

文章编号 1004-924X(2012)08-1765-07

基于圆柱凸轮的同轴变速传动机构

刘波^{1,2*}, 贾继强¹, 丁亚林¹, 苏东风¹, 张雷¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春, 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对常规传动方式在径向空间较小情况下难以实现同轴旋转运动的变速功能,提出了一种基于圆柱凸轮的同轴变速传动机构。以变焦镜头的结构为基础,结合使用两个圆柱凸轮,在主、从动凸轮上开出螺旋线槽,使从动凸轮螺旋线槽导程为主动凸轮螺旋线槽导程的 n 倍,从而实现速比为 n 的变速传动。对机构的传动效率和传动精度进行分析,得出主动凸轮螺旋线槽的螺旋升角与传动效率和传动精度的关系及相关规律。在实验室对机构的传动精度进行了测试,结果表明其速比精度在1.6%以内。此机构结构紧凑,能够自锁且精度较高。

关键词:圆柱凸轮;同轴传动机构;螺旋线导程;传动效率;传动精度

中图分类号:TH112.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1765

Coaxial transmission mechanism based on cylindrical cams

LIU Bo^{1,2*}, JIA Ji-qiang¹, DING Ya-lin¹, SU Dong-feng¹, ZHANG Lei¹

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

** Corresponding author, E-mail: liubo1985@gmail.com*

Abstract: As conventional transmission mechanism is difficult to realize coaxial rotation transmission in a narrow radial space, a coaxial transmission mechanism based on cylindrical cams is proposed. On the basis of the structure of a lens, the transmission mechanism is combined by two cylindrical cams, and one is initiative cam and the other is passive cam. Spiral slots are opened on the surface of both cams. When the spiral lead of the passive cam is n times that of initiative cam, the transmission mechanism can offer a transmission ratio of n . Transmission efficiency and transmission accuracy are analyzed and the relation between the angle of initiative cam's spiral slot and the transmission efficiency and transmission accuracy is discussed. An experiment is performed to test transmission accuracy, which shows the transmission ratio accuracy is less than 1.6%. Obtained mechanism has compact structure, high accuracy and can be locked automatically.

Key words: cylindrical cam; coaxial transmission mechanism; spiral lead; transmission efficiency; transmission accuracy

收稿日期:2012-04-18;修订日期:2012-06-08.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA701203)

1 引言

传动机构是指将动力机产生的机械能传送到工作机构的中间装置。以传递动力为主的传动称为动力传动,以传递运动为主的传动称为运动传动,后者对传动精度有较高要求。常见的传动方式有齿轮传动、链传动、带传动等。

在工程设计中常常需要在径向空间较小的场合实现同轴的变速传动。如对卡塞格林式光学系统的相机,主镜筒以角速度 ω 旋转作像移补偿时,为保证出射光线不变,反射镜应以主镜筒一半的角速度 $1/2\omega$ 旋转^[1]。由于相机空间和光学系统的限制,其径向空间很小,如果应用齿轮传动或带传动等传统方式,则需要 2 个轴系,先把运动由轴系 1 传递到轴系 2,然后由轴系 2 传回到轴系 1,这样径向尺寸大大增加,对于精密机械要求空间紧凑的场合较难实现。目前同轴变速较为常用的是行星齿轮传动。行星齿轮减速器具有结构紧凑、重量轻、效率高等优点,但其结构复杂,制造及安装误差会导致行星轮间载荷不均匀,同时其传动精度不高^[2-4],在上述狭小空间也较难实施,难以满足要求。

针对以上情况,本文设计了一种基于圆柱凸轮的同轴变速传动机构,并对其传动效率和传动精度进行了分析。凸轮机构是由机架、凸轮和从动件或从动系统组成的高副机构。适当地设计出凸轮的轮廓曲线,就可以使从动件得到各种预期的运动规律,而且机构简单紧凑。凸轮机构在各种机械,特别是自动机械和自动控制装置中有着广泛应用,而且随着数控技术的不断发展,其加工精度也不断提高^[5-7],在精密传动领域的应用也日益广泛^[8-10]。

2 变速机构的组成

2.1 变焦距镜头的结构

常用的变焦距镜头结构如图 1 所示,由凸轮、保持架、内筒、导钉等组成^[9-10]。凸轮圆柱面上开出一规律曲线的槽,保持架上开出直线导槽。当转动凸轮时,导钉沿着保持架的直线导槽移动,同时带动内筒按凸轮曲线的运动规律作直线运动。此过程是把凸轮的旋转运动转化成内筒的直线运动。

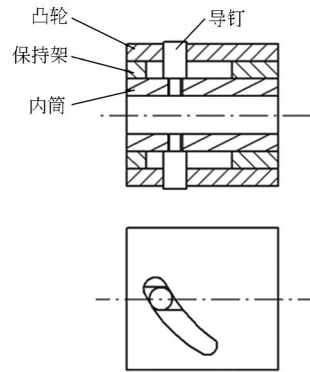


图 1 变焦距镜头结构

Fig. 1 Structure of zoom lens

2.2 变速机构的组成

变速机构是由变焦距镜头演化而来,用于实现同轴旋转运动的变速。如图 2 所示,变速机构主要由主动凸轮、从动凸轮、固定环、滑动环、导钉组件(为了使受力均匀,导钉在每个凸轮上对称设置 2 个)、压圈 1、压圈 2 等组成。主动凸轮和从动凸轮上有螺旋线凸轮槽。固定环安装在固定座上,其上有直线导槽。主动凸轮作旋转运动时,导

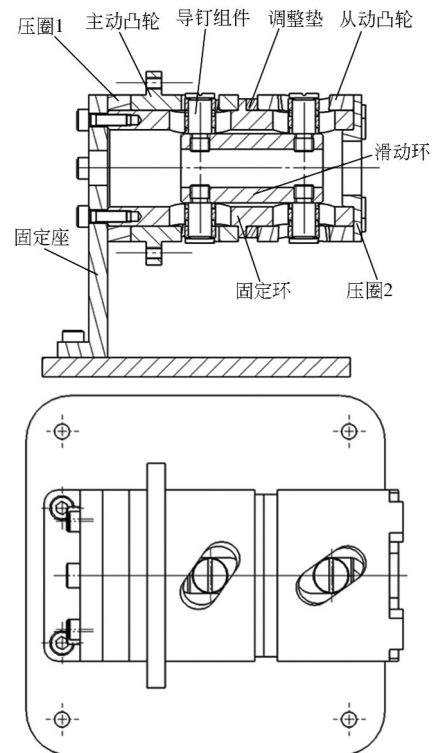


图 2 变速机构结构

Fig. 2 Structure of transmission mechanism

钉组件沿着主动凸轮上的螺旋线凸轮槽滑动,同时导钉组件被限制在固定环上的直线导槽内作直线运动,从而带动滑动环作直线运动。滑动环带动从动凸轮上的导钉组件沿固定环上的直线导槽作直线运动,同时在从动凸轮上的螺旋线凸轮槽上滑动,从而带动从动凸轮作旋转运动。整个过程即把主动凸轮的转动转化为滑动环的直线运动,再把滑动环的直线运动转化为从动凸轮的转动。当从动凸轮上螺旋线导程 P_2 为主动凸轮上螺旋线导程 P_1 的 n 倍时,则从动凸轮的转速为主动凸轮的 $1/n$,从而实现变速功能。

3 传动效率与传动精度分析

传动机构的传动效率与传动精度直接影响到传动机构的传动效果。

3.1 传动效率分析

图 3 所示为主动凸轮和从动凸轮中的导钉组件的受力情况。

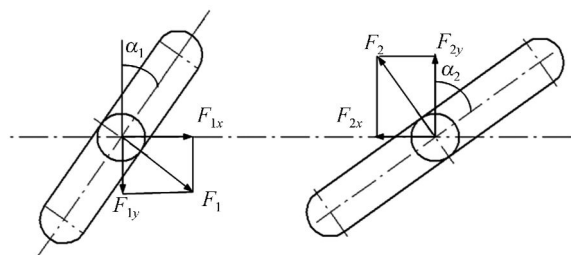


图 3 导钉组件受力分析
Fig. 3 Force analysis of driving pin

主动凸轮端的输入功 W_1 和从动凸轮端的输出功 W_2 分别为:

$$\begin{aligned} W_1 &= M_1 \times \beta_1 \\ W_2 &= M_2 \times \beta_2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: M_1 为主动凸轮端输入力矩, M_2 为从动凸轮端输出力矩, β_1 为主动凸轮转角, β_2 为从动凸轮转角。设机构的传动比为 n , 则:

$$\beta_1 = n \times \beta_2 \quad (2)$$

M_1, M_2 分别为:

$$\begin{aligned} M_1 &= (F_{1y} + \mu \times F_{1x}) \times D \\ M_2 &= (F_{2y} - \mu \times F_{2x}) \times D \end{aligned} \quad (3)$$

式中: μ 为主从动凸轮与其接触件的摩擦系数, D 为主从动凸轮的外径。 $F_{1x}, F_{1y}, F_{2x}, F_{2y}$ 如式(4)所示:

$$\begin{aligned} F_{1x} &= F_1 \times \cos \alpha_1 \\ F_{1y} &= F_1 \times \sin \alpha_1 \\ F_{2x} &= F_2 \times \cos \alpha_2 \\ F_{2y} &= F_2 \times \sin \alpha_2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: α_1, α_2 分别为主动凸轮和从动凸轮的螺旋线凸轮槽的螺旋升角。由于机构传动比为 n , 则从动凸轮上螺旋线导程 P_2 为主动凸轮上螺旋线导程 P_1 的 n 倍, 而:

$$\begin{aligned} P_1 &= \pi D \times \tan \alpha_1 \\ P_2 &= \pi D \times \tan \alpha_2 \end{aligned} \quad (5)$$

则:

$$\tan \alpha_2 = n \times \tan \alpha_1 \quad (6)$$

由于导钉组件固连于滑动环上, 根据滑动环轴向受力平衡可知:

$$F_{1x} = F_{2x} \quad (7)$$

综合式(1)~(7)得到机构的传动效率为:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W_2}{W_1} = \frac{(F_{2y} - \mu \times F_{2x})}{(F_{1y} + \mu \times F_{1x})} \times \frac{1}{n} = \\ &= \frac{\tan \alpha_2 + \mu}{\tan \alpha_1 - \mu} \times \frac{1}{n} = \frac{\tan \alpha_1 + \mu/n}{\tan \alpha_1 - \mu} \quad (8) \end{aligned}$$

图 4 为速比 n 为 2, 不同摩擦系数 μ 时, 主动凸轮螺旋升角 α_1 与机构传动效率的关系。图中效率小于 0 的区域为机构的死锁区。从图中可以看出以下几个规律:

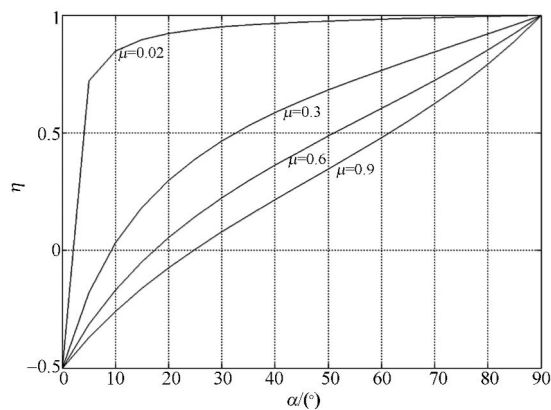


图 4 $n=2$ 时的 $\eta-\alpha_1$ 曲线图
Fig. 4 $\eta-\alpha_1$ curve with $n=2$

- (1) 主动凸轮螺旋升角 α_1 越大, 机构传动效率越高。
- (2) 摩擦系数 μ 越大, 机构的死锁区越大。
- (3) 摩擦系数 μ 越小, 机构传动效率随主动凸轮螺旋升角 α_1 的增大提高的越慢。因而把主从动凸轮与其接触件间加入精密滚珠, 变滑动摩擦

为滚动摩擦^[9],对提高机构传动效率很有意义。

图 5 为 $\mu=0.25$,在不同速比 n 下,主动凸轮螺旋升角 α_1 与机构传动效率的关系。从图中可以看出以下几个规律:

(1)速比 n 越大,机构的死锁区越小。

(2)对于互为倒数的速比(即主从动方向互换,如图中的 $n=2$ 和 $n=0.5$),存在 3 个区域:分别为双向死锁区,单向死锁区和双向运行区。当 α_1 处于双向死锁区时,无论从主动方向输入动力还是从从动方向输入动力,机构都不能运动,设计时应避免 α_1 在此区域。当 α_1 处于单向死锁区时,从主动方向输入动力时机构能够运动,而从从动方向输入动力时机构不能运动(类似于蜗轮蜗杆机构的自锁)。对于需要自锁的机构, α_1 应设计在此区域内。当 α_1 处于双向运行区时,无论从主动方向还是从从动方向输入动力时机构都能运动。

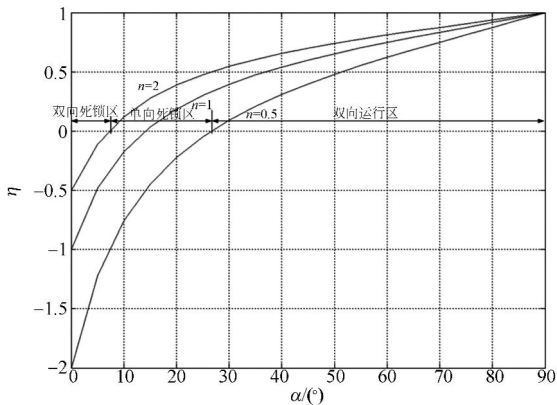


图 5 $\mu=0.25$ 时的 $\eta-\alpha_1$ 曲线图

Fig. 5 $\eta-\alpha_1$ curve with $\mu=0.25$

3.2 传动精度分析

导钉组件与螺旋线凸轮槽之间的间隙,主从动凸轮与其接触件间的间隙直接影响机构的传动精度。

如图 6 所示,主从动凸轮槽与导钉组件的间隙分别为 ΔB_1 和 ΔB_2 。用于弥补 ΔB_1 间隙主动凸轮旋转需要经过的弧长 ΔC_1 为:

$$\Delta C_1 = \frac{\Delta B_1}{\sin \alpha_1} = \frac{D}{2} \times \Delta \beta_1, \quad (9)$$

式中 $\Delta \beta_1$ 为主动凸轮对应旋转的角度,则:

$$\Delta \beta_1 = \frac{2\Delta B_1}{D \sin \alpha_1}, \quad (10)$$

用于弥补 ΔB_2 间隙导钉组件需要经过的距

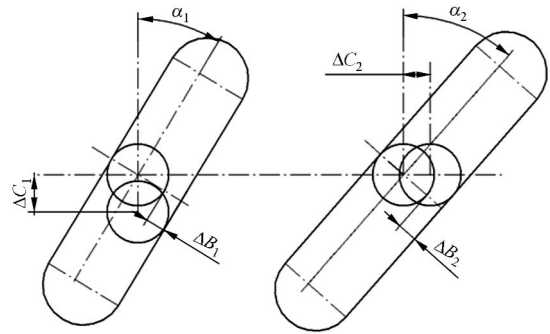


图 6 导钉组件与凸轮槽之间的间隙

Fig. 6 Gap between driving pin and cam slot

离 ΔC_2 为:

$$\Delta C_2 = \frac{\Delta B_2}{\cos \alpha_2} = \frac{\Delta \beta_2}{2\pi} \times P_1, \quad (11)$$

式中 $\Delta \beta_2$ 为主动凸轮对应旋转的角度,则:

$$\Delta \beta_2 = \frac{2\Delta B_2}{D \tan \alpha_1 \cos \alpha_2}. \quad (12)$$

如图 7 所示,主动凸轮和从动凸轮与其接触零件的间隙为 $\Delta B_1'$ 和 $\Delta B_2'$,为了弥补 $\Delta B_1'$ 和

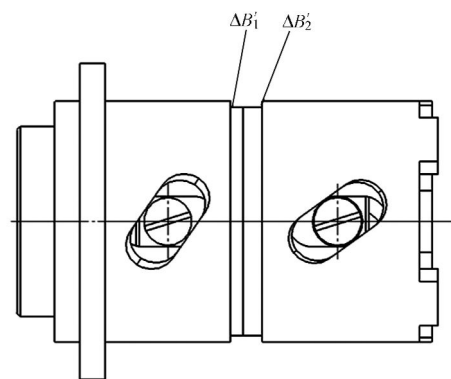


图 7 主从动凸轮与其接触件的间隙

Fig. 7 Gap between cams and their contacts

$\Delta B_2'$ 对应主动凸轮需要的转角分别为 $\Delta \beta_1'$ 和 $\Delta \beta_2'$,则:

$$\Delta \beta_1' = \frac{\Delta B_1'}{P_1} \times 2\pi = \frac{2\Delta B_1'}{D \tan \alpha_1} \quad (13)$$

$$\Delta \beta_2' = \frac{\Delta B_2'}{P_1} \times 2\pi = \frac{2\Delta B_2'}{D \tan \alpha_1}$$

综合式(9)~(13),机构由于间隙所引起的转角误差为:

$$\Delta \beta = \Delta \beta_1 + \Delta \beta_2 + \Delta \beta_1' + \Delta \beta_2' = \frac{2\Delta B_1}{D \sin \alpha_1} + \frac{2\Delta B_2}{D \tan \alpha_1 \cos \alpha_2} + \frac{2\Delta B_1'}{D \tan \alpha_1} + \frac{2\Delta B_2'}{D \tan \alpha_1}. \quad (14)$$

图 8 所示 ΔB_1 、 ΔB_2 、 $\Delta B_1'$ 、 $\Delta B_2'$ 都为 0.01 mm

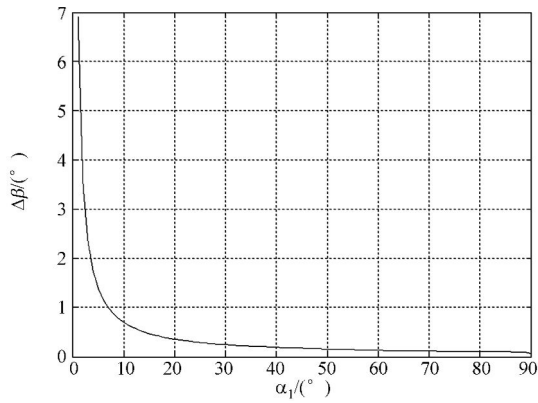


图 8 $\Delta\beta-\alpha_1$ 曲线图

Fig. 8 $\Delta\beta-\alpha_1$ curve

时, $\Delta\beta$ 随主动凸轮螺旋升角 α_1 的变化趋势, 可以看出, α_1 越大, 机构的转角误差越小。此转角误差可以看作是传动机构的系统误差, 此误差造成机构的空回, 如图 9 所示。

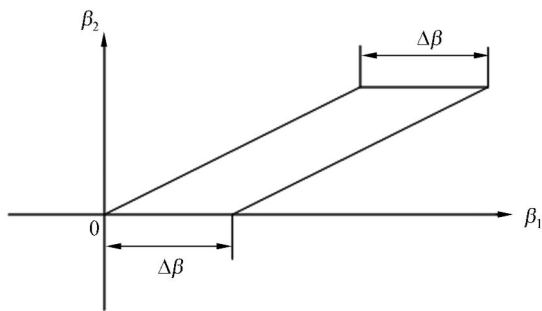


图 9 机构空回图

Fig. 9 Backlash of transmission mechanism

4 实验室精度测试

在实验室对机构的精度进行了测试。测试的机构速比 $n=2$, 主动凸轮螺旋升角 $\alpha_1=35^\circ$, 从动

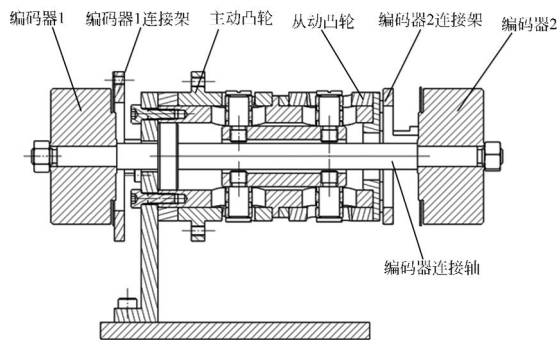


图 10 实验装置剖面图

Fig. 10 Sketch of experiment setup

凸轮螺旋升角 $\alpha_2=54.47^\circ$ 。试验装置的剖面图如图 10 所示, 实物图如图 11 所示, 图中采用的是 16 位绝对式编码器, 测得的结果如表 1 所示。

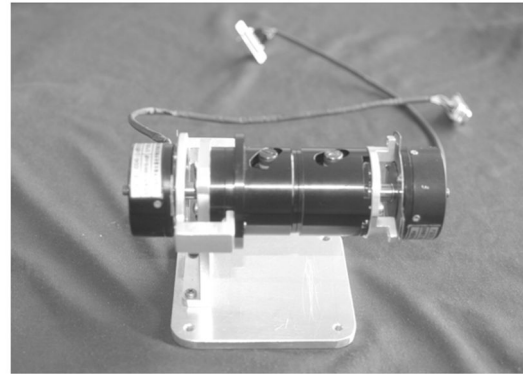


图 11 实验装置实物图

Fig. 11 Photo of experiment setup

表 1 传动精度测试结果

Tab. 1 Test results of transmission accuracy

主动凸轮转角 / (码值)	从动凸轮转角 / (码值)	速比 n	与理论速比 2 的差值	速比误差 / %
170	84	2.024	0.024	1.2
207	104	1.990	-0.010	-0.5
151	76	1.987	-0.013	-0.65
221	109	2.028	0.028	1.4
231	116	1.991	-0.009	-0.45
322	161	2	0	0
349	174	2.006	0.006	0.3
266	135	1.970	0.030	1.5
207	102	2.029	0.029	1.45
327	166	1.970	0.030	1.5
317	156	2.032	0.032	1.6

从表中可以看出, 系统最大速比误差为 1.6%。

5 结 论

为了解决常规传动方式在径向空间较小情况下难以实现同轴旋转运动的变速功能, 提出了一种基于圆柱凸轮的同轴变速传动机构。通过 2 个圆柱凸轮结合使用, 在主、从动凸轮上开出螺旋线槽, 通过设计 2 个螺旋线槽的导程实现固定的速比。对机构的效率和传动精度进行分析, 得出了

主动凸轮螺旋线槽的螺旋升角与传动效率和传动精度的关系和相关规律。在实验室对机构的传动精度进行了测试,结果表明其速比精度在 1.6%

以内。此机构优点在于结构紧凑,工作可靠,能够自锁,传动精度较高,在精密传动领域有较大的应用价值。

参考文献:

- [1] PARTYNSKI A J, LAKE C, BERAN S R, *et al.*. *Dual Band Framing Reconnaissance Camera* [P]. US:66904094, 2004.
- [2] 蒋仁科. 同轴双输出行星齿轮减速器研发设计及分析[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
JIANG R K. *R&D and Analysis of Coaxial Planetary Gear Transmission with Dual Power Output* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- [3] 陈磊. 滤波齿轮传动精度研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2009.
CHEN L. *Study on Transmission Accuracy of Filtering Gear Reducer* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- [4] ZHU B, QIN W, LIU J, *et al.*. Simulation and analysis of dynamical transmission precision of 2K-V cycloid pin gear reducer based on multi-body system dynamics [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 308-310:2205-2210.
- [5] 任春野. 凸轮轮廓曲线的数控加工[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(6):83-86.
REN CH Y. NC milling of cam contour curve [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(6):83-86. (in Chinese)
- [6] 武海滨. 圆柱凸轮的三维参数化设计及数控加工编程[J]. *机械设计与制造*, 2010, 6:213-214.
WU H B. 3D parameterized design and NC programming of cylindrical cams [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010, 6:213-214. (in Chinese)
- [7] YUAB L L, JUI P H, JIAN H C. Roller guide design and manufacturing for spatial cylindrical cams [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008, 38:142-148.
- [8] 王智, 张立平, 李朝辉, 等. 传输型立体测绘相机的调焦机构设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1051-1056.
WANG ZH, ZHANG L P, LI CH H, *et al.*. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1051-1056. (in Chinese)
- [9] 王一凡, 薛育. 一种大口径高精度凸轮变焦机构的设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11):1756-1759.
WANG Y F, XUE Y. Design of heavy caliber and high precision cam-varifocal mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1756-1759. (in Chinese)
- [10] 王平, 张葆, 程志峰, 等. 变焦距镜头凸轮结构优化设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4):893-898.
WANG P, ZHANG B, CHENG ZH F, *et al.*. Optimal design of cam structure of zoom lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):893-898. (in Chinese)
- [11] 乔健, 曹立华, 崔爽, 等. 连续变焦距镜头结构设计及焦距实时输出分析[J]. *应用光学*, 2010, 31(4):521-524.
QIAO J, CAO L H, CUI SH, *et al.*. Mechanical design of zoom lens and analysis of its focal length [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4):521-524. (in Chinese)

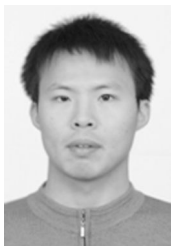
作者简介:



刘波(1985—),男,2006年、2008年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士学位,江西抚州人,助理研究员,博士研究生,主要从事航空相机结构设计方面的研究。E-mail:liubo1985@gmail.com



贾继强(1966—),男,吉林长春人,研究员,1987年于吉林工学院获学士学位,主要从事航空相机方面的研究。E-mail:jia-jiqiang@sohu.com



苏东风(1978—),男,河南睢县人,助理研究员,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事航空相机结构设计方面的研究。
E-mail: cc_sdf@126.com



张 雷(1982—),男,吉林长春人,助理研究员,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事航空相机结构优化设计研究。E-mail: zhangl_1982@163.com

导师简介:



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,博导,研究员,1987年于吉林工业大学获学士学位,1994年于东北大学获硕士学位,主要从事航空相机方面的研究。
E-mail: dingyl1964@sohu.com

●下期预告

用于火星探测的 AOTF 成像光谱仪设计

赵慧洁,程 宣,张 颖

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 教育部精密光机电一体化技术实验室,北京 100191)

面向火星探测应用,设计研制了一种基于声光可调谐滤波器(AOTF)原理的成像光谱仪地面原理样机。该样机由前置光机系统和后置电子学系统组成,采用消色差远心光路的光学系统结构,波段为550~1 000 nm,光谱分辨率为0.9~4.0 nm。在电子学系统中引入可编程片上系统技术,并设计了新型SpaceWire高速总线接口用于数据传输。样机在实验室定标的基础上,搭载在模拟火星探测器上进行了成像试验。试验结果表明:样机成像质量良好,通过与ASD光谱仪比对测量的一致性检验,光谱测量准确可靠,两者数据匹配精度超过96%。设计的SpaceWire接口实现了100 Mbps数据率的稳定传输,满足设计指标25Mbps的要求。样机的研制为AOTF成像光谱技术在火星遥感探测领域的应用奠定了技术基础。