

六自由度装校机器人雅可比矩阵的建立及奇异性分析

李 诚¹ 谢志江¹ 倪 卫² 刘 楠²

1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆, 400044

2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900

摘要:针对六自由度装校机器人,通过D-H法建立了各连杆的参考坐标系,给出了装校机器人各连杆与末端执行器的位姿关系,并推导出装校机器人的运动学正解方程。采用微分变换法求得机器人雅可比矩阵并对装校机器人进行了奇异性分析,为装校机器人在实际装校作业环境中的轨迹规划及实时控制提供了理论基础和重要数据。

关键词:装校机器人;末端执行器;雅可比矩阵;奇异性

中图分类号:TP242.3;TH11

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.10.009

Establishment of Jacobian Matrix and Singularity Analysis of a 6-DOF Installing-calibrating Robot

Li Cheng¹ Xie Zhijiang¹ Ni Wei² Liu Nan²

1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400044

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900

Abstract: Aimed at a 6-DOF installing-calibrating robot, coordinate systems of joints were set up and D-H parameters were obtained by using D-H methods. Then the positions of its moving elements and end-effectors with their relationship were presented and the forward kinematic solution were derived. A Jacobian matrix of the installing-calibrating robot was established based on differential methods. And singular values of the Jacobian matrix and the condition numbers of installing-calibrating robot were analyzed. It provides the theoretical basis and important data for the robot trajectory planning and online real-time calculation under actually working environments.

Key words: installing-calibrating robot; end-effector; Jacobian matrix; singularity

0 引言

机器人的运动学分析是性能分析和动力学分析的基础,所以对于一个新型机构来说,运动学分析是机构分析的前提和基础,是进行机器人机构设计的首要任务^[1]。雅可比矩阵在机器人的运动学分析中具有重要地位,机器人的分离速度控制、静力分析、灵活性和可操作度分析等都要用到机器人的雅可比矩阵,因此,机器人雅可比矩阵的准确、快速求解显得尤为重要^[2]。

对于机械手系列机器人来说,奇异性是机械手的重要运动学特性^[3]。机械手奇异位形主要有边界奇异位形和内部奇异位形^[4],边界奇异位形出现在机械手工作空间的边界,只要机械手远离工作空间边界即可避免;内部奇异位形会使可操作性变差,机械手的可行区减少。装校机器人属于机械手系列机器人,当装校机器人操作臂运动到奇异位置时,暂时会失去一个或几个自由度,因而不能保证其在复杂作业环境中的灵活性和避障

性,失去了运动柔性。其末端执行器也无法实现沿某些方向的运动,从而无法完成装校作业任务。同时,即使进行较小的位置调整也会导致某些关节速度趋向无穷大,从而引起操作臂失控,使控制方案无法实现。因此,研究装校机器人奇异性对提高其作业性能具有重要意义。

1 机构综合

装校机器人的功能是将洁净精密光学模块从侧面装入到主体装置上去。通过对装校机器人的作业环境、作业对象和作业全流程的分析,机构应具有较大的工作空间范围、良好的承载能力、较高的刚度、简单的结构形式、简单的运动学正解和反解、机构输出件的位置控制和姿态控制的耦合程度低等特点。因此,需要装校机器人在垂直方向具有最优的工作空间、可操作性 and 避障空间,同时满足运动、位姿等方面性能要求,以满足装校机器人作业过程中的各项指标。依据功能要求设计了由4个转动关节和2个移动关节组成的六自由度装校机器人,其机构简图如图1所示。

收稿日期:2011-05-25

基金项目:国家科技重大专项(RCLF-GL-HT-T01.2.0 (2005)110)

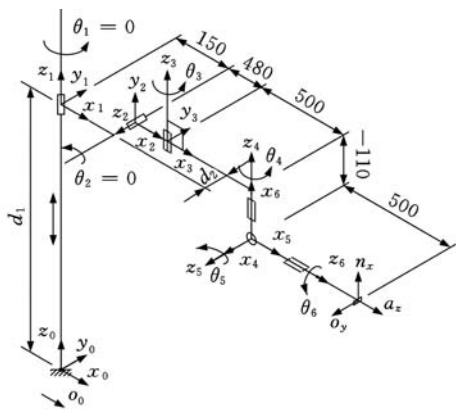


图 1 六自由度装校机器人机构及其杆件坐标系

2 运动学方程的建立

机器人的正运动学问题是已知机器人各个关节的关节角,求末端执行器的位置和姿态。通过对其正运动学方程的研究可以准确描述机器人的各个杆件的位置、方向及位移之间的关系,为机器人的运动控制提供分析的手段和方法,也是建立动力学方程和误差分析模型的基础^[5]。

采用 D-H 法 (Denavit - Hartenberg Matrix)^[4,6-8] 建立装校机器人坐标系并推导机器人的运动学方程。装校机器人 D-H 坐标系如图 1 所示。其基座坐标系 {0} 设于升降丝杆轴线在基座上的投影处,机器人末端连杆关节 6 的坐标系 {6} 建立在关节 4、5、6 的轴线的交点处,工具端部设在被装校作业对象中心处;装校机器人各连杆参数及关节变量如表 1 所示。其中, θ_i 为从 x_{i-1} 轴到 x_i 轴方向绕 z_i 轴旋转的角度; a_i 为从 z_i 轴到 z_{i+1} 轴方向绕 x_i 轴旋转的角度; a_i 为从 z_i 轴到 z_{i+1} 轴沿 x_i 轴测量的距离; d_i 为从 x_{i-1} 轴到 x_i 轴沿 z_i 轴测量的距离。

表 1 连杆参数及关节变量

i	θ_i (rad)	α_{i-1} (rad)	a_{i-1} (mm)	d_i (mm)	关节变量范围
1	0	0	0	d_1	200 ~ 1950mm
2	0	$\pi/2$	150	d_2	-260 ~ 260mm
3	θ_3	$-\pi/2$	480	0	$-7\pi/12 \sim 7\pi/12$
4	θ_4	0	500	-110	$-7\pi/9 \sim 7\pi/9$
5	θ_5	$\pi/2$	0	0	$4\pi/9 \sim 5\pi/9$
6	θ_6	$\pi/2$	0	0	$4\pi/9 \sim 5\pi/9$

连杆变换矩阵 ${}^i_{i-1}T$ 可表示为

$${}^i_{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

装校机器人有 6 个自由度,根据式(1)和表 1

所示的连杆参数,可求得各连杆变换矩阵 ${}^i_{i-1}T$:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 480 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 500 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -110 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, $s_i = \sin\theta_i, c_i = \cos\theta_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 。

将所得各连杆变换矩阵依次右乘,得到装校机器人基座坐标系和末端执行器标系之间总变换矩阵 0_6T :

$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T \quad (2)$$

如果要得到工具端部和基座之间的总变换矩阵 ${}^0_E T$,则需要将 0_6T 右乘以 ${}^6_E T, {}^6_E T$ 为工具端部和末端连杆坐标系间的变换矩阵。即

$${}^0_E T = {}^0_6T {}^6_E T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $(n_x, n_y, n_z)^T, (o_x, o_y, o_z)^T, (a_x, a_y, a_z)^T$ 分别为工具端坐标系 x 轴、 y 轴、 z 轴在基坐标系中的方向矢量; (p_x, p_y, p_z) 为工具端部在基坐标系中的位置。

$$\left. \begin{aligned} n_x &= c_{34}c_5c_6 + s_{34}s_6 \\ n_y &= s_{34}c_5c_6 - c_{34}s_6 \\ n_z &= s_5c_6 \\ o_x &= -c_{34}c_5s_6 + s_{34}c_6 \\ o_y &= -s_{34}c_5s_6 - c_{34}c_6 \\ o_z &= -s_5s_6 \\ a_x &= c_{34}s_5 \\ a_y &= s_{34}s_5 \\ a_z &= -c_5 \\ p_x &= 500c_{34}s_5 + 500c_3 + 630 \\ p_y &= 500s_{34}s_5 + 500s_3 - d_2 \\ p_z &= -500c_5 - 110 + d_1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j) \quad c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j) \\ i = 3, 4, 5, 6; j = 3, 4, 5, 6$$

当各变量的初始值分别取为 $d_1 = 610\text{mm}$, $d_2 = 0$, $\theta_3 = -\pi/2$, $\theta_4 = \pi/2$, $\theta_5 = \pi/2$, $\theta_6 = \pi/2$ 时, 代入式(4) 可得:

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1130 \\ -1 & 0 & 0 & -500 \\ 0 & -1 & 0 & 500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由所得结果可知, 与三维模型在同样状态下的测量值完全吻合, 如图 2 所示, 表明正解结果是正确的。

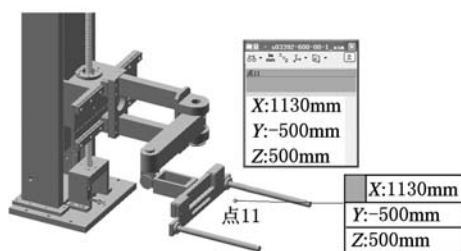


图 2 正解结果验证

3 雅可比矩阵

机器人的雅可比矩阵(Jacobian matrix) J 通常是指从关节空间向操作空间运动速度传递的广义传动比 V 。 V 的表达式为

$$V = \dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (6)$$

式中, \dot{q} 为关节速度矢量; \dot{X} 为操作速度矢量。

雅可比矩阵可以判别机器人的奇异形位, 分析机器人的运动特征和动力学特征, 它是描述机器人特征的重要参量。雅可比矩阵的构造方法有矢量积法、微分变换法、力和力矩递推法、速度递推法^[4, 9-12]。本文采用微分变换法求解装校机器人的雅可比矩阵。

雅可比矩阵 $^T J$ 有 n 列, 第 i 列元素 $^T J_i$ 由 $^i n T$ 决定。

对移动关节 i , 有

$$^T J_i = [n_z \quad o_z \quad a_z \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (7)$$

对转动关节 i , 有

$$^T J_i = \begin{bmatrix} (P \times n)_z \\ (P \times o)_z \\ (P \times a)_z \\ n_z \\ o_z \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_x p_y + n_y p_x \\ -o_x p_y + o_y p_x \\ -a_x p_y + a_y p_x \\ n_z \\ o_z \\ a_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于装校机器人的结构和运动具有以下几个特点: ① 有 6 个关节, 因此雅可比矩阵是 6×6 矩阵; ② 其中 2 个是移动关节(关节 1 和关节 2), 4 个

是转动关节(关节 3 到关节 6)。根据已求得各连杆变换矩阵 $^{i-1} T$ 可得 $^i T$:

$${}^1_6 T = {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T = \begin{bmatrix} C_{34} C_5 C_6 + S_{34} S_6 & -C_{34} C_5 S_6 + S_{34} C_6 & C_{34} S_5 & a_3 C_3 + a_2 + a_1 \\ S_{34} C_5 C_6 - C_{34} S_6 & -S_{34} C_5 S_6 - C_{34} C_6 & S_{34} S_5 & a_3 S_3 - d_2 \\ S_5 C_6 & -S_5 S_6 & -C_5 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_6 T = {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T = \begin{bmatrix} C_{34} C_5 C_6 + S_{34} S_6 & -C_{34} C_5 S_6 + S_{34} C_6 & C_{34} S_5 & a_3 C_3 + a_2 \\ S_5 C_6 & -S_5 S_6 & -C_5 & d_4 \\ -S_{34} C_5 C_6 + C_{34} S_6 & S_{34} C_5 S_6 + C_{34} C_6 & -S_{34} S_5 & a_3 S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_6 T = {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T = \begin{bmatrix} C_4 C_5 C_6 + S_4 S_6 & -C_4 C_5 S_6 + S_4 C_6 & C_4 S_5 & a_3 \\ S_4 C_5 C_6 - C_4 S_6 & -S_4 C_5 S_6 - C_4 C_6 & S_4 S_5 & 0 \\ S_5 C_6 & -S_5 S_6 & -C_5 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_6 T = {}^4_5 T {}^5_6 T = \begin{bmatrix} C_5 C_6 & -C_5 S_6 & S_5 & 0 \\ -S_6 & -C_6 & 0 & 0 \\ S_5 C_6 & -S_5 S_6 & -C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5_6 T = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^6_6 T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则得到各列雅可比矩阵如下:

$${}^T J_1 = \begin{bmatrix} S_5 C_6 \\ -S_5 S_6 \\ -C_5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^T J_2 = \begin{bmatrix} -S_{34} C_5 C_6 + C_{34} S_6 \\ S_{34} C_5 S_6 + C_{34} C_6 \\ -S_{34} S_5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^T J_3 = \begin{bmatrix} (S_4 C_5 C_6 - C_4 S_6) a_3 \\ -(S_4 C_5 S_6 - C_4 C_6) a_3 \\ S_4 S_5 a_3 \\ S_5 C_6 \\ -S_5 S_6 \\ -C_5 \end{bmatrix} \quad {}^T J_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_5 C_6 \\ -S_5 S_6 \\ -C_5 \end{bmatrix}$$

$${}^T J_5 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad S_6 \quad C_6 \quad 0]^T$$

$${}^T J_6 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$$

${}^T J(q)$ 与 $J(q)$ 之间的关系为

$${}^T J(q) = \begin{bmatrix} {}^0_n R^T & 0 \\ 0 & {}^0_n R^T \end{bmatrix} J(q) \quad (9)$$

$${}^0_n R^T = \begin{bmatrix} C_{34} C_5 C_6 + S_{34} S_6 & S_{34} C_5 C_6 - C_{34} S_6 & S_5 C_6 \\ -C_{34} C_5 S_6 + S_{34} C_6 & -S_{34} C_5 S_6 - C_{34} C_6 & -S_5 S_6 \\ C_{34} S_5 & S_{34} S_5 & -C_5 \end{bmatrix}$$

由式(9)可知,所得 ${}^T J(q)$ 与 $J(q)$ 的结果是正确的。至此 $J_1、J_2、\dots、J_6$ 全部求出,于是得到装校机器人的雅可比矩阵。

4 奇异性分析

奇异性的物理解释相当于机器人丧失了一个或多个自由度,数学上用 $J(q)$ 的行列式是否为 0 来判别。因此,雅可比矩阵的奇异性用来定性地描述机器人操作臂的运动学特征。

操作臂的灵活性和运动反解的精度与机械手雅可比矩阵的奇异值有关。当雅可比矩阵的秩 $r(J(q)) < 6$ 时,机械手处于奇异位形。设在任一位置装校机器人雅可比矩阵的秩 $r(J(q)) = 6$,根据矩阵的奇异值分解理论,对雅可比矩阵进行奇异值分解^[13]:

$$J(q) = U\Sigma V \quad (10)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $U \in R^{m \times n}, V \in R^{n \times n}, U, V$ 为正交矩阵; n 为关节数, m 为操作空间维数; σ_i 为雅可比矩阵的第 i 个奇异值,且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0$ 。

另外,条件数 $K(J)$ 也是与雅可比矩阵相关、用于衡量机械手灵活性的重要指标。条件数常用于数值分析中,其计算精度较高,求逆运算的数值稳定性好。对于冗余度机械手,条件数可利用下式计算^[4]:

$$K(J) = \sigma_1 / \sigma_m \quad (12)$$

六自由度装校机器人有 2 个移动关节和 4 个转动关节,由所求出的雅可比矩阵 ${}^T J(q)$ 可知,奇异位形主要受转动关节位置的影响,移动关节不会产生奇异位形,因此主要分析装校机器人各转动关节对奇异位形的影响。在 4 个转动关节变量运动范围内,利用随机取点方法分别得到装校机器人最大奇异值、最小奇异值和条件数,如图 3 ~ 图 5 所示。

根据矩阵奇异值分解理论对装校机器人雅可

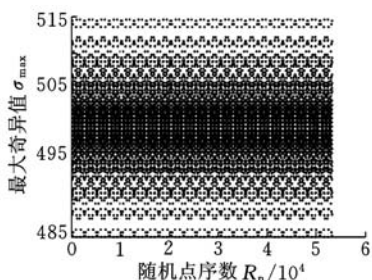


图 3 装校机器人雅可比矩阵最大奇异值分布

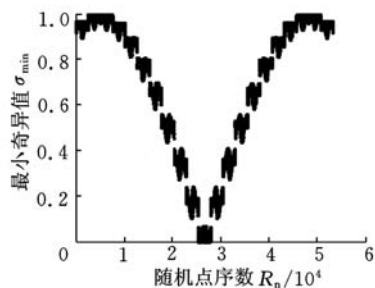


图 4 装校机器人雅可比矩阵最小奇异值分布

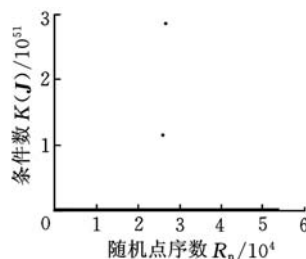
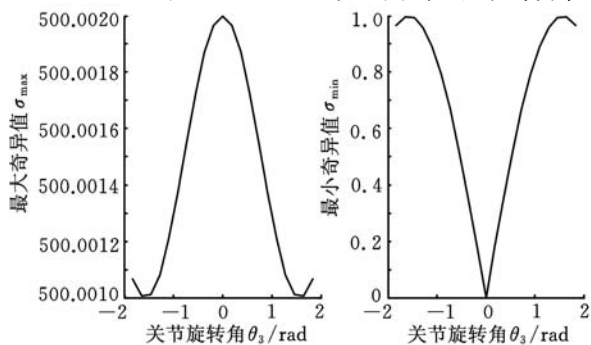


图 5 装校机器人条件数分布

比矩阵进行奇异值分解,当在某一位置最小奇异值为零时,此位形即是奇异位形。由图 3 与图 4 可知,装校机器人奇异值的大小随机器人运动位置而变化,最大奇异值在 485.0099 ~ 514.5565 之间,最小奇异值位于 0 ~ 0.9969 之间,最小奇异值为零的位置即为奇异位置;图 5 所示为装校机器人条件数分布,条件数基本上在 496.3659 ~ 561.0687 之间,仅有极个别的点大于 561.0687。从图中可知,条件数越大,最小奇异值越小,则在此位置时装校机器人灵活性较差。由于机器人在作业时不可避免地存在一些奇异位形,因此希望工作时能够避开这些位置。

选定其他关节变量值,某一关节与最大、最小奇异值的变化关系如图 6 ~ 图 9 所示。其中图 6 所示为 $\theta_3 = [-7\pi/12, 7\pi/12], \theta_4 = 0, \theta_5 = \pi/2, \theta_6 = \pi/2$ 时的仿真结果, $\theta_3 = 0$ 附近最小奇异值为零;图 7 所示为 $\theta_3 = 0, \theta_4 = [-7\pi/9, 7\pi/9], \theta_5 = \pi/2, \theta_6 = \pi/2$ 时的仿真结果, θ_4 在 $-2.4422 \sim -1.8708\text{rad}$ 和 $0 \sim 2\text{rad}$ 两个区间时,最小奇异值

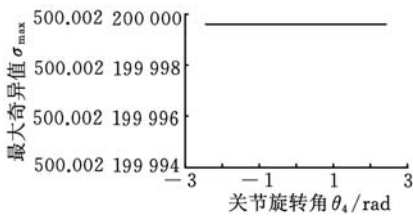


(a) θ_3 与最大奇异值关系

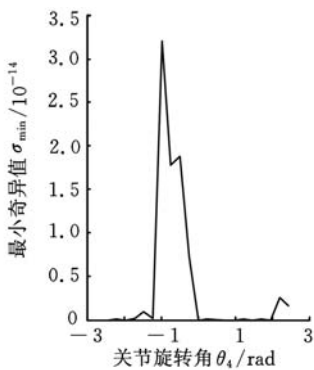
(b) θ_3 与最小奇异值关系

图 6 第三关节旋转角与奇异值的关系

接近零,会出现奇异现象;图 8 所示为 $\theta_3 = 0, \theta_4 = 0, \theta_5 = [4\pi/9, 5\pi/9], \theta_6 = \pi/2$ 时的仿真结果, $\theta_5 = 1.5708\text{rad}$ 附近最小奇异值为零;图 9 所示为 $\theta_3 = 0, \theta_4 = 0, \theta_5 = \pi/2, \theta_6 = [4\pi/9, 5\pi/9]$ 时的仿真结果, $\theta_6 = 1.5708\text{rad}$ 附近最小奇异值为零。

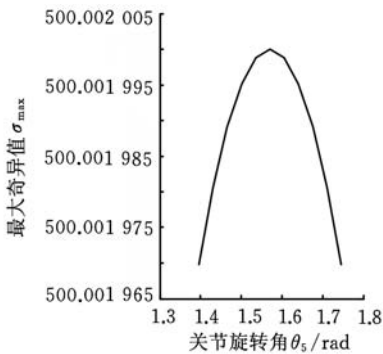


(a) θ_4 与最大奇异值关系

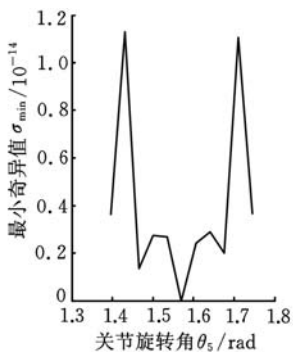


(b) θ_4 与最小奇异值关系

图 7 第四关节旋转角与奇异值的关系



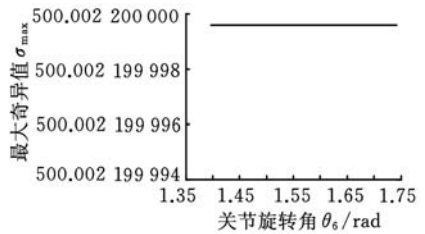
(a) θ_5 与最大奇异值关系



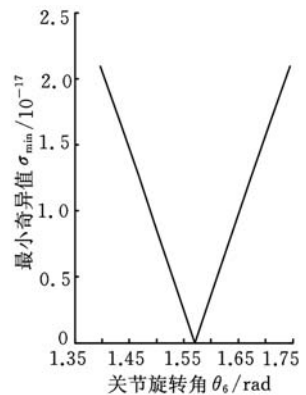
(b) θ_5 与最小奇异值关系

图 8 第五关节旋转角与奇异值的关系

由上述分析可知,奇异值的出现与各关节参数值的组合密切相关,奇异位形总是存在的,只要



(a) θ_6 与最大奇异值关系



(b) θ_6 与最小奇异值关系

图 9 第六关节旋转角与奇异值的关系

出现奇异位形,装校机器人运动性能就无法保证,不能进行正常工作。因此必须避开奇异位形或在奇异点附近对奇异值进行处理,使装校机器人在保证工作性能和运动精度的前提下通过奇异位形。通过对奇异值的分析,为装校机器人的控制系统避开这些奇异位形提供了重要的数据。

5 结论

(1)应用 D-H 法建立了六自由度装校机器人运动学模型,得出了机器人运动学正解;在已知各关节变量时,可求得装校机器人末端相对于基坐标系的位置。

(2)求得装校机器人的雅可比矩阵,描述了机器人运动速度与关节角速度之间的关系,为实际装校作业环境中的轨迹规划及实时控制提供了理论基础。

(3)对装校机器人的奇异位形进行了分析,为装校机器人的控制系统避开这些奇异位形及对奇异性的处理提供了重要的数据。

参考文献:

[1] 张立杰,李永泉,黄真. 球面二自由度 5R 并联机器人的运动学分析[J]. 中国机械工程,2006,17(4): 39-41.
 [2] 倪受东,文巨峰,颜景平. 四自由度冗余度机器人雅可比矩阵的建立[J]. 仪器仪表学报,2001,22(4): 381-382.

很理想,叶片头部存在撞击现象,尾部存在一定的脱流现象,用改进升力法设计的叶轮 2 液体绕流叶片情况也最为理想,由于设计中控制好了叶型以及边界层的影响等,在叶片头部和尾部均无明显的脱流和漩涡现象。

(3)从叶轮 1 与叶轮 2 的计算结果(表 2)以及计算结果比较分析可得,在工况 $Q=3473.9\text{kg/s}$ 下,叶轮 2 计算出来的水力效率比叶轮 1 高 1.298%,但是所受的轴向力却比叶轮 1 小 4286N,电机功率比叶轮 1 小 3057W;在工况 $Q=2828.3\text{kg/s}$ 下,叶轮 2 计算出来的水力效率比叶轮 1 高 1.660%,但是所受的轴向力却比叶轮 1 小 1997N,电机功率比叶轮 1 小 2072W;在工况 $Q=2262.6\text{kg/s}$ 下,叶轮 2 计算出来的水力效率比叶轮 1 高 2.085%,但是所受的轴向力却比叶轮 1 稍大 656N,电机功率比叶轮 1 仅大 759W。

由分析结果可以看出,在各个工况下叶轮 2 的水力效率比叶轮 1 高,但其轴向力和电机功率比叶轮 1 小或者相差不多,这说明叶轮 2 在提供高的效率的同时,对导轴承的要求降低了,能耗降低了,原因是考虑了叶片端部靠近外壳和轮毂等区域的实际流动,以及静止外壳壁面上的环状边界层流动,转动叶片表面上的边界层以及叶片端部和外壳之间的间隙流动等的相互干涉等问题,引进了考虑叶轮外缘及叶轮轮毂处的边界层及间隙影响的修正系数,因此,改进升力法针对传统升力法在间隙流方面的不足做出的改动是有效的。

当然我们的研究也只是提出了一种新的方法,尚有许多问题还需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 宋文武,谭光仪. 蜗壳轴流泵的研究与产品开发[J]. 机械工程学报,1999,35(6):66-68.
- [2] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1995.
- [3] 李文广,苏发章,黎义斌,等. 轴流泵的叶片设计理论与应用研究现状[J]. 兰州理工大学学报,2004,30(5):59-63.
- [4] 陈次昌,杨昌明,王金诺,等. 轴流泵端壁区域流动三维粘性数值计算[J]. 工程热物理学报,2003,24(4):603-605.
- [5] 汤方平,王国强,刘超,等. 高比转数轴流泵水力模型设计与紊流数值分析[J]. 机械工程学报,2005,41(1):119-123.
- [6] 王德军,周惠忠,黄志勇,等. 对旋式轴流泵全流道三维定常紊流场的数值模拟[J]. 清华大学学报(自

然科学版),2003,43(10):1339-1342.

- [7] 梁开洪,张克危,许丽. 轴流泵叶顶间隙流动的计算流体动力分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2004,32(9):36-38.

(编辑 苏卫国)

作者简介:宋文武,男,1965年生。西华大学能源与环境学院副院长、教授。主要研究方向为流体机械流动理论及新产品开发。获四川省科技进步二等奖 1 项、三等奖 2 项。出版专著 1 部,发表论文 60 余篇。符杰,男,1978年生。西华大学能源与环境学院讲师。

(上接第 1169 页)

- [3] 梁喜凤,王永维. 番茄收获机械手奇异性分析与处理[J]. 农业工程学报,2006,22(1):85-88.
- [4] 熊有伦,丁汉,刘恩沧. 机器人学[M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- [5] 刁燕,陈章平,姚林,等. 一种新型混联手术机器人的运动学分析[J]. 四川大学学报(工程科学版),2010,42(4):214-218.
- [6] Denavit J, Hartenberg R S. A Kinematic Notation for Lower - pair Mechanisms Based on Matrices [J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 21(5): 215-221.
- [7] Niku B. Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Application[M]. Upper Saddle River: Pearson Education, 2001.
- [8] Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems[M]. New York: Springer-Verlag, 2003.
- [9] 吕广明,孙立宁,张博. 五自由度上肢康复机械手臂的运动学分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(5):698-701.
- [10] Paul R P. Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control [M]. Cambridge: MIT Press, 1981.
- [11] Stadler W. Analytical Robotics and Mechatronics [M]. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [12] Whitney D E. Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators[J]. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, 1972, 94(4): 303-330.
- [13] Yoshikawa T. Manipulability of Robotic Mechanisms[J]. The International Journal of Robotics Research, 1985, 4(2): 3-9.

(编辑 陈勇)

作者简介:李诚,男,1972年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为机械设计 & 机电一体化技术。谢志江,男,1963年生。重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师。倪卫,男,1983年生。中国工程物理研究院激光聚变研究中心实习研究员。刘楠,男,1983年生。中国工程物理研究院激光聚变研究中心助理工程师。