

doi: 10.7690/bgzdh.2021.07.018

高危场所机器人手爪夹持力控制仿真

李全俊¹, 杨帆², 胥健¹, 史慧芳¹, 杨治林¹, 岳显¹

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000; 2. 陆装信息保障室, 北京 100071)

摘要: 为保证机器人手爪夹持力在高危产品安全阈值范围内且稳定输出, 以高危场所常用机器人手爪夹持控制为典型过程, 建立夹持力控制系统模型, 提出连续系统智能控制仿真步骤, 设计模糊控制器, 采用 Runge-Kutta 迭代方法求解。结果表明: 夹持力在漂移性扰动情况下, 可快速实现夹持力大小的稳定安全控制。

关键词: 机器人; 夹持力; 控制; 仿真

中图分类号: TJ410.5 **文献标志码:** A

Clamping Force Control Simulation of Robot Gripper in High-risk Locations

Li Quanjun¹, Yang Fan², Xu Jian¹, Shi Huifang¹, Yang Zhilin¹, Yue Xian¹

(1. Department of Intelligent Manufacturing, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China; 2. Information Support Office of PLA Army Equipment Department, Beijing 100071, China)

Abstract: In order to ensure that the clamping force of robot gripper is within the safe threshold of high-risk products and the output is stable, the typical example was taken as the gripping process of robot's gripper commonly used in high-risk locations. This paper established the control system model of clamping force and proposed the simulation steps of continuous system and intelligent control. The fuzzy controller was designed and solved by Runge-Kutta iterative method. The results show that the clamping force is in the case of drift disturbance, it can quickly realize the stable and safe control of the clamping force.

Keywords: robot; clamping force; control; simulation

0 引言

随着智能制造技术的兴起, 工业机器人在弹药装药装配等易燃易爆高危场所的应用得到了极大发展^[1-3], 有效提高了制造效率和生产过程安全度, 降低了生产成本, 但机器人在高危产品抓取中对力、摩擦、热等刺激较为敏感, 一旦超过产品本身的安全阈值, 将会发生安全事故。目前大多数工业用机器人运行主要通过人工导引和示教盒示教, 可快速实现应用, 但对夹紧过程中的干扰不能及时做出反应, 很容易出现夹持力过大或过小的情况, 存在一定的安全隐患。要提高机器人手爪的夹持力控制精度, 增强抗干扰能力, 提高本质安全度, 首先需要对夹持力控制过程开展仿真, 为先进的安全控制方法提供理论依据。笔者以高危场所常用工业机器人

手爪夹持控制为典型过程, 建立夹持力控制系统模型, 提出连续系统智能控制仿真步骤, 设计模糊控制器, 采用 Runge-Kutta 迭代方法求解, 进行了仿真实验。

1 机器人手爪控制系统模型

常用的工业机器人手爪机械结构如图 1 所示, 机器人手爪控制结构如图 2 所示。机器人由直流电机驱动, 通过改变 2 个手爪间的夹角 θ 来调节夹持力的大小。

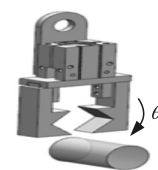


图 1 机器人手爪机械结构

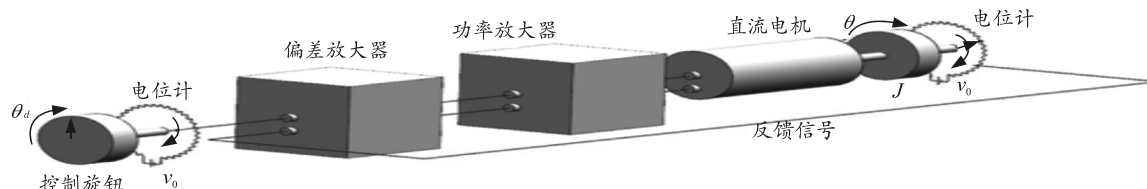


图 2 机器人手爪控制结构

收稿日期: 2021-03-17; 修回日期: 2021-04-20

作者简介: 李全俊(1987—), 男, 陕西人, 硕士, 高级工程师, 从事控制理论与控制工程、高危产品智能制造技术研究。

E-mail: 564510677@qq.com。

机器人手爪控制夹持力控制系统结构图如图 3 所示^[4]。

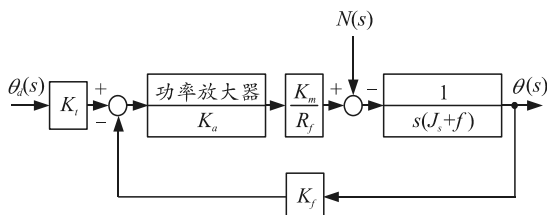


图 3 机器人手爪夹持力控制系统结构

图中： K_t 为电位器传递系数； K_a 为放大器增益； K_m 为直流电机转矩的结构常数； K_f 为反馈比例系数； R_f 为直流电机电枢电阻； J 为电机轴上的总转动惯量； f 为总黏性摩擦系数； $N(s)$ 为系统扰动。

系统的闭环传递函数为：

$$\Phi(s) = \frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} = K_t \frac{K_a K_m / R_f \cdot (1/(s(Js + f)))}{1 + (K_a K_m K_f) / R_f \cdot (1/(s(Js + f)))} = \frac{K_t K_a K_m / R_f}{s(Js + f) + K_a K_m K_f / R_f} \quad (1)$$

2 连续系统智能控制仿真数学原理及步骤

2.1 连续系统智能控制仿真的数学原理

机器人的手爪加持力控制是一个连续系统。从数学上看，连续系统智能控制算法是根据系统观测量的状态实时通过合适的控制量，使得输出特性不断趋近理想目标，即给出了一个控制函数：

$$u = u(t, x) \quad (2)$$

连续系统的数学模型为^[5]：

$$\left. \begin{aligned} P(t, x, u) &= 0 \\ u &= u(t, x) \\ y &= G(t, x) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中： $P(t, x, u)$ 表示系统观测状态 $x(t)$ 与控制函数 $u(t)$ 随着时间 t 的约束关系；输出量 y 为观测量和时间 t 的函数。连续系统控制仿真即采用某种满足精度要求的数值方法获得输出量 $y(t)$ 的数值解，该数值解是最终仿真结果，因此仿真方法的主要区别在于采用不同的数值方法。

2.2 连续系统智能控制的仿真步骤

通常采用微分方程组对连续系统描述，其形式为^[5]

$$\begin{cases} \dot{x}_k' = f(t, x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_m) \\ x_k(t)|_{t=0} = x_k(0) \end{cases}, k=1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

连续系统的输出观测为

$$y_j = G(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \quad j=1, 2, \dots, q. \quad (5)$$

采用向量形式记为^[6]

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}' &= f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{x}(t)|_{t=0} &= \mathbf{x}(0) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$y = G(t, \mathbf{x}). \quad (7)$$

连续系统智能控制仿真步骤如下：

- 1) 根据实际算法确定控制周期 T_c 、采样周期 T_s ，给出仿真时间 $T = LT_c$ ，其中 L 为正整数；
- 2) 明确系统初始状态 $\mathbf{x}(t)|_{t=0} = \mathbf{x}(0)$ ；
- 3) 根据控制函数 u 给出控制量： $u_0(t) = u(t, \mathbf{x}_0)$ ， $t \in [0, T_c]$ ；
- 4) 取

$$\left. \begin{aligned} uk(t) &= u(t, \mathbf{x}(tk)), \\ k &= 0, 1, 2, \dots, L, \\ t &\in [kT_c, (k+1)T_c]; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

- 5) 按照采用的数值方法在区间 $[kT_c, (k+1)T_c]$ 内求解系统初值问题：

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}' &= f(t, \mathbf{x}, u_k(t)) \\ \mathbf{x}(t)|_{t=t_k} &= \mathbf{x}(t_k) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

的解，该数值解记为 $S_k(t)$ ；

- 6) 迭代更新数值解的状态，即给出 t_{k+1} 时刻的状态数值：

$$\mathbf{x}(t_{k+1}) = S_k(t_{k+1}), \quad (10)$$

然后转入第 4) 步，继续下一步计算；

- 7) 最终仿真结果由数据组

$$\{\mathbf{x}(t_k) | k=0, 1, 2, \dots, L\} \quad (11)$$

以及

$$\{y(t_k) | y(t_k) = G(t_k, \mathbf{x}(t_k)), k=0, 1, 2, \dots, L\} \quad (12)$$

给出。

由于采用不同的数值方法，在 $[kT_c, (k+1)T_c]$ 内求得数据点的多少也不一样^[6]，因此更为精确细致的仿真结果通过分段数值解给出。分段数值解为：

$$\mathbf{x}(t) = S_k(t), t \in [kT_c, (k+1)T_c] \quad (13)$$

$k=0, 1, 2, \dots, L$ 及

$$y(t) = G(t, S_k(t)). \quad (14)$$

2.3 常用的数值方法

在式(6)描述的初值问题中，求解区间为 $[0, t_0]$ ，取步长 $h = T/N$ ， $t_n = t_0 + nh$ ， $n=1, 2, \dots, N$ 。目前常用的数值方法有改进 Euler 法和 Euler 折线法，但在兼顾计算精度和计算复杂性的情况下，标准四阶 Runge-Kutta 迭代法^[7]效果更好，其算法如下：

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &= x_k + [k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4]/6, \\
 k_1 &= hf(t_k, x_k), \quad k_2 = hf(t_k + h/2, x_k + k_1/2), \\
 k_3 &= hf(t_k + h/2, x_k + k_2/2), \quad k_4 = hf(t_k + h, x_k + k_3). \quad (15)
 \end{aligned}$$

3 机器人手爪夹持力控制系统仿真分析

3.1 计算步长与采样周期和控制周期的关系

在式(6)描述的初值问题中, 计算步长 h 应小于等于采样周期 T_s 。通常取 $T_c=KT_s$, $T_s=Kh$, 即: 控制周期是采样周期的整数倍, 采样周期又是计算步长的整数倍。在实际控制过程中, 采样周期和控制周期由系统自身的控制特性决定, 计算步长仅仅是为保证数值方法计算精度而确定^[8]。为保证仿真精度, 计算补偿选择在方法的稳定区内。

3.2 扰动过程的仿真实现

在机器人手爪加持力控制过程中, 扰动主要由系统外部环境的变化(如振动)、被控对象本身各种部件的老化(如直流电机)和各种不稳定因素(如温度)造成。在仿真过程的某个时间点处, 采用改变机器人手爪夹持控制模型的方法, 模拟扰动发生后的情况。在机器人手爪夹持工作过程中, 主要扰动为漂移性扰动^[9], 系统输出主要表现为缓慢增加或减小, 可用下式变换表示:

$$y(t) = x(t) + C_1t + C_0. \quad (16)$$

其中 C_1 、 C_0 为适当常数, 此时将 y 带入式(6)得扰动后的方程模型为:

$$\left. \begin{aligned}
 x' &= f(t, x + C_1t + C_0, u) - C_1 \\
 x(t)|_{t=0} &= x(0)
 \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

假定在 t_0 时刻系统受到扰动, 则在控制函数 $u=u(t, x)$ 作用下的仿真过程如下:

1) 在 $[0, t_0]$ 区间, 求解初值:

$$\left. \begin{aligned}
 x' &= f(t, x, u) \\
 x(t)|_{t=0} &= x(0)
 \end{aligned} \right\};$$

2) 在 $[t_0, T]$ 区间, 求解初值:

$$\left. \begin{aligned}
 x' &= f(t, x + C_1t + C_0, u) - C_1 \\
 x(t)|_{t=0} &= x(0)
 \end{aligned} \right\}.$$

上述 2 个区间的解均按 2.2 节中给出的一般步骤求解, 最终的仿真结果 $y=G(t, x)$ 由两区间数值解分段构成^[10]。

3.3 机器人手爪夹持力智能控制仿真实现

查找常用工业机器人相关参数, 在图 1 中取 $K_f=1, K_a=25, K_m=0.4, K_f=1.25, R_f=100 \Omega, J=1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2,$

$f=0.75$ 。代入式(1)可得:

$$\Phi(s) = 0.1/(s^2 + 0.75s + 0.125). \quad (18)$$

机器人夹持力控制系统由下述方程描述:

$$\left. \begin{aligned}
 dy^2/dt^2 + 0.75 dy/dt + 0.125y &= 0.1u(t) \\
 y|_{t=0} = 0, \quad y'|_{t=0} &= 0
 \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

其中输出量 y 的变化范围为 $[0, 100]$, 控制量 u 的变化范围为 $[0, 10]$ 。

对应的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.125 & -0.75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} u(t). \quad (20)$$

式中: $x_1(0)=0, x_2(0)=0$ 。

对机器人手爪夹持力采用模糊控制器进行控制, 控制器输出取增量型输出。其中偏差 e 、偏差变化率 Δe 以及控制量增量 Δu 的论域为 $[-3, 3]$, 模糊控制表如表 1 所示^[10]。

表 1 标准模糊控制表

Δu	Δe						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	3	3	2	1	0
-2	3	3	2	2	1	0	0
-1	3	3	2	1	0	0	-1
0	3	2	1	0	-1	-2	-3
1	1	1	0	-1	-2	-3	-3
2	1	0	-1	-2	-3	-3	-3
3	0	0	-1	-2	-3	-3	-3

仿真过程中控制量采用查表去模糊算法确定:

$$\forall (e, \Delta e) \in E \times \Delta E, \Delta u = f(\text{round}(e), \text{round}(\Delta e)).$$

式中: f 为控制表给出的对应关系; $\forall a \in R, \text{round}(a)$ 为 a 四舍五入的取整函数^[11], 如 $(e, \Delta e) = (-1.3, -2.7)$, 查表得

$$\Delta u = f(\text{round}(-1.3), \text{round}(2.7)) = f(-1, 3) = -1.$$

机器人手爪夹持力智能控制仿真按照 Runge-Kutta 数值方法求解, 在 Matlab 中进行求解得出系统阶跃响应曲线如图 4 所示。

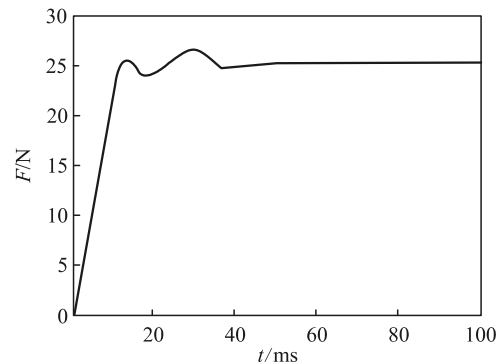


图 4 机器人手爪夹持力控制系统阶跃响应曲线