

文章编号: 1002-0446(2005)01-0073-05

柔性机械手结构/控制融合设计*

朱灯林, 姜涛, 王安麟, 王石刚

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘要: 针对柔性机械手的设计性能要求, 以单臂机械手为例, 讨论了基于系统性能配置的结构/控制融合设计方法. 根据控制系统超调量 σ_p 和调整时间 t_s 的要求, 配置闭环控制传递函数极点的可行区域. 在此基础上, 把柔性结构动力学和控制理论相结合, 建立了包含结构参数和控制参数的性能配置优化模型, 并以系统的转动惯量和控制能量指标为目标函数对机电设计参数进行了优化.

关键词: 柔性机械手; 性能配置; 结构/控制融合建模; 优化设计

中图分类号: TP24

文献标识码: B

Integrated Design of Structure and Control of Flexible Manipulator

ZHU Deng-lin, JIANG Tao, WANG An-lin, WANG Shi-gang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In this paper, the integrated optimal design methodology of mechanical and control system is discussed with regard to the performance requirement and configuration of flexible manipulator. In terms of percent overshoot σ_p and the settling time t_s , the viable region of poles of the closed-loop transfer function is decided. Then, by the combination of dynamics of flexible structure and control theory, the optimum model including structure and control parameters is proposed. Finally, the objective function, which contains the moment of inertia and the control effort of system, is optimized.

Keywords: flexible manipulator; performance configuration; integrated modeling of structure/control; optimization design

1 引言 (Introduction)

现代机电系统不断地向高速化和轻量化方向发展, 同时对系统精度和稳定性的要求也越来越高. 如为了提高装配机器人的工作效率, 装配机器人在系统运行过程中经历着频繁的高加速启停, 极易引起系统的宽频共振, 从而降低系统的运动精度, 限制了系统的工作速度. 机械结构参数和控制参数之间存在着相互耦合作用, 要进一步提高整个系统的动态性能, 应该对机电系统统一建模并对机电设计参数进行并行优化.

文献[1, 2]中提出一种单臂和双臂杆机构和基于 PD 控制的机电融合设计方法, 建立柔性杆机构的机电耦合模型和系统的传递函数, 以主导极点的实部具有最大值作为目标函数来对机构的截面尺寸、驱动力的作用位置和控制增益等参数进行优化设计,

从而使整个系统的振动稳定调整时间最短. 文献[3]针对一种智能镗床的镗刀杆振动的主动控制, 提出了一套基于机电耦合的机电系统设计方法. 文献[4]以电机—丝杠—移动工作台组成的传动机构为例, 研究了系统机电参数间的匹配关系, 提出了部件选型的一些准则. 文献[5]中提出了用回归实验优化方法对机电系统进行机电融合设计, 通过测试—分析—改进物理模型改进的循环迭代过程来实现系统机电参数的最优化设计. 文献[6]中提出了一种分析固定结构与控制的机电耦合方法, 介绍了一种关于机电耦合问题的解决方案, 其主要思想就是在结构分析的软件和控制系统的分析、设计软件之间开发一个通信接口, 实现分析程序间的数据传递、系统耦合分析和一些简单控制系统闭环特征值的计算和响应的模拟.

* 基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(50390063); 博士点基金资助项目(20020248048).

收稿日期: 2004-06-24

以上文献在系统建模时一般都是单目标模型,或者采用结构-控制分别建模、结构-控制循环迭代优化等方法,很难体现实际应用中对系统多目标的并行要求.多目标的模型及其并行的优化方法在机械/控制融合设计中显得尤其重要.针对这个问题,本文以点到点运动的单臂机械手为对象,提出了包含结构参数和控制参数性能配置的优化模型.根据控制系统超调量 σ_p 和调整时间 t_s 的要求,配置闭环控制传递函数极点的可行区域,并在此基础上以系统的转动惯量和控制能量指标为目标函数,对机械/控制系统的多目标机电融合建模及其并行优化设计进行了研究.

2 柔性机械手动力学模型的建立 (Dynamic modeling of the flexible manipulator)

将机械手简化为如图 1 所示的柔性梁,假设其截面形状为矩形.在图中把梁作为一根质量沿长度方向均匀分布的杆件,设梁的长度为 L ,截面对 Y 轴的抗弯刚度为 EI_y ,质量密度为 ρ ,截面面积为 $S = HB$,电机扭矩 T , C 为扭矩 T 的作用点位置到回转中心 O 的距离.

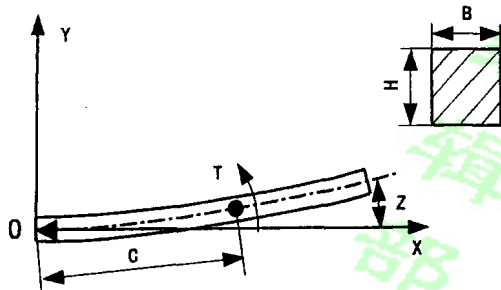


图 1 柔性梁变形示意图
Fig.1 The sketch of deflection of flexible beam

根据梁横向振动 Bernoulli-Euler 方程,不计结构阻尼,得其横向自由振动的运动微分方程为:

$$EI_y \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

采用变量分离法,得到柔性臂的前三阶振型为:

$$\begin{aligned} \phi_1(x) &= -\sin(3.9266x/L) \\ &\quad + 0.027875\sin h(3.9266x/L) \\ \phi_2(x) &= \sin \frac{7.0686x}{L} \\ &\quad + 1.2041 \times 10^{-3} \sin h \frac{7.0686x}{L} \\ \phi_3(x) &= -\sin \frac{10.2102x}{L} \end{aligned}$$

$$+ 5.2032 \times 10^{-5} \sin h \frac{10.2102x}{L}$$

为了将刚性位移用统一的振型表达式表示,令刚性位移的振型函数为:

$$\phi_0(x) = x$$

此时 $\omega_0 = 0$.

根据拉格朗日方法求出柔性臂在运动过程中的动力学方程如下:

$$M\dot{q} + Kq = DT \quad (2)$$

其中:

$$M = \begin{bmatrix} m_{00} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_{nn} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{00} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\dot{q} = (\dot{q}_0 \ \dot{q}_1 \ \dots \ \dot{q}_n)^T$$

$$q = (q_0 \ q_1 \ \dots \ q_n)^T$$

$$D = (\phi_0'(C) \ \phi_1'(C) \ \dots \ \phi_n'(C))^T$$

其中: $m_{ki} = \int_0^L \rho S \phi_i^2 dx$

$$k_{ki} = \int_0^L EI (\phi_i'')^2 dx$$

T ——扭矩

C ——驱动扭矩作用点到臂回转中心的距离.

柔性臂端部的综合位移的拉氏变换为:

$$Z_L(s) = \sum_{i=0}^n \phi_i(L) q_i(s)$$

输入扭矩 T 和运动端部位移的传递函数为:

$$\begin{aligned} G_0(s) &= \frac{Z_L(s)}{T(s)} \\ &= \sum_{i=0}^n \frac{\phi_i(L) \phi_i'(C)}{m_{ki} (s^2 + \omega_i^2)} \\ &= \frac{D_n s^{2n} + D_{n-1} s^{2n-2} + \dots + D_1 s^2 + D_0}{(s^2 + \omega_0^2)(s^2 + \omega_1^2) \dots (s^2 + \omega_n^2)} \end{aligned}$$

其中:

$$D_n = \sum_{i=0}^n \frac{\phi_i(L) \phi_i'(C)}{m_{ki}}$$

$$D_{n-1} = \sum_{i=0}^n \frac{\phi_i(L) \phi_i'(C)}{m_{ki}} \sum_{j \neq i} \omega_j^2$$

$$D_{n-2} = \sum_{i=0}^n \frac{\phi_i(L) \phi_i'(C)}{m_{ki}} \sum_{\substack{j, k \neq i \\ j \neq k}} \omega_j^2 \omega_k^2$$

⋮

$$D_0 = \sum_{i=0}^n \frac{\phi_i(L) \phi_i'(C)}{m_{ki}} \prod_{j \neq i} \omega_j^2$$

$$= \frac{\phi_0(L) \phi_0(C)}{m_{b0}} \prod_{j \neq 0}^n \omega_j^2$$

其 PD 控制的闭环传递函数为：

$$G(s) = \frac{(k_p + k_v s) \sum_{i=0}^n D_i s^{2i}}{\prod_{i=0}^n (s^2 + \omega_i^2) + (k_p + k_v s) \sum_{i=0}^n D_i s^{2i}}$$

为了便于讨论,我们取系统的一阶振型来研究,则：

$$G(s) = \frac{(k_p + k_v s)(D_1 s^2 + D_0)}{s^2(s^2 + \omega_1^2) + (k_p + k_v s)(D_1 s^2 + D_0)}$$

相应的特征方程为：

$$s^2(s^2 + \omega_1^2) + (k_p + k_v s)(D_1 s^2 + D_0) = 0 \quad (3)$$

对于四阶系统来说,当系统具有两对相同的复根时,主导极点离虚轴最远,系统亦具有最佳的稳定性.为了使特征方程(16)具有两个重复根,则有：

$$k_p = \frac{D_0}{D_1^2} \quad (4)$$

$$k_v = \frac{2}{D_1} \sqrt{\omega_1^2 - \frac{D_0}{D_1}} \quad (5)$$

此时特征方程的根为：

$$s_{1,2} = -\frac{k_v D_1}{4} \pm \frac{\sqrt{k_v^2 D_1^2 - 16 k_p D_1}}{4}$$

其实部和虚部分别为：

$$\text{Real}(\lambda_{\text{sig}}) = -\frac{k_v D_1}{4} = -\frac{1}{2} \sqrt{\omega_1^2 - \frac{D_0}{D_1}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Image}(\lambda_{\text{sig}}) &= \pm \frac{\sqrt{16 k_p D_1 - k_v^2 D_1}}{4} \\ &= \pm \frac{1}{2} \sqrt{5 \times \frac{D_0}{D_1} - \omega_1^2} \quad (7) \end{aligned}$$

3 系统的性能要求和极点配置 (The performance requirement and poles configuration)

机电系统动力学的各种特征和品质指标在很大程度上是由系统的极点决定的.因此,可以根据系统的性能要求预先选择极点的位置,然后通过对系统优化来设计系统的其它参数.

设系统的综合指标为：

输出超调量： σ_p

调整时间： t_s

根据超调量 σ_p 和调整时间 t_s 就可以近似计算出系统的阻尼系数 ξ 和圆频率 ω 为：

$$\xi = \frac{|\ln \sigma_p|}{\sqrt{(\ln \sigma_p)^2 + \pi^2}}$$

$$\omega_T = \frac{3}{t_s \xi}$$

则其主导极点定义如下：

$$s_{1,2}^T = -\xi \omega^T \pm j \omega^T \sqrt{1 - \xi^2}$$

对于本系统来说,通常可以根据性能指标的要求,在复平面上画出满足这一要求的闭环系统主导极点所在的区域,如图 2 的阴影区域.图中 $\sigma_0 = -\xi \omega^T$ 为 $s_{1,2}$ 的实部,阻尼角 $\beta = \arccos \xi$.

为了满足系统的性能要求,必须使控制系统的主导极点位于图 2 中的阴影区域.为了使主导极点 $s_{1,2}$ 位于图 2 中的阴影区域,由式(6)、(7)可得下式：

$$-\frac{1}{2} \sqrt{\omega_1^2 - \frac{D_0}{D_1}} \leq -\xi \omega^T \quad (8)$$

$$\omega_1^2 - 5 \frac{D_0}{D_1} < 0 \quad (9)$$

$$\arctg \left| \frac{\text{Image}(\lambda_{\text{sig}})}{\text{Real}(\lambda_{\text{sig}})} \right| \leq \beta \quad (10)$$

为了使系统为最小相位系统,必须使：

$$D_1 \geq 0$$

即：

$$D_0 = \frac{\phi_0(L) \phi_0(C)}{m_{b0}} \omega_1^2 \geq 0 \quad (11)$$

$$D_1 = \frac{\phi_0(L) \phi_0(C)}{m_{b0}} + \frac{\phi_1(L) \phi_1(C)}{m_{h1}} \geq 0 \quad (12)$$

从式(4) - (12)可知, ω_1 、 D_0 、 D_1 以及闭环控制传递函数的极点实部和虚部都和参数 L 、 H 、 B 、 C 、 K_p 、 K_v 有关,并且这几个参数之间具有很强的相互耦合.因此要想使系统具有最佳的综合性能就必须对以上参数同时进行优化.

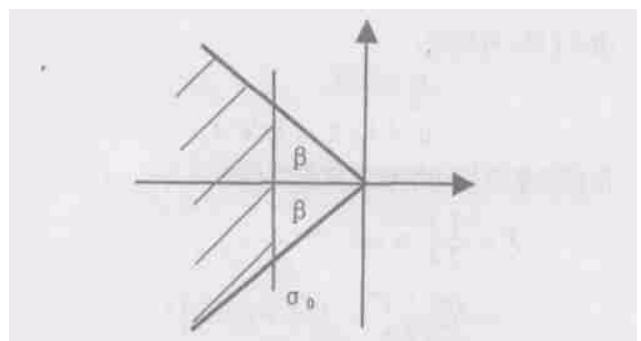


图 2 闭环传递函数极点取值范围示意图

Fig.2 The viable region of poles of the closed-loop transfer function

4 设计优化计算 (Optimized calculation in design)

对于点到点往复运动的运动臂来说,要实现系统的高速高精度要求,在满足系统稳定性的前提下,为了提高减加速性能,应使系统的转动惯量较小,同时使控制系统的控制能量较小。

对于柔性梁来说,其转动惯量为:

$$W = \frac{\rho HBL^3}{3} \tag{13}$$

对于只考虑梁的一阶振型的 PD 反馈控制系统,其状态方程为:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A_0 X + Bu \\ Y &= CX \end{aligned} \tag{14}$$

其中: $X = [\theta \dot{\theta} \ y \ \dot{y}]^T$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{k_{11}}{m_{11}} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\phi'_0(C)}{m_{b0}} \\ 0 \\ \frac{\phi'_1(L) \ \phi'_1(C)}{m_{11}} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \phi_0(L) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \phi_0(L) & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$\theta, \dot{\theta}$ 分别为梁的角位移和角速度, y, \dot{y} 分别为梁端点的弹性位移和速度, y 为梁端点的综合位移和速度。

根据 PD 反馈控制原理可知控制规律为:

$$u = -KY = -KCX$$

其中 $K = (k_p \ k_v)$, k_p, k_v 由式(4)、(5)计算.将上式代入(14)式得:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= (A_0 - BKC) X \\ A &= A_0 - BKC \end{aligned} \tag{15}$$

由式(15)可解得:

$$\begin{aligned} X &= e^{At} X_0 \\ u &= KCX = KCe^{At} X_0 \end{aligned}$$

则控制系统振动消耗的能量性能指标为:

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \int_0^\infty u^T u dt \\ &= X_0^T \left[\frac{1}{2} \int_0^\infty e^{A^T t} C^T K^T K C e^{At} dt \right] X_0 \end{aligned}$$

要计算 J 必须先指定初值 X_0 ,为了计算方便,假设 X_0 随机分布于 $2n$ 维的单位球面上,并采用由 Levine 与 Athans^[7] 的平均性能函数 \hat{J} 来表示 J :

$$\begin{aligned} \hat{J} &= \frac{1}{2} \text{tr} \left| \int_0^\infty e^{A^T t} C^T K^T K C e^{At} dt \right| \\ &= \frac{1}{2} \text{tr} [P] \end{aligned}$$

其中 $P = \int_0^\infty e^{A^T t} C^T K^T K C e^{At} dt$, 可以通过以下 Lyapunov 方程解得:

$$PA + A^T P + C^T K^T K C = 0$$

为此,本文以一阶自振频率和能量性能指标为目标函数,其优化表达式如下:

$$\text{Find } X = [H \ B \ C]^T \quad X \in R^n \tag{16}$$

$$\text{Min } F = \lambda_1 W / W_0 + \lambda_2 J / J_0 \tag{17}$$

由式(8) - (12)可得约束为:

$$g_1 = 2 \xi \omega^T - \sqrt{\alpha^2 - \frac{D_0}{D_1}} \leq 0 \tag{18}$$

$$g_2 = \alpha^2 - 5 \frac{D_0}{D_1} \leq 0 \tag{19}$$

$$g_3 = \arctg \frac{\sqrt{5 \times D_0 - \alpha^2 D_1}}{\alpha^2 D_1 - D_0} \leq \beta \tag{20}$$

$$\begin{aligned} g_4 &= -\cos(3.9266 \times \frac{C}{L}) + 0.027875 \times \\ &\quad \cos h(3.9266 \times \frac{C}{L}) > 0 \end{aligned} \tag{21}$$

$$g_5 = \delta_0 = \frac{3 \rho g L^4}{2 E I^2} \leq \delta_{\max} \tag{22}$$

在上式中: W_0, J_0 分别为系统转动惯量初值和能量指标的初值;

δ_0 为柔性臂在垂直方向的变形;

δ_{\max} 为柔性臂在垂直方向的最大允许变形。

5 优化结果与分析 (The optimization result and analysis)

通过以上的分析,对单柔性臂的机电耦合设计就转化为对目标函数式(17)的带约束式(18) ~ (22)的优化问题.采用遗传算法对此优化模型进行了优化计算,初始值为: $L = 0.73 \text{ m}$, $H = 0.019 \text{ m}$, $B = 0.0032 \text{ m}$, $C = 0 \text{ m}$, $\delta_{\max} = 5 \text{ mm}$, $\alpha_p = 15\%$, $t_s = 0.15 \text{ s}$, 计算结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,优化设计以后整个系统为最小相稳定系统,在满足稳定性指标 α_p, t_s 的要求和使控制能量相对较小的同时,转动惯量明显降低,大大低于初始值,一阶自振频率增大.由于转动惯量减小,系统的加速性能得到了很大改善,同时由于一阶自振频率增大,系统工作的速度和启停频率可以更高而不会产生共振。

表 1 优化前后设计结果

Table 1 Design results before and after optimization

	参数	初始值	最终优化值
	L (m)	0.75	0.75
设计参数	H (m)	0.019	0.0057
	B (m)	0.0032	0.0067
	C (m)	0	0.3302
	K_p	30.8363	250.1
	K_v	0.8240	3.6327
性能参数	惯量 (kgm)	0.0206	0.0134
	质量 (kg)	0.1231	0.0773
	ω (rad/s)	138.36	285.88
	F (1/s)	22.02	45.5
	σ_p	15%	12%
	t_s (s)	0.15	0.09
	δ_0 (mm)	9.72	4.9
	δ_{vmax} (mm)	5	5

6 结论 (Conclusion)

本文以单臂机械手为例,提出了一种基于系统性能配置的机械/控制多目标融合建模的理论.研究表明,在满足系统性能指标的同时,采用本方法可以改善系统的动态特性并使得控制能量较小,从而得到更好的综合性能.这对于高性能机电系统的设计是十分必要的,为满足高科技装备对机电一体

化系统提出的轻量化、高速化和高精度要求提供了一种可行的解决方案.

参考文献 (References)

- [1] Asada H, Park J H, Rai S. A control configured flexible arm: integrated structure / control design[A]. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1991. 2356 - 2362.
- [2] Park J H, Asada H. Design and control of minimum-phase flexible arms with torque transmission mechanisms[A]. Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1990. 1790 - 1795.
- [3] George N. An Analytical Approach to Integrated Structural and Control Design[D]. Michigan, USA: Bell and Howell Information and Learning Company, 2001.
- [4] Dequidt A, Castelain J M, et al. Mechanical pre-design of high performance motion servomechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(8): 1047 - 1063.
- [5] Anton C, Asada H. Integrated structure/control design of mechatronic systems using a recursive experimental optimization method[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1996, 1(3): 191 - 203.
- [6] Blesloch P A, Beagley N R. Tools for analysis of control-structure interaction[J]. Computer-Aided Engineering Journal, 1990, 7(4): 107 - 111.
- [7] Levine W S, Athan M. On the determination of the optimal constant output feedback gains for linear multivariable systems[J]. IEEE Transactions on Automation Control, 1970, AC-15(1): 44 - 48.

作者简介:

朱灯林 (1966-), 男, 博士研究生. 研究领域: 机电系统设计, 优化方法.

姜涛 (1969-), 男, 博士研究生. 研究领域: 优化方法, 自组织设计.