基于驱动或结构冗余的并联机器人容错方法

闫彩霞 战 强 陆 震

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191) (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：研究了并联机器人利用驱动冗余进行驱动器故障容错及利用结构冗余进行关节故障容错的方法.结合冗余驱动并联机构的力矩分配问题的多解性,分析了部分驱动器故障后在剩余正常工作驱动器之间重新分配驱动力矩以实现容错的方法.结合结构冗余并联机构的特点,分析了放弃部分结构自由度以完成操作任务的方法.从运动学和动力学角度讨论了两类冗余机器人的特点及容错的可能性,以一种平面三自由度并联机构为实例,针对驱动器及关节故障分别分析了故障后机构运动学和动力学性能的变化,验证了采用驱动及结构的冗余进行容错的可行性.

关 键 词：并联机器人；冗余驱动；结构冗余；容错

中图分类号：TP 24

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)12-1407-05

Fault tolerance of parallel manipulator with actuation or structure redundancy

Yan Caixia Zhan Qiang

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

Lu Zhen

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

Abstract: The fault tolerance approaches for actuator fault of parallel manipulator by using actuator redundancy were researched and the fault tolerance approaches with structure redundancy for the joint fault of parallel manipulator were discussed. According to the multiplicity of torque distribution in redundant actuated parallel manipulator, after partial actuator fault happens, the torque re-distribution among remaining working actuators was analyzed to realize fault tolerance. Considering the character of redundant structure parallel manipulator, the way to ensure the completion of task by aborting some structure freedoms was further studied. From kinematic and dynamic perspectives, the character and fault tolerance feasibility of the two types of redundant manipulators were presented. Taking 3-DOF planar parallel manipulator as an example, the kinematic and dynamic performance change of actuator and joint faulted manipulator was respectively stated. Furthermore, data simulating result indicates the feasibility of the fault tolerance with actuator and structure redundancy of parallel manipulator.

Key words: parallel manipulator; redundant actuators; redundant structure; fault tolerant

随着机器人广泛应用于特殊场合,机器人的容错能力成为一项非常重要的指标.驱动器和关节是机器人的故障多发部件,驱动器或关节的故障都会大幅度降低机器人的工作能力或导致机器人无法工作,因此针对这两类故障的容错研究十分必要.本文研究并联机器人采用驱动冗余进行驱动器故障容错及采用结构冗余进行关节故障容错的方法.

收稿日期：2009-11-05

基金项目：国际科技合作计划资助项目 (2008DFA81280)

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

令并联机器人的任务自由度为 N_1，结构自由度为 N_2，输入变量数目为 N_3，当 $N_3=N_2>N_1$ 时，称这种形式的冗余为结构冗余；当 $N_3>N_2=N_1$ 时，称这种形式的冗余为驱动冗余. 最具有普遍意义的冗余度并联机器人应满足 $N_3>N_2>N_1$，由于结构复杂，目前这类机构的研究还很少[1].

驱动冗余并联机器人有两种构成方式[2]，本文考虑在原并联机构增加一个串联分支而引入驱动冗余的类型. 由于冗余驱动器的存在，当故障驱动器的数目不多于冗余驱动器的数目，故障后重新合理分配驱动力矩是可以实现容错的[3]. 文献[4－5]指出冗余驱动并联机器人系统具有容错性，但未对具体问题进行研究. 文献[6－7]从考虑机构的容错性角度分析了一类平面二自由度冗余驱动机构的驱动力矩分配问题，通过合理的分配故障前冗余驱动机构的力矩，可以改善机构的容错性能[8].

结构冗余即机器人所拥有的自由度的数目多于任务空间的维数，也称为运动学冗余. 对某一任务是非结构冗余的并联机器人，对另外的任务可能是结构冗余的. 由于其自由度大于完成操作所必需的最小自由度，因此可以对引起机构自由度降低的故障进行容错，如关节锁定故障等. 文献[9－10]将并联机器人的故障分为3种类型：位置失效、力矩失效和确定失效，并研究了一类冗余驱动Stewart机构的容错设计问题，其中位置失效的容错本质上即采用结构冗余实现.

本文从运动学和动力学两方面探讨驱动冗余及结构冗余并联机器人的特点，分析这两类特殊的并联机器人的容错能力.

1 两类冗余机构运动学与动力学

1.1 运动学分析

为进行两类冗余并联机构容错方法的研究，有必要分析其运动学和动力学问题的特性. 假设并联机器人包含 n 个并联支链，每个支链中与基座相连的关节为驱动关节，机构的结构自由度数目为 m，工作空间的维数为 e. 令 $\boldsymbol{X}$ 为 $e\times1$ 向量描述输出变量，$\boldsymbol{\theta}$ 为 $n\times1$ 向量，描述输入变量，并联机构的运动约束方程一般形式为

$$F(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\theta})=\boldsymbol{0} \tag{1}$$

对式(1)两边关于时间求微分，可以得到主动驱动关节的广义速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ 与末端输出速度 $\dot{\boldsymbol{X}}$ 之间的关系为

$$\boldsymbol{J}_x\dot{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{J}_\theta\dot{\boldsymbol{\theta}}=\boldsymbol{0} \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{J}_x=\dfrac{\partial F(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\theta})}{\partial\boldsymbol{X}}$；$\boldsymbol{J}_\theta=\dfrac{\partial F(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\theta})}{\partial\boldsymbol{\theta}}$. 由式(2)，一般情况下，并联机构的速度Jacobian矩阵可以表示成

$$\boldsymbol{J}=\boldsymbol{J}_x^{-1}\boldsymbol{J}_\theta \tag{3}$$

对于冗余驱动并联机构，$n>m=e$，因此 $\boldsymbol{J}_x$ 的维数为 $n\times e$，非方阵，而矩阵 $\boldsymbol{J}_\theta$ 为方阵. 因此对于驱动冗余并联机构，在非奇异位形，整理式(2)可以得到全部 n 个主动驱动关节的广义速度与末端输出速度之间的关系为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}=\boldsymbol{G}\dot{\boldsymbol{X}} \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{G}=\boldsymbol{J}_\theta^{-1}\boldsymbol{J}_x$ 为 $n\times e$ 维矩阵，是逆速度Jacobian矩阵. 式(4)中当 $e<n$ 时，机构的运动学逆解的求解方法简单直观. 而求解机构的运动学正解时，各输入变量满足一定的相容条件时才能求解，即在冗余驱动并联机构中，各输入之间要协调，以实现要求的运动.

对于结构冗余并联机构，$n=m>e$，假设有 l 个冗余自由度，将机构的输入 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ 分解为 $[\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{w}}^{\mathrm{T}}\quad\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，输出分解为 $\dot{\boldsymbol{X}}=[\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{w}}\quad\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{r}}]^{\mathrm{T}}$，其中 $\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{w}}$ 表示操作自由度方向对应的关节速度，$\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{r}}$ 表示冗余的 l 个自由度方向上的速度. 式(4)中 $\boldsymbol{G}=[\boldsymbol{G}_{\mathrm{w}}\quad\boldsymbol{G}_{\mathrm{r}}]$，机构的广义输入速度与末端输出速度之间的关系为

$$[\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{w}}^{\mathrm{T}}\quad\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{G}_{\mathrm{w}}\quad\boldsymbol{G}_{\mathrm{r}}][\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{w}}\quad\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{r}}]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

由式(5)可容易求解机构的运动学正解，在求解机构的运动学反解时，可根据工况确定冗余部分自由度方向上的运动来进行求解.

1.2 动力学分析

将机构中的某些被动关节拆开，变成串联机构，并假设拆分后机构的所有关节都被驱动，机构动力学方程可以表示为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{\theta}}+\boldsymbol{N}=\boldsymbol{T} \tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{\theta}$ 表示独立的广义坐标；$\boldsymbol{M}$ 表示惯性矩阵；$\boldsymbol{C}$ 表示歌氏力和离心力；$\boldsymbol{N}$ 表示重力以及其他的力；$\boldsymbol{T}$ 表示关节的驱动力. 并联机构部分关节 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{a}}$ 是驱动关节，其他的 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{p}}$ 为被动关节，由 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{p}}=\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{p}}(\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{a}})$，有

$$\delta\boldsymbol{\theta}=[\delta\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{a}}\quad\delta\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{p}}]=[\boldsymbol{J}_{\mathrm{a}}\quad\boldsymbol{J}_{\mathrm{p}}]^{\mathrm{T}}\delta\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{a}}=\boldsymbol{W}\delta\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{a}} \tag{7}$$

根据达朗伯原理和虚功原理，将拆分的串联机构与原并联机构等效，这里被动关节的驱动力矩为 $\boldsymbol{0}$，有

$$\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\delta\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\delta\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{a}} \tag{8}$$

将式(7)代入式(8)可以得到拆分的串联机构的驱动力矩 $\boldsymbol{T}$ 与原并联机构驱动力矩 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}}$ 之间的关系，将式(6)左乘 $\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}$，并结合式(8)可以得到：

$$\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{\theta}}+\boldsymbol{N})=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}} \tag{9}$$

式(9)即为并联机构的动力学方程,当机构是冗余驱动的,结合式(4)将关节角坐标转换为直角坐标,可整理得到:

$$\tilde{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{X}}+\tilde{\boldsymbol{C}}\dot{\boldsymbol{X}}+\tilde{\boldsymbol{N}}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}} \tag{10}$$

其中,$\tilde{\boldsymbol{M}}=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{W}$,$\tilde{\boldsymbol{C}}=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{W}}+\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{W}$;$\tilde{\boldsymbol{N}}=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}$. 显然,该方程组的左边包含有 e 个独立关节参数,方程的右边包含有 n 个驱动力矩,因此在逆动力学问题 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}}$ 的求解过程中有无穷多解,这就为部分驱动器故障后力矩重新分配以补偿故障驱动器带来的影响提供了理论基础.

2　两类故障容错的运动学分析

2.1　驱动器故障容错的运动学分析

在机器人的操作过程中,软件或硬件的故障往往表现为驱动器的故障,如驱动器突然失控、输出能力下降或者驱动器停车等形式. 对于并联机器人,驱动器发生故障时最可靠的解决方式是将故障驱动器隔离,即对发生故障的驱动器断电,故障驱动器所在关节由主动关节变为被动关节,不再有驱动力输出. 由于冗余驱动并联机构的特殊性,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. 由于冗余驱动并联机器人的驱动器大都安装在基座上,因此将故障驱动器隔离容易实现.

假设有 k 个驱动器出现故障,这样式(4)中 $\boldsymbol{\theta}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{a}}\\ \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{n}}\end{bmatrix}$,这里 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{n}}$ 为故障关节,$\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{a}}$ 为故障后主动关节向量. 故障发生后,故障的主动关节变为被动关节,因此 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{n}}$ 成为被动关节不再包含在运动模型之内,将 $\boldsymbol{G}$ 分解得到 $\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{G}_{\mathrm{af}}\\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\end{bmatrix}$,原来的式(4)描述的运动学关系转变为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{a}}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{af}}\dot{\boldsymbol{X}} \tag{11}$$

其中,$\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}$ 是 $\boldsymbol{G}$ 的最后 k 行;$\boldsymbol{G}_{\mathrm{af}}$ 是 $\boldsymbol{G}$ 剩余正常工作部分对应的行. 式(11)即故障后机构的运动学方程,如果 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{af}}$ 有列满置矩阵,那么 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{n}}$ 可以由 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{a}}$ 唯一确定,这样对驱动器故障可以容错. 如果隔离部分驱动器后 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{af}}$ 仍为行满秩矩阵,即机构仍然是冗余驱动的.

2.2　关节故障容错的运动学分析

故障关节锁定后,该关节两端所联接的构件等效为一个新的构件,结构自由度减少. 由于结构冗余并联机器人的自由度大于完成操作任务所需的最少自由度,因此对这类故障可能容错. 假设并联机构有 k 个主动关节发生故障,将故障前机构的驱动力矩 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{a}}$ 分解为$[\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{wa}}^{\mathrm{T}}\quad\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{fa}}^{\mathrm{T}}]$,其中 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{wa}}$ 为正常工作的主动关节所对应的关节速度,而 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{fa}}=[0]_{k\times 1}$ 为故障关节的速度,相应地输出速度分解为 $\dot{\boldsymbol{X}}=[\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{wa}}^{\mathrm{T}}\quad\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{fa}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$,故障关节处的约束可表示为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{fa}}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{wa}}\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{wa}}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{0} \tag{12}$$

由于式(12)的约束,$\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{f}}$ 各分量不再是完全独立于 $\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{wa}}$ 的,即机构的结构自由度减少. 结合式(5)与式(12),可整理得到新的运动学模型为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{wa}}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{new}}\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{wa}} \tag{13}$$

其中,$\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{wa}}$ 为 $\dot{\boldsymbol{X}}$ 中去除非独立的分量而得到;$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{wa}}$ 为 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ 中去除非独立的分量而得到;$\boldsymbol{G}_{\mathrm{new}}$ 为故障后机构的逆速度 Jacobian 矩阵. 当故障关节的数目小于结构自由度冗余的数目,则故障后机构仍然是结构冗余的. 而即使对于非结构冗余的并联机构,当部分关节出现故障并锁定,可以选择必需的自由度,利用式(13)降低操作质量或将机构引导至安全位姿从而减小对工作环境或操作人员的伤害. 故障关节为被动关节时,其运动学分析过程类似.

3　两类故障容错的动力学分析

3.1　驱动器故障容错的动力学分析

将故障驱动器隔离后,由剩余的正常工作的驱动器来弥补隔离故障驱动器的影响,重新分配驱动力矩,以保证操作任务的完成. 结合式(10)故障发生后机构动力学模型容易得到:

$$\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{f}}=\tilde{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{X}}+\dot{\tilde{\boldsymbol{C}}}\dot{\boldsymbol{X}}+\tilde{\boldsymbol{N}} \tag{14}$$

这里 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{f}}$ 为 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}}$ 中故障驱动器所对应的输出力矩为零所得到的向量,不失一般性将 $\boldsymbol{G}$ 整理为$[\boldsymbol{G}_{\mathrm{new}}\quad\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}]$,其中 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}$ 对应 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{f}}$ 中的零向量. 当故障驱动器数目等于驱动冗余数目,$\boldsymbol{G}_{\mathrm{new}}$ 为方阵,此时剩余的正常工作的驱动力矩为确定解:

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{new}}=(\boldsymbol{G}_{\mathrm{new}}^{\mathrm{T}})^{-1}(\tilde{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{X}}+\tilde{\boldsymbol{C}}\dot{\boldsymbol{X}}+\tilde{\boldsymbol{N}}) \tag{15}$$

所以,这种容错类型的输入力矩可以整理为$[\boldsymbol{T}_{\mathrm{new}}\quad\boldsymbol{0}]^{\mathrm{T}}$,其中的 $\boldsymbol{0}$ 为发生故障被隔离的 k 个驱动器所对应的 $k\times 1$ 维零向量.

3.2　关节故障容错的动力学分析

故障关节锁定后,机构在新增约束的限制下继续运动,如果锁定关节为主动关节,故障关节所在分支变为机构的一个负载分支,如锁定关节为

被动关节,则故障前后驱动器数目不变.故障后机构的动力学方程类似式(10)可表示为

$$\boldsymbol{G}_{\text{new}}^{\text{T}}\boldsymbol{T}_{\text{f}}=\boldsymbol{M}_{\text{new}}\ddot{\boldsymbol{X}}_{\text{new}}+\boldsymbol{C}_{\text{new}}\dot{\boldsymbol{X}}_{\text{new}}+\tilde{\boldsymbol{N}}_{\text{new}} \quad (16)$$

其中,$\boldsymbol{T}_{\text{f}}$ 为锁定故障关节后的输出力矩向量;$\boldsymbol{M}_{\text{new}}$为故障后机构的惯性力矩,被锁定关节连接的两个杆件等效为一个新的杆件;类似地 $\boldsymbol{C}_{\text{new}}$为故障后机构的歌氏力和离心力;$\boldsymbol{N}_{\text{new}}$为重力以及其他的力;$\boldsymbol{X}_{\text{new}}$为故障后机构末端操作器位姿.

4 数据仿真与分析

4.1 基于结构冗余容错的运动学仿真

图1所示为平面三自由度4RRR并联机构,每个分支与机座相连的关节处都装有驱动器.

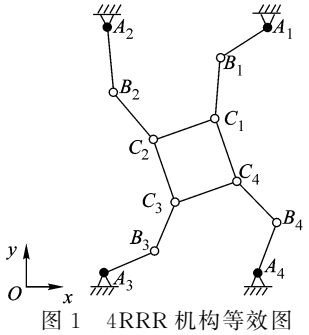

图1 4RRR机构等效图

输出端运动平台边长 $l=15$ mm,质量 $m=50$ kg,杆件 A_iB_i 记为 V_i,杆件 B_iC_i 记为 W_i,结构参数如表1所示.机构的运动学、动力学分析过程可参考文献[11].

表1 机构结构参数

i	l_{V_i}/mm	l_{W_i}/mm	m_{V_i}/kg	m_{W_i}/kg	x_{A_i}/mm	y_{A_i}/mm
1	12	12	5	5	2	1.5
2	12	12	5	5	0	1.5
3	12	12	5	5	0	−0.5
4	12	12	5	5	2	−0.5

输出端的位置变化规律给定:$x=0.5+0.5\sin t$,$y=0.25$,机构的结构自由度为3,任务自由度为2,此时机构结构冗余度为1.取平台的旋转角度为 $\phi=\dfrac{\pi}{3}$,则0.8 s内机构的运动位形图如图2所示.

假设运行到0.5 s,驱动器4所在关节发生故障,将其锁定,锁定角度为 $\theta_4\equiv\overline{\theta}_4$,$\overline{\theta}_4$ 为一常数.舍弃冗余的结构自由度即角度自由度,结构的位形如图3所示.

从图3可以看出,虽然故障关节4锁定,但是由于机构具有结构冗余度,机构仍可以完成操作任务.因此在发生关节故障后,为保证机构继续工作或者恢复到安全的位置,可以考虑放弃操作要求的某些方向自由度,实现容错或者将机构放置到安全位置.

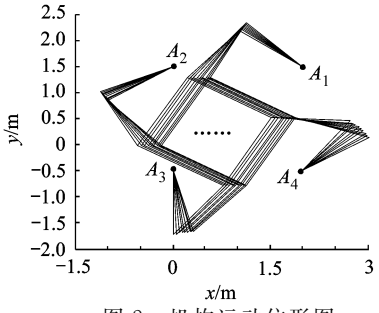

图2 机构运动位形图

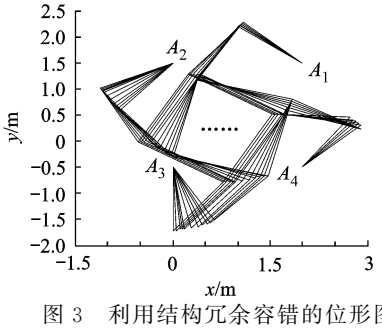

图3 利用结构冗余容错的位形图

4.2 基于驱动冗余容错的动力学仿真

当机构输出端的位置变化规律为:$x=0.5\cdot\sin(2\pi t)$,$y=0.28$,$\phi=\dfrac{\pi}{3}$,此时机构的驱动冗余度为1.由第1.1节中的运动学分析可以很容易的求出输入与输出的速度及加速度之间的映射关系,结合第1.2节中动力学分析过程,各驱动器的力矩分配采用伪逆方法,如图4所示.

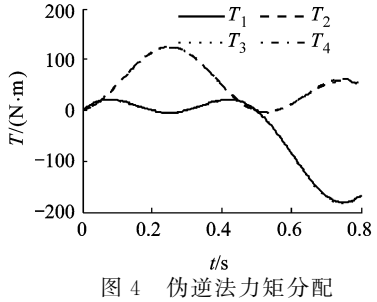

图4 伪逆法力矩分配

假设在 $t=0.2$ s时驱动器1在工作过程中发生故障,将其隔离,所以故障后机构的力传递矩阵 $\boldsymbol{G}$ 去掉故障驱动器1所对应的列所得,是一个可逆方阵.各驱动器的力矩分配如图5所示.

从图5可以看出,在驱动器1发生故障后,重新分配剩余正常工作的驱动器的驱动力矩,可以补偿驱故障驱动器的影响,完成操作任务.

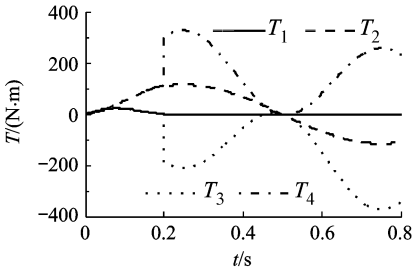

图 5　利用驱动冗余容错的力矩分配

5　结　论

本文研究了并联机构的故障容错问题，对驱动器故障及关节故障的容错方法进行了理论探讨. 提出了利用冗余驱动并联机构的力矩分配问题的多解性进行驱动器故障容错的方法，本质上这类容错即故障后在剩余正常工作驱动器之间重新分配驱动力矩以弥补故障驱动器的影响. 分析了利用结构冗余进行并联机构关节故障容错的方法，本质上这种容错是以放弃机构结构自由度的代价实现的. 以平面三自由度并联机构为例，从运动学和动力学两方面探讨了利用驱动冗余进行驱动器故障和利用结构冗余进行关节故障容错的可行性.

参考文献（References）

[1] 蔡胜利，白师贤. 3-SRS 型带冗余度并联机器人的运动学分析[J]. 北京工业大学学报，1995，21(4)：97－102
Cai Shengli，Bai Shixian. Kinematics of a 3-SRS redundant parallel manipulator[J]. Journal of Beijing Polytechnic University，1995，21(4)：97－102(in Chinese)

[2] 蔡胜利，白师贤. 冗余驱动的平面并联操作手的输入力优化[J]. 北京工业大学学报，1997，23(2)：37－41
Cai Shengli，Bai Shixian. Optimization of actuating forces of redundantly actuated planar parallel manipulator[J]. Journal of Beijing Polytechnic University，1997，23(2)：37－41(in Chinese)

[3] Yan Caixia，Lu Zhen. Research on features of faulting redundant actuation manipulator[C]//Proceedings of SPIE International Conference on Instrumentation and Control Technology. Beijing：SPIE，2006：635758

[4] Liu G F，Wu Y L. Analysis and control of redundant parallel manipulator[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul：ROBOT，2001：3748－3754

[5] Cheng H，Yiu Y K，Li Z X. Dynamics and control of redundantly actuated parallel manipulators[J]. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics，2003，8(4)：483－491

[6] Yan Caixia，He Guangping. Over-actuated parallel manipulator fault tolerant control based on minimum difference oriented smooth transition method[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin：IEEE Robotics and Automation Society，2007：1817－1821

[7] 闫彩霞，何广平，陆震. 考虑容错的平面二自由度过驱动机构力矩分配[J]. 北京航空航天大学学报，2008，34(2)：244－248
Yan Caixia，He Guangping，Lu Zhen. Force distribution of plane 2-DOF overactuated parallel manipulator with fault tolerance[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2008，34(2)：244－248(in Chinese)

[8] 闫彩霞，闫楚良，陆震. 基于加权矩阵的过驱动并联机构驱动力矩调节法[J]. 吉林大学学报：工学版，2008，38(5)：1215－1219
Yan Caixia，Yan Chuliang，Lu Zhen. An approach to coordinate driving torque of redundant actuated parallel manipulator based on weighted matrix[J]. Journal of Jilin University：Engineering and Technology Edition，2008，38(5)：1215－1219(in Chinese)

[9] Yi Y，McInroy J E，Chen Yixin. Fault tolerance of parallel manipulators using task space and kinematic redundancy[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation，2006，22(5)：1017－1021

[10] Yong Y. Fault tolerant N-DOF gough-stewart platforms：kinematics，dynamics，and design[D]. Wyoming：Department of Electrical and Computer Engineering，University of Wyoming，2005

[11] 闫彩霞，何广平，陆震. 过驱动并联机器人驱动力矩的特解构造法[J]. 北京航空航天大学学报，2008，34(6)：725－728
Yan Caixia，He Guangping，Lu Zhen. Driving torque special solution constructive approach of redundant actuated manipulator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2008，34(6)：725－728(in Chinese)

（编　辑：文丽芳）