

# 一种新型数控气动机械手的设计与研究

马 亮<sup>1</sup>, 张庆峰<sup>2</sup>, 顾寄南<sup>2\*</sup>

(1. 迪艾工程技术软件(上海)有限公司, 上海 200030; 2. 江苏大学 制造业信息化研究中心, 江苏 镇江 212013)

**摘要:**针对市场对经济性数控机床的需求,设计了一种全新的经济型数控机床装夹机械手,通过一次调整就能够对某一种待加工工件进行自动装夹及卸料;运用非线性规划技术得到结构最优机械手的尺寸,运用极点配置技术为提高运动的鲁棒性提供了一种思路;解决了在保证机械手正常工作的情况下快速有效定位的问题,探索了其实现最优控制的方法;在分析运动学理论的基础上建立了机械手运动学模型,实现了机械手整个工作过程虚拟样机模型的运动仿真,得到了机械手的运动仿真数据,验证了机械手结构的可行性,为后续新型机械手的详细设计提供了依据。

**关键词:**机械手;虚拟样机;极点配置;非线性规划

**中图分类号:**TH122;TH138.5;TH39

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2011)02-0162-04

## Design and research on a new pneumatic manipulator for NC machine

MA Liang<sup>1</sup>, ZHANG Qing-feng<sup>2</sup>, GU Ji-nan<sup>2</sup>

(1. Engineering Technology Associates(Shanghai) Inc., Shanghai 200030, China;

2. Mechanical Information Engineering Research Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Aiming at the market needs of CNC machine tools, a new type of CNC machine tool clamping economic manipulator was designed, through an adjustment, it can be a kind of automatic work piece clamping and unloading. Using nonlinear programming techniques, the optimal size of the robot structure was gotten, using the theory and application of pneumatic servo pole placement technique, the robustness of motion was improved. Under ensuring the case of work well, the problem quickly and effectively locate was solved, its approach was explored to achieve optimal control. In analysis of multi-mechanics kinematics, the manipulator multimode dynamic kinematics model was established, and a mechanical hand throughout the process of the virtual prototype model of the motion simulation was implemented, the manipulator motion simulation data was provided to verify the manipulator feasibility for subsequent detailed design of the new robot.

**Key words:** manipulator; virtual prototypes; pole assignment; nonlinear programming

## 0 引 言

对于一些形状简单又批量生产的加工件,国内现有的数控机床还需专门人员来操作<sup>[1]</sup>。针对这一状况,本研究设计了一种全新的经济型数控机床装夹气动机械手,通过前臂的伸缩,配合前臂与中臂角度的调整来实现一次调整就可以对某一种待加工工件的自动装夹及卸料,从而实现某一种待加工工件在数控机床

上的自动加工。根据数控机床卡盘的工作空间和机械手装夹精度的要求,以及气压传动的特点,设计的机械手应达到需求的极限定位精度,因而如何实现机械手快速有效定位成为本研究的重点。

本研究借鉴 James Lam<sup>[2]</sup>在机器人方面的极点配置应用,并结合 Mordecai Avriel 在非线形规划技术方面的研究。极点配置技术是通过比例环节的反馈把定常线性系统的极点移置到预定位置,实质是用比例反

收稿日期:2010-08-24

作者简介:马 亮(1972-),男,山东济南人,主要从事虚拟设计与虚拟装配、计算机仿真、制造业信息化等方面的研究. E-mail: maliang2006@gmail.com

通信联系人:顾寄南,男,教授,博士生导师. E-mail: gjnan@ujs.edu.cn

馈去改变原系统的自由运动模式,以满足设计规定的性能要求;非线性规划技术是具有非线性约束条件或目标函数的数学规划。本课题利用极点配置技术寻找和定位路径极点,引入非线性规划技术<sup>[3]</sup>来实现机械手时间的最优轨迹规划。

## 1 机械手机构设计和分析

### 1.1 机械手虚拟样机

设计的新型气动机械手的虚拟样机如图1所示,其中腰部转动关节由比例流量阀式摆动气缸实现;大臂和中臂之间的俯仰运动由比例流量阀驱动单出杆双作用直线汽缸实现。而中臂与小臂之间由可调支撑件来手动调节角度,并配合调节小臂的螺纹连接件,来控制机械手末端在笛卡尔空间坐标系中的位置。手抓部位的夹持力通过控制直线气缸来调节。

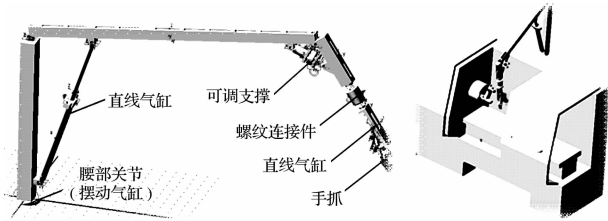


图1 机械手虚拟样机

在设计的机械手虚拟样机中,底座与躯干以固定副相连,躯干与大臂以转动副相连,大臂与中臂以转动副相连,中臂、可调支撑和小臂以固定副相连,小臂与手腕以固定副相连,直线气缸部位以平动副相连,添加约束后如图1所示。

### 1.2 机械手参数计算与分析

本研究建立了空间关节连杆坐标系,并选择独立的广义坐标来表示刚体之间的相对运动。取大臂关节旋转中心为操作空间坐标系原点O,建立的连杆坐标系如图2所示。

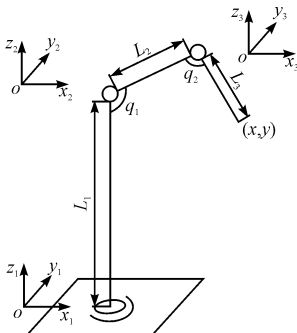


图2 机械手连杆坐标系

对于笔者所设计的机械手系统的5个约束 $\theta_j (j = 1, 2, \dots, 5)$ ,定义 $p_{js} (s = 1, \dots, N_j)$ 为 $\theta_j$ 的各转动轴的单位矢量,令 $\theta_{js} (s = 1, \dots, N_j)$ 为 $\theta_j$ 关联的邻接刚体之间相对转动的广义坐标,于是可以写出各广义坐标列阵 $q_j$ 及转轴基矢量列阵 $p_j$ <sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} q_1 = [\theta_{11}] \\ q_2 = [\theta_{21}] \\ q_3 = [\theta_{32}, \theta_{31}] \\ q_4 = [\theta_{41}, \theta_{43}, \theta_{42}] \\ q_5 = [\theta_{54}, \theta_{53}, \theta_{52}, \theta_{51}] \end{cases} \quad \begin{cases} p_1 = [p_{11}]^T \\ p_2 = [p_{21}]^T \\ p_3 = [p_{32}, p_{31}]^T \\ p_4 = [p_{41}, p_{43}, p_{42}]^T \\ p_5 = [p_{54}, p_{53}, p_{52}, p_{51}]^T \end{cases} \quad (1)$$

得到各个刚体的角速度及角加速度如下:

$$\omega = \begin{bmatrix} p_j^T \dot{q} + \omega_0 \\ \sum_{j=1}^2 p_j^T \dot{q} + \omega_0 \\ \sum_{j=1}^3 p_j^T \dot{q} + \omega_0 \\ \sum_{j=1}^3 p_j^T \dot{q} + \omega_0 \\ \sum_{j=1}^4 p_j^T \dot{q} + \omega_0 \\ \sum_{j=1}^5 p_j^T \dot{q} + \omega_0 \end{bmatrix}, \quad \dot{\omega} = \begin{bmatrix} (p_j^T \ddot{q} + \omega_j) + \dot{\omega}_0 \\ \sum_{j=1}^2 (p_j^T \ddot{q} + \omega_j) + \dot{\omega}_0 \\ \sum_{j=1}^3 (p_j^T \ddot{q} + \omega_j) + \dot{\omega}_0 \\ \sum_{j=1}^3 (p_j^T \ddot{q} + \omega_j) + \dot{\omega}_0 \\ \sum_{j=1}^4 (p_j^T \ddot{q} + \omega_j) + \dot{\omega}_0 \\ \sum_{j=1}^5 (p_j^T \ddot{q} + \omega_j) + \dot{\omega}_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过ADAMS的仿真模块,运用STEP函数设置驱动缸的伸缩,根据各驱动缸的运动时间序列来实现STEP函数的设置,STEP函数格式为<sup>[5]</sup>:

step(x x0, h0, x1, h1),其中:x为自变量;x0为阶跃函数起点自变量值;h0为阶跃起点处函数值;x1为阶跃终点自变量值;h1为阶跃终点函数值。

于是,机械手基座旋转气缸的STEP设置如下:

Define a runtime function = step(time, 0, 0, 2, 200) + step(time, 6, 0, 8, -200) + step(time, 9, 0, 11, 200) + step(time, 15, 0, 17, -200) + step(time, 23, 0, 25, 200) + step(time, 31, 0, 33, -200) + step(time, 39, 0, 41, 200) + step(time, 43, 0, 45, -200) + step(time, 46, 0, 48, 200),可以得出驱动缸工作时的伸缩速度曲线和此时机械手末端速度曲线如图3所示。

可以看出汽缸工作时的速度变化和机械手末端的速度变化是基本趋于一致的,但是当汽缸速度为0时,机械手有些许波动(图中数值做了比例放大,以便观察),于是要考虑机械手的鲁棒性,即只有当机械手末端稳定后才可以进行下一步的操作。

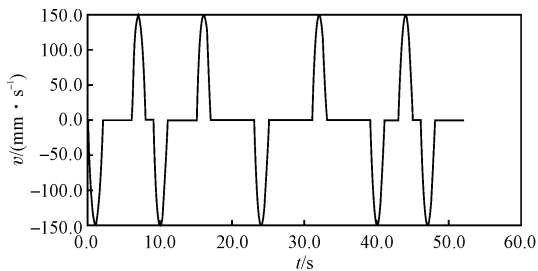


图 3 驱动汽缸工作时伸缩速度曲线

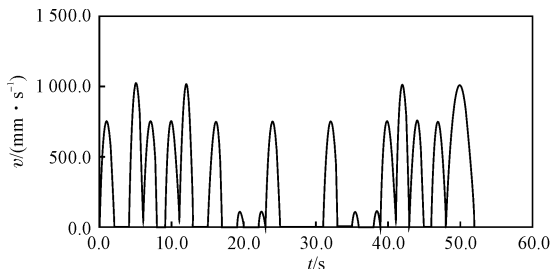


图 4 机械手末端速度曲线

## 2 机械手机构仿真与优化

非线性约束优化问题是指目标函数为决策变量的非线性函数以及约束条件为决策变量的等式或不等式构成的优化问题。本研究运用了多变量约束优化的方法来解决这类非线性多变量约束问题,运用 Matlab 中的 fmincon 函数实现,可做如下描述<sup>[6]</sup>:

$$\min_x f(x) \quad (3)$$

s. t. :  $Ax \leq b$  (线性不等式约束)

$A_{eq}x = b$  (线性等式约束)

$Cx \leq 0$  (非线性不等式约束)

$C_{eq}x = 0$  (非线性等式约束)

$L_{bound} \leq x \leq U_{bound}$

fmincon 函数的调用格式如下:

$[xopt, fxopt] = fmincon(\text{UserFunction}, x0, A, b, Aeq, beq, LBnd, UBnd, 'NonLinconstr', option, p1, p1, \dots)$

其中,  $xopt = x_{opt}$  为  $x$  的最优解,  $fxopt = f(x_{opt})$  和 UserFunction 为求解目标函数的函数文件名。参数  $x0$  为向量的起始值,矩阵  $A$  和向量  $b$  为线性不等式约束条件的系数,矩阵  $A_{eq}$  和向量  $b$  为等式约束条件的系数。LBnd 和 UBnd 分别为  $x$  的下界和上界, options 为 optimset 定义的参数赋值,  $p1, p2$  为传递给 UserFunction 和 NonLinconstr 的附加参数, NonLinconstr 定义了非线性约束条件的函数名。

根据如图 2 所示的坐标系可建立机械手末端轨迹方程如下:

$$y = L_1 + L_2 \times \sin(q_1 - 90^\circ) - L_3 \times \sin(270^\circ - q_1 - q_2) \quad (4)$$

$$x = L_2 \times \cos(q_1 - 90^\circ) + L_3 \times \cos(270^\circ - q_1 - q_2) \quad (5)$$

$L_1$  和支架相加的高度不能低于机床高度 1 586 mm ( $L_1 > 1\ 586$ ),  $L_2$  和  $L_3$  相加不能小于三爪卡盘与数控机床背面的距离 795 mm ( $L_2 + L_3 > 795$ )。

现在考虑可调支撑确定角度约束问题。可调支撑主要是用于连接前臂和中臂,起到支撑定位的作用;通过调节可调支撑的长度,调节中臂与前臂之间的夹角,并确定手爪需要的安装角度。因为不同的机床、不同的工件、不同的轨道位置,所需要的夹角是不一样的;通过可调支撑这一结构,可以大大增加机械手的通用性能。笔者设计的可调部位如图 5 所示。

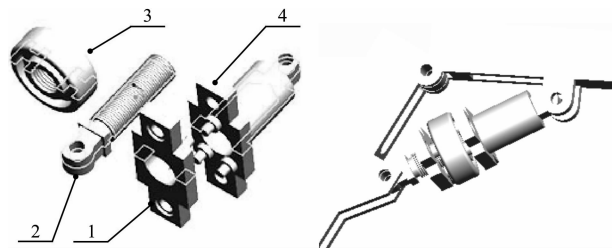


图 5 机械手可调支撑结构

1—可调支撑的左端部件;2—螺杆;3—旋转螺母;4—可调支撑右端盖

部件 2 与部件 3 连接为螺纹连接,需要调节时调节旋转螺母 3,由于旋转螺母 3 所在的轴固定且是螺纹连接,所以迫使螺杆 2 向左或是向右沿轴向移动,来调节所需要的总长,当调节满足要求的时候拧紧螺栓。

通过计算可以得出  $q_1$  在  $[0.785\ 2.1]$ ,  $q_2$  在  $[1.05\ 1.4]$  区间。

于是,对于设计的机械手而言,要求设计的材料最少,这里设计目标为所求杆件长度之和的最优解,问题描述如下:

$$\min f = x(1) \times (1 + \sqrt{1 - x(2)^2}) \times \sqrt{1 - x(3)^2} - x(2) \times x(3) + ((795 + x(1) \times (\sqrt{1 - x(2)^2}) \times x(3) + x(2) \times \sqrt{1 - x(3)^2})) \times (1 + x(2)) / (\sqrt{1 - x(2)^2}) + 1\ 092 \quad (6)$$

上式中所有变量单位为 mm,  $x(1) = L_3, x(2) = q_1, x(3) = q_2$ 。考虑汽缸安装和可调部件的可调范围,得出其约束条件为:

$$\begin{aligned} G1: & 1\ 586 - (1\ 092 \times \sqrt{1 - x(2)^2}) + 795 \times x(2) + x(1) \times \sqrt{(1 - x(3)^2)} / (1 - x(2)^2) \leq 0 \\ G2: & 405 \leq x(1) \leq 795 && \text{杆件长度约束} \\ G3: & 0.785 \leq x(2) \leq 2.1 && q_1 \text{ 角度约束} \\ G4: & 1.05 \leq x(3) \leq 1.4 && q_2 \text{ 角度约束} \end{aligned}$$

G1 为非线性不等式约束条件,G2 ~ G4 为线性不等式约束条件,也是变量的上下限值。故  $L_{\text{bound}} = [405, 0.785, 1.05]$ ,  $U_{\text{bound}} = [795, 2.1, 1.4]$ 。通过式(5)编写 Matlab 程序,其执行结果为:

$$x = [405.0000 \quad 0.7850 \quad 1.0500]$$

$$f = 4.2129 \times 10^3 + 3.7361 \times 10^2 i$$

于是本研究选取  $L_1 = 2200 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 1000 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 680 \text{ mm}$ , 此时带入式(3、4)可得机械手末端的轨迹函数,用 Matlab 进行仿真如图6、图7所示。

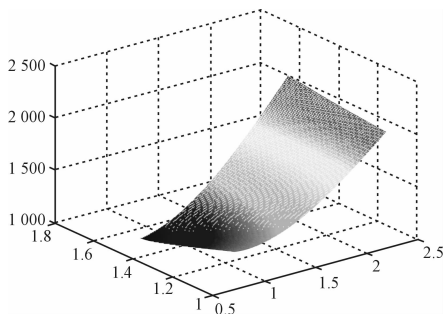


图6 机械手末端 y 轴方向轨迹图

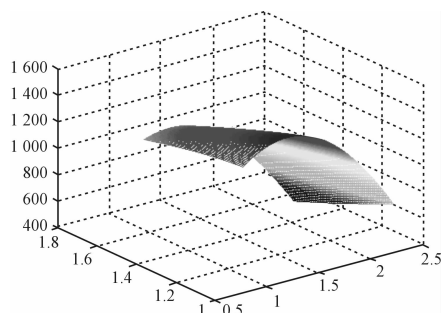


图7 机械手末端 x 轴方向轨迹图

### 3 机械手极点配置技术

根据上面分析,通过实验将系统期望的闭环极点设置为(795 1092 972),由于实验数据进行循环定位,故不再赘述,在此仅对实现方法进行探讨。首先需要选择反馈矩阵  $K$ ,将闭环系统的极点配置在期望的位置,以达到需求的极限定位精度,实现快速有效的定位。其线性定常系统可以描述为:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + BK)x + BGv \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $K$ —状态增益阵, $v$ —外部输入信号。

其位置极点是反馈矩阵的特征值,记为  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 。当系统完全可控时,选择适当的反馈矩阵  $K$ ,便可将闭环系统的极点位置设置在所需的任何期望位置上。

比如,在此选择的期望极点为:

$$x = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, (x = 795, 1025)$$

则系统期望的特征方程为:

$$\begin{aligned} f(x) &= A(x - \lambda_1)(x - \lambda_2) \cdots (x - \lambda_n), \\ (f(x) &= A(x - 795)(x - 1025)) \end{aligned}$$

然后利用状态反馈设计的闭环系统的特征方程求解反馈增益矩阵  $K = [K_1, K_2, \dots, K_n]$ ,反馈增益矩阵  $K$  是由期望的闭环极点确定,而期望的闭环极点是由闭环系统的设计要求决定。根据文献[7-9],理论上配置极点的位置离虚轴越远效果越好,但这不是绝对的,如果确定理想的特征值,需要通过试验对比,确定反馈增益矩阵  $K$ ,然后确定阀控摆动位置系统极点配置后的闭环传递函数  $G(s)$ <sup>[10]</sup>。这为提高气动机械手的鲁棒性提供了一种思路。

### 4 结束语

(1) 本研究设计了一种全新的经济型数控机床装夹气动机械手,通过前臂的伸缩配合前臂与中臂角度的调整,来实现一次调整就可以对某一种待加工工件的自动装夹及卸料。

(2) 笔者建立了装夹机械手的虚拟仿真模型以及多体动力学模型,最大限度地为后续装夹机械手的研制提供真实的数据,验证了设计的可行性。

(3) 运用非线性约束优化技术建立了机械手的优化模型,运用 Matlab 优化工具箱对设计问题进行优化分析,确定最合理的尺寸结构,再用建立的仿真模型进行验证,参考极点配置控制器的设计方法,确定必要的设计参数,提高机械手的鲁棒性,为进一步的研究工作奠定了基础。

### 参考文献 (References):

- [1] 孙士昆. 当前数控技术和装备的发展趋势[J]. 河北建筑工程学院学报, 2006, 24(1): 91-92.
- [2] TAM H K, LAM J. Robust deadbeat pole assignment with gain constraints: an LMI optimization approach[J]. USA. **Optimal Control Applications and Methods**, 2000, 21(6): 243-256.
- [3] AVRIEL M. Nonlinear Programming [M]. USA. Dover Publications, 2003.
- [4] 毛新涛, 包钢, 杨庆俊, 等. 3 自由度气动串联机械手的关节控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 254-260.
- [5] [英] MAGRAB E B. MATLAB 原理与工程应用[M]. 高会生, 李新叶, 胡智奇, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [6] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(下转第 171 页)

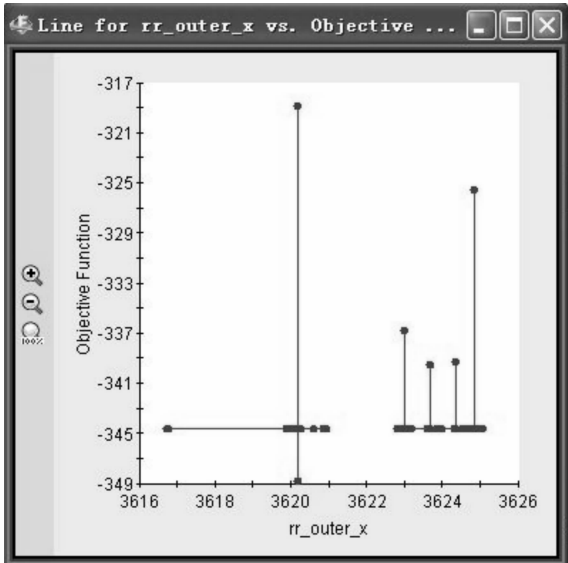


图 21 目标值随后悬架后连杆内点 x 点坐标变化曲线

优化前后设计变量和优化目标值的对比如表 5、表 6 所示,通过对比不难发现,优化之后汽车的平顺性和操稳性均得到了不同程度的提高。

表 5 设计变量优化前后对比

设计变量	初始值	优化值
b_front_spring	1	1.01
lca_outer_x	954.34	954.29
strut_lwr_z	561.07	563.18
d_rear_spring	1	1.21
tierod_inner_y	-329.42	-332.18
lca_front_z	392	392.37
tierod_outer_y	-674.38	-678.75
tierod_inner_x	1123.5	1122.77
rr_outer_x	3 620.2	3 623.68

表 6 优化前后目标值对比

优化目标	初始值	优化值
acc_sum	0.314	0.28
wthz	75.276	81.746
zxhz	87.822	90.351
shexing	66.746	78.147
maichong	92.933	98.518
yieyue	86.19	88.05

[编辑:柴福莉]

## 4 结束语

本研究利用多体动力学仿真软件 Adams/car 和多学科优化软件 iSight-FD 进行联合优化,有效地解决了汽车悬架的行驶平顺性和操纵稳定性之间的矛盾,使评价汽车性能的多目标得到平衡和优化。同时也证明了 Adams/car 与 iSight-FD 协同优化是提升汽车性能的一个有效的途径。

### 参考文献(References):

- [1] GOBBI M, LEVI F, MASTINU G. Multi-objective stochastic optimization of the suspension system of road vehicles [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 298 (4-5): 1055-1072.
- [2] ELS P S, UYS P E, SNYMAN J A, et al. Gradient-based approximation methods applied to the optimal design of vehicle suspension systems using computational models with severe inherent noise [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2006, 50(9-10): 787-801.
- [3] COKER C, WHITE M. Optimization process for off-road vehicle shock absorbers [J]. *Altair Engineering*, 2008(1): 123-126.
- [4] 邢天伟. 基于田口方法的整车平顺性仿真及优化 [D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2008.
- [5] 苏小平. 依维柯汽车多体动力学仿真分析、优化研究及工程实现 [D]. 南京: 南京理工大学机械工程学院, 2004.
- [6] 杨荣山. 多目标优化方法在悬架几何设计上的应用 [J]. *华南理工大学学报*, 2009(7): 85-89.
- [7] 谢能刚. 基于相似接近度的悬架参数多目标模糊优化 [J]. *汽车技术*, 2008(1): 38-41, 60.
- [8] ISO 2631-1: 1997(E), Mechanical vibration and shock Evaluation of human exposure to whole-body vibration-part1: general requirements [S]. ISO, 1997.
- [9] 汽车操纵稳定性试验和评价方法 [S]. 中华人民共和国汽车行业标准 GB/T6323.1-1994.
- [10] 白迎春. 基于灵敏度分析的客车结构优化设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学机械与汽车学院, 2009.

[编辑:柴福莉]

(上接第 165 页)

- [7] TEREN F. Minimum-time acceleration of aircraft turbofan engines by using fin algorithm based on nonlinear programming [R]. NASA-TM-73741, 1997.
- [8] 段广仁. 线性系统理论 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
- [9] BOBROW J E, MCDONELL B W. Modeling, identification, and control of pneumatically actuated robot [C]//Proceed-

- ings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA. Part 1 (of 4), Apr. 20-25, 1997, Albuquerque, NM, USA. Piscataway: IEEE, 1997: 124-129.
- [10] [加]安杰利斯. 机器人机械系统原理理论、方法和算法 [M]. 宋伟刚, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[编辑:柴福莉]