

文章编号 1004-924X(2007)02-0224-06

# 同步辐射 X 射线双晶单色器联动机构

董晓浩, 凤良杰, 康 乐, 徐朝银

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

**摘要:**提出了一种实现固定空间输出位置同步辐射双晶单色器的方法及联动机构。分析了基于 Bragg 衍射原理的此类 X 射线双晶单色器发展状况,尤其是在能量扫描过程中,通过运动补偿实现出射光束方向与位置固定的方法,总结了各种机械联动机构。在综合凸轮耦合运动机构及直角联动机构运动特点基础上,详细描述了国家同步辐射实验室成功研制的 X 射线双晶单色器 L 型联动机构特征,其融合了二者的优点,简化了结构与运动,重点分析了其结构原理与运动关系,以及机构运动的实现与第二晶体自身微调,并对其性能做了进一步的讨论。测试结果表明,L 型联动机构完全适用于实现 3.1~12.4 keV 整个能量范围的全谱扫描实验研究。

**关键词:**联动机构;运动分析;双晶单色器;X 射线;同步辐射

**中图分类号:**TL544;TH744.1 **文献标识码:**A

## A mechanical linkage of double crystal X-ray monochromator for synchrotron radiation

DONG Xiao-hao, FENG Liang-jie, KANG Le, XU Chao-yin

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science & Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract:** A novel mechanism for the fixed-exit double crystal monochromator of Bragg-Bragg diffraction case used widely in synchrotron radiation was presented. The development of double crystal monochromator for synchrotron radiation X-ray was reviewed briefly, especially of the fixed-exit mode. Several kinds of implementation approaches for the energy scanning of the photons were summarized by analyzing the common mechanical linkage schemes. Based on the principle of mechanism with rotation plate coupling motions on fixed cams as well as right-angle linkage device, the L-shaped mechanical linkage used in successfully the double crystal monochromator of X-ray beamlines at National Synchrotron Radiation Laboratory (NSRL) was introduced in detail. It adopted the advantages of the above right-angle and motion coupling mechanism to operate the mechanical linkage in simple configurations and motions. Motion mechanism and position adjustment of the crystals, mechanical design of the related structure, and the incoming improvement were discussed. It is indicated that the mechanical linkage is suit for the experimental researches at 3.1~12.4 keV by off-line testing of the mechanism and on-line measurement of the monochromators.

收稿日期:2006-01-12;修订日期:2006-10-15.

基金项目:国家自然科学基金(No. 10575098)

**Key words:** mechanical linkage; motion analysis; double crystal monochromator; X-ray; synchrotron radiation

## 1 引言

基于 Bragg 衍射原理的完整单晶作为能量色散元件已广泛应用于 X 射线分光器件中,通过改变入射光线与衍射晶面间夹角(Bragg 角)来选择不同波长光束,进行分光,其衍射方程为  $\lambda = 2d \sin \theta$  ( $\lambda$  为波长,  $d$  为晶体衍射面间距)。同步辐射应用中为了从连续光谱中分离出单色 X 光,晶体单色器是常用关键光学部件。为使出射光束与入射光束方向相同,通常采用在同一大块晶体上铣槽来(Monolithic channel-cut crystal monochromator)<sup>[1]</sup>,保证两衍射面具有相同晶面指数并严格平行,且使其反射摇摆曲线(Rocking curve)在相同宽度范围内。由于大多数实验需在波长连续改变、能量扫描过程中出射单色 X 光线方向与位置都固定,理论上可将大块切槽晶体的两反射晶面做成非完全平面<sup>[2,3]</sup>(如平面与斜面;斜面与曲面结合等),采取与整体旋转相耦合的轴向或径向移动来实现,或特殊曲面<sup>[4]</sup>(如双渐近线曲面, Monolithic curved surfaces channel-cut crystal monochromator),仅需一维转动实现固定空间输出位置,但此类面形难以保证且存在能量扫描范围小等局限性,有待改进与完善。绝大多数采用两块独立且晶面指数相同晶体(如从同一大块晶体切割)来保证其衍射面严格平行(Separate-two-parallel-crystal),称为双晶单色器(Double crystal monochromator),在波长连续变化过程中,晶体转动的同时通过机械机构的联动调节或智能控制的运动合成,来保证两晶体在运动过程中的相互位置关系,使出射光束空间位置固定。目前新的实验方法所需高稳定性、高分辨率等对仪器要求更严格,联动机构性能的提高成为优化单色器,引出单色光品质的一个重要课题。

## 2 典型联动机构分析

### 2.1 原理与方法

固定空间输出位置双晶单色器能量扫描过程中晶体运动关系如图 1 所示,当入射与出射光束

高度差固定为  $H$ ,两晶体转动,改变角度后(为叙述简便,假设其绕第一晶体与入射光束交点  $A$  转动),第二晶体从位置 1 转到位置 2,此时出射光束偏离原来位置,只有将它沿其法向( $X$  向)移动  $\Delta D$  到位置 3,才能使出射光束回到原来位置;同时要求其切线方向( $Y$  向)衍射面足够长,为使出射光束全落在晶面上,以减小晶体长度,同时需沿  $Y$  向移动至少  $\Delta L$  来保证。可见此类单色器,当两晶体转动的同时,至少需一晶体相对另一晶体做平移运动,按其运动机构可分为以下几类:(1)两晶体转动与  $X$ - $Y$  平动按设定关系,分别驱动,所需驱动马达数目较多且均需置于超高真空中,同时须确保所有运动的精度<sup>[5]</sup>; (2)两晶体均置于同一转台上,其中一晶体位于  $X$ - $Y$  滑台上,在转动同时其相对另一晶体平动由另一个机构(如固定特制轮廓的凸轮)决定<sup>[6]</sup>,可视为一种特殊联动机构;(3)运用具有计算关系的联动机构实现两晶体转动与  $X$ - $Y$  相对平移运动,使之达到所需位置关系,馈入驱动可减至一个,所需转矩较小,精度较高。虽其结构与运动均较复杂,但可使不同光子能量光束入射中心光线始终位于晶面的同一点上,因此晶体尺寸不限制于能量范围、小块晶体便可实现全谱扫描,且更换、调整晶体元件简单方便,易于扩展能量调谐性能与减小晶体不完整或细微弯曲引起的影。直角机构(Right angle)<sup>[7]</sup>是最早采用的具有计算关系联动机构,在此基础上衍生了多种类似机构,如 Boomerang<sup>[8]</sup>、Right angle-Boomerang<sup>[9]</sup>、Broomstick<sup>[10]</sup> 机构等。近年来,逐渐也出现了一些实现光束偏移量为常数的新机构与新方法,如过约束柔性铰链机构(Overconstrained weak-link mechanism)<sup>[11]</sup>、无外加约束的简单运动耦合方法<sup>[12]</sup>等,可使机构更加紧凑且运动稳定。

国外同步辐射装置及台湾 NSRRC 针对以上各类机构,在结合各自特点基础上,发展了较成熟的技术。基于直角机构原理,结合转台馈入运动,同步辐射装置 NSRL 成功应用了 L 型联动机构双晶单色器<sup>[13]</sup>,BSRF 曾采用了 T 型联动机构双晶单色器<sup>[14]</sup>,正在建设中的 SSRF,其预研的弧矢聚焦晶体单色器采用了上述(1)方法<sup>[15]</sup>、首批拟

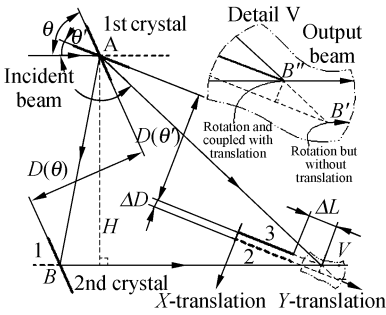


图 1 固定空间输出位置双晶单色器晶体运动关系  
Fig. 1 Scheme of relative position of fixed-exit double crystal monochromator

建光束线设计中大多计划采用机械联动机构双晶单色器,实现固定空间输出位置。

2.2 凸轮耦合运动机构

耦合运动机构中两晶体可如图 2 以 (+n, -n) 消色散方式排列。第二晶体安放在相互垂直的 X-Y 滑台上,与第一晶体置于同一转台。当两晶体同时绕过第一晶体表面的转动中心 O 转动时,第二晶体运动受凸轮轨迹制约,分别沿滑轨作 X(法线方向)和 Y(切线方向)两维平动, X 向平移保持输出的单色光束与入射光束之间的高度差不变, Y 向平移保持经第一晶体反射的光能落在第二晶体表面同一点。在要求不是很高时,由于所需凸轮轮廓制造加工难度大,沿 X 向的平动,可用若干直线段近似代替曲线轮廓<sup>[16]</sup>,相应的光束落在第二晶体表面一定范围内;亦可取消 Y 向平动,加大第二晶体切向尺寸补偿,使光束均被晶面所接受。同样,当转台绕第二晶体表面中心线转动时,使第一晶体运动受凸轮约束,有类似结论。

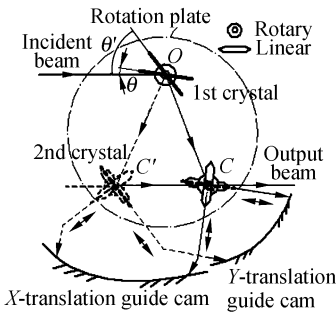
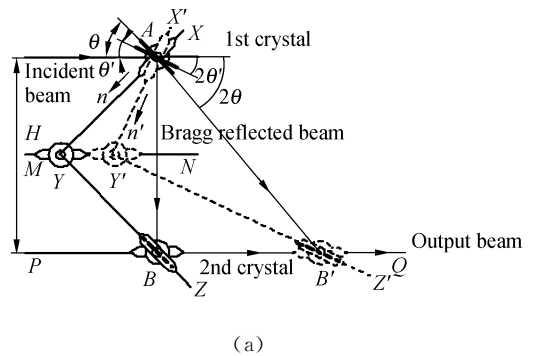


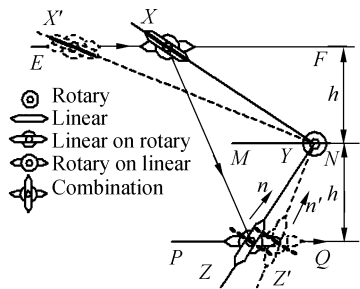
图 2 转台与沿凸轮耦合运动机构示意图  
Fig. 2 Diagram of mechanism with rotation plate and coupled motions of fixed cams

2.3 直角联动机构

原理上可将直角联动机构看成主要由两个滑杆 YX 和 YZ 构成的直角刚性结构(图 3)。由图中几何关系,有  $H = \overline{AB} \cdot \sin 2\theta = \overline{AY} \cdot \frac{\sin 2\theta}{\sin \theta} = \frac{h}{\cos \theta} \cdot \frac{\sin 2\theta}{\sin \theta} = 2h$ ,可见 MN 是入射与出射光束高度的中线。整个机构可绕直角顶点或某一直角边与入(或出)射光束的交点为固定点转动,并满足直角顶点始终严格地位于 MN 上。如图 3(a) 实线 XYZ,两晶体以 (+n, -n) 消色散方式排列,第一晶体位于固定转轴 A 点,衍射面法线沿 YX 方向,第二晶体位于 B 点,衍射面与 YZ 平行,而图 3(b) 实线 XYZ 情况正好相反。于是,根据直角顶点位置的不同,图 3(a),(b) 各自对应另一种形式(图中未画出)。



(a)



(b)

图 3 直角联动机构结构原理与运动关系  
Fig. 3 Geometrical constructing and required operating motions of right angle linkage

图 3 中分别给出了直角机构两个不同运动位置,实线直角 XYZ 对应低能 X 射线光束、虚线直角对应高能部分。两晶体分别安装在既可绕 A、B 转动又可沿 YX、YZ 杆滑动的滑块上。如图 3(a),以 A 点为固定轴心转动直角机构,刚性

杆 YX 绕 A 转动并沿 YX 方向滑动,同时带动顶点 Y 随之转动并沿 MN 滑动;与此同时,引起 YZ 杆转动并沿 YZ 方向滑动,带动 B 转动并在受与 MN 平行导轨 PQ 约束下沿其方向滑动,以保证 B 始终在 YZ 和 PQ 的交点上。这样保证了晶体间相互位置关系,使输出光束的方向与高度不随能量变化,即无论 Y 在 MN 上什么位置(或不论  $\theta$  如何变化),从 A 点反射的光束总是在所要求的高度上(PQ)与 YZ 相交。如图 3(b),以直角顶点 Y 为固定轴心转动直角机构,同样分析,有类似的运动关系。

### 3 L 型联动机构

#### 3.1 结构原理与运动关系

NSRL 研制的 L 型联动机构,由于机构外型像字母 L 而得名。晶体以及运动支撑部件均置于一个转台上(如图 4),转轴位于第一晶体表面中心线与入射光束交点 A。平行于入射光束的直线导轨 MN 固定于另一平台上,两晶体排列如前面讨论的直角机构图 3(a)中的方式相同。第二晶体可沿其法线方向线性移动。类似直角机构分析方法同样可得入射光线高度为  $2h$ , MN 为其中心线( $h$  为入射光线与 MN 之间距离)。

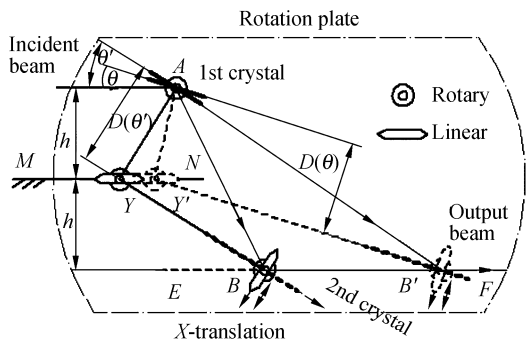
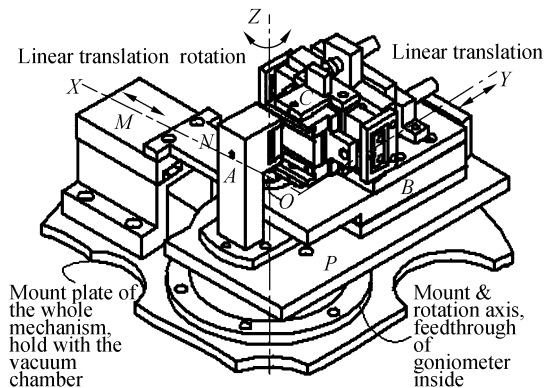


图 4 L 型联动机构结构原理与运动分析

Fig. 4 Principle and motions of L-shaped linkage

转台绕 A 转动时,第一晶体随之转动但无平移,带动直角顶点 Y 转动并受直线导轨 MN 约束并沿其方向移动,从而使第二晶体在转动同时沿其法线方向平移。显然 L 型联动机构省略了第二晶体沿其表面切线方向线性移动,为此需加长第二晶体切向尺寸来补偿,使从第一晶体反射的光束始终能被其全部接受。在能量扫描过程中,

两晶体之间距离  $D(\theta) = h/\cos \theta$  随角度变化,则转动一个角度之后,第二晶体沿其法向移动距离为  $\Delta D = D(\theta') - D(\theta) = h \times (1/\cos \theta' - 1/\cos \theta)$ ,由此引起光斑在第二晶体切向移动量为  $\Delta L = h \times (1/\sin \theta' - 1/\sin \theta)$ 。由此可见在能量覆盖范围不是很大的情况下,采用 L 型联动机构仅用一维转动,便可实现全谱扫描。NSRL 光束线 U7B、U7C 上双晶单色器入射光束高度为 10 mm ( $h=5$  mm),扫描角度范围为  $9^\circ \leq \theta \leq 32^\circ$ ,则有  $\Delta D_{\max} = 0.687$  mm,  $\Delta L_{\max} = 22.53$  mm,当第二晶体长度为 40 mm 时,足以满足要求。



A: 1st crystal holder and rotation arm; B: 2nd crystal slide stage; C: 2nd crystal holder and corrector; M, N: pivot rod and slide stand; O: linkage axis; P: rotation table

图 5 L 型联动机构 NSRL 双晶单色器

Fig. 5 Scheme of L-shaped linkage

#### 3.2 功能实现与自身微调

如图 5 所示,机构主体安装在转台 P 上,夹持第一晶体的托架 A 直接与转台 P 连成一体,转台 P 旋转轴线通过第一晶体表面中心线;第二晶体托架及调整装置 C 安放在可沿第二晶体表面法向移动的滑台 B 上,其滑座遵循两晶体的直角关系严格定位在转台 P 上。连杆 N 与滑台 B 通过转动轴承联接于直角顶点 O 通过枢轴限制在导轨 M 上做平移运动。直线导轨 M 与转台 P 分开安装,固定在同一底座上,是单色器其它部件安装时的参考基准。整个系统封闭在真空室内,转台转动(即 Bragg 转动)由设置在真空腔体外面的 Huber 转角仪驱动,通过磁流体密封轴承,将旋转运动馈入到真空室内面。真空室安放在五维精密调整台上,调整、准直两晶体的空间姿态和同步辐射光轴的相关位置。由于加工制造、安装等误差,

不可能完全保证两晶体衍射面在 Bragg 角全程扫描中始终保持平行,为此第二晶体还设置了自身微调装置(图 6)。通过柔性块、压缩弹簧连接的支撑架调节,由两个编码微驱动器(Encoder micro-driver)驱动第二晶体分别绕 X、Y 轴转动(滚角 Roll、投角 Yaw),其作用主要是:滚角调节第一晶体与第二晶体相互位置关系,投角调节 Bragg 角,以随时调整第二晶体与第一晶体平行,或者使第二晶体与第一晶体失谐,抑制高次谐波。

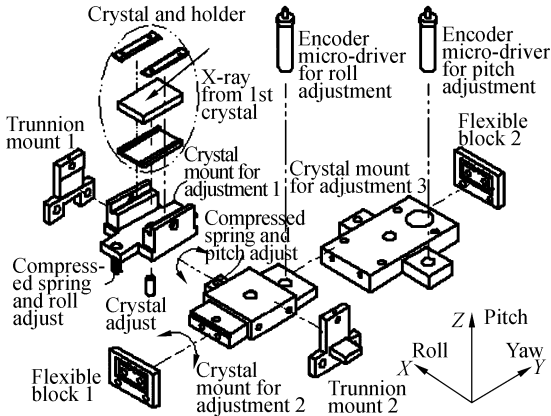


图 6 第二晶体运动微调装置

Fig. 6 Corrector assemble of the 2nd crystal

## 4 结 论

L 型联动机构已成功应用于国家同步辐射实

验室 U7B、U7C 光束线的双晶单色器,入射与出射光束高度差为 10 mm,调试状态良好,运行 Bragg 转角  $9\sim 32^\circ$ ,足以覆盖合肥光源 X 射线 4.1~12.4 keV 能量范围。机构结合了直角关系与耦合运动的特点,可实现波长快速选择,能量微区扫描,光斑空间输出位置固定。试验结果表明<sup>[17]</sup>,单色器在全程扫描范围内光斑漂移量远小于光斑尺度的 20%;扫描最小步程为  $0.18''$ ,第二晶体角度微调可达  $0.1''$  精度;由 U7B 光束线测试结果表明<sup>[18]</sup>,经过单色器分光后,其能量分辨率优于  $5\times 10^{-4}$ 。NSRL 即将进行 U7C 光束线改造、U7A 扩建的微聚焦成像光束线中单色器也将采用此联动机构,有如下方面的改进考虑:由于整个机构运行在超高真空环境中,运动部件真空处理方式可进一步提高,如采用固体润滑等;微驱动器运动频繁,且体积较大,可采用 PZT 元件<sup>[19-23]</sup>代替,形成闭环反馈系统实现自动调节,从而进一步优化结构,减小整个机构体积并提高运动精度与稳定性。

致谢:感谢中国科学院沈阳科学仪器中心赵殿明研究员、国家同步辐射实验室王峰和赵飞云工程师等在 L 型联动机构设计、制造与调试中所作的卓有成效的工作,以及实验室相关工作人员的配合与大力支持。感谢刘斌博士热情帮忙校对文稿以及愉快的讨论交流。

## 参考文献:

- [1] HART M, RODRIGUES A R D. Harmonics-free single-crystal monochromators for neutrons and X-rays [J]. *J. Appl. Cryst.*, 1978,11(4):248-253.
- [2] HRDY J. Fixed-exit channel-cut crystal X-ray monochromators for synchrotron radiation [J]. *Czech. J. Phys.*, 1989,39(3):261-265.
- [3] HRDY J. Harmonic-free and fixed-exit monolithic X-ray monochromator [J]. *Czech. J. Phys.*, 1990,40(4):361-366.
- [4] SPIEKER P, ANDO M, KAMIYA N. A monolithic X-ray monochromator with fixed-exit beam position [J]. *Nucl. Instr. Met.*, 1984, 222(1-2):196-201.
- [5] KAWATA H, ANDO M. A double crystal monochromator for the photon factory wiggler beamline [J]. *Nucl. Instr. Meth.*, 1986,246(1-3):368-372.
- [6] LEMONNIER M, COLLET O, DEPAUTEX C, et al.. High vacuum two crystal two crystal soft X-ray monochromator [J]. *Nucl. Instr. Meth.*, 1978,152(1):109-111.
- [7] GOLOVCHENKO J A, LEVESQUE R A, COWAN P L. X-ray monochromator system for use with synchrotron radiation sources [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1981,52(4):509-516.
- [8] COWAN P L, HASTINGS J B, JACH T, et al.. A UHV compatible two-crystal monochromator for synchrotron

- radiation [J]. *Nucl. Instr. Meth.*, 1983, 208(1-3):349-353.
- [9] KIRKLAND J P. A UHV-compatible fixed two/four crystal monochromator [J]. *Nucl. Instr. Meth. A*, 1990, 291 (1-2):185-191.
- [10] MASON W P, EMMEL G R, FEYZI F, *et al.*. A new double-crystal monochromator for UHV operation in the low to medium photon energy range [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, 67(9):3350-3351.
- [11] SHU D, TOELLNER T S, ALP E E. Modular overconstrained weak-link mechanism for ultraprecision motion control [J]. *Nucl. Instr. Meth. A*, 2001, 467-468(1):771-774.
- [12] CALIEBE W A, CHEUNG S, LENHARD A, *et al.*. Fixed exit monochromator with fixed rotation axis [C]. *AIP Proceedings*, 2004, 705:643-646.
- [13] XU C, ZHAO W, PAN G, *et al.*. A double-crystal monochromator for EXAFS measurement at NSRL [J]. *Nucl. Instr. Meth. A*, 1998, 410(2):293-296.
- [14] SHU D, WANG M, LIU W, *et al.*. UHV compatible compact double-crystal monochromator at BEPC diffraction & scattering beamline 4B9A [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, 60(7):2054-2057.
- [15] 汤琦, 马健康, 周泗忠, 等. 弧矢聚焦双晶单色器设计[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(4):411-415.  
TANG Q, MA J K, ZHOU S ZH, *et al.*. Design of a sagittal focusing double crystal monochromator in synchrotron radiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4):411-415. (in Chinese)
- [16] MATSUSHITA T, ISHIKAWA T, OYANAGI H. Sagittal focusing double-crystal monochromator with constant exit beam height at the photon factory [J]. *Nucl. Instr. Meth. A*, 1986, 246(1-3): 377-379.
- [17] 王峰, 徐朝银, 潘国强, 等. 同步辐射双晶单色仪能量扫描[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(4):401-404.  
WANG F, XU CH Y, PAN G Q, *et al.*. Energy scanning of the double crystal monochromator at X-ray beamline [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4):401-404. (in Chinese)
- [18] 黄志刚, 董晓浩, 高飞, 等. X 射线衍射与散射光束线环面聚焦镜的面形精度与像差分析[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1):26-30.  
HUANG ZH G, DONG X H, GAO F, *et al.*. Slope error and aberration analysis for XRDS beamline toroidal focusing mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):26-30. (in Chinese)
- [19] 孙立宁, 孙绍云, 曲东升, 等. 基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1):55-59.  
SUN L N, SUN SH Y, QU D SH, *et al.*. Micro-positioning system based on PZT and its control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):55-59. (in Chinese)
- [20] 许晓慧, 鲁健, 朱龙洋, 等. 基于激光多普勒技术的 PZT 薄膜压电性能测试研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 658-663.  
XU X H, LU J, ZHU L Y, *et al.*. Measurement of piezoelectric properties of PZT films by laser Doppler technique [J]. *Opt. precision Eng.*, 2005, 13(6):658-663. (in Chinese)
- [21] 刘建芳, 杨志刚, 范尊强, 等. 压电直线精密驱动器研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1):65-72.  
LIU J F, YANG ZH G, FAN Z Q, *et al.*. Precise PZT linear step actuator[J]. *Opt. precision Eng.*, 2005, 13(1): 65-72. (in Chinese)
- [22] 赵宏伟, 刘建芳, 华顺明, 等. 压电型步进精密旋转驱动器[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3):305-310.  
ZHAO H W, LIU J F, HUA SH, *et al.*. Piezoelectric-type stepping precision rotary actuator[J]. *Opt. precision Eng.*, 2005, 13(3):305-310. (in Chinese)
- [23] 华顺明, 张宏壮, 程光明, 等. 压电薄膜型精密运动平台研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):635-640.  
HUA SH M, ZHANG H ZH, CHENG G M, *et al.*. Research on precise traveling positioning stage driven by piezoelectric bimorph[J]. *Opt. precision Eng.*, 2006, 14(4):635-640. (in Chinese)