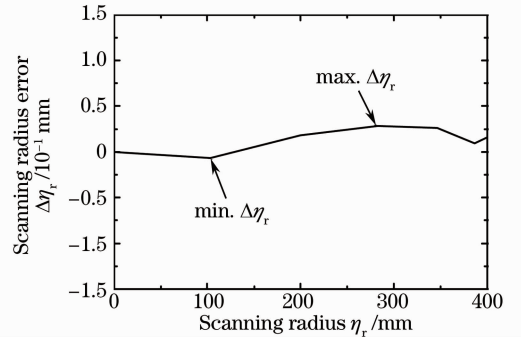


图 8 双转子孔径扫描装置扫描精度 $\Delta\eta_r$ 分布图

Fig. 8 Scanning radius errors $\Delta\eta_r$ due to the parameters systematic errors of SSMDA

由图 8 可见,1)当扫描半径 $\eta_r = 0.000$ mm 时 $\Delta\eta_r = 0.000$ mm,与表 6 中 $\psi_1 = \psi_3 = 0$ 时, $\epsilon(\psi_1) = \epsilon(\psi_3) = 0$ 相吻合;2)当扫描半径 $\eta_r = 103.528$ mm 时,扫描精度达到负极值 $\Delta\eta_{r \min} = -0.007$ mm;3)当扫描半径 $\eta_r = 282.843$ mm 时,扫描精度达到正极值 $\Delta\eta_{r \max} = 0.028$ mm;4)当扫描半径位于 $282.843 \text{ mm} \ll \eta_r \ll 400.000$ mm 时, $\Delta\eta_r$ 的误差分布曲线出现了凹陷,这是因为在 $120^\circ \ll \psi_3 \ll 180^\circ$ 时,系统误差 $\epsilon(\psi_3)$ 负正交替变化。

4 结 论

针对传统测量方法和装置在实现大口径光学系统透射特性测试上的问题,设计了一套新颖的双转子孔径扫描装置,让子孔径扫描光斑能够覆盖大口径光学系统全口径,以子孔径方法在光度测量领域的应用为思路,找到了一种新的大口径光学系统透射特性测量解决方案。基于空间坐标变换理论,应用空间坐标变换矩阵建立了子孔径扫描运动数学模型,推导出子孔径扫描系统误差模型,为双转子孔径扫描装置的精度分析提供了可靠的理论依据。在子孔径扫描装置设计与精度分析过程中发现:

1)两个回转关节的精度对于子孔径扫描精度的影响是不同的,靠近输出端的关节,其精度影响更显著;

2)通过推导出的误差模型,根据扫描装置各结构参数系统误差 $\Delta\Gamma_i, \Delta\rho_i, \Delta\Gamma, \epsilon(\psi_i)$ 和 $\epsilon(\phi_i)$,可以直接确定扫描精度参数 $\Delta\eta_r$ 的分布规律:当子孔径扫描半径为 $0.000 \text{ mm} \ll \eta_r \ll 400.000 \text{ mm}$ 时,子孔径扫描精度 $\Delta\eta_r$ 为 $-0.007 \sim 0.028 \text{ mm}$ 。这些结论的得出,为进一步开展大口径光学系统光谱透射特性测量的研究,提供了理论和数据基础。

参 考 文 献

- 1 Q. Dong, T. Jiang, S. Zhang *et al.*. Telescopic optical system transmittance detection based on the cross-correlation technique [J]. *Acta Armamentarii*, 2006, **27**(6): 1103~1105
董起顺,姜涛,张森等.基于互相关技术的光学系统透过率检测[J].兵工学报,2006,**27**(6):1103~1105
- 2 H. Wang, G. Cao, H. Ding. Detecting research on transmission of optical system based on bright field[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, (12): 223~224
王红平,曹国华,丁红昌.基于亮场条件下的光学系统透过率检测技术研究[J].机械设计与制造,2009,(12):223~224
- 3 D. T. Su, D. Shang, J. Lin *et al.*. Optical Testing Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 43~47
苏大图,沙定国,林家明等.光学测试技术[M].北京:北京理工大学出版社,1996.43~47
- 4 L. An, L. Li, Q. Li. Applied Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. 122~126
安连生,李林,李全臣.应用光学[M].北京:北京理工大学

- 出版社,2000.122~126
- 5 Y. Q. Li, Y. F. Zhang, G. R. Zhang. A new test method for short-focus-length optical system [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2009, **30**(6A): 89~91
李永强,张宇烽,张国瑞.一种短焦光学系统透过率测试的新方法[J].计量学报,2009,**30**(6A):89~91
 - 6 Y. Hao, C. Yang. A new testing method of transmittancy of camera with large aperture [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1996, **17**(4): 22~29
郝云彩,杨宗泉.大口径相机系统透过率测量新方法研究[J].航天返回与遥感,1996,**17**(4):22~29
 - 7 Y. Xie, J. Liu, H. Li *et al.*. Measuring spectral reflectance and transmittance of heavy caliber optical thin-film [J]. *Optical Instruments*, 2004, **26**(2): 164~167
谢云,刘骏,李海峰等.大口径光学薄膜透反射率测量方法的研究[J].光学仪器,2004,**26**(2):164~167
 - 8 Y. Li, Y. Tang, Z. Lin *et al.*. Design of apochromatism objective lens of aerial camera based on large frame array CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3183~3185
李玉瑶,唐勇,林昭珩等.基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计[J].光学学报,2009,**29**(11):3183~3185
 - 9 R. R. Zhang, W. M. Shen. Long focal-length optical system using annular aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1140~1143
张蕊蕊,沈为民.环形孔径长焦距光学系统[J].光学学报,2010,**30**(4):1140~1143
 - 10 Z. Chao, X. B. Peng, X. Z. Xing. Observation planning of LAMOST fiber positioning sub-system and its simulation study [C]. *SPIE*, 2003, **4837**(2): 556~563
 - 11 X. B. Peng, H. Z. Hu, C. Zhai *et al.*. Study on the construction of LAMOST sub-system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, **24**(z1): 341~343
彭小波,胡红专,翟超等.LAMOST 并行可控式光纤定位子系统的构建[J].仪器仪表学报,2003,**24**(z1):341~343
 - 12 S. W. Lin, P. P. Wang, Y. T. Fei. Simulation of the errors transfer in an articulation-type coordinate measuring machine [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2006, **30**(9): 879~886
 - 13 H. F. F. Castro. Uncertainty analysis of a laser calibration system for evaluating the positioning accuracy of a numerically controlled axis of coordinate measuring machines and machine tools [J]. *Precision Engineering*, 2008, **32**(2): 106~113
 - 14 K. Song, Z. Jiang. Estimation of measuring uncertainty for optical micro-coordinate measuring machine [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(12): 704~707
 - 15 Z. Chao, X. Z. Xing, H. Z. Hu *et al.*. The design of control system for fiber positioning system of LAMOST [C]. *SPIE*, 2003, **4837**(2): 494~501
 - 16 T. T. Liao, P. D. Lin. Analysis of optical elements with flat boundary surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(7): 1191~1202
 - 17 T. T. Liao. A skew ray tracing-based approach to the error analysis of optical elements with flat boundary surfaces [J]. *Optik*, 2008, **119**(15): 713~722