

# 工程机械臂系统结构动力学特性分析

武玉霞

(许家湖镇人民政府 山东 临沂 276400)

**摘要:** 随着经济水平的提升和科技的迅猛发展,人们对工程机械提出了更高的要求,为了保证工程机械符合现代社会发展的需要,应全面对工程机械展开分析。基于此,本文以工程机械臂系统为研究对象,通过有限元分析的方式,对其结构动力学特性展开了研究,为研制出更好的工程机械臂提供思路。

**关键词:** 工程机械臂; 动力学特性; 刚柔耦合动力学分析

## 1 液压挖掘机机械臂介绍

机械臂是液压挖掘机中的重要组成部分,被广泛应用到建筑、水利等各种工程项目建设当中,对项目的建设具有重要意义。如图1所示,机械臂共由7个部分构成,分别为:①动臂升降机,用于控制动臂的上升与下降;②铲斗收放,用于对铲斗收回与放下进行控制;③铲斗卸载,用于控制铲斗的装载与卸料;④动臂液压缸伸缩,用于控制液压缸的运行;⑤斗杆液压缸收缩,用于控制斗杆液压缸的运行;⑥铲斗液压缸伸缩,用于控制铲斗液压缸的运行;⑦动臂,用于调节转台的位置(如图1所示)。在7个部分的共同协作下,机械臂可以完成各种工作。

## 2 刚柔多体动力学分析

### 2.1 运动坐标系的构建

根据挖掘机机械臂的结构构成,臂杆运动时通过液压缸控制。整个设备中,由6个元件构成,分别为动臂、斗杆、铲斗及各自对应的液压缸。臂架采用的是Bernoulli梁,在动臂当中,划分成 $I_1$ 与 $I_2$ 两个模块, $I_3$ 表示斗杆。在机械臂的基座处,设置出远点 $O$ ,在 $O_1$ 与 $O_2$ 处,构建出相应的广义坐标(图2),即:

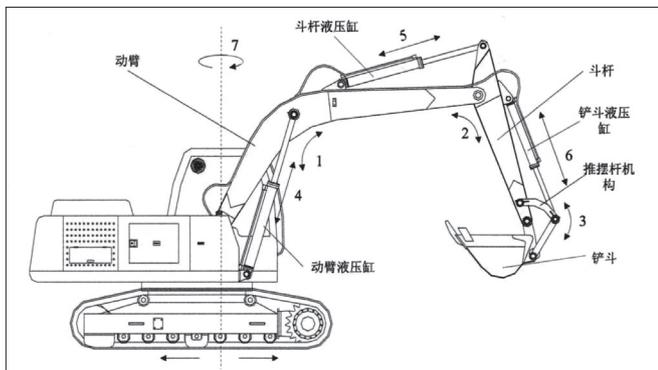


图1 液压挖掘机机械臂结构图

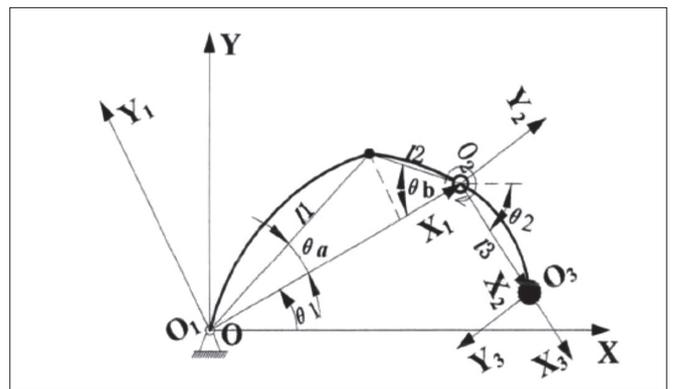


图2 机械臂的坐标系

$$\begin{cases} \sum_1 = O_1x_1y_1 \\ \sum_2 = O_2x_2y_2 \end{cases} \quad (1)$$

假设:  $\eta = [\theta, q^1, \theta_2, q^2]^T$  为坐标向量,  $\dot{\eta} = [\dot{\theta}, \dot{q}^1, \dot{\theta}_2, \dot{q}^2]^T$  表示速度向量。

### 2.2 动力学模型的构建

在上述坐标向量方程  $\eta$  内,假设 Lagrange 函数  $L=T-U-V$ , 根据机械臂系统具体情况, 带入相关参数, 能够得到下述公式:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial \eta} \right) = Q, \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

进一步转换后, 能够得到:

$$M \ddot{\eta} + M \dot{\eta} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial M}{\partial \dot{\eta}} \right)^T \dot{\eta} + K \eta + \frac{\partial M}{\partial \eta} = Q_k \quad (3)$$

其中,  $Q_k$  为广义上的坐标力, 由虚功原理可知, 能够推导出驱动运行时的功率, 即:

$$\begin{aligned} \delta_{\dot{\eta}} = & \tau_2 \delta \left[ \theta_1 + \frac{\partial \mu_2}{\partial x_1} \Big|_{x_1 = \frac{a_{12}}{\cos \phi}} \right] - \tau_1 \delta \left[ \theta_1 + \frac{\partial \mu_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1 = \frac{a_{12}}{\cos \phi}} \right] + \tau_3 \delta \left[ \theta_2 + \frac{\partial \mu_3}{\partial x_3} \Big|_{x_3 = a_{32}} \right] \\ & - \tau_2 \delta \left[ \theta_1 + \frac{\partial \mu_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1 = \frac{a_{12}}{\cos \phi}} \right] + m_p g l_3 \delta \tau_2 \delta \left[ \theta_1 + \frac{\partial \mu_3}{\partial x_2} \Big|_{x_1 = l_3, \cos \theta_2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $u$  为各段的模态方程, 假设机械臂运行时, 主要通过液压缸驱动, 由此, 则可推导出广义上的列阵, 即:

$$Q_k = \left[ \tau_2 - \tau_1, \frac{\pi}{L \cos \theta_b} \tau_2 - \frac{\pi}{L \cos \theta_a} \tau_1, \tau_3 - \tau_2, \frac{\pi}{l_3} \tau_3 - \frac{\pi}{L \cos \theta_b} \tau_2 \right] \quad (5)$$

对上述方程整理后, 能够得到机械臂的多体动力学矩阵, 具体为:

$$\begin{cases} m_{\theta\theta} \ddot{\theta} + m_{\theta q} \ddot{q} + v_{\theta\theta} \dot{\theta}^2 + D_q \dot{\theta} = Q_\theta \\ m_{qq} \ddot{q} + m_{q\theta}^T \ddot{\theta} + v_{q\theta} \dot{\theta}^2 + K_{qq} q = Q_q \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $m_{\theta\theta}$ 、 $m_{\theta q}$ 、 $m_{qq}$  表示刚度方程,  $v$  表示速度的二次项,  $D$  表示一次项。

### 2.3 灵敏度分析

对液压挖掘机动力学特性的分析, 主要是确保整个机械臂性能良好, 符合整个设备运行的要求, 其中, 核心问题为: 明确设计变量对动态特性的影响程度。为了达到这一目的, 则需要采用动力学特性灵敏度分析的方式, 通过计算特性参数特征值  $\lambda$ 、特性向量  $\phi$  等参数的变化率, 即特征值灵敏度  $\partial\lambda/\partial p_m$  与  $\partial\phi/\partial p_m$ , 均表示特征灵敏度, 其中,  $p_m$  表示结构的各个参数值。

假设: 在机械臂结构当中, 第  $i$  阶模态特征值  $\lambda_i$  对应的特征向量是  $\phi_i$ , 由此, 可得到对应的特征函数, 即:

$$K\phi_i = \lambda M\phi_i = \omega_i^2 M\phi_i \quad (7)$$

对于该特征函数来说, 符合下述条件:

$$\begin{cases} (K - \lambda_i M)\phi_i = 0 \\ \phi_i^T M\phi_i = 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $K$  表示在第  $n$  阶函数当中, 所存在的刚度矩阵;  $M$  表示在第  $n$  阶函数当中, 所存在的质量矩阵;  $\omega_i$  表示在第  $i$  阶函数当中, 所具有的频率值。假设: 在整个函数内, 存在特征值互异的问题, 同时符合以下排列:

$$0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 \cdots < \lambda_n \quad (9)$$

通过对上述公式的计算, 能够推导出:

$$\left( \frac{\partial K}{\partial p_i} - \frac{\partial \lambda_i}{\partial p_i} M - \lambda_i \frac{\partial M}{\partial p_i} \right) \phi_i + (K - \lambda_i M) \frac{\partial \phi_i}{\partial p_i} = 0 \quad (10)$$

$$2\phi_i^T M \frac{\partial \phi_i}{\partial p_i} + \phi_i^T \frac{\partial M}{\partial p_i} \phi_i = 0 \quad (11)$$

对上述公式进行转换后, 能够得到灵敏度方程, 即:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial p_i} = \phi_i^T \frac{\partial K}{\partial p_i} \phi_i - \lambda_i \phi_i^T \frac{\partial M}{\partial p_i} \phi_i \quad (12)$$

对于该方程来说, 应符合下述条件:

$$(K - \lambda_i M) \frac{\partial K}{\partial p_j} = b_i, \phi_i^T M \frac{\partial \phi_i}{\partial p_j} = -\frac{1}{2} \phi_i^T M \frac{\partial M}{\partial p_j} \phi_i \quad (13)$$

其中, 
$$b_i = \left( \frac{\partial \lambda_i}{\partial p_j} M - \frac{\partial K}{\partial p_j} + \lambda_i \frac{\partial M}{\partial p_j} \right) \phi_i \quad (14)$$

由此可知, 该方程为隐式计算方程, 同时, 对于  $(K - \lambda_i M)$  来说, 属于奇异矩阵, 使得该方程运算难度较高。

针对这一问题, 本研究对该方程进行了优化, 从而得到如下所示方程:

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial p_j} = \frac{1}{2\omega_j} \left( \phi_j^T \frac{\partial K}{\partial p_j} \phi_j - \omega_j^2 \phi_j^T \frac{\partial M}{\partial p_j} \phi_j \right) \quad (15)$$

其中,  $\omega$  为频率值,  $\phi_j$  为振型值, 由此可以发现, 在机械臂性能参数灵敏度方面, 与质量、阻尼、刚度矩阵等存在相关性。

对于质量与刚度的灵敏度来说, 通过中心差分方程推导出:

$$\frac{\partial [M]}{\partial p_i} = \frac{[M(p_i + \Delta p_i)] - [M(p_i)]}{\Delta p_i} \quad (16)$$

$$\frac{\partial [K]}{\partial p_i} = \frac{[K(p_i + \Delta p_i)] - [K(p_i)]}{\Delta p_i} \quad (17)$$

通过上述公式的运算, 即可推导出机械臂模型的灵敏度。

### 2.4 刚柔耦合动力学数值求解

本文选择的挖掘机运行时, 由三个液压缸进行驱动, 其中在初始角度方面,  $\theta_1$  为 1.36rad,  $\theta_2$  为 0.85rad, 在角速度方面,  $\dot{\theta}_1 = 0, \dot{\theta}_2 = 0$ ; 机械臂动作流程是: 控制动臂回缩, 使其处于地面特定高度处, 时间是 1s, 然后在斗杆与铲斗配合下完成挖掘工作, 整个时间是 3s (见图 3)。

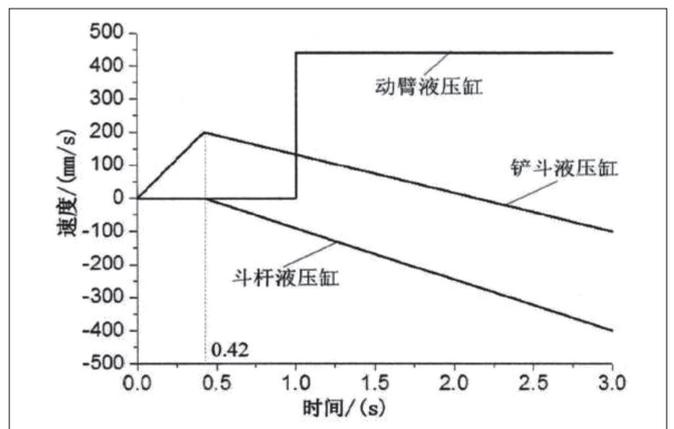


图 3 液压缸运行信号

对于该挖掘机来说, 下表为主要参数。通过 Matlab 软件, 可构建出相应的三维模型, 其中, 步长设定成 0.05s, 由此, 即可推导出机械臂的各种图像。

通过对图形分析可以发现, 在机械臂运行模态影响因素方面, 铰点位置是最关键的因素, 相对于其他因素来说, 对机械臂运行的影响更加显著。对于姿态角来说, 主要处于 0 刻度线的下方, 由此表示, 液压缸伸长时, 频率在不断降低; 对于机械臂的固有频率来说, 姿态角越低, 频率越稳定, 且斗杆姿态角变化时, 固有频率也会出现较大的变化。对于斗杆摆角来说, 也与固有模态存在紧密联系。综合分析后发现, 机械臂响应表现为明

(下转第 46 页)

当前该技术在控制领域的应用情况来看,依然存在诸多不足之处,需要进一步完善。本文的研究是基于自适应控制技术的基本介绍,分析自适应控制技术的情况,进一步探讨了自适应控制在太阳能电池阵列模拟器以及机械臂系统中的应用,以期为进一步研究提供参考。

参考文献:

[1] 郑洪波, 杨德权, 黄志伟, 等. 基于模型实时辨识自适应控制算法的时变机械系统振动主动控制 [J]. 振动与冲击, 2020, 039(15):68-69.

[2] 张建军, 吴中华, 刘群坡, 等. 主从机械手遥操作双边自适应阻抗控制策略 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 054(6):91-92.

[3] 李雨田. 仿生机器人模糊自适应控制系统设计研究 [J]. 工业加热, 2020, 49(4):3.

[4] 王刚, 贺乃宝, 高倩, 等. 基于自适应模糊递归控制的机器手臂位置跟踪研究 [J]. 制造业自动化, 2020, 042(8):47-48.

[5] 李德昀, 徐德刚, 桂卫华. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制 [J]. 控制与决策, 2021, 036(6):13-14.

[6] 易星, 陈军, 缪小冬. 基于自适应迭代学习的机械手轨迹跟踪控制研究 [J]. 电气传动, 2020, 050(3):66-67.

[7] 孙洪敏. 采煤机自适应调高控制系统的优化研究 [J]. 机械管理开发, 2021, 036(2):36-37.

[8] 谭贵林. 自适应控制在电力系统继电保护中的应用 [J]. 电力系统装备, 2021, (14):25-26.

作者简介: 关猛 (1975.10-), 男, 汉族, 山西长治屯留县人, 硕士研究生, 总经理, 研究方向: 电力系统自动化。

(上接第43页)

表 挖掘机主要参数

构件名称	长度 (m)	质量 (kg)	铰点位置 (m)	转角数据 (°)
1	$l_1=1.995$	$m_1=26678$	$a_{01}=0.316$ $a_{11}=0.152$ $a_{12}=1.996$	$\theta_a=54^\circ$
	$l_2=1.700$	$m_2=285.817$	$a_{22}=1.71$	
2	$l_3=1.945$	$m_3=503.967$	$a_{31}=0.365$ $a_{32}=0.215$ $a_{33}=1.732$	$\theta_c=124^\circ$
3		$m_p=54$		

显的非线性, 模态振级是  $10^{-2}m$ , 是以刚性响应为基础的小幅振动; 在竖直方向上, 会产生最大的震动, 所以说, 一阶固有频率对机械臂的震动影响最大。

2.5 刚柔耦合动力学仿真分析

刚柔耦合动力学仿真分析时, 其流程为: 构建中性文件 .MNF → 导入 ADAMS 模型 → 模拟机械臂中的各部件 → 设定柔性体 → 仿真分析 → 结果观察。

本研究当中, 选择动臂与斗杆作为研究对象, 在 NASTRAN 软件内, 构件出动臂模型, 设置相应属性值, 其中, 材料选择的是 16Mn, 杨氏模量是  $2.1 \times 10^5 MPa$ ; 泊松比是 0.275, 密度是  $7870kg/m^3$ 。之后通过 ADAMS 软件内的 Rigid to Flex 功能, 构建出相应的 ADAMS 模型, 并自动生成对应的中性文件 .MNF, 该文件内存在部件的质量、频率、规格等数据。最后, 上述模型与文件导入到仿真软件内, 由仿真软件构建出相应的运动模型。通过该模型观察可知, 对于刚柔模型来说, 与刚性模型的工作状态保持一致, 但速率变化更加明显, 因而对机械臂动态性能的影响更大。此外, 还能够发现, 液

压挖掘机柔性机械臂在标准挖掘过程中各动臂与斗杆的唯一与速度的相应变化区域保持一致, 两者误差小于 0.1, 由此表示, 该动力学特性分析是合理的。

3 结语

综上所述, 工程机械臂设计时, 采取科学有效的动力学特性分析方法, 可准确了解机械臂的具体情况, 有利于机械臂的设计与制造。而动力学仿真分析则是一种较为良好的分析方法, 通过该方法的应用可得到非常精准的结果, 基本与实际情况相同。

参考文献:

[1] 孙强. 探究工程机械臂的系统结构动力学及其特性 [J]. 内燃机与配件, 2020, 08(02):03.

[2] 刘磊, 朱兴龙, 尹珺瑶. 基于 4 自由度操作臂无冲击轨迹规划及动力学仿真分析 [J]. 机械传动, 2020, 44(04):07.

[3] 李彬, 张磊, 曹跃云. Alford 力作用下计及叶片振动的转子-轴承系统动力学特性分析 [J]. 船舶力学, 2020, 24(01):10.

[4] 杨立欢, 陈惠贤. 关节铰接双面接触摩擦对医用机械臂影响分析 [J]. 机械与电子, 2020, 08(15):125.

[5] 张玉玲, 谷勇霞, 赵杰亮, 等. 机械臂臂杆刚度主动控制下的末端振动特性研究 [J]. 力学学报, 2020, 52(04):985-995.

作者简介: 武玉霞 (1981.01-), 女, 汉族, 山东临沂人, 专科, 助理工程师, 研究方向: 机械工程。