

柔性机械臂结构控制一体化设计

崔玲丽¹, 高立新¹, 张建宇¹, 肖志权²

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院 北京市先进制造技术重点实验室, 北京 100022;

2. 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: 综合考虑机械结构和控制器对系统性能的影响, 采用结构与控制一体化设计方法对单连杆柔性机械臂系统进行了研究, 同时优化设计参数包括柔性机械臂结构参数和控制器参数. 为兼顾系统鲁棒性和抑制末端柔性振动性能, 采用 H_∞ 鲁棒控制器. 结构设计变量的参数寻优采用智能优化算法. 设计结果表明, 柔性机械臂具有非均匀截面梁结构, 设计的控制器对系统参数的不确定性有较好的鲁棒性.

关键词: 柔性机械臂; 一体化设计; 鲁棒控制; 遗传算法

中图分类号: TP 24

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2007)08-0791-05

对柔性机械臂进行控制, 主要有主动控制和被动控制 2 种方式^[1-2]. 主动控制通过向系统施加外力来控制系统的弹性振动, 其优点是能降低柔性机械臂各阶弹性模态的振动. 被动控制主要通过系统自身的结构来减弱和吸收振动, 如采用耗能或储能材料来抑制振动, 或者改变机械臂的结构提高刚度等, 其优点是对抑制机械臂高频振动具有较好的作用, 但是对低频阻尼效果不佳. 基于文献[3-4], 作者将柔性机械臂的结构和控制进行一体化设计, 将结构设计变量和控制参数同时作为独立的设计变量进行优化, 对机械子系统和控制子系统的同时设计问题进行了研究.

1 柔性机械臂系统模型

1.1 机械臂本体模型

单连杆柔性机械臂可利用 Bernoulli-Euler 梁理论建模, 振动方程及其边界条件为

$$[EI(x)s''(x)]'' - \rho A(x)\ddot{s}(x) = 0 \tag{1}$$

$$s(x)|_0 = 0, s'(x)|_0 = \theta, I_h\ddot{\theta} - EI(x)s''(x)|_0 = \tau \tag{2}$$

$$EI(x)s''(x)|_L + J_p\dot{s}'(x)|_L + a_cM_p\dot{s}(x)|_L = 0 \tag{3}$$

$$[(EI(x)s''(x))]'|_L + a_cM_p\dot{s}(x)|_L + M_p\dot{s}(x)|_L = 0 \tag{4}$$

其中, $s(x)$ 是梁的总体位移 (刚性位移加上柔性变形位移); $s(x) = \theta(t) + w(x, t)$, θ 是轴的转角, $w(x, t)$ 是梁的柔性变形位移; I_h 是梁固定端转盘的转动惯量; M_p, J_p, a_c 是端部载荷参数, 分别为端部质量、转动惯量、质心相对于梁顶端的 x 轴坐标.

$I(x), A(x)$ 均随着梁上各点的位置不同而变化, 方程(1)是变系数微分方程, 除少数特殊情形之外得不到解析解. 在此采用分段均匀逼近的半解析方法——有限差分法, 使偏微分可以用有限差商来近似. 设机械臂可以用 N 小段来逼近, 其中每段都具有均匀的质量与刚度, 但每段的质量和刚度可能不同. 通过冗繁的推导^[3,5], 可得到分为 N 段的柔性手臂的 $N+1$ 个节点方程构成的精确数学模型

$$M\ddot{s} + Ks = \tau B \tag{5}$$

其中, $s = [\theta, s_1, s_2, \dots, s_{n-2}, s_{n-1}, s_n]'_{n+1}$; $B = [1, 0, 0, \dots, 0, 0, 0]'_{n+1}$; τ 是输入转矩; M, K 为系统的质量

收稿日期: 2006-05-10.

基金项目: 北京市先进制造技术重点实验室开放基金资助项目(00419); 北京工业大学青年科研基金资助项目(00283).

作者简介: 崔玲丽(1976-), 女, 黑龙江佳木斯人, 讲师.

矩阵与刚度矩阵,由系统的结构参数组成.

1.2 驱动器模型

考虑直流电机及减速器的动态方程

$$(J_m + J_L)\ddot{\theta}_m + (B_m + K_r K_c/R)\dot{\theta}_m = K_r V_c/R - r\tau_m, \theta_m = \theta/r \tag{6}$$

其中, J_m 、 J_L 分别为电机转子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_c 为电动势常数; R 为电枢电阻; r 为减速比; θ_m 为电机驱动轴角位移; θ 为负载轴角位移; V_c 为输入控制电压.

1.3 系统状态方程模型

联立式(5)、式(6),得到包含直流电机动态的柔性机械臂系统的动力学方程

$$M'\ddot{Q} + D'\dot{Q} + K'Q = bV_c. \tag{7}$$

其中 M' 、 D' 和 K' 分别为方程联立后的广义质量矩阵、广义阻尼矩阵和广义刚度矩阵. 则柔性机械臂系统的状态方程为

$$\dot{X} = AX + BV_c, Y = CX + DV_c.$$

其中

$$\begin{aligned} X &= [Q \quad \dot{Q}]^T \\ A &= \begin{bmatrix} 0_{m \times m} & I_{m \times m} \\ -M'^{-1}K' & -M'^{-1}D' \end{bmatrix} \\ B &= [0_{m \times 1} \quad M'^{-1}]^T, \quad D = [0] \\ C &= [L \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 1 \quad \vdots \quad 0_{1 \times m}]_{1 \times 2m}, \quad m = 2N + 1. \end{aligned}$$

该模型的输入是直流电机的控制电压,输出是机械臂末端的总位移,或者机械臂根部转角等(与状态方程中的输出方程有关). 系数矩阵 A 是由手臂的结构参数即质量与刚度分布以及电机参数共同决定的,输入矩阵 B 体现了系统的控制器参数,输出矩阵 C 则反映了传感器位置及手臂的变形等信息. 此模型包含了柔性机械臂的形状参数、直流电机的参数以及控制器参数,对于研究机械臂的形状对系统动态性能的影响非常方便,可以利用此特点进行系统结构和控制一体化设计.

2 控制器的设计

H_∞ 范数优化能有效地处理包括随频率变化的不确定因素,如高频范围的非建模动态和低频范围的对象干扰等,与标称对象的关系可以是加性、乘性或者是互质因子摄动形式^[6]. 考虑到柔性机械臂系统建模过程中的简化处理、线性化处理等常会忽略高频动态以及结构可变所带来的不确定性,故采用基于输出反馈的 H_∞ 鲁棒控制器以提高系统鲁棒性.

$P(s)$ 为柔性机械臂系统的线性化模型,其混合灵敏度问题可由图 1 表示. 其中基于 $P(s)$ 的增广被控对象由图 1 中除控制器外的部分组成. u 为控制输入信号; w 为参考输入信号; y 为输出信号; e 为控制误差信号; $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$ 为正则加权函数. 引入 $S = [I + PK]^{-1}$, 则补灵敏度函数 $T = I - S$. 3 个受控输出 Z_1 、 Z_2 和 Z_3 分别是对 e 、 u 和 y 的加权乘积,可得 $w-Z$ 的闭环传递函数

$$F_{Zw}(s) = \begin{bmatrix} T_{Z_1 w} \\ T_{Z_2 w} \\ T_{Z_3 w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 K S \\ W_3 T \end{bmatrix} \tag{8}$$

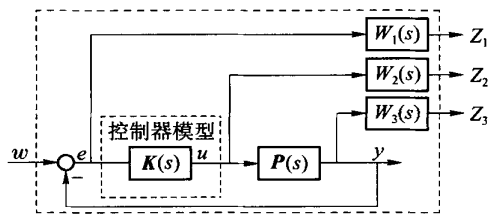


图 1 加权灵敏度问题框图

Fig. 1 Block diagram of the mixed sensitivity

3 个受控输出 Z_1 、 Z_2 和 Z_3 分别是对 e 、 u 和 y 的加权乘积,可得 $w-Z$ 的闭环传递函数

则 H_∞ 控制问题可表示为

$$\min_K \|F_{2w}(s)\|_\infty \leq \gamma \quad (9)$$

其中 γ 为给定标量 ($0 < \gamma \in \mathbb{R}$)。当 $\gamma = 1$ 时, 控制器为最优控制器, 否则为次优控制器。 W_1 用来反映控制系统对抑制低频干扰的要求, 并使系统达到一定的频宽要求; W_2 用来反映加性摄动范数, 抑制控制输入; W_3 表示乘性摄动范数界, 一般具有高通特性, 保证闭环系统对高频干扰的抑制^[7]。

3 基于智能优化的结构与控制一体化设计

3.1 一体化设计框架

结构与控制和一体化优化设计兼顾系统的鲁棒性和系统抑制末端柔性振动性能, 目标函数中包含系统的结构参数 V_s 和控制器 K 。设 Ω 为柔性机械臂结构参数的解空间, Λ 为鲁棒控制器的解空间, 则优化设计就是在解空间 Ω 和 Λ 中寻求使得优化目标函数最小的优化设计参数, 表示为

$$J = \min_{V_s \in \Omega, K \in \Lambda} J(V_s, K) = \min_{V_s \in \Omega} [\inf_{K \in \Lambda} J(V_s, K)] \quad (10)$$

其中, 优化目标可以分为内外2层。内层是寻找满足式(9), 使 γ 接近于最优值 γ_{opt} 的鲁棒控制器 K ; 外层是优化机械臂的结构参数, 寻找满足系统机械性能指标(例如机械臂末端柔性振动最小)的结构参数。

内层采用线性矩阵不等式法求解最优 H_∞ 控制器。外层采用智能优化算法——改进的遗传算法进行结构参数寻优。为简化问题, 只考虑具有均匀高度的矩形截面梁柔性机械臂进行研究。在机械臂质量不变的情况下, 通过优化截面的宽度优化梁的刚度 EI 分布。具体优化过程为: 首先通过遗传操作, 生成机械臂的结构参数, 然后求取相应系统的输出反馈 H_∞ 次优控制器, 再以外层优化目标函数构造适应度函数来优化结构参数, 并判断这组结构参数及其控制器的取舍。经过数值迭代, 最终得到优化设计结果。

3.2 遗传算法实现

3.2.1 变量及编码表示

矩形截面梁具有均匀高度, 优化参数为柔性机械臂各段的宽度 $b(b_1, b_2, \dots, b_n)$, 优化后的梁可能是变截面的, 不是通常的均匀截面梁。控制器的参数不包含在优化变量中, 在生成增广被控系统参数后, 由单独的程序独立生成。变量的编码采用实数编码。

3.2.2 性能指标

采用误差平方积分(ISE)准则函数

$$J(X) = \int_0^\infty e^2(t) dt \quad (11)$$

作为性能指标。其中 e 为参考输入和实际柔性机械臂末端位置间的差值。

3.2.3 约束处理

1) 结构的刚度约束及系统性能约束

机械臂横截面宽度取值必须满足刚度要求, 通过预先的校核, 可以确定梁宽度 b 的极限值, 并且以上下限约束的形式给出, 即 $b_{\min} \leq b \leq b_{\max}$ 。

在求输出反馈 H_∞ 控制器时, 假设增广被控对象是能稳定和能检测的, 否则将不能求得控制器。因此, 系统性能的约束就是 $G(s)$ 系统的能稳定和能检测, 即 (A, B_1) 能稳定, (C_2, A) 能检测。

2) 机械臂梁的总质量不变的约束

采用构造罚函数方法, 将约束问题转化成形式上的无约束问题。罚函数构造为

$$\Phi(X) = J(X) + w_g g'(b_i)^2 \quad (12)$$

其中, $J(X)$ 为性能指标函数; w_g 是罚因子。当 $g'(b_i) \leq \epsilon$ 时, $g'(b_i) = 0$; 当 $g'(b_i) \geq \epsilon$ 时, $g'(b_i) =$

$$\left| \sum_{i=1}^n b_i - nb \right|.$$

3) 构造适应度函数

基于性能指标,构造适应度函数

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

式中 f_{\max} 取足够大的数,保证 f 恒大于 0.

3.2.4 遗传操作

利用改进的遗传算法^[8]进行参数寻优. 选择操作采用轮盘赌选择. 在交叉操作过程中,为减少产生大量不可行个体(系统不稳定)的可能性,采用时变交叉概率的整体算术交叉. 在迭代初期,交叉概率较高,不会过早收敛,而随着迭代数的增加和个体的进化,交叉反而易产生不可行个体,因此,在迭代后期通过减小交叉概率来增强系统稳定性. 在变异操作中,采用非均匀变异,变异幅度随着迭代数的增加而减小,会减少在迭代后期产生过多不可行个体的问题.

3.2.5 权函数选择

提高系统的跟踪响应能力就是要极小化系统的输入或干扰与跟踪误差的灵敏度函数,因此,控制目标就是使

$$\|W_1 S\| \leq \gamma, \gamma \rightarrow \gamma_{\min}$$

其中,权函数 W_1 用来反映低频段跟踪性能,并且可以反映控制系统对低频干扰的抑制,一般取为低通滤波器,但阶次不能过高,否则会使控制器阶次增加.

4 仿真

单连杆柔性机械臂系统的参数为:机械臂梁长度 $L = 94.70$ cm,梁截面高 $H = 7.62$ cm,梁截面平均宽 $b = 0.64$ cm,梁弹性模量 $E = 70$ GN/m²,梁固定端转动惯量 $J_h = 0.23$ g·m². 梁端部载荷参数为: $M_p = 33$ g, $a_c = 3.5$ cm, $J_p = 0.15$ g·m². 驱动电机参数为:电枢电阻 $R = 1.39$ Ω,转子转动惯量 $J_m = 1.384$ μg·m²,电机转矩常数 $K_t = 0.24$ N·m/A,电机反电动势常数 $K_e = 0.24$ V/(rad·s⁻¹). 系统输入为直流电机的输入电枢电压,量测输出为机械臂的末端位置.

柔性机械臂的结构可能是非均匀截面梁,截面宽度范围 $[0.8b, 1.2b]$, b 为均匀梁标称宽度. 优化形状预先不可知,随机生成若干组非均匀梁,建立其动力学模型. 根据系统低频动态性能要求,选择权函数 W_1 为高阶低通滤波器形式,取 $W_1 = 90(0.01s + 1)/(0.5s + 1)$. 根据对溢出、未建模动态保证稳定的要求,选取权函数 W_2 ,将 W_2 取为某一常数,不仅可以抑制控制输入,还可以不增加控制器的阶次. 为抑制高频干扰,选择 W_3 为高通滤波器形式,这里取 $W_3 = 0.5s(0.05s + 1)$.

遗传算法的控制参数为:种群规模 50,最大进化代数 100;轮盘赌选择概率 $P_s = 0.8$,时变交叉概率 0.5,变异概率 0.1. 机械臂梁等分为 5 段,选择目标函数为式(11),以抑制末端柔性振动. 图 2 为机械臂梁的优化形状. 图 3 为柔性机械臂系统加入控制器后末端位置的阶跃响应. 图 3 中,曲线 1 为未加入干扰时闭环系统响应;曲线 2 为机械臂末端质量增大为 0.60 kg 后的系统响应. 2 条曲线近乎重合,说明系统对负载变化具有非常好的鲁棒性能.

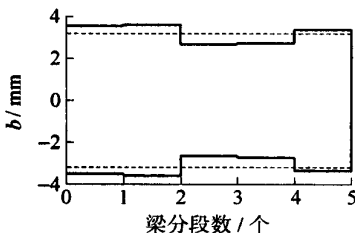


图 2 梁的优化形状

Fig. 2 Optimized shape of the beam

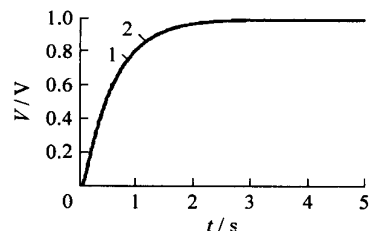


图 3 改变末端质量负载的系统响应

Fig. 3 Step responses with different payload

5 结束语

数值仿真研究表明, 优化后的柔性机械臂具有非均匀截面梁结构, 建立的 H_∞ 控制系统可以兼顾鲁棒性和抑制末端振动的性能. 改进的遗传算法可以方便地将不同的优化目标转化成相应的适应度函数, 从而可以求解本文的结构和控制器的同时优化问题. 但是寻优的结果并不是唯一的, 多次运算可能得到多组优化参数, 这表明得到的结果是次优的, 并非全局最优.

参考文献:

- [1] 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): 86-89.
WANG Shu-xin, YUAN Jin-tian, SHI Ju-rong, et al. A roadmap of research on modeling and control strategy for flexible manipulators[J]. Robot, 2002, 24(1): 86-91. (in Chinese)
- [2] ROSSI Mauro, WANG David. Issues in the design of passive controllers for flexible-link robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1997, 16(4): 577-588.
- [3] ZHOU Pi-xuan, WANG Fei-yue, CHEN Wei-nong. Optimal construction and control of flexible manipulators: a case study based on LQR output feedback[J]. Mechatronics, 2001, 11(1): 59-77.
- [4] 肖志权. 柔性机器人手臂系统控制和优化研究[D]. 北京: 中国科学院情报中心, 2004.
XIAO Zhi-quan. Research on control and optimization design of flexible manipulator system[D]. Beijing: Library of Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [5] CUI Ling-li, GAO Li-xin, ZHANG Jian-yu. On GA based concurrent design of one-link flexible manipulator [C] // Proceedings of ICMEM2005. Monmouth Junction: Science Press, 2005, 10: 429-484.
- [6] GAHINET P. A convex parametrization of H_∞ suboptimal controller [C] // Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control. Tucson: [s. n.], 1992: 937-942.
- [7] 吴旭东, 解学书. H_∞ 鲁棒控制中的加权阵选择 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(1): 27-30.
WU Xu-dong, XIE Xue-shu. Weighting function matrix selection in H_∞ robust control [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1997, 37(1): 27-30. (in Chinese)
- [8] 崔玲丽, 肖志权. 实数编码遗传操作机制的研究 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1577-1606.
CUI Ling-li, XIAO Zhi-quan. Research on the mechanism of real-coded genetic operation [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(11): 1577-1606. (in Chinese)

Integrated Structure and Control Design for Flexible Manipulator System

CUI Ling-li¹, GAO Li-xin¹, ZHANG Jian-yu¹, XIAO Zhi-quan²

(1. The Key Laboratory Beijing Municipality in Advanced Manufacturing Technology, College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. The Key Laboratory of Complex System and Intelligent Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: To consider the effects of both mechanic structure and controller on the system performance, integrated structure and control design method is used for the flexible manipulator. At the same time, the optimal parameters which include the parameters of flexible manipulator structure and the controller parameters are designed. To guarantee both robustness and tip vibration suppression of the system, H_∞ robust controller is used. Structural design variables are optimized by using intelligent optimization algorithms that is an improved genetic algorithms. Design results demonstrate that the optimized manipulator is the structure of non-uniform cross-section beam and the designed controller is robust to the system parametric uncertainties.

Key words: flexible manipulators; integrated design; robust control; genetic algorithms