

精密微动工作台

Precision Nanopositioner Stage

合肥工业大学机械与汽车工程学院 朱仁胜 沈 健 赵 韩

[摘要] 通过有限元法的应用,建立了微动工作台静、动特性的有限元分析模型,分析了柔性铰链在几个主要影响因素下的位移、应力分布以及固有频率和振型。应用正交试验设计,全面分析结构主要参数对微动工作台的静、动特性的影响。用逐步回归分析方法对数值计算结果进行回归,获得了微动工作台的性能及其结构尺寸的回归方程,并研制样机对其进行了验证。

关键词: 微动工作台 有限元分析 逐步回归分析

[ABSTRACT] A model of static and dynamic characteristic of nanopositioner stage is built with finite element method. The displacement, stress distribution, natural frequencies and vibration modes of flexible hinge effected by some main factors are analyzed. The influences of main structure parameters on static and dynamic characteristics of the nanopositioner stage are investigated by comprehensively using orthogonal test design. The regression equations of the performances, structure sizes of nanopositioner stage are obtained by using stepwise regression analysis on numerical results, and a prototype is manufactured for verification.

Keywords: Nanopositioner stage Finite element analysis Stepwise regression analysis

精密机械的产品质量依赖于精密的加工和检测,精密的加工和检测又依赖于高分辨率的工作台。目前,光学装置、精密机床和半导体加工机械要求达到亚微米级的定位精度。

以柔性铰链为导向机构的超高精度微动工作台已逐渐用于要求具有纳米级定位分辨率的技术中。柔性铰链具有有限转动、无间隙、无摩擦、无需润滑、结构紧凑、免装配和运动平稳等特点。因此,柔性铰链广泛应用在精密工程中,如高精加工的微动平台^[1]、分步重复印刷术^[2-3]、扫描隧道显微镜^[4]、光电显微镜^[5]、激光焊接^[6]、高精度相机^[7]等。

许多研究成果仅对柔性铰链的设计进行讨论:

Paros 和 Weisbord^[8]推导了刚弹性体圆弧形柔性铰链的设计计算公式;还有许多学者研究了柔性铰链的设计规则^[4]和方法^[9]。本文以柔性铰链的研究为基础,提出了一种纳米级 XY 微动工作台的运动原理。在 X 方向和 Y 方向上,柔性铰链传动机构采用了对称结构,在角转动方向上采用了双平行四杆机构,以电致伸缩器件为驱动器,较好地消除了不同运动方向的耦合位移,从而控制工作台的位置,在理论上实现了线性运动。通过有限元法的应用,建立了微动工作台静、动特性的有限元分析模型,分析了柔性铰链在几个主要影响因素下的位移、应力分布以及固有振动的频率和振型。应用正交试验设计全面分析主要结构参数对微动工作台的静、动特性的影响。用逐步回归分析方法对数值计算结果进行回归,获得微动工作台的性能和结构尺寸的回归方程,并研制样机进行验证。

1 微动工作台有限元模型的建立

微动工作台的主要结构参数有连杆长 L 、连杆宽 h 、铰链宽 t 、铰链厚度 b 、铰链弧线半径 r ,图 1 为微动工作台柔性铰链部分的结构参数。其中连杆宽 h 在数学建模时对微动工作台的性能影响不显著。取 $h=14\text{mm}$,使连杆相对于柔性铰链具有足够刚度,让变形集中在柔性铰链处。微动工作台材料选用 65Mn,材料的弹性模量为 200GPa ,泊松比为 0.288 ,密度为 7.9g/cm^3 ,屈服应力为 785MPa 。

为了建立微动工作台的数学模型,我们根据正交试验法设定微动工作台的结构参数和驱动载荷,在

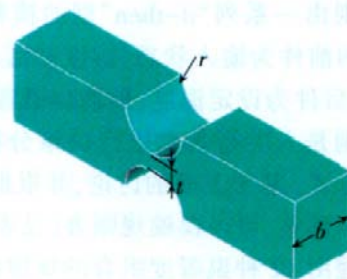


图 1 柔性铰链部分的结构参数

Fig.1 Structural parameters of flexible hinge

ANSYS7.0平台上,针对设定的每一组结构参数建立微动工作台的三维实体模型,进行网格划分;按设定的驱动载荷,进行仿真计算,取得微动工作台位移和应力的相应数据,再通过逐步回归分析的方法建立其数学模型^[10]。

1.1 微动工作台的平移部分

微动工作台在X和Y两个移动方向上的结构相同,所以只需对其中之一进行研究。图2为微动工作台的三维有限元部分模型,按正交试验法设定的微位移工作台平移部分的结构参数、驱动载荷F和用ANSYS软件计算得到的位移、和应力及固有频率 f_n 的数值见表1。

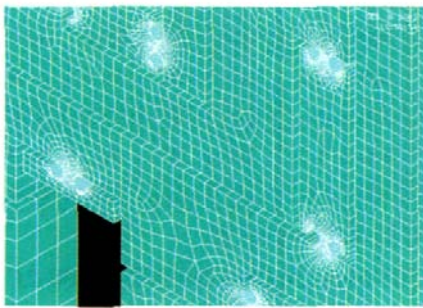


图2 三维实体有限元部分模型
Fig.2 Partial 3D FE model

表1 微动工作台平移部分的计算结果

序号	t/mm	F/N	r/mm	b/mm	L/mm	$\delta/\mu\text{m}$	σ/MPa	f_n/Hz
1	1.5	200	1	14	40	68.7	161	233
2	1.5	300	1.5	16	43	122.8	215	206
3	1.5	400	2	18	46	180.6	268	184.3
4	1.5	500	2.5	20	50	270.6	331	164.1
5	2.5	200	1.5	18	50	19.6	62.9	309.9
6	2.5	300	1	20	46	34.1	87.2	351.7
7	2.5	400	2.5	14	43	77.2	128	345.5
8	2.5	500	2	16	40	81.3	140	379.2
9	3	200	2	20	43	3.7	33.3	429
10	3	300	2.5	18	40	20.3	49.4	452
11	3	400	1	16	50	22.7	114	391.3
12	3	500	1.5	14	46	74.1	138	411.7
13	3.5	200	2.5	16	46	7.3	33.3	462
14	3.5	300	2	14	50	31.8	64.2	433.8
15	3.5	400	1.5	20	40	20	50.7	558.5
16	3.5	500	1	18	43	37.7	76.4	536.5

根据表1中的数据,取选入因子时显著性检验的F分布值为: $F_{0.25}(1, 15)=1.43$;剔除因子时显著性检验的F分布值为: $F_{0.25}(1, 16)=1.42$ 。按3种函数形态(一次多项式、二次多项式、三次多项式)进行逐步回归分析,求得回归方程后进行比较,选择其中可信度和精度高、简单的回归方程作为最优回归方程。

· 位移的最优回归方程:

$$\delta = -247.66t + 0.3037F - 27.96b + 36.14t^2 + 8.68r^2 + 0.9047b^2 + 0.0512L^2 + 420.69 \quad (\mu\text{m}) \quad (1)$$

· 最大应力的回归方程:

$$\sigma = -1016.40t + 0.3324F + 17.41r + 4.403L + 339.30t^2 - 39.18t^3 + 793.38 \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

· 固有频率的回归方程:

$$f_n = 150.35t + 0.0529F - 16.17r - 8.104L + 0.1047b^2 + 312.47 \quad (\text{Hz}) \quad (3)$$

其中铰链厚度b对最大应力的作用不显著,因而在回归方程(2)中不出现(从回归方程中剔除b)。

图3为平动位移、平动最大应力及平动第一阶固有频率的最优回归方程输出拟合图。

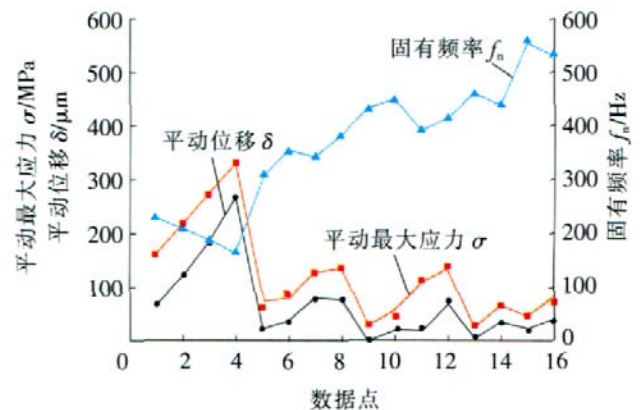


图3 平动位移、平动最大应力、平动固有频率最优回归方程输出拟合图

Fig.3 Simulation results of optimization regression equation output for translation displacement, maximum translation stress and translation natural frequency

根据求得的位移和最大应力的回归方程,可以对和与结构参数和驱动载荷之间的关系进行定量分析,作出任意两个参数与和之间关系的三维曲面图。作图时取的基本参数为: $t=2\text{mm}$, $F=200\text{N}$, $r=2\text{mm}$, $b=17.5\text{mm}$, $L=46\text{mm}$ 。图4为平动位移与任意2个参数之间的关系图,图5为平动应力与任意2个参数之间的关系图。

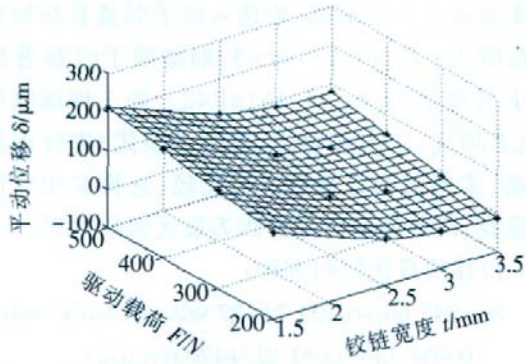


图4 平动位移 $\delta-f(F,t)$ 关系图
Fig.4 Relationship of translation displacement $\delta-f(F,t)$

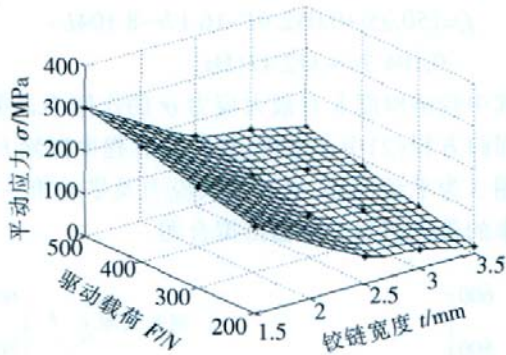


图5 平动应力 $\sigma-f(F,t)$ 关系图
Fig.5 Relationship of translation stress $\sigma-f(F,t)$

1.2 微动工作台的转动部分

按正交试验法设定的微动工作台转动部分的结构参数、驱动载荷 F 和用 ANSYS 软件计算得到的位移、应力及固有频率 f_n 的数值见表 2。

表 2 中的位移是转动部分平行四边形机构的连杆沿驱动力方向的位移, 由于这里的连杆做平移运动, 连架杆(转动工作台)的转角可以由公式 $\theta = \arcsin(\frac{t}{L})$ 近似求得。

按照与微动工作台平移部分一样的原则选择最优回归方程。

· 位移的最优回归方程:

$$= -287.72t + 0.1076F + 26.91r - 0.121L + 42.80t^2 - 0.20r^2 - 3.62 \times 10^{-9}F^3 + 0.00326L^3 + 376.39(\mu\text{m}), \quad (4)$$

· 最大应力的回归方程:

$$= 185.530t + 0.5171F - 75.56r + 487.96b + 626.70t^2 - 0.0002738F^2 + 57.55r^2 - 30.48b^2 + 0.1318L^2 - 71.33t^3 - 11.67r^3 + 0.62188b^3 - 804.84(\text{MPa}), \quad (5)$$

表 2 微动工作台转动部分的计算结果

序号	t/mm	F/N	r/mm	b/mm	L/mm	$\delta/\mu\text{m}$	σ/MPa	f_n/Hz
1	2	200	1	14	20	44.1	101	1356.5
2	2	300	1.5	16	23	81.1	152	1108.2
3	2	400	2	18	26	122.2	193	914.6
4	2	500	2.5	20	30	176.1	263	737
5	2.5	200	1.5	18	30	70.5	83.9	1055.3
6	2.5	300	1	20	26	37.8	92.2	1295.8
7	2.5	400	2.5	14	23	70.4	146	1247.7
8	2.5	500	2	16	20	54.6	141	1521.7
9	3	200	2	20	23	9.9	36.7	1585.8
10	3	300	2.5	18	20	20.3	51.9	1738.4
11	3	400	1	16	30	52.4	149	1327.1
12	3	500	1.5	14	26	45.9	163	1471.2
13	3.5	200	2.5	16	26	35.4	41.8	1550.7
14	3.5	300	2	14	30	63.1	121	1399.7
15	3.5	400	1.5	20	20	0.2	56.9	2208.8
16	3.5	500	1	18	23	10.6	87.8	1994.4

· 固有频率的回归方程

$$f_n = 505.69t - 126.08r - 169.90L + 0.0002F^2 + 2.2471L^2 + 0.018b^3 + 2909.13(\text{Hz}), \quad (6)$$

图 6 为转动部分位移、最大应力及固有频率的最优回归方程输出和数据点拟合图。

同平移部分一样, 作出任意 2 个参数与和之间关系的三维曲面图。作图时取的基本参数为: $t=3\text{mm}$, $F=200\text{N}$, $r=2\text{mm}$, $b=17.5\text{mm}$, $L=25\text{mm}$ 。图 7 为转动位移与任意两个参数之间的关系图, 图 8 为转动应力与任意两个参数之间的关系图。

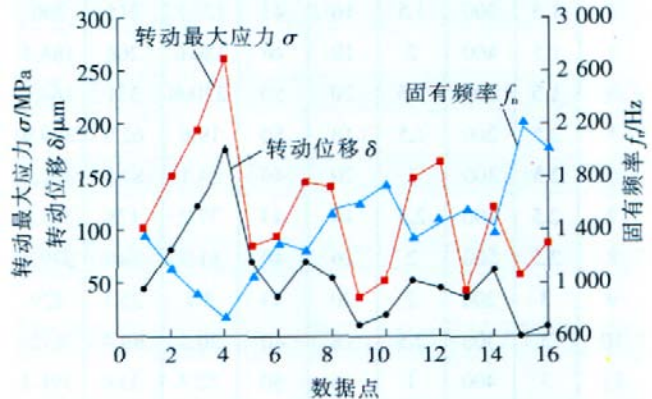
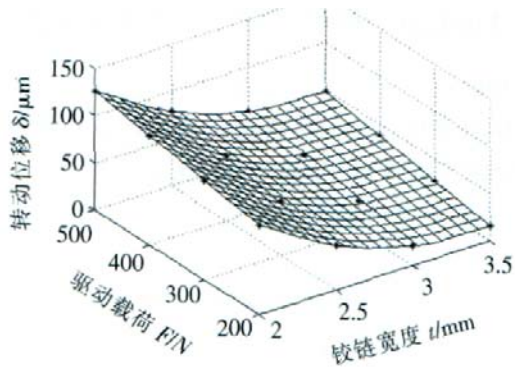
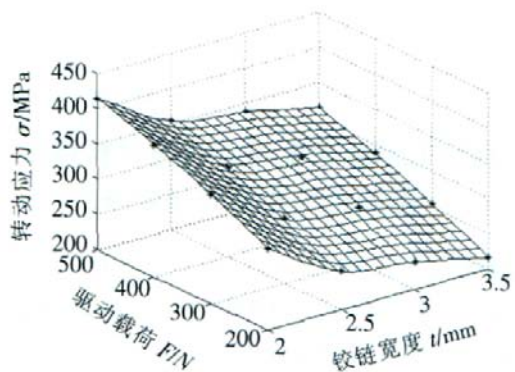


图 6 转动位移、转动最大应力及转动固有频率的最优回归方程输出拟合图

Fig.6 Simulation results of optimization regression equation output for rotational displacement, maximum rotational stress and rotational natural frequency

图7 转动位移 $\delta-f(F,t)$ 关系图Fig.7 Relationship of rotational displacement $\delta-f(F,t)$ 图8 转动应力 $\sigma-f(F,t)$ 关系图Fig.8 Relationship of rotational stress $\sigma-f(F,t)$

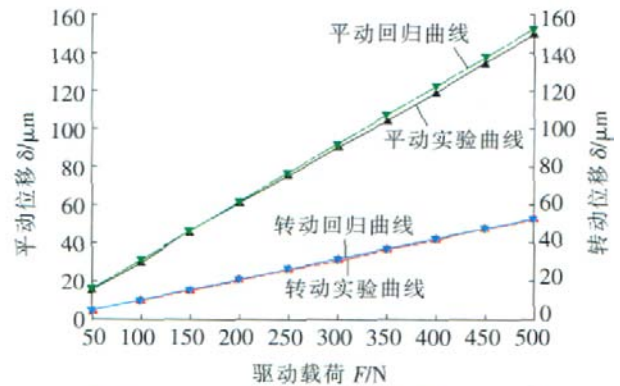
2 微动工作台数学模型的试验验证

我们研制了一台样机对建立的数学模型进行验证。

表3 样机平移、转动部分位移量的测量结果

驱动载荷/N	平移部分			转动部分		
	测量结果/ μm	回归计算/ μm	相对误差/%	测量结果/ μm	回归计算/ μm	相对误差/%
50	15.5	15.963	-2.99	5.0	4.818	3.64
100	29.5	31.147	-5.58	10.0	10.196	-1.96
150	46.5	46.331	0.363	15.0	15.568	-3.79
200	61	61.515	0.84	20.5	20.931	-2.10
250	75	76.699	-2.27	26.0	26.284	-1.09
300	90	91.883	-2.09	30.5	31.623	-3.68
350	104	107.067	-2.95	36.5	36.946	-1.22
400	119	122.251	-2.73	41.5	42.250	-1.81
450	135	137.435	-1.80	47.5	47.533	-0.06
500	149.5	152.619	-2.09	52.0	52.790	-1.52

证。样机平移部分(X、Y方向)的结构参数为: $t=2\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $b=17.5\text{mm}$, $L=46\text{mm}$; 转动部分(方向)的结构参数为: $t=3\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $b=17.5\text{mm}$, $L=25\text{mm}$ 。同时,我们做了一套直接挂砝码加载的加载装置,用来测量驱动载荷 F 与位移量 的对应关系。表3为样机平移、转动部分位移量 的测量结果与回归计算结果,图9为样机平移和转动部分的驱动载荷(F)-位移()测量曲线和回归计算曲线。

图9 样机平移部分和转动部分的 $F-\delta$ 测量曲线和回归计算曲线Fig.9 $F-\delta$ measurement curve and regression calculation curve for translation parts and rotational parts of the prototype

从表3可以看到,回归方程的计算结果与测量结果比较接近,这说明仿真计算和试验建模是成功的。

3 结束语

(1) 本课题采用有限元法对微动工作台进行研究,打破了常规的设计理念(一般是昂贵的),充分体现了计算机辅助工具在设计过程中的应用,发展了一种虚拟实验方法,可以根据参数和条件的改变,仿真出不同的模型和环境,从而作出正确的判断。

(2) 运用正交试验法设定试验参数,通过逐步回归分析得出有效的数学模型,进而定量地分析微动工作台的设计参数和影响因素,为微动工作台设计提供基本依据。

(3) 绘制了微动工作台位移和应力指标的三维曲面图,定性地说明了各影响因素对位移影响的大小。

(4) 通过对微动工作台的特性的仿真,并通过正交试验法的仿真计算,达到控制和优化固有频率、位移、应力和驱动载荷以得到理想的响应和位移,并研

制样机验证了仿真结果。

参 考 文 献

- [1] Furukawa Y, Moronuki N. Development of ultra precision machine tool made of ceramics. Ann CIRP, 1986(35): 279-282.
- [2] Ryu J W, Lee S Q, Gweon D G, et al. Inverse kinematic modeling of a coupled flexure hinge mechanism. Journal of Mechatronics, 1999(9): 657-674.
- [3] Ragulskis K M, Arutunian M G, Kochikian A V, et al. A study of fillet type flexure hinges and their optimal design. Vibration Engineering, 1989(22): 447-452.
- [4] Xu W, King T G. Flexure hinges for piezo-actuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy and stress considerations. Precision Engineering, 1996, 19(1): 4-10.
- [5] Ryu J W, Gweon D G. Error analysis of a flexure hinge mechanism induced by machining imperfection. Precision Engineering, 1997(21): 83-89.
- [6] Lobontiu N, Paine J S N, Garcia E, et al. Design of symmetric conic-section flexure hinges based on closed-form compliance equations. Mechanism and Machine Theory, 2002(37): 477-498.
- [7] Peterson R E. Stress concentration factors. New York: Wiley, 1974.
- [8] Pilkey W D. Peterson's stress concentration factors. New York: Wiley, 1997.
- [9] Awabdy B A, Shih W C, Auslander D M. Nanometer positioning of a linear motion stage under static loads. IEEE Trans Mechatronics, 1998,3(2):113-119.
- [10] 白新桂. 数据分析与试验优化设计. 北京: 清华大学出版社, 1986.

(责编 钟元)

(上接第 81 页)

参 考 文 献

- [1] Wieland P O. Living together in space: the design and operation of the life support systems on the international space station. NASA/TM - 1998 - 206956/VOL1, 1998, 104-116, 229-245.
- [2] 刘顺波. 房间空调器动态性能与智能化控制研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1999, 20.
- [3] Ernst Messerschmid, Reinhold Bertrand. Space stations systems and utilization. Springer, 1999,184-204.
- [4] Man- Systems Integration Standards. NASA- STD- 3000. NASA Johnson Space Center. Houston. 1995.
- [5] 张曾科. 模糊数学在自动化技术中的应用. 北京: 清华大学出版社, 1997.

(责编 钟元)

Timken® 轴承, 新舟 60 的安全承托

2008 年 5 月 21 日, 铁姆肯公司宣布, 其为西安航空制动科技有限公司特别定制的起落机轮轴承已成功应用于新舟 60 型(MA- 60) 涡桨支线飞机。‘新舟 60’是中国自主研发的涡轮式飞机, 能同时满足国内及国际市场需求。

作为世界领先的轴承制造商, 铁姆肯公司的起落机轮轴承以其卓越品质和极具针对性的创新技术在全球广受青睐。在此次与西安航空制动科技有限公司的合作中, 铁姆肯公司凭借在轴承领域的杰出专业技术, 为客户量身定制出专门的圆锥滚子轴承设计, 帮助客户有效提升飞机机轮性能, 从而改善其耐用度。

(本刊记者 微凉)

IFWT2008 轻金属与高强材料焊接
国际论坛在京隆重举行

2008 年 5 月 13 日, 由中国机械工程学会及其焊接分会、英国焊接学会(TWI) 共同组办的 IFWT2008 轻金属与高强材料焊接国际论坛在北京中旅大厦隆重举行。此次论坛的议题主要有: 轻量、高强材料在汽车、轨道交通、航空、航天等产业的需求与应用的现状及其发展趋势; 铝、镁等轻金属材料的焊接性; 高强、超级钢材料的焊接性等。

清华大学教授、中国科学院院士潘际銮, 中国机械工程学会常务副理事长宋天虎, 中国机械工程学会秘书长张彦敏, 大连理工大学材料科学与工程学院副院长刘黎明, 中北大学材料科学与工程系王宝教授, 以及来自国内多所知名高校的大批教授和学者应邀参加了本次论坛, 使此次论坛成为众专家、学者交流的盛会。同时, 多家国内外知名厂商参加了此次论坛, 并带来了各自研究领域的最新成果。其中, 美国 WTC/MEDAR 集团亚太地区总裁、上海梅达焊接设备有限公司总经理陈建平讲解了“先进的 WTC/MEDAR 中频直流阻焊技术”; 长沙凯天环保有限公司总经理助理刘华发表了题为“铝合金焊接生产的环境保护措施及应用”的报告; 唐山松下产业机器有限公司技术部部长陈韻演讲了“松下数字焊接技术”; 艾美特焊接自动化技术(北京)有限公司总经理杨旭东介绍了艾美特“先进的轻合金焊接工艺及其高效柔性化的焊接系统”。各家企业各献所长, 为此次国际论坛营造了“百家争鸣”的良好氛围。

(本刊记者 晓霏)