第 37 卷第 5 期　　河北科技大学学报　　Vol. 37, No. 5
2016 年 10 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Oct. 2016

文章编号:1008-1542(2016)05-0423-08　　doi:10.7535/hbkd.2016yx05001

挠性接头角刚度静态测量方法研究

黄永超[1],谭小群[1],张晓宇[1],朱力敏[2],王战玺[1]

(1.西北工业大学机电学院,陕西西安　710072;2.上海航天控制技术研究所,上海　201109)

摘　要:挠性接头角刚度的测量精度直接关系到陀螺仪的控制精度和灵敏度,但传统方法存在较多问题。根据挠性接头角刚度静态测量原理,基于不同的加载方式提出 2 种角刚度静态测量方法,即机械式加载角刚度测量和压电式加载角刚度测量。搭建以电动倾斜台为分度加载驱动的机械式挠性接头角刚度测量系统,进行挠性接头角刚度测试试验,得出挠性接头角刚度数值。针对机械式加载测量方法中测试结果不稳定的问题,设计利用压电促动器的静态加载机构,提出了一种利用压电促动器测量挠性接头角刚度的方法。使用 ANSYS Workbench 对压电加载机构位移输出进行仿真,位移输出满足挠性接头角刚度静态测试加载要求,验证了压电式静态测量方法理论的可行性。

关键词:精密仪器制造;挠性接头;压电促动器;角刚度;静态测试;放大机构

中图分类号:TH703　　**文献标志码:**A

Research on static angular stiffness measurement of flexible joint

HUANG Yongchao[1], TAN Xiaoqun[1], ZHANG Xiaoyu[1], ZHU Limin[2], WANG Zhanxi[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China; 2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Measurement accuracy of the angular stiffness of flexible joint is directly related to the control accuracy and sensitivity of gyro, but the traditional measurement methods have many problems. According to the principle of angular stiffness measurement of flexible joint, two static measurement methods of angular stiffness are proposed based on different loading ways, namely mechanical loading angular stiffness measurement and piezoelectric loading angular stiffness measurement. The mechanical loading angular stiffness measurement system is built by using a motor driven indexing feeding tilting table, the measure experiment if the angular stiffness of flexible joint is conducted, and the angular stiffness of flexible joint is measured. For the excessive fluctuation problem of the measure result in mechanical load test, a piezoelectric loading structure is designed and a measurement method employing piezoelectric actuator is proposed for angular stiffness measurement of flexible joint. Based on ANSYS Workbench, the displacement output of the piezoelectric loading structure is analyzed by simulations. The simulation results illustrate that the displacement output meets the requirement of static loading angular stiffness measurement of flexible joint, and the theoretical feasibility of piezoelectric loading angular stiffness measurement method is validated.

Keywords: precision instrument manufacture; flexible joint; piezoelectric actuator; angular stiffness; static measurement; amplifying mechanism

---

收稿日期:2016-05-23;修回日期:2016-07-11;责任编辑:冯　民

基金项目:国家自然科学基金(51505380)

作者简介:黄永超(1991—),男,黑龙江尚志人,硕士研究生,主要从事机械制造自动化、精密测试技术方面的研究。

通讯作者:王战玺讲师。E-mail:zxwang@nwpu.edu.cn

黄永超,谭小群,张晓宇,等.挠性接头角刚度静态测量方法研究[J].河北科技大学学报,2016,37(5):423-430.

HUANG Yongchao, TAN Xiaoqun, ZHANG Xiaoyu, et al. Research on static angular stiffness measurement of flexible joint[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(5): 423-430.

动力调谐陀螺仪作为一种传感器,广泛用于运载火箭、导弹等的导航系统,其内部弹性元件(挠性接头)的角刚度,作为补偿力矩关键因素直接关系到整个陀螺仪的控制精度和灵敏度[1-4]。因此,研制挠性接头角刚度测量系统对挠性接头批量化生产非常必要[5]。

目前,挠性接头角刚度的检测仍然以手工吊砝码法为主,这种方法存在效率差、重复度低等问题[6-7]。利用机械式电动倾斜台对挠性接头进行自动加载,能够解决这一问题。但由于机械式倾斜台位移机构存在爬行现象、机械摩擦和装配间隙等不利因素,影响其定位分辨力和运动精度,造成挠性接头角刚度测量设备实际测试结果稳定性不高、易受环境影响等问题。为解决这一实际问题,需对测试设备分度加载机构进行改进。

压电陶瓷叠堆执行器利用压电材料的逆压电效应,能够在电压作用下产生成比例的位移和力输出,具有位移精度和分辨率高、响应快、功耗小、无噪声、刚度高等优点,在精密定位、振动控制等领域有着广泛的应用[8-9]。本文利用压电促动器作为分度加载驱动,提出一种挠性接头静态角刚度测量方法,解决挠性接头角刚度测试稳定性差的问题。使用 ANSYS workbench 对压电分度加载机构几何模型进行有限元分析,仿真该结构在给定外加载荷的情况下对其产生的影响[10-11]。仿真结果验证了压电式静态测量方法理论的可行性,位移输出满足挠性接头静态测试加载要求。

1 挠性接头角刚度静态测试方法

静态测量法即胡克定律,对挠性接头加载静态力(或力矩)导致其外圈偏摆,通过测出力与位移(或扭矩与角度)计算得出角刚度值:

$$K=\frac{M}{\theta},\tag{1}$$

式中:K 为挠性接头的角刚度,Ngcm/rad;M 为对挠性接头施加的扭矩,Ngcm;θ 为挠性接头偏摆角度,rad。

根据挠性接头加载方式的不同,本文提出 2 种挠性接头静态测试方法,即机械式加载角刚度测试法和压电式加载角刚度测试法。

1.1 机械式加载角刚度测试法

机械式加载测试过程采用倾斜台分步驱动,对挠性接头进行等角度施压,由每一步的倾斜台偏摆角度以及相应的扭矩传感器读数求出角刚度值。其测量原理如图 1 所示。

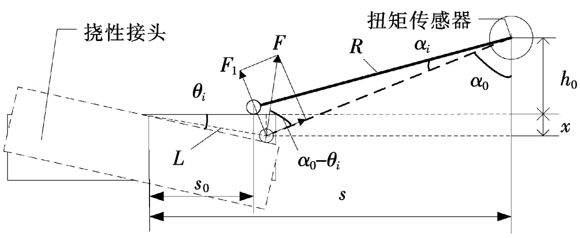


图 1 机械式加载测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical loading measurement

图 1 中,s 为传感器中心到挠性接头轴线的距离;R 为压杆的施压半径;h_0 为传感器中心到挠性接头初始上平面的距离;r 为测头小球的半径(图中未标注);F 为挠性接头对压杆测试小球的作用力;F_1 为 F 垂直于压杆方向的分力。

对挠性接头偏转角度 θ_i 与压杆摆角 α_i 进行换算:

$$R\cos\alpha_0=h_0+x\ ,\quad L=\sqrt{x^2+(s-R\sin\alpha_0)^2}\ 。\tag{2}$$

则挠性接头偏转角度 θ_i 为

$$\theta_i=\arcsin\frac{r}{L}+\arctan\frac{x}{s-R\sin\alpha_0},\tag{3}$$

式中 $\alpha_0=\frac{\pi}{2}-\arcsin\frac{h_0-r}{R}-\alpha_i$。

对挠性接头偏摆施加的扭矩 M_i 与扭矩传感器读数 T_i 进行如下换算:

$$F_1=Fg\ \sin(\alpha_0-\theta_i)。\tag{4}$$

则挠性接头偏摆施加的扭矩为

$$M_i=\frac{T_i gL}{Rg\ \sin(\alpha_0-\theta_i)}。\tag{5}$$

从挠性接头初始状态开始施压，选取 $n=6$，$i=1,2,\cdots,6$，记录每一步的倾斜台偏摆角度 α_i 以及扭矩传感器读数 T_i，由式(3)和式(5)换算为挠性接头的偏摆角度 θ_i 以及施加扭矩 M_i，采用最小二乘线性拟合的方法计算角刚度值：

$$K=\frac{\sum_{i=1}^{n}M_i\theta_i-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}M_i\sum_{i=1}^{n}\theta_i}{\sum_{i=1}^{n}\theta_i^2-\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}\theta_i\right)^2}。\tag{6}$$

引入挠性接头偏摆角度 θ_i 和施加扭矩 M_i 的相关系数 r，以判别最小二乘线性拟合效果：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i-\overline{M})(\theta_i-\bar{\theta})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(M_i-\overline{M})^2 g\sum_{i=1}^{n}(\theta_i-\bar{\theta})^2}}。\tag{7}$$

1.2　压电式加载角刚度测试法

压电促动器(见图 2)将叠层型压电陶瓷封装，能够在电压作用下产生成比例的位移输出[9,12]。压电促动器已加载预紧力，上下螺纹转接，可达到亚纳米分辨率和亚毫秒响应时间。利用压电促动器作为分度加载驱动，可实现挠性接头多步加载，且定位精度较高。

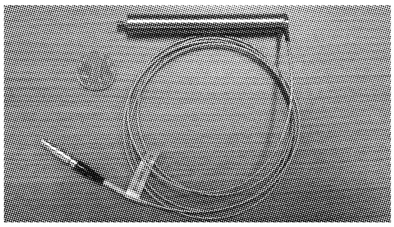


图 2　压电促动器

Fig. 2　Piezo-ceramic actuator

由于压电促动器输出位移较小，其应用范围受到限制，需对其输出位移进行放大[12]。可利用菱形放大机构(见图 3)设计微位移工作台，作为加载机构进行角刚度测量，解决这一问题。菱形放大机构能提供抵抗横向干扰力的能力[13]，在位移放大的同时，能得到很大的输出力[14]，同时也能对促动器进行保护[15]。当压电促动器使菱形外壳延长轴产生位移量为 δ 的伸长形变时，则其短轴产生 $2\beta\delta$ 的缩短形变，其中 $\beta=1/\tan\gamma$[16-19]。

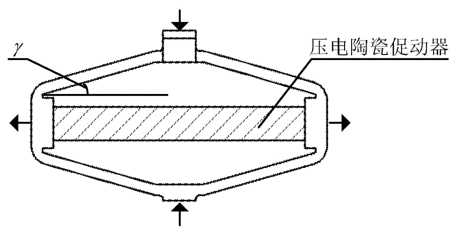


图 3　菱形放大机构示意图

Fig. 3　Schematic diagram of rhombic amplification mechanism

压电促动器选择闭环控制，其驱动电压和位移输出成线性比例[9,12-20]。压电陶瓷在电压驱动下的位移[21]计算公式如式(8)所示：

$$\Delta L=d_{33}nU=KU。\tag{8}$$

式中：d_{33} 为应变系数(m/V)；n 为压电陶瓷片个数；U 为驱动电压(V)。

由于放大机构存在刚度，其输出位移会有损失[22]，在低刚度负载条件下，促动器最大驱动位移 ΔL_1 为

$$\Delta L_1\approx\Delta L_0\left(\frac{k_A}{k_A+k_L}\right)。\tag{9}$$

式中：ΔL_0 为标称位移；k_A 为压电陶瓷刚度；k_L 为负载刚度。

由式(8)和式(9)可知，压电促动器实际驱动位移为

$$\Delta L'=K_2U。\tag{10}$$

压电式加载测试过程采用以压电促动器为驱动的放大机构进行分布加载，对挠性接头进行等距施压，由压电加载机构进给量和扭矩传感器读数求得挠性接头角刚度值，测量原理如图 4 所示。

图 4 中，L'为测头小球中心到挠性接头轴线的距离；x'_i 为压电加载机构进给量；s'为传感器中心到挠性接头轴线的距离；R'为压杆的施压半径。

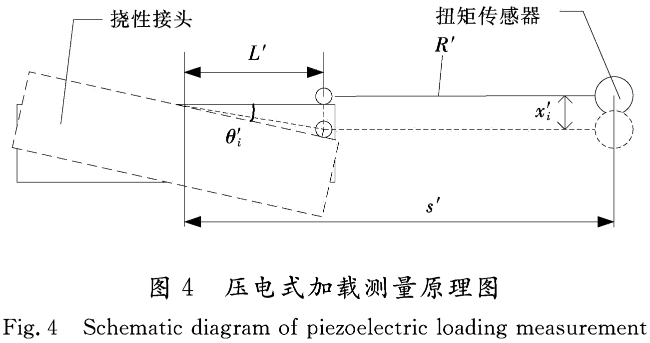


图 4　压电式加载测量原理图

Fig. 4　Schematic diagram of piezoelectric loading measurement

由于挠性接头偏摆角度 θ'_i 较小，对偏摆角度 θ'_i 与压电加载机构进给量 x'_i 进行换算：

$$\theta'_i=\tan\theta'_i=\frac{x'_i}{L'}。\tag{11}$$

对挠性接头偏摆扭矩 M'_i 与传感器读数 T'_i 进行如下换算：

$$M'_i=\frac{T'_i}{R'}g\ \frac{L'}{\cos\theta'_i}。\tag{12}$$

从挠性接头初始状态开始施压，选取 $n'=15$，$i=1,2,\cdots,15$，记录压电加载机构进给量 x'_i 和扭矩传感器读数 T'_i，由式(11)和式(12)换算得到挠性接头的偏摆角度 θ'_i 以及施加的扭矩 M'_i，由式(6)采用最小二乘线性拟合的计算斜率求得挠性接头角刚度值 K'。

2　挠性接头角刚度测量结构设计

2.1　机械式角刚度测量结构设计

机械式加载角刚度测量系统(见图 5)由装夹机构、倾斜台、扭矩传感器和测量调整机构组成。被测挠性接头为一体式挠性接头，装夹机构通过一个带锥度的芯轴与挠性接头内孔过渡配合，保证挠性接头在受压过程中内圈固定、外圈偏摆。压杆一端安装红宝石探针，一端与扭矩传感器测试轴连接。扭矩传感器安装在倾斜台上。测量调整机构由电动平移台、手动平移台、电动升降台组成，用于调整红宝石探针位置，从而对挠性接头不同压点施压。在一次装夹情况下，倾斜台自动进行等角度偏摆，对挠性接头进行施压，得出角刚度值。

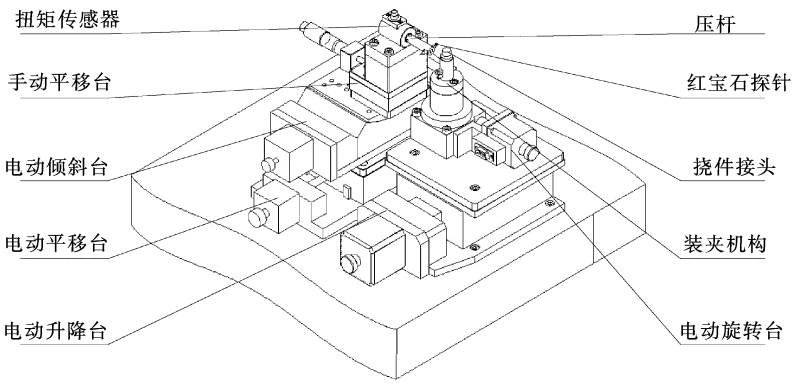


图 5　机械式加载测量系统三维图

Fig. 5　Three-dimensional diagram of mechanical loading measure system

2.2　压电式角刚度测量结构设计

利用压电促动器作为分度驱动，设计一种挠性接头静态角刚度测量机构(见图 6)。对压电促动器施加电压，促动器沿菱形放大机构长轴方向对放大机构产生作用力，从而使放大机构沿短轴方向产生位移输出。对压电促动器施加不同电压，放大机构带动扭矩传感器沿短轴方向对挠性接头进行等距施压，通过测量扭矩传感器读数，计算得到挠性接头角刚度值。

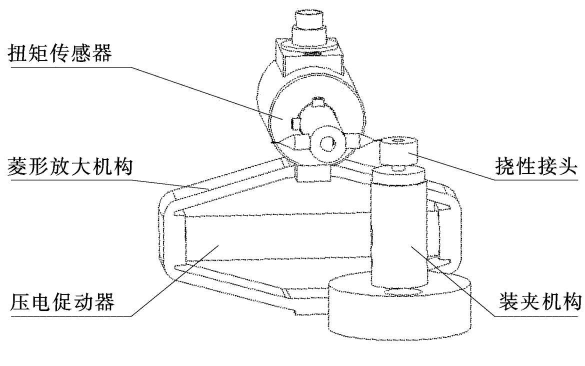


图 6　压电式加载测量机构

Fig. 6　Mechanism of piezoelectric loading measurement

3　机械式加载角刚度测量系统试验验证

搭建机械式加载角刚度测量系统(见图 7)，选用德国 Lorenz D-2452 扭矩传感器(量程为 0.005)、LCV-USB2 放大器。电动倾斜台选用北光世纪 MGC102，采用机械式弧形滚珠导轨，蜗轮蜗杆传动，分辨率为 0.000 5°，重复定位精度为 0.005°。

测试系统角度和扭矩换算的相关参数：s=20 mm；R=14.66 mm；h_0=0.78mm；r=0.5 mm。

所选取的测试一体式挠性接头角刚度为(1.34±0.14)Ngcm/rad，转角最大值为 25 角分，由式(3)得摆台最大偏摆角度为0.151 9°。倾斜台每次偏摆 0.02，偏摆 6 次，总偏摆角度小于 0.151 9°。由于 h_0 和 θ_i 非常小，则挠性接头初始压点到中心的距离 $s_0=s-R$=5.34 mm，倾斜台分步偏摆，其竖直方向进给量 x 和倾斜台偏摆角度关系列于表 1。

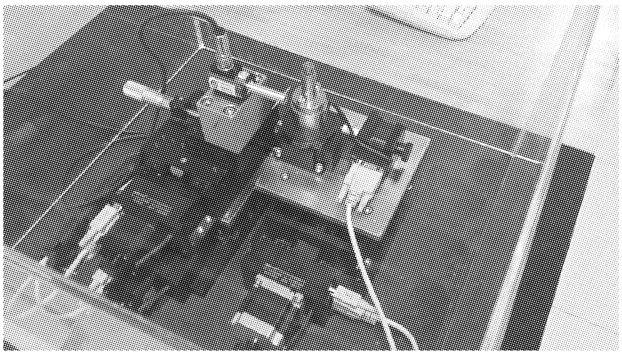


图 7　机械式加载测试样机

Fig. 7　Prototype of mechanical loading measurement

表 1　机械式加载进给量与偏摆角度的关系

Tab. 1　Relation between mechanical loading displacement and the yawing angle

加载步数	1	2	3	4	5	6
倾斜台偏摆角度 α_i/(°)	0.02	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20
挠性接头偏摆角度/(°)	0.055	0.110	0.165	0.220	0.274	0.329
倾斜台竖直方向进给量 x/μm	5.11	10.23	15.34	20.46	25.57	30.69

对挠性接头角刚度进行试验时，由于挠性接头细筋不易在同方向连续受压，对挠性接头同一轴线方向对称施压，以平衡施压力对挠性接头偏摆造成的影响。取所制造一体式挠性接头 90°和 270°方向进行角刚度测试，倾斜台分步偏摆 6 次，记录扭矩传感器数值，由式(6)根据最小二乘拟合得到角刚度值，测量结果列于表 2。

表 2　一体式挠性接头扭矩测试数据及角刚度值

Tab. 2　Data of integrated flexible joint angular stiffness and torque test

序号	测试方向	扭矩传感器测量值/(mNgm)						角刚度值/(Ngcm・rad^{-1})	角刚度平均值/(Ngcm・rad^{-1})
		1	2	3	4	5	6		
1	90°	0.025 3	0.051 2	0.084 4	0.118 3	0.151 3	0.182 8	1.219 4	1.207 9
2		0.025 4	0.052 9	0.084 4	0.117 7	0.148 8	0.181 8	1.199 5	
3		0.027 5	0.054 7	0.086 3	0.120 2	0.151 6	0.183 5	1.200 9	
4		0.027 1	0.053 7	0.085 2	0.119 2	0.152 3	0.184 1	1.211 9	
5	270°	0.034 3	0.062 9	0.096 2	0.129 1	0.162 4	0.193 9	1.227 2	1.212 5
6		0.035 5	0.062 6	0.095 7	0.127 1	0.159 0	0.189 4	1.185 0	
7		0.036 3	0.064 9	0.097 5	0.131 4	0.161 9	0.195 2	1.217 6	
8		0.030 3	0.058 1	0.092 1	0.124 3	0.157 6	0.188 7	1.220 5	

取表 2 前 3 组扭矩传感器数值，由式(7)计算挠性接头偏摆角度和施加扭矩的相关系数 r，结果列于表 3。

表 3　挠性接头偏摆角度和施加扭矩的相关系数

Tab. 3　Correlation coefficent between angular and torque of flexible joint

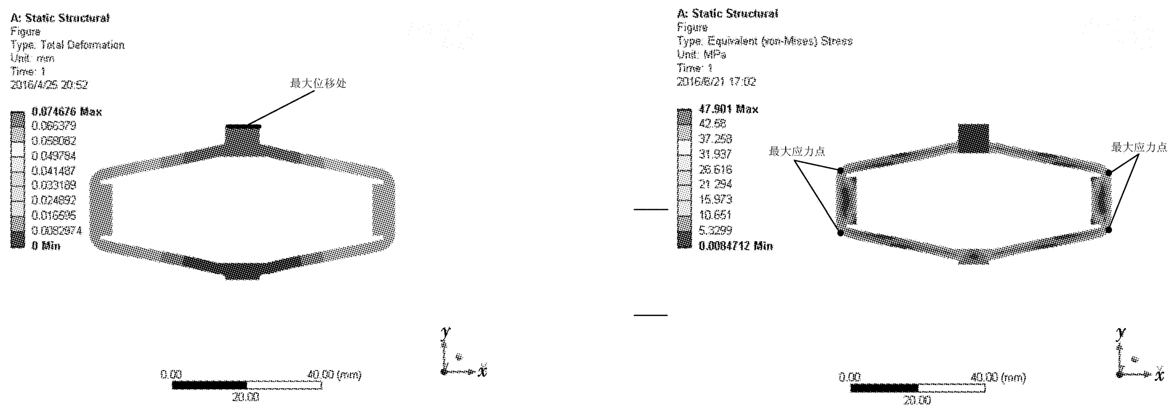
序号	挠性接头施加的扭矩/(mNgm)						相关系数 r
	1	2	3	4	5	6	
1	0.009 2	0.018 7	0.030 8	0.043 1	0.055 1	0.066 6	0.999 35
2	0.009 3	0.019 3	0.030 8	0.042 9	0.054 2	0.066 3	0.999 64
3	0.010 0	0.019 9	0.031 5	0.043 8	0.055 2	0.066 9	0.999 60

对表 3 的数据进行分析，3 组相关系数 r 计算结果均大于 0.999，可认为挠性接头偏摆角度和施加的扭矩是一个线性特征非常明显的实验模型，即说明拟合直线能够解释覆盖实测数据，具有很好的一般性，可作为标准工作直线使用。

对表 2 测量结果进行分析，同一轴线 90°和 270°方向，角刚度平均值相差 0.004 6，表明挠性接头 90°与 270°方向细颈尺寸较好。所测角刚度值波动较为明显，特别是 270°方向刚度测量值 1.185 0 和 1.227 2 出现较大偏差，最大差值达到 0.042 2，最大差值百分比为 3.5%。机械式倾斜台位移机构存在爬行现象、机械摩擦和装配间隙等不利因素，影响其定位分辨力和运动精度，是造成角刚度测试设备实际测试结果稳定性不高的主要原因。同时，受制于机械式传动机构重复定位精度的影响，倾斜台分布单位进给量过高，压点个数较少，受扭矩测量误差影响较大。为解决这一实际问题，需对测试设备分度加载机构进行改进。

4 压电式挠性接头角刚度测量机构仿真验证

所测挠性接头外圆直径为 Φ11.2 mm，转角最大值为 25 角分，则竖直方向最大进给量为 40.7 μm。根据挠性接头施压步距，取菱形放大机构长轴尺寸为 80 mm，短轴尺寸为 42 mm，促动器接触短边尺寸为 20 mm，输出端短边尺寸为 14 mm，放大比 $\beta_0=3$。使用 ANSYS 对放大机构进行有限元分析，放大机构选用 45＃钢，对与促动器接触的两个平面施加 300 N 作用力，位移变形仿真结果如图 8 a)所示，等效应力仿真结果如图 8 b)所示。根据变形计算结果，放大器横向两端最大位移为 13.5 μm，放大器上端最大位移为 74.7 μm，与分析值 78.6 mm 接近。根据等效应力计算结果，最大应力为 47.9 MPa，小于 355 MPa(45＃钢屈服极限)，计算结果满足测试要求。



a) 位移变形仿真结果 b) 等效应力仿真结果

图 8 菱形放大机构仿真结果

Fig.8 Simulation results of rhombic amplification mechanism

使用 ANSYS 逐渐增加促动器作用力，计算放大器横向位移以及上端输出位移，计算结果如表 4 所示。根据表 4 的仿真结果，放大机构放大比 $\beta_0=2.77$。放大器横向位移与作用力成线性放大，放大机械机构外部刚度 k_L 近似于 11.11 N/μm。

表 4 作用力和输出位移关系

Tab.4 Simulation results of relation between force and displacement

作用力/N	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
横向两端位移/μm	0.45	0.89	1.13	1.78	2.23	2.68	3.12	3.57	4.02	4.46	4.91	5.36	5.80	6.25	6.70
上端输出位移/μm	2.49	4.98	7.47	9.96	12.45	14.94	17.42	19.91	22.40	24.89	27.38	29.87	32.36	34.85	37.34

压电促动器选用芯明天科技有限公司的低压压电促动器 PSt 150/7/60 VS12，标称行程为 57 μm±10%，刚度为 15 N/μm±20%，标准推力为 1 200 N。由式(9)可得，促动器最大驱动位移 $\Delta L_1=32.74$ μm。根据图 8 a)计算结果，放大器横向两端位移为 13.1 μm，即促动器输出位移为 26.2 μm，小于 ΔL_1，此时放大器上端输出位移为 73.1 μm，大于挠性接头竖直方向最大进给量 40.7 μm，故该促动器满足挠性接头加载量

程要求。

所选用的促动器标称行程 57 μm±10%是在 0～150 V 的驱动电压下无负载力的位移行程，则促动器在 150 V 驱动电压下实际驱动位移为 32.74 μm，由式(10)得，K_2＝0.218 3 μm/V。对压电促动器分布驱动电压进行设计，压电促动器的驱动电压按照 4 V 等幅增加，取 15 个压点，由式(10)可得，放大器上端驱动电压与位移输出关系见图 9。

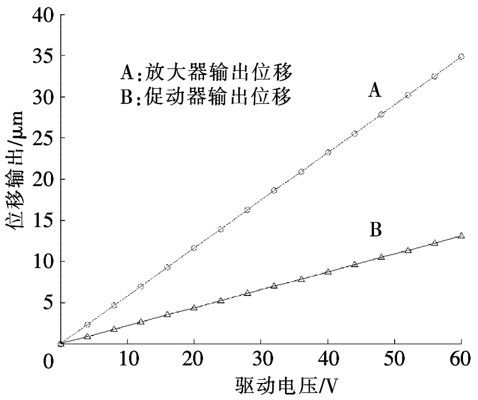


图 9　驱动电压与位移输出关系

Fig. 9　Relation between driving voltage and displacement outputs

对图 9 数据进行分析，压电式加载机构竖直方向单位进给量约为 2.42 μm，最大进给量 36.28 μm 小于挠性接头所允许的最大进给量 40.7 μm。对比表 1 的数据，倾斜台加载竖直方向最大进给量 30.69 μm＜40.7 μm，表明压电式加载机构总进给量可覆盖倾斜台总进给量，满足挠性接头测试量程要求。倾斜台分布进给单位量 5.11 μm＞2.42 μm，表明压电式加载机构可加载单位进给量更小，扭矩采集点更多。综上所述，利用压电促动器加载测量挠性接头角刚度的方法可行，能够解决倾斜台加载机构定位分辨力低、扭矩采集点少的问题。

5　结　语

根据挠性接头角刚度测试的需求，提出 2 种挠性接头静态测量方法，即机械式加载角刚度测试法和压电式加载角刚度测试法。利用电动倾斜台，搭建机械式分度挠性接头角刚度测试台，进行试验验证，测试结果波动明显，角刚度值重复度不高。提出一种利用压电促动器作为加载驱动的压电式加载角刚度测量方法，解决测试结果不稳定的问题。利用有限元方法对压电式加载机构进行仿真验证，压电式加载区间覆盖机械式加载区间，定位分辨力更高，并给出满足测量要求的驱动电压。仿真结果表明该方法应用于挠性接头静态角刚度加载可行，压电式加载角刚度测量法的精度有待进一步实验验证。

参考文献/References：

[1]　万德安，刘攀，孙东继. 整体式挠性接头刚度测量系统设计[J]. 计测技术，2006，26(3)：15-16.
WAN De'an，LIU Pan，SUN Dongji. Design of testing system of unitary flexible hinge stiffness[J]. Metrology & Measurement Technology，2006，26(3)：15-16.

[2]　刘春节，万德安. 一体式挠性接头及其制造技术[J]. 宇航学报，2007，28(2)：475-478.
LIU Chunjie，WAN De'an. Integrative flexible joint and its machining technology[J]. Journal of Astronautics，2007，28(2)：475-478.

[3]　吴冬良，戴一帆，郑子文. 基于模态分析的挠性接头角刚度测量研究[J]. 国防科技大学学报，2004，26(5)：94-98.
WU Dongliang，DAI Yifan，ZHENG Ziwen. Research based on modal analysis to dynamical angular rigidity of the flexible joint [J]. Journal of National University of Defense Technology，2004，26(5)：94-98.

[4]　JUNQUEIRA F D C，BARROS E A D. Development of a dynamically tuned gyroscope-DTG[C]//ABCM Symposium Series in Mechatronics-Vol. [S. l.]：[s. n.]，2004：470-478.

[5]　王广林，王慧峰，詹捷，等. 挠性接头刚度测量中传感器的研究[J]. 振动、测试与诊断，2009，29(1)：110-112.
WANG Guanglin，WANG Huifeng，ZHAN Jie，et al. Research on sensor of flexible joint stiffness measurement[J]. Vibration Test and Diagnosis，2009，29(1)：110-112.

[6]　王广林，卢坤宙，王慧峰. 基于附加质量法的挠性接头刚度动态测量方法分析[J]. 现代制造工程，2010(5)：91-95.
WANG Guanglin，LU Kunzhou，WANG Huifeng. Analysis of dynamic stiffness measurement base on additional quality act of flexible joint [J]. Modern Manufacturing Engineering，2010(5)：91-95.

[7]　赵辉，俞朴. 微小尺寸弹性零件刚度自动检测方法的研究[J]. 仪器仪表学报，2001，22(3)：49-50.
ZHAO Hui，YU Pu. Research of automatic measurement method of stiffness of small size flexible parts[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2001，22(3)：49-50.

[8]　韩同鹏，李国平，沈杰. 基于压电陶瓷微位移执行器的精密定位技术研究[J]. 传感器与微系统，2010 (2)：51-53.
HAN Tongpeng，LI Guoping，SHEN Jie. Study on accurate positioning technology of piezoelectric ceramics micro-displacement actuator

[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2010 (2)：51-53.

[9] 袁刚，李世栋，王代华. 一种压电陶瓷叠堆执行器刚度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报，2015，36(3)：568-573.
YUAN Gang，LI Shidong，WANG Daihua. A stiffness measurement method for piezoelectric ceramic stack actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2015，36(3)：568-573.

[10] 刘庆刚，王珺，郭彦书，等. 扇环形半圆截面圆筒应力分布规律研究[J]. 河北科技大学学报，2014，35(4)：370-375.
LIU Qinggang，WANG Jun，GUO Yanshu，et al. Study of stress distribution principle of annular sector semicircular cross section vessel [J]. Journal of Hebei University of Science & Technology，2014，35(4)：370-375.

[11] 王立新，高雅妍，翟利刚. 制动盘表面微结构仿生构建与应力场分析[J]. 河北科技大学学报，2014，35(6)：497-503.
WANG Lixin，GAO Yayan，ZHAI Ligang. Bionic microstructure surface building and stress field analysis of brake disc[J]. Journal of Hebei University of Science & Technology，2014，35(6)：497-503.

[12] 黄卫清，史小庆，王寅. 菱形压电微位移放大机构的设计[J]. 光学精密工程，2015，23(3)：803-809.
HUANG Weiqing，SHI Xiaoqing，WANG Yin. Design of diamond piezoelectric microdisplacement amplification mechanism[J]. Optics and Precision Engineering，2015，23(3)：803-809.

[13] 张春林，张希农，陈杰，等. 菱形微位移压电作动器的输入输出线性建模[J]. 西安交通大学学报，2014，48(5)：102-106.
ZHANG Chunlin，ZHANG Xinong，CHEN Jie，et al. Linear modeling for input-output relations of a rhombic micro-displacement piezo-electirc actuator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2014，48(5)：102-106.

[14] 徐志科，鄢珂，金龙. 一种正交型压电位移放大机构的研究[J]. 压电与声光，2009，31(2)：207-209.
XU Zhike，YAN Ke，JIN Long. Research of orthoconal micro-displacement amplifier with piezoelectic actuator[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics，2009，31(2)：207-209.

[15] CHEN Jinglong，ZHANG Chunlin，XU Minglong，et al. Rhombic micro-displacement amplifier for piezoelectric actuator and its linear and hybrid model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2015，50：580-593.

[16] 杨志刚，刘登云，吴丽萍，等. 应用于压电叠堆泵的微位移放大机构[J]. 光学精密工程，2007，15(6)：884-888.
YANG Zhigang，LIU Dengyun，WU Liping，et al. Micro-displacement magnifying mechanism used in piezo-stack pump[J]. Optics and Precision Engineering，2007，15(6)：884-888.

[17] WU Qingguo，YANG Dehua，LI Aihua，et al. Design and test of a novel cost-effective piezo driven actuator with a two-stage flexure amplifier for chopping mirrors [C]//SPIE Astronomical Telescopes＋ Instrumentation. [S. l.]：International Society for Optics and Photonics，2012：84505G-84505G-11.

[18] HONG Jin，JIN Long，XU Zhike. Design and characteristic study of large torque micro-nano platform based on piezoelectric stack[C]// Electrical Machines and Systems (ICEMS)，2014 17th International Conference on IEEE. [S. l.]：[s. n.]，2014：2697-2700.

[19] SHAO Shubao，XU Minglong，ZHANG Shuwen，et al. Stroke maximizing and high efficient hysteresis hybrid modeling for a rhombic piezoelectric actuator[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2016，75：631-647.

[20] 刘泊，郭建英，孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. 光学精密工程，2013，21(6)：1503-1509.
LIU Bo，GUO Jianying，SUN Yongquan. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator[J]. Optics and Precision Engineering，2013，21(6)：1503-1509.

[21] 俞军涛，焦宗夏，吴帅. 基于液压微位移放大结构的新型压电陶瓷直接驱动阀设计及仿真[J]. 机械工程学报，2013，49(2)：151-158.
YU Juntao，JIAO Zongxia，WU Shuai. Design and simulation study on new servo valve direct driven by piezoelectric actuator using hydraulic amplification[J]. Journal of Mechanical Engineering，2013，49(2)：151-158.

[22] 刘荣，侯力，毛建，等. 负载刚度对压电元件输出特性影响的研究[J]. 压电与声光，2008，30(3)：279-281.
LIU Rong，HOU Li，MAO Jian，et al. Research on the influence of stiffness on piezoelectric actuator[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics，2008，30(3)：279-281.