

# 蛇形臂机器人高精度位置伺服系统建模与仿真\*

## Simulation and Modeling of High-Precision Position Servo System of Snake-Arm Robot

中航工业北京航空制造工程研究所 魏志强 袁伟

**[摘要]** 针对蛇形臂机器人由多个具有相同控制及传动结构的关节组成的特点,建立了单关节的单轴控制系统的数学模型,基于不变性原理设计了复合控制系统。采用 MATLAB/Simulink 进行仿真,研究了间隙及摩擦对系统性能的影响,并提出了相应改进措施。仿真结果表明,系统具有高精度位置伺服性能及良好的抗干扰能力,为蛇形臂机器人柔性连续运行奠定了技术基础。

**关键词:** 蛇形臂机器人 位置伺服 复合控制

**[ABSTRACT]** Snake-arm robot consists of a number of the same links of control and feed structure. So the model of single motor control system is established and the complex control system is designed based on invariance principle. The influence on system by gap and friction is studied based on MATLAB/Simulink and the improved methods are proposed. Simulation results show that the system has high-precision position servo performance and good capacity of resisting disturbance, which provides the technical foundation for the actual control of robot.

**Keywords:** Snake-arm robot Position servo Complex control

蛇形臂机器人具有高柔性、活动空间比较大、动作灵活的特点,因而具有很强的实用性,可在复杂工作环境下进行危险品探测、激光切割、装配等,如英国 OC 机器人公司研制了多种工业用蛇形臂机器人,并成功将其商品化,但国内该类机器人仍处于实验室研发阶段。

蛇形臂一般由多个相同控制及传动结构的关节组成,而每个单关节一般为 3 或 4 个基于电机驱动的伺服系统,以实现弯、转 2 个自由度的运动。每个电机控制系统的高精度位置伺服性能是保证多关节组合后减少累积误差、具有良好运动性能的前提;同时,必须避免结构谐振,使系统具有一定的伺服带宽及抗干扰能力。因此,本文以机器人单轴伺服系统为研究对象,对系统进行建模与仿真,为实际系统有效控制提供借鉴与参考。

### 1 机器人结构简介

本文的蛇形臂机器人为欠驱动多自由度连续型机

器人,由 5 个大关节构成,每个大关节由 4 个小关节组成,并由圆盘、球铰等结构组成。伺服电机经一级齿轮减速后驱动丝杠并带动滑块前后运动,从而通过驱动圆盘上等角度分布的 3 根绳子的伸缩实现关节的弯、转运动。

### 2 直流电机控制系统动态模型

设传动环节如图 1 所示。电机电压平衡方程和转矩平衡方程分别为(1)和(2)式<sup>[1]</sup>:

$$U_m = i_m R_m + L_m \frac{di_m}{dt} + K_e \frac{d\theta_m}{dt} \quad (1)$$

$$T_m = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} + T_L \quad (2)$$

式中:  $U_m$  为电机电枢电压(V);  $i_m$  为电机电流(A);  $R_m$  为电机等效电阻( $\Omega$ );  $L_m$  为电机电感(H);  $K_e$  为电机反电势系数(V/rad/s);  $\theta_m$  为电机轴角位移(rad);  $T_m$  为电机电磁转矩( $N \cdot m$ ),  $T_m = K_t i_m$ ;  $J_m$  为电机轴等效转动惯量( $kg \cdot m^2$ );  $T_L$  为负载等效力矩( $N \cdot m$ );  $B_m$  为电机轴等效阻尼系数( $N \cdot m \cdot s / rad$ )。空载条件下,相应的电机模型如图 2 所示。图中,  $\Delta d$  为电网波动引起的干扰;  $K_f$  为功放放大系数;  $K_t$  为电机转矩系数( $N \cdot m / A$ )。

对于进给环节,设作用于齿轮 2 上的转矩为  $T_2$ , 得电机轴和丝杠轴的动力学方程为<sup>[2-4]</sup>:

$$k(\theta_m - \frac{2\pi i x_1}{L}) = J_1 \frac{d^2}{dt^2} (\frac{2\pi i x_1}{L}) + \frac{T_2}{i} \quad (3)$$

$$T_2 = [J_2 + m(\frac{L}{2\pi})^2] \frac{d^2}{dt^2} (\frac{2\pi x_1}{L}) + B_0 (\frac{L}{2\pi})^2 \frac{d}{dt} (\frac{2\pi x_1}{L}) + F \frac{L}{2\pi} \quad (4)$$

式中:  $x_1$  为滑块位移(m);  $i$  为为减速比即齿数之比( $z_2/z_1$ );  $J_1, J_2$  为分别为齿轮 1、齿轮 2 及丝杠轴的等效转动惯量( $kg \cdot m^2$ );  $m, B_0$  为分别为滑块的质量(kg)及等效

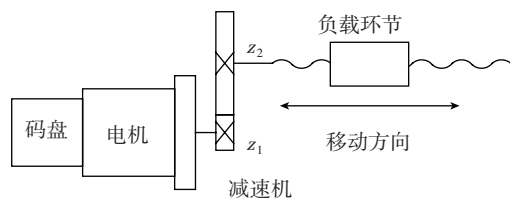


图1 传动系统模型

Fig.1 Transmission system model

\* 北京市科技计划资助项目(Z121100001612011)。

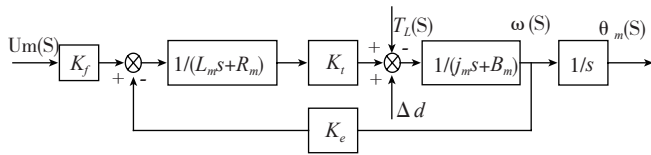


图2 直流电机动态模型  
Fig.2 Dynamic model of DC motor

粘性阻尼系数 ( $N \cdot m \cdot s / rad$ ) ;  $k$  为电机转轴到丝杠的总变形系数 ( $N \cdot m / rad$ ) ;  $L$  为丝杠导程 ( $mm$ ) ,  $F$  为滑块所受阻力及摩擦力 ( $N \cdot m$ ) 。

设系统初始条件为零,将(3)和(4)式进行拉氏变换可得传动系统二阶传递函数:

$$G(s) = \frac{x_1(s)}{\theta_m(s)} = \frac{K_1 k}{T^2 s^2 + K_1^2 B_0 s + k} = \frac{K_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}, \quad (5)$$

式中:  $\omega_n = \frac{\sqrt{k}}{T}$  ;  $T^2 = (J_1 + J_2/i^2 + mK_1^2)$  ;  $\xi = \frac{K_1^2 B_0}{2T\sqrt{k}}$  ;  $K_1 = (\frac{L}{2\pi i})$  。

### 3 基于不变性原理的复合控制与仿真

为提高系统伺服精度,获得高带宽的伺服系统并保证其稳定性,本文采用前馈与反馈相结合的复合控制策略。基于不变性原理的复合控制如图3所示<sup>[5]</sup>。由不变性原理可知,前馈通道  $W_R(s)$  可提高稳态精度,但并不影响  $W_1(s)$ (控制器)和  $W_2(s)$ (被控对象)构成的闭环系统的稳定性。对于给定的输入信号  $R(t)$ ,系统的误差传递函数为:

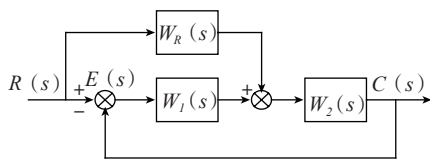


图3 基于不变性原理的复合控制  
Fig.3 Complex control based on invariance principle

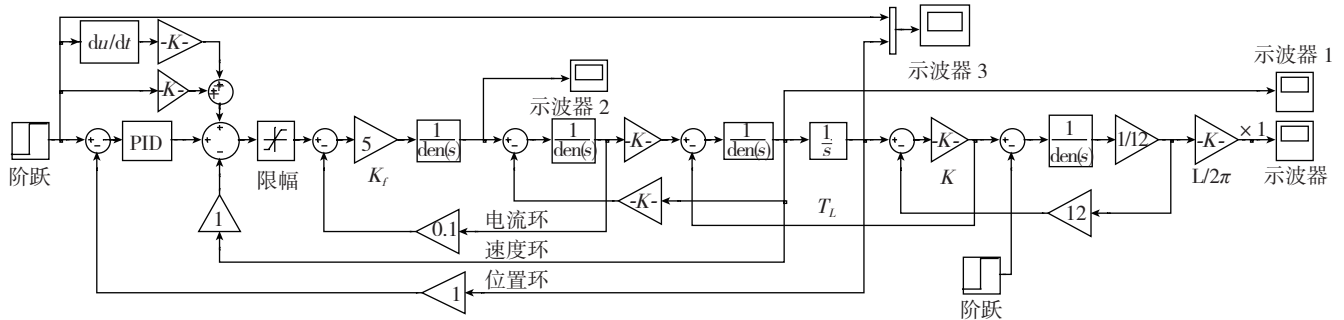


图4 单轴复合控制仿真模型  
Fig.4 Simulation model of single motor complex control

$$\varphi_E(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1 - W_R(s)W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} \quad (6)$$

可见,当  $1 - W_R(s)W_2(s) = 0$ ,即  $W_R(s) = 1/W_2(s)$ 时,系统的误差为零,即实现完全不变性,但  $W_R(s)$  一般存在高阶微分环节,工程上较难实现,因此,本文只引入输入指令前馈补偿,即按精度要求实现部分不变性,而系统的动态品质主要由系统闭环部分决定;同时,在此基础上还引入速度前馈,以有效抑制系统阻尼引起的跟随误差;采用电流、速度及位置三环控制结构,增加系统刚性及阻尼,改善系统稳定性。基于PID+前馈的复合控制总的控制输出为:

$$U_{out} = K_v \frac{d\theta}{dt} + K_f \theta + K_p e_k + K_i T_1 \sum_{n=1}^k e_n + \frac{K_d(e_k - e_{k1})}{T_1}, \quad (7)$$

式中,  $e_k = \theta(k) - \theta_m(k)$  。  $\theta$  为输入指令,  $K_v$ 、 $K_f$  分别为速度及指令前馈系数,  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别对应控制器PID算法中的比例、积分、微分系数,其值可通过多次仿真调试确定,  $T_1$  为采样周期。

图4给出了基于PID+前馈的单轴复合控制系统总体仿真框图。仿真可知,经过放大器后的高频信号频率约为2kHz。因此,系统中加入一阶低通滤波器  $F(s) = 1/(\tau s + 1)$ , 这里取  $\tau = 0.001$ 。其他仿真参数:  $R_m = 0.608 \Omega$  ;  $L_m = 0.423 mH$  ;  $K_e = 0.096 (V / rad / s)$  ;  $K_f = 0.093 (N \cdot m / A)$  ;  $J_m = 5.42 \times 10^{-3} kg \cdot m^2$  ;  $J_1 = 0.12 \times 10^{-3} kg \cdot m^2$  ;  $J_2 = 2.7 \times 10^{-3} kg \cdot m^2$  ;  $K_f = 5$  ;  $K = 10000 N \cdot m / rad$  ;  $i = 12$  ;  $L = 5 mm$  ;  $m = 1 kg$ 。

根据实际情况,为系统设置了限幅输出。图5为单位阶跃信号下的速度及位移输出曲线,说明系统具有良好的快速响应能力。通过计算可知,系统理论输出位移为  $7.958 \times 10^{-5} m$ ,而仿真结果为  $8.003 \times 10^{-5} m$ ,误差为  $0.045 \times 10^{-5} m$ 。因此,不仅说明仿真模型的正确性,也说明系统具有良好的位置伺服精度。在0.8s时加入单位干扰力矩信号。由图6可见,系统经过几个采样周期便恢复稳定运行状态,说明系统对于干扰信号具有很强的

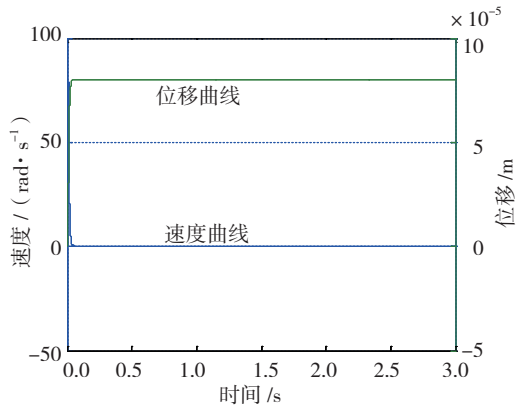


图5 速度及位移输出曲线  
Fig.5 Outputs of velocity and distance

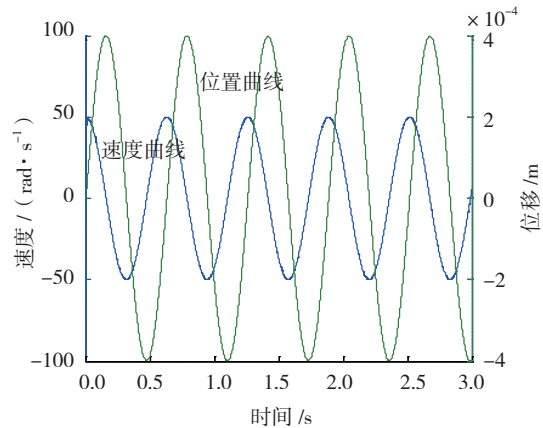


图8 速度和位移输出曲线  
Fig.8 Output curves of velocity and distance

抑制能力。

图7为幅值、频率分别为5rad、10rad/s时的正弦信号的跟踪结果,该图表明指令信号(红色曲线)与实际输出(蓝色曲线)几乎重合,位移输出和理论结果一致,说明系统具有一定的伺服带宽及良好的跟踪性能。图8给出了相应的速度(左边纵坐标)及系统位移(右边纵坐标)输出曲线,表明系统运行平稳,完全满足实际需要。

基于图4仿真模型,本文将系统间隙特性集中在丝

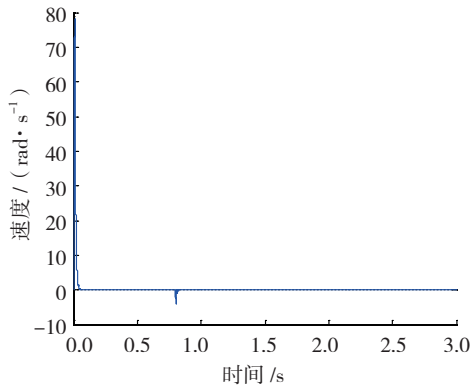


图6 加入单位干扰力矩时的速度响应曲线  
Fig.6 Response curve with unit disturbance

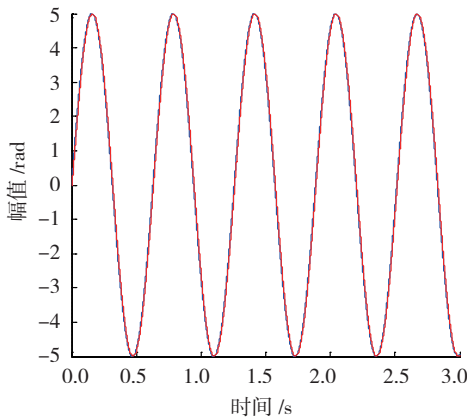


图7 正弦信号跟踪结果  
Fig.7 Tracking result of sine wave signal

杠与滑块结合处考虑,将摩擦特性集中到电机部分考虑,以研究间隙及摩擦等非线性因素对系统性能的影响情况。图9给出在幅值为2rad、频率为5rad/s时存在间隙(红色曲线)与无间隙(蓝色曲线)时系统最终位移输出曲线。可见,当存在间隙时位移曲线出现平顶现象,影响了系统位移输出精度。图10给出了同时存在间隙与干摩擦情况下的角速度及最终位移输出曲线,其中,间隙特性带宽及摩擦特性增益均取0.1。可见,由于摩擦特性的存在,正弦位移响应曲线有平顶现象,影响了位置精度,而且,速度信号在低速时的跳动使得整个运行区间的速度处于波动状态。

#### 4 提高系统性能的措施

基于半闭环的复合控制对线性系统有非常好的控制效果,使系统具有良好的动态及稳态性能,但对间隙和摩擦非线性因素给系统带来的误差不能完全消除,并影响了系统的稳定性。对此,工程上可采取以下措施提高系统的伺服性能:

(1)安装光栅尺等检测器件实现全闭环控制,使系统间隙、摩擦等特性也得到有效校正与控制。

(2)采用先进新型的免润滑抗反冲击塑料螺母与梯形螺杆传动系统,减少传动间隙,从而减少摩擦、力冲击及间隙对系统性能的影响。

(3)提高滑块零部件等的加工精度,尽量提高丝杠等传动环节的刚度,合理确定传动形式及惯量匹配、优化结构设计,提高系统结构谐振频率等。

#### 5 结论

(1)大量仿真结果表明,设计的单关节单轴位置伺服系统具有良好的动态及稳态性能,并可实现高带宽及高精度的系统定位性能,为由多关节组成的蛇形臂机器

(下转第137页)

了充分的体现,在对接过程机头、后机身前后移动,柔性支撑定位装置不用再做二次调整,就可以通过自动控制软件终端按钮实现,也是该装置柔性的表现。装配要求、精度的不断提高,全自动柔性对接成本的居高不下,本装置应运而生,可谓两者综合,两头兼顾,特别适合于批量不大的大飞机的装配生产线。

## 7 柔性支撑定位装置的前景

大型飞机的柔性装配技术是我国航空企业重点研究方向之一,我国在柔性夹持、自动制孔、组件级装配和飞机自动对接技术等方面进行了较为系统的研究,在多个单项技术上实现了突破。

结合目前国内技术发展现状<sup>[3]</sup>,我国大飞机柔性装配技术将会呈现以下趋势:

(1)大型飞机的柔性装配将会建立在面向装配的全数字化产品定义基础上,逐步实现飞机的整体化模块化设计。

(2)飞机数字化三维装配工艺规划和管理技术相结合的过渡性装配工艺设计表达模式,有效地解决现有装配技术瓶颈问题。

(3)在飞机装配车间,建立全局或局部测量网,实现大空间范围内的高精度测量。

(4)建立半自动化/自动化飞机柔性装配系统,结合飞机结构特点和装配工艺水平,在需求与发展中开拓创新,为我国航空制造技术做出新的贡献。

(5)以分步单点突破、集点成线的思路,逐步建立柔性装配技术体系,使国内飞机装配技术向数字化、自动化、柔性化、虚拟化、集成化和网络化方向发展。

## 8 结束语

飞机大部件对接装配的数字化和自动化可以有效降低部件对接误差,提高飞机大部件对接装配精度和效率,是飞机大部件对接的发展趋势。今后,其发展重点是开展柔性定位装置的设计研究,考虑不同层次的自动要求;其次是要实现大部件对接装配的系统化、标准化、模块化等整体规划设计,构建大飞机柔性装配生产线。数字化柔性装配技术是一个值得深入研究的课题。

### 参考文献

[1] 王仲奇,康永刚,王辉坪,等.飞机部件级数字化柔性工装设计.航空制造技术,2011(22):101-104.  
 [2] 王亮,李东升,刘凤贵,等.飞机壁板类组件数字化装配柔性工装技术及应用.航空制造技术,2010(10):58-61.  
 [3] 郭洪杰.大型飞机柔性装配技术.航空制造技术,2010(18):52-54.

(责编 小城)

(上接第 132 页)

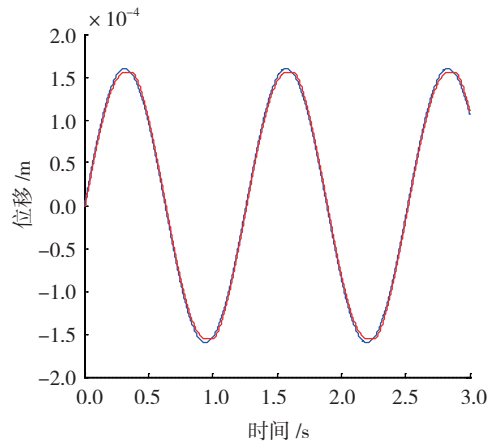


图9 间隙特性正弦信号位移曲线

Fig.9 Sine wave response curve with gap

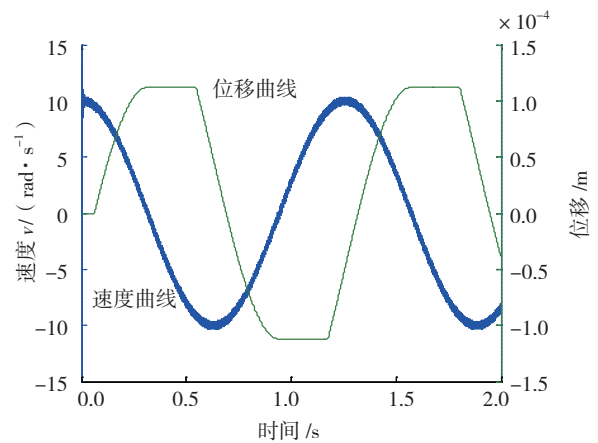


图10 加入间隙与摩擦后的速度与位移曲线

Fig.10 Velocity and distance curves with gap and friction

人的实际控制奠定了技术基础。

(2)研究了间隙及摩擦等非线性因素对系统性能的影响,为进一步提高系统性能提出了相应解决方案。

(3)该系统及控制方法已应用到安检蛇形臂机器人的实际控制中,获得了良好的控制效果。本文的建模与仿真方法也为类似伺服系统提供了借鉴与参考。

### 参考文献

[1] 魏志强,牛国臣,张小磊.反操纵大扭矩电动加载系统设计与应用.机械与电子,2013(8):58-62.  
 [2] 郑向周,李文斌.基于BLDCM的数控进给传动系统建模与仿真.机械工程与自动化,2010(4):85-87.  
 [3] 董玉红,邵俊鹏,周室仁.CK7815数控机床进给伺服系统的建模及仿真.哈尔滨理工大学学报,2005,10(3):25-27.  
 [4] 舒志兵,刘峻泉,林锦国,等.闭环伺服系统的数学模型研究.系统仿真学报,2002,14(12):1611-1613  
 [5] 刘胜,彭侠夫,叶瑰均.现代伺服系统设计.哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001:179-184.

(责编 小城)