机械式反操作负载模拟器优化设计与仿真

王 巍 李雄峰 张新华

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

于文鹏

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 对设计的负载模拟器采用复数矢量法与虚位移原理建立其机构动力学与多余力矩数学模型. 在此基础上针对传统遗传算法优化解不一致的情况,提出了基于参数灵敏度分层的遗传算法优化方法并对设计中各参数进行了优化. 根据优化结果设计虚拟样机,并利用ADAMS进行多种加载信号的仿真,结果表明样机各项指标均达到设计要求,依此设计出一套可同时进行环境试验与多种负载加载的反操作负载模拟器.

关 键 词: 反操作负载模拟器; 灵敏度; 遗传算法; 仿真

中图分类号: TH 122; V 224

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)02-0161-06

Design optimization and simulation of mechanical anti-load simulator

Wang Wei Li Xiongfeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhang Xinhua

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Yu Wenpeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The dynamics and extraneous torques models of an anti-load simulator were built according to the complex vector and virtual displacement principles respectively. To avoid the problem that the solution is not consistent when the traditional genetic algorithm (GA) is used in the parameters optimization, the hierarchical optimization of GA based on the parametric sensitivity was applied to optimize the design parameters of the mechanism of the anti-load simulator. Then a virtual prototype was designed according to the optimizing results, and testified by the simulation in ADAMS with various loads applied. The results show that the prototype is able to withstand the complex environment conditions and loads in simulating tests. Finally, the real anti-load simulator was established with functions working in environment tests and under various loads.

Key words: anti-load simulator; sensitivity; genetic algorithm; simulation

飞行器飞行过程中,其舵面受空气压力产生负载扭矩作用,当舵面转动方向与该扭矩方向相反时,称为正操作;而当两者相同时,即为反操作. 在地面试验中,正操作负载一般可用扭杆弹簧予以模拟;反操作负载则需反操作负载模拟器进行模拟[1]. 自主飞行状态下的舵机扭矩负载会受到强振动与温度冲击的影响. 在模拟真实环境的条件下对舵机的性能指标进行检测,是改进其设计的重要手段. 电动、气动、电液加载方式的负载模拟器由于存在易损器件而不能在强振动与温度冲

收稿日期: 2009-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50605501)

作者简介: 王 巍(1973 -),男,湖北宜昌人,副教授,wangweilab@163.com.

击环境下持续使用[2]. 目前国内外解决该问题的相关报道很少,一般采用的方法是将舵机的负载试验与环境试验分开进行,这种方法增加了试验成本且降低了试验的可信度.

机械式反操作负载模拟器为解决上述难题提供了有效途径. 其造价与维护成本低,操作方便[3],且没有电路油路等易损环节,能在强振动与温度冲击环境中保持稳定的负载输出. 但已有的机械式负载模拟器存在质量与体积偏大,加载精度低,加载频带窄,可模拟的负载种类单一等问题,尚不能同时进行环境与加载综合试验[3-4]. 本文通过改进原有模拟器的机械本体,建立其加载力矩数学模型,分析了多余力矩产生机理;针对遗传算法优化设计参数得不到一致解的问题,提出了基于灵敏度分层的遗传算法优化方法;将优化的结果通过 ADAMS 仿真验证,有效改善了原有负载模拟器的精度.

1 加载机构与其数学模型

1.1 加载机构原理与数学模型

反操作示意图见图 1. 舵面气压合力 F_p 产生的负载扭矩为 M_p,大小与舵面偏角 δ 成正比,即

$$M_p = k_p\delta \tag{1}$$

式中 k_p 为加载梯度值.

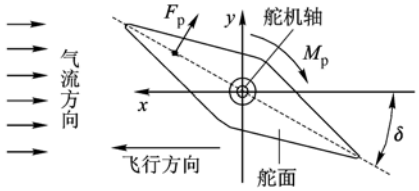
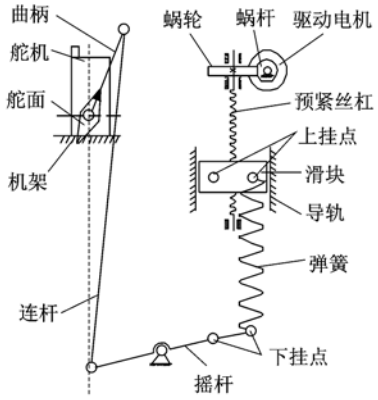


图 1 反操作示意图

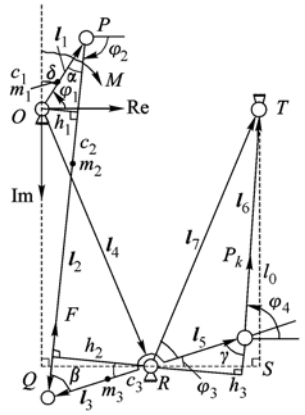
在实际使用中,反操作加载设备要求输出扭矩达数百 N·m,可实现多梯度(5 N·m/(°)与 10 N·m/(°))多种类负载模拟,且要求加载的对称度($\pm\delta$ 情况下)与线性度均低于 5%.

机构选型如图 2 所示,弹簧拉动一个四杆机构在舵机舵面上产生加载扭矩. 使用前,先将曲柄调整至虚线所示平衡位置,然后根据加载梯度选择弹簧的上下挂点(图 2 弹簧挂点在梯度为 10 N·m/(°)的位置),利用驱动电机驱动蜗轮蜗杆机构使弹簧预紧拉力达到预定值,即可进行负载试验.

为保证输出扭矩的精度,四杆机构尺寸、弹簧预紧力、上下挂点的位置均需合理配置;动态加载过程中,由杆件惯性引起的多余力矩也会对输出扭矩产生影响. 因此建立精确的数学模型,得到最



a 机械结构



b 原理图

图 2 机械结构与原理图

优设计参数,以设计出满足精度要求的模拟器.

将 $OPQR$, RST 看作封闭矢量多边形[5],用 $\boldsymbol{l}_1,\boldsymbol{l}_2,\boldsymbol{l}_3,\boldsymbol{l}_4,\boldsymbol{l}_5,\boldsymbol{l}_6,\boldsymbol{l}_7$ 表示各边长度矢量,弹簧在平衡位置长度为 l_0,自由长度为 l_f,则矢量方程为

$$\boldsymbol{l}_1 + \boldsymbol{l}_2 = \boldsymbol{l}_3 + \boldsymbol{l}_4 \qquad \boldsymbol{l}_5 + \boldsymbol{l}_6 = \boldsymbol{l}_7$$

假定逆时针方向为正,以复数形式表示为

$$l_1 e^{i\varphi_1} + l_2 e^{-i\varphi_2} = l_3 + (l_2 - l_1)i + l_3 e^{i\varphi_3}$$

$$l_5 e^{i\varphi_3} + l_6 e^{i\varphi_4} = l_5 + l_0 i$$

方程式中实部和虚部分别相等,令

$$A = l_3 - l_1\cos\varphi_1$$

$$B = l_2 - l_1 - l_1\sin\varphi_1$$

$$C = \frac{A^2 + B^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_3}$$

$$D = \frac{B + \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A - C}$$

$$E = \frac{B + BD^2 + 2Dl_3}{A + AD^2 + l_3 - D^2 l_3}$$

$$G = \frac{l_0 + D^2 l_0 - 2Dl_5}{2D^2 l_5}$$

则解方程得

$$\alpha = \arctan E + \varphi_1$$

$$\beta = \arctan E - 2\arctan D$$

$$l_6 = \frac{\sqrt{D^2 + 4G^2}}{1 + D^2} l_5$$

弹簧在图 2 所示位置产生的拉力为 P_k,转动中心 R 到 P_k 延长线距离为 h_3,且与矢量 $\boldsymbol{l}_5$ 的夹角为 γ,弹簧刚度为 k,由此可得:

$$\gamma = \arctan G - 2\arctan D$$

则弹簧拉力 P_k 在 R 点产生的转矩为

$$M_R = P_k h_3 = k(l_6 - l_f) l_5 \sin\gamma$$

连杆所受拉力为 F,到转动中心 R 的距离为 h_2,到转动中心 O 的距离为 h_1. 不计摩擦力,则弹簧拉力在 O 点处产生的扭矩值 M_O 为

$$M_O = f_O(l_0, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, k) = Fh_1 = \frac{M_R l_1 \sin\alpha}{l_3 \sin\beta} \tag{2}$$

机构的雅克比矩阵为

$$\boldsymbol{A}_3^3 = \begin{bmatrix} -c_1\sin\varphi_1 + c_1\cos\varphi_1 & 0 & 0 \\ -l_1\sin\varphi_1 + l_1\cos\varphi_1 & -c_2\sin\varphi_2 + c_2\cos\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3\sin\varphi_3 + c_3\cos\varphi_3 \end{bmatrix}$$

由机构约束方程得

$$\boldsymbol{C}_2 = \begin{bmatrix} l_1\sin\varphi_1 \\ l_1\cos\varphi_1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}_2^2 = \begin{bmatrix} l_1\sin\varphi_2 & l_3\sin\varphi_3 \\ -l_2\cos\varphi_2 & l_3\cos\varphi_3 \end{bmatrix}$$

可得到约束矩阵 $\boldsymbol{D}_2$ 的转置矩阵:

$$\boldsymbol{D}^2 = (\boldsymbol{D}_2)^{\mathrm{T}} = (-[\boldsymbol{C}_2^2]^{-1}\boldsymbol{C}_2)^{\mathrm{T}}$$

活动构件的质量与转动惯量对角阵为

$$\boldsymbol{\Lambda}_m = \mathrm{diag}(m_1 \quad m_2 \quad m_3)$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_J = \mathrm{diag}(J_1 \quad J_2 \quad J_3)$$

则等效转动惯量:

$$J_e = [1 \quad \boldsymbol{D}^2][\boldsymbol{A}_2^3]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Lambda}_m\boldsymbol{A}_3^3\begin{bmatrix} 1 \\ \boldsymbol{D}_2 \end{bmatrix} + [1 \quad \boldsymbol{D}^2]\boldsymbol{\Lambda}_J\begin{bmatrix} 1 \\ \boldsymbol{D}_2 \end{bmatrix}$$

当曲柄加速度为 α 时,在 O 点输出的多余力矩为

$$M_r = J_e\alpha = f_r(c_1, c_2, c_3, m_1, m_2, m_3) \tag{3}$$

将式(2)与式(3)线性叠加,可得机构输出扭矩的理论值 M_c 为

$$M_c = M_O + M_r = f_{cal}(l_0, l_1, l_2, l_3, l_5, k, c_1, c_2, c_3, m_1, m_2, m_3) \tag{4}$$

为使 M_c 与 M_p 之间误差值最小,且在加载梯度为 5 N·m/(°) 和 10 N·m/(°) 时均能满足精度要求,需要对式(4)中的 12 个参数进行优化.

2　灵敏度分层遗传算法优化

遗传算法在机构设计优化上有广泛应用,适用于函数表达式难以求出的多参数多目标优化[7-9]. 如文献[10]对机器人手臂的优化,文献[11]对平面并联操作臂的优化,文献[12]对平面机构型综合的数值优化.

机械式反操作负载模拟器的实质是希望通过式(2)中的 M_O 来拟合式(1)中 M_p. 在静态或低速加载条件下,加载精度仅取决于机构结构参数. 但在实际加载过程中,机构转动惯量产生的多余力矩将线性叠加到 M_O 上,使实际输出扭矩值偏大. 例如,在文献[3-4]中,忽略了多余力矩的影响,而在实际操作过程中,当加载频率为 1 Hz 时,输出扭矩偏差会达到 10% 以上,因此,分析多余力矩产生机理有利于提高加载精度.

1.2　动态加载多余力矩建模

利用虚位移法可求解四杆机构惯性力矩[6]. 如图 2 所示,四杆机构 3 个运动杆件的质量为 m_1, m_2, m_3;质心在杆件上分布的位置为 c_1, c_2, c_3.

文献[3-4]中设计的模拟器精度在 5 N·m/(°) 与 10 N·m/(°) 时误差达 9%,且可模拟负载种类少,只能用于正弦加载的试验. 为使加载精度低于 5%,并可进行正弦、阶跃、三角信号加载试验,需对式(4)中各参数进行优化. 对此类多参数多目标优化问题,函数表达式难以求出,适合采用遗传算法进行参数优化.

2.1　优化目标

根据仿真计算和对已有模拟器的实测可得仿真值与实测值的最大偏差点在偏角值最大的位置 $\delta = 30°$ 处. 为此,设定优化目标为使该处 M_c 与 M_p 的差值趋近于 0. 由于有 5 N·m/(°) 和 10 N·m/(°) 两个优化目标,通过多次优化检验,取权值为 0.5 时能使两者精度改善最为均衡,则优化的最终目标函数为

$$M_{goal} = f_{goal}(l_0, l_1, l_2, l_3, l_5, k, c_1, c_2, c_3, m_1, m_2, m_3) = 0.5M_{c5} + 0.5M_{c10}$$

式中 M_{c5}, M_{c10} 分别为梯度为 5 N·m/(°) 和 10 N·m/(°) 时 $\delta = 30°$ 处的计算值.

为方便杆件设计和更换,将杆件的质心尽可能配置在中心位置,则有

$$[c_1 \quad c_2 \quad c_3] \approx 0.5[l_1 \quad l_2 \quad l_3 + l_5]$$

即可令

$$[l_0, l_1, l_2, l_3, l_5, k, m_1, m_2, m_3] = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9]$$

则目标函数可以简化为

$$M_{goal} = f_{goal}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9)$$

由式(1)可得 $\delta = 30°$ 处理想值为

$$M_{ideal} = 0.5M_{p5} + 0.5M_{p10} = 7.5\delta$$

式中 M_{p5}, M_{p10} 分别为梯度为 5 N·m/(°)与 10 N·m/(°)时 $\delta = 30°$ 处理想值.

优化的适应度函数即计算值与理想值之差的绝对值,该值在优化过程中趋近于零,即优化目标函数值与理想值重合. 适应度函数为

$$f_{fitness}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9) = |M_{goal} - M_{ideal}|$$

2.2 约束条件

模拟器需要内置于温箱内,因此尺寸应小于 800 mm × 800 mm × 400 mm. 由于输出扭矩大,为保证强度,方便设计,各杆件尺寸亦不能过小,即

$$50 \leqslant x_2,\ x_4,\ x_5 \leqslant 250$$

$$450 \leqslant x_3 + x_4\sin\varphi_3 \leqslant 800$$

$$450 \leqslant x_3 + x_5\sin\varphi_3 \leqslant 800$$

又拉伸弹簧设计中要求:

$$500 \leqslant x_1 \leqslant 650$$

$$20 \leqslant x_6 \leqslant 35$$

设计中的杆件质量不能超过预定指标,才能满足总质量在 60 kg 以下,在实际设计中有

$$1 \leqslant x_7,\ x_8,\ x_9 \leqslant 4$$

2.3 分层优化过程

采用遗传算法直接优化时,结果的一致性难以保证(如图 3),参数在各次优化中取值变化过大,给设计带来较大困难.

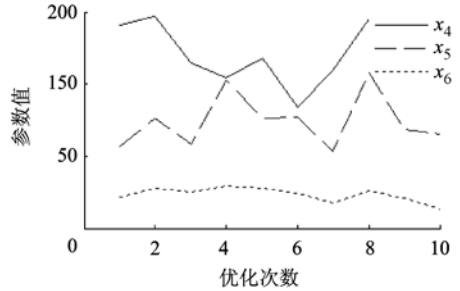


图 3 遗传算法直接优化参数值

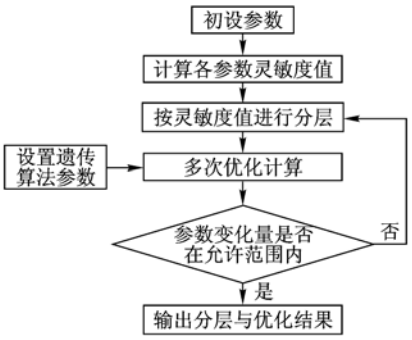
采用分层优化方法,首先计算待优化参数在初始值基础上变化 10% 时对应的目标函数值变化量,即参数 x_i 灵敏度值为

$$\mu_i = \frac{|f_{goal}(\eta x_i)|}{|f_{goal}(x_i)|} \quad (5)$$

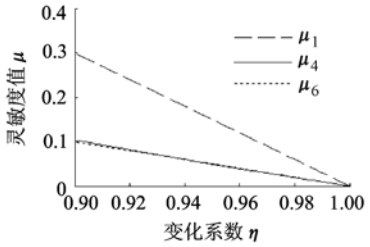
式中 η 为变化系数,取值范围为 0.9 ~ 1; $i = 1, 2, 3, \cdots, 9$.

再根据参数的灵敏度值大小来划分该参数所处优化层,优化程序流程图如图 4 所示. 取 $l_f = 400$, $\varphi_1 = \pi/3$;根据程序计算得最佳分层为 3 层,计算得各层灵敏度曲线.

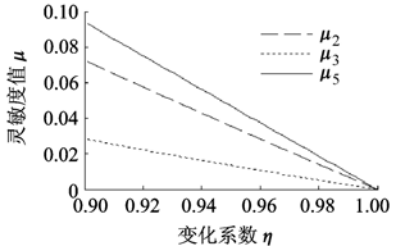
由式(5)可以得知,参数的灵敏度值反映了该参数发生改变时对目标函数值的影响程度. 以图 4b 为例,参数 x_1 的灵敏度值在整个改变过程中一直处于最大位置,表明对其优化可使目标函数值以最快速度趋近理想值. 依此类推,将灵敏度值大的参数先优化,可使整个优化更快速度趋于收敛且优化参数减少,更易得到一致解.



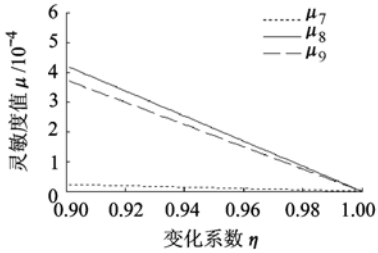
a 分层优化流程图



b 第 1 层灵敏度



c 第 2 层灵敏度



d 第 3 层灵敏度

图 4 优化流程图及 3 层参数灵敏度曲线

2.4 优化结果与仿真验证

采用上述基于灵敏度分层优化的方法,设置

进化代数为 150 代,将直接优化与分层优化过程中适应度进行比较,可得分层优化在优化速度方面有所改善(如图 5),且优化结束后的参数值在分层优化过程中更易趋于稳定(如图 6),适合在设计中进行参数选取.

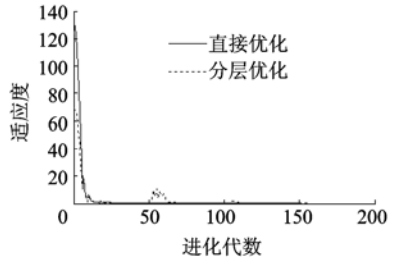


图 5　优化目标函数值图

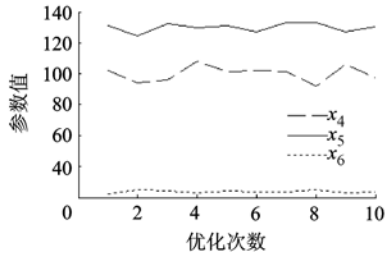
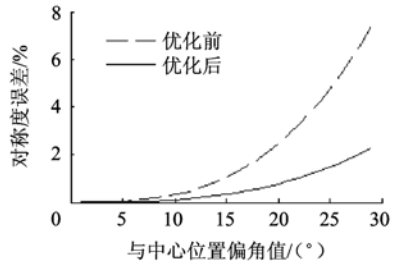


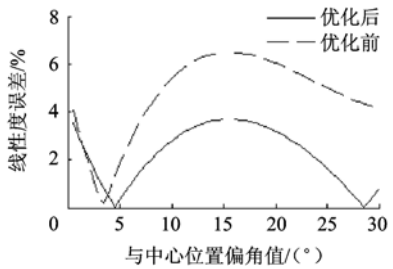
图 6　遗传算法分层优化参数值

通过上述分层优化方法得到结果为: l_0 = 610 mm, l_1 = 138 mm, l_2 = 492 mm, l_3 = 102 mm, k = 24.3 N/mm, m_1 = 1.9 kg, m_2 = 2.9 kg, m_3 = 3.8 kg, l_5 = 134 mm(梯度为 10 N·m/(°)时), l_5 = 70 mm(梯度为 5 N·m/(°)时).

比较优化前后的结果(图 7 与图 8),优化后加载精度低于 4.5%,满足加载精度(包括加载线性度与加载对称度)低于 5% 的要求.

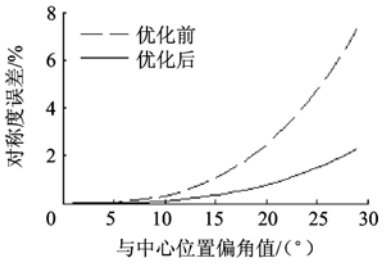


a　优化前后对称度误差

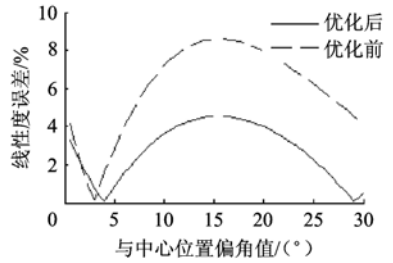


b　优化前后线性度误差

图 7　5 N·m/(°)时优化前后精度比较



a　优化前后对称度误差



b　优化前后线性度误差

图 8　10 N·m/(°)时优化前后精度比较

3　机构设计与仿真验证

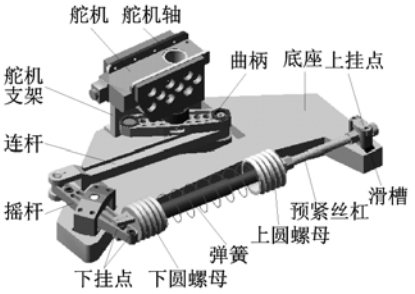
根据图 2 和上述分析结果,本文设计了单路反操作负载模拟器样机. 如图 9 所示,舵机安装在舵机支架上,舵机轴与曲柄中心连接,曲柄与连杆采用滚动轴承配合,连杆与摇杆、摇杆与下圆螺母之间采用滑动轴承配合,可有效减轻质量. 上下圆螺母均旋入弹簧中,预紧丝杠用于调节弹簧拉伸长度. 上挂点安装在底座的滑槽内,其长度与两下挂点间距离相匹配. 驱动电机与蜗轮蜗杆部分设计为可拆卸结构,预紧完成后予以拆卸.

将上述样机模型导入刚体动力学分析软件 ADAMS 中,建立虚拟样机模型,对机构进行动力学仿真分析. 按优化的结果,弹簧刚度 24.3 N/mm,在 5 N·m/(°)时预紧拉力 3.6 kN,10 N·m/(°)时预紧拉力为 7 kN,并在舵机轴输入幅值为 30°的 3 种信号. 阶跃加载时仿真值存在一定的超调,但超调在 10% 以内,且在 0.2 s 左右即趋于稳定,在舵机允许范围内. 而三角波信号加载与正弦信号加载,其精度均在 5% 以内,满足使用要求.

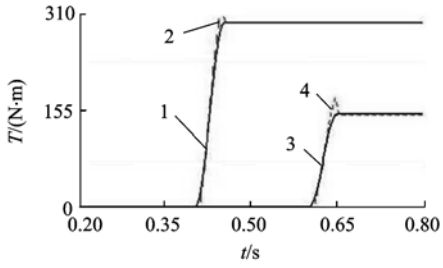
仿真结果表明,优化后的负载模拟器可以实现多种负载的模拟,并且在梯度为 5 N·m/(°)和 10 N·m/(°)时输出精度有明显改善(如表 1),故优化后的设计精度能满足要求. 目前,该样机已投入加工,其性能将在真实试验中得到验证.

表 1　优化前后精度比较表

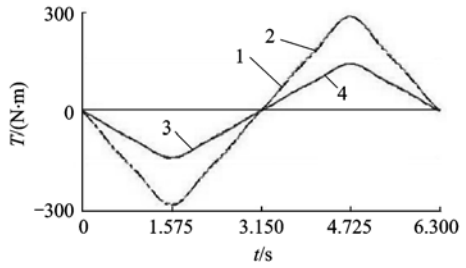
梯度	对称度		线性度	
	优化前	优化后	优化前	优化后
5 N·m/(°)	≤9%	≤3%	≤7%	≤3.5%
10 N·m/(°)	≤9%	≤3%	≤9%	≤4.5%



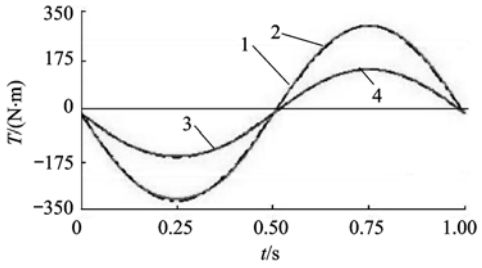
a 虚拟样机模型



b 阶跃加载



c 三角波加载



d 正弦加载

1—梯度为 10 N·m/(°)理论输出; 2—梯度为 10 N·m/(°)仿真输出; 3—梯度为 5 N·m/(°)理论输出; 4—梯度为 5 N·m/(°)仿真输出.

图 9 样机及其 3 种信号加载输出扭矩

4 结 论

①利用虚位移原理可建立机构多余力矩模型,据此可获得加载机构的动态加载模型;②基于参数灵敏度分层的遗传算法优化方法能有效改善传统遗传算法参数优化后参数变化过大的问题,适用于反操作负载模拟器机构优化中多参数、多目标的优化问题,能有效提高优化速度;③虚拟样机的动力学仿真结果表明设计的负载模拟器可有效模拟多梯度多负载种类的力矩载荷,但是如何利用仿真环境,模拟振动与温度冲击对输出负载的影响,尚需要进一步研究.

参考文献(References)

[1] Nam Yoonsu, Lee Jinyoung, Hong Sung Kyung. Force control system design for aerodynamic load simulator[C]//IEEE Proceedings of the American Control Conference. Chicago: AACC, 2000: 3043 – 3047

[2] Walter Haeussermann. Developments in the field of automatic guidance and control of rockets[J]. IEEE J Guidance and Control, 1981, 4(3): 225 – 239

[3] 曹彤,孙杏初,欧阳沁,等. 舵机反操纵负载台设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(3): 252 – 254
Cao Tong, Sun Xingchu, Ouyang Qin, et al. Design of loading stand for reverse operation of navigating machine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(3): 252 – 254(in Chinese)

[4] 王冰. 基于 ANSYS 和 ADAMS 的舵机反操作力矩加载试验台的仿真分析与研究[J]. 军民两用技术与产品, 2007(8): 43 – 44
Wang Bing. Simulation analysis and research on loading stand for reverse operation of navigating machine with ANSYS & ADAMS [J]. Dual Use Technologies & Products, 2007(8): 43 – 44 (in Chinese)

[5] 郭蓉. 平面连杆机构计算机辅助设计方法的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学机械与车辆工程学院, 2005
Guo Rong. Study on CAD System for plane linkage mechanism [D]. Hefei: School of Mechanical and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, 2005(in Chinese)

[6] 曲秀全. 基于 MATLAB/Simulink 平面连杆机构的动态仿真[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007
Qu Xiuquan. Dynamic simulation of planar linkage based on MATLAB/Simulink[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007(in Chinese)

[7] Laribi M A, Romdhane L, Mlika A, et al. A combined genetic algorithm-fuzzy logic method (GA-FL) to design a 6 bars planar mechanism[C]//ASME 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Manchester: ASME, 2004: 733 – 738

[8] Zhang Ke. Dynamics design of a planar controllable five bar mechanism based on genetic algorithm[C]//ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Las Vegas: ASME, 2007: 821 – 827

[9] Li Rui, Chang Tian, Wang Jianwei, et al. Multi-objective optimization design of gear reducer based on adaptive genetic algorithms[C]//International Electronic Conference on Computer Science. Beijing: AIP, 2008: 237 – 277

[10] Liu Tung-Kuan, Chen Chiu-Hung, Tsai Shang-En. Optimization on robot arm machining by using genetic algorithms[C]//The 2007 International Conference on Mechatronics and Information Technologys. Gifu: SPIE, 2007, 679431: 1 – 6

[11] Boudreau R, Gosselin C M. The synthesis of planar parallel manipulators with a genetic algorithm[J]. ASME: Journal of Mechanical Design, 1999, 121(4): 533 – 537

[12] Liu Yi, Mcphee John. Automated type synthesis planar mechanisms using numeric optimization with genetic algorithms[J]. ASME: Journal of Mechanical Design, 2005, 127(5): 910 – 916

(编 辑:文丽芳)