

JZ-3 型水轮机修复机器人动力学建模

舒庆¹, 朱捷², 张晓光²

1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 哈尔滨 150080

2. 黑龙江科技学院数力系, 哈尔滨 150027

摘要 JZ-3 是专门用于修复被气蚀和磨损的水轮机转轮的机器人, 由在导轨上移动的小车、三节机械臂和两个转动关节组成, 有包括 1 个移动和 5 个转动的 6 个自由度。本文基于拉格朗日方程的功能平衡法, 构建了 JZ-3 机器人的动力学模型, 对其中的惯量项、重力项和雅可比矩阵等参量进行了深入分析, 建立了相应的算法, 为实现机器人力的自适应控制奠定了基础, 并对 Lg 算式进行了修正。

关键词 JZ-3 机器人; 动力学; 惯量; 重力; 雅可比矩阵

中图分类号 TP242.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)02-0070-03

Dynamic Modeling of Robot for Repairing Hydraulic Turbines

SHU Qing¹, ZHU Jie², ZHANG Xiaoguang²

1. College of Mechanical & Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China

2. Department of Mathematics and Mechanics, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China

Abstract JZ-3 Robot is used for welding and grinding for repairing hydraulic turbines damaged by cavitation and wear in hydro power plants. For the special working conditions, JZ-3 Robot should meet some requirements, such as small volume, light weight, easy movement from one stream channel to another. The structure of JZ-3 Robot is carefully analyzed with its six degrees of freedom, including the track, moving car, arm of three degrees of freedom, wrist of two degrees of freedom. A dynamic model of JZ-3 robot is built, based on Lagrange Equation. The terms of inertia gravity and Jacobian matrix are analyzed and calculated, which can provide a basis for the self-adapted control of the forces of the robot and also for motion planning and motion simulation.

Keywords JZ-3 robot; dynamics; inertia; gravity; Jacobian matrix

0 引言

众所周知, 机器人的控制问题与其运动学和动力学问题

密切相关。对于像焊接、搬运和喷涂等作业的机器人, 只需进行位姿控制; 而对于切削、磨光和装配等作业的机器人, 则需进行阻抗控制或柔顺控制^[1-4]。JZ-3 水轮机修复机器人(图 1)是一种多功能机器人, 有 6 个活动杆件: L1~L6; 6 个关节: J1~J6。其中 J1 是平动关节, 实现小车 L1 在导轨上移动。当该机器人进行磨削、等离子切割作业时, 需要将力(力矩)的偏差信号加至位置伺服环节, 以实现力(力矩)的控制。

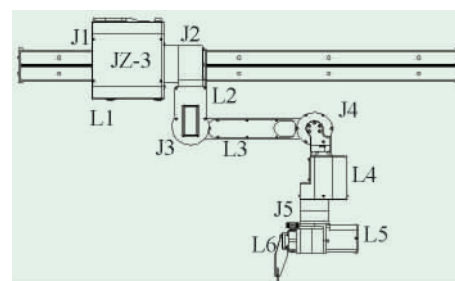


图 1 JZ-3 水轮机修复机器人

Fig. 1 Robot for repairing hydraulic turbines

1 动力学方程的构建

1.1 具有几个连杆的机械手动力方程

关节 3 关于 i 处的力矩方程为^[1]

$$T_i = \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + I_{ai} \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (1)$$

式中, 取 $n=6$; 等式右侧第 1 项为惯量项; 第 2 项为传动装置的等效惯量; 第 3 项为向心力、哥氏力项; 第 4 项为重力项。

1.2 JZ-3 机器人动力学方程

考虑到 JZ-3 机器人的运动速度不高 ($7 \sim 15$ mm/s), 机器

收稿日期: 2008-09-04

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目 (10541042)

作者简介: 舒庆 (中国科协会员登记号: E280701711M), 教授, 研究方向为机械动力学, 电子信箱: shuqing58@yeah.net

手材质为铝合金,谐波减速器位于关节部位,质心可近似认为集中在关节处与关节坐标原点重合,这样式(1)中右侧第2、3项均可忽略,于是JZ-3机器人动力学方程可简化为

$$\begin{cases} T_i = \sum_{j=1}^6 D_{ij} \ddot{q}_j + D_i \\ D_{ij} = \sum_{p=\max i, j}^6 m_p [\dot{r}_p^i \cdot \dot{r}_p^j] \\ D_{ii} = [\bar{P}_p \cdot \bar{P}_p] \\ D_i = {}^{i-1}g \sum_{p=i}^6 m_p {}^{i-1}r_p \\ {}^{i-1}g = [-g^T \cdot 0, g^T \cdot n, 0, 0] \\ g^T = [g_x, g_y, g_z, 0] \end{cases} \quad (2)$$

其中, D_{ij} 为惯量项,当 $i=j$ 时, D_{ii} 称为有效惯量; D_i 为重力项, g^T 为重力矩阵。

2 JZ-3 机器人的动力学分析

2.1 连杆参数和 D-H 矩阵

JZ-3 水轮机修复机器人连杆坐标系如图 2 所示, JZ-3 机器人连杆参数如表 1 所示。

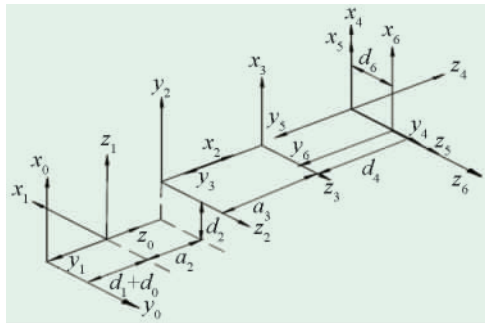


图 2 JZ-3 水轮机修复机器人连杆坐标系
Fig. 2 Link-frame assignment of robot for repairing hydraulic turbines

表 1 JZ-3 机器人连杆参数
Table 1 Link parameters of the JZ-3 robot

连杆	变量	α	a	d	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$
1	0	0°	a_1	d_1	1	0
2	θ_2	90°	a_2	d_2	0	1
3	θ_3	0°	a_3	0	1	0
4	θ_4	-90°	a_4	d_4	0	-1
5	θ_5	-90°	a_5	d_5	0	-1
6	θ_6	0	0	d_6	1	0

JZ-3 机器人的 D-H 矩阵为

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a_0 \\ s_1 & c_1 & 0 & b_0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3T_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -c_5 & s_5 & 0 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_6 & -c_6 & 0 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 ${}^p d_i$ 的计算

以 ${}^{i-1}T_p$ 为基础计算 ${}^p d_i$ 。以 ${}^1 d_1$ 为例。

$$\begin{aligned} {}^1 d_{1x} &= -n_x p_y + n_y p_x = c_1 b_0 + s_1 a_0 \\ {}^1 d_{1y} &= -0_x p_y + 0_y p_x = -s_1 b_0 + c_1 a_0 \\ {}^1 d_{1z} &= -a_x p_y + a_y p_x = 0 \end{aligned}$$

于是

$${}^1 d_1 = (c_1 b_0 + s_1 a_0)i + (-s_1 b_0 + c_1 a_0)j + 0k$$

同理可得

$$\begin{aligned} {}^1 T_2 &\Rightarrow {}^2 d_2 = 0i + 0j - a_1 k \\ {}^0 T_2 &\Rightarrow {}^2 d_1 = c_2 (c_1 b_0 + s_1 a_0)i - s_2 (c_1 b_0 + s_1 a_0)j + (-a_1 + s_1 b_0 - c_1 a_0)k \\ &\vdots \\ {}^1 T_6 &\Rightarrow {}^6 d_2 = [-(c_{23} c_5 + s_{23} s_4 s_5) d_6 + c_4 c_5 (s_{23} d_5 + c_2 a_2 + a_1)]i + \\ &\quad [-s_4 (s_{23} d_5 + c_2 a_2 + a_1)]j + \\ &\quad [(c_{23} c_5 - s_{23} s_4 s_5) d_6 - c_4 c_5 (s_{23} d_5 + c_2 a_2 + a_1)]k \\ {}^0 T_6 &\Rightarrow {}^6 d_1 = [-A (s_4 d_6 - c_1 b_0 - s_1 a_0) + c_4 c_5 (C - s_1 b_0 + c_1 a_0)]i + \\ &\quad [-c_{23} c_4 (s_4 d_6 - c_1 b_0 - s_1 a_0) - s_4 (C - s_1 b_0 + c_1 a_0)]j + \\ &\quad [-B (s_4 d_6 - c_1 b_0 - s_1 a_0) - c_4 c_5 (C - s_1 b_0 + c_1 a_0)]k \end{aligned}$$

式中, $A = c_{23} c_4 c_5 + s_{23} s_4 s_5$; $B = -c_{23} s_4 s_5 + s_{23} c_5$; $C = -c_{23} c_4 d_6 + s_{23} d_5 + c_2 a_2 + a_1$ 。

2.3 有效惯量 D_{ii} 和耦合惯量 D_{ij} 的计算

根据 $D_{ii} = \sum_{p=i}^6 m_p [{}^{i-1} p_{px}^2 + {}^{i-1} p_{py}^2]$ ($i=1, 2, \dots, 6$), 则

$$\begin{aligned} D_{11} &= m_1 [{}^0 p_{1x}^2 + {}^0 p_{1y}^2] + m_3 [{}^0 p_{2x}^2 + {}^0 p_{2y}^2] + \dots + m_6 [{}^0 p_{6x}^2 + {}^0 p_{6y}^2] \\ D_{22} &= m_2 [{}^1 p_{2x}^2 + {}^1 p_{2y}^2] + \dots + m_6 [{}^1 p_{6x}^2 + {}^1 p_{6y}^2] \\ &\vdots \\ D_{66} &= m_6 [{}^5 p_{6x}^2 + {}^5 p_{6y}^2] \end{aligned}$$

根据 $D_{ij} = \sum_{p=\max i, j}^6 m_p [{}^p \dot{d}_i \cdot {}^p \dot{d}_j]$, 则

$$\begin{aligned} D_{12} &= m_3 [{}^2 \dot{d}_1 \cdot {}^2 \dot{d}_2] + m_3 [{}^3 \dot{d}_1 \cdot {}^3 \dot{d}_2] + \dots + m_6 [{}^6 \dot{d}_1 \cdot {}^6 \dot{d}_2] \\ D_{13} &= m_3 [{}^3 \dot{d}_1 \cdot {}^3 \dot{d}_3] + m_4 [{}^4 \dot{d}_1 \cdot {}^4 \dot{d}_3] + \dots + m_6 [{}^6 \dot{d}_1 \cdot {}^6 \dot{d}_3] \\ &\vdots \\ D_{16} &= m_6 [{}^6 \dot{d}_1 \cdot {}^6 \dot{d}_6] \\ &\vdots \\ D_{56} &= m_6 [{}^6 \dot{d}_5 \cdot {}^6 \dot{d}_6] \end{aligned}$$

2.4 重力项 D_i 的计算

根据式(2), 计算 D_i 需先求出 ${}^{i-1}g$ 和 ${}^{i-1}r_p$ 。

2.4.1 计算 ${}^{i-1}g$

可根据 0T_i 计算出 ${}^{i-1}g$ 。

设 $g^T = [g, 0, 0, 0]$, 由式(2)可得

$${}^0 g = [0, g, 0, 0] \Rightarrow {}^0 T_0 \quad i=1$$

$$\begin{aligned} {}^1g &= [s_1g, c_1g, 0, 0] \Rightarrow {}^0T_1 \quad i=2 \\ &\vdots \\ {}^5g &= [(c_1(-c_{23}s_4s_5+s_{23}c_5)-s_1c_4s_5)g, (-c_1(c_{23}s_4s_5+s_{23}c_5)-s_1c_4s_5)g, 0, 0] \\ &\Rightarrow {}^0T_5 \quad i=6 \end{aligned}$$

2.4.2 计算质心矢量

根据 ${}^{i-1}r_p = {}^{i-1}T_p \cdot {}^p r_p$, ${}^p r_p = [0, 0, 0, 1]^T$, 可得

$$\begin{aligned} {}^0r_1 &= {}^0T_1 \cdot {}^1r_p = \begin{pmatrix} a_0 \\ -b_0 \\ d_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad {}^0r_2 = {}^0T_2 \cdot {}^2r_p = \begin{pmatrix} c_1a_1+a_0 \\ s_1a_1-b_0 \\ d_1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ &\vdots \\ {}^0r_6 &= {}^0T_6 \cdot {}^6r_p = \begin{pmatrix} c_1(-c_{23}c_4d_6+s_{23}d_5+c_2a_2+a_1)-s_1s_4d_6+a_0 \\ s_1(-c_{23}c_4d_6+s_{23}d_5+c_2a_2+a_1)+s_1s_4d_6-b_0 \\ -s_{23}c_4d_6-c_{23}d_5+s_2a_2+d_1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ {}^1r_1 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow {}^1T_1 \quad {}^1r_2 = \begin{pmatrix} a_1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow {}^1T_2 \quad {}^1r_3 = \begin{pmatrix} c_2a_2+a_1 \\ -d_3 \\ s_2a_2 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow {}^1T_3 \\ &\vdots \\ {}^4r_6 &= \begin{pmatrix} -d_6 \\ 0 \\ d_5 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow {}^4T_6 \quad {}^5r_6 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d_6 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow {}^5T_6 \end{aligned}$$

2.5 关节加速度计算

关节加速度 $\ddot{q}(t)$ 可表示为机械手末端 (手部) 的线速度 v 和角速度 ω 及其速率的函数^[1], 即

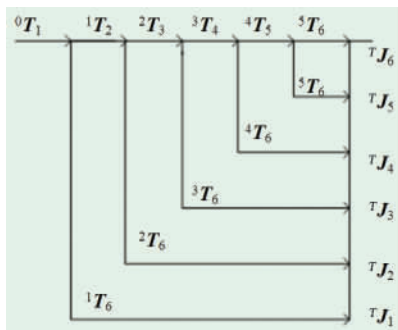


图 3 J_i 和 iT_n 之间的关系图

Fig. 3 Relationship between J_i and iT_n

$$\ddot{q}(t) = J^{-1}(q) \begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} - J^{-1}(q) \dot{J}(q, \dot{q}) J^{-1}(q) \begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于旋转关节, 雅可比矩阵 $J(q)$ 的第 i 列可由下式求得

$${}^T J_{it} = \begin{bmatrix} (p \times n)_z \\ (p \times 0)_z \\ (p \times a)_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad {}^T J_{at} = \begin{bmatrix} n_z \\ 0_z \\ a_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

J_i 和 iT_n 之间的关系如图 3 所示。

由图 2 及式 (4) 可以求得

$$\begin{aligned} T_6 \Rightarrow {}^T J_{i6} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^T J_{a6} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ T_6 \Rightarrow {}^T J_{j5} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_6 \end{bmatrix} \quad {}^T J_{a5} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \theta_6 = 0^\circ \\ &\vdots \\ T_6 \Rightarrow {}^T J_{i1} &= \begin{bmatrix} -c_{23}c_4d_6+s_{23}d_5+c_2a_2+a_1 \\ s_4d_6 \\ -s_{23}c_4d_6-c_{23}d_5+s_2a_2 \end{bmatrix} \\ T_{a1} &= \begin{bmatrix} s_{23}s_4c_5-c_{23}s_5 \\ s_{23}c_4 \\ -s_{23}s_4s_5-c_{23}c_5 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3 结论

本文构建了满足项目技术要求的动力学简化模型, 并对模型中的参量 D_j 、 D_i 和 $\ddot{q}$ 逐一进行了深入的分析, 建立了相应的算法, 为本机器人后续的神经网络模糊自适应控制提供了理论基础, 并对文献 [1] 和 [2] 中的 ${}^{i-1}g$ 算式进行了修正。

参考文献 (References)

- [1] Niku S B. 机器人学导论 [M]. 孙富春, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 105-125.
Niku S B. Introduction to robotics [M]. Sun Fuchun, et al trans. Beijing: Electronics Industry Press, 2004: 105-125.
- [2] 蔡自兴. 机器人学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 91-108.
Cai Zixing. Robotics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 91-108.
- [3] 郭洪红. 工业机器人技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 170-171.
Guo Honghong. Industry robot technology [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006: 170-171.
- [4] 林尚杨. 焊接机器人及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 300-301.
Lin Shangyang. Welding robot and its application [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 300-301.
- [5] 杨萍, 刘晓琴, 张淑珍. 水轮机修复专用机器人逆运动学求解 [J]. 机械设计与制造, 2005(4): 15-16.
Yang Pin, Liu Xiaoqin, Zhang Shuzhen. Machinery Design & Manufacture, 2005(4): 15-16.

(责任编辑 代丽)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在研读相当数量文献资料的基础上, 全面、深入、系统地论述某一方面的问题, 并对所综述的内容进行归纳、分析、评价, 以反映作者的观点和见解。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址: www.kjdb.org; 投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。