

文章编号:1000-582X(2008)08-0859-05

# 空间二自由度连杆机构设计

周 忆,董元伟,何 洁,屠 凯

(重庆大学 机械工程学院,重庆 400030)

**摘 要:**应用 ADAMS 分析软件的相关模块,建立某空间二自由度连杆机构的三维模型,进行运动分析和仿真,分析表明该机构能满足设计要求,为机构重要部件的设计和控制提供了基础;同时,对影响机构运动精度的主要因素进行分析和设计,结果表明机构中两脚长度的误差灵敏度远大于其它设计变量的灵敏度,因此,双脚架机构的精度设计是达到总体精度的关键,这为机构的设计、制造、安装以及控制提供了可靠的理论依据。

**关键词:**空间机构;运动仿真;精度设计

**中图分类号:**TH113.2

**文献标志码:**A

## Design of a 2-DOF spatial linkage mechanism

ZHOU Yi, DONG Yuan-wei, HE Jie, TU Kai

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** A 3D-model of a 2-DOF spatial linkage mechanism was built using ADAMS. Kinematic analysis and simulation of the model were performed. The analysis results show that this mechanism meets the design requirements, which provides the basis for further design and control of the mechanism. The main factors that have an impact on mechanism precision subsequently were analyzed and designed. The results show that the sensitivity of the two legs' lengths ranks higher than that of the other design variables. Therefore, the precision design of the bipod is the key point to achieve mechanism precision. The study provides a theoretical foundation for the design, manufacture, assembly, and control of the mechanism.

**Key words:** spatial mechanisms; kinematics simulation; precision design

若机构的各构件中至少有一个构件不在同一平面或相互平行平面内运动,则称之为空间机构。空间机构结构紧凑、运动灵活可靠,在机械、仪表等领域中得到了广泛的应用,因此对空间机构的运动分析相当重要<sup>[1-2]</sup>。常规的分析方法是图解法和解析法<sup>[3-4]</sup>。但是前者的设计精度低;后者的计算工作量大。对于一些复杂的空间机构设计,有时候用传统的方法甚至是不可能实现的。而在现代 CAD/CAE 等技术的支持下,复杂空间机构的设计不但可以实现,而且非常直观、便于修改,设计方法和思路也可

以随之而创新。笔者在运用现代 CAD/ CAE 技术,基于 ADAMS 分析软件,综合有关技术对某空间连杆机构进行了设计分析,取得了很好的效果。

## 1 空间二自由度连杆机构

### 1.1 机构简图

某大型物理实验设备中,要求设计一个操作平台,用于向密闭球形装置内部装入和取出进行物理参数诊断的设备。操作平台安装在球壳任意指定的舱门上,要求实现所搭载的诊断设备中心对球心的

收稿日期:2008-03-03

基金项目:教育部重点科技资助项目(01146)

作者简介:周忆(1964-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事机电系统设计与分析研究,(E-mail)kohhy@163.com。

精确定位(自动准直),以使诊断设备中心对准放置于球心的靶点,定位精度为 $\pm 25 \mu\text{m}$ 。分析可知该操作平台对准目标靶点的调整关键,是实现 $X$ 、 $Y$ 轴(坐标系的确定见图2)的精密转动(无姿态要求),为此,设计了如图1所示的可调双脚架和十字铰组成的空间机构。十字铰安装于舱门上,其中目标靶点到十字铰的距离等于球体半径。采用十字铰是为了使机构仅仅沿着 $X$ 、 $Y$ 轴转动,而不能绕其 $Z$ 轴旋转。调节双脚架两脚的长度即可实现对其端部所装诊断设备位置的调整,双脚架两脚长度的调节可以采用伺服电机驱动精密滚珠丝杆副或电液伺服机构来实现。

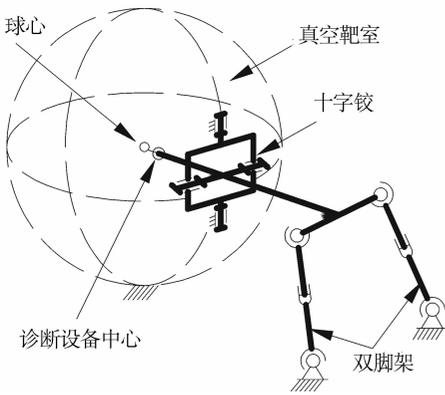


图1 机构简图

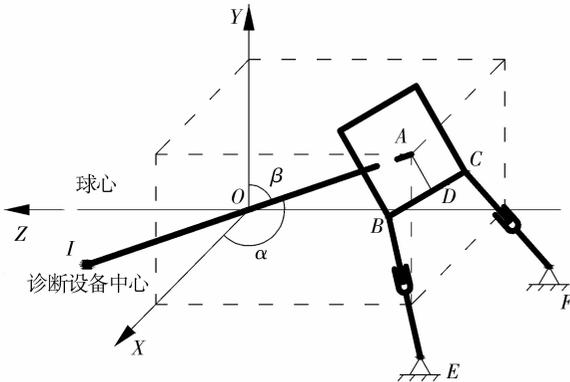


图2 数学模型

分析计算得知此机构的自由度为2,因此该机构为空间二自由度连杆机构。为了讨论双脚架两脚长度变化与前端诊断设备中心点的关系,即求得机构的正、逆解,实现对双脚架两脚长度控制,并对该机构进行运动学和动力学分析,以确定影响其调整精度的关键因素,首先建立了该机构的数学模型和三维分析模型。

## 1.2 机构数学模型和三维分析模型

以球壳和机构轴线的交点为坐标原点,建立图

2所示的机构数学模型(设 $B$ 、 $C$ 两处球铰关于 $Z$ 轴对称,轴线 $AI$ 垂直于平面 $ABC$ )。假设某一时刻,诊断设备中心 $I$ 在位置 $(X, Y, (R^2 - X^2 - Y^2)^{\frac{1}{2}})$ ,设 $IO$ 和 $OA$ 长度分别为 $R$ 和 $r$ ,则 $A$ 点坐标为 $(-rX/R, -rY/R, -r(R^2 - X^2 - Y^2)^{\frac{1}{2}}/R)$ 。

由空间几何可知 $A$ 点 $(X_A, Y_A, Z_A)$ 和 $B$ 、 $C$ 两点坐标的关系为

$$X_B = X_A + m \frac{\sqrt{Y_A^2 + Z_A^2}}{\sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}}, \quad (1)$$

$$X_C = X_A - m \frac{\sqrt{Y_A^2 + Z_A^2}}{\sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}}, \quad (2)$$

$$Y_B = Y_C = Y_A - n \frac{\sqrt{X_A^2 + Z_A^2}}{\sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}}, \quad (3)$$

$$Z_B = -\sqrt{r^2 + m^2 + n^2 - X_B^2 - Y_B^2}, \quad (4)$$

$$Z_C = -\sqrt{r^2 + m^2 + n^2 - X_C^2 - Y_C^2}. \quad (5)$$

根据两点间距离公式,代入相应参数,得双脚架两脚长度为

$$l_{BE} = \sqrt{(X_B - X_E)^2 + (Y_B - Y_E)^2 + (Z_B - Z_E)^2} = \left\{ \left( \frac{m\sqrt{R^2 - X^2}}{R} - \frac{rX}{R} - X_E \right)^2 + \left( \frac{rY}{R} + \frac{n\sqrt{R^2 - Y^2}}{R} + Y_E \right)^2 + \left[ (r^2 + m^2 + n^2 - \left( \frac{rX}{R} - \frac{m\sqrt{R^2 - X^2}}{R} \right)^2 - \left( \frac{rY}{R} + \frac{n\sqrt{R^2 - Y^2}}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + Z_E \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$l_{CF} = \sqrt{(X_C - X_F)^2 + (Y_C - Y_F)^2 + (Z_C - Z_F)^2} = \left\{ \left( \frac{m\sqrt{R^2 - X^2}}{R} + \frac{rX}{R} + X_F \right)^2 + \left( \frac{rY}{R} + \frac{n\sqrt{R^2 - Y^2}}{R} + Y_F \right)^2 + \left[ (r^2 + m^2 + n^2 - \left( \frac{rX}{R} + \frac{m\sqrt{R^2 - X^2}}{R} \right)^2 - \left( \frac{rY}{R} + \frac{n\sqrt{R^2 - Y^2}}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + Z_F \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

其中: $m = |BC|/2$ ,为 $B$ 、 $C$ 两处球铰距离的一半; $n = |AD|$ ,为点 $A$ 到直线 $BC$ 距离; $R = |IO|$ ,为诊断设备中心到坐标原点的距离; $r = |OA|$ ,为 $B$ (或 $C$ )处球铰到原点距离的 $Z$ 轴分量。

式(6)、(7)式表明双脚架两脚长度与诊断设备中心位置的关系,由此可见其关系极为复杂。若采

用人工求解并进行优化,困难很大,为此,采用运动和动力仿真功能强大的 ADAMS 软件进行分析。

ADAMS 软件是由美国 MSC 公司开发研制的集建模、求解等技术于一体的虚拟样机软件,其主要模块为 ADAMS/View 和 ADAMS/Solver,通过这两个模块,可以对大部分的机械系统进行分析和仿真<sup>[5]</sup>。根据 ADAMS 软件的建模及简化原则,建立如下参数化的三维模型,如图 3。



图 3 机构三维模型

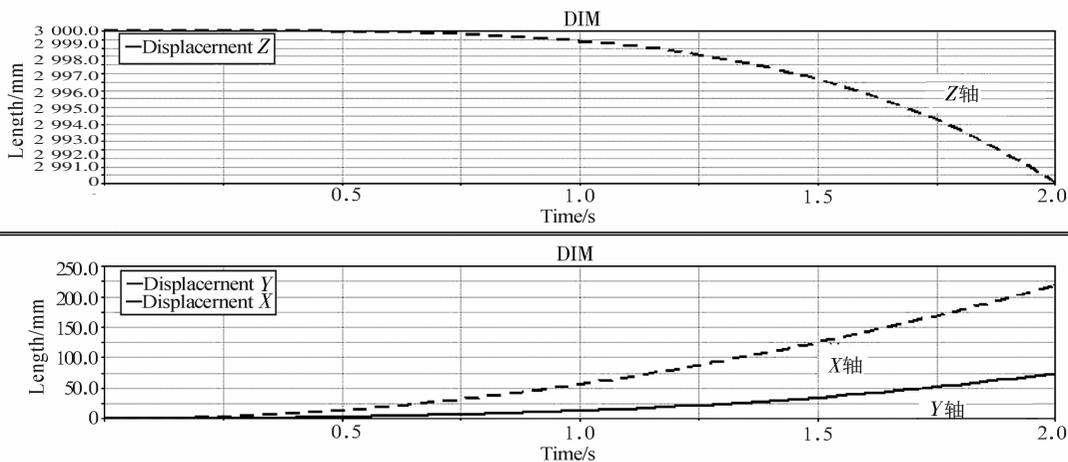
## 2 机构运动仿真及精度设计

### 2.1 运动仿真分析

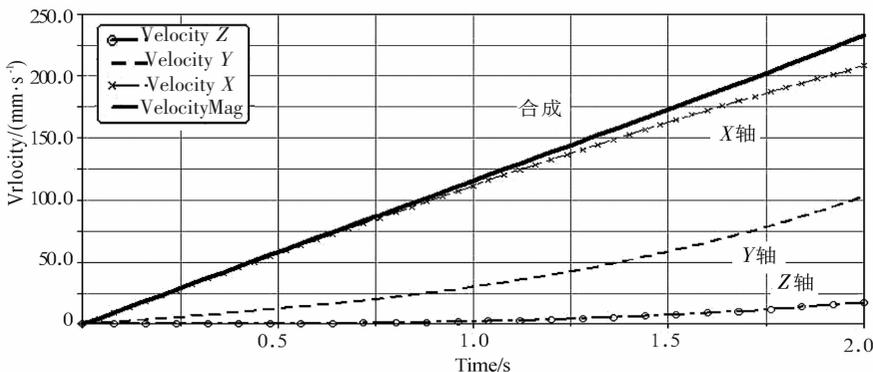
机构的运动分析,就是对机构的位移、轨迹、速度、加速度进行分析,根据原动件的运动规律,求解出从动件的运动规律<sup>[6-7]</sup>。应用上述建立的模型,进行了诊断设备中心点的运动仿真。当双脚架两脚长度分别按  $v=20t$  和  $s=40t^2$  ( $v, s, t$  分别代表速度、位移和时间)的规律变化的时候,诊断设备中心点的运动曲线如图 4。

图 4 直观地反映了诊断设备中心点的运动规律,表明调整双脚架两脚长度,可以使诊断设备中心按照一定的运动规律运动,并达到预期的效果。

而在实际工程中,一般是通过检测得知诊断设备中心点与目标靶点的误差,调整双脚架两脚长度来实现误差的消除,也即是进行机构的逆解。为此,以诊断设备中心的运动规律为输入,仿真反求双脚架两脚长度的变化规律。设诊断设备中心绕 X、Y 两轴做旋转运动,角加速度分别为  $\epsilon=0.05t$  和  $\epsilon=$



(a) 位移曲线



(b) 速度曲线

图 4 诊断设备中心运动仿真曲线

0.02t,在双脚架其中一脚长度不变的情况下,利用ADAMS提供的内部函数,可以得到另外一脚长度变化规律,如图5。

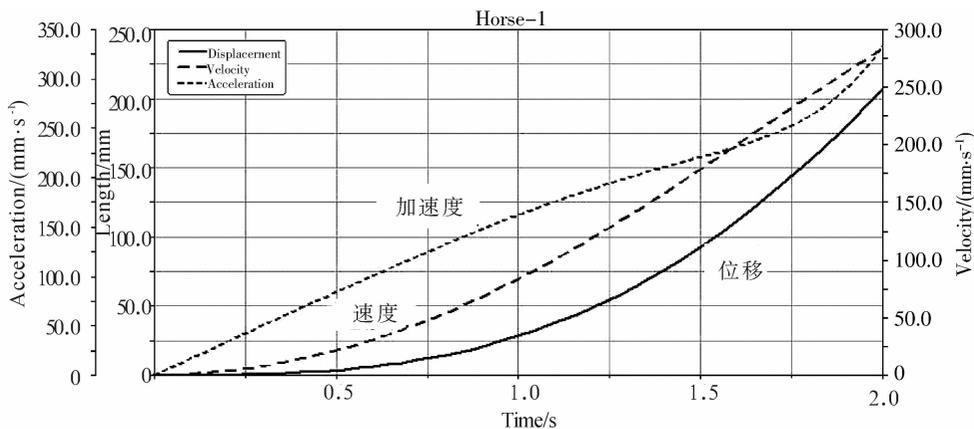


图5 双脚架运动仿真曲线

动曲线即是双脚架两脚长度调节装置选型(例如速度、加速度等性能要求)及其控制系统硬件、软件设计的可靠依据。

## 2.2 精度设计

由于物理实验要求准直定位精度高,组成机构的构件存在加工误差和装配误差,从而使运动存在不确定性,也就是其运动精度具有随机性<sup>[8-9]</sup>。合理的机构精度设计分析也是非常重要的。精度设计包括精度分析和精度综合两部分。精度分析由各零部件的公差得出终端平台的运动误差,精度综合由终端平台的允许误差反求出各零部件的设计、装配公差<sup>[10]</sup>。

经过分析可知以下因素对该机构的运动精度存在影响:

- 1)球铰间隙和装配误差;
- 2)螺旋副误差和驱动螺旋副的伺服电机转动误差;
- 3)各零件的尺寸误差。

为了使问题简化,对一些误差可以作等效或者综合处理,具体方法如下。

1)滚珠丝杆副、伺服电机、球铰间隙产生的误差可以综合处理为两脚长度误差  $\Delta l_{BE}$  和  $\Delta l_{CF}$ 。

2)B、C两处球铰装配误差,沿Z轴可以等效处理为r的误差,沿Y轴可以等效处理为n的误差,沿X轴可以等效处理为m的误差。

3)E、F两处球铰装配误差单独处理。

从上面分析中可以知道机构的精度存在多个影

图5中仿真曲线表明,通过实时检测调整点(设备中心点)与目标点的误差,给出调整点的运动参数,则可反求出双脚架两脚的长度变化曲线,这些运

响因素,而且它们对机构精度的影响是不相同的,由于各个零件的加工和装配难度也有所不同,因此进行精度分配的时候应用等影响法显然是不恰当的<sup>[11-12]</sup>,须考虑采用别的方法。在不同的位置,各个影响因素的误差对机构输出偏差的影响是不相同的<sup>[13-14]</sup>。机构设计的最终目的是实现诊断设备中心对球心的精确瞄准,因此,可以忽略调整过程中的输出偏差,重点考察机构处于理想瞄准状态时的情况,并对此时各个影响因素的灵敏度进行分析。此处所进行的灵敏度分析,就是将各个影响因素定为设计变量,寻求系统的输出和输入(设计变量)之间的有关系,研究对输出函数影响最大的设计变量,灵敏度分析应用ADAMS。ADAMS采用世界上广泛流行的多刚体系统动力学中的拉格朗日方程方法,自动建立系统的动力学方程。在开始仿真后,ADAMS软件通过分析初始条件,根据自动建立的动力学方程,分别求出设计变量取不同值时系统的输出值,建立设计变量和系统输出值之间的一一对应关系,从而求出设计变量在不同取值时所对应的平均斜率,亦即设计变量的灵敏度<sup>[15]</sup>。机构为空间对称机构,因此有理由认为B与C、E与F处球铰的装配误差以及两脚的长度误差对机构精度的影响分别是等效的。为了使问题简化,将B、E两处球铰的三维坐标和 $L_{BE}$ 的长度设为设计变量,应用ADAMS软件对各个变量进行设计研究(design study)。首先利用ADAMS软件提供的编辑器创建各个设计变量并确定其取值范围,然后利用相关命令分别对各个变量

进行设计研究,最终自动生成设计研究报告。报告如下表所示(其中, $L_{BE}$ 为双脚架长度, $X_E, Y_E, Z_E, X_B, Y_B, Z_B$ 分别为E、B两处球铰的三维坐标,表1中用DV\_1至DV\_7分别代表上述7个变量)。

表 1 各个变量灵敏度

| 变量名称 | 试验编号 | 理想取值/mm | 实验取值/mm  | 敏感度      |
|------|------|---------|----------|----------|
| DV_1 | 1    | 0       | -0.10    | -1.205 9 |
|      | 2    |         | -0.05    | -1.205 9 |
|      | 3    |         | 0        | -1.206 1 |
|      | 4    |         | 0.05     | 1.205 9  |
|      | 5    |         | 0.10     | 1.206 0  |
| DV_2 | 1    | 4 133   | 4 132.9  | 1.001 0  |
|      | 2    |         | 4 132.9  | 1.001 0  |
|      | 3    |         | 4 133.0  | 1.001 0  |
|      | 4    |         | 4 133.1  | 1.001 0  |
|      | 5    |         | 4 133.1  | 1.001 0  |
| DV_3 | 1    | -1 540  | -1 540.1 | -0.125 9 |
|      | 2    |         | -1 540.1 | -0.125 9 |
|      | 3    |         | -1 540.0 | -0.125 9 |
|      | 4    |         | -1 539.9 | -0.125 9 |
|      | 5    |         | -1 539.9 | -0.125 9 |
| DV_4 | 1    | 701     | 701.4    | -0.258 2 |
|      | 2    |         | 701.4    | -0.258 2 |
|      | 3    |         | 701.5    | -0.258 1 |
|      | 4    |         | 701.5    | -0.258 2 |
|      | 5    |         | 701.6    | -0.258 2 |
| DV_5 | 1    | 4 133   | 4 132.9  | -0.223 7 |
|      | 2    |         | 4 132.9  | -0.223 7 |
|      | 3    |         | 4 133.0  | -0.223 7 |
|      | 4    |         | 4 133.1  | -0.223 7 |
|      | 5    |         | 4 133.1  | -0.223 7 |
| DV_6 | 1    | -415    | -415.1   | 0.125 1  |
|      | 2    |         | -415.1   | 0.125 1  |
|      | 3    |         | -415.0   | 0.125 1  |
|      | 4    |         | -414.9   | 0.125 1  |
|      | 5    |         | -414.9   | 0.125 1  |
| DV_7 | 1    | 325     | 324.9    | 0.256 4  |
|      | 2    |         | 324.9    | 0.256 4  |
|      | 3    |         | 325.0    | 0.256 4  |
|      | 4    |         | 325.1    | 0.256 4  |
|      | 5    |         | 325.1    | 0.256 5  |

表 1 的各列中,第 1 列为各个设计变量的试验设计编号,第 2 列为各次试验设计中观测设备中心离目标靶点的最远距离,第 3 列为各次试验设计中

设计变量的取值(假设设计变量的误差为 $\pm 0.1$  mm),第 4 列为各次试验设计中设计变量的灵敏度。可以看出,两脚长度的灵敏度远大于其它变量的,也就是说两脚长度的误差对机构的精度影响最大。因此,在实际的精度分配中,可以以两脚长度误差为基准,确定其它零部件的设计装配精度。如设两脚长度误差为 $\Delta L$ ,则其它零件的设计和装配公差分配为 $k_i \cdot \Delta L$  ( $K_i > 1$ ,为各个变量的误差影响修正系数,视各个零件的制造、装配难度等具体情况而定)。由于前面式(6)、(7)已经给出了机构的输入(双脚架两脚长度)与输出(检测设备中心位置)关系式,因此可以用微分法求出机构的精度分析计算公式。将上述分配的公差代入精度分析计算公式,根据机构总体允许误差,即可反求出各部件误差的允许值,最终完成误差的设计分配。

### 3 结 论

运用 ADAMS 进行系统的设计和仿真,可以清楚的看到各构件的运动情况。通过反复修改和优化机构模型,在虚拟环境下模拟系统的运动,最终得到最优的设计。

在建立了机构各个参数之间的数学模型后,运用试验设计方法得出各个设计变量的灵敏度,表明该空间机构中,两脚长度的误差灵敏度远大于其它设计变量的灵敏度,因此,双脚架机构的精度是达到总体精度的关键,为机构的设计、制造、安装以及控制提供了可靠的理论依据。目前,基于上述设计分析的机构已进行了实际设计制造。

#### 参考文献:

- [1] 肖丽萍,魏文军,宋建农,等.空间机构连杆的运动分析[J].农机化研究,2006(3): 50-52.  
XIAO LI-PING, WEI WEN-JUN, SONG JIAN-NONG, et al. Kinematics characteristics analysis for links of spatial mechanisms[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(3): 50-52.
- [2] GLAZUNOV V A. Philosophy of construction and analysis of parallel-structure spatial mechanisms [J]. Mashinovedenie, 1995 (1): 14-19.
- [3] 侯红玲,赵永强,魏伟锋.基于 ADAMS 的平面杆机构运动分析与仿真[J].机械,2005, 32(6): 33-35.  
HOU HONG-LING, ZHAO YONG-QIANG, WEI WEI-FENG. Analyzing and simulating of 4-bar mechanism motion based on ADAMS [J]. Machinery, 2005, 32(6): 33-35.

(下转第 868 页)

- SHA-LI, et al. Application of mosaic crystal model in calculation of integrated reflectivity for KAP [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2005, 27(3): 306-308.
- [10] IMAZONO T, ISHINO M, KOIKE M, et al. Performance of a reflection-type polarizer by use of muscovite mica crystal in the soft X-ray region of 1 keV [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76: 23104.
- [11] PIKUZ T A, YA A. Bragg X-ray optics for imaging spectroscopy of plasma microsources[J]. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 1995, 5: 323-340.
- [12] NUBUSHI Y, NISHIMURA H, OCHIAI M. X-ray polarization spectroscopy for measurement of anisotropy of hot electrons generated with ultraintense laser pulse [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3699-3671.
- [13] 程新路, 刘小红, 杨向东, 等. 激光金等离子体谱中 3d-5f, 3p-5s 跃迁子阵计算[J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(1): 83-87.
- CHENG XIN-LU, LIU XIAO-HONG, YANG XIANG-DONG, et al. Calculation of the 3d-5f, 3p-5s subarrays in the spectrum of a laser produced plasmas of gold [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 1999, 11(1): 83-87.
- [14] WEINHEIMER J, AHMAD I, HERZOG O, et al. High-resolution X-ray crystal spectrometer/polarimeter at torus experiment for technology oriented research-94[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(6): 2566-2574.
- [15] PIKUZ S A, SHELKOVENKO T A, ROMANOVA V M, et al. High-luminosity monochromatic X-ray backlighting using an incoherent plasma source to study extremely dense plasmas [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1): 740-744.

(编辑 赵 静)

(上接第 863 页)

- [4] PAPEGAY Y A, MERLET J P, DANEY D. Exact kinematics analysis of car's suspension mechanisms using symbolic computation and interval analysis [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, 40(4): 395-493.
- [5] 陈立平, 张云清, 任卫群, 等. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] 沈庆云, 沈自林. 基于 UG 的四连杆机构的运动分析仿真[J]. *轻工机械*, 2006, 24(4), 74-75.
- SHEN QING-YUN, SHEN ZI-LIN. The analysis simulation for movement of four-link-lever mechanism based on UG[J]. *Light Industry Machinery*, 2006, 24(4), 74-75.
- [7] WEI H X, LIU M Z, WANG S Y, et al. Analysis of kinematics of humanoid running robot [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(13): 1321-1324.
- [8] 陆凤仪, 徐格宁. 平面连杆机构运动误差及可靠性分析[J]. *起重运输机械*, 2003, 4: 25-27.
- LU FENG-YI, XU GE-NING. Analysis of reliability and motion error of planar linkage[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2003, 4: 25-27.
- [9] SLOCUM A, MATTOON R L. Precision machine design [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1993, 46(3): B42.
- [10] 祁富燕, 张文辉, 晏丽琴. 机器零件的精度设计[J]. *甘肃科技纵横*, 2007, 35(6): 34-35.
- QI FU-YAN, ZHANG WEN-HUI, YAN LI-QIN. Precision design of machinery parts [J]. *Scientific & Technical Information of Gansu*, 2007, 35(6): 34-35.
- [11] 闫群, 袁夫彩, 王晓霞. 机械系统精度分配与评价方法的研究[J]. *林业机械与木工设备*, 2002, 30(8): 21-23.
- YAN QUN, YUAN FU-CAI, WANG XIAO-XIA. Research on the accuracy theory of mechanical system [J]. *Machinery & Woodworking Equipment*, 2002, 30(8): 21-23.
- [12] PRESCOTT B. Accuracy measurements for modern dispensing [J]. *SMT Surface Mount Technology Magazine*, 2006, 20(6): 36-38.
- [13] 葛正浩, 蔡小霞, 杨芙莲. 凸轮连杆机构的精度分析与综合[J]. *中国制造业信息化*, 2003, 32(2): 112-113.
- GE ZHENG-HAO, CAI XIAO-XIA, YANG FU-LIAN. Precision analysis and synthesis of cam-linkage mechanisms [J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2003, 32(2): 112-113.
- [14] BRIZARD M, MEGHARFI M, MAHE E. Design of a high precision falling-ball viscometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(2): 025109-1-025109-6.
- [15] 李军, 邢俊文, 覃文洁, 等. ADAMS 实例教程 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.

(编辑 赵 静)