

基于解析法的管道清灰机器人操作臂分析及仿真

张淑珍 杨萍 党兴武

【摘要】 以管道清灰机器人为研究对象,建立了该机器人操作臂机构简图。利用解析法对机器人操作臂位置、速度、加速度进行了分析,给出了末端操作器的位置、速度、加速度解。利用 Matlab 编制计算程序,基于 Simulink 建立了仿真模型,对管道清灰机器人进行了动态仿真,验证了运动分析的正确性。

关键词: 管道清灰机器人 操作臂 解析法 仿真

中图分类号: TH113.2; TP242.3

文献标识码: A

Kinematics Analysis and Simulation for Operating Arm of In-pipe Clearing Ash Robot Based on Analytic Method

Zhang Shuzhen Yang Ping Dang Xingwu

(Lanzhou University of Technology)

Abstract

Regarding in-pipe clearing ash robot in exhaust gas pipeline of metal smeltery as the research object, operating arm framework sketch of the robot is set up. Utilizing the analytic method the arm displacement, speed and acceleration are analyzed and solved. Computing program is designed in Matlab. Simulation model of the robot mechanical system is set up in Simulink and the robot dynamic simulation is carried on. The correctness of kinematic analysis was verified.

Key words In-pipe clearing ash robot, Operating arm, Analytic method, Simulation

引言

烟气输送管道中的烟灰堆积层采用人工清理方式,由于工作环境危险性大,工人劳动强度大,以及停产清理造成较大的经济损失,所以有必要研制管道自动化清灰机器人进行管道清灰作业。

1 操作臂位置分析

根据管道清灰机器人工作环境和清灰技术要求,在对国内外管道机器人进行了解和分析的基础上,采用履带式管道清灰机器人的设计方案。利用 Pro/E 软件建立了机器人本体结构,如图 1 所示。

机器人清灰作业主要由操作臂完成,操作臂简化后为一平面闭环连杆机构,其上的末端操作器——铲斗为平面运动,铲斗可实现提升和翻转动作,

操作臂提升装置为正转六连杆机构^[1],如图 2 所示。对操作臂进行运动学分析,为便于程序编制,利用解析法进行位置、速度、加速度分析和求解。

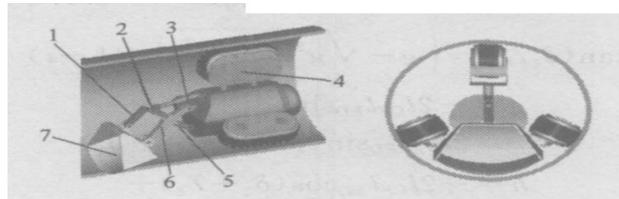


图 1 管道清灰机器人本体结构图

Fig. 1 Structure for in-pipe clearing ash robot

1. 拉杆 2. 摇臂 3. 转斗油缸 4. 可伸缩履带 5. 举升油缸
6. 动臂 7. 铲斗

已知操作臂各杆长,设 HA 为 x 轴,由 H 指向 A 为正向。 s_1 、 s_2 为提升油缸和转斗油缸长度,各角度变量如图 2 所示。

收稿日期: 2005-04-26

张淑珍 兰州理工大学机电工程学院 讲师, 730050 兰州市

杨萍 兰州理工大学机电工程学院 副教授

党兴武 兰州理工大学机电工程学院 讲师

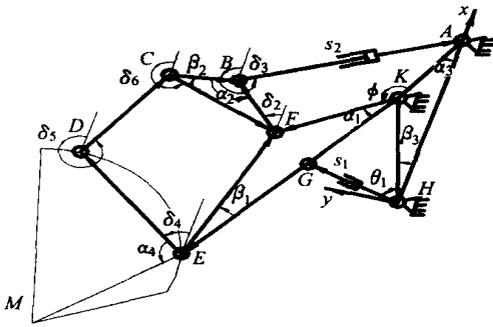


图2 操作臂机构简图

Fig.2 Sketch of operating arm of robot

1.1 转斗油缸及摇臂转角 δ 、 δ' 的求解

对于矢量闭链^[2] $KFBAK$ ，可得

$$\tan((\delta + \alpha)/2) = \left[a \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2} \right] / (b - c)$$

其中 $a = -2l_{KF}l_{BA}\sin\phi$ $b = -2l_{BA}(l_{KF}\cos\phi - l_{KA})$

$$c = l_{FB}^2 - l_{KF}^2 - l_{BA}^2 - l_{KA}^2 + 2l_{KF}l_{KA}\cos\phi$$

同理可求得

$$\tan((\delta + \alpha)/2) = \left[d \pm \sqrt{d^2 + e^2 - f^2} \right] / (e - f)$$

其中 $d = -2l_{KF}l_{FB}\sin\phi$ $e = -2l_{FB}(l_{KF}\cos\phi - l_{KA})$

$$f = l_{KF}^2 + l_{FB}^2 - l_{BA}^2 + l_{KA}^2 + 2l_{KF}l_{KA}\cos\phi$$

在该操作臂机构中，根据举升油缸和转斗油缸的行程，可知角度 $\delta + \alpha$ 总是在第4象限，角度 $\delta + \alpha$ 总是在第1象限，因此

$$\tan((\delta + \alpha)/2) = \left[a - \sqrt{a^2 + b^2 - c^2} \right] / (b - c) \quad (1)$$

$$\tan((\delta + \alpha)/2) = \left[d + \sqrt{d^2 + e^2 - f^2} \right] / (e - f) \quad (2)$$

1.2 铲斗及拉杆转角 δ 、 δ' 的求解

对于矢量闭链 $FEDCF$ ，可得

$$\tan(\delta/2) = \left[g - \sqrt{g^2 + h^2 - i^2} \right] / (h - i) \quad (3)$$

其中

$$g = -2l_{CF}l_{ED}\sin(\delta + \gamma) + 2l_{FE}l_{ED}\sin(\phi - \alpha + \alpha + \beta)$$

$$h = -2l_{CF}l_{ED}\cos(\delta + \gamma) + 2l_{FE}l_{ED}\cos(\phi - \alpha + \alpha + \beta)$$

$$i = l_{CF}^2 + l_{FE}^2 + l_{ED}^2 - l_{DC}^2 -$$

$$2l_{CF}l_{FE}\cos(\delta + \gamma - (\phi - \alpha + \alpha + \beta))$$

其中

$$\gamma = 180^\circ - \alpha - \beta$$

同理得

$$\tan(\delta/2) = \left[k + \sqrt{k^2 + m^2 - n^2} \right] / (m - n) \quad (4)$$

其中

$$k = 2l_{DC}[l_{FE}\sin(\phi - \alpha + \alpha + \beta) - l_{FC}\sin(\delta + \gamma)]$$

$$m = 2l_{DC}[l_{FE}\cos(\phi - \alpha + \alpha + \beta) - l_{FC}\cos(\delta + \gamma)]$$

$$n = l_{FC}^2 + l_{FE}^2 + l_{DC}^2 - l_{ED}^2 - 2l_{FC}l_{FE}\cos(\phi - \alpha + \alpha + \beta - (\delta + \gamma))$$

在该操作臂机构中，可知角度 δ 总是在第1象限，角度 δ' 总是在第4象限，因此 δ 、 δ' 的正切值如式(3)、(4)所示。

2 速度、加速度分析

对于矢量闭链 $HGEDCBAH$ 和闭链 $HGED-CFKH$ ，向 x, y 轴投影得

$$\begin{cases} s_1 \cos \theta + l_{GE} \cos \phi' + l_{ED} \cos \delta + l_{DC} \cos \delta' - l_{CB} \cos(\delta - \alpha) + s_2 \cos \delta - l_{AH} = 0 \\ s_1 \sin \theta + l_{GE} \sin \phi' + l_{ED} \sin \delta + l_{DC} \sin \delta' - l_{CB} \sin(\delta - \alpha) + s_2 \sin \delta = 0 \\ s_1 \cos \theta + l_{GE} \cos \phi' + l_{ED} \cos \delta + l_{DC} \cos \delta' - l_{FC} \cos \delta' - l_{KF} \cos \phi - l_{KH} \cos \beta_3 = 0 \\ s_1 \sin \theta + l_{GE} \sin \phi' + l_{ED} \sin \delta + l_{DC} \sin \delta' - l_{FC} \sin \delta' - l_{KF} \sin \phi - l_{KH} \cos \beta_3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\delta = \phi + \alpha + \beta - \alpha$ $\delta' = \delta - \alpha - \beta_2 + 180^\circ$ $\phi' = \phi + \alpha - \alpha$

其中 s_1, s_2 为一级坐标， $\theta, \phi, \delta, \delta', \delta, \delta'$ 为二级坐标，将式(5)两边分别对时间取一次、二次导数^[2]，整理得该机器人操作臂机构从动件角速度列阵

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\delta}' \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \delta \\ -\sin \theta & -\sin \delta \\ \cos \theta & 0 \\ -\sin \theta & 0 \\ s_1 \sin \theta & l_{GE} \sin \phi' \\ s_1 \cos \theta & l_{GE} \cos \phi' \\ s_1 \sin \theta & \begin{cases} l_{GE} \sin \phi' \\ l_{KF} \sin(\phi - \alpha) \end{cases} \\ s_1 \cos \theta & \begin{cases} l_{GE} \cos \phi' \\ l_{KF} \cos(\phi - \alpha) \end{cases} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} l_{ED} \sin \delta & l_{DC} \sin \delta & l_{CB} \sin(\delta - \alpha) & s_2 \sin \delta \\ l_{ED} \cos \delta & l_{DC} \cos \delta & l_{CB} \cos(\delta - \alpha) & s_2 \cos \delta \\ l_{ED} \sin \delta & l_{DC} \sin \delta & l_{CF} \sin \delta' & 0 \\ l_{ED} \cos \delta & l_{DC} \cos \delta & l_{CF} \cos \delta' & 0 \end{bmatrix}$$

从动件角加速度列阵

$$\begin{bmatrix} \ddot{\delta}_1 \\ \ddot{\delta}_2 \\ \ddot{\delta}_3 \\ \ddot{\delta}_4 \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \left[\begin{array}{c} \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\sin \delta \\ -\cos \theta & -\cos \delta \\ -\sin \theta & 0 \\ -\cos \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \delta \\ -\sin \theta & \sin \delta \\ \cos \theta & 0 \\ -\sin \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} - \mathbf{A} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s_1 \sin \theta + s_1 \theta \cos \theta & l_{GE} \phi \cos \phi' \\ s_1 \cos \theta - s_1 \theta \sin \theta & -l_{GE} \phi \sin \phi' \\ s_1 \sin \theta + s_1 \theta \cos \theta & \left\{ \begin{array}{l} l_{GE} \cos \phi' - \\ l_{KF} \cos(\phi - \alpha) \end{array} \right\} \\ s_1 \cos \theta - s_1 \theta \sin \theta & \left\{ \begin{array}{l} -l_{GE} \sin \phi' + \\ l_{KF} \sin(\phi - \alpha) \end{array} \right\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s_1 \sin \theta & l_{GE} \sin \phi' \\ s_1 \cos \theta & l_{GE} \cos \phi' \\ s_1 \sin \theta & \left\{ \begin{array}{l} l_{GE} \sin \phi' - \\ l_{KF} \sin(\phi - \alpha) \end{array} \right\} \\ s_1 \cos \theta & \left\{ \begin{array}{l} l_{GE} \cos \phi' - \\ l_{KF} \cos(\phi - \alpha) \end{array} \right\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \right] \quad (7)$$

3 铲斗斗尖 M 的运动分析

由图 2 可得 M 点的位移、速度、加速度分别为

$$\begin{cases} x_M = l_{KH} \cos \beta_3 + l_{EK} \cos(\phi + \alpha - \alpha) + l_{ME} \cos(\alpha + \delta) \\ y_M = l_{KH} \sin \beta_3 + l_{EK} \sin(\phi + \alpha - \alpha) + l_{ME} \sin(\alpha + \delta) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -l_{EK} \sin(\phi + \alpha - \alpha) - l_{ME} \sin(\alpha + \delta) \\ l_{EK} \cos(\phi + \alpha - \alpha) + l_{ME} \cos(\alpha + \delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} l_{EK} \cos(\phi + \alpha - \alpha) & l_{ME} \cos(\alpha + \delta) \\ l_{EK} \sin(\phi + \alpha - \alpha) & l_{ME} \sin(\alpha + \delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_{EK} \sin(\phi + \alpha - \alpha) & -l_{ME} \sin(\alpha + \delta) \\ l_{EK} \cos(\phi + \alpha - \alpha) & l_{ME} \cos(\alpha + \delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式 (6)、(7) 求得的 $\dot{\phi}$ 、 $\dot{\delta}$ 、 $\ddot{\phi}$ 、 $\ddot{\delta}$ 代入式 (9)、(10) 可求得斗尖的速度、加速度。其中 δ 、 $\dot{\delta}$ 为铲斗的角速度、角加速度。

给出几组杆件参数, 求得铲斗的转角、位置、速度及加速度值如表 1 所示。

表 1 铲斗的运动参数

Tab. 1 Solution of bucket parameters

输入参数			输出参数					
s_1/mm	s_2/mm	$\delta/(\text{ }^\circ)$	x_M/mm	y_M/mm	$v_{Mx}/\text{mm s}^{-1}$	$v_{My}/\text{mm s}^{-1}$	$a_{Mx}/\text{mm s}^{-2}$	$a_{My}/\text{mm s}^{-2}$
93	237	44.93	-378.7	344.8	-39.11	-50.13	0	-5.263
153	237	54.93	-255.4	501.1	40.28	49.23	5.902	0
106	179	14.05	-424	243.8	-84.06	-87.9	-15.39	-37.01
106	295	81.92	-189.9	481	87.64	84.16	12.09	0
124.8	237	49.3	-321.6	433.4	38.9	48.8	5.69	-5.13
					-38.7	-48.4	5.77	-5.07
106	240.5	53.99	-363.9	374.7	65.8	82.4	11.92	-36.68
					-67	-83.5	-14.44	-34.34

4 仿真分析

利用计算机仿真软件包求解管道清灰机器人操作臂机构在所计时间内的运动学方程, 以此确定机构在连续运动过程中各个构件的位移、速度和加速度, 验证理论分析的正确性。

在此利用 Matlab/Simulink, 通过综合开环矢量方程(描述运动约束)、数值仿真、矩阵代数等来完成机器人动态仿真所需的基本步骤^[3], 建立操作臂动态仿真模型, 如图 3 所示。

图 3 中 s_1 、 s_2 是已知量, 在此将其设为正弦函数。Subsystem 是一子系统, 该子系统求解了 doujian 函数模块的第 2、第 4、第 6 个输入值, phi 函数模块求解角度 ϕ 角度 ϕ 如图 2 所示, doujian 模块是用 Matlab 编写的函数来求解斗尖 M 点相对于图 2 所示坐标系的位移、速度及加速度值。deta4-d 表示铲斗角速度, deta4 示波器模块显示了铲斗转角的变化情况。使用 To Workspace 模块将输出写入工作空间并用 Matlab 绘图命令输出仿真结果, 如图 4~图 7 所示。

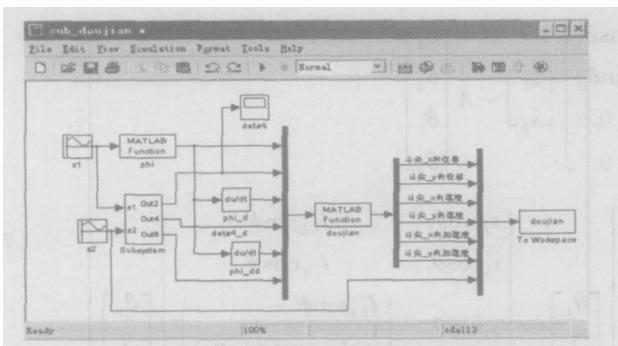


图3 操作臂动态仿真模型界面

Fig.3 Interface of dynamic simulation model of operating arm

从图6和图7可以看出,对于每一个油缸长度的横坐标值,均有2个纵坐标值对应。这是因为同一油缸长度,油缸伸出和缩回时的速度、加速度不同,导致斗尖有不同的速度、加速度值,这一点从表1也

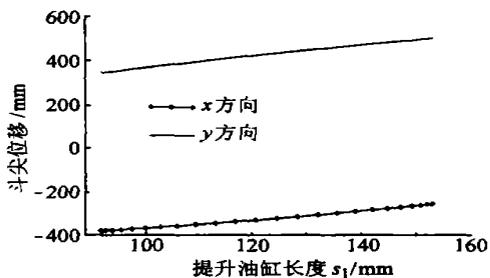


图5 斗尖位移随提升油缸和转斗油缸长度变化曲线

Fig.5 Bucket-point displacement curve against promoted oil cylinder and turning bucket oil cylinder

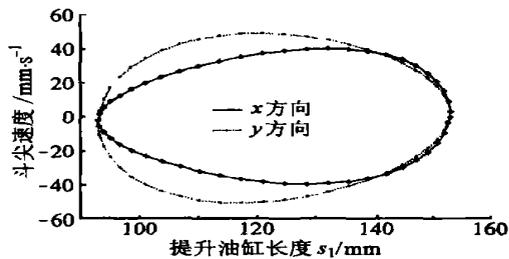
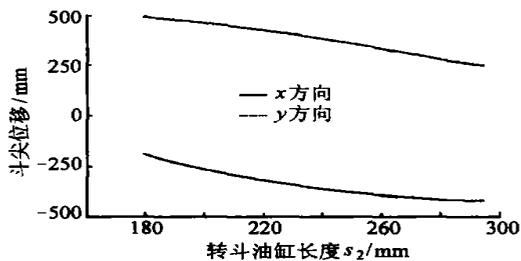


图6 斗尖速度随提升油缸和转斗油缸长度变化曲线

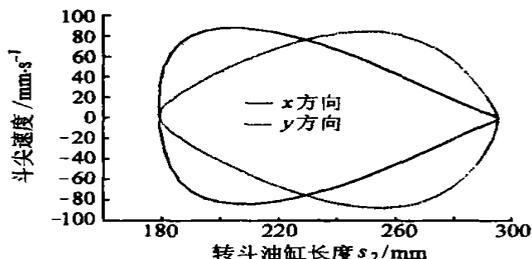


Fig.6 Bucket-point velocity against promoted oil cylinder and turning bucket oil cylinder

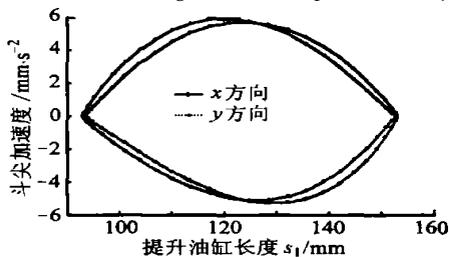


图7 斗尖加速度随提升油缸和转斗油缸长度变化曲线

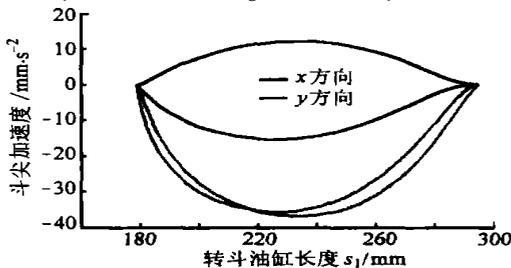


Fig.7 Bucket-point acceleration against promoted oil cylinder and turning bucket oil cylinder

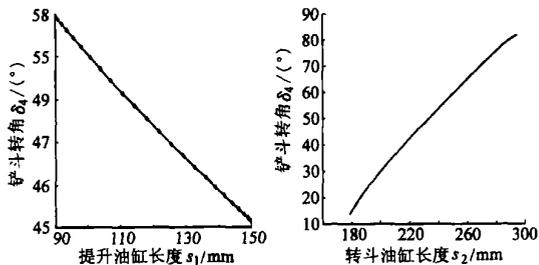


图4 铲斗角度随提升油缸和转斗油缸长度变化曲线
Fig.4 Bucket angle against promoted oil cylinder and turning bucket oil cylinder

可看出。

从图4~图7可以看出,用 Matlab/Simulink 所做的仿真结果与表1列出的该机器人操作臂机构理论分析及求解结果完全一致,验证了机器人操作臂机构理论分析与仿真分析的正确性。

5 结束语

根据管道清灰机器人操作臂机构简图,利用解析法进行了操作臂从动件的运动学分析,给出了末

端操作器运动学理论解,利用 Matlab/Simulink 进行仿真并验证了机器人操作臂运动分析的正确性。

(下转第165页)

到一定的压缩,边部厚度平均减小 0.113 mm ,芯部厚度减小 0.45 mm ;加载过程中锚环在径向上也产生了不同程度的膨胀变形,锚环直径在入口端上增加 0.125 mm ,在出口端上增加 0.016 mm 。有限元模拟测得锚环厚度在边部减小 0.071 mm ,在芯部减小 0.37 mm ,锚环直径在入口端和出口端平均增加了 0.088 mm 和 0.067 mm 。从表中可以看到试验数值与有限元计算结果较吻合,总体上看模拟数据

表3 试验测得锚环变形数据与有限元数据

Tab.3 Comparison between FEM data and

experimental data mm

变形	测量截面	试验			有限元	
		试验前	试验后	变形量		
轴向 变形	1-1	53.2	53.0	-0.2	-0.0543	
	2-2	53.2	53.1	-0.1	-0.1030	
	3-3	53.2	53.16	-0.04	-0.0549	
径向 变形	入口 截面	1-1	125.84	125.99	0.15	0.097
		2-2	125.81	125.95	0.14	0.086
		3-3	125.865	125.95	0.085	0.08
	出口 截面	4-4	125.66	125.58	-0.08	0.074
		5-5	125.61	125.67	0.06	0.065
		6-6	125.61	125.68	0.07	0.063

注:1-1、2-2、3-3分别为锚环上 0° 、 30° 、 60° 截面;负号表示压缩。

比试验数据要小一些,存在的误差主要是由于试验中锚环较厚,热处理后未能使其整体性能一致所造成。

5 结论

(1) 应用 MSC·Marc 有限元分析软件提供的接触模块,对锚环组合进行了数值模拟,得出了锚环在受预应力作用下的应力应变分布规律。分析得知,锚环在接触过程中发生不均匀变形,芯部的等效塑性变形比边部的大。在应力分布上,芯部的等效应力也是较大。

(2) 在应用软件进行接触分析的时候,研究了接触问题的关键技术,探讨了影响接触模拟的因素。正确的接触体定义顺序,合理的位移收敛准则,取最小单元尺寸的 $1/15\sim 1/20$ 作为接触容差,以及基于应力的相对分离力,对接触模拟收敛性和计算精度都有十分重要的影响。

(3) 对模拟得到的应力结果进行了相应的强度校核。校核发现,该结构尺寸下锚环的最大等效应力小于材料的强度极限,因而在强度上满足要求。 $p = 2100\text{ MPa}$ 为该锚环组合的极限载荷。

(4) 在试验台上对锚环进行了静载试验验证,试验值与有限元模拟值吻合较好,这也表明在接触分析上,借助有限元软件模拟具有较高的可信度。

参 考 文 献

- 1 Padmanabhan V, Laursen T A. A framework for development of surface smoothing procedures in large deformation frictional contact analysis[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 37(3): 173~198.
- 2 Gun H. Elasto-plastic static stress analysis of 3D contact problems with friction by using the boundary element method[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2004, 28(7): 779~790.
- 3 Ezawa Y, Okamoto N. Development of contact stress analysis programs using the hybrid method of FEM and BEM [J]. Computers and Structures, 1995, 57(4): 691~698.
- 4 张庆,富壮,徐宏祥.冷滚轧机床本体二维接触分析[J].塑性工程学报,2002,9(4):92~94.
- 5 陈火红. MARC 有限元实例分析教程[M].北京:机械工业出版社,2002.
- 6 张宝生,陈家庆,蒋力培,等. MARC 在接触分析中的应用[J].轴承,2003(11):1~3.
- 7 李晨光,李晓光,卞延彬.多根钢绞线夹片式锚具的试验与数值研究[J].建筑技术开发,2002,29(11):22~25.

(上接第152页)

参 考 文 献

- 1 曹惟庆,徐曾荫.机构设计[M].北京:机械工业出版社,1993.
- 2 孙桓,陈作模.机械原理[M].北京:高等教育出版社,1998.
- 3 [美]约翰·F·加德纳.机构动态仿真:使用 MATLAB 和 SIMULINK[M].周进雄,张陵,译.西安:西安交通大学出版社,2002.