

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.10.009

五自由度平行四边形机构机械手动力学 分析与仿真研究

陈立博¹, 龚媛², 陶柯¹, 刘兴¹

(1. 沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 沈阳广泰真空设备有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 针对五自由度平行四边形机构机械手的动力学问题, 基于拉格朗日动力学和平行四边形机构特点建立了机械手的动力学模型, 对有效惯量、耦合惯量、向心加速度、科氏加速度和重力项对其动力学性能的影响进行了分析, 提出了一种通过优化机构参数来提高其动力学性能的途径。利用UG软件建立了机械手的三维实体模型并导入到ADAMS中, 对工作节拍对机械手工作效率及其稳定性的影响进行了动力学仿真测试。研究结果表明, 优化机械手机构参数可以提高其动力学性能, 减小非线性力对其动力学性能的影响, 动力学仿真分析验证了其动力学模型的正确性, 准确地反映了在工作节拍缩短的情况下各关节驱动力矩的变化规律, 为机械手控制系统的设计与优化奠定了基础。

关键词: 平行四边形机构; 拉格朗日动力学; ADAMS; 仿真

中图分类号: TH166; TP24 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)10-1274-05

Dynamics analysis and simulation of 5-DOF parallelogram mechanism manipulator

CHEN Li-bo¹, GONG Yuan², TAO Ke¹, LIU Xing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Shenyang Guangtai Vacuum Equipment Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: Aiming at the dynamics analysis of the 5-DOF parallelogram mechanism manipulator, a dynamic model of the manipulator was established with the Lagrangian dynamics and the feature of the parallelogram mechanism. The effect of the effective inertia, coupling inertia, centripetal acceleration, coriolis acceleration and gravity to its dynamics performance were analyzed. A method to improve its dynamics performance was carried out. The dynamics simulation of the manipulator model which was established by UG was analyzed with the ADAMS. The effect of the tempo of the manipulator working to its efficiency and stability was tested. The results indicate that by optimizing the organization can improve its dynamic performance and reduce the impact of nonlinear force, the simulation verifies the correctness of its dynamics model and reflects the variation of joint driving torque clearly. It lays the foundation for the design and optimization of manipulator control system.

Key words: parallelogram mechanism; Lagrangian dynamics; ADAMS; simulation

0 引言

随着工业自动化生产效率的提高, 对机械手的运动精度、运行速度、加速度以及高加速情况下的运行平稳性提出了较高的要求。因此, 研究者在机械手控制系统设计的阶段要通过计入其动力学特性, 针对多

个关节采用基于动力学模型的计算力矩控制, 来补偿其运动时非线性力的影响。同时, 通过机械手动力学仿真可以提高其设计性能, 减少设计成本和产品开发的周期^[1]。目前, 研究者建立机械手动力学模型时一般先采用D-H法, 通过建立机械手的连杆坐标系, 在经过坐标变换得到其动力学模型。在推导模型的过程

收稿日期: 2014-06-04

作者简介: 陈立博(1990-), 男, 辽宁沈阳人, 主要从事搬运机械手方面的研究。E-mail:811137606@qq.com

中计算十分复杂,且得到的动力学模型特别不容易求解^[2-3]。而平行四边形机构机械手则由于平行四边形特殊的几何关系,而不再需要复杂的坐标变换的过程^[4]。

平行四边形机构机械手一般用于搬运以及点焊的领域中,具有结构简洁、速度快、性能高等特点^[5-7]。本研究为了提高平行四边形机构机械手的动力学性能、工作效率以及其高速运行时的稳定性,在机械手的设计阶段对其进行动力学建模、分析、优化与仿真。

1 机械手动力学分析

1.1 机械手广义坐标及其机构参数的设定

1.1.1 广义坐标设定

机械手机构简图如图1所示。建立空间坐标系 $Oxyz$ 、机械手固连的坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 。机械手具有5个自由度,驱动关节1、关节2、关节3,使末端执行器达到不同的位置,驱动关节4、关节5使末端执行器具有不同的姿态。在动力学分析中不再考虑关节4、关节5的影响:连杆3和连杆6合并为一根连杆记为连杆3';连杆7、末端执行器和负载的质量都归结到连杆3'的末端 D 点上。设连杆1与 y_1 轴正方向夹角为 θ_1 ,连杆2与 z_1 轴正方向夹角为 θ_2 , x_1 轴与 x 轴正方向夹角为 θ_3 。 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 即为机械手的广义坐标,初始位置时 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$ 。

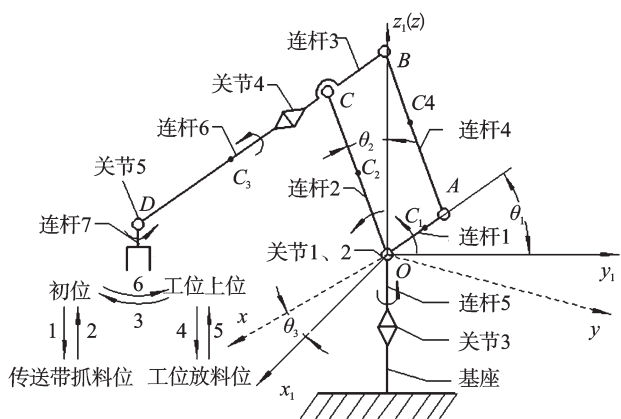


图1 机械手机构简图

1.1.2 机构参数设定

机械手机构参数如表1所示。设连杆7,末端执行

表1 机械手机构参数

连杆	质量	长度	质心	质心位置	惯性张量
1	m_1	l_1	C_1	C_1 到 O 的距离为 l_{c1}	I_1^{C1}
2	m_2	l_2	C_2	C_2 到 O 的距离为 l_{c2}	I_2^{C2}
3'	m_3	$l_1 + l_3$	C_3	C_3 到 C 的距离为 l_{c3}	I_3^{C3}
4	m_4	l_2	C_4	C_4 到 A 的距离为 l_{c4}	I_4^{C4}

器和负载的总质量为 m_5 。

1.2 机械手动力学模型建立

本研究采用拉格朗日法对机械手进行动力学模型建立与分析,即:

$$T_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} \quad (1)$$

式中: n —连杆的数目, $i=1,2,\dots,n$; q_i —广义坐标, m 或 rad ; \dot{q}_i —广义速度, m/s 或 rad/s ; E_k —系统总的动能; E_p —系统总的势能; T_i —作用在第 i 个关节上的广义力, N 或 $N \cdot M^{[8]}$ 。

1.2.1 系统的动能

平面运动刚体的动能等于随同质心平移的动能与绕质心转动的动能之和,即:

$$T = \frac{1}{2} m v_{ci}^2 + \frac{1}{2} I_{ci} \omega_i^2 \quad (2)$$

式中: v_{ci} —质心平移的速度, ω_{ci} —绕质心转动的角速度。

连杆1和连杆2的运动可看成绕相互垂直的 x_1 轴和 z 轴旋转的合成。连杆3', 连杆4, 末端执行器与负载运动可以看成在 y_1oz_1 平面内的平面运动和绕 z 轴旋转的合成; 其中在 y_1oz_1 平面内的平面运动又可以看成平动和绕点转动的组合。因此,由式(2)可得各个连杆、末端执行器与负载的动能以及系统的总动能:

$$\begin{aligned} T_1 &= \left(\frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 + \frac{1}{2} I_{xx1} \right) \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \cdot \cos^2 \theta_1 + \frac{1}{2} I_{zz1} \right) \dot{\theta}_3^2 \\ T_2 &= \left(\frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 + \frac{1}{2} I_{xx2} \right) \dot{\theta}_2^2 + \left(\frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 \cdot \sin^2 \theta_2 + \frac{1}{2} I_{zz2} \right) \dot{\theta}_3^2 \\ T_3 &= \frac{1}{2} m_3 \left[l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + l_{c3}^2 \dot{\theta}_1^2 - 2l_2 l_{c3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] + \frac{1}{2} I_{xx3} \dot{\theta}_1^2 + \\ &\quad \frac{1}{2} m_3 (l_2 \sin \theta_2 + l_{c3} \cos \theta_1)^2 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} I_{zz3} \dot{\theta}_3^2 \\ T_4 &= \frac{1}{2} m_4 \left[l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{c4}^2 \dot{\theta}_2^2 + 2l_1 l_{c4} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] + \frac{1}{2} I_{xx4} \dot{\theta}_1^2 + \\ &\quad \frac{1}{2} m_4 (l_1 \cos \theta_1 - l_{c4} \sin \theta_2)^2 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} I_{zz4} \dot{\theta}_3^2 \\ T_5 &= \frac{1}{2} m_5 \left[l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + l_3^2 \dot{\theta}_1^2 - 2l_2 l_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] + \\ &\quad \frac{1}{2} m_5 (l_2 \sin \theta_2 + l_3 \cos \theta_1)^2 \dot{\theta}_3^2 \\ E_k &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \end{aligned}$$

1.2.2 系统的势能

为了计算方便,笔者选取 O 点为零势能点,可得各个连杆、末端执行器与负载的势能以及系统的总势能:

$$\begin{aligned} U_1 &= m_1 g l_{c1} \sin \theta_1 \\ U_2 &= m_2 g l_{c2} \cos \theta_2 \\ U_3 &= m_3 g (l_2 \cos \theta_2 - l_{c3} \sin \theta_1) \\ U_4 &= m_4 g (l_1 \sin \theta_1 + l_{c4} \cos \theta_2) \\ U_5 &= m_5 g (l_2 \cos \theta_2 - l_3 \sin \theta_1) \\ E_p &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 \end{aligned}$$

1.2.3 关节驱动电机的控制力矩

由式(1)得:

$$M_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \theta_i} + \frac{\partial E_p}{\partial \theta_i} \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

将系统的总动能 E_k 和总势能 E_p 代入式(3)整理,并最终写成矩阵形式得:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{111} & D_{122} & D_{133} \\ D_{211} & D_{222} & D_{233} \\ D_{311} & D_{322} & D_{333} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{112} & D_{113} & D_{123} \\ D_{212} & D_{213} & D_{223} \\ D_{312} & D_{313} & D_{323} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中各系数表达式及其物理意义^[9-11]:

(1) 有效惯量 D_{ii} :

关节 i 的加速度 $\ddot{\theta}_i$ 将在关节 i 处产生一个等于 $D_{ii}\ddot{\theta}_i$ 的惯性力矩。

$$\begin{aligned} D_{11} &= m_1 l_{c1}^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 + m_5 l_3^2 + I_{x1} + I_{x3} \\ D_{22} &= m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_{c4}^2 + m_5 l_2^2 + I_{x2} + I_{x4} \\ D_{33} &= a \cos^2 \theta_1 + b \sin^2 \theta_2 + c \cos \theta_1 \sin \theta_2 + d \\ a &= m_1 l_{c1}^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 + m_5 l_3^2 \\ b &= m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_{c4}^2 + m_5 l_2^2 \\ c &= 2m_3 l_2 l_{c3} - 2m_4 l_1 l_{c4} + 2m_5 l_2 l_3 \\ d &= I_{z1} + I_{z2} + I_{z3} + I_{z4} \end{aligned}$$

(2) 耦合惯量 $D_{ij}(i \neq j)$:

关节 i 或 j 的加速度 $\ddot{\theta}_i$ 或 $\ddot{\theta}_j$ 将在关节 j 或关节 i 处分别产生一个等于 $D_{ij}\ddot{\theta}_i$ 或 $D_{ij}\ddot{\theta}_j$ 的惯性力矩。

$$\begin{aligned} D_{12} &= D_{21} = (m_4 l_1 l_{c4} - m_3 l_2 l_{c3} - m_5 l_2 l_3) \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ D_{13} &= D_{31} = D_{23} = D_{32} = 0 \end{aligned}$$

(3) 向心加速度系数 D_{ij} :

$D_{ij}\dot{\theta}_j^2$ 项是由于关节 j 的速度 $\dot{\theta}_j$ 在关节 i 处引起的向心力。

$$\begin{aligned} D_{122} &= -(m_4 l_1 l_{c4} - m_3 l_2 l_{c3} - m_5 l_2 l_3) \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ D_{133} &= \frac{1}{2}(m_1 l_{c1}^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 + m_5 l_3^2) \sin 2\theta_1 - \\ & (m_4 l_1 l_{c4} - m_3 l_2 l_{c3} - m_5 l_2 l_3) \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ D_{211} &= (m_4 l_1 l_{c4} - m_3 l_2 l_{c3} - m_5 l_2 l_3) \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ D_{233} &= -\frac{1}{2}(m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_{c4}^2 + m_5 l_2^2) \sin 2\theta_2 + \\ & (m_4 l_1 l_{c4} - m_3 l_2 l_{c3} - m_5 l_2 l_3) \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ D_{111} &= D_{222} = D_{311} = D_{322} = D_{333} = 0 \end{aligned}$$

(4) 科氏加速度 D_{ijk} :

$D_{ijk}\dot{\theta}_j\dot{\theta}_k$ 是由于关节 j 和 k 处的速度 $\dot{\theta}_j$ 和 $\dot{\theta}_k$ 引起的作用于关节 i 处的科氏力。

$$\begin{aligned} D_{112} &= D_{113} = D_{123} = D_{212} = D_{213} = D_{223} = D_{312} = 0 \\ D_{313} &= -(a \sin 2\theta_1 + c \sin \theta_1 \sin \theta_2) \\ D_{323} &= (b \sin 2\theta_2 + c \cos \theta_1 \cos \theta_2) \end{aligned}$$

(5) 重力项 D_i :

D_i 表示关节 i 处的重力影响项。

$$\begin{aligned} D_1 &= (m_1 g l_{c1} - m_3 g l_{c3} + m_4 g l_1 - m_5 g l_3) \cos \theta_1 \\ D_2 &= -(m_2 g l_{c2} + m_3 g l_2 + m_4 g l_{c4} + m_5 g l_2) \sin \theta_2 \\ D_3 &= 0 \end{aligned}$$

1.3 机械手动力学性能的提升途径的分析

由机械手动力学模型可知:耦合惯量 $D_{ij}(i \neq j)$ 、向心加速度系数 D_{ij} 、科氏加速度 D_{ijk} 除了等于0的项外,其余各项系数均与 D_y 有关。

$$D_y = m_4 l_1 l_{c4} - m_3 l_2 l_{c3} - m_5 l_2 l_3 \quad (5)$$

(1) 如果令 $D_y = 0$, 则耦合惯量 $D_{ij} = 0$, 消除了不同关节间的耦合惯性力矩的影响。

(2) 如果令 $D_y = 0$, 则使得向心加速度系数 $D_{122} = D_{211} = 0$, 同时减小了向心加速度系数 D_{133} , D_{233} 对关节1和关节2的影响。

(3) 如果令 $D_y = 0$, 则减小了科氏加速度 D_{313} 与 D_{323} 对关节3的影响。

因此,为了完全消除或减少不同坐标间的耦合惯性力矩,向心力和科氏力的影响,减小机构中的非线性程度保证机械手在工作过程中的动平衡,就要尽量减小 D_y 的数值,提高机械手的动力学性能。

2 基于 ADAMS 的机械手动力学仿真与研究

2.1 机械手动力学仿真

本研究根据动力学分析得到的结论对机械手的机构参数进行优化后,在UG中建立机械手的三维模型,再导入ADAMS中进行动力学仿真与分析。现设定机械手的搬运方案,从初始位置 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$ 开始完成一个整个的搬运过程如图1所示,搬运过程持续18 s,整个搬运过程可以分成的6个阶段如表2所示。

表2 机械手搬运过程

过程	时间	末端执行器 开始位置	末端执行器 结束位置
1	0~3 s	(0, -1 000, 750)	(0, -1 000, 0)
2	4 s~7 s	(0, -1 000, 0)	(0, -1 000, 750)
3	7 s~9 s	(0, -1 000, 750)	(1 000, 0, 750)
4	9 s~12 s	(1 000, 0, 750)	(1 000, 0, 0)
5	13 s~16 s	(1 000, 0, 0)	(1 000, 0, 750)
6	16 s~18 s	(1 000, 0, 750)	(0, -1 000, 750)

本研究对整个搬运过程进行仿真分析后处理得到的各关节控制力矩随时间的变化规律如图2所示。图2中, motion3 对应关节1, motion2 对应关节2, motion1 对应关节3^[12]。

如图2所示,关节1、关节2、关节3随着转角的变

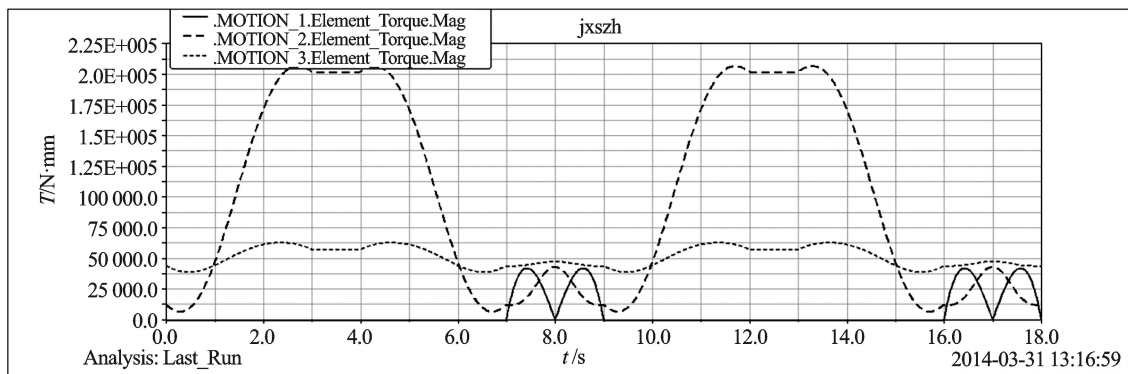


图2 各关节力矩随时间变化规律

化,控制力矩变化平稳无突变,方案可行。为了进一步提高机械手的效率并保证其稳定性,要对搬运节拍的影响进行进一步分析。

2.2 搬运节拍对机械手关节控制力矩影响的研究

现缩短搬运过程的节拍,搬运时间由原来的18 s变为10 s,其中每个阶段节拍均较少到原来的一半,得到关节控制力矩随时间变化的规律如图3所示。

2.2.1 搬运节拍缩短对关节1关节2控制力矩的影响

搬运节拍缩短后,关节1和关节2在阶段1、2、4、5(即上升和下降阶段)时控制力矩的变化不大,这说明在该阶段关节1和关节2的控制力矩主要受重力项

的影响。关节1和关节2在阶段3、6的控制力矩增大到原来的400%左右,这是由于角速度变为原来的2倍,向心力 $D_{133}\dot{\theta}_3^2$ 与 $D_{233}\dot{\theta}_3^2$ 的增大到原来的4倍引起的。这说明虽然尽量减小了 D_y 的值,但是由关节3的角速度在关节1和关节2处引起的向心力不能完全消除与忽略。

2.2.2 搬运节拍缩短对关节3控制力矩的影响

在搬运节拍缩短后,关节3的控制力矩增大为原来400%左右,说明关节3的控制力矩的变化主要由关节3的角加速度的变化引起, $D_3=0$ 无重力项的影响。

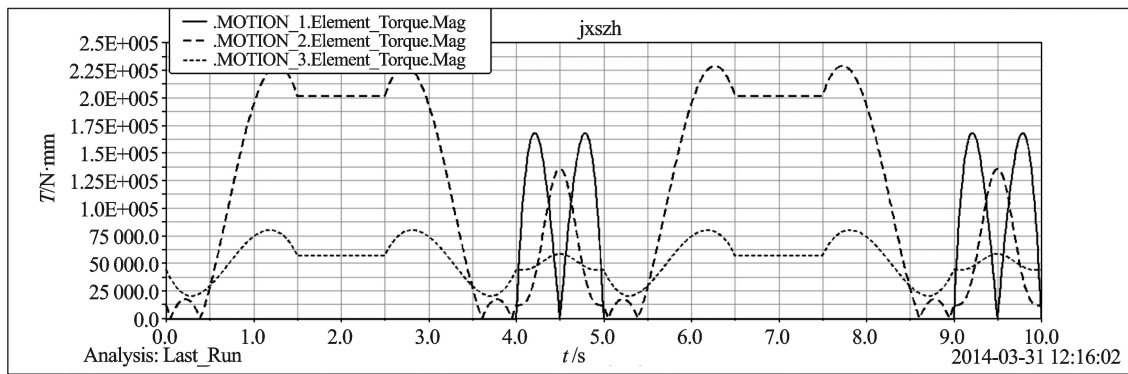


图3 各关节力矩随时间变化规律

3 结束语

本研究利用平行四边形机构的特点建立了机械手动力学模型,省去了复杂的坐标变换过程,所得到的动力学模型更易于求解分析。通过减小 D_y 的数值,可以消除或减小关节之间的耦合运动、向心力以及科氏力的影响,可以提高平行四边形机构机械手的

动力学性能。

通过本研究可得以下结论:为提高机械手的工作效率要加大机械手关节1、关节2的速度、加速度;同时为保证其工作平稳性要使关节3的速度、加速度保持在一个稳定的范围之内,为机械手控制系统的设计与优化奠定了基础。

(下转第1286页)

本文引用格式:

陈立博,龚媛,陶柯,等. 五自由度平行四边形机构机械手动力学分析与仿真研究[J]. 机电工程,2014,31(10):1274-1277,1286.

CHEN Li-bo, GONG Yuan, TAO Ke, et al. Dynamics analysis and simulation of 5-DOF parallelogram mechanism manipulator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(10): 1274-1277, 1286.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>