文章编号 1004-924X(2016)06-1373-09

基于 3-RRR 结构的光学元件柔顺微动调整机构的位姿正解

赵 磊[1*],梁 超[2],张德福[1],东立剑[1],彭海峰[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 超精密光学工程研究中心,吉林 长春 130033;
2. 长春理工大学 经济管理学院,吉林 长春 130022)

摘要:针对光刻投影物镜中光学元件 $X/Y/\theta$ 微动调整的工程需求,研制了一种基于 3-RRR 结构的光学元件柔顺微动调整机构,并对其位姿正解进行了研究。建立了 3-RRR 柔顺并联机构的伪刚体模型,并采用矢量代数法理论推导了该机构的位姿正解,得到了它的理论雅克比矩阵。然后,在 NASTRAN 中建立了 3-RRR 柔顺并联机构的有限元模型,得到了仿真环境下该机构的位姿正解和雅克比矩阵。最后,对研制的 3-RRR 柔顺并联机构进行了实验研究,得到了该机构真实的位姿正解和雅克比矩阵。实验结果表明,实验雅克比矩阵的各项系数分别为 0.577 7、-0.304 0、-0.283 3、0.002 1、0.524 6、-0.516 5、1.402 6、1.481 9、1.435 3,而理论雅克比矩阵相对应的各项系数分别为 0.612 9、-0.306 5、-0.306 5、0、0.530 8、-0.530 8、1.444 6、1.444 6、1.444 6,得到的数据表明:采用矢量代数法能够理论推导出该机构正确的位姿正解公式。提出的 3-RRR 柔顺微动调整机构位姿正解方法为微动调整机构的研制提供了设计依据。

关 键 词:柔顺并联机构;光学元件微动调整;位姿正解;伪刚体模型;矢量代数法;雅克比矩阵
中图分类号:TN305.7; TH703 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20162406.1373

Forward kinematics of 3-RRR flexure parallel mechanism used in lens micro-adjustment

ZHAO Lei[1*], LIANG Chao[2], ZHANG De-fu[1], DONG Li-jian[1], PENG Hai-feng[1]

(1. *Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2 *School of Economics and Management, Changchun University of Science and Technology Changchun* 130032, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: :zhaol@sklao.ac.cn*

Abstract: To meet the requirements of $X/Y/\theta$ adjustment in a lithography projection lens, a 3-RRR flexure parallel mechanism used in lens micro-adjustment was developed and its forward kinematics was researched. Firstly, the pseudo-rigid body model of the 3-RRR flexure parallel mechanism was established, the forward kinematic solution of the 3-RRR parallel mechanism was derived based on

收稿日期:2015-11-12;**修订日期**:2015-12-15.
基金项目:国家重大专项基金资助项目(No. 2009ZX02205);国家自然科学基金资助项目(No. 61504142)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

vector mathematical theory, and its theoretical Jacobian matrix was obtained. Then, the Finite Element Model(FEM) of the 3-RRR parallel mechanism was established in NX NASTRAN environment, and the FEM forward kinematic solution and the FEM Jacobian matrix were obtained. Finally, according to the experiment of the 3-RRR flexure parallel mechanism, the actual forward kinematic solution and the actual Jacobian matrix were acquired. The experiment results show that: the parameters of the actual Jacbian matrix are 0.5777, −0.304 0, −0.283 3, 0.002 1, 0.524 6, −0.516 5, 1.402 6, 1.481 9, 1.435 3, while the parameters of the theoretical Jacbian matrix are 0.612 9, −0.306 5, −0.306 5, 0, 0.530 8, −0.530 8, 1.444 6, 1.444 6, 1.444 6, respectively. The experiment results demonstrate that the forward kinematics can be exactly derived by the vector mathematical theory. The forward kinematic equation method for the 3-RRR flexure parallel mechanism is feasible when designing micro-motion mechanisms.

Key words: flexure parallel mechanism; lens micro adjusting mechanism; forward kinematic solution; pseudo rigid body model; vector algebra; Jacobian matrix

1 引 言

光刻机作为半导体集成电路领域中的核心设备，其工作性能直接决定终端产品芯片的特征尺寸。随着芯片线宽精细化需求，对光刻机关键组成部分的光刻投影物镜，也提出了越来越高的像差指标要求[1]。因此高精度光刻投影物镜中的多个敏感光学元件在装调和周期性维护过程中需要具备平面内微动调整的能力，其关键指标为±25 μm左右的调整行程以及20 nm左右的定位精度。

为了满足上述工程需求，课题组研制了一种平面柔顺机构。柔顺机构是以柔顺铰链代替传统运动铰链，采用柔顺元件的弹性变形运动来传递或转换运动、力或能量的非装配一体式机构[2]。相对于由刚性零件和真实运动副构成的传统传动部件，具有运动分辨率高、无摩擦、无需润滑、制造工艺简单等优点，在半导体设备[3,4]、精密光学仪器[5-7]、精密加工[8-10]、医疗器械[11]等领域得到了广泛应用。柔顺机构在工程领域中的不断需求，加速了国内外学者在该领域的研究。Lobontiu对柔顺机构的静力学、动力学等进行了系统的理论研究[12]。Howell提出了伪刚体模型法，对具有集中柔度的柔顺机构进行了系统研究[13]。黄真提出了基于约束螺旋理论的末端瞬时运动约束法[14-15]，杨廷力构建了基于方位特征和单开链单元的机构拓扑结构设计方法[16]，张宪民对各种构型的柔顺并联机构进行了运动学、静力学、动力学等方面的研究[17-20]。

本文针对光刻投影物镜中光学元件 $X/Y/\theta$ 三自由度调整的工程需求，研制了基于3-RRR结构的平面柔顺微动机构，针对研制的3-RRR柔顺机构位姿正解展开，建立了机构的伪刚体模型并对其位姿正解进行了理论分析，在NASTRAN环境下对机构的位姿正解进行了仿真分析，最后对研制的机构进行了位姿正解的实验验证工作。

2 3-RRR柔顺并联机构的模型及位姿正解理论推导

3-RRR柔顺微动调整机构如图1所示，机构为一体化的镜框外环和镜框内环结构，镜框外环和内环之间通过周向均布的3个RRR运动支链连接，可以通过慢走丝线切割方法加工，驱动器的输入位移垂直作用在运动支链的外侧连杆上，该机构可实现沿着 X 和 Y 向的移动和绕着 θ 的转动。其中每个 R 铰链采用了圆弧形柔性铰链，由于其绕 Z 轴方向的转动柔度比其它方向的移动柔度和转动柔度大得多，小转角范围内可将其等效为绕 Z 轴转动的单轴转动副。

伪刚体模型是对柔顺机构刚性化的一种描述，是将柔顺杆和柔顺铰链等效简化为刚性杆和真实运动铰链，然后应用刚体理论对机构进行分析和综合的一种方法[13]。3-RRR柔顺并联机构

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的伪刚体模型如图 2 所示，运动平台 $C_1C_2C_3$ 代表镜框内环，机架 $A_1A_2A_3$ 代表镜框外环，运动平台 $C_1C_2C_3$ 通过沿周向均布的 3 条运动支链 $A_iB_iC_i(i=1,2,3)$ 与机架 $A_1A_2A_3$ 连接。

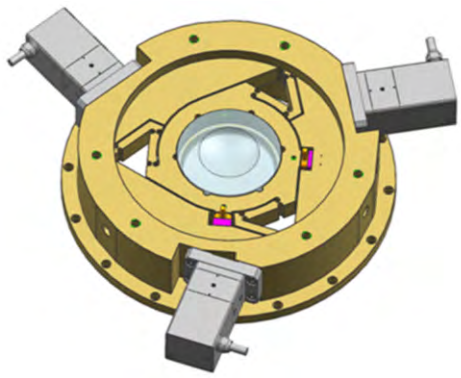


图 1　3-RRR 柔顺微动调整机构示意图

Fig. 1　3-RRR flexure micro-motion mechanism

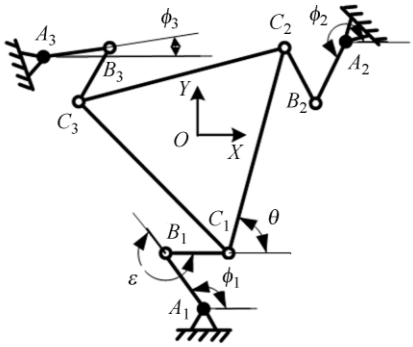


图 2　3-RRR 柔顺并联机构的伪刚体模型

Fig. 2　Pseudo rigid body model of 3-RRR flexure parallel mechanism

3-RRR 柔顺并联机构的结构参数定义如图 2 所示，定义 X 轴水平向右，Y 轴竖直向上，结构参数的定义和具体尺寸如表 1 所示。

表 1　结构参数的具体尺寸

Tab. 1　Data of the structural parameters

Structure parameter	data
L1	25.1 mm
L2	23 mm
L3	45.5 mm
$\varphi_i(i=1,2,3)$	$122.6°+120°(i-1)$
θ	74.6°
ε	237.4°

其中定义 $L_1=A_iB_i(i=1,2,3)$，$L_2=B_iC_i(i=1,2,3)$，$L_3=C_iO(i=1,2,3)$，第一连杆初始位置与 X 轴正向的夹角为 $\varphi_i(i=1,2,3)$，C_1C_2 与 X 轴正向的夹角为 θ，第一连杆与第二连杆之间的夹角 ε。

平面 3-RRR 柔顺并联机构的工作状态可以用其运动平台中心点的空间位置 (X,Y) 和转动角度 θ 描述，其位姿正解为已知各驱动器的输入位移变化量 $(\Delta M_1,\Delta M_2,\Delta M_3)$ 求解运动平台中心点位姿输出位姿变化量 $(\Delta X,\Delta Y,\Delta\theta)$ 的过程。

通过矢量代数法对机构的位姿正解进行了推导，首先确定了各个支链第一连杆与 X 轴正向夹角 $(\Delta\phi_1,\Delta\phi_2,\Delta\phi_3)$ 与运动平台中心点位姿 $(\Delta X,\Delta Y,\Delta\theta)$ 之间的关系，进而通过 $(\Delta M_1,\Delta M_2,\Delta M_3)$ 与 $(\Delta\phi_1,\Delta\phi_2,\Delta\phi_3)$ 的关系，最终得到了机构的位姿正解公式。

通过几何关系得到第一支链的约束方程为：

$$\overline{\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{O}}+\overline{\boldsymbol{O}\boldsymbol{C}_1}=\overline{\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{B}_1}+\overline{\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{C}_1}. \tag{1}$$

求导得到速度矢量的关系式为：

$$\bar{\boldsymbol{v}}+\dot{\boldsymbol{\theta}}(\bar{\boldsymbol{k}}\times\overline{\boldsymbol{O}\boldsymbol{C}_1})=\dot{\boldsymbol{\varphi}}_1(\bar{\boldsymbol{k}}\times\overline{\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{B}_1})+(\dot{\boldsymbol{\varphi}}_1+\dot{\boldsymbol{\varepsilon}})(\bar{\boldsymbol{k}}\times\overline{\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{C}_1}), \tag{2}$$

其中：$\bar{\boldsymbol{v}}=(\dot{\boldsymbol{X}},\dot{\boldsymbol{Y}})$ 为运动平台中心点的速度矢量，$\bar{\boldsymbol{k}}$ 为 $\boldsymbol{R}$ 副轴线的单位矢量。

将式(2)两边同时点乘矢量 $\overline{\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{C}_1}$，转换后得到：

$$\bar{\boldsymbol{v}}\cdot\overline{\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{C}_1}+\dot{\boldsymbol{\theta}}\bar{\boldsymbol{k}}\cdot(\overline{\boldsymbol{O}\boldsymbol{C}_1}\times\overline{\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{C}_1})=\dot{\boldsymbol{\varphi}}_1\bar{\boldsymbol{k}}\cdot(\overline{\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{B}_1}\times\overline{\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{C}_1}). \tag{3}$$

同理，根据第二支链和第三支链可得

$$\bar{\boldsymbol{v}}\cdot\overline{\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{C}_2}+\dot{\boldsymbol{\theta}}\bar{\boldsymbol{k}}\cdot(\overline{\boldsymbol{O}\boldsymbol{C}_2}\times\overline{\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{C}_2})=\dot{\boldsymbol{\varphi}}_2\bar{\boldsymbol{k}}\cdot(\overline{\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{B}_2}\times\overline{\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{C}_2}), \tag{4}$$

$$\bar{\boldsymbol{v}}\cdot\overline{\boldsymbol{B}_3\boldsymbol{C}_3}+\dot{\boldsymbol{\theta}}\bar{\boldsymbol{k}}\cdot(\overline{\boldsymbol{O}\boldsymbol{C}_3}\times\overline{\boldsymbol{B}_3\boldsymbol{C}_3})=\dot{\boldsymbol{\varphi}}_3\bar{\boldsymbol{k}}\cdot(\overline{\boldsymbol{A}_3\boldsymbol{B}_3}\times\overline{\boldsymbol{B}_3\boldsymbol{C}_3}). \tag{5}$$

定义输出速度 $\boldsymbol{p}=(\dot{X},\dot{Y},\dot{\theta})^{\mathrm{T}}$，输入角速度 $\boldsymbol{q}=(\dot{\boldsymbol{\varphi}}_1,\dot{\boldsymbol{\varphi}}_2,\dot{\boldsymbol{\varphi}}_3)^{\mathrm{T}}$，将式(3)、(4)、(5)表示为矩阵形式为：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{p}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{q}}\boldsymbol{q}. \tag{6}$$

根据矢量计算公式可以得到

$$\boldsymbol{J}_p=\begin{pmatrix} L_2\cos(\varphi_1+\varepsilon) & L_2\sin(\varphi_1+\varepsilon) & L_3L_2\sin\left(\varphi_1+\varepsilon-\theta+\frac{5}{6}\pi\right) \\ L_2\cos(\varphi_2+\varepsilon) & L_2\sin(\varphi_2+\varepsilon) & L_3L_2\sin\left(\varphi_2+\varepsilon-\theta+\frac{\pi}{6}\right) \\ L_2\cos(\varphi_3+\varepsilon) & L_2\sin(\varphi_3+\varepsilon) & L_3L_2\sin\left(\varphi_3+\varepsilon-\theta-\frac{\pi}{2}\right) \end{pmatrix}, \tag{7}$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\boldsymbol{J}_q=\begin{pmatrix} L_1L_2\sin\varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & L_1L_2\sin\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & L_1L_2\sin\varepsilon \end{pmatrix}. \quad (8)$$

根据式(6),得到采用雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}$ 表示的输出速度 $\boldsymbol{p}=(\dot{\boldsymbol{X}},\dot{\boldsymbol{Y}},\dot{\boldsymbol{\theta}})^{\mathrm{T}}$ 与输入角速度 $\boldsymbol{q}=(\dot{\boldsymbol{\varphi}}_1,\dot{\boldsymbol{\varphi}}_2,\dot{\boldsymbol{\varphi}}_3)^{\mathrm{T}}$ 关系为:

$$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{p}}^{-1}\boldsymbol{J}_{\mathrm{q}}\boldsymbol{q}=\boldsymbol{J}\boldsymbol{q}. \quad (9)$$

将3-RRR柔顺并联机构的结构参数带入公式(7)、(8)、(9)中,得到矩阵 $\boldsymbol{J}_P$、$\boldsymbol{J}_q$、$\boldsymbol{J}$ 分别为:

$$\boldsymbol{J}_p=\begin{pmatrix} 23 & 0 & 1\,012.7 \\ -11.5 & 19.9 & 1\,012.7 \\ -11.5 & -19.9 & 1\,012.7 \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{J}_q=\begin{pmatrix} -486.3 & 0 & 0 \\ 0 & -486.3 & 0 \\ 0 & 0 & -486.3 \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{J}=\begin{pmatrix} 3-14.097\,0 & 7.048\,5 & 7.048\,5 \\ 0 & -12.208\,4 & 12.208\,4 \\ -0.160\,1 & -0.160\,1 & -0.160\,1 \end{pmatrix}$$

由于柔顺微动机构的位移量和角度量均较小,式(9)按泰勒级数展开,略去高阶项可以得到:

$$\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{X} \\ \Delta\boldsymbol{Y} \\ \Delta\boldsymbol{\theta} \end{pmatrix}=J\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{\varphi}_1 \\ \Delta\boldsymbol{\varphi}_2 \\ \Delta\boldsymbol{\varphi}_3 \end{pmatrix}=$$

$$\begin{pmatrix} -14.097\,0 & 7.048\,5 & 7.048\,5 \\ 0 & -12.208\,4 & 12.2084 \\ -0.160\,1 & -0.160\,1 & -0.160\,1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{\varphi}_1 \\ \Delta\boldsymbol{\varphi}_2 \\ \Delta\boldsymbol{\varphi}_3 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中:ΔX,ΔY 的单位为 mm,$\Delta\theta$ 和 $\Delta\phi_i(i=1,2,3)$ 的单位为 rad。

驱动器的变化量 $\Delta M_i(i=1,2,3)$ 与角度量 $\Delta\phi_i(i=1,2,3)$ 的几何关系如图3所示,驱动器输入位移垂直作用在 $A_iD_i(i=1,2,3)$ 上,其作用点为 $D_i(i=1,2,3)$,定义 $L_4=A_iD_i(i=1,2,3)$,其尺寸为23 mm。

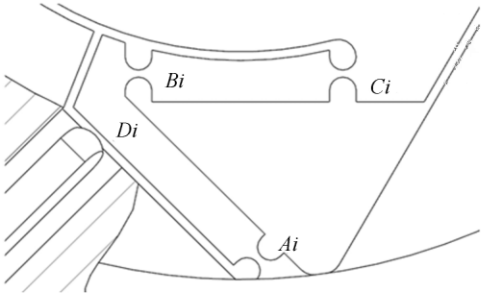


图3 RRR柔性运动支链示意图

Fig. 3 RRR flexure kinematic chain

根据如图3所示的几何关系,得到 $\Delta M_i(i=1,2,3)$ 与 $\Delta\phi_i(i=1,2,3)$ 的关系为:

$$\mathrm{tg}\Delta\varphi_i=-\Delta M_i/(1\,000*L_4), \quad (11)$$

式中:$\Delta M_i(i=1,2,3)$ 的单位为 μm,L_4 的单位为 mm。

由于 $\Delta\phi_i$ 很小时,可以近似用 $\mathrm{tg}\Delta\varphi_i$ 代替 $\Delta\phi_i$,将其带入(10)中得到:

$$\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{X} \\ \Delta\boldsymbol{Y} \\ \Delta\boldsymbol{\theta} \end{pmatrix}=-j/(1\,000*L_4)\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{M}_1 \\ \Delta\boldsymbol{M}_2 \\ \Delta\boldsymbol{M}_3 \end{pmatrix}=$$

$$\begin{pmatrix} 0.000\,612\,9 & -0.000\,306\,5 & -0.000\,306\,5 \\ 0 & 0.000\,530\,8 & -0.000\,530\,8 \\ 0.000\,007\,0 & 0.000\,007\,0 & 0.000\,007\,0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{M}_1 \\ \Delta\boldsymbol{M}_2 \\ \Delta\boldsymbol{M}_3 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

式中:$\Delta\boldsymbol{X}$,$\Delta\boldsymbol{Y}$ 的单位为 mm,$\Delta\boldsymbol{M}_i(i=1,2,3)$ 的单位为 μm,$\Delta\theta$ 的单位为 rad,将上述单位转换为 $\Delta\boldsymbol{X}$,$\Delta\boldsymbol{Y}$,$\Delta\boldsymbol{M}_i(i=1,2,3)$ 的单位为 μm,有:

$$\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{X} \\ \Delta\boldsymbol{Y} \\ \Delta\boldsymbol{\theta} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 0.612\,9 & -0.306\,5 & -0.306\,5 \\ 0 & 0.530\,8 & -0.530\,8 \\ 1.444\,6 & 1.444\,6 & 1.444\,6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{M}_1 \\ \Delta\boldsymbol{M}_2 \\ \Delta\boldsymbol{M}_3 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

因此得到理论推导的雅克比矩阵为:

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{M_theory}}=\begin{pmatrix} 0.612\,9 & -0.306\,5 & -0.306\,5 \\ 0 & 0.530\,8 & -0.530\,8 \\ 1.444\,6 & 1.444\,6 & 1.444\,6 \end{pmatrix}.$$

3 3-RRR柔顺并联机构的位姿正解仿真分析

为了验证上述位姿正解公式的正确性,在NASTRAN环境下建立了3-RRR机构的有限元模型,并对其位姿正解进行了仿真分析,得到了仿真环境下的雅克比矩阵。

仿真分析时,各驱动器的实际输入位移变化量($\Delta\boldsymbol{M}_1$,$\Delta\boldsymbol{M}_2$,$\Delta\boldsymbol{M}_3$)与运动平台中心点位姿输出位姿变化量($\Delta\boldsymbol{X}$,$\Delta\boldsymbol{Y}$,$\Delta\boldsymbol{\theta}$)的关系可以表示为:

$$\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{X} \\ \Delta\boldsymbol{Y} \\ \Delta\boldsymbol{\theta} \end{pmatrix}=\boldsymbol{J}_{M_fem}\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{M}_1 \\ \Delta\boldsymbol{M}_2 \\ \Delta\boldsymbol{M}_3 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中：$\boldsymbol{J}_{\mathrm{M_fem}}=\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}$.

为了求解仿真环境下的雅克比矩阵值，使每个驱动器单独运动产生单位位移量，观察此时运动平台的输出位姿情况。

在 NASTRAN 中建立的 3-RRR 机构有限元模型，如图 4 所示，将机构外侧多余的特征去掉，并将外侧铰链外侧的机架完全固定约束，镜片和镜框接触处采用面面胶粘连接。驱动器的驱动杆前端球头面与第一连杆接触面之间采用面面接触，驱动杆采用滑动约束，保证输入位移沿驱动杆方向输出，在驱动杆后端部施加力，并通过调整力的大小，保证驱动杆位移为单位位移量 10 μm，观察此时运动平台输出的位姿情况。仿真过程中需要进行网格优化，将结果收敛时的模型作为最终的有限元模型。

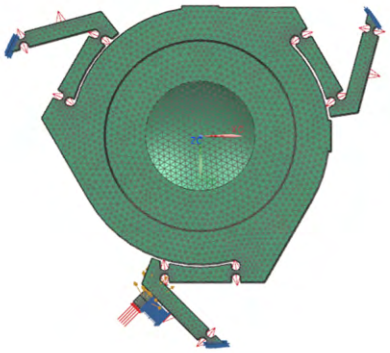


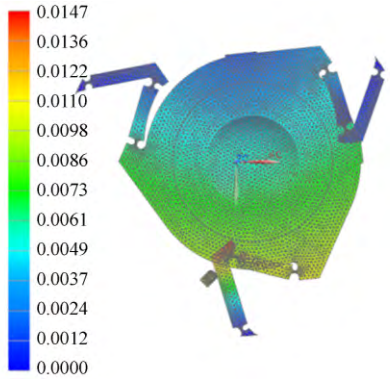
图 4　3-RRR 机构有限元模型

Fig. 4　FEM modal of 3-RRR mechanism

图 5(a)所示为各驱动器输入位移变化量 $\Delta \boldsymbol{M}_1$ 为 10 μm，$\Delta \boldsymbol{M}_2$ 为 0 μm，$\Delta \boldsymbol{M}_3$ 为 0 μm 时的机构变形云图，转换到机构坐标系下得到运动平台的输出位姿 $\Delta \boldsymbol{X}=5.957\mu\mathrm{m}$，$\Delta \boldsymbol{Y}=0.065\ \mu\mathrm{m}$，$\Delta \boldsymbol{\theta}=14.169''$，因此可以得到雅克比矩阵的系数 $m_{11}=0.595\ 7$，$m_{21}=0.006\ 5$，$m_{31}=1.4169$。

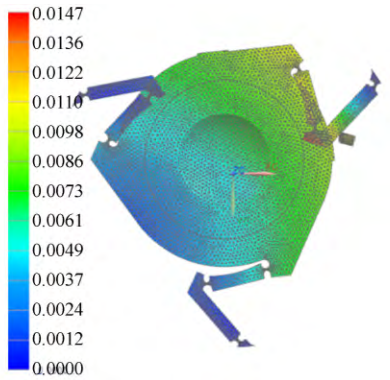
图 5(b)所示为各驱动器输入位移变化量 ΔM_1 为 0 μm，ΔM_2 为 10 μm，ΔM_3 为 0 μm 时的机构变形云图，转换到机构坐标系下得到运动平台的输出位姿 $\Delta X=-3.035\ \mu\mathrm{m}$，$\Delta Y=5.126\ \mu\mathrm{m}$，$\Delta\theta=14.112''$，因此可以得到雅克比矩阵的系数 $m_{12}=-0.303\ 5$，$m_{22}=0.5126$，$m_{32}=1.411\ 2$。

图 5(c)所示为各驱动器输入位移变化量 ΔM_1 为 0 μm，ΔM_2 为 0 μm，ΔM_3 为 10 μm 时的机构变形云图，转换到机构坐标系下得到运动平台的输出位姿 $\Delta X=-2.922\ \mu\mathrm{m}$，$\Delta Y=-5.191\ \mu\mathrm{m}$，$\Delta\theta=14.201''$，因此可以得到雅克比矩阵的系数 $m_{13}=-0.292\ 2$，$m_{23}=-0.519\ 1$，$m_{33}=1.420\ 1$。



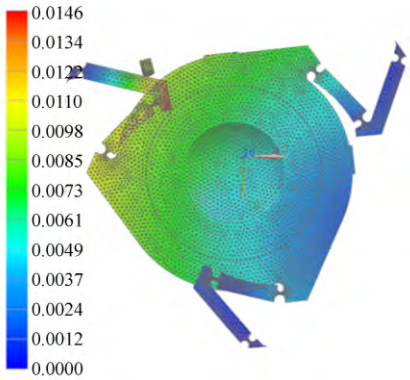
(a) 驱动器 1 作用时的机构运动图

(a) mechanism motion of actuator 1



(b) 驱动器 2 作用时的机构运动图

(b) Mechanism motion of actuator 2



(c) 驱动器 3 作用时的机构运动图

(c) Mechanism motion of actuator 3

图 5　驱动器作用时的机构运动图

Fig. 5　Mechanism motion of actuator

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据上述仿真结果，得到仿真环境下的雅克比矩阵为：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{M_fem}}=\begin{pmatrix}0.595\,7 & -0.303\,5 & -0.292\,2\\ 0.006\,5 & 0.512\,6 & -0.519\,1\\ 1.416\,9 & 1.411\,2 & 1.420\,1\end{pmatrix}$$

由此得到基于仿真数据的驱动器输入位移变化量($\Delta\boldsymbol{M}_1,\Delta\boldsymbol{M}_2,\Delta\boldsymbol{M}_3$)与运动平台位姿输出位姿变化量($\Delta\boldsymbol{X},\Delta\boldsymbol{Y},\Delta\boldsymbol{\theta}$)的关系为：

$$\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{X}\\ \Delta\boldsymbol{Y}\\ \Delta\boldsymbol{\theta}\end{pmatrix}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{M_fem}}\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{M}_1\\ \Delta\boldsymbol{M}_2\\ \Delta\boldsymbol{M}_3\end{pmatrix}=$$

$$\begin{pmatrix}0.595\,7 & -0.303\,5 & -0.292\,2\\ 0.006\,5 & 0.512\,6 & -0.519\,1\\ 1.416\,9 & 1.411\,2 & 1.420\,1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{M}_1\\ \Delta\boldsymbol{M}_2\\ \Delta\boldsymbol{M}_3\end{pmatrix},\quad(15)$$

式中：$\Delta\boldsymbol{X},\Delta\boldsymbol{Y},\Delta\boldsymbol{M}_i(i=1,2,3)$单位为 μm，$\Delta\theta$ 的单位为(″)。

4 3-RRR 柔顺并联机构的位姿正解实验研究

3-RRR 柔顺并联机构及其位姿正解实验装置分别如图 6、图 7 所示。3 个压电驱动器固定在镜框外环上，驱动器输入力垂直作用在运动支链的第一连杆上。压电驱动器选用 NEXLINE 压电式驱动器，该驱动器运动行程为 10 mm，驱动力为 50 N，内部带有光栅尺，其闭环定位精度为 5 nm。X 向和 Y 向的位移测量采用电容传感器，电容传感器固定在镜框外环上，可以实时检测镜框内环和镜片整体的位移量。电容传感器测量行程 500 μm，线性度 0.05%，静态分辨率 RMS 4.0 nm。角度的测量采用数显自准直仪，测量时将反射镜安装在运动内环上，自准直的测量范围为 20″，示值误差为±0.2″，有效分辨力为 0.1″。

实验标定时，各驱动器的实际输入位移变化量($\Delta\boldsymbol{M}_1,\Delta\boldsymbol{M}_2,\Delta\boldsymbol{M}_3$)与运动平台中心点位姿输出位姿变化量($\Delta\boldsymbol{X},\Delta\boldsymbol{Y},\Delta\boldsymbol{\theta}$)的关系为：

$$\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{X}\\ \Delta\boldsymbol{Y}\\ \Delta\boldsymbol{\theta}\end{pmatrix}=J_{\mathrm{M_exp}}\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{M}_1\\ \Delta\boldsymbol{M}_2\\ \Delta\boldsymbol{M}_3\end{pmatrix},\quad(16)$$

其中：$\boldsymbol{J}_{\mathrm{M_exp}}=\begin{pmatrix}a_{11} & a_{12} & a_{13}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23}\\ a_{31} & a_{32} & a_{33}\end{pmatrix}$.

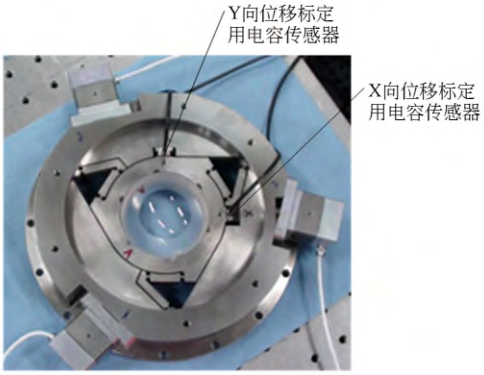


图 6 3-RRR 柔顺并联机构

Fig. 6 Photo of 3-RRR flexure parallel mechanism

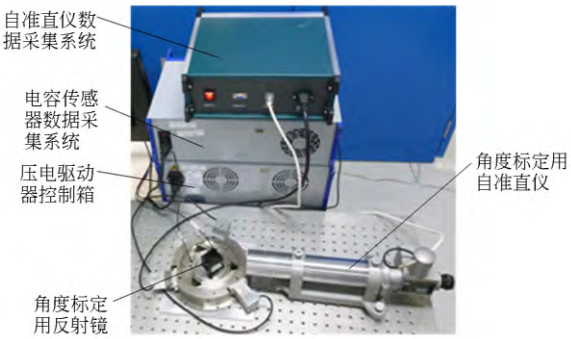


图 7 3-RRR 柔顺并联机构位姿正解标定装置

Fig. 7 Experiment system of 3-RRR mechanism forward kinematic calibration

实验时分别控制单个驱动器产生单位输入位移，根据电容传感器测量得到的实际输出位移量，以及自准直仪测量得到的角度量，可以求得实验雅克比矩阵的各项系数。

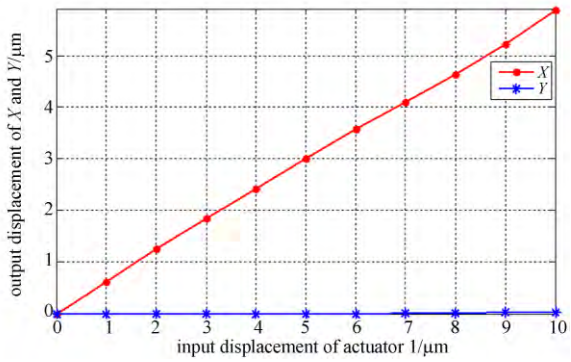
图 8 所示为压电驱动器 1 单独运动时，驱动器的输入位移和光学元件输出位移/角度的实验数据，可以得到 $a_{11}=0.577\,7$，$a_{21}=0.002\,1$，$a_{31}=1.402\,6$。

图 9 所示为压电驱动器 2 单独运动时，驱动器的输入位移和光学元件输出位移/角度的实验数据，可以得到 $a_{12}=-0.304\,0$，$a_{22}=0.524\,6$，$a_{32}=1.481\,9$。

图 10 所示为压电驱动器 3 单独运动时，驱动器的输入位移和光学元件输出位移/角度的实验数据，可以得到 $a_{12}=-0.283\,3$，$a_{23}=-0.516\,5$，$a_{33}=1.435\,3$。

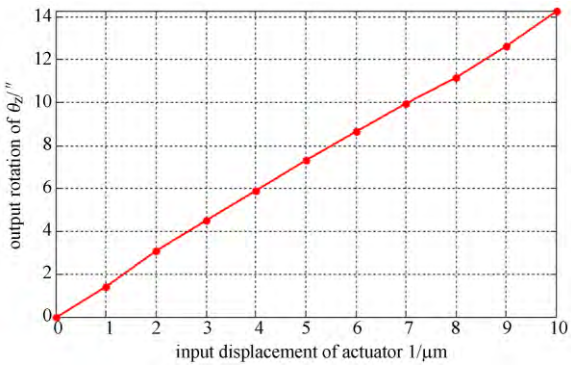
根据实验数据，得到 3-RRR 柔顺并联机构的实验雅克比矩阵为：

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）驱动器 1 输入位移与 X/Y 输出位移

（a）Actuator 1 input displacement and X/Y output displacement

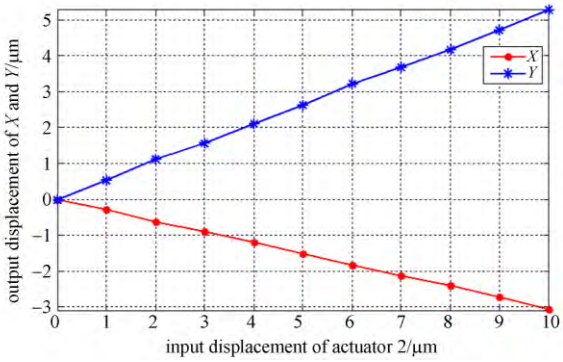


（b）驱动器 1 输入位移与 θ_Z 输出位移

（b）actuator 1 input displacement and θ_Z output angle

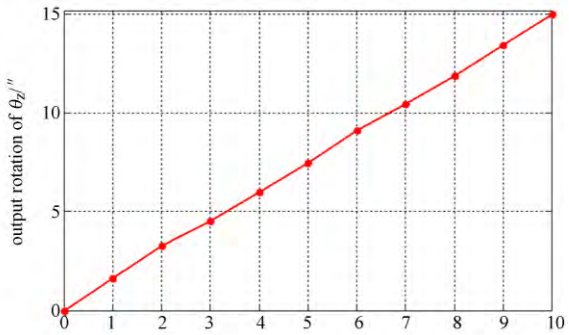
图 8　驱动器 1 作用时的输入输出数据

Fig. 8　Input and output data when actuator 1 work



（a）驱动器 2 输入位移与 X/Y 输出位移

（a）Actuator 2 input displacement and X/Y output displacement

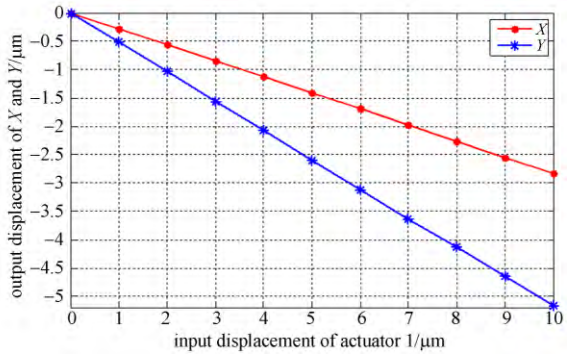


（b）驱动器 2 输入位移与 θ_Z 输出位移

（b）Actuator 2 input displacement and θ_Z output angle

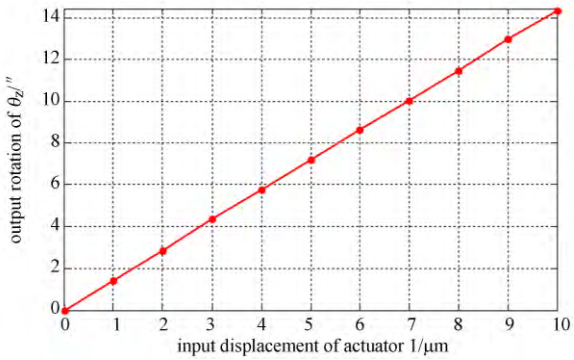
图 9　驱动器 2 作用时的输入输出数据

Fig. 9　Input and output data when actuator 2 work



（a）驱动器 3 输入位移与 X/Y 输出位移

（a）Actuator 3 input displacement and X/Y output displacement



（b）驱动器 3 输入位移与 θ_Z 输出位移

（b）actuator 3 input displacement and θ_Z output angle

图 10　驱动器 3 作用时的输入输出数据

Fig. 10　Input and output data when actuator 3 work

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{M_exp}}=\begin{pmatrix}0.577\,7 & -0.304\,0 & -0.283\,3\\ 0.002\,1 & 0.524\,6 & -0.516\,5\\ 1.402\,6 & 1.481\,9 & 1.435\,3\end{pmatrix}$$

由此得到基于实验数据的驱动器输入位移变化量($\Delta\boldsymbol{M}_1,\Delta\boldsymbol{M}_2,\Delta\boldsymbol{M}_3$)与运动平台位姿输出位姿变化量($\Delta\boldsymbol{X},\Delta\boldsymbol{Y},\Delta\boldsymbol{\theta}$)的关系为:

$$\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{X}\\ \Delta\boldsymbol{Y}\\ \Delta\boldsymbol{\theta}\end{pmatrix}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{M_exp}}\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{M}_1\\ \Delta\boldsymbol{M}_2\\ \Delta\boldsymbol{M}_3\end{pmatrix}=$$

$$\begin{pmatrix}0.577\,7 & -0.3040 & -0.283\,3\\ 0.002\,1 & 0.524\,6 & -0.516\,5\\ 1.402\,6 & 1.481\,9 & 1.435\,3\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{M}_1\\ \Delta\boldsymbol{M}_2\\ \Delta\boldsymbol{M}_3\end{pmatrix}. \quad (17)$$

式中:$\Delta\boldsymbol{X},\Delta\boldsymbol{Y},\Delta\boldsymbol{M}_i(i=1,2,3)$单位为 μm,$\Delta\theta$ 的单位为(″)。

5 结 论

针对光刻投影物镜中光学元件 $X/Y/\theta$ 微动调整的工程需求,研制了一种基于3-RRR结构的光学元件平面柔顺微动调整机构,重点围绕其位姿正解进行了研究。建立了3-RRR柔顺并联机构的伪刚体模型,并对其位姿正解进行了理论推导,得到了反映微动调整时各驱动器输入位移与光学元件输出位姿 $X/Y/\theta$ 的理论雅克比矩阵,并通过有限元分析和实验测试分别得到了仿真环境下的雅克比矩阵和真实环境下的雅克比矩阵。实验结果表明,实验雅克比矩阵的各项系数分别为0.577 7、−0.304 0、−0.283 3、0.002 1、0.524 6、−0.516 5、1.402 6、1.481 9、1.435 3,而理论雅克比矩阵相对应的各项系数分别为0.612 9、−0.306 5、−0.306 5、0、0.530 8、−0.530 8、1.444 6、1.444 6、1.444 6,证明了位姿正解理论推导的正确性。3-RRR柔顺微动调整机构位姿正解方法,可为微动调整机构的研制提供设计依据。

参考文献:

[1] 许伟才,黄玮,杨旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. 光学学报,2011,31(11):1122003.
XU W C, HUANG W, YANG W. Magnification tolerancing and compensation for the lithography projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11):1122003. (in Chinese)

[2] 钟掘. 机械工程学科发展战略报告[M]. 北京:科学出版社,2010.
ZHONG J. *Strategic Development Report of Mechanical Engineering Discipline* [M]. Beijing: The Science Press, 2010. (in Chinese)

[3] RYU J W, GWEON D G, MOONT K S. Optimal design of a flexure hinge based XYΘwafer stage [J]. *Precision Engineering*, 1997, 21: 18-28.

[4] YONG Y K, LU T F. Kinematic modeling of 3-RRR compliant micro-motion stages with flexure hinges [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 44: 1156-1175.

[5] 赵磊,巩岩,赵阳. 光刻投影物镜中的透镜X-Y柔性微动调整机构[J]. 光学 精密工程,2013,21(6):12425-1432.
ZHAO L, GONG Y, ZHAO Y. Flexure-based X-Y micro-motion mechanism used in lithographic lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 12425-1432. (in Chinese)

[6] 鲁亚飞,范大鹏,范世珣,等. 快速反射镜两轴柔性支撑设计[J]. 光学 精密工程,2010,18(12):2574-2582.
LU Y F, FAN D P, FAN SH X, *et al.*. Design of two-axis elastic support for fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2574-2582. (in Chinese)

[7] 郭抗,巩岩. 轴向调节机构中调节力对光学元件面形的影响[J]. 光学学报,2013,33(11):1123001.
GUO K, GONG Y. Effect of adjusting force on surface figure of optical element in axial adjustment mechanism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1123001. (in Chinese)

[8] SMITH S T, CHETWYND D G, BOWEN D K. Design and assessment of monolithic high precision translation mechanisms [J]. *J. Phys. E: SciInstrum*, 1987, 20: 977-983.

[9] KIM H S, KIM E J, SONG B S. Diamond turning of large off-axis aspheric mirrors using a fast tool servo with on-machine measurement [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 146: 349-355.

[10] 周京博,孙涛,侯国安. 双柔性支撑板快速伺服刀架优化设计及测试[J]. 光学 精密工程,2013,21(2):349-355.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ZHOU J B, SUN T, HOU G A. Optimal design and test of double elastic plate based fast tool serco [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 349-355. (in Chinese)

[11] 高鹏，颜国正，王志武. 肠道微机器人柔性运动系统[J]. 光学 精密工程，2012，20(3)：541-549.
GAO P, YAN G ZH, WANG ZH W. Flexible incomotion system for gastrointestinal microrobots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 541-549. (in Chinese)

[12] LOBONTIU N. *Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges* [M]. CRC Press, 2003.

[13] HOWELL L L. *Compliant Mechanisms* [M]. New York: John Wiley & Sons Press, 2001.

[14] 黄真，赵永生，赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京：高等教育出版社，2008.
HUANG ZH, ZHAO Y SH, ZHAO T SH. *Advanced Spatial Mechanism* [M]. Beijing: High Education Press, 2008. (in Chinese)

[15] GAO F, LI W M, ZHAO X CH. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37(11): 1395-1411.

[16] 杨廷力，刘安心，罗玉峰，等. 机器人机构拓扑结构设计[M]. 北京：科学出版社，2012.
YANG T L, LIU A X, LUO Y F, *et al.*. *Theory and Application of Robot Mechanism Topology* [M]. Beijing: The Science Press, 2012. (in Chinese)

[17] 王华，张宪民，邓俊广. 基于压电陶瓷驱动的精密定位平台研究测试技术学报[J]. 测试技术学报，2007，21(4)：295-300.
WANG H, ZHANG X M, DENG J G. Research on a precision positioning stage based on piezoelectric actuators[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2007, 21(4): 295-300. (in Chinese)

[18] 孙立宁，董为，杜志江. 基于大行程柔性铰链的并联机器人刚度分析[J]. 机械工程学报，2005，41(8)：90-95.
SUN L N, DONG W, DU ZH J. Stiffness analysis on a wide-range flexure hinge-based parallel manipulator [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(8): 90-95. (in Chinese)

[19] 于靖军，裴旭，毕树生，等. 柔性铰链机构设计方法的研究进展[J]. 机械工程学报，2010，46(13)：2-13.
YU J J, PEI X, BI SH SH, *et al.*. State-of-arts of design method for flexure mechanisms [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(13): 2-13. (in Chinese)

[20] 胡鹏浩，张毅，郑群. 3-RRR 并联微动机器人结构误差对其运动精度的影响[J]. 制造业自动化，2008，30(12)：66-68.
HU P H, ZHANG Y, ZHENG Q. Structure error lnfluence on the precision of 3-RRR micro-motion stage[J]. *Manufacturing Automation*, 2008, 30(12): 66-68. (in Chinese)

作者简介：

赵　磊(1982－)，男，山东蒙阴人，硕士，助理研究员，主要从事柔顺微动机器人、主动光学方面的工作。E-mail: zhaol@sklao.ac.cn

张德福(1983－)，男，吉林长春人，博士，助理研究员，主要研究方向为光学精密仪器结构设计。E-mail: zhangdf@sklao.ac.cn

（版权所有　未经许可　不得转载）

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net