

多机械手协同系统的动载协调数值仿真研究*

赵永生 任敬轶 赵铁石 黄真
(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

摘 要 应用数值分析方法,对两个 PUMA 机械手协同操作同一物体的情况,进行了系统动载在关节空间的最优协调分配的仿真研究,研究结果验证了理论分析的正确性。

关键词 多机械手 协调 动载 最优分配

1 引 言

近十几年来,在机器人研究领域,多个开链机构共同协调操作引起了人们越来越多的注意(例如,步行机、多指机械手以及多机械手协同操作,有时它们也被称作多机器人机构)。这样的系统构成了多个闭合的运动链,而且存在超确定输入^[1](也称之为冗余驱动)。由于在各个操作机构之间存在的运动约束,使得这些闭合运动链的各个关节之间产生了新的动力耦合。同时由于系统存在超确定输入,我们可以有无穷多组输入能够满足系统给定的运动。对多机械手协调系统的建模、动载最优协调分配等问题,我们在文献[2]中已作过一定的讨论。本文选用较常见的 PUMA 机械手,应用数值分析方法研究了两机械手协同操纵一重物时,系统动载在关节空间最优协调分配的情况。

2 系统的动载协调分配模型

应用虚位移原理, L 个多机械手协调系统的动力学模型为^[2]:

$$\tau_q = [J_q^0]^T D(\theta) + [J_q^0]^T P - [J_q^{0K}]^T \tau_K \quad (1)$$

* 国家自然科学基金和中科院机器人学开放研究实验室资助

收稿日期: 1998- 12- 30

修稿日期: 1999- 01- 26

式中, $[J_q^0]^T = [[J_q^{01}]^T, [J_q^{02}]^T, \dots, [J_q^{0L}]^T]$, $\{[J_q^{0i}], i = 1, 2, \dots, L\}$ 表示广义坐标向各机械手关节空间映射的雅可比矩阵。 $D(\theta) = [D_1^T(\theta_1), D_2^T(\theta_2), \dots, D_L^T(\theta_L)]^T$, $D_i(\theta_i) = [M_i(\theta_i)] \ddot{\theta}_i + \theta_i^T [N_i(\theta_i)] \dot{\theta}_i + g_i(\theta_i)$ 这里是第 i 个操作臂的动载。 $[J_q^u]$ 表示广义坐标向目标坐标系映射的雅可比矩阵。 $[J_q^K]$ 表示由广义坐标向非广义坐标映射的雅可比矩阵。 P 为被操纵物体的动载, τ_q 为系统广义关节坐标的驱动力矩列向量, τ_0^K 为系统非广义关节坐标的驱动力矩列向量。 该动力学模型直接建立了由目标空间向关节空间的动力学映射, 而且在该模型中包含了系统的关节驱动力矩, 物体的动载, 系统中每个分支的动载。

系统关节输入力矩加权平方和的表达式为

$$f_{obj} = \left[[W] \begin{Bmatrix} \tau_q \\ \tau_0^K \end{Bmatrix} \right]^2 = \left[[W_q] \tau_q \right]^2 + \left[W_0^K \right] \tau_0^K \right]^2 \quad (2)$$

这里 $[W]$ 是对角加权矩阵

$$[W] = \begin{bmatrix} [W_q] & 0 \\ 0 & [W_0^K] \end{bmatrix}$$

当加权矩阵 $[W]$ ($[W_q]$, $[W_0^K]$) 为单位阵和由相应关节速度平方组成的对角矩阵时, 式(2)分别表示系统瞬时输入力矩的平方和及瞬时输入功率的平方和。

将式(1)代入(2)中得

$$f_{obj} = \left\{ [W_q] \left([J_q^0]^T D(\theta) + [J_q^u]^T P - [J_q^{0K}]^T \tau_0^K \right) \right\}^T \cdot \left([W_q] \left([J_q^0]^T D(\theta) + [J_q^u]^T P - [J_q^{0K}]^T \tau_0^K \right) \right) + \left([W_0^K] \tau_0^K \right)^T \left([W_0^K] \tau_0^K \right) \quad (3)$$

由式(3)推导出的系统动载在关节空间的加权最优分配表达式为

$$\left\{ \tau_0^K \right\}_{opt} = \left([J_q^{0K}] [W_q]^T [W_q] [J_q^{0K}]^T + [W_0^K]^T [W_0^K] \right)^{-1} \cdot [J_q^{0K}] [W_q]^T [W_q] \left([J_q^0]^T D(\theta) + [J_q^u]^T P \right) \quad (4)$$

这里 $[W_q]$ 和 $[W_0^K]$ 是两个对角的加权矩阵。 将式(4)的值代入到式(1)中, 可得 $\{ \tau_q \}_{opt}$ 。 通过改变加权矩阵中各项的值, 可对 $\{ \tau_0^K \}_{opt}$ 和 $\{ \tau_q \}_{opt}$ 的值进行调整。 例如当我们取 $[W_q]$ 和 $[W_0^K]$ 的各项是与 τ_q 和 τ_0^K 相对应关节处的铰链速度平方时, 这个输入力矩的分配表达式对应于系统瞬时输入功率的最小平方和。

3 数值研究分析

研究分析的例子是一个双手协调操作系统, 它所用的机器人是两个 PUMA262 型机器人(其结构参数如表 1 所示), 它们的摆放位置如图 1 所示。 被操纵的物体是一个实心圆盘, 其半径为 180mm,

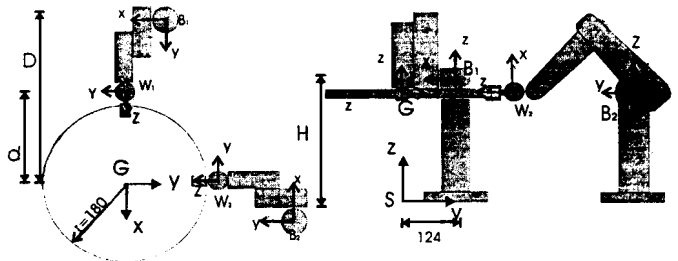


Fig. 1 Two PUMA262 cooperating manipulators system

厚度为 10mm, 密度为 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。每个机器人的抓手和物体之间我们认为是刚性抓取无相对滑动。为了简便的原因, 物体的运动轨迹是通过在关节空间进行插值得到的。

Tab. 1 Mechanism parameters of PUMA262 manipulator

linkage	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i	joint rotating
i	(mm)	($^\circ$)	(mm)	($^\circ$)	range($^\circ$)
1	0	0	0	90	308
2	0	-90	73	0	314
3	198.1	0	51	-90	292
4	19.1	-90	203	0	578
5	0	90	0	0	244
6	0	-90	0	0	534

在本例中物体的起点和终点位置用从固连于物体的坐标系到基坐标系之间的转换矩阵来表示:

$$\text{起点: } \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 547.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{终点: } \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & 1 & 0 & -100 \\ 0 & 0 & 1 & 350 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中前三行三列描述了物体的姿态, 最后一列描述了物体在基坐标系上的位置。从起点到终点物体运动的时间为 10s。为了简化计算过程, 在这里我们忽略了系统的等效惯(质)量, 同时为了减少这种简化所带来的误差, 我们适当地降低了物体的运动速度和加速度。

当我们分别取加权矩阵 $[W]$ ($[W_q]$, $[W_0^k]$) 为单位阵和由相应关节速度平方组成的对角矩阵时, 将会得到二种不同的分配结果, 相应的分配原则我们称之为瞬时输入力矩最小原则和瞬时输入功率最小原则。图 2 到图 13 显示了在两种分配方式下各个关节在运动轨迹的各点处瞬时输入力矩的大小。从这十二个图表中我们能够明显看出, 运用瞬时输入力矩最小原则在大部分时间里的确降低了各个关节的输入力矩。在前 6 个图中还加入了一个和操作臂 1 处于相同位置的单臂机器人夹持该物体沿相同轨迹运动时各关节输入力矩随时间变化的曲线。从中可以看出在大多数情况下, 运用两个机器人搬运重物时各关节所需要的力矩要比只用单个机器人相应关节所需力矩小得多, 有时还不止两倍。这样不仅防止了各关节驱动装置的过载, 而且它也使系统的整体承载能力得到成倍增长。

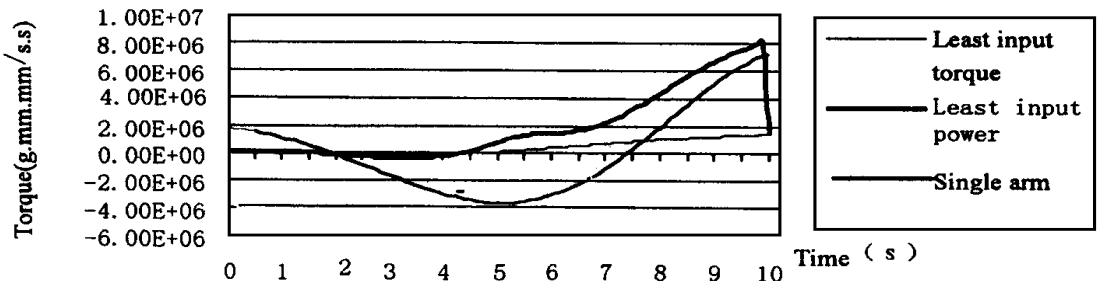


Fig. 2 1st joint torque of master arm

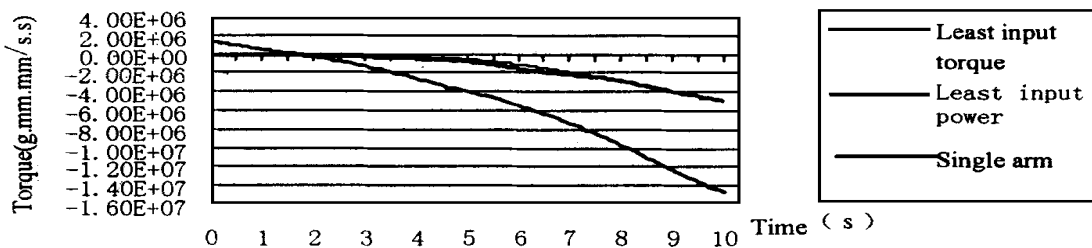


Fig. 3 2nd joint torque of master arm

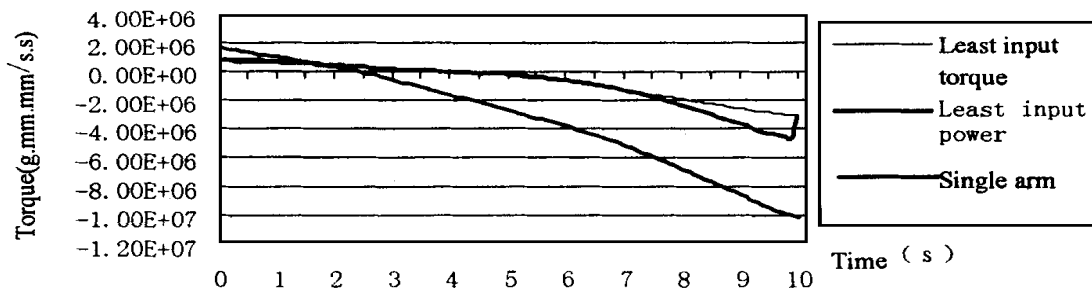


Fig. 4 3rd joint torque of master arm

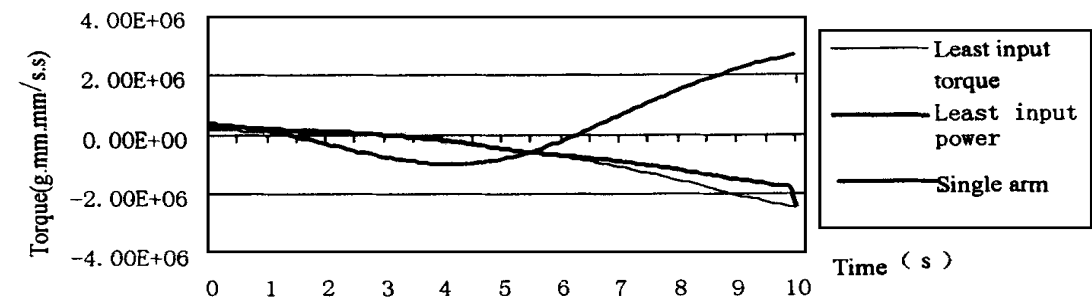


Fig. 5 4th joint torque of master arm

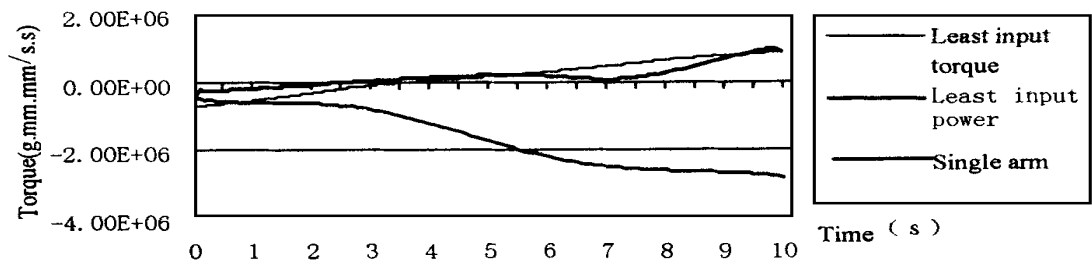
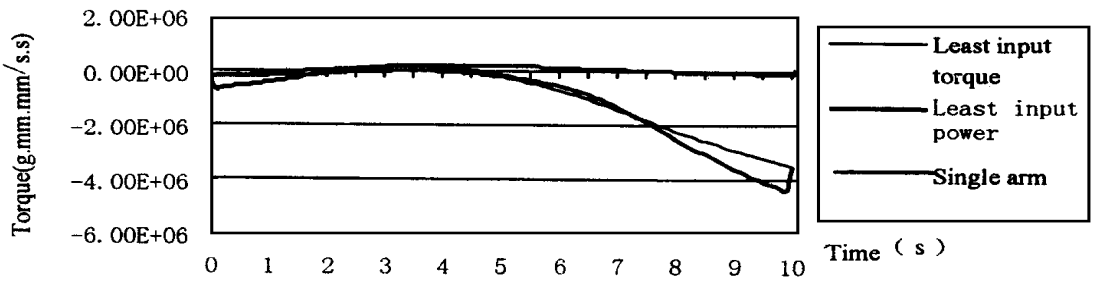
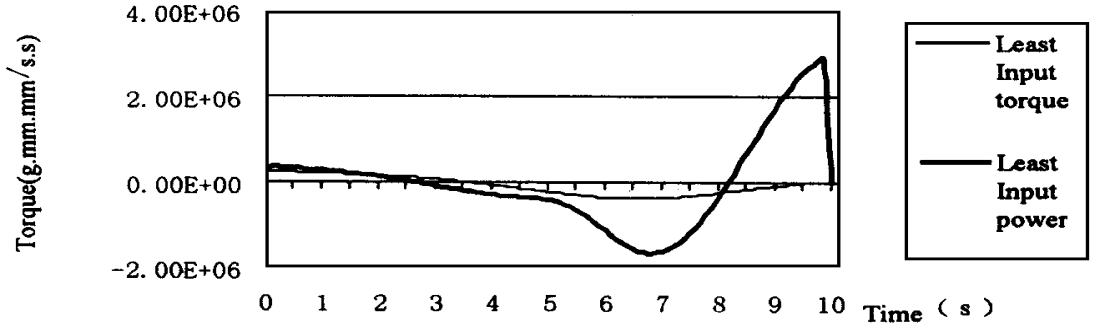
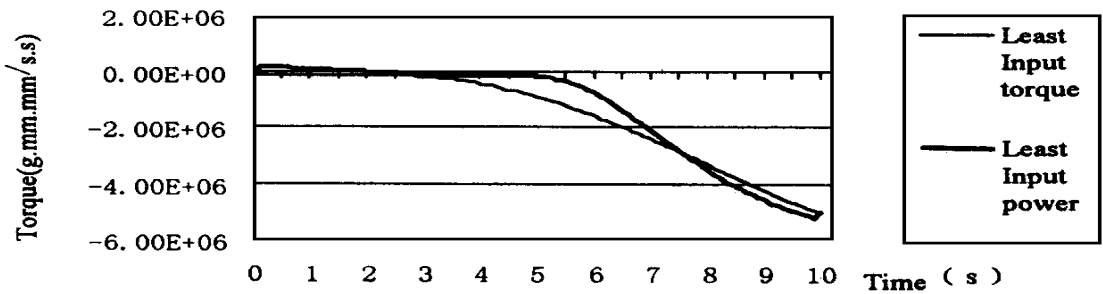
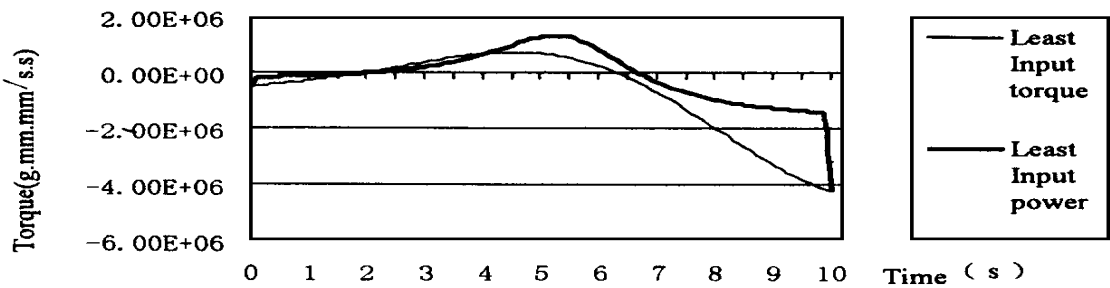
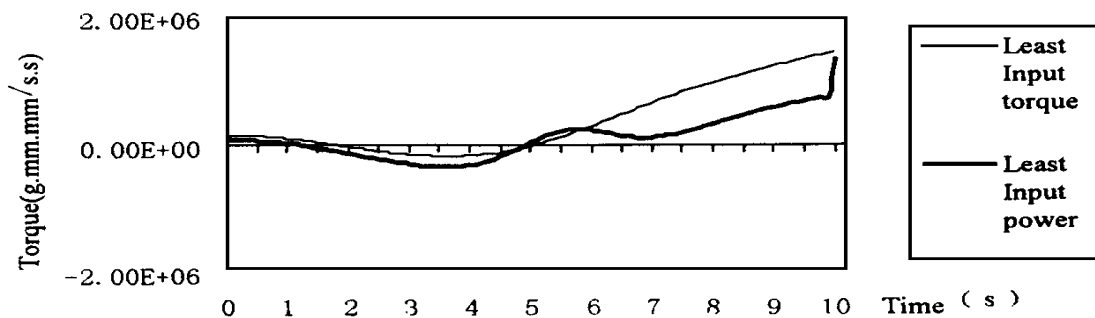
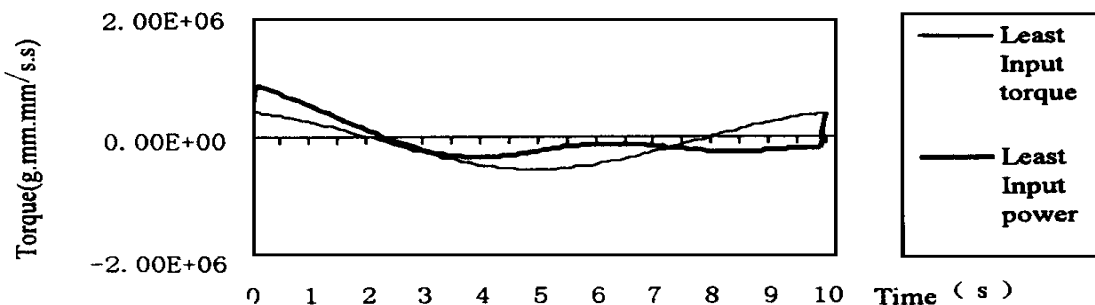
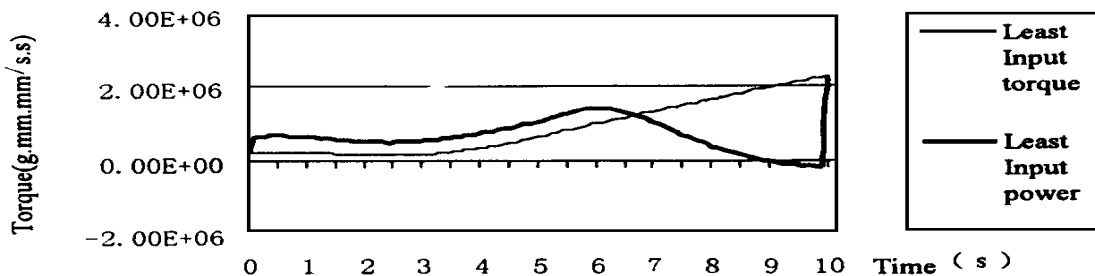


Fig. 6 5th joint torque of master arm

Fig. 7 6th joint torque of master armFig. 8 1st joint torque of slave armFig. 9 2nd joint torque of slave armFig. 10 3rd joint torque of slave arm

Fig. 11 4th joint torque of slave armFig. 12 5th joint torque of slave armFig. 13 6th joint torque of slave arm

在每个图中我们还看到, 根据瞬时输入功率最小原则计算得出的关节力矩在开始和结束时变化的总是很剧烈。产生这种现象的原因是因为在这两个位置处机器人各关节的速度都趋近于零, 此时即使输入力矩变化再大对系统的总功率也

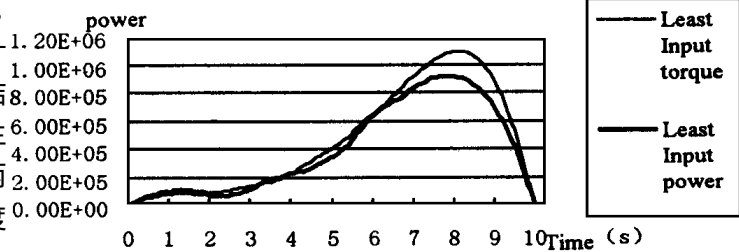


Fig. 14 Sum of absolute values of joint power

不会产生什么影响, 可以说这时所得到的关节力矩是一个失真的结果。为防止这种现象的出现, 在实际应用瞬时输入功率最小原则进行关节力矩的分配时, 我们应在运动开始和结束时增加一些约束条件。如当关节速度减小到一定程度时, 适当地改变加权矩阵 $[W]$ ($[W_q]$ 和

$[W_0^*])$ 的相应元素的值。在图 14 中画出了按照瞬时输入力矩最小原则和瞬时输入功率最小原则进行力矩分配时系统各关节输入功率的绝对值之和。从中可以看出按照瞬时输入功率最小原则分配关节力矩的确降低了系统的总功率。

4 结 论

本文应用数值方法研究了多机械手协同操作系统的动载荷最优分配,可以看出在大多数情况下,采用我们所研究的动载荷最优协调分配方法,用两个机器人搬运重物时各关节所需要的力矩要比只用单个机器人相应关节所需力矩小得多,有时还不止两倍。这样不仅防止了各关节驱动装置的过载,而且它也使系统的整体承载能力得到成倍增长,并且按照瞬时输入功率最小原则分配关节力矩的确降低了系统的总功率。本文的研究结果验证了理论分析的正确性。对进一步研究多机械手协调操作系统的协调控制和实际应用有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Huang Zhen, Zhao Yongsheng. The accordance and optimization distribution equations of the over determinate inputs of walking machine. *The Int J of Mechanism and Machine Theory*, 1994, 29(2): 327332
- 2 Zhao Yongsheng, Du Yonghui, Zhao Tieshi, Huang Zhen. The novel approach for the optimal dynamic loads distribution of multiple cooperating manipulators. *Proceeding of International Conference on Mechanical Transmission and Mechanisms*. Tianjin, P R China, 1997, 970973

Numerical Simulation on Dynamic Load Coordination of Multiple Cooperating Manipulators

ZHAO Yong-Sheng, REN Jing-Yi, ZHAO Tie-Shi, HUANG Zhen

(*Mechanical Engineering Institute, Yanshan University, Qinhuangdao 066004*)

Abstract

For the case of two manipulators handling a single object, the optimal distributions of the object dynamic load in the joint space of the system are simulated by using numerical method. The results of this paper verified the correctness of our theoretical analysis.

Key words: Multiple cooperating manipulators, Coordination, Dynamic load, Optimal distribution

赵永生 男,1962年出生,副教授,在职博士。主要从事机器人学领域的研究(包括并联机器人、多足步行机、多机械手协同系统等方向);曾获国家教委科技进步一等奖一项、国家教育部科技进步二等奖一项、河北省科技进步二等奖一项,参加完成国家自然科学基金、国家“863”等高科技研究课题6项,在国际和国内各种科技刊物和会议上发表论文30余篇。