

文章编号 : 1002-0446(2004)02-0170-06

## 基于遗传算法的柔性机械臂的同时优化设计\*

肖志权, 崔玲丽

(中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 针对单连杆柔性机械臂系统, 采用同时设计的方法, 对包含柔性机械臂结构参数、传感器参数和控制器参数的系统模型进行整体优化设计, 改进的遗传算法用于参数的全局寻优。仿真结果显示, 优化设计后的单连杆柔性机械臂为变截面梁, 可以仅采用简单的控制器(PD 控制器)达到减小梁末端振动的效果。

**关键词:** 遗传算法; 柔性机械臂; 同时设计; 优化

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** B

## GA Based Concurrent Optimization and Design of Flexible Manipulator System

XIAO Zhi-quan, CUI Ling-li

(The Key Laboratory of Complex and Intelligent Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Concurrent design method is adopted in this paper to design and integrally optimize a single-link robotic flexible manipulator system, whose mathematical model includes construction parameters, sensor parameters and controller parameters. An improved genetic algorithm(GA) is used for parameter global optimization. Simulation results demonstrate that the optimized manipulator beam is non-uniform cross-section beam. And with simple PD controller, the system shows improved performances of tip vibration suppression.

**Keywords:** genetic algorithm; flexible manipulator; concurrent design; optimization

### 1 引言 (Introduction)

近年来, 已经有大量的关于柔性机械臂的研究<sup>[1]</sup>。相对于刚性机械臂, 柔性机械臂系统是非常复杂的动力学系统, 由于其结构的柔性而带来的非线性、强耦合性, 以及执行过程中的振动问题, 使得实现柔性机械臂的高精度有效控制提出更高要求。

关于柔性机械臂的动力学建模, 主要有利用拉格朗日方程的假设模态法、有限元法、有限段法, 也有利用牛顿—欧拉方程的牛顿—欧拉法, 甚至神经网络建模法等等<sup>[2]</sup>。

国内外的学者针对柔性机械臂的控制问题, 主要是抑制振动, 提出了许多不同的控制策略, 包括加速度反馈控制, 被动阻尼控制, 力反馈控制, 经典 PID 控制, 变结构控制, 鲁棒和自适应控制, 智能控制, 非线性反馈控制等等<sup>[2]</sup>。

绝大多数的研究集中在对柔性机械臂控制规律上, 主要是将其作为均匀梁进行研究, 很少涉及到对

柔性机械臂本身结构的研究以及结构对控制效果的影响。根据文献[1]的研究结果, 单连杆柔性机械臂的结构与控制效果之间有密切关系。因此, 本文采用了同时设计、整体优化的思想设计柔性机械臂控制系统。首先建立了包含柔性机械臂结构参数、传感器参数和控制器参数的系统模型, 然后采用遗传算法同时优化结构、传感器和控制器三者的参数。性能指标可以选择 ISE 准则或 ISTE 准则, 以及考虑防止控制量过大的改进的性能指标。

系统的复杂性以及来自结构和控制上的多重约束增大了优化设计的难度, 为此, 本文对遗传算法进行了改进, 并采用罚函数法将约束问题转化为无约束问题求解。

### 2 柔性机械臂系统的动力学建模 (Dynamic modelling of flexible manipulator system)

#### 2.1 Euler-Bernouli 梁模型

考虑一个单连杆柔性机械臂, 如图 1 所示, 由直

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69885007); 国家杰出青年基金资助项目(60125310)。  
收稿日期: 2003-09-01

流电机及减速器驱动,在平面内绕中心  $O$  水平转动,因其梁长较横截面大很多,可以视为 Euler-Bernouli 梁(忽略轴向变形),设电机与梁为刚性连接.先设梁为均匀矩形截面梁(其后将优化梁的形状,可能成为非均匀截面梁),梁长  $L$ ,矩形截面宽  $B$ ,高  $H$ ,梁的端部有质量为  $M_p$  的负载.

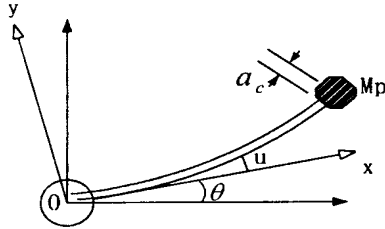


图 1 单连杆柔性机械臂

Fig.1 A single-link flexible manipulator

柔性机械臂的水平转动可以视为大范围刚性转动和小范围梁的弹性变形的叠加,定义其总位移  $y$  为:

$$y = x\theta(t) + u(x, t) \quad (1)$$

其中,  $\theta$  为其刚性转角,  $u$  为弹性变形.

Euler-Bernouli 梁的振动方程为:

$$EI(x) \left| \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \right| + \rho S(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

边界条件为:

$$EI(x) \left| \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_{x=0} - I_H \ddot{\theta} + \tau = 0 \quad (3)$$

$$y_{x=0} = 0, \quad y'_{x=0} = \theta \quad (4)$$

$$EI(x) \left| \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_{x=L} + J_p \left| \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (5)$$

$$EI(x) \left| \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \right|_{x=L} = M_p \left| \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right|_{x=L} \quad (6)$$

式中:  $E$  是梁的体弹模量,  $I$  是梁的转动惯量,  $EI$  是梁的抗弯刚度,  $\rho$  是梁单位长度的质量密度,  $S$  是梁截面面积,对于均匀梁来说,  $I$  和  $S$  是常数,而对于非均匀截面梁,它们也将是变量  $x$  (转动中心至梁上某点的沿梁方向的距离) 的函数.  $I_H$  是梁固定端转盘的转动惯量,  $M_p$ 、 $J_p$  和  $a_c$  分别是端部负载的质量、转动惯量和负载质心相对于梁顶端的  $x$  轴坐标.  $\tau$  是输入转矩.这里  $(\cdot)$  代表对  $x$  的偏导,  $(\ddot{\cdot})$  代表对时间  $t$  的偏导.

### 2.2 柔性机械臂的有限段差分近似模型

根据文献[1],可以采用有限差分法将式(2)(6)转化成结构振动方程形式,进而转化成便于求解的

一阶微分方程组.将柔性机械臂梁沿长度方向均匀分成  $n$  段,每段长  $\Delta x = \frac{L}{n}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ . 定义:  $x_i = i \cdot \Delta x$ ,  $y_i = y(i \Delta x, t)$ ,  $\beta_i = \beta(i \Delta x) = EI(i \Delta x)$ ,  $S_i = S(i \Delta x)$ . 用差商代替微分,见文献[8],由式(2)可得:

$$y_{i-1} = -\Delta x \theta', \quad y'_0 = \theta \quad (7)$$

式(3)可以近似表示为:

$$I_H \ddot{\theta} - \beta_0 \frac{1}{(\Delta x)^2} (y_1 - \Delta x \theta) = \tau \quad (8)$$

式(2)可以近似表示为:

$i = 1$  时:

$$\frac{1}{2(\Delta x)^4} [(\beta_2 + 2\beta_1 - \beta_0) y_3 - 4(3\beta_1 - \beta_0) y_2 - 4(\beta_1 - 5\beta_0 - \beta_1) y_1 + 4(\beta_1 - 3\beta_0) y_0 - (\beta_1 - 2\beta_0 - \beta_0) y_{-1}] + \rho S_1 \ddot{y}_1 = 0 \quad (9)$$

$i = 2$  时:

$$\frac{1}{2(\Delta x)^4} [(\beta_3 + 2\beta_2 - \beta_1) y_4 - 4(3\beta_2 - \beta_1) y_3 - 4(\beta_2 - 5\beta_1 - \beta_0) y_2 + 4(\beta_2 - 3\beta_1) y_1 - (\beta_2 - 2\beta_1 - \beta_0) y_0] + \rho S_2 \ddot{y}_2 = 0 \quad (10)$$

$i = 3, \dots, n-2$  时:

$$\frac{1}{2(\Delta x)^4} [(\beta_{i+1} + 2\beta_i - \beta_{i-1}) y_{i+2} - 4(3\beta_i - \beta_{i-1}) y_{i+1} - 4(\beta_{i+1} - 5\beta_i - \beta_{i-1}) y_i + 4(\beta_{i+1} - 3\beta_i) y_{i-1} - (\beta_{i+1} - 2\beta_i - \beta_{i-1}) y_{i-2}] + \rho S_i \ddot{y}_i = 0 \quad (11)$$

$i = n-1$  时:

$$\frac{1}{(\Delta x)^2} (\beta_n y'_n - 2\beta_{n-1} y'_{n-1} + \beta_{n-2} y'_{n-2}) + \rho S_{n-1} \ddot{y}_{n-1} = 0 \quad (12)$$

式(5)可以近似表示为:

$$\beta_n y'_n = \frac{J_p}{\Delta x} \ddot{y}_{n-1} - \left( \frac{J_p}{\Delta x} + a_c M_p \right) \ddot{y}_n \quad (13)$$

式(6)可以近似表示为:

$$\beta_n y'_n - \beta_{n-1} y'_{n-1} = M_p [(\Delta x + a_c) \ddot{y}_n - a_c \ddot{y}_{n-1}] \quad (14)$$

将式(13)分别带入式(12)和式(14),并且继续用差商代替微分,得到:

$$\left( \frac{J_p}{(\Delta x)^3} + \rho S_{n-1} \right) \ddot{y}_{n-1} - \frac{1}{(\Delta x)^2} \left( \frac{J_p}{\Delta x} + a_c M_p \right) \ddot{y}_n - \frac{1}{(\Delta x)^4} [2\beta_{n-1} y_n - (4\beta_{n-1} + \beta_{n-2}) y_{n-1} + (2\beta_{n-1} + 2\beta_{n-2}) y_{n-2} - \beta_{n-2} y_{n-3}] = 0 \quad (15)$$

$$\left( \frac{J_p}{\Delta x} + a_c M_p \right) \ddot{y}_{n-1} - \left[ \left( \frac{J_p}{\Delta x} + a_c M_p \right) + M_p (\Delta x + a_c) \right] \ddot{y}_n - \frac{\beta_{n-1}}{(\Delta x)^2} (y_n - 2y_{n-1} + y_{n-2}) = 0 \quad (16)$$

综合式(8)(11)及式(15),式(16)可以写成矩阵形式的振动方程:

$$[M] \ddot{y} + [K] y = [B] \tau \quad (17)$$

其中,  $M$ 、 $K$  分别是结构的质量矩阵和刚度矩阵,  $B$  是输入矩阵,  $\tau$  是输入转矩. 将式(17)转化为一阶微分方程组时, 不可避免地要进行矩阵求逆  $[M]^{-1}$ , 这样可能增加产生舍入误差的机会, 因此本文并没有将以上方程组写成振动方程形式, 对方程组的处理见 2.4 节.

**2.3 直流电机、减速器及测速电机转速反馈的模型**  
考虑直流电机及减速器的动态方程, 有:

$$(J_m + J_L) \ddot{\theta}_m + (B_m + \frac{K_r K_e}{R}) \dot{\theta}_m = \frac{K_r}{R} V_c - r \tau$$

$$\theta_m = \frac{\theta}{r} \quad (18)$$

其中,  $J_m$  和  $J_L$  分别为电机转子转动惯量和减速器侧的转动惯量,  $B_m$  为阻尼系数,  $K_r$  是电机转矩系数,  $K_e$  为电动势常数,  $R$  是电枢电阻,  $r$  是减速比,  $\theta_m$  和  $\theta$  分别是电机驱动轴角位移和负载轴角位移.

若考虑安装测速电机实时测量输出转速来加入电机轴速度负反馈, 则动态方程为:

$$(J_m + J_L) \ddot{\theta} + (B_m + \frac{K_r(K_e + K_w K_i)}{R}) \dot{\theta}$$

$$= r \frac{K_r K_\theta}{R} V_c - r^2 \tau \quad (19)$$

将式(19)与式(8)联立, 得:

$$(J_m + J_L + r^2 I_n) \ddot{\theta} + (B_m + \frac{K_r(K_e + K_w K_i)}{R}) \dot{\theta} + \frac{r B_0}{\Delta x}$$

$$= \frac{r K_r K_\theta}{R} V_c + \frac{r^2}{(\Delta x)^2} y_1 \quad (20)$$

**2.4 系统状态方程模型**

考虑以柔性机械臂的末端位置为输出, 则输出矩阵可以定义为:

$$z = y_n \quad (21)$$

对于已经获得的方程组, 首先将式(15)和(16)进行解耦, 然后联立式(9)~(11), 式(20)和(21), 定义:

$q_0 = [\theta \ y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]'$ , 取状态变量为  $q = \begin{bmatrix} q_0 \\ \dot{q}_0 \end{bmatrix}$ , 可以直接写出状态方程, 而避免进行矩阵求逆  $[M \setminus \tau]^{-1}$ .

$$\dot{q} = Aq + Bu, \quad Z = Cq \quad (22)$$

式中,  $A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ ,  $B = \frac{r K_r K_\theta}{R}$ , 输入量  $u$  定义为  $V_c$ ,  $C = [0 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]$ .

这里,  $A_{11} = [0]_{(n+1) \times (n+1)}$ ,  $A_{12} = I_{(n+1) \times (n+1)}$ ,

$A_{22} = [0]_{(n+1) \times (n+1)}$ ,  $A_{21}$  由式(9)~(11)及式(15)和(16)解耦后的方程式求得, 这里不详述.

式(21)描述的系统模型包含了柔性机械臂结构参数和传感器参数.

### 3 控制策略及系统总体模型 (Control strategy and system overall model)

#### 3.1 确定控制策略

对于柔性机械臂的控制, 主要目的是抑制振动, 已有许多学者提出了各种控制算法<sup>[2]</sup>, 基于线性状态方程模型的控制算法有基于状态反馈极点配置的方法、奇异摄动法、卡尔曼滤波算法、模型参考自适应算法等等. 这些算法几乎都是将柔性机械臂当作均匀截面梁, 采用假设模态法建模, 截取前 2~3 阶模态. 这种方法建立的状态方程(状态变量)数量相对较少, 方法简单, 具有系统性和效率高的特点, 但缺点是对非均匀截面量进行建模与控制, 而且对于柔性机械臂的振动抑制主要依赖于控制算法的有效性, 因而存储造成算法复杂, 算法计算量较大, 不便于工程实现.

本文建立了直流电机加减速器驱动柔性机械臂的线性状态方程, 可以方便地处理均匀和非均匀截面梁的建模和相应的控制算法, 因而灵活性很大. 虽然模型的状态变量都有明确的物理意义, 可测量, 但是随着梁分段数  $n$  的增加, 状态变量数量 ( $2n+2$  个) 也大量增加, 因此基于状态变量反馈的控制算法无论从经济角度还是从工程实际角度都是不可行的. 根据文献[1]可以确定柔性机械臂的形状结构与控制参数的整体优化. 本文在此基础上, 力图发挥结构与控制同时设计、整体优化对柔性机械臂的振动抑制作用, 相应地减少系统性能对控制算法的依赖, 或者降低控制算法的复杂性. 本文采用简单的基于梁末端位置的 PD 控制器, 通过同时优化设计梁的形状结构、根部速度反馈增益以及 PD 控制器的参数, 达到抑制振动的目的, 算法也易于工程实现. 参数的优化设计和调整通过遗传算法(GA)来完成.

在实际应用中, 不可能也没有必要实现纯微分动作, 可以采用一个带滞后的一阶环节近似微分动作, 构造近似的 PD 控制器<sup>[5]</sup>, 经过拉普拉斯变换后为:

$$C(s) = K_p \left[ 1 + \frac{s T_d}{1 + s T_d / N} \right] E(s) \quad (23)$$

其中,  $K_p$  为比例系数,  $T_d$  为微分时间常数,  $E$  是误差,  $N$  是以为较大的数值, 当  $N \rightarrow \infty$  时, 将趋近于

理论的微分动作。

### 3.2 系统总体模型

式(22),包含直流电机、减速器和测速电机以及分段均匀的柔性机械臂的数学模型为  $\Sigma_0(A, B, C)$ , 式(23), PD 控制器的模型为  $\Sigma_1(K_p, T_d) = K_p \left[ 1 + \frac{sT_d}{1 + sT_d/N} \right] E(s)$ ,  $E$  是理想输入与柔性机械臂实际末端位置的误差。则包含柔性机械臂结构参数、传感器参数和控制器参数的系统总体模型定义为:

$$\Sigma_T = \Sigma_0(A, B, C) \Sigma_1(K_p, T_d) \quad (23)$$

系统框图如图 2 所示。

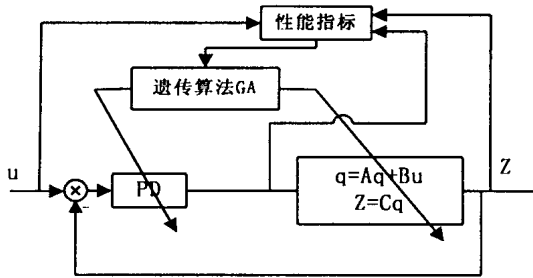


图 2 系统框图

Fig. 2 System chart

## 4 基于遗传算法的优化设计 (Optimization design based on genetic algorithm)

### 4.1 遗传算法简介

遗传算法是一种高效的随机搜索与优化方法,与其他优化方法相比,遗传算法仅利用适应度值进行优化计算,无需函数导数等其它辅助信息,而且它具有全局优化能力和隐含的并行性,因而在函数优化、结构优化、工业调度、并行计算等诸多领域得到广泛应用<sup>[6,7]</sup>。

标准的遗传算法包括 3 个基本操作:选择、交叉和变异。通过遗传操作,在解空间内并行地、随机地搜索使适应度值最大的个体,并通过一代又一代的进化,最终找到最优个体和最优解。

在优化设计中,设计变量、目标函数(性能指标)的选取、约束条件处理是三个重要的因素。通过合理的编码,将设计变量转化为适合于群体进化的表达形式。对于目标函数(性能指标)进行处理,使其转化为单调的适应度函数,这样,在群体进化过程中,适应度值就可以反映优化模型的目标函数,并通过判别适应度值来确定最优解。约束条件的处理对于遗传算法的成功运用起到至关重要的作用。

### 4.2 变量的设计和性能指标的选取

本文将柔性机械臂的结构优化(或最优形状)设计问题,转化为机械臂梁的总质量不变的情况下优化梁的刚度( $EI$ )分布。这里考虑的矩形截面梁具有均匀高度,待优化的结构参数是各段的宽度  $b(b_1, b_2, \dots, b_n)$ ,因此优化后的梁是变截面的,而不是通常的均匀截面梁。此外,待优化的参数还包括电机轴(手臂根部)速度反馈增益  $K_f$ 、PD 控制器的参数  $K_p$ (比例系数)、 $T_d$ (微分时间常数)。定义待优化参数向量  $X = [b_1, b_2, \dots, b_n, K_p, T_d, K_f]$ 。

鉴于实数编码在解决工程优化问题中的优势<sup>[7]</sup>,本文采用实数编码。

采用 ISE(误差平方积分)准则函数  $J(X) = \int_0^\infty e^2(t) dt$  作为性能指标,其中  $e$  为参考输入和实际输出间的误差。为了防止控制量过大,在性能指标中加入控制输入的平方项,性能指标函数为  $J(X) = \int_0^\infty (w_1 e^2(t) + w_2 u^2(t)) dt$ ,其中,  $u(t)$  为控制输入,  $w_1, w_2$  为权值。

### 4.3 约束条件的处理

无约束设计可能导致不可接收的结果,如零截面或者截面很大,因此建立约束才能使问题的求解有实际意义。目前为止,还没有找到一种能够处理各种约束条件的一般方法,只能针对具体应用问题及约束条件的特征,选用不同的处理方法<sup>[4]</sup>。目前关于遗传算法处理约束问题,一般有抛弃不可行解法、修复不可行解法、罚函数法、修改遗传因子法等等。本文涉及到三方面的约束问题。

首先是结构的刚度约束。优化后的梁必须满足刚度的要求,通过预先的校核,可以确定梁宽度极限值,并且以上、下限约束的形式给出,保证刚度要求。

系统稳定约束比较复杂。由于系统是动态响应系统,对于每一个待优化参数都存在这样的约束,要求使得系统稳定。但是对于这个有多种类和多个优化参数的系统,要想解析地求得系统稳定性与各个参数间的关系,从而得到各参数的约束,这非常困难。这种约束为隐性约束,为此我们采用了抛弃不可行解法。另外,在交叉和变异操作过程中,为了减少产生大量不可行个体(系统不稳定)的可能性,我们对遗传操作也进行了改进,即在交叉操作中,尝试采用了时变交叉概率策略,交叉概率为:  $\text{cross\_prob} = 1 - \text{step}/\text{total\_steps}$ ,  $\text{step}$  是当前迭代数,  $\text{total\_steps}$  是总的迭代数。在迭代初期,希望交叉概率较高,不致于过早收敛,而随着迭代数的增加,个体的进化逐步趋近最优解,交叉反而易产生不可行个体,因此希望减小交叉概率。交叉操作采用算术交叉。在变异操

作中,采用非均匀变异,变异幅度也随着迭代数的增加而减小,从而也可以减少在迭代后期产生过多不可行个体的问题.

第三方面的约束来自于本文对优化设计后梁结构的要求,即梁的总质量不变.经过转化,对于梁的各段宽度  $b_i (i=1, 2, \dots, n)$  有:  $\sum_{i=1}^n b_i = nb$ , 其中  $b$  为均匀梁的宽度.

定义:  $g(b_i) = \left| \sum_{i=1}^n b_i - nb \right|$ . 对于等式约束, 本文采用罚函数法, 将约束条件以罚函数的形式, 包含到适应度函数中, 将约束问题转化为无约束问题. 考虑到数值计算很难满足到等式的精度, 给出等式约束一个微小的允许域  $\epsilon$  (约束精度). 因此构造罚函数:  $\Phi(X) = J(X) + w_g g'(b_i)^2$ , 其中,  $J(X)$  为性能指标函数,  $w_g$  是罚因子.

$$g'(b_i) = \begin{cases} 0 & g(b_i) \leq \epsilon, \text{满足约束} \\ g(b_i) & g(b_i) \geq \epsilon, \text{不满足约束} \end{cases}$$

因此, 定义适应度函数为:

$$f = f_{\max} - \Phi(X)$$

这里,  $f_{\max}$  取足够大数, 保证适应度值  $f$  恒大于

0.

### 5 仿真 (Simulation)

为了验证本方法的有效性, 本文对某单连杆柔性机械臂系统进行数值仿真. 直流电机驱动单连杆柔性机械臂在平面内水平转动, 柔性机械臂的参数为: 手臂梁长度  $L = 0.947\text{m}$ , 梁截面高  $H = 0.0762\text{m}$ , 梁平均截面宽  $b = 0.0064\text{m}$ , 梁的弹性模量  $E = 7.0 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ , 梁固定端转动惯量  $I_h = 2.3 \times 10^{-4}\text{kgm}^2$ ; 梁端部载荷参数: 端部质量  $M_p = 0.33\text{kg}$ , 端部质量载荷对梁端部的距离  $a_c = 0.035\text{米}$ , 端部质量载荷的转动惯量  $J_p = 1.5 \times 10^{-4}\text{kgm}^2$ ; 直流电机参数: 电枢电阻  $R = 1.39\Omega$ , 转子转动惯量  $J_m = 0.01384 \times 10^{-4}\text{kgm}^2$ , 电机转矩常数  $K_E = 0.24\text{Nm/A}$ , 电机反电动势常数  $K_b = 0.24\text{V/(rad/s)}$ , 测速电机常数  $K_w = 0.06685\text{V/(rad/s)}$ .

改进的遗传算法的控制参数是: 种群规模为 60, 最大进化代数 40; 遗传算法的策略为: 实数编码, 轮盘赌选择, 时变交叉概率的整体算术交叉, 非均匀变异, 并采用了改进的方向算子策略<sup>[3]</sup>.

图 3 图 5 是柔性机械臂系统梁分段数为 6 段、截面宽度的变化范围是  $[0.70b, 1.30b]$  时的仿真结果, 采用 ISE 性能指标. 图 3 中曲线 1 为均匀梁末端位置的 PD 控制阶跃响应, 曲线 2 为经过优化设计后的手臂梁末端位置的 PD 控制阶跃响应. 整体优化设

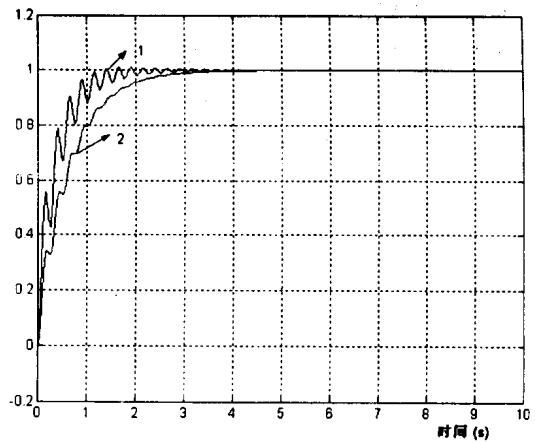


图 3 端部位置的阶跃响应  
Fig. 3 Step responses of the tip position

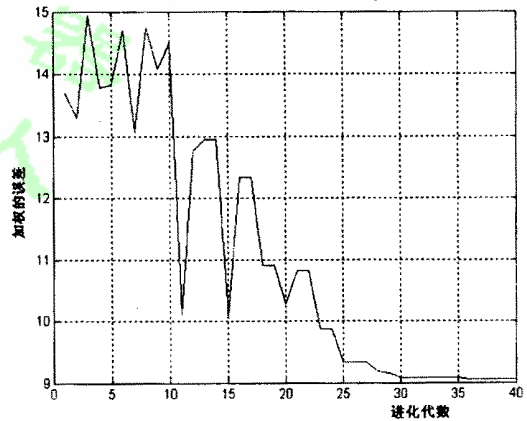


图 4 遗传算法寻优过程  
Fig. 4 Evolutionary process of the GA

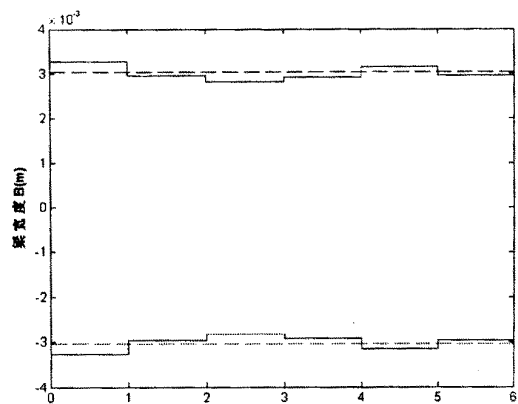


图 5 梁的优化形状(6段)  
Fig. 5 Optimized shape of the beam (6 segments)

计后,手臂的末端振动有较好的抑制,且为分段均匀的变截面梁结构。

对将柔性机械臂梁分为 4 段或者 10 段( $n=4$  或  $n=10$ )的系统也进行了数值仿真,仿真结果具有一定的相似性,但从工程实际出发,分段数量不宜过多。

## 6 结论 (Conclusion)

本文采用同时设计的思想,整体优化柔性机械臂系统的结构、传感器和控制器参数,达到控制系统的全局优化。仿真结果显示,通过合理选择遗传操作方式以及罚函数的系数,被优化设计的系统比仅仅采用优化控制的均匀梁柔性机械臂系统,有更好的响应性能和振动抑制效果,而且控制器很简单(PD 控制器)。实际上,对于不同的设计目标,可以采用不同的性能指标、控制算法甚至优化策略。此外,对于优化设计过程中,遗传操作的概率、罚函数的权重系数等的优化也将在以后的工作中进行。

## 参考文献 (References)

(上接第 169 页)

## 参考文献 (References)

- [1] Matthew V, Andreas F. Zero dynamics in kinematical redundant robots [A]. Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Systems Engineering [C]. Pittsburgh, PA: 1990. 66 - 69.
- [2] Matthew V, Andreas F. Chaotic zero dynamics in kinematical redundant robots [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(5): 784 - 796.
- [3] 李立,李开富,陈永. 平面 4R 冗余度机器人自运动中的混沌现象 [J]. 机械传动, 2003, 27(2): 1 - 4.
- [4] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Control chaos [J]. Physical Review Letters, 1990, 64(6): 1196 - 1199.
- [5] Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback [J]. Physical Letters A, 1992, 170(6): 421 - 428.
- [6] 王光瑞,于熙龄,陈式刚. 混沌的控制、同步与利用 [M]. 北京: 国

- [1] Zhou P X, Wang F Y, Chen W N, et al. Optimal construction of flexible manipulators: a case study based on LQR output feedback [J]. Mechatronics, 2001, 11(1): 55 - 77.
- [2] 王树新,员今天,石菊荣,等. 柔性机械臂建模理论与控制方法研究综述 [J]. 机器人, 2002, 24(1): 86 - 91.
- [3] Yamamoto K, Inoue O. New evolutionary direction operator for genetic algorithms [J]. AIAA Journal, 1995, 33(10): 1990 - 1993.
- [4] 蔡宣三. 最优化与最优控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1982.
- [5] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析——MATLAB 语言应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] 陆金桂,李谦,王浩,等. 遗传算法原理及其工程应用 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1997.
- [7] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [8] Mathews J H, Fink K D. 数值方法 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

## 作者简介:

- 肖志权 (1971-), 男, 博士生. 研究领域: 柔性机器人, 演化计算, 鲁棒控制, 优化与控制.
- 崔玲丽 (1976-), 女, 博士生. 研究领域: 柔性机器人, 演化计算, 优化与控制.

- [7] 熊有伦,丁汉,刘恩沧. 机器人学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [8] 陈士华,陆君安. 混沌动力学初步 [M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1998.
- [9] 姜万录,张淑清,王益群. 混沌运动特征的数值试验分析 [J]. 机械工程学报, 2000, 36(10): 13 - 17.
- [10] 徐缤昌,阙志宏. 机器人控制工程 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1991.

## 作者简介:

- 张登材 (1973-), 男, 硕士研究生. 研究领域: 机器人机构学.
- 李立 (1965-), 女, 工学博士, 教授. 研究领域: 机构学, 机器人学和设计自动化.