

8

悬伸操作器, 液压挖掘机, 机器人

58-66

机器人空间机构理论的应用

——对工程机械悬伸操作器的运动分析*

张荣瑞

苏彰道

尹永峰

(机电工程学院)

TH 62103

摘要 本文应用机器人空间机构理论对工程机械悬伸操作器进行了运动分析, 建立了液压挖掘机悬伸操作器的运动仿真模型, 并在 IBM-PC/XT 微机上对某台 20 吨级反铲液压挖掘机的悬伸操作器的运动性能进行了全面仿真。

关键词 机器人, 工程机械操作器, 运动分析, 雅可比矩阵

中图分类号 TH112.1, TH113.22

1 问题的提出

悬伸操作器是工程机械的一个重要的组成部分, 它直接反映工程机械的功能, 而且也是工程机械分类和开发产品的一个最主要的因素。图 1, 2, 3 为几种带悬伸操作器的工程机械。例如在一台液压履带式挖掘机上, 仅变化其操作器, 就很明显的扩大其功能, 甚至可以开发出新的机型。事实上, 目前悬伸操作器的结构型

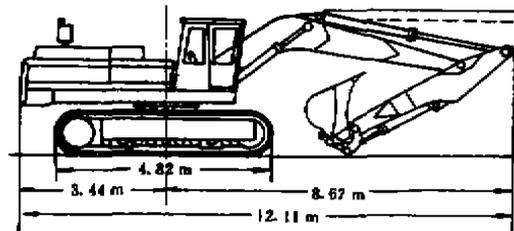


图 1 挖掘机

式很多, 仅液压挖掘机的可换工装就有七十余种^[2], 可以进行挖、装、填、夯、抓、刨、吊、钻等多种工作。因此, 努力寻求对各种型式的悬伸操作器的可靠的、高效的设计和计算及评估方法是十分必要的。

近些年来, 我国引进了许多国外的工程机械产品, 很多工厂在对引进产品的消化和国产化方面做了大量的有成效的工作。然而, 对引进产品的真正消化, 必须对其工作性能进行理论分析和评定, 以便从中吸取其先进性, 最后达到赶超先进产品的目的, 而在这方面目前还很不足。作为工程机械的一个重要组成部分的悬伸操作器, 其性能的好坏在一定程度上能反映整机性能的好坏, 因此, 以悬伸操作器作先导, 通过对它的运动和动力特性的分析研究,

* 收稿日期: 1994-01-18.

张荣瑞, 男, 1927 年生, 教授, 重庆建筑大学机电工程学院(630045).

找出对操作器性能的分析 and 评估方法,对今后我国自行设计先进的工程机械有着重要的实际意义。

为此,首先对悬伸操作器的运动学进行分析与研究。

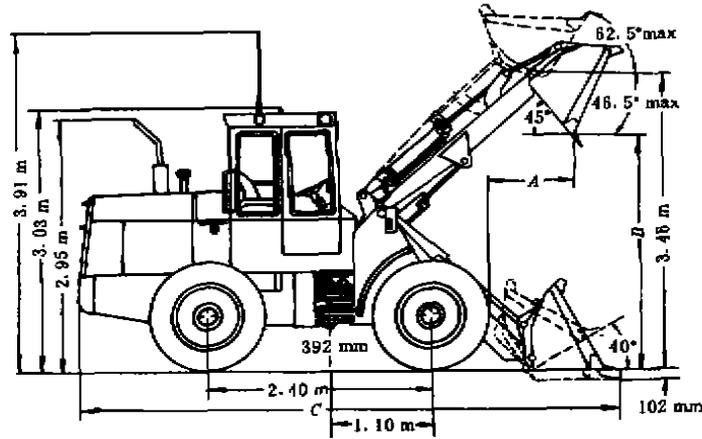


图2 装载机

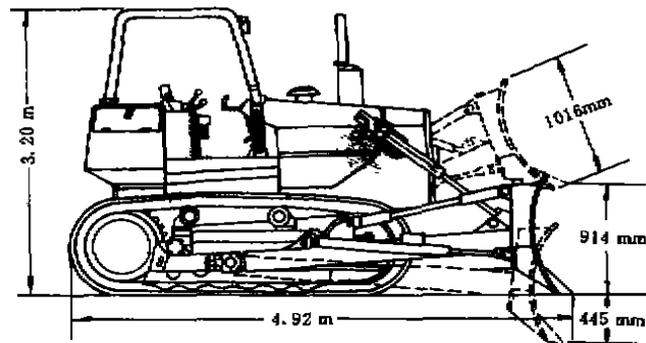


图3 推土机

2 比较与设想

目前,国内、外都在努力探求悬伸操作器的一种通用的、高效的分析方法。我们用机器人的理论进行了研究,并提出了一系列全新的计算方法。为此,首先把悬伸操作器和工业机器人作如下比较。从功能上看,工程机械悬伸操作器所能实现的功能,工业机器人都可以实现,区别的只是悬伸操作器要求操作器末端有较大的有效工作力,自由度较少,定位精度要求较低;而工业机器人操作器末端不但要求有一定的有效工作力,而且严格地要求操作器末端有精确的工作位姿,自由度较多,而对定位精度要求较高。由此可见,悬伸操作器功能少,要求

低,用机器人理论分析更容易实现。从结构上分析,工程机械悬伸操作器均具有多自由度的开式主结构链,环绕开式主链有各式各样的闭环驱动机构,像正铲、伸缩臂及捞臂液压挖掘机等,在结构上与工业机器人极为相似,但结构相对简单,为平行轴机构,且常用闭环驱动机构,而工业机器人结构复杂,小型工业机器人多用纯开环结构,只有持重较大的大、中型机器人的前部关节才采用闭环机构。通过以上比较可以得出结论:工程机械悬伸操作器不论从功能上和结构上均可视为一种简单的工业机器人,因而用机器人空间机构理论来分析悬伸操作器的空间运动和动力状态是有可能的。然而,悬伸操作器和工业机器人不是完全相同,因此用机器人理论研究其运动学时,根据其特点作如下分析:由于悬伸操作器是一种开式链和闭式链相结合的混合链,且其中多自由度的开式链为主结构链、环绕开式主链有各式各样的闭环驱动机构,这使得悬伸操作器的运动分析难度大为增加。从以往的文献中可知,混合链操作器的运动和动力建模,大多数采用将闭环机构在非主动关节拆开的方式,闭环机构的运动关系用运动约束方程来代替,这种方法不但扩大了运动和动力方程的规模,增大了方程求解的计算量,而且当机构复杂时,尤其是机构的广义自变量之间相互独立时,机构的运动及动力方程的系数矩阵容易出现病态,增加了方程的求解难度,甚至有时还会出现无解。为了克服上述缺点,在建立悬伸操作器运动状态计算机仿真模型时,提出下列设想:将悬伸操作器分解为开式结构主链和相互独立的闭式驱动机构,利用机器人空间机构学理论来研究开式结构主链,闭环驱动链的运动关系直接应用平面机构学理论来描述,两者之间的关系以关系矩阵来描述。

3 分析与例证

根据上面的设想,现以某一液压挖掘机的悬伸操作器为例进行分析与论证。

3.1 液压挖掘机悬伸操作器的机构分析

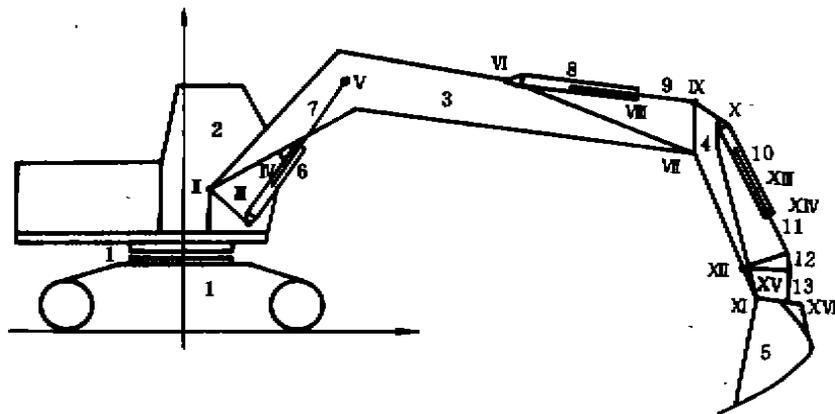


图 4 反铲液压挖掘机结构示意图

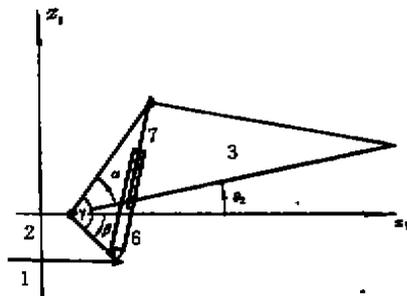


图5 动臂驱动机构

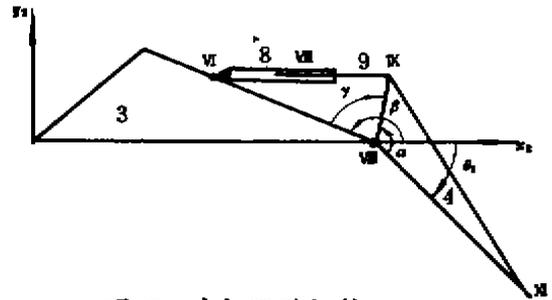


图6 斗杆驱动机构

图4是一台反铲液压挖掘机的结构示意图,图中的阿拉伯数字为构件标示符,罗马数字为关节标示符。在图中可见:该机的悬伸操作器是由机体1、转台2、动臂3、斗杆4、铲斗5铰接而组成的开式主链和由杆件3~13组成的三组闭环驱动机构所组成。这三组闭环驱动机构分别为:由构件2,3,7,6,2构成的动臂驱动机构,其示意图如图5所示,由构件3,8,9,4,3构成的斗杆驱动机构,其示意图如图6所示;和由构件4,10,11,12,13,5,4六杆组成的铲斗驱动机构,其示意图如图7(a)所示。而铲斗驱动机构又可分解为二个串联的四杆机构,它们是由构件4,10,11,12,4组成的油缸四杆机构(见图7(b))和由构件4,12,13,5,4组成的四连杆机构(见图7(c))。

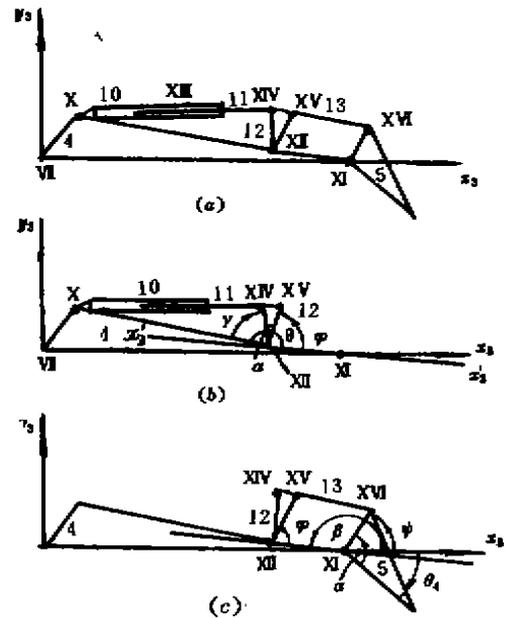


图7 铲斗驱动机构

3.2 闭环驱动机构的运动分析

工程机械悬伸操作器闭环驱动机构的形式是多种多样的,但大多数为伸缩关节式单自由度平面四杆机构,回转关节式单自由度平面四杆机构,或者是以上两种机构组合而成的平面多杆机构。本例的驱动机构属于前两种,现分别对其运动特性进行分析研究。

3.2.1 伸缩关节式平面四杆机构的运动分析

比较图5,6和7(b)可以看出,以上三图具有相类似的结构形式,都是由于油缸的活塞伸缩量的变化而引起输出角 θ_2 、 θ_3 和 φ 的变化,这些机构均可应用平面机构学的理论求出它的运动位置、速度和加速度。现设角 γ 的两个邻边分别为 l_{21} 和 l_{22} ,其对边为 d ,对于图5,其运动规律可描述为:

$$\left. \begin{aligned} \theta_2 &= \cos^{-1}[(l_{21}^2 + l_{22}^2 - d^2)/2 \cdot l_{21} \cdot l_{22}] - \beta - \alpha \\ d_2 &= \text{SQRT}[l_{21}^2 + l_{22}^2 - 2 \cdot l_{21} \cdot l_{22} \cdot \cos(\theta_2 + \beta + \alpha)] \\ \theta_3 &= k_{21} \cdot d_2 \\ \theta_3 &= k_{21} \cdot d_2 + k_{22} \cdot d_1 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} k_{21} &= \frac{d_2}{l_{21} \cdot l_{22} \cdot \sin(\theta_2 + \beta + \alpha)} \\ k_{22} &= \frac{k_{21}}{d_2} \cdot \frac{k_{21}^2}{\lg(\theta_2 + \beta + \alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对于图 6 和图 7(b) 也可按上述方法分别求得 $\theta_3, \dot{\theta}_3, \ddot{\theta}_3$ 和 $\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$.

3.2.2 回转关节式平面四杆机构的运动分析

为了方便地应用显式表示机构的运动规律, 分别用 φ, ψ 的半角正切: $u = \lg \frac{1}{2}\varphi, v = \lg \frac{1}{2}\psi$ 代替 φ 和 ψ 作为机构的输入和输出变量(见图 7(c)), 根据文献[5]的结论并进行推导, 可得出:

$$\left. \begin{aligned} \theta_4 &= 2 \cdot \lg^{-1}(u) + \beta - \alpha - \pi \\ \dot{\theta}_4 &= k_{45} \cdot \dot{u} \\ \ddot{\theta}_4 &= k_{45} \cdot \ddot{u} + k_{46} \cdot \dot{u}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 k_{45}, k_{46} 是推导过程中所求得的系数。上式也反映了铲斗摆角的速度和加速度也是铲斗驱动油缸活塞伸缩量的函数。

3.3 纯开链操作器的运动分析

图 8 为液压挖掘机开链操作器的示意图。这里可以直接利用机器人机构运动学的理论^{[1][4]}对其运动进行分析, 由此求得操作器末端点 Q 的位姿、速度和加速度。

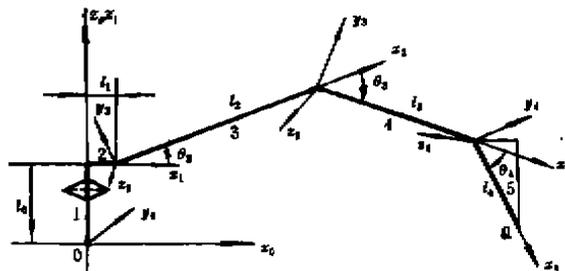


图 8 液压挖掘机开链操作器示意图

Q 点在 O 坐标系内的位姿综合描述为:

$$Q_0 = \begin{bmatrix} l_1 \cdot c_1 + l_2 \cdot c_1 \cdot c_2 + l_3 \cdot c_1 \cdot c_{23} + l_4 \cdot c_1 \cdot c_{234} \\ l_1 \cdot s_1 + l_2 \cdot s_1 \cdot c_2 + l_3 \cdot s_1 \cdot c_{23} + l_4 \cdot s_1 \cdot c_{234} \\ l_0 + l_2 \cdot s_2 + l_3 \cdot s_{23} + l_4 \cdot s_{234} \\ \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $C_i = \cos\theta_i$, $S_i = \sin\theta_i$, $S_{i,j} = \sin(\theta_i + \theta_j)$,
 $C_{i,j} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $S_{i,j,k} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$,
 $C_{i,j,k} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$.

l_i, θ_i 如图所示, $i = 1, 2, 3, 4$.

操作器末端 Q 点的速度, 通过对式(3) 直接求导得到:

$$\dot{Q}_0 = \begin{bmatrix} -(l_1 + b_1) \cdot s_1 \cdot \dot{\theta}_1 - a_1 \cdot c_1 \cdot \dot{\theta}_2 - a_2 \cdot c_1 \cdot \dot{\theta}_3 - a_3 \cdot c_1 \cdot \dot{\theta}_4 \\ (l_1 + b_1) \cdot c_1 \cdot \dot{\theta}_1 - a_1 \cdot s_1 \cdot \dot{\theta}_2 - a_2 \cdot s_1 \cdot \dot{\theta}_3 - a_3 \cdot s_1 \cdot \dot{\theta}_4 \\ b_1 \cdot \dot{\theta}_2 + b_2 \cdot \dot{\theta}_3 + b_3 \cdot \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $a_1 = l_2 \cdot s_2 + l_3 \cdot s_{23} + l_4 \cdot s_{234}$

$a_2 = l_3 \cdot s_{23} + l_4 \cdot s_{234}$

$a_3 = l_4 \cdot s_{234}$

$b_1 = l_2 \cdot c_2 + l_3 \cdot c_{23} + l_4 \cdot c_{234}$

$b_2 = l_3 \cdot c_{23} + l_4 \cdot c_{234}$

$b_3 = l_4 \cdot c_{234}$

将(4)式写成矩阵形式为:

$$\dot{Q}_0 = \begin{bmatrix} -(l_1 + b_1) \cdot s_1 & -a_1 \cdot c_1 & -a_2 \cdot c_1 & -a_3 \cdot c_1 \\ (l_1 + b_1) \cdot c_1 & -a_1 \cdot s_1 & -a_2 \cdot s_1 & -a_3 \cdot s_1 \\ 0 & b_1 & b_2 & b_3 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \\ = J_0(\theta) \cdot \dot{\theta} \quad (5)$$

式中系数矩阵 $J_0(\theta)$ 是操作器末端 Q 点在基坐标系 O 中的雅可比(Jacobia) 矩阵。

根据矩阵变换理论, 将式(5) 变换便得操作器的反向速度:

$$\dot{\theta} = J_0^{-1}(\theta) \cdot \dot{Q}_0 \quad (6)$$

为了表示方便, 现定义机构的开式结构主链中各活动杆件的自由度称为机构广义主自由度, 由它组成的列阵称为机构的广义主坐标, 即

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$$

而各闭环驱动机构的自由度称为机构的广义副自由度, 由它所组成的列阵称为机构的广义副坐标, 即

$$D = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4]^T$$

其中: θ_i —— 开环主杆 i 的相对转角;

d_i —— 相应驱动油缸的长度。

广义速度 $\dot{\theta}$ 和 D 之间的关系可表示为:

$$\dot{\theta} = KD \quad (7)$$

这里 K —— 速度关系矩阵

现将式(7) 代入式(5), 得

$$\dot{Q}_0 = J_0(\theta) \cdot KD$$

并令

$$JC_0(\theta) = J_0(\theta) \cdot K$$

有

$$\dot{Q}_0 = JC_0(\theta) \cdot D \quad (8)$$

其中 $JC_0(\theta)$ 为包含闭环驱动机构的液压挖掘机悬伸操作器机构的雅可比矩阵。

根据矩阵变换理论, 也可将式(8) 变成:

$$\dot{D} = JC_0^{-1}(\theta) \cdot \dot{Q}_0 \quad (9)$$

Q 点在基坐标系 O 中的加速度 \ddot{Q}_0 可以对式(5)直接求导得到:

$$\ddot{Q}_0 = J_0(\theta) \cdot \ddot{\theta} + \dot{J}_0(\theta) \cdot \dot{\theta} \quad (10)$$

式中 $\dot{J}_0(\theta)$ 是雅可比矩阵 $J_0(\theta)$ 的导数,它是 θ 和 $\dot{\theta}$ 的函数,把它展开并经过一系列的变换,最后得到:

$$\ddot{Q}_0 = JC_0(\theta) \cdot \ddot{D} + JC1_0(\theta) \cdot \dot{D}^2 + JC2_0(\theta) \cdot \dot{D}\dot{D} \quad (11)$$

其中: $JC_0(\theta) = J_0(\theta) \cdot K$

$$JC1_0(\theta) = J_0(\theta) \cdot K1 + J1_0(\theta) \cdot K^2$$

$$JC2_0(\theta) = J2_0(\theta) \cdot K2$$

$$\dot{D}^2 = [\dot{\theta}_1^2 \quad \dot{\theta}_2^2 \quad \dot{\theta}_3^2 \quad \dot{\theta}_4^2]^T$$

$$\dot{D}\dot{D} = [\dot{\theta}_1 \cdot \dot{d}_2 \quad \dot{\theta}_1 \cdot \dot{d}_3 \quad \dot{\theta}_1 \cdot \dot{d}_4 \quad \dot{d}_2 \cdot \dot{d}_3 \quad \dot{d}_2 \cdot \dot{d}_4 \quad \dot{d}_3 \cdot \dot{d}_4]^T$$

根据矩阵变换理论,操作器机构的反加速度为:

$$\ddot{\theta} = J_0^{-1}(\theta) \cdot [\ddot{Q}_0 - JC1_0(\theta) \cdot \dot{D}^2 - JC2_0(\theta) \cdot \dot{D}\dot{D}] \quad (12)$$

$$\ddot{D} = JC_0^{-1}(\theta) \cdot [\ddot{Q}_0 - JC1_0(\theta) \cdot \dot{D}^2 - JC2_0(\theta) \cdot \dot{D}\dot{D}] \quad (13)$$

按上述提供的数学模型,开发了反铲液压挖掘机悬伸操作器运动状态和运动参数的仿真程序,该程序在我院 SIEMENS-7570C 机上通过,也可在 IBM 系列微机上顺利运行,程序框图如图 9 和图 10 所示。

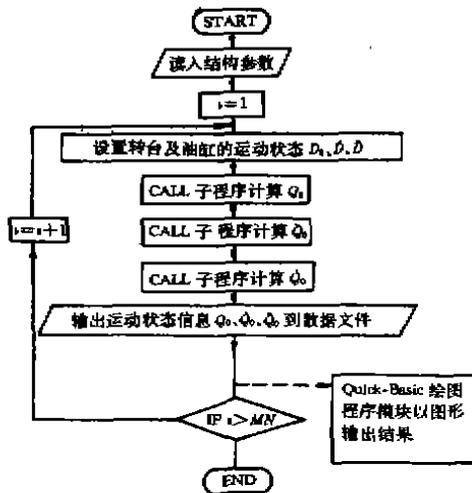


图 9 运动状态仿真程序框图

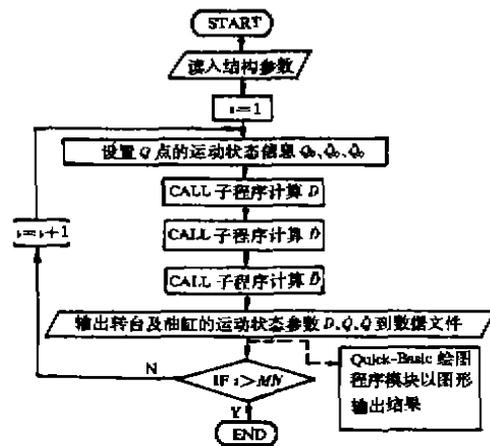


图 10 机构运动状态反向仿真程序框图

根据以上程序,对某一液压挖掘机铲斗运动状态和液压挖掘机的转台、油缸的运动状态反向仿真结果如图 11 和图 12 所示。图 11 中的(a),(b),(c)分别是液压挖掘机铲斗工作点 Q 在已知转台、各油缸运动状态下的位置、速度、加速度在 x, y, z 方向和姿态 α 及其速度 $\dot{\alpha}$ 、加速度 $\ddot{\alpha}$ 的响应情况;图 12 中的(a),(b),(c)分别是已知铲斗运动规律时各驱动油缸的位置、速度、加速度的响应情况。由于在铲斗运动状态分析时,设定转台及各个油缸均为匀速运动,起动时出现速度跳跃,故在铲斗的速度和加速度中也出现跳跃响应,但从图中可以看出,铲斗的速度和加速度响应的最大值均较小,这就说明所分析的挖掘机的机构配置较合理。这点

在反向运动仿真结果中(见图12)得到更充分的证明,当铲斗的连续的运动状态工作时,各个驱动油缸的速度和加速度的响应幅值较小且十分平缓,这正是设计人员所期望的结果。

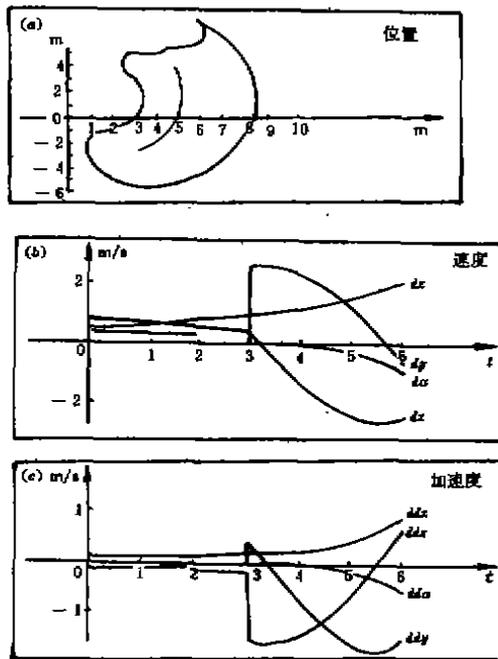


图11 液压挖掘机操作臂 I 作点运动仿真结果

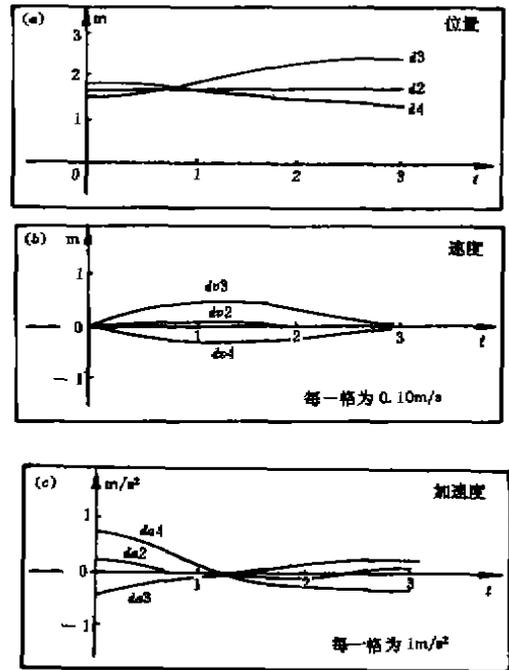


图12 液压挖掘机操作臂 反向运动仿真结果

4 结论与展望

1) 工程机械悬伸操作器是一种开式链和闭式链相结合的混合链。本文根据机器人运动学理论,结合操作器的结构特点,提出了一种混合链操作器运动状态仿真通用的分解建模方法,这一方面有以下几个特点:

简单 将工程机械悬伸操作器分解为开式结构主链和相互独立的闭式驱动机构,这样就复杂的混合链操作器的运动状态的分析,转化为多自由度纯开链操作器机构和单自由度平面四连杆机构,两种比较简单的机构的运动学的问题。而纯开式结构主链的运动状态,可应用机器人运动学理论来分析,而闭式驱动机构的运动状态,可直接应用平面机构理论来分析,两者之间的关系用关系矩阵来描述,这就使混合链操作器运动分析建模大为简化。

高效 对反铲液压挖掘机悬伸操作器中的闭环驱动机构的运动分析,本文采用分解-组合方式,这种方式具有十分广泛的意义,而且此法可以提供完整的机构位置、速度和加速度的显式表达式,故可作为工程机械悬伸操作器常见的闭环驱动机构运动分析和仿真的一种高效的方法。

通用 本文在建立悬伸操作器工作状态的仿真数学模型中,所用的数学方法具有通用性,因而这种建模方法具有普遍意义。对于不同结构形式的操作器,仅需构造机构的广义主坐标 Θ 和广义副坐标 D 之间的关系矩阵 $K, K1, K2$,即可快速地建立操作器机构的工作状态

仿真模型。

准确 采用本文所提供的建模方法,可以方便地构造出操作器机构工作状态的显式仿真模型,使得仿真过程准确、迅速。这是以往建模中多采用的数值算法所达不到的。

2) 在对悬伸操作器进行运动分析的基础上,针对反铲液压挖掘机开发了其操作器的正向和反向运动状态仿真软件,这可为设计人员在设计阶段准确地了解操作器机构的工作情况,为操作器的设计提供很好的数据。

3) 本文在运动分析中,构造出液压挖掘机开式和闭式混合链操作器的混合雅可比矩阵 $JC_0(\theta)$ 。这不但对评价操作器的操作性能非常重要,而且由于混合雅可比矩阵具有运动分析和力分析的同源性^[3],这对进一步对操作器进行动力分析时,可直接利用混合雅可比矩阵直接构造出操作器的动力模型,这将大大减少混合链操作器的动力建模难度,提高动力模型的运算效率,故混合雅可比矩阵具有很好的开发应用价值。

4) 本文利用机器人理论对工程机械悬伸操作器运动分析的更大意义是:在这基础上可进一步分析悬伸操作器的工作空间、工作灵活性和操作性能,并由此提出相应的工作性能的评价指标;还可对操作器进行运动轨迹规划,为我国工程机械操作器向着多样化、自动化方向发展建立理论基础。

参 考 文 献

- 1 约翰·克雷格著,苏仲飞等译. 机器人学导论. 西安:西北工业大学出版社,1987
- 2 曹善华. 单斗液压挖掘机. 北京:中国建筑工业出版社,1989
- 3 黄田. 平面连杆机构运动和力分析的同源性定理及其物理内涵. 机械工程学报,1991,27(2)
- 4 卜永洪,王翼. PUMA-A760 机器人运动学建模. 机器人,1987
- 5 Con a Computationally Efficient Microcomputer Kinematic Analysis of the Basic Lunkage Mechanisms. Mechanism and Machine Theory, Ferdinand Freudenstein and Homayoons Mohammad Beigi, Vol. 21, No. 6, 1986

(编辑:刘家凯)

THE APPLICATION OF THE SPATIALLY MECHANICAL THEORY OF ROBOT

Zhang Rongrui Su Zhangdao Yin Yongfeng

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering)

ABSTRACT A kinematic simulation model has been designed for a cantilever manipulator of hydraulic excavator and the kinematic performance of a 20 t hydraulic excavator's cantilever manipulator is simulated on IBM-PC/XT microcomputer.

KEY WORDS robot, manipulator of engineering machinery, kinematic analysis, Jacollan matrix