

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.002

# 基于解耦的柔性关节机械臂振动抑制方法研究\*

戎新萍, 张得礼\*, 王小平

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**针对多自由度柔性关节机器人手臂残余振动抑制问题,对双杆机械臂关节耦合及振动抑制方法进行了研究,提出了基于解耦的柔性关节振动抑制控制算法。首先,根据拉格朗日方法建立了系统的动力学模型。然后,分析了关节间存在的相互作用力及关节间的相互耦合对机械臂振动抑制的影响。利用模糊补偿控制方法对二自由度柔性关节机械臂进行了模糊解耦,并在解耦的基础上引入零振荡整形器(ZV整形器)对解耦后的各个单关节进行进一步控制,以抑制各臂杆由于关节刚度不足导致的残余振动。最后,通过数值算例进行了仿真,验证了该算法的有效性。研究表明,加入解耦环节之后,两杆的相互干扰明显减弱,耦合度明显降低,使该非线性系统近似成为线性系统,再通过零振荡整形器对各关节运动加以优化,使得机械臂的残余振动得到了有效的抑制。

**关键词:**机械臂;解耦控制;模糊控制;振动抑制;输入整形

中图分类号:TH113.1;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0014-07

## Vibration suppression control for manipulator with flexible joints based on decoupling

RONG Xin-ping, ZHANG De-li, WANG Xiao-ping

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of  
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of residual vibration suppression of multi-degree of freedom robot arm with flexible joints, the coupling between joints and vibration suppression of two-link mechanical arm were studied. The vibration suppression control algorithm for flexible joints based on decoupling was proposed. First of all, the dynamic model of the whole system was established by taking advantage of the Lagrange method. Then, the interaction between joints and the vibration suppression of mechanical arm affected by the mutual coupling between the joints were analyzed. Secend, the coupling between the flexible joints of the multiple degrees of freedom manipulator was eliminated by making the use of fuzzy control method. To suppress the residual vibration of the arm due to the lack of rigidity of joints, the zero vibration shaper (ZV shaper) was introduced on the basis of decoupling to make further control of single joint after decoupling. At last, the effectiveness of the algorithm was verified through a numerical example. The results indicate that after adding the decoupling links, mutual interferences of the two rods are decreased obviously and the coupling degree is reduced, which make each rod become approximate linear system, and each joint is optimized through the zero vibration shaper to make the vibration of mechanical arm have been effectively suppressed.

**Key words:** robot arm; decoupling control; fuzzy control; vibration suppression; input shape

## 0 引 言

为了满足高速、轻型、稳定、低能耗等要求,机器人一般采用谐波减速器来传递电机输出的力矩<sup>[1]</sup>。然

而谐波减速器刚度低,其引入必然导致关节柔性的增加,进而引起负载端的振动,降低系统的轨迹跟踪精度、工作效率、稳定性以及鲁棒性。因此,研究关节柔性对机器人稳态精度的影响显得非常必要,并已得到

收稿日期:2014-09-15

基金项目:江苏省产学研联合创新资助项目(SBY2014020585)

作者简介:戎新萍(1990-),女,江苏扬州人,主要从事机电控制方面的研究. E-mail:rongxinpingnuaa@126.com

通信联系人:张得礼,男,博士,副教授,硕士生导师. E-mail:nuaazdl@126.com

国内外研究者的重视。如郭闯强等利用力矩传感器反馈机械臂作用于关节的扭转力矩,增加名义输出力矩前馈补偿,实现了振动的快速抑制。谢立敏、陈力等<sup>[2-4]</sup>采用奇异摄动理论将系统分解为快慢两个子系统,针对慢变子系统,提出基于状态观测器的鲁棒反步控制方法减少关节柔性带来的转角误差,实现了柔性关节机械臂的振动抑制。Kenji Kaneko 等<sup>[5]</sup>通过创建速度干扰观测器来观测臂杆末端的速度值,再反馈到输入端形成速度环,增加了系统的稳定性。Masahiko 等<sup>[6]</sup>提出模型控制算法,利用简化后的系统模型来估计负载端的转速,再和电机端的转速做差补偿到输入端来抑制振动,并在单关节机械臂上得以验证了该算法的有效性。Pyung Hun Chang, Hyung-Soon Park<sup>[7]</sup>针对柔性关节机械臂在运动过程中产生时变颤振现象,设计了时变输入整形器来抑制机械臂的残余振动。但

这些方法大多没有涉及系统解耦。而对多关节机器人手臂来说,机器人在运动过程中,各关节需要按照轨迹规划的结果同时运动,这时各运动关节之间的力和力矩会产生相互作用。当机械臂低速运动时,两轴之间存在的科氏力和向心力以及谐波减速器的柔性等因素可以忽略,这时还不至于造成过大的振动,但在高速、高精度的情况下关节处的弹性以及科氏力和向心力就不容忽视了。因此,没有解耦的机器人手臂,其系统是非常复杂的非线性系统,进行减振控制时较难获得精准的控制量。因此,要想更好地抑制机械臂的残余振动,必须首先要对机械臂进行解耦。

目前,针对械臂解耦控制研究并不多见。孙敬颀等<sup>[8]</sup>采用基于微分几何反馈线性化方法对柔性关节模型做了精确化解耦处理,对于线性化后的系统采用滑模变结构控制规律来实现轨迹的合理跟踪。但微分几何方法只能解单柔性关节的机电耦合,不能解多自由度柔性关节相互之间的耦合,即对多关节机械臂不适用。Kouhei Tominaga 等<sup>[9-11]</sup>建立了多关节机械臂的动力学数学模型,计算关节之间的耦合量,再在控制输入端加入力矩补偿值来消除关节之间的干扰,达到了完全解耦的目的。但是它忽略了轴与轴之间的科氏力和向心力以及轴的重力,而且把关节惯量矩阵视为定值,忽略的因素比较多,达不到精确控制的目的。

因此,本研究以最具代表性的二自由度柔性关节机械臂为例,在前人研究的基础上,提出模糊补偿解耦控制方法。

## 1 系统建模

机器人数学模型是进行机器人精确控制的基础。

本研究以二自由度柔性关节机器人手臂为例进行多自由度柔性关节机械臂振动抑制算法研究。其柔性主要集中在关节处,由谐波减速器所引入,而连杆则被视为刚性杆。本研究利用 Spong 建立的单关节简化模型<sup>[12]</sup>和拉格朗日方法建立动力学模型。另外,本研究不考虑轴与轴承之间的库伦力摩擦和传动间隙等非线性因素,假设杆的质量分布也是均匀的。二自由度柔性关节机械臂结构简化图如图 1 所示。其中:杆 1 为大臂,杆 2 为小臂。系统在平面内运动,具有两个自由度。伺服电机受到输入驱动力矩转动,经过谐波减速器减速把驱动力矩传递给关节,带动机械臂转动。

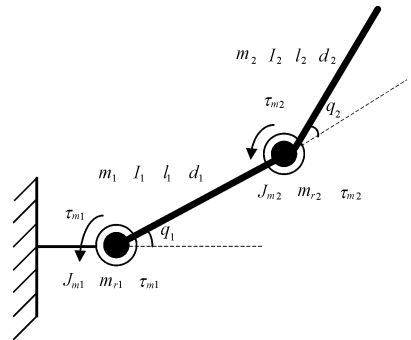


图 1 二自由度柔性关节机械臂结构简化图

$\tau_m$ —电机输入力矩; $J_m$ —电机转子的转动惯量; $m_r$ —电机转子的质量; $\theta_m$ —电机转子的转动角度; $m$ —臂杆的质量; $l$ —臂杆的中心转动惯量; $q$ —臂杆的转动角度; $l$ —臂杆的总长度; $d$ —臂杆的质心到各杆转动端的长度

二自由度柔性关节机械臂的动力学模型<sup>[13]</sup>为:

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + C(q)\dot{q}^2 + D(q)\dot{Q} + G(q) = \tau \\ J_m\ddot{\theta}_m + \frac{1}{n}\tau = \tau_m \\ \tau = K\left(\frac{1}{n}\theta_m - q\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tau_m$ —电机输入力矩; $J_m$ —电机转子转动惯量; $\theta_m$ —电机转子的转动角度; $q$ —机械臂的转动角度; $\dot{q}$ —机械臂的转动速度,且  $\dot{Q} = [\dot{q}_1 \dot{q}_2 \quad \dot{q}_2 \dot{q}_1]^T$ ;  $M(q)$ —关节转动惯量,  $M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ ;  $M_{11}, M_{22}$ —关节 1 和关节 2 的有效惯量; $M_{12}, M_{21}$ —关节 1 和关节 2 之间的耦合惯量; $C(q)$ —向心力系数; $D(q)$ —科氏力系数; $G(q)$ —机械臂重力项; $K$ —关节刚度系数; $n$ —谐波减速器的减速比,  $n > 1$ 。

## 2 耦合分析

由于运动加速度的存在,两臂在运动过程中彼此都给对方施加反向作用力。为了分析两臂之间的耦合关系,本研究利用 Matlab 搭建了二自由度柔性关节机

械臂的数学模型,先后进行了两个步骤进行分析。

步骤一:为了清楚地分析杆 2 的转动加速度  $a_2$  对杆 1 运动状态的影响,先让杆 1 不动,只驱动电机 2 使杆 2 动,其目标位置为  $30^\circ$ ,仿真时间为 3 s。杆 2 在运动过程中对杆 1 产生的反向作用力会改变杆 1 的运动状态,如杆 1 的转动角度。杆 2 加速度  $a_2$  对杆 1 运动状态影响分析如图 2 所示。从图 2 可以看出,杆 2 加速度在做衰减振荡,振动频率非常快;由于关节存在柔性,杆 1 并没有稳定在目标位置而是在做衰减振荡,且其振荡曲线受杆 2 加速度的影响,振荡过程中产生高次谐波。另外,由于大臂的实际转动惯量大于小臂的转动惯量,所以振荡频率相对杆 2 比较低。为了更清楚地看到小臂运动加速度对大臂运动状态的影响,对图 2 进行局部放大。两臂运动时间为 0.15 s 前的局部放大图如图 3 所示。

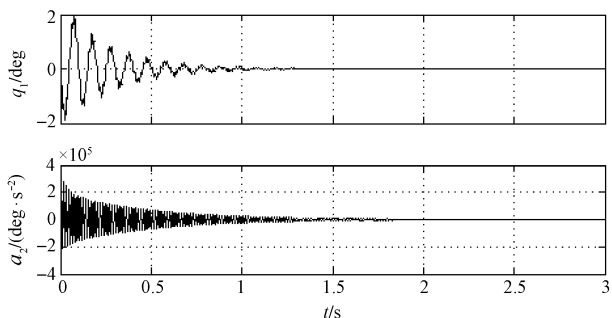


图 2 杆 2 加速度  $a_2$  对杆 1 运动状态影响分析图

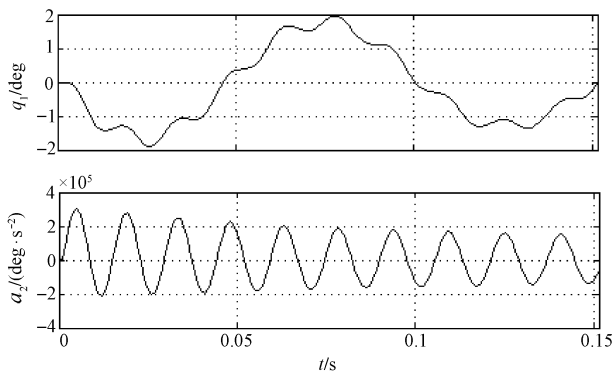


图 3 两臂运动时间为 0.15 s 前的局部放大图

从图 3 可以看出,运动的瞬间,小臂受伺服电机 2 驱动,向上做加速度运动,此时其加速度反作用于杆 1,使杆 1 受到杆 2 向下的反作用力,并且该加速度值越来越大,当该干扰力矩大于伺服电机 1 的输出力矩时,杆 1 开始向下运动。又由于关节刚度较低,存在柔性,所以杆 1 受到此干扰力作用开始做衰减振荡。当杆 2 加速度大小、方向改变时,杆 1 所受杆 2 的反作用力的大小、方向也会改变,此时杆 1 的运动速度也会相应改变,所以杆 1 的振荡曲线具有高次谐波。

步骤二:同样为了清楚地分析杆 1 的转动加速度

$a_1$  对杆 2 运动状态的影响,然后令杆 2 不动,只驱动电机 1 让杆 1 转动,其目标位置为  $30^\circ$ ,仿真时间为 3 s。杆 1 加速度  $a_1$  对杆 2 运动状态影响分析如图 4 所示。当大臂动、小臂不转动时,从图 4 可以看出,杆 1 加速度在做衰减振荡,因为杆 1 的实际转动惯量较大,其振荡频率比步骤一中杆 2 加速度的振荡频率低。由于杆 1 反作用力的影响,杆 2 也没有稳定在目标位置处,而是在做衰减振荡,其振荡频率和杆 1 加速度的振荡频率一样,这是因为杆 1 的实际转动惯量大于杆 2 的转动惯量,且两关节的刚度值相同,当大臂振动方向改变时,杆 2 受杆 1 反向作用力的影响,其振动方向也会跟着发生改变,所以杆 2 的振动频率和杆 1 的振动频率一样。为了更清楚地分析大臂运动加速度对小臂位置精度的影响,本研究对图 4 进行局部放大。两臂运动时间为 0.3 s 前的局部放大图如图 5 所示。

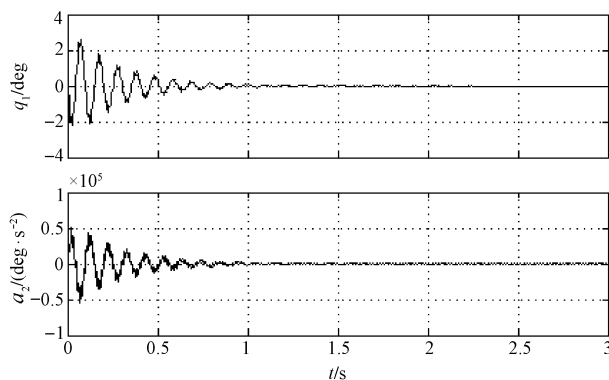


图 4 杆 1 加速度对杆 2 运动状态影响分析图

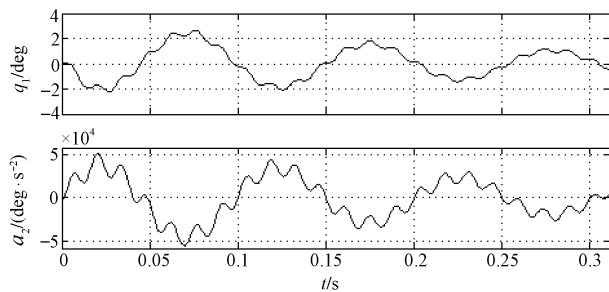


图 5 步骤二中两臂运动时间为 0.3 s 前的局部放大图

从图 5 可以看出,步骤二和步骤一运动情况很相似,在运动的瞬间杆 1 受到伺服电机 1 的驱动开始向上做加速度运动,该加速度反作用于杆 2。当杆 1 的加速度的大小、方向改变时杆 2 所受杆 1 的反作用力的大小、方向也会改变,此时杆 2 的运动速度也会相应改变,所以杆 2 的振荡曲线产生高次谐波。

综合以上分析,本研究可以得出一杆的运动加速度对另一杆产生反向作用力,另一杆受该反向作用力影响使其原有的运动速度和运动精度都相应发生改变,使各自的振荡曲线都产生了高次谐波,因此两者之

间存在严重的耦合。要想得到较为精准的控制量,必须首先要对两杆进行解耦处理,以更好地抑制振动。

### 3 控制算法

#### 3.1 机械臂的解耦

根据上述的耦合分析,一杆的加速度会对另一杆产生影响,因此,本研究提出模糊解耦的控制算法。本研究以一杆的运动速度和该杆实际运动位置和目标位置之差以及另一杆的运动加速度为模糊控制器的 3 个输入量,利用模糊控制规则得出该杆的耦合量补偿给该杆。同时本研究进行多次仿真实验确定模糊控制规则、量化因子和比例因子,尽可能消除两杆之间的相互干扰量,实现模糊解耦的目的。设该三输入单输出的模糊控制器的输入量分别是  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ ,输出量是  $u$ ,量化因子分别是  $k_{e1}$ 、 $k_{e2}$ 、 $k_{e3}$ ,比例因子为  $k_u$ 。这里分两个步骤确定模糊控制器 1 和模糊控制器 2 的各个参数及模糊控制规则。

步骤一:让杆 1 不动,只驱动电机 2 使杆 2 动,其目标位置为  $30^\circ$ 。 $e_1$  为杆 1 实际转动位置和目标位置之差、 $e_2$  为杆 2 的转动加速度、 $e_3$  为杆 1 的转动速度, $u$  为模糊控制器的输出量,即杆 1 的补偿量。经过仿真实验测试得出输入量和输出量的取值范围,取该控制器输入量的模糊论域都为  $e \in [-3 \ 3]$ ,输出量的模糊论域为  $u \in [-4 \ 4]$ 。输入量和输出量隶属函数都取为三角形,输入量用 7 个模糊子集涵盖,模糊子集分别为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、O(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。输出量用 9 个模糊子集涵盖,模糊子集分别为 NB(负大)、NMB(负中大)、NMS(负中小)、NS(负小)、O(零)、PS(正小)、PMS(正中小)、PMB(正中大)、PB(正大)。

经过多次仿真实验对比,最后确定步骤一的模糊控制器的模糊规则如表 1 所示。步骤一中大臂不动,只有小臂转动时,加入模糊解耦之前大臂的实际转动位置  $q_1$  如图 6 所示。加入模糊解耦之后,大臂的实际转动位置  $q_1$  如图 7 所示。

表 1 步骤一的三维模糊控制语言

规则号	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$u$
1	O	O	O	O
2	O	O	PB	NMS
3	O	O	NM	PS
.....				
34	NS	PB	PS	O
35	NS	PB	NM	PMB
36	NS	PB	NS	PMB
37	NS	PM	NM	PMB
.....				
70	NM	NS	PS	PS

(续表)

规则号	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$u$
71	NM	NS	NS	PMS
72	NM	NB	PS	O
73	NM	NB	PM	O
.....				
89	NB	O	NS	PB
90	NB	NB	NB	PMB
91	NB	NB	NM	PMB
92	NB	NB	NS	PMS
.....				
140	PS	NS	O	NMS
141	PS	NS	NM	O
142	PS	NS	PM	NMS
143	PS	NS	NS	NS
.....				
160	PM	NM	O	NMB
161	PM	NM	NS	NMB
162	PM	NS	PB	NMB
163	PM	NS	NS	NMS
.....				
190	PB	PB	PM	NMS
191	PB	PB	O	NS
192	PB	PB	NS	O
.....				

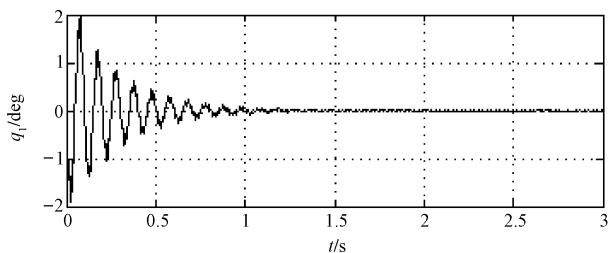


图 6 解耦前的大臂实际转动位置  $q_1$

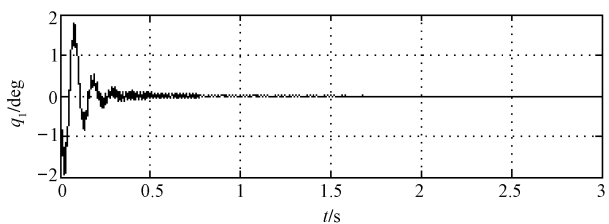


图 7 解耦后的大臂实际转动位置  $q_1$

对比图 6 和图 7 可以看出,经过模糊解耦之后杆 1 的振动幅值及调整时间都明显减小,当  $t=0.2 \text{ s}$  时杆 1 就趋于稳定, $t=0.75 \text{ s}$  时杆 1 完全稳定了,调整时间比解耦前提高了 50%。因此,杆 1 受杆 2 加速度的影响已经变小,达到了模糊解耦的目的。

步骤二:让杆 2 不动,只驱动电机 1 使杆 1 转动,其目标位置为  $30^\circ$ 。 $e_1$  为杆 2 实际转动位置和目标位置之差、 $e_2$  为杆 1 的转动加速度、 $e_3$  为杆 2 的转动速度, $u$  为模糊控制器的输出量,即杆 2 的补偿量。经过仿真实验测试得出输入量和输出量的取值范围,取该控制器输入量和输出量的模糊论域都为  $e \in [-3 \ 3]$ 。输入量和

输出量隶属函数都取为三角形,都用 7 个模糊子集涵盖,模糊子集分别为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、O(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。

经过多次仿真实验对比,最后确定步骤二的模糊控制器的模糊规则如表 2 所示。步骤二中小臂不动,只有大臂转动时,加入模糊解耦之前小臂的实际位置  $q_2$  如图 8 所示。加入模糊解耦之后,小臂的实际位置  $q_2$  如图 9 所示。对比图 8 和图 9 可以发现模糊解耦后,虽然小臂的振动幅值没有改变,但小臂的振荡曲线比解耦前光滑,消除了小臂振动曲线的高次谐波,说明大臂的运动加速度的变化对小臂运动影响变小了。同样也实现了模糊解耦的目的。

表 2 步骤二的三维模糊控制语言

规则号	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$u$
1	O	O	O	O
2	O	O	PB	NM
3	O	O	PS	NS
.....				
20	NS	PM	NB	PS
21	NS	PM	NM	PS
22	NS	PM	O	O
23	NS	PM	PS	NS
24	NS	PB	PS	NS
.....				
31	NM	PM	NB	PM
32	NM	PM	NM	PM
33	NM	PM	PS	O
34	NM	PM	O	O
35	NM	PS	NM	PM
.....				
41	NB	PM	O	PM
42	NB	PM	NS	PM
43	NB	PM	PS	PS
44	NB	PM	PB	O
45	NB	PM	PM	O
.....				
55	PS	NM	O	O
56	PS	NM	NS	O
57	PS	NM	PS	O
58	PS	NS	NB	PS
59	PS	NS	PM	NS
.....				
64	PM	NB	PM	NS
65	PM	NB	O	O
66	PM	NB	NB	O
67	PM	NB	PS	O
68	PM	NB	PM	NS
.....				
76	PB	NM	PB	NM
77	PB	NM	O	NS
78	PB	NB	PB	NS
.....				

### 3.2 振动抑制

机械臂经过上述的解耦环节之后,运动过程中两杆

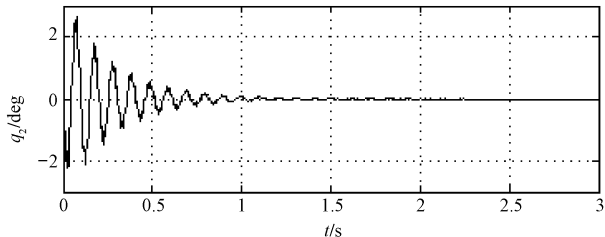


图 8 解耦前的小臂实际转动位置  $q_2$

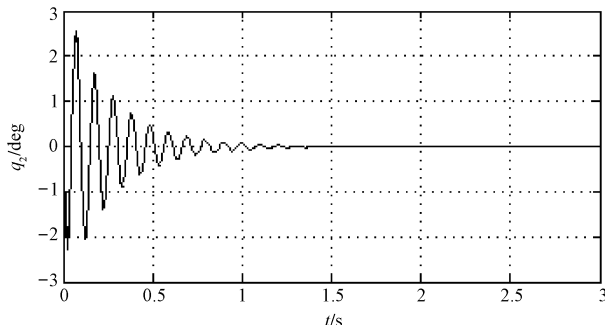


图 9 解耦后的小臂实际转动位置  $q_2$

之间的耦合度减弱,能得到更为精准的控制量,但是因为关节处存在柔性,机械臂在解耦之后仍然产生振动。

输入整形技术<sup>[14]</sup>作为系统残余振动抑制常用控制方法,通过对输入控制信号进行整形,能够有效地抑制小阻尼系统的残余振动,且还不需要额外的反馈。它是由一系列的脉冲信号组成,与参考命令卷积生成整形命令,驱动系统运行。本研究所引用的是最简单的输入整形器—零振荡整形器(ZV 整形器)。ZV 整形器只包含两个脉冲,第一个脉冲在零时刻产生振荡,而第二个脉冲延迟一定时间后,其产生的振荡与第一个脉冲产生的振荡幅值和频率相同,但方向相反,所以两者相互抵消。假设系统的无阻尼固有频率为  $\omega$ ,阻尼比为  $\xi$ ,则 ZV 输入整形器的两个脉冲幅值和脉冲时滞分别为:

$$A_1 = \frac{1}{1 + e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}}; A_2 = \frac{e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}}{1 + e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}};$$

$$t_1 = 0; t_2 = \frac{\pi}{\omega \sqrt{1-\xi^2}} \quad (2)$$

综上所述,整个机械臂系统基本控制框图如图 10 所示。

## 4 数值分析

基于 Simulink 软件,本研究构建了整个系统的动力学模型。首先,笔者只加入模糊解耦模块,然后,在此基础上再引入 ZV 输入整形器,最后,观察机械臂各臂杆运动状态的变化。系统参数如表 3 所示。令大臂和小臂的同时转动,转动目标位置都为  $30^\circ$ ,仿真时间为 3 s。大臂模糊解耦前转动位置  $q_1$  如图 11 所示。小

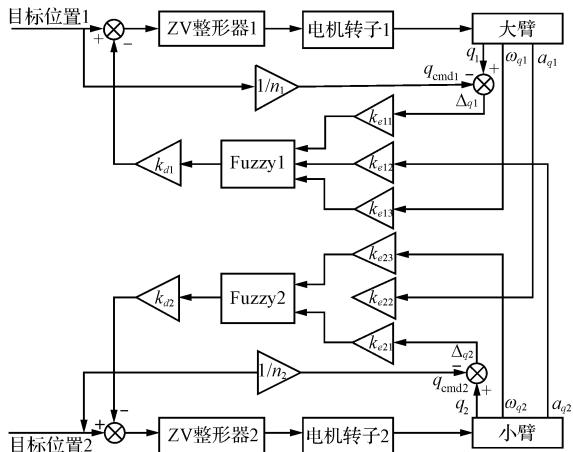


图 10 整个机械臂系统基本控制框图

$q_{cmd}$ —臂杆的转动目标位置; $q$ —臂杆实际转动位置; $\omega$ —臂杆实际转动速度; $a$ —臂杆实际转动加速度; $k_e$ —模糊控制器的量化因子; $k_d$ —模糊控制器的比例因子; $n$ —谐波减速器的减速比

臂模糊解耦前转动位置  $q_2$  如图 12 所示。

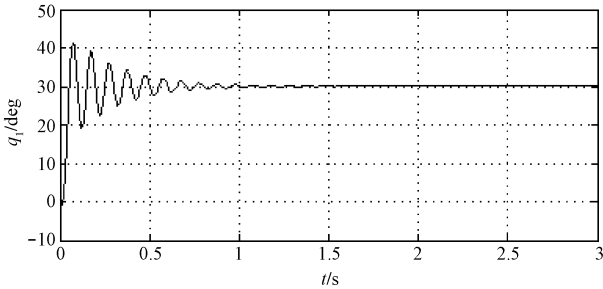


图 11 大臂模糊解耦前转动位置  $q_1$

表 3 系统结构参数

参数名称	取值
大臂等效质量/kg	5
小臂等效质量/kg	3
大臂杆长/m	0.6
小臂杆长/m	0.4
电机转子等效质量/kg	1
电机转子转动惯量/kg·m <sup>2</sup>	5.525e-5
大臂的中心转动惯量/kg·m <sup>2</sup>	0.15
小臂的中心转动惯量/kg·m <sup>2</sup>	0.04
关节刚度/(N·deg <sup>-1</sup> )	180
减速比 $n$	33.3

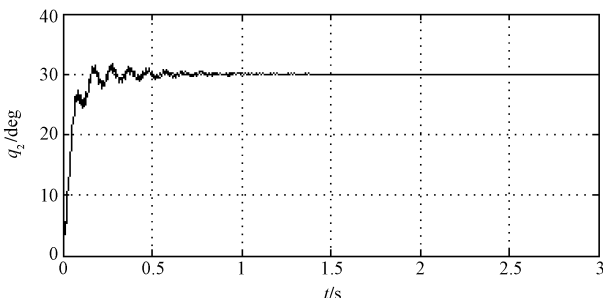


图 12 小臂模糊解耦前转动位置  $q_2$

杆之间相互耦合,大臂和小臂运动到目标位置之后都产生了很长时间的一段振动,然后才趋于稳定,且振动曲线中都有高次谐波。从图 11、图 12 可以看出,解耦之前大臂的最大超调量为 18.3%,调整时间约为 1.2 s,振荡次数为 12;小臂的最大超调量较小,但由于耦合作用的影响其振荡曲线存在高次谐波,调整时间为 1 s,振荡次数为 10。大臂模糊解耦前后转动位置  $q_1$  如图 13 所示。小臂模糊解耦后转动位置  $q_2$  如图 14 所示。

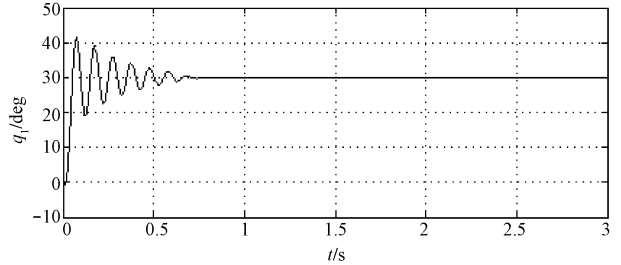


图 13 大臂模糊解耦后转动位置  $q_1$

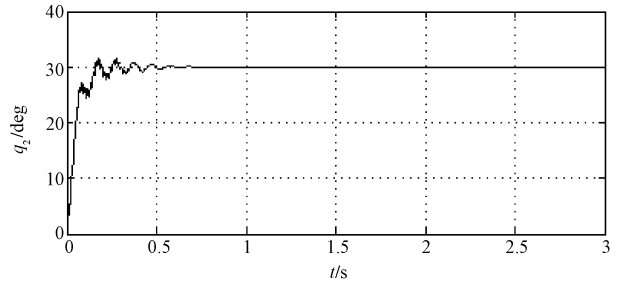


图 14 小臂模糊解耦后转动位置  $q_2$

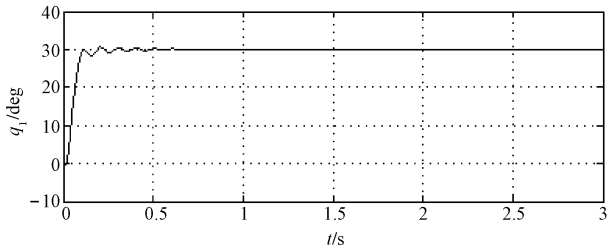
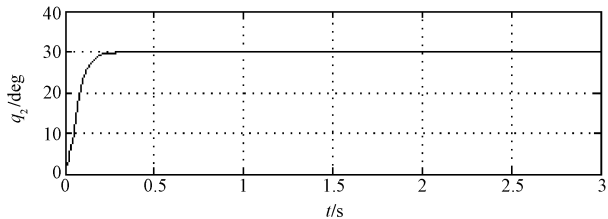
从图 13、图 14 可以看出,机械臂经过模糊解耦之后,两杆的耦合度降低,大臂的调整时间约为 0.6 s,足足提前了 0.6 s,小臂的振动曲线比解耦前更加光滑了,且调整时间变为 0.55 s,相比解耦前提前了 0.45 s。另外,通过图 13 和图 14 可以计算出解耦之后大臂、小臂的无阻尼固有频率和阻尼分别为  $\omega_1 = 61.81, \xi_1 = 0.0625; \omega_2 = 64.879, \xi_2 = 9.28e-3$ 。通过式(2)可以计算出 ZV 整形器 1 和 ZV 整形器 2 的脉冲幅值和脉冲时滞如表 4 所示。大臂解耦后并引入 ZV 整形器时转动位置  $q_1$  如图 15 所示。小臂解耦后并引入 ZV 整形器时转动位置  $q_2$  如图 16 所示。

表 4 ZV 整形器参数

ZV 整形器	$A_1$	$A_2$	$t_1$	$t_2$
1	0.549	0.451	0	0.0509
2	0.5074	0.4926	0	0.0485

由图 15、图 16 可以看出,模糊解耦之后引入 ZV 整形器,机械臂的振动得到了更有效地抑制。大臂的最大超调量减小到 1%,调整时间比解耦后提前了 0.1 s,当  $t=0.5$  s 时大臂就完全稳定了;小臂没有超调和振动,很平稳地到达了目标位置,并且到达目标位置之后没有残余振动。

机械臂在解耦之前,由于关节处刚度较低而且两

图 15 大臂解耦后并引入 ZV 整形器转动位置  $q_1$ 图 16 小臂解耦后并引入 ZV 整形器转动位置  $q_2$ 

## 5 结束语

二自由度柔性关节机器人手臂在运动过程中,由于关节刚性不足,会产生残余振动,而且一杆的运动加速度会对另一杆产生反向作用力,影响另一杆的运动速度和运动精度,且加速度值越大,影响就越大。关节间存在的耦合给机械臂振动抑制增加了困难。本研究根据一杆加速度大小和方向,对另一杆进行补偿来抵消该耦合值。数值仿真实验表明,本研究提出的模糊解耦算法有效地解决了关节间的耦合问题。

机械臂解耦之后,由于关节间的耦合度降低,大臂和小臂都可被看成近似线性系统,通过引入 ZV 输入整形器,能更好地抑制各杆的残余振动,提高整个系统的控制精度和工作效率。因此,解耦能够更好地抑制振动。

在实际工业自动化控制环境下,机械臂杆转动的实际角度一般不用专用的传感器来进行测量,因此下一步仍需进一步根据系统的数学模型,预估出各臂杆的实际转动角度,利用预测的角度位置进行控制。

### 参考文献 (References):

- [1] 郭闯强,倪风雷,孙敬颀,等. 具有力矩传感器的柔性关节的振动抑制[J]. 机器人,2011,33(4):449-454.
- [2] 谢立敏,陈力. 具有柔性关节的漂浮基空间机械臂基于状态观测器的轨迹跟踪鲁棒反步控制及弹性振动抑制

[J]. 机器人,2012,34(6):722-729.

- [3] 陈志勇,陈力. 带有柔性补偿的柔性关节空间机器人的增广自适应控制及关节振动抑制[J]. 宇航学报,2013,34(12):1599-1604.
- [4] 黄松,胡晓兵,周飞,等. 关节机器人定位精度影响因素分析[J]. 机械,2014(4):76-80.
- [5] KANEKO K, KONDO S, OHNISHI K. A motion control of flexible joint based on velocity estimation[J]. **IEEE Industrial Electronics Society**,1990(1):279-284.
- [6] ITOH M, YOSHIKAWA H. Vibration suppression control for an articulated robot: effects of model-based control applied to a waist axis[J]. **International Journal of Control, Automation and System**,2003,1(3):263-270.
- [7] CHANG P H, PARK H S. Time-varying input shaping technique applied to vibration reduction of a industrial robot[J]. **Control Engineering Practise**,2005(13):121-130.
- [8] 孙敬颀,史士财,王学飞,等. 大型空间机械臂柔性关节的微分几何算法控制器设计[J]. 哈尔滨工程大学学报,2012,33(11):1371-1376.
- [9] TOMINAGA K, OGURO R. A Decoupling Control Method for Two Link Manipulator[C]. ICIC'07. Kumamoto: [s. n.],2007:258.
- [10] LAN Lin-feng, OKABE K, OGURO R, et al. Decoupling Control of 2-link Manipulator with Model Following Control and Proposed Control Gains Design [C]// International Conference on Control, Automation and System 2012. JejuIsland; [s. n.],2012:1049-1054.
- [11] NAKASHIMA R, OJIMA M, OGURO R, et al. A Decoupling Control Method for Industrial Robots[C]. AMC 2000 NAGOYA; [s. n.],2000:252-257.
- [12] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots [J]. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**,1987,109(1):310-319.
- [13] KIM E J, SEKI K, IWASAKI M, et al. Modeling and identification of serial two-link manipulator considering joint nonlinearities for industrial robots control[J]. **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**,2012(10):2718-2723.
- [14] 董明晓,孙杰,郑康平,等. 闭环输入整形器消除多模态柔性系统残留振动[J]. 机械工程学报,2006,42(5):110-114.

[编辑:李辉]

### 本文引用格式:

戎新萍,张得礼,王小平. 基于解耦的柔性关节机械臂振动抑制方法研究[J]. 机电工程,2015,32(1):14-20.

RONG Xin-ping, ZHANG De-li, WANG Xiao-ping. Vibration suppression control for manipulator with flexible joints based on decoupling[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(1):14-20.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>