

空间机械臂力学模拟件的设计与优化

刘俊秀 邓宗全 岳洪浩 陈正生

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨, 150080)

摘要:为降低机械臂进行地面力学实验时的成本,真实地反映机械臂的力学性能,提出一种机械臂等效力学特性的设计方法,并对机械臂力学模拟件的参数进行优化。根据机械臂的结构原理,对机械臂关节的轴承刚度、扭转刚度进行等效设计,通过目标达到法对机械臂力学模拟件的参数进行优化,将力学模拟件与机械臂各质量模块的质量、质心坐标、质心各方向转动惯量等关键参数进行对比并进行实验验证。结果表明,力学模拟件与机械臂各关节模块力学参数基本一致,力学模拟件能够满足实验要求,可降低力学环境实验成本。

关键词:机械臂;力学模拟件;多目标优化;序列二次规划法

中图分类号:TH11

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)04-0532-06

Design and Optimization of Mechanical Analogue Element of Space Manipulator

Liu Junxiu, Deng Zongquan, Yue Honghao, Chen Zhengsheng

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150080, China)

Abstract: A design method for equivalent mechanical character of manipulator is put forward to cut down ground mechanical experiment cost of manipulator and reflect its mechanical character more veritably. Furthermore, the parameters of mechanical analogue element of manipulator are optimized. Axletree rigidity and joint torsion rigidity are equivalently designed on the basis of manipulator structure principle. The parameters of mechanical analogue element of manipulator are optimized through objective obtained method. The comparison between mechanical analogue element and mass, centroidal coordinate, moment of inertia of centroid on each direction and other critical parameters of each mass module of the manipulator is made. The result shows that mechanical parameters between mechanical analogue element and each joint module are almost the same. The mechanical analogue element can satisfy experimental demand, thus reduceing the experimental cost of mechanical circumstance.

Key words: manipulator; mechanical analogue element; multi-objective optimization; successive quadratic programming

随着空间技术的飞速发展,特别是空间站、航天飞机、空间机器人等的诞生及成功应用,空间机械臂作为在轨支持、服务的新型航天器已经进入太空,并日益得到人们的关注^[1]。随着我国国民经济与国防工业技术的迅速发展,对航天器的需求量显著增加,对其能力的要求日臻提高。特别是空间站

在轨服务、深空探测等空间技术领域的迅速发展,对空间机械臂技术的需求极其迫切。机械臂关节内部包括电机、减速器、传感器等精密元器件,在地面力学实验时一旦发生损坏,会造成机械臂的功能失效。考虑到机械臂的造价和成本很高,将其用于力学环境实验具有很大的风险,因此,有必要进行机

基金项目:航天创新基金(CAST2009)资助项目。

收稿日期:2011-11-15;修订日期:2012-02-21

通讯作者:刘俊秀,男,博士研究生,工程师,1980年3月生,E-mail:liujunxiu3005@163.com。

械臂等效力学模拟件的研制^[2-3]。

为保证力学模拟件的尺寸及力学特性与机械臂尽量一致,对关节轴承刚度及扭转刚度进行等效设计,采用目标达到法,优化各关节模块的质量、质心位置以及转动惯量等参数,并与机械臂关键参数进行对比验证。该力学模拟件可用于锁紧释放机构的性能试验、机械臂与卫星间安装工艺的研究等^[4]。

1 力学模拟件关节的等效设计

空间机械臂原理结构设计为6个自由度,由6个完全一样的模块化关节和两个长臂杆连接而成,配置结构如图1所示,其中,2个自由度组成肩关节,1个自由度为肘关节,3个自由度组成腕关节。机械臂的肩关节固定在基座上,基座内装配有机械臂控制器,机械臂的另一端装配有末端捕获器,实现与轨道上其他合作目标飞行器对接,并进行信息和电力的传输。

关节是机械臂最薄弱的环节,对机械臂的动力学特性会产生极大影响,因此对力学模拟件关节参数的设计至关重要。关节参数主要包括关节的弯曲刚度和扭转刚度,在电机锁死状态下,关节的弯曲刚度由轴承及其预紧量决定,扭转刚度由谐波减速器及力矩传感器决定。

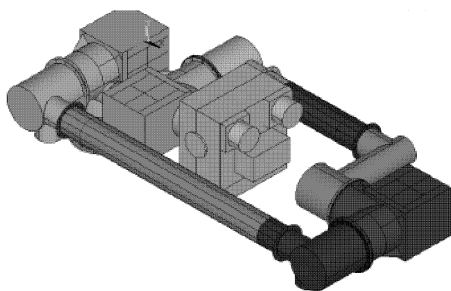


图1 空间机械臂模型

1.1 关节轴承刚度的等效设计

轴承刚度直接关系到关节弯曲刚度,为了使力学模拟件各关节的刚度与机械臂关节刚度最大程度等效,轴承刚度的等效是必不可少的。轴承预紧量决定轴承刚度的大小,根据赫兹接触应力的公式,分析预紧量与轴向刚度和径向刚度的关系表达式,并结合实际应用轴承的参数,计算力学模拟件的等效预紧量。

在机械臂中关节采用背对背的角接触球轴承配置方式,角接触球轴承受力后主要变形是滚动体与内、外滚道处的接触弹性变形,受力与变形关系可用赫兹公式来计算。根据赫兹公式和我国角接触球轴承的结构参数,可得钢制轴承弹性变形趋近量为

$$\delta = 4.23 \times 10^{-8} \left(\frac{Q^2}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中:Q为每个钢球轴向力;D为钢球直径。

轴向刚度分析:设预紧力为 F_{a0} 时,各滚珠受力一致,变形一致,则滚珠负荷Q为

$$Q = \frac{F_{a0}}{Z \sin \alpha} \quad (2)$$

式中:Z为钢球数目; α 为接触角。

将式(2)代入式(1),可得轴承内、外环轴向相对位移 δ_{a0} 为

$$\delta_{a0} = \delta / \sin \alpha = 4.23 \times 10^{-8} (Z^2 D \sin^5 \alpha)^{-1/3} F_{a0}^{2/3} \quad (3)$$

对式(3)求导可得关节的轴向刚度 K_a 为

$$K_a = 3.546 \times 10^7 (Z^2 D F_{a0} \sin^5 \alpha)^{-3} \quad (4)$$

径向刚度分析:假设预紧方式为轴向定位预紧,轴承预紧后,如再受到径向负荷作用,内、外环产生相对径向位移,轴向位移仍为预紧时轴向位移。根据受力分析,径向负荷 F_r 等于各滚珠负荷在径向分量的代数和^[5]。即

$$F_r = 1.149 \times 10^{11} D^{1/2} \cos \alpha \cdot \sum (\delta_{a0} \sin \alpha + \delta_r \cos \alpha \cos \phi)^{3/2} \cos \phi \quad (5)$$

式中 δ_r 为径向位移。

根据式(5),绘制不同 δ_{a0} 时 F_r 随 δ_r 的变化曲线,如图2所示。由图可见,随着 δ_r 增大, F_r 增大,在 δ_{a0} 较小时, F_r 与 δ_r 呈非线性关系,而在 δ_{a0} 较大 δ_r 较小时, F_r 与 δ_r 近似线性关系。

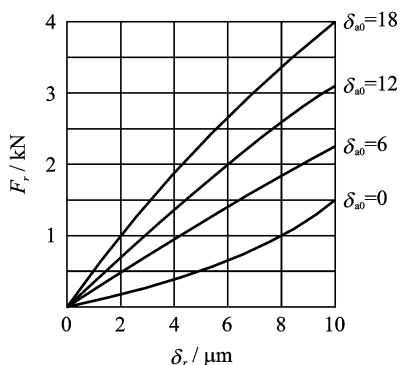


图2 不同轴向位移时轴承径向力与径向位移的关系

轴承在关节工作中,属于 δ_r 较小而 δ_{a0} 较大情况, F_r 与 δ_r 近似为线性关系,此时,径向刚度为常数,令 $\delta_r=0$,对式(5)求导,可得径向刚度为^[6-7]

$$K_r = 1.77236 \times 10^7 (Z^2 D)^{1/3} \frac{\cos^2 \alpha}{\sin^{1/3} \alpha} F_{a0} \quad (6)$$

轴承预紧量的计算:已知机械臂的预紧量 $\delta_1 = 5 \mu\text{m}$,两种轴承的参数如表1所示。

表1 机械臂用轴承与力学模拟件用轴承参数对比

轴承	滚珠数目 Z	滚动体直径 D/mm	接触角 $\alpha/(\text{°})$
机械臂用轴承	68	3.175	25
力学模拟件用轴承	68	2.5	30

根据式(1,2,4,6),可得

机械臂轴向刚度: $K_a = 4.13 \times 10^8 \text{ N/m}$

机械臂径向刚度: $K_r = 3.1 \times 10^8 \text{ N/m}$

以机械臂用轴承刚度反计算力学模拟件用轴承的轴向预紧量,以轴向刚度计算得 $\delta_1 = 13.8 \mu\text{m}$,径向刚度计算得 $\delta_2 = 13 \mu\text{m}$,取 $\delta = 13.5 \mu\text{m}$,此时,力学模拟件与机械臂基本具有相同的刚度。

1.2 关节扭转刚度的等效设计

在确定的等效原则中,保证关节的扭转刚度是一项重要的要求,因为这是关节中相对薄弱的谐波和力矩传感器等效设计的关键。经过计算和分析,可得实际结构中力矩传感器的刚度为 $G_1 = 3.31 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$,谐波柔轮的刚度为 $G_2 = 1.6 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ 。则力矩传感器与谐波柔轮串联的刚度为

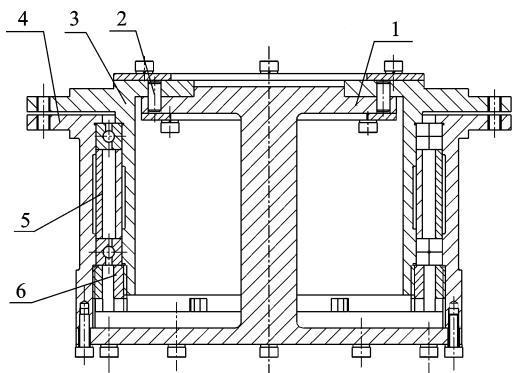
$$G = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \quad (7)$$

因此,可以根据实际结构的相关尺寸确定等效轴构件的长度和直径。综合加工工艺性及材料的成本,采用45钢。

$$I_p = \pi D^4 (1 - d^4) / 32 = Tl / \phi G = 8775 \quad (8)$$

式中: I_p 为惯性矩; D 为等效轴外径; d 为等效轴内孔直径; T 为力矩; l 为扭转长度; ϕ 为扭转角。

经计算可知,当 $D = 20 \text{ mm}$ 时, $d = 16.3 \text{ mm}$; $D = 17 \text{ mm}$ 时, $d = 0 \text{ mm}$ 。考虑到加工因素,采用实心轴模拟关节扭转刚度。经过等效设计后的单关节结构如图3所示。



1. 模拟轴; 2. 定位销; 3. 轴承座1; 4. 轴承座2; 5. 调整套筒; 6. 预紧螺母。

图3 关节组件结构图

2 关节模块力学参数多目标优化设计

机械臂中相互保持静止的零部件构成关节模块。由于力学模拟件只是用一些力学件与机械臂进行刚度等效,因此其质量与转动惯量等一些参数不可能与机械臂完全相同,需要一些特殊的调整质量块加到力学模拟件各关节模块上,使各关节模块质量、转动惯量及质心位置与机械臂近似。

2.1 关节模块多目标型优化模型的建立

采用多个长方体质量块进行加减的方式组合成一个单一质量,每个长方体各参数均为变量,质量块数量越多,力学模拟件和机械臂的力学性能越接近。为了便于加工,安装简单和实际工程精度,使用两块质量块进行优化。图4为关节模块的参数表示, Σ_o 为关节模块的坐标系,优化前关节模块的质量为 a_1 ,质心位置 $o'(a_2, a_3, a_4)$,转动惯量 (a_5, a_6, a_7) ,优化后关节模块的质量为 c_1 ,质心位置 $o''(c_2, c_3, c_4)$,转动惯量 (c_5, c_6, c_7) ,机械臂关节模块的质量为 a'_1 ,质心位置 $o'''(a'_2, a'_3, a'_4)$,转动惯量 (a'_5, a'_6, a'_7) 。 x_1 为长方体1(简称 R_1)的质量; x_2, x_3, x_4 为 R_1 质心坐标, x_5, x_6, x_7 为 R_1 的尺寸变量; x_8, x_9, x_{10} 为长方体2(简称 R_2)的尺寸变量, x_{11}, x_{12} 为 R_2 的质心在 R_1 一个面上的投影坐标, x_{13} 为 R_2 质量。

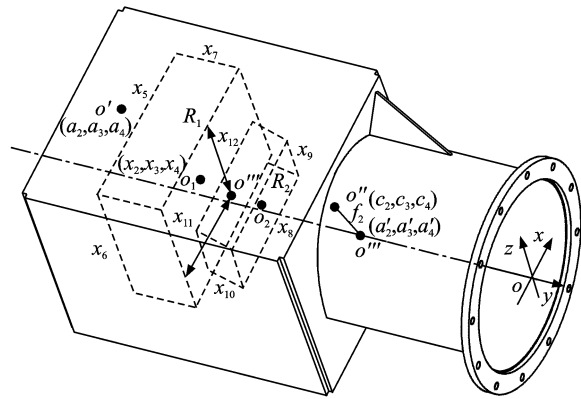


图4 关节模块参数表示

(1)设计变量。以各长方体的尺寸、相对位置及安装位置为设计变量

$$\mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}\}$$

(2)目标函数。以优化前后各关节模块质量、质心及转动惯量与理想值的偏差为目标函数, $f = \{f_i\}, i = 1, 2, 3$ 。 f_1 为质量偏差, f_2 为质心位置偏差, f_3 为转动惯量综合偏差, $e = \{e_i\}$ 为各力学参数

的偏差率, e_1 为质量偏差率, e_2 为质心位置偏差率, e_3 为转动惯量偏差率。

$$f_1 = |a'_1 - x_1 - x_{13}| \tag{9}$$

$$f_2 = \sqrt{(c_1 - a'_2)^2 + (c_2 - a'_3)^2 + (c_3 - a'_4)^2} \tag{10}$$

$$f_3 = \sqrt{(c_5 - a'_5)^2 + (c_6 - a'_6)^2 + (c_7 - a'_7)^2} \tag{11}$$

$$e_1 = f_1/a'_1 \tag{12}$$

$$e_2 = f_2/\sqrt{a'^2_2 + a'^2_3 + a'^2_4} \tag{13}$$

$$e_3 = f_3/\sqrt{a'^2_5 + a'^2_6 + a'^2_7} \tag{14}$$

式中

$$c_2 = [x_2x_1 + x_{13}(x_2 + 0.5x_5 + 0.5x_8) + b_8b_2]/(x_1 + x_{13})$$

$$c_3 = [x_3x_1 + x_{13}(x_3 - 0.5x_6 + x_{11}) + b_1b_3]/(x_1 + x_{13} + b_1)$$

$$c_4 = [x_4x_1 + x_{13}(x_4 - 0.5x_7 + x_{12}) + b_1b_4]/(x_1 + x_{13} + b_1)$$

$$c_5 = x_1(x_6^2 + x_7^2)/12 + x_{13}[(x_3 - a_3)^2 + (x_4 - a_4)^2] + x_{13}(x_9^2 + x_{10}^2)/12 + x_{13}[(x_3 - 0.5x_6 + x_{11} - a_3)^2 + (x_4 - 0.5x_7 + x_{12} - a_4)^2] + b_5 + (a_1 - b_1)[(a_3 - b_3)^2 + (a_4 - b_4)^2]$$

$$c_6 = x_1(x_5^2 + x_7^2)/12 + x_{13}[(x_2 - a_2)^2 + (x_4 - a_4)^2] + x_{13}(x_8^2 + x_{10}^2)/12 + x_{13}[(x_2 + 0.5x_5 + 0.5x_8 - a_2)^2 + (x_4 - 0.5x_7 + x_{12} - a_4)^2] - (a_6 - b_6) + (a_1 - b_1)[(a_2 - b_2)^2 + (a_4 - b_4)^2]$$

$$c_7 = x_1(x_5^2 + x_8^2)/12 + x_{13}[(x_2 - a_2)^2 + (x_3 - a_3)^2] + x_{13}(x_9^2 + x_{10}^2)/12 + x_{13}[(x_3 - 0.5x_6 + x_{11} - a_3)^2 + (x_2 + 0.5x_5 + 0.5x_8 - a_2)^2] - (a_7 - b_7) + (a_1 - b_1)[(a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]$$

(3)约束条件。主要包括材料约束及调整块安装的尺寸空间要求。由于调整块采用合金钢,其体积与密度的乘积必然为质量。

$$x_1 = 7.8 \times 10^{-6}x_5x_6x_7 \tag{15}$$

$$x_{13} = 7.8 \times 10^{-6}x_8x_9x_{10} \tag{16}$$

同时调整块必须满足安装要求,必须在安装空间内,其数学模型为

$$\begin{aligned} -x_2 + 0.5x_5 &\leq a_1, x_2 + 0.5x_5 + 0.5x_8 &\leq a_2 \\ -x_3 + 0.5x_6 &\leq a_3, x_3 + 0.5x_6 &\leq a_4 \\ -x_4 + 0.5x_7 &\leq a_5, x_4 + 0.5x_7 &\leq a_6 \\ -x_6 + 0.5x_9 + x_{11} &\leq 0, 0.5x_9 - x_{11} &\leq 0 \\ -x_7 + 0.5x_{10} + x_{12} &\leq 0, 0.5x_{10} - x_{12} &\leq 0 \end{aligned} \tag{17}$$

2.2 多目标优化方法

多目标优化的常用方法包括权和法,约束法,合并目标法,交换目标法,目标达到法等。多目标优化能得到目标函数的近似最优解集。分析所建立的数学模型的特点,该模型属于有约束非线性规划问题,可采用 MATLAB 优化工具箱中的优化函数 fgoalattain 进行求解,该函数的基本算法为目标达到法。数学模型为^[8]

$$\begin{cases} \min \nu \\ \text{s. t.} \\ f_i(x) - w_i\nu \leq \text{goal}_i, i = 1, 2, \dots, t \\ AX \leq b \text{ (线性不等式约束)} \\ \text{Aeq}X = \text{beq} \text{ (线性等式约束)} \\ C(x) \leq 0 \text{ (非线性不等式约束)} \\ \text{Ceq}(x) = 0 \text{ (非线性等式约束)} \\ L_b \leq x \leq U_b \text{ (边界约束)} \end{cases} \tag{18}$$

式中: ν 为标量变量; $f_i(x)$ 为各个分目标函数; w_i 为各个分目标权重。

该方法是为目标函数建立起目标值。Goal 函数是一系列目标达到值,在进行优化之前通常不知道对象是否会达到目标。使用权向量 weight 进行控制是没有达到还是溢出。fgoalattain 函数使用序列二次规划法(SQP),MATLAB 算法过程中对于一维搜索和 Hess 矩阵都进行了适当修改。

2.3 优化设计算例

以 1 号关节模块为例,取权重 $w = \{1, 1, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 1\}$,图 5 为目标函数的迭代过程,由图可见,迭代过程比较平稳,计算结果 $X = \{2.6, 171.5, 0, 1, 120, 140, 20, 28, 97, 75, 1, 0\}$ 。表 2 为加调整块后力学模拟件关节模块 1 与机械臂关节模块 1 力学参数比较,质量偏差为 0.28%,质心位置最大偏差为 0.19%,转动惯量最大偏差为 5.38%。

表 2 关节模块 1 加调整块后与机械臂力学参数对比

	质量/ kg	质心坐标/ mm	转动惯量/ (10 ⁴ kg · mm ²)
优化后	10.73	(124.85, -1.25, -28.78)	(5.70, 12.70, 9.97)
理想值	10.76	(124.61, -1.23, -28.77)	(6.27, 13.22, 10.57)
偏差	0.03	0.24	0.98
偏差率/%	0.28	0.19	2.38

3 力学模拟件与机械臂力学参数对比

图 6 为力学模拟件各关节模块的优化结果,由图可见,关节模块的质量偏差小于 0.1 kg,质心位

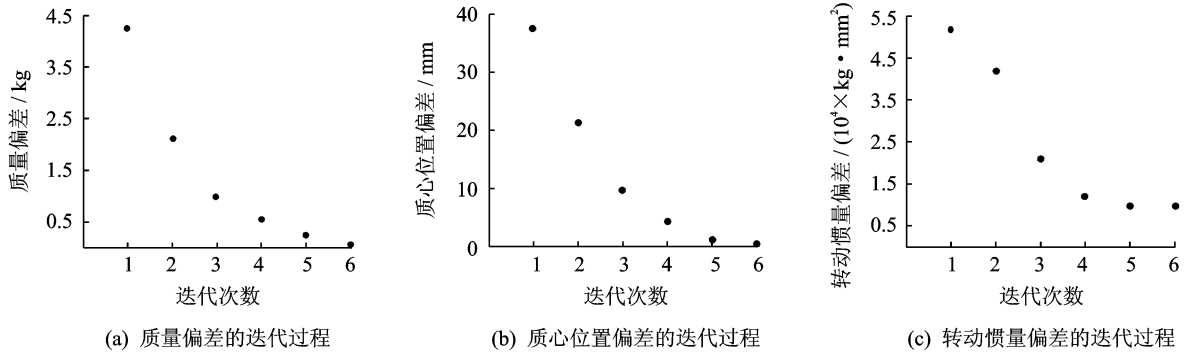


图5 关节模块1多目标优化迭代过程

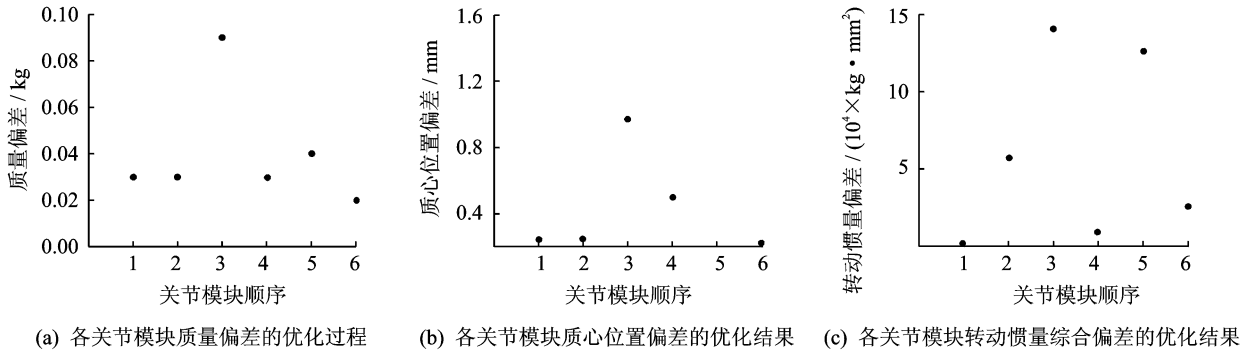


图6 力学模拟件各关节模块多目标优化结果

置偏差小于 1 mm, 综合转动惯量偏差小于 $1.5 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ 。经换算, 得到力学模拟件与机械臂各质量模块在质量、质心坐标、质心各方向转动惯量等关键参数的具体对比关系, 质量最大偏差 1.15%, 质心位置最大偏差为 3.46%, 转动惯量最大偏差为 2.38%。

4 力学模拟件性能的验证

利用有限元分析软件 ANSYS12.1 建立机械臂的双关节有限元模型, 通过模态分析方法分析了双关节的力学性能。在锁紧状态下双关节的一阶模态云图如图 7 所示, 一阶频率为 82.6 Hz。并对其进行了实验验证, 双关节的锁紧采用模态分析时的锁紧方式, 通过振动台对双关节进行固有频率测试, 如图 8 所示, 分别在 3 个锁紧位置的正上方放置

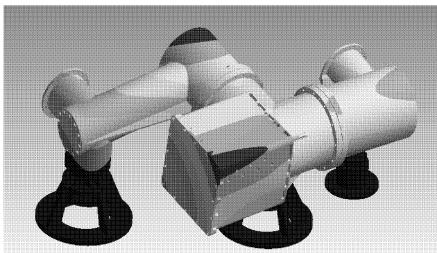


图7 双关节的一阶模态云图

加速度传感器, 中间传感器对应的是双关节模块, 激励信号如图 9 所示, 测得响应曲线如图 10 所示。

对图 9, 10 进行分析, 基本都在 82 Hz 左右出

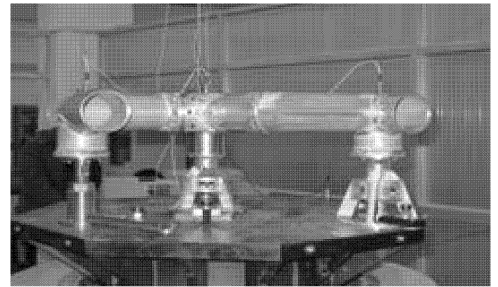


图8 固有频率测试

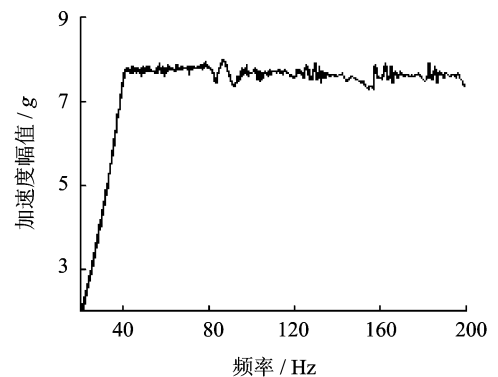


图9 激励信号

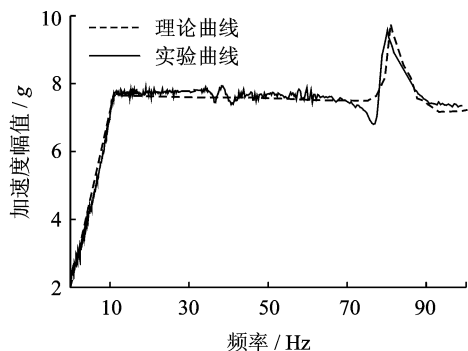


图 10 双关节模块处响应

现峰值响应,响应的幅值分别为 $9.6g$ 和 $9.4g$,可以看出,力学模拟件完全可以模拟机械臂的力学性能。

5 结 论

本文着重研究了空间机械臂力学模拟件的设计与优化,并进行了双关节的力学性能测试实验,得出以下结论:

(1)分析了预紧量与径向刚度和轴向刚度的关系,对机械臂关节轴承刚度和扭转刚度进行了等效设计,得出力学模拟件轴承预紧量和等效轴构件尺寸的计算方法。

(2)采用目标达到法对各关节模块的质量、质心位置以及转动惯量进行了多目标优化,优化结果表明,力学模拟件与机械臂各关节模块力学参数基本一致。经实验证明,设计和优化后的力学模拟件能真实地反映机械臂的力学性能,在降低机械臂地面力学实验成本方面具有显著意义。

参考文献:

[1] 于登云,孙京,马兴瑞. 空间机械臂技术及发展建议[J]. 航天器工程,2007,16(4):1-8.

Yu Dengyun, Sun Jing, Ma Xingrui. Suggestion on development of chinese space manipulator technology [J]. Spacecraft Engineering, 2007,16(4):1-8.

[2] Gibbs G, Sachdev S. Canada and the international space station program: overview and status [J]. A CTA Astronaut, 2002,51(1):591-600.

[3] Verzijden P, Petersen H, Visser M. ERA performance measurements test results [C]//7th ESA Work Shop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation "ASTRA 2002" ESTEC. Noordwijk, Netherlands:[s. n.], 2002:1-8.

[4] Deng Zongquan, Wu Binghui, Wu Xiang. Design and analysis of a new style lock-unlock mechanism for space borne appendages[C]//Proceedings of the International Conference on Advanced Design and Manufacture. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2006:117-120.

[5] 王刚,郭茂林. 航天航空滚动轴承刚度[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,1(33):43-48.

Wang Gang, Guo Maolin. Stiffness of aerospace rolling bearings [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001,33(1):43-48.

[6] Marciniak A, Torstenfelt B. Load distribution in flexibly supported three-row roller slewing bearings tribology transactions [J]. Tribology Transactions, 1994,37(4):757-762.

[7] Kania L. Modelling of rollers in calculation of slewing bearing with the use of finite elements [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41 (11): 1359-1376.

[8] Fonseca C, Fleming P. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms[J]. II. Application example IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 1998,28(1):38-47.