

基于非结构模型机器人力控制稳定性分析*

袁 军

(北京控制工程研究所·北京, 100080)

摘要: 本文将机械手和接触环境作为一个整体来考虑, 采用非结构模型分析了机器人力外环控制^[1]的稳定性. 得到了机器人力控制系统稳定操作的界限, 实验结果表明这种分析方法的合理性.

关键词: 机器人力控制; 非结构模型; 稳定性

1 机器人力控制的稳定性问题

结构化模型稳定性分析的方法^[2]是将机器人、腕力传感器、接触环境看成弹簧-质量-阻尼系统, 根据系统传递函数的根轨迹的趋向得到系统的稳定性分析. 随着控制器的增益的增加, 力控制系统的根轨迹将趋于右半平面, 导致力控制系统的不稳定. 结构化建模和控制得到的稳定性条件是特殊的稳定性条件而不能应用到一般情形, 非结构化建模的方法关心的是系统的输入-输出特性^[3], 而不是特定的动力学模型, 尽管非结构模型的方法得出的只是一般的结论, 但它具有更加普遍的意义. 本文将机械手和环境的稳定性问题作为一个整体来考虑, 采用非线性模型分析了机器人力控制的稳定性, 将机械手的末端执行器、腕力传感器、关节的结构柔性和伺服控制器的柔性的动力学与环境的动力学一起考虑, 得到了力控制器稳定性的界限. 稳定性条件展示了在机械手或环境中必须存在一定的柔性, 这种柔性可以是机械手的被动柔性(如 RCC 和机械结构柔性)、位置控制器的柔性以及接触环境中的柔性组成. 稳定性条件显示出在理想状态下的位置控制(无静差)刚体机器人与无穷大刚度的环境接触时, 不可能找到稳定的力控制器, 解决的办法是通过引入被动柔性单元(如 RCC), 实验结果说明了这种稳定性条件.

2 机器人力控制的非结构化模型

考虑图 1 所示的单关节机械手-环境模型, 命令位置为 y_d , 机械手实际位置为 y , 控制器采用 PD 控制, K_m 、 C_m 分别为控制器位置增益和速度增益, K_e 、 C_e 分别为环境刚度和阻尼系数, x_0 为变形产生前环境表面的位置, d 为环境作用在机械手上的作用力, F 为作用于环境的力, 机械手和环境的动力学模型可由下式给出:

$$M\ddot{y} + C_m\dot{y} + K_my = C_m\dot{y}_d + K_my_d + d. \quad (1)$$

其中 $d = -F$, $F = K_ex + C_e\dot{x}$, 且 $x = y - x_0$.

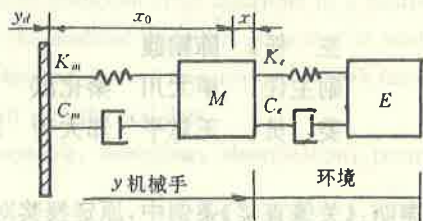


图 1 单关节机械手和环境模型

* 中国航天工业总公司博士后科学基金资助项目。

本文于 1995 年 6 月 12 日收到, 1995 年 12 月 20 日收到修改稿。

(1)的拉氏变换为

$$y(s) = \frac{C_m s + K_m}{Ms^2 + C_m s + K_m} y_d(s) + \frac{1}{Ms^2 + C_m s + K_m} d(s). \quad (2)$$

其中

$$d(s) = -F(s), \quad F(s) = (K_e + C_e s)x(s).$$

$$\text{令 } G(s) = \frac{C_m s + K_m}{Ms^2 + C_m s + K_m}, \quad S(s) = \frac{1}{Ms^2 + C_m s + K_m}, \quad E(s) = C_e s + K_e.$$

则(2)可表示为

$$y(s) = G(s)y_d(s) + S(s)d(s). \quad (3)$$

其中 $F(s) = E(s)x(s)$ 上式体现了机械手末端位置是给定位置和作用在机械手的外力的函数。(3)式包括了机械手和环境的动力学模型,可以写为非结构模型形式:

$$y = G(y_d) + S(d). \quad (4)$$

其中

$$d = -F = -E(x).$$

机械手响应外力 d 的运动结果由机械手的结构柔性和位置控制器的柔性引起。如具有线性运动学行为的 RCC(remote center compliance)^[4], S 等于 RCC 刚度的倒数(动力学意义下的阻抗),称之为灵敏度函数,标志着外力作用下的机械手的位置控制能力,具有精确位置伺服的机械手的 S 很小。对于多关节机械手,设机械手作用于环境的期望力为 F_d ,当在系统中加入力外环控制器 C 时,由上述分析可以得到机器人力控制的非结构模型表示的示意图如图 2。已知 S, G, F 选择 C ,可以改变机器人的顺应性, C 选择得越大,机器人的柔性越大, C 的选择必须保证整个闭环系统的稳定性,其目标是使如图 2 所示系统稳定的一个充分条件,这个充分条件引入一类提高系统柔顺度的补偿器。图 2 中,由(a)可以得到(b), $P = E(SE + I_n)^{-1}G$ 为一非线性算子,当 C 选择为一线性算子,由小增益原理^[5] 如以下条件成立,则闭环系统是稳定的。

I) P 是 L_P 稳定的算子:

$$\text{a) } P(\cdot); L_P^n \rightarrow L_P^n, \quad \text{b) } \|P(\cdot)\|_P \leq \alpha_1 \|\cdot\|_P + \beta_1. \quad (5)$$

II) C 的选择应保证映射 $C(\cdot)$ 是 L_P 稳定的:

$$\text{a) } C(\cdot); L_P^n \rightarrow L_P^n, \quad \text{b) } \|C(\cdot)\|_P \leq \alpha_2 \|\cdot\|_P + \beta_2. \quad (6)$$

III)

$$\alpha_1 \alpha_2 < 1. \quad (7)$$

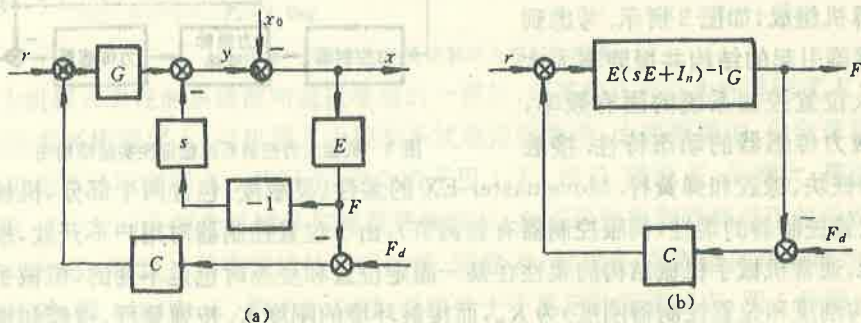


图 2 机器人力控制的非结构化模型

上述三个条件成立时,闭环系统是 L_P 稳定的,由此可得:

$$\|C(P(\cdot))\|_P \leq \alpha_1 \alpha_2 \|\cdot\|_P + \alpha_2 \beta_1 + \beta_2. \quad (8)$$

α_1, α_2 代表环映射 $C(P(\cdot))$ 的增益, 第三条稳定性条件要求 C 的选择使闭环映射 $C(P(\cdot))$ 是线性有界的, 且具有小于 1 的增益.

如果 C 选择为一线性算子, 而其它算子是非线性的, 则:

$$\|C(P(\cdot))\|_p \leq \gamma \|P(\cdot)\|_p. \quad (9)$$

其中 $\gamma = \sigma_{\max}(C)$ 是 C 中每个元素 L_1 范数最大奇异值, 考虑(9), 则不等式(8)可写为:

$$\|C(P(\cdot))\|_p \leq \gamma \|P(\cdot)\|_p \leq \gamma \alpha_1 \|\cdot\|_p + \gamma \beta_1. \quad (10)$$

式(10)与式(8)相比较, 为了保证闭环系统的稳定性, $\gamma \alpha_1$ 必须小于 1, 或等价地表示为 $\gamma < 1/\alpha_1$, 必须使 C 的范围(由 γ 表示)小于前向通道的通益 α_1 . 即当图中所有的算子是线性传递函数矩阵, 使用多变量 Nyquist 判据, 不等式(11) 是闭环系统稳定的一个充分条件.

$$\sigma_{\max}(C) < 1/\sigma_{\max}(E(I_m + SE)^{-1}G), \quad \omega \in (0, +\infty). \quad (11)$$

C 的选择必须使 $\sigma_{\max}(C)$ 小于前向环节的最大奇异值的倒数, 对于单输入单输出线性系统模型, (11) 变为

$$|C| < |(S + 1/E)G^{-1}|, \quad \omega \in (0, +\infty). \quad (12)$$

$|\cdot|$ 为传递函数的幅度, 在大多数情况下, $G \approx 1 (0 < \omega < \omega_0)$, 即使得 C 的选择:

$$|C| < |(S + 1/E)|, \quad \omega \in (0, \omega_0). \quad (13)$$

ω_0 为闭环系统频带宽度, 从(13)中可以看出, 机械手灵敏度 S 越小以及环境刚度 E 越大, 可容选择的反馈增益 C 就越小. 在理想情况下, 当机器人是精确定位系统 ($S \rightarrow 0$), 则不能找到 C 使得机器人与无穷大环境刚度 ($E \rightarrow \infty$) 实现稳定的接触, 因此要实现稳定的力控制, 在机械手或环境中必须存在一定的柔顺性, 通常机器人的柔顺由 RCC, 机械结构柔性、伺服控制器的有差调节产生. 以下的实验主要分析接触环境柔性的大小对机器人力控制系统稳定性的影响.

3 实验结果及分析

实验装置由华中理工大学自动控制系智能机器人控制理论及方法实验室的 5 自由度机器人 Movemaster-EX, HUST-FS6 高精度六维腕力传感和 Intel-386 计算机组成, 如图 3 所示. 考虑到由腕力传感器引起的结构共振频率大大高于机器人位置控制系统的固有频率, 故可忽略腕力传感器的动态特性. 接触

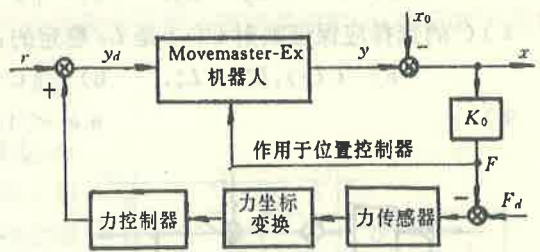


图 3 机器人力控制系统稳定性实验结构图

环境分别为铁块、橡胶和弹簧秤. Movemaster-EX 的柔性(灵敏度)包含两个部分, 机械结构的柔性和位置控制器的柔性(伺服控制器有差调节), 由于位置控制器对用户不开放, 故其柔性是固定的, 通常机械手机械结构的柔性在某一固定位置和姿态时也是不变的, 机械手的刚度(机械结构刚度和位置控制器刚度)为 K_m , 而接触环境的刚度 K_e 按弹簧秤、橡胶和铁的次序增加, 机械手和环境接触时的等效刚度 K_0 为:

$$K_0 = \frac{K_m K_e}{K_m + K_e}. \quad (14)$$

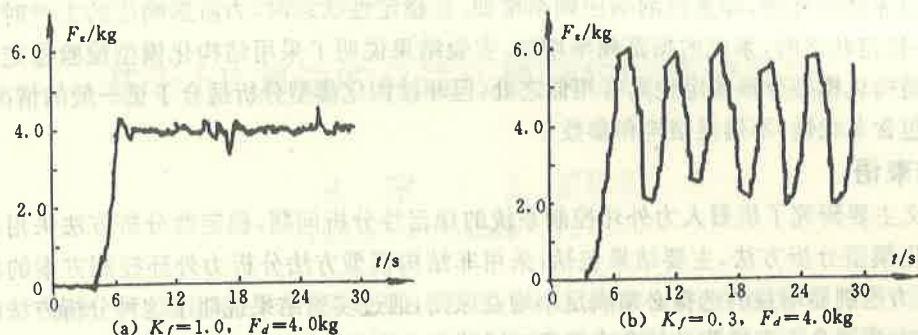


图 4 机械手与弹簧称接触时力稳定性曲线

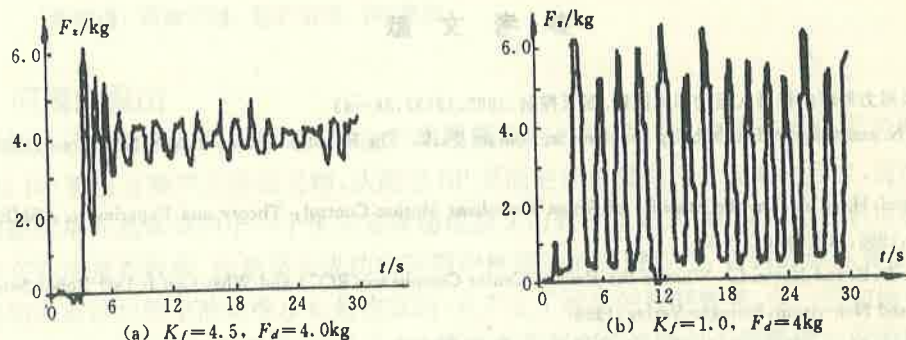


图 5 机械手与橡胶接触时力稳定性曲线

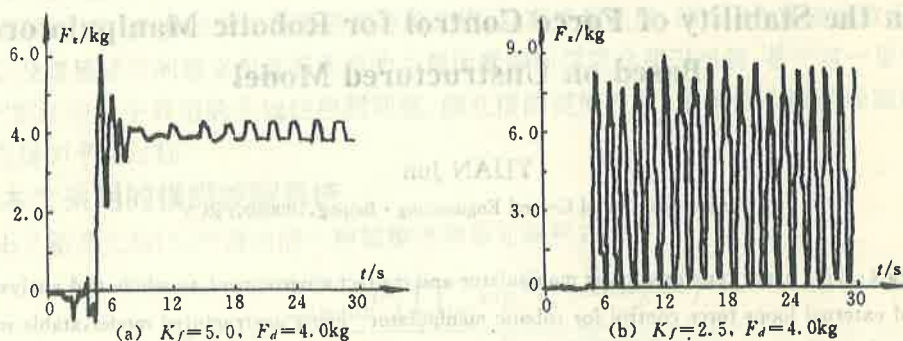


图 6 机械手与铁块接触时力稳定性曲线

K_0 为机器人力控制系统前向通道增益的一部分,而其变化部分为环境刚度 K_e ,下面的实验主要研究环境刚度 K_e 对机器人力控制系统稳定性影响,力控制器中,包含着抵消等效刚度 K_0 (主要为环境刚度 K_e) 的因子,这个因子用 $1/K_f$ 表示.随着 K_f 的增大,控制器的增益减少,图 4(a)、(b) 分别为机械手与弹簧秤接触时,在不同的控制器增益下的阶跃响应曲线,图 4(a) 中, K_f 取为 1,具有较好的响应性能.随着 K_f 的减小,控制器的增益增加,系统的响应性能变差,图 4(b) 中, K_f 取为 0.3 时,系统处于不稳定的振荡状态.图 5 和图 6 分别为在橡胶和铁块上进行的相同类型的实验,由于环境刚度依次增大,所以能使控制系统稳定的 K_f 的值变大,以适应系统参数 K_0 的变化,对应于要使控制系统稳定的控制器增益的范围减小.实验中可以看出,随着环境刚度的增加,控制系统前向通道的增益增加并越来越呈现

出高增益系统的性质,即系统的响应频率增加.在稳定性状态时,力阶跃响应的上升时间缩短;在不稳定状态时,系统的振荡频率增加.实验结果说明了采用结构化模型检验稳定性与采用非结构化模型分析稳定性具有相似之处,但非结构化模型分析适合于更一般的情况(如系统中包含非线性,不确定结构和参数).

4 结束语

本文主要研究了机器人力外环控制系统的稳定性分析问题,稳定性分析方法采用基于非结构化模型分析方法,主要结果包括:采用非结构模型方法分析力外环控制方案的稳定性,指出力控制器增益的选择必须满足小增益原则,通过实验结果说明了这种分析方法的合理性.该方法适合于直接驱动和非直接驱动机器人力外环控制的稳定性分析.

参 考 文 献

- [1] 袁军. 采用力外环的机器人运动和力控制. 航天控制, 1995, 13(3): 38—43
- [2] Hogan, N. and Colgate, E. . Stability Problems in Contact Tasks. The Robotics Review 1, MA: MIT Press, 1989, 339—348
- [3] Kazerooni, H. et al. . On the Stability of Robot Compliant Motion Control: Theory and Experiment. ASME J. of DSMC, 1990, 112(3): 417—426
- [4] Whitney D. E. and Nevis. L. . What is the Remote Center Compliance(RCC) and What Can It Do? Robot Sensors: Tactile and Non-vision, Springer-Verlag, 1986
- [5] Vidyasagar, M. and Deser, C. A. . Feedback System; Input-Output Properties. Academic Press, 1975

On the Stability of Force Control for Robotic Manipulator Based on Unstructured Model

YUAN Jun

(Beijing Institute of Control Engineering • Beijing, 100080, PRC)

Abstract: This paper regards robotic manipulator and contact environment as whole and analyses the stability of external loops force control for robotic manipulator^[1] using unstructured model, stable maneuvering boundary of robotic manipulator force control system is obtained. Experiment results demonstrate that the analysis method is rational.

Key word: force control for robot; unstructured model; stability

本文作者简介

袁 军 分别于 1988 年和 1991 年在西北工业大学自动控制系获学士学位和硕士学位, 1994 年在华中理工大学自动控制系获博士学位. 现为中国空间技术研究院博士后工作人员. 目前从事空间机器人和飞行器交会对接方面的研究工作.