文章编号：1000-8152(2001)05-0765-04

柔性空间机械臂的闭环方波序列控制*

张 兵
（航天清华卫星技术有限公司·北京，100088）
张洪华
（北京控制工程研究所·北京，100080）

摘要：将"输入成形"方法加以推广，提出了一种方波序列控制，并利用幅值调制的思想，提出了一种闭环方波序列控制方法，在保证无余振的前提下，实现了柔性空间机械臂的高精度机动控制，并对系统惯量不确定性具有较强的鲁棒性．理论和仿真结果表明，该方法是有效的．

关键词：空间机械臂；振动控制；输入成形；反馈控制
文献标识码：A

A Close-Loop Implementation of Square-Wave form Control for the Space Flexible Manipulator

ZHANG Bing
(Hangtian Tsinghua Satellite Technology Company Limited · Beijing, 100088, P.R China)
ZHANG Honghua
(Beijing Institute of Control Engineering · Beijing, 100080, P.R.China)

Abstract: Based on input shaping approach, a square-wave form control is proposed for a close-loop implementation. The output of a PD controller is modulated to the square-wave form to eliminate both the residual vibration and maneuver error. The approach is applied to the simulation of a space flexible manipulator, and shown effective.

Key words: space flexible manipulator; vibration control; input shaping; feedback control

1 引言(Introduction)

空间柔性机械臂是进行在轨操作的重要设备．空间机械臂工作在失重环境下，在剧烈运动过程中，其挠性振动问题显得较为突出，所以振动抑制是空间柔性机械臂控制中必须要解决的问题[1,2]．

对于柔性结构的控制，可以通过增加阻尼、刚化结构和对控制输入成形(input shaping, IS)来抑制振动．IS的基本思路是通过对控制输入形式或设定点的规划来减振．Smith[3]的研究中已包含对命令预整形的思想，此后最优控制方法也融入IS设计中，但其控制律本质上是开环的形式，对不同的机动任务必须重新对控制律进行解算，而且计算的复杂性也使其中的一些方法难于应用．另外一类方法是计算力矩法，由于涉及系统逆运动学的求解，其鲁棒性不易保证．比较有影响的是Singer和Seering的一些研究工作[4~7]，由于在理论上可以实现目标在机动后无余振的优良控制品质，所以日益得到理论界和工程界的重视．通常的IS方法在应用中的主要问题是：为了保证机动结束时振动完全消除，需要事先精确规划好控制输入，所以是一种开环的控制形式，当机动任务发生变化后还需要重新设计．另外在鲁棒性方面，目前的一些研究主要是针对对象自然频率和阻尼不确定性的，而另外姿态运动方程的不确定性，如惯量的不确定性同样对IS的实际控制效果有很大的影响．

对空间柔性机械臂来说，由于需要抓拿物体，使得本身的惯量存在较大的不确定性．为此本文提出一种闭环实施IS的控制策略，其基本思路是：将脉冲序列控制推广为特定的方波序列控制，作为基本的控制输入形式；在转动通道引入PD反馈控制律生成预控制输入；基于幅值调制的思想，用不激振的方波序列对预控制输入进行调制，使最终的控制输入在实现期望机动的同时又不激振．

2 柔性机械臂的简化模型(Simplified model of flexible manipulator)

考虑平面桁架结构的柔性空间机械臂，其根端受装配在航天器上的旋转电机驱动；末端是自由端，可用来跟踪或抓获空间物体．为理论研究方便，柔性

* 基金项目：国家高技术(863)航天领域研究项目资助．
收稿日期：1999-06-16；收修改稿日期：2000-06-28．

机械臂的刚体运动,限制为绕根端的平面内转动;而柔性机械臂的变形运动取为在平面内的纵向弯曲振动.这里忽略了柔性机械臂的平动,这是因为飞行器的轨道运动周期通常远远大于姿态操作周期.

假设刚体的转动角可通过安装在机械臂上的加速度计或其他敏感器解算出.控制任务是:基于电机和角度敏感器,设计控制算法,实现快速旋转机动或目标跟踪,同时实现柔性振动的快速高精度抑制.

利用 Lagrange 方程可以导出刚体角位移坐标与柔性模态坐标描述的混合运动方程:

$$J\ddot{\theta} + \sum_{k=1}^{N} p_k\ddot{\eta}_k = \tau, \tag{2.1}$$

$$\ddot{\eta}_i + p_i\ddot{\theta} + \omega_i^2\eta_i = 0,\ i = 1,,2\cdots,N. \tag{2.2}$$

其中,J 是柔性臂相对根端的转动惯量,N 是柔性模态数目,ω_i 是模态频率,θ 是柔性臂转角,电机控制力矩用 τ 表示,p_i 为刚体运动与振动的耦合系数,η_k 为模态坐标.

3 方波序列控制(Square-wave control)

本节将选定方波信号为基本元素,仿照脉冲控制序列的形成构造方波控制序列,消除振动.考虑单个模态运动方程

$$\ddot{\eta} + \omega^2\eta = u. \tag{3.1}$$

其中 η 是模态坐标,u 是模态控制输入,ω 是模态频率.令上式的输入宽度为 w 与幅值为 A 的方波信号.可以导出方波响应为

$$-A\cos(\omega(t-t_0))+A\cos(\omega(t-(t_0+w)))=\bar{A}\cos(\omega t-\varphi). \tag{3.2}$$

其中

$$\bar{A} = \sqrt{2}\sqrt{1-\cos\omega w}A,$$

$$\varphi = \mathrm{tg}^{-1}\frac{-\sin\omega t_0 + A\sin\omega(t_0+w)}{-\cos\omega t_0 + A\cos\omega(t_0+w)}.$$

可推出,在 $t_1,t_2,\cdots,t_N$ 时刻加入宽度为 w 与幅值分别为 $A_1,A_2,\cdots,A_N$ 的方波,其对应的在 t_N 时刻后的模态响应为

$$\bar{A}_1\cos(\omega t-\varphi_1)+\cdots+\bar{A}_N\cos(\omega t-\varphi_N) = A_{\mathrm{amp}}\cos(\omega t-\Psi), \tag{3.3}$$

其中,$A_{\mathrm{amp}} = \sqrt{(\sum_{j=1}^{N}\bar{A}_j\cos\varphi_j)^2+(\sum_{j=1}^{N}\bar{A}_j\sin\varphi_j)^2}.$

为使 N 个方波作用后消除振动,必须有 $A_{\mathrm{amp}}=0$,或 $\sum_{j=1}^{N}A_j\cos\varphi_j = 0,\ \sum_{j=1}^{N}A_j\sin\varphi_j = 0$.对于双方波控制模式,$N=2$ 则可进一步写为

$$A_1[-\cos\omega t_1+\cos\omega(t_1+T)] + A_2[-\cos\omega t_2+\cos\omega(t_2+T)] = 0, \tag{3.4}$$

$$A_1[-\sin\omega t_1+\sin\omega(t_1+T)] + A_2[-\sin\omega t_2+\sin\omega(t_2+T)] = 0, \tag{3.5}$$

其中,$T=2\pi/\omega$ 为模态周期.设 $t_1=0,A_1=\frac{1}{2}$,则在(3.4)和(3.5)式中有两个未知数(t_2,A_2)两个方程,解之得,$t_2=kT+T/2,A_2=\frac{1}{2}$,其中 k 为0或任意正整数.同样可导出三方波控制序列

$$\begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ A_1 & A_2 & A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & kT+T/2 & 2kT+T \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{bmatrix}. \tag{3.6}$$

应当指出,理论上可有任意多个方波构成的序列,使得在序列作用后振动彻底消失.可以证明,序列中的方波个数越少,控制对模态频率的鲁棒性越差;而方波序列中的方波个数越多,则完全消除振动的时间越长.因此,方波个数的选取应在两者之间进行折中,通常取三方波序列或四方波序列就能满足工程需求.类似地,多个模态的方波序列控制可从单个模态的方波序列控制推出[8].尽管方波序列与相应脉冲序列有完全相同的表达形式.其中的重要区别在于方波序列物理上是可以实现的,而脉冲序列物理上是不可实现的.

4 柔性机械臂的开环方波序列控制(Open-loop square-wave control of flexible manipulator)

本节将利用方波序列控制研究柔性机械臂的姿态机动和振动控制问题[8].考虑柔性机械臂模型(2.1)和(2.2).不失一般性只考虑单个振动模态情形,于是系统的数学模型可写为

$$J\ddot{\theta}(t) + p_1\ddot{\eta}_1(t) = \tau, \tag{4.1}$$

$$\ddot{\eta}_1 + \omega_1^2\eta_1 = -p_1\ddot{\theta}. \tag{4.2}$$

若取 $\tau = \bar{\tau} + p_1\ddot{\eta}_1(t)$,可得 $J\ddot{\theta} = \bar{\tau}$,即有 $\ddot{\eta}_1 + \omega_1^2\eta_1 = -\frac{p_1}{J}\bar{\tau}$,显然,如果 $\bar{\tau}$ 具有前述方波控制的波形,则根据前面的讨论,可以实现零余振.这样我们可以通过规划整形方波序列来确定出相应的 $\bar{\tau}$,可以得到最终的控制律为

$$\tau = \left(1-\frac{p_1^2}{J}\right)\bar{\tau} - p_1\eta_1\omega_1^2. \tag{4.3}$$

整理前述过程,可以给出姿态机动的开环控制律设计的步骤为:

1) 按照方波控制序列,规划 $\ddot{\theta}(t)$ 并确定 $\bar{\tau}$,使得完成预定的姿态机动.

2) 根据实测的 $\ddot{\eta}_1$ 和已经确定的 $\bar{\tau}$,利用(4.3)

式确定在线控制力矩 $\tau(t)$.

由于前述的控制律是种对 θ 开环的控制律，当机动量发生变化时，需要重新规划控制. 特别是当系统惯量 J 存在不确定性时，开环控制律则无法完成精确的机动任务. 下面依据幅值调制的思想给出一种闭环的方波序列控制方案.

5　柔性机械臂的闭环方波序列控制(Close-loop square-wave control of flexible manipulator)

从前面的讨论可以看出方波序列控制的无余振特性仅决定于方波序列的形状，而与波形的幅值无关，当幅值成倍增加或减小，振动控制的效果不变. 而且不同时刻施加的不同幅值的有限个方波组作用在对象上同样具有无余振特性.

考虑对象(4.1)和(4.2)，为了将闭环控制律与方波序列控制结合起来，首先给出一个采样 PD 控制律的形式

$$U^*(t;kT^*)=\begin{cases}kp\theta(kT^*)+kd\dot{\theta}(kT^*), & kT^*\leqslant t<(k+1)T^*,\\ 0, & \text{其它}.\end{cases}\tag{5.1}$$

其中，$T^*>0$ 为采样时间，k 为非负整数，表示时间序号.

如果将式(3.6)描述的三方波序列另记为

$$\bar{U}(t;t_0,\omega)=\begin{cases}1/4, & t_0\leqslant t<t_0+w,\\ 1/2, & t_0+T/2\leqslant t<t_0+T/2+w,\\ 1/4, & t_0+T\leqslant t<t_0+T+w,\\ 0, & \text{其它}.\end{cases}\tag{5.2}$$

其中，t_0 为序列的起始时间，w 为每个方波的宽度.

如果取控制律

$$\tau=\tilde{\tau}+p_1\ddot{\eta}_1(t),\tag{5.3}$$

其中

$$\tilde{\tau}(t)=\sum_{k=0}^{k_f}U^*(t;kT^*)\bar{U}(t;kT^*,w)\tag{5.4}$$

则是一种包含状态 θ 与 $\dot{\theta}$ 反馈的闭环控制律，k_f 为施加方波组的数目，根据需要而定.

以第 4 节的数学模型为例，采用式(5.4)所示的闭环方波控制序列，$T=10/7\mathrm{s}$，方波宽度 $w=T/2$，采样时间 $T^*=3T/2$. 图 1 给出机动 18 度的仿真结果. 当系统惯量减少 1/3 时，采用同一控制律的仿真曲线如图 2 所示. 可以看出惯量变化前后同一控制器的无余振效果未受影响，而且姿态控制精度也得到保证.

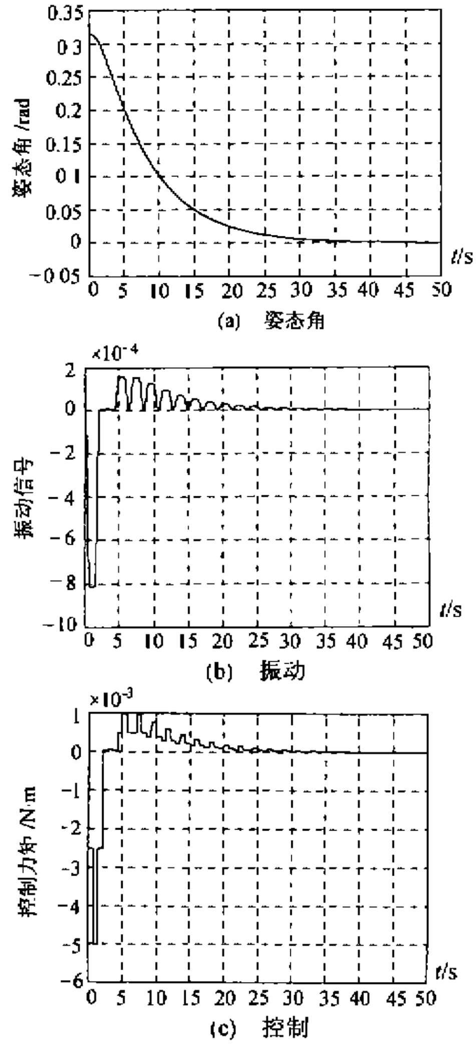
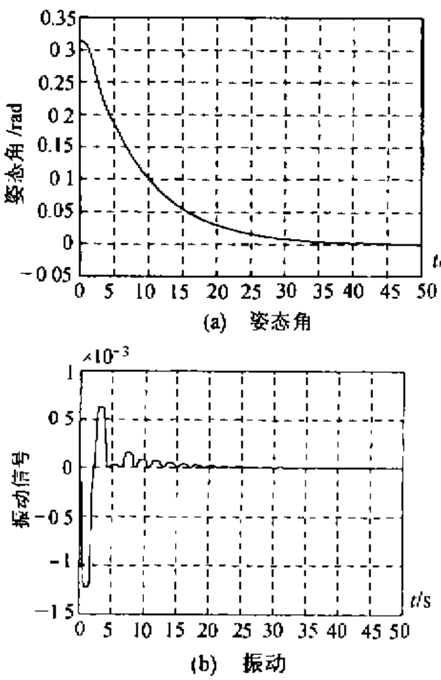
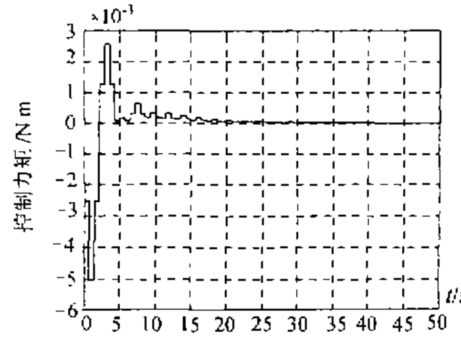


图 1　机动 18 度的仿真结果

Fig. 1　Simulation of 18 degrees maneuvering





(c) 控制

图2 惯量变化后机动18度的仿真结果

Fig 2 Simulation of 18 degrees maneuvering with the changed moment of inertial

从式(5.6)可以看出,上述控制律可以看成是用闭环控制量对方波组幅值的调制,很好地将方波序列控制与闭环控制结合起来;

由于包含了形如式(5.3)的反馈,可以实现姿态角 θ 的任意机动;特别是,当存在系统惯量 J 的不确定性时仍能保证机动任务的实现,过渡过程的品质可以通过比例和微分系数来调整;另外,由于最终的控制量是若干个不同时间和不同幅值的形如式(5.4)方波组的叠加,因而也具有零余振特性;具体实施时,可以设计一个满足控制精度需要的死区,当系统状态进入死区后,则截除控制量,最终维持在一种极限环方式.由于幅值调制思想的采用,振动抑制和机动控制可以分开考虑,为了进一步提高控制品质,闭环控制律和方波组还可以采用其它形式.

6 小结(Summary)

本文参考了"输入成形"方法,将脉冲序列的无余振特性推广到方波序列控制,然后基于幅值调制的思想,把方波序列控制律与PD反馈控制律结合起来,给出了一套闭环方波序列控制方案.该方法不但可以保留了"输入成形"理论上的无余振特性,而且具有对不同机动任务的适应性和对系统惯量不确定性的鲁棒性,为姿态控制和振动抑制的分离设计提供了一种可行的策略.针对空间柔性机械臂的仿真结果表明,该方案设计简单,能够有效用于柔性机械臂的姿态控制和振动抑制,并有可能进一步推广到其它的振动控制问题.

参考文献(References)

[1] Chun Hon M, Truner James D and Juang Jer-Nan Disturbance-accommodating tracking maneuvers of flexible spacecraft [J]. Journal of the Astronautical Sciences, 1998, 33(2): 197-216

[2] Juang Jer-Nan, Turner James D and Chun Hon M Closed-form solutions for feedback control with terminal constraints [J]. Journal of Guidance and Control, 1985, 8(1): 39-43

[3] Smith O J M. Feedback Control Systems [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1958

[4] Singhose William, Derezinske S and Singer N. Extra-insensitive input shapers for controlling flexible spacecraft [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1996, 19(2): 385-391

[5] Singhose William, Seering W and Singer N. Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs [J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(2): 654-658

[6] Singer N and Seering W P. Preshaping command inputs to reduce system vibration [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1990, 112(1): 76-82

[7] Singhose W, Banerjee A and Seering W. Slewing flexible spacecraft with deflection-limiting input shaping [J]. J. of Guidance, Control, and Dynamics, 1997, 20(2): 291-298

[8] Zhang Honghua, Sun Dongchang and Zhang Bing Dynamics and control technology of flexible manipulator [A]. Chinese National Defense Science and Technology Report [R], Beijing: Beijing Institute of Control Engineering, 1999 (in Chinese)

本文作者简介

张 兵 1970年生.1998年获中国空间技术研究院博士学位,现为航天清华卫星技术有限公司高级工程师.主要研究方向为:卫星姿态控制、容错控制,故障检测与诊断,模糊控制,航天控制等.

张洪华 1963年生.1991年毕业于北京航空航天大学,获博士学位.现为中国航天科技集团公司502所高级工程师 主要研究方向为:挠性航天器的动力学与控制,星座动力学与控制和航天控制等.