过驱动并联机器人驱动力矩的特解构造法

闫彩霞 何广平

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191) (北方工业大学 机电工程学院，北京，100041)

陆 震

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

摘 要：以一种平面三自由度过驱动并联机构为研究对象，分析其运动学方程，并采用虚功原理和等效力方法推导了该机构的动力学模型.讨论过驱动机构的容错性，给出了故障前后驱动关节力矩突变的定义.分析过驱动机构逆动力学方程解的不确定性，从提高机构的可靠性以及容错性角度出发，提出一种新的过驱动机构驱动力矩分配思路，以驱动器集可靠度作为系数乘子，采用故障后力矩分配的确定解构造过驱动机构输入力矩的不确定解.将这种方法与传统的力矩分配方法所得到的各关节力矩突变之和进行比较，数据计算结果表明该方法具有更好的容错性能.

关 键 词：过驱动；并联机器人；动力学；容错；可靠性；特解构造法

中图分类号：TP 24

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)06-0725-04

Driving torque special solution constructive approach of redundant actuated manipulator

Yan Caixia

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

He Guangping

(School of Electronics and mechanism, North China University of Technology, Beijing 100041, China)

Lu Zhen

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Taking redundant actuated manipulator with planar 3 degree of freedom as subject investigated, the kinematics model was deduced. Based on the virtual work principle and the equivalent force theory, the dynamic model was built. After the fault tolerant performance of redundant actuated manipulator was discussed, the force abrupt change of driving joint before and after fault occurrence was defined. Furthermore, the uncertainty of redundant actuated manipulator dynamics inverse solution was analyzed. To improve the reliability and fault tolerant performance, a new force allocation approach was brought forward. By taking the reliability of actuator as coefficient multiplier, the uncertain solution was constructed from the certain force allocation solution after failure. The sums of force abrupt change got calculated with traditional approach and this new method were compared. Data simulating result indicates this approach has an outstanding fault tolerant performance.

Key words: redundant actuators; parallel manipulator; dynamics; fault tolerant; reliability; special solution constructive approach

收稿日期：2007-06-06

基金项目：北京市自然科学基金资助项目(3062009)

作者简介：闫彩霞(1978—)，女，内蒙通辽人，博士生，yancx@asee.buaa.edu.cn.

近年来机器人在极限环境如航空、深海、有害材料处理等场合的应用越来越广泛.由于工作环境的特殊以及修理的难度等原因,这类机器人的可靠性显得尤为重要.为提高机器人的工作可靠性,通常尽量延长机器人首次发生故障的时间,同时应提高机器人的容错能力,在机器人发生故障之后仍可继续完成预定的作业任务.

过驱动并联机器人是一类特殊的机器人,这类机构所包含驱动器的个数大于自由度数,这种驱动方式给并联机构带来很多好处,如改善并联机构的运动学性能[1-2]及动力学性能[3-4]、提高结构刚度[5],或者减小能耗等[6].文献[7-8]指出过驱动并联机器人系统具有容错性,文献[9-10]研究了一类过驱动 Stewart 机构的容错设计问题.对于过驱动并联机构,当故障驱动器的数目不多于冗余驱动器的数目,那么机构可能利用剩余正常工作的驱动器完成操作任务[11],因此如何合理的分配故障前后的驱动力矩成为过驱动机构容错的核心问题.

本文针对一类三自由度过驱动机构故障关节自由随动情况提出一种过驱动机构输入力矩分配方法,即采用驱动器集可靠度作为加权乘子,利用故障后输入力矩的确定特解来构造故障前输入力矩不确定解.这种方法对于可靠度比较高的驱动器所分配的权重也比较大,从而尽量提高机构的可靠性,延长机构的首次故障时间.当机构发生驱动器故障,由于过驱动机构的力矩分配最接近工作可靠性最大的容错力矩分配,这就尽量减小故障前后的驱动力矩关节突变,驱动器输出力矩的切换比较容易实现.

1 运动学分析

如图1所示为平面三自由度并联机构,该机构的动平台是一个边长为 l 的正方形,通过4个串联分支与固定机座相连接,每个分支与机座相连的关节处都装有驱动器.设各支链的对应杆长相等,$l_{A_iB_i}=l_1$,$l_{B_iC_i}=l_2$,主动关节的旋转角度为 θ_i,α_i 表示各支链中 b_i 的角度,参考位置为水平方向,运动平台具有三自由度(x,y,φ),机构的运动学模型分析过程参考文献[12],这里概括给出重要结论.由几何约束关系可以推导得到输入、输出速度的关系式:

$$a_i\dot{x}+b_i\dot{y}+c_i\dot{\varphi}=d_i\dot{\theta}_i \tag{1}$$

其中

$$a_i=2\left\{x+l\cos\frac{\pi}{4}\cos\beta_i-x_{A_i}-l_1\cos\theta_i\right\}$$

$$b_i=2\left\{y+l\cos\frac{\pi}{4}\sin\beta_i-y_{A_i}-l_1\sin\theta_i\right\}$$

$$c_i=b_il\cos\frac{\pi}{4}\cos\beta_i-a_il\cos\frac{\pi}{4}\sin\beta_i$$

$$d_i=l(a_i\sin\theta_i-b_i\cos\theta_i)$$

$$\beta_i=\left[(i-1)\ \frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{4}+\varphi\right]$$

$$i=1,2,3,4$$

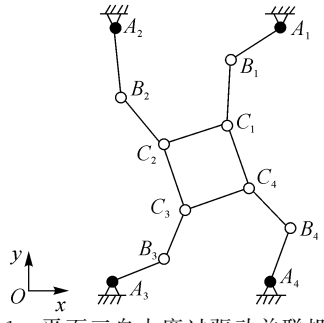


图1 平面三自由度过驱动并联机构

方程(1)可以整理为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}=\boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{X}} \tag{2}$$

其中

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}=[\dot{\theta}_1\quad\dot{\theta}_2\quad\dot{\theta}_3\quad\dot{\theta}_4]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{X}=[x\quad y\quad\varphi]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{D}=[\boldsymbol{D}_1\quad\boldsymbol{D}_2\quad\boldsymbol{D}_3\quad\boldsymbol{D}_4]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{D}_i=[a_i/d_i\quad b_i/d_i\quad c_i/d_i]$$

方程(2)求导可以得到机构的输入、输出加速度之间的映射关系为

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}=\dot{\boldsymbol{D}}\dot{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{D}\ddot{\boldsymbol{X}} \tag{3}$$

2 动力学模型

2.1 过驱动机构的动力学方程

根据惯性力及惯性力矩的定义,平面上构件的惯性力旋量可以表示为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{ine}}=\begin{bmatrix}m & & \\ & m & \\ & & I_z\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{x}\\ \ddot{y}\\ \ddot{A}\end{bmatrix} \tag{4}$$

其中,m 为构件的质量;I_z 为其转动惯量;$\ddot{x}$ 和 $\ddot{y}$ 为构件质量中心的移动加速度;$\ddot{A}$ 为其角加速度.假设图1中各构件质量均匀分布,且回转轴线通过其质心.分析各构件的运动情况,根据方程(4)可求得运动平台的惯性力旋量 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{P}}$.对于连接固定机座的杆件,其上只有惯性力偶,表示为 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{V}i}$.采用等效力方法,将其所受的惯性力旋量等效到输出平台:

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{PV}i}=\boldsymbol{D}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{V}i} \tag{5}$$

由机构的运动学关系,连接运动平台的杆件质心 $C_{\mathrm{W}i}(x_{\mathrm{W}i},y_{\mathrm{W}i})$ 的运动速度可表示为

$$\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{W}i}=\boldsymbol{D}_{\mathrm{W}i}\dot{\boldsymbol{X}} \tag{6}$$

其中,$\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{W}i}=[\dot{x}_{\mathrm{W}i}\quad \dot{y}_{\mathrm{W}i}\quad \dot{\alpha}_i]^{\mathrm{T}}$,可以求得其惯性力旋量 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{W}i}$,具体求解过程可参考文献[13],在输出平台处等效惯性力旋量为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{PW}i}=\boldsymbol{D}_{\mathrm{W}i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{W}i} \tag{7}$$

这样,输出平台处总的等效力矩可以表示为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{P}}+\sum_{i=1}^{4}\boldsymbol{F}_{\mathrm{PV}i}+\sum_{i=1}^{4}F_{\mathrm{PW}i}=\dot{\boldsymbol{M}}\dot{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}} \tag{8}$$

设机构驱动力矩为 $\boldsymbol{T}$,$\boldsymbol{T}=[T_1\quad T_2\quad T_3\quad T_4]^{\mathrm{T}}$,由虚功原理有

$$\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\delta\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\delta\boldsymbol{X} \tag{9}$$

结合方程(2),由达朗伯原理,所有外力包括驱动力及惯性力处于平衡状态,可以得到机构的动力学方程:

$$\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}=\dot{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}} \tag{10}$$

当根据给定的机构输出运动参数求解输入力矩,该方程组包含 3 个方程、4 个变量,因此方程组有无穷多解,这就构成了力矩分配的客观条件.

2.2　故障机构的动力学方程

如图 1 所示的过驱动平面三自由度机构的驱动冗余度为 1,当该机构中有一个驱动器发生故障,原来的驱动支链成为输出负载.由虚功原理:

$$\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}=\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_{i\mathrm{f}} \tag{11}$$

其中,$\boldsymbol{T}_{i\mathrm{f}}$为第 i 个驱动器发生故障的驱动力矩,其第 i 个元素为 0.这样方程(10)中所包含的一组特解方程为

$$\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_{i\mathrm{f}}=\dot{\boldsymbol{M}}\dot{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}} \tag{12}$$

方程(12)也即故障后机构的动力学模型,这里方程数与未知量的数目相等,其逆动力学问题有确定解,因此可以考虑用故障后机构的逆动力学解来构造过驱动机构的逆动力学解.

3　以可靠度为系数的特解构造法

3.1　驱动关节力矩突变定义

容错操作中,为保证操作任务的完成,故障后各驱动关节的输出力矩重新分配,因此各驱动关节的输出力矩在故障瞬间产生变化,为了定量描述这种突变,定义第 i 个驱动器发生故障前后驱动关节 j 的力矩突变为

$$\Delta\boldsymbol{T}_{j,i\mathrm{f}}=|\ \boldsymbol{T}_j-\boldsymbol{T}_{j,i\mathrm{f}}\ | \tag{13}$$

式中,$\boldsymbol{T}_j$ 为过驱动机构驱动关节 j 的力矩;$\boldsymbol{T}_{j,i\mathrm{f}}$为第 i 个驱动器发生故障时驱动关节 j 的力矩.

这种输出力矩突变会对机构造成冲击,影响操作末端的精度.从优化容错性能角度出发,可将减小故障前后主动关节的力矩突变作为过驱动机构的驱动力矩分配依据.分析方程(13)可知减小力矩突变也即使得 $\boldsymbol{T}_j$ 接近 $\boldsymbol{T}_{j,i\mathrm{f}}$,据此引入驱动器的可靠性概念,提出驱动力矩分配的特解构造法.

3.2　可靠度特解构造法

当且仅当一个驱动器发生故障,机构总能继续工作的情况下,假设系统各驱动器的可靠度分别为 $\lambda_i(i=1,2,3,4)$,第 i 个驱动器发生故障,余下 3 个驱动器组成的驱动器集工作的可能性为

$$\tilde{\lambda}_i=(1-\lambda_i)\lambda_m\lambda_n\lambda_j \tag{14}$$

其中,$m,n,i,j\in 1,2,3,4$ 且 $m\neq n\neq j\neq i$,用 $\tilde{\lambda}_i$ 做加权乘子,将考虑系统可靠性和容错性的过驱动机构输入力矩构造为

$$\boldsymbol{T}=\frac{\sum_{i=1}^{4}\tilde{\lambda}_i\boldsymbol{T}_{i\mathrm{f}}}{\sum_{i=1}^{4}\tilde{\lambda}_i} \tag{15}$$

由方程(11),$\boldsymbol{T}_{i\mathrm{f}}$为 $\boldsymbol{T}$ 的特解,可以容易地证明,根据方程(15)所求得的解 $\boldsymbol{T}$ 满足过驱动机构的动力学方程(10).特别地,当 $\lambda_i=0$,则由方程(14)可知包含该驱动器的任意驱动器集工作可能性为零,由方程(15)可计算得到此时的过驱动并联机构力矩分配为 $\boldsymbol{T}=\boldsymbol{T}_{i\mathrm{f}}$,由方程(13)知$\Delta\boldsymbol{T}_{j,i\mathrm{f}}=0(j=1,2,3,4)$.分析特解的数学特征可知,方程(15)中的乘子和特解的个数等参数均可以根据需要进行选择,因此这种特解构造方法可以应用于其他场合.根据可靠度的定义容易理解,如果使得故障前机构的力矩分配尽量靠近工作可能性大的驱动集,那么就可以最大可能地减小故障后各主动关节的输出力矩的波动.

4　数据仿真计算及分析

已知一个结构如图 1 所示机构.输出端运动平台正方形边长 $l=1.5$ mm,$l_1=l_2=1.2$ mm,质量 $m_{\mathrm{P}}=50$ kg,各构件的结构参数如表 1 所示.

表 1　机构结构参数

i	m_{Vi}/kg	m_{Wi}/kg	x_{A_i}/mm	y_{A_i}/mm	λ_i
1	5	5	2	1.5	0.30
2	5	5	0	1.5	0.95
3	5	5	0	−0.5	0.95
4	5	5	2	−0.5	0.95

注:m_{vi},m_{wi}分别表示连接固定机座的杆件和连接运动平台杆件的质量;x_{A_v},y_{A_i}为连接机座关节的横、纵坐标.

已知输出端的位置变化规律:$x=0.5\sin(2\pi t)$,$y=0.25$,平台的旋转角度为 $\varphi=\frac{\pi}{3}$.当位于第 1 分支的驱动器发生故障,故障后驱动

器集的输入力矩 $\boldsymbol{T}_{1f}=[0 \quad T_{2,1f} \quad T_{3,1f} \quad T_{4,1f}]^{T}$，其工作的可能性为 $\tilde{\lambda}_1=(1-\lambda_1)\cdot\lambda_2\cdot\lambda_3\cdot\lambda_4$.

根据方程(12)可计算得到某一驱动器故障后各驱动关节的力矩分配情况，图2给出了第1分支驱动器故障后各驱动关节的力矩分配情况.

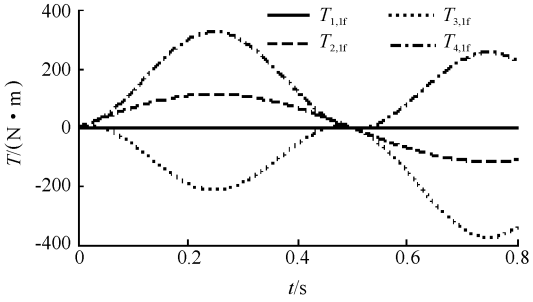


图2 第1分支驱动器故障的力矩分配

传统的过驱动机构的力矩分配方法是从减小输出力矩的角度出发，选择平方和最小的那一组解作为输出力矩，得到的力矩分配情况如图3.

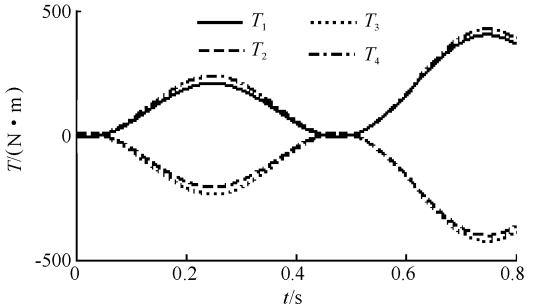


图3 传统最小平方和方法力矩分配

采用可靠性特解构造法，由方程(15)计算得到的过驱动机构的力矩分配情况如图4所示.

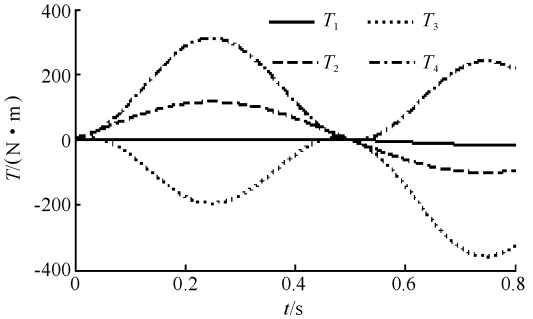


图4 可靠度特解构造法力矩分配

从图4可以看出，由于第一分支驱动器的可靠度最低，特解构造法所选择的 $\boldsymbol{T}_{1f}$ 权系数最大，得到的各驱动关节力矩分配情况非常接近图2所示的力矩分配情况，可见选择这种方法进行力矩分配后，故障前的力矩分配最接近工作可能性大的驱动集合力矩分配，因此故障后的力矩突变量较小.

计算任意一个驱动器发生故障后各驱动力矩的突变，比较结果表明各驱动器发生故障时特解构造法所得的力矩突变始终小于传统方法. 在实际的工作中每个驱动器都有故障的可能性，计算各驱动器分别发生故障的各驱动力矩的突变之和 $\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{4}\Delta\boldsymbol{T}_{j,if}$，图5给出两种方法的比较结果.

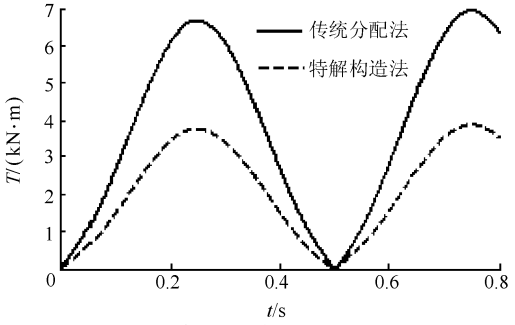


图5 各驱动关节力矩突变之和

从图5中可以看出，特解构造法所得到的故障发生前后主动关节的驱动力矩突变之和较小. 这说明所提出的力矩分配方法对可靠度大的驱动集选择较大的权系数，有效地延长系统的寿命并显著地改善了机构的容错性能.

5 结束语

由于冗余驱动器的存在，过驱动机构的力矩分配问题的解是不确定的. 常见的解决这个问题的方法是构造某优化目标函数来进行力矩分配. 为提高系统的可靠性和容错性，提出一种由确定解的组合来构造不确定解的思想，结合驱动器可靠度的概念，采用驱动集可靠度做加权系数乘子，组合得到过驱动力矩分配. 以平面三自由度过驱动机构力矩分配为实例，与传统的力矩分配方法进行比较，说明了所提出方法在改善容错性能方面的优越性.

参考文献（References）

[1] Liu G F, Lou Y J, Li Z X. Singularities of parallel manipulators: a geometric treatment[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 2003, 19(4): 579－594

[2] 白志富，韩先国，陈五一. 基于冗余驱动的大姿态角并联机构优化设计[J]. 北京航空航天大学学报，2006，32(17)：856－859

Bai Zhifu, Han Xianguo, ChenWuyi. Optimal design of parallel mechanisms with large tilting ability based on redundant actuation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(17): 856－859(in Chinese)

(下转第733页)