

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.010

3P3R型磨削机器人的结构参数计算与优化*

朱鸿泰¹, 俞超^{1*}, 周文明²

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 牧羊集团, 江苏 扬州 225000)

摘要: 针对设计机器人中考虑到灵活空间需要包络整个工件, 灵活空间的大小受到机器人结构尺寸与磨削机和机器人的摆放位置影响等问题, 提出了3P3R的结构构型, 并对该机器人结构参数计算与灵活空间等方面进行研究。首先给出了运用旋量建模方法的运动学分析, 后又将待加工的工件模型进行了简化, 在总结前人工作的基础上, 参考加工实际情况, 提出了虚拟球的概念, 针对特定的加工工件设计机器人的尺寸, 重点讨论了机器人与砂带机位置参数的计算方法, 给出了详细公式推导与计算流程图, 对于整个磨削系统的结构计算进行了系统综合, 运用蒙特卡洛方法对于机器人的灵活空间进行了验证, 并在Matlab平台上进行了编程实现。最后, 研究结果证实, 该优化算法具有可靠性与实用性; 同时这种逆推机器人结构参数并优化的方法也可应用到其他机器人的结构设计中。

关键词: 3平动3转动; 磨削机器人; 运动学分析; 结构参数优化

中图分类号: TH39; TH16; TP24 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)12-1559-06

Structure parameter calculate and optimization of 3P3R grinding robot

ZHU Hong-tai¹, YUN Chao¹, ZHOU Wen-ming²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. MUYANG Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract: Aiming at designing a grinding robot, the workspace of which must meet with the size of the workpiece, a 3P3R structure was put forward. Robot's workspace was determined by many factors such as the structure parameters and the relative positions of grinding robot and the belt grinder. The structure parameter calculation and dexterous were studied. First, the calculation about the 3P3R grinding manipulator was presented which was based on the twist theory. Simplified model of the workpiece to be machined and previous work based on the actual situation of the reference process was summarized, the concept of a virtual ball was proposed. The kinematic model was made. Second, the size of the grinding manipulator was determined by a given workpiece. The belt grinder's position with respect to the robot base was optimized, additionally, the detailed derivation of the formula and the optimization flow chart were presented. Meanwhile, the simulation about the dexterous grinding space was verified by Monte Carlo method, and a software implementation based on Matlab platform was made. Finally, the result indicate that the backward calculation of the manipulator structural parameters and optimized algorithm is not only stable and practical, can also be referred in the structural design of other types of manipulators.

Key words: 3P3R; grinding robot; kinematics analysis; structural parameters optimization

0 引 言

砂带磨削历史悠久, 起源于13世纪, 当时人们就已经使用砂纸打磨和抛光金属或石料^[1]。近几年来由

于人力成本的提高与机器人的兴起, 运用机器人磨削工件越来越广泛。工业机器人可以保证产品质量的统一性, 工业发达国家已将数控加工中心与数控叶片砂带磨床用于汽轮机叶片加工^[2]。

收稿日期: 2014-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305008)

作者简介: 朱鸿泰(1989-), 男, 辽宁铁岭人, 主要从事机器人技术方面的研究. E-mail: zht6901110@163.com

通信联系人: 俞超, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: cyun18@vip.sina.com

磨削机器人的磨削力量一般在 10^2 N 量级上,磨削精度一般要保证在 0.01 mm 左右,因此考虑高负载、高精度的结构设计中,本研究采用 3P3R 的机构形式。由于第 5 轴转角范围的限制,机器人的灵活空间欧氏群 $SE(3) = R_3 \times SO(3)$ 测度很小^[3]。通用的三关节正交手腕在理想情况下可达到任意姿态,此时满足 Pieper 准则时,运动学的逆解简单且存在封闭解^[4],但是由于相邻的两个杆件物理上存在干涉导致姿态空间有限,加工工件某些位置不可达,需要二次装夹,降低了磨削精度。因此本研究设计的磨削机结构不采用球形手腕结构。手腕的 3 个轴线不相交于一点,而是相交于两个点^[5]。

对于特定的磨削工件的大小设计具体机器人的尺寸与工具坐标系的位置摆放是一个非常复杂的问题,王伟^[6]使用模拟退火算法(SA)求得机器人的灵活空间,张栋^[7]运用正交实验法优化了工具坐标系的摆放位置。高志慧^[8]运用粒子群算法优化了机器人的灵活空间,但是对于机器人的本体参数设计均很少有优化设计的提出。

本研究提出 3P3R 的结构构型,并对该机器人结构参数与灵活空间等方面进行研究。

1 砂带磨削机器人运动学分析

在设定变量参数条件下,运用旋量理论给出机器人正反解析解,结构示意图如图 1 所示。

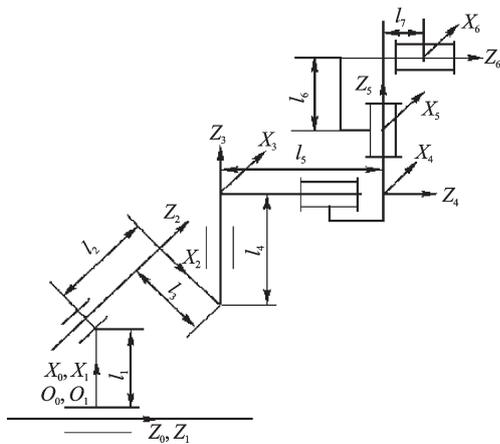


图 1 磨削机器人的结构示意图

1.1 运动学正解

轴 1 为前后移动 z 运动轴,轴 2 为左右移动 y 运动轴,轴 3 为上下移动 x 运动轴,4,5,6 轴为姿态旋转变换轴。取当前图 1 形为初始位形,则 $g_{06}(0)$ 表示的是机器人的末端坐标系相对于坐标系 0 的刚体变换。运动旋量:

$$\xi_i = [-\omega_i, q_i, \omega_i]^T$$

式中: ω_i —运动旋量上的单位矢量, $\omega_i \in R^3$; q_i —在 i 坐标系下轴向上的任意一点, $q_i \in R^3$; ξ_i —移动关节, $\xi_i = [v_i, 0]^T$; 其中: v_i —在 i 坐标系下移动方向上的单位矢量, $v_i \in R^3$ 。

根据旋量的基础理论,可以求得:

$$g_{06}(\theta) = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} e^{\xi_4 \theta_4} e^{\xi_5 \theta_5} e^{\xi_6 \theta_6} g_{06}(0) = \begin{bmatrix} R(\theta) & p(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$p(\theta) = \begin{bmatrix} l_1 + l_4 \\ -l_2 + l_6 \\ l_3 + l_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

该机器人前 3 个关节为 3P 结构,因此:

$$\begin{cases} \xi_1 = \begin{bmatrix} v_1 \\ 0 \end{bmatrix} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \xi_2 = \begin{bmatrix} v_2 \\ 0 \end{bmatrix} = [0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \xi_3 = \begin{bmatrix} v_3 \\ 0 \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi_4 = \begin{bmatrix} -\omega_4 \times q_1 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = [-l_2 \ -l_1 - l_4 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (5)$$

$$\xi_5 = \begin{bmatrix} -\omega_5 \times q_1 \\ \omega_5 \end{bmatrix} = [-l_3 - l_5 \ 0 \ l_1 + l_4 \ 0 \ 1 \ 0]^T \quad (6)$$

$$\xi_6 = \begin{bmatrix} -\omega_6 \times q_2 \\ \omega_6 \end{bmatrix} = [-l_2 + l_6 \ l_1 + l_4 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (7)$$

将式(2~7)代入式(1)中可以得到:

$$g_{06}(\theta) = \begin{bmatrix} c4c5c6 - s4s6 & -c4c5s6 & 0 & 0 \\ s4c5c6 + c4s6 & -s4c5s6 + c4c6 & 0 & 0 \\ -s5c6 & s5s6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & c4s5 & \theta_3 - s4l_6 + l_4 + l_1 \\ 0 & 0 & s4s5 & -\theta_2 + c4l_6 - l_2 \\ 0 & 0 & c5 & \theta_1 + l_5 + l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $si = \sin(\theta_i)$; $ci = \cos(\theta_i)$ 。

1.2 运动学逆解

在 1.1 节中已经求得运动学正解公式(8),笔者设定机器人末端法兰第 6 坐标系相对于机器人的基坐标系的位姿齐次矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

令 $g_{06}(\theta) = T$ 可得到如下解析解:

$$\begin{cases} \theta_6 = a \tan 2(-\frac{O_z}{n_z}) \\ \theta_5 = \begin{cases} \arccos(a_z, r_{32} / \sin(\theta_6)) \geq 0 \\ -\arccos(a_z, r_{32} / \sin(\theta_6)) < 0 \end{cases} \\ \theta_4 = a \tan 2(\frac{a_y}{a_x}) \\ \theta_3 = p_x - (l_4 + l_1) + s4l_6 \\ \theta_2 = -p_y - l_2 + c4l_6 \\ \theta_1 = p_z - l_5 - l_3 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $s_i = \sin(\theta_i)$; $c_i = \cos(\theta_i)$ 。

2 灵活空间分析

根据夏刚等人^[9]的定义,机器人的末端执行器能以任何姿态到达同一个点的空间即为机器人的灵活空间。但是对于磨削机器人,灵活空间仅需要与工具坐标系的一个方向对接即可,因此笔者引用虚拟球^[10]来定义灵活空间,事实证明该方法可以有效表示磨削机器人的灵活空间。

机器人的基坐标系 $\{0\}$,工件坐标系 $\{P\}$,工具坐标系 $\{T\}$ 如图2所示。

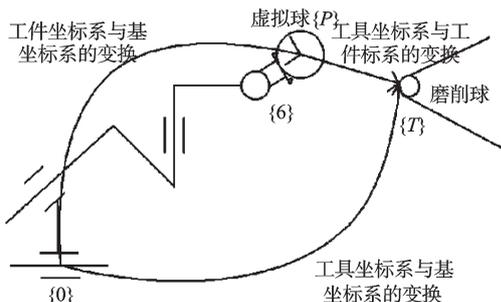


图2 机器人各个坐标系关系

$$[g_{06}(\theta)]_6^P T = g_{or}(0) \quad (11)$$

$$g_{or}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $g_{or}(0)$ — T 坐标系相对于机器人基坐标系的齐次矩阵。

由式(11)可得: ${}^P T = [g_{06}(\theta)]^{-1} g_{or}(0)$, 即:

$${}^P T = \begin{bmatrix} c4c5c6 - s4s6 & c4s6 + c5c6s4 & -c6s5 & P'_x \\ -c6s4 - c4c5s6 & c4c6 - c5s4s6 & s5s6 & P'_y \\ c4s5 & s4s5 & c5 & P'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:

$$\begin{bmatrix} P'_x \\ P'_y \\ P'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c6s5 & c4s6 + c5c6s4 & s4s6 - c4c5c6 \\ -s5s6 & c4c6 - c5s4s6 & c6s4 + c4c5s6 \\ -c5 & s4s5 & -c4s5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P''_x \\ P''_y \\ P''_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} P'_x &= T_y c4s6 - l_6 s6 - T_z c6s5 + l_2 c5c6s4 - \\ &\quad l_4 c4c5c6 - T_x s4s6 + l_2 c4s6 + l_3 c6s5 + \\ &\quad l_5 c6s5 + l_1 s4s6 + l_4 s4s6 + l_1 s4s6 + l_4 s4s6 + \\ &\quad T_x c4c5c6 + T_y c5c6s4 - l_1 c4c5c6, \\ P'_y &= T_y c4c6 - l_6 c6 - T_x c6s4 - l_2 c5s4s6 + \\ &\quad l_2 c4c6 + l_4 c4c5s6 + T_z s5s6 + l_1 c6s4 + \\ &\quad l_4 c6s4 - l_3 s5s6 - l_5 s5s6 - \\ &\quad T_x c4c5s6 - T_y c5s4s6 + l_1 c4c5s6, \\ P'_z &= T_z c5 - l_3 c5 - l_5 c5 + \\ &\quad T_x c4s5 + T_y s4s5 - l_1 c4s5 - l_4 c4s5 + l_2 s4s5. \end{aligned}$$

本研究设定机器人的灵活空间大小为一个虚拟球体,这个球体可以包围整个加工工件如图3所示。

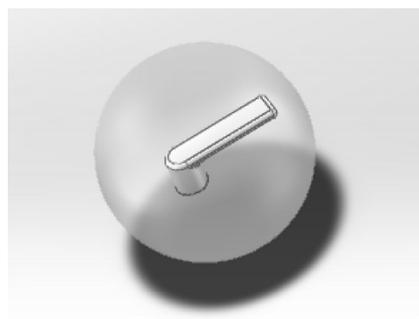


图3 用虚拟球包围的待加工工件

由于机器人后3个关节结构关系确定后,决定机器人灵活空间大小的重要参数为前3个轴。计算机器人前3个轴行程大小的流程如图4所示。

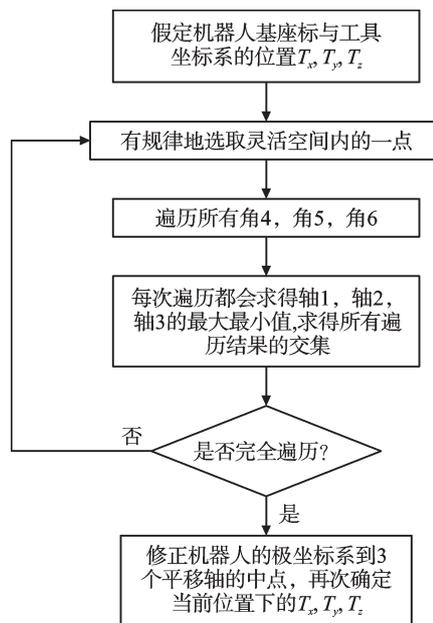


图4 计算 T_x, T_y, T_z 的流程图

本研究设定磨削点在基坐标系下的位置坐标为: (T_x, T_y, T_z) , 设定磨削点的方向与 xz 平面平行, 并且与 yz 平面夹角为 θ_r , 设定工件坐标系被包围在一个半径

为 r_r 的球内,可以求得球心坐标为: $(T_x - r_r \sin(\theta_r), T_y, T_z - r_r \cos(\theta_r))$,由文献[6-7]可得到机器人灵活空间分布在末端法兰第六坐标系即末端法兰 z 轴对称位置上,现利用两个变量 α, β 就可以遍历球面上所有点,点的方向取球心与点的延长线方向。

虚拟球的建模如图5所示。

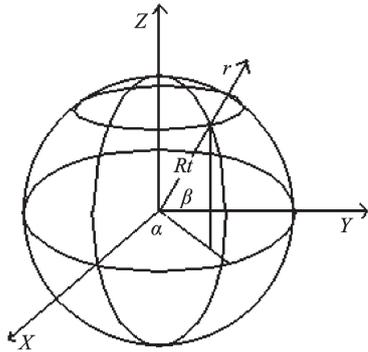


图5 虚拟球的建模

在已知两个角度 α 与 β , 一个长度 R_r 条件下,即可利用圆心坐标表示球面上任意一点及其方向等信息。设定末端法兰第六坐标系原点距离工具坐标系球心距离为 R_r , 六轴坐标系此时 z 轴指向球心, xy 轴由于无法确定磨削方向设为任意值,可以求得球面相对于末端法兰第六坐标系的坐标齐次变换矩阵为:

$$P_{\text{圆心}} = \begin{bmatrix} T_x - r_r \sin(\theta_r) + R_r \cos(\beta)\cos(\alpha) \\ T_y + R_r \cos(\beta)\sin(\alpha) \\ T_z - r_r \cos(\theta_r) + R_r \sin(\beta) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

此时末端法兰第六坐标系 z 轴在基坐标系下的表示式为:

$$\vec{z} = (\cos(\beta)\cos(\alpha), \cos(\beta)\sin(\alpha), \sin(\beta))^T$$

此时的齐次变换矩阵为:

$$P_{\text{球}} = \begin{bmatrix} * & * & 0 & T_x - r_r \sin(\theta_r) + R_r \cos(\beta)\cos(\alpha) \\ * & * & 0 & T_y + R_r \cos(\beta)\sin(\alpha) \\ * & * & 0 & T_z - r_r \cos(\theta_r) + R_r \sin(\beta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cos(\beta)\cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\beta)\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & \sin(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

此时将式(15)代入式(13),即可以求得 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 式中的*为可以取得符合齐次变换矩阵的任意值。

3 实验及结果分析

该设计的磨削机器人主要针对水龙头,待加工水龙头CAD模型如图6所示。图6中Point点是用来实际磨削时取用的关键点,只要所有关键点可以到达,

整个工件即可完全磨削。由于水龙头不需要精确的表面误差,磨削后还要进行抛光处理,研究者主要还是通过实际经验判断工件磨削好坏,通常一个好的磨削后工件触摸上去没有凹凸感。

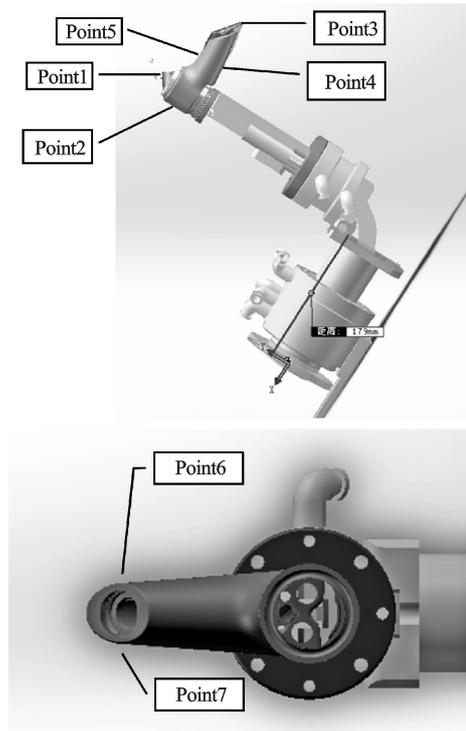


图6 待加工的水龙头CAD模型

根据上文理论介绍,虚拟工件坐标系中心距离末端法兰第六轴坐标系原点 $R_r = 600$,本研究利用一个半径为 $r_r = 250$ 的球体包围工件,磨削角度 $\theta_r = 30^\circ$,设定初值 $T_x = 500, T_y = 500, T_z = 500$,磨削点的位置初值可以任意设定,不影响计算结果。机器人的结构参数为: $l_1 = 272, l_2 = 0, l_3 = 266, l_4 = 253.5, l_5 = 611, l_6 = 237$ 。

计算结果如表1所示。由表1可知,在设计夹具时在不干涉条件下尽可能将工件放置在距离末端法兰第六坐标系近的位置上,这样可以缩短各轴的行程,降低机器人成本。

表1 计算结果

初值设定/mm		求得的各轴行程/mm		
R_r	r_r	θ_1	θ_2	θ_3
600	250	1 200	1 287	1 287
500	250	1 000	1 097	1 097
400	250	800	925	925

该次实验取 $R_r = 600, r_r = 250$,该条件下的虚拟球基本可以包括常用水龙头的大小。在初始 $T_x = 500, T_y = 500, T_z = 500$ 时,第一次计算得到行程范围为:

$$(-1\ 093 \leq \theta_1 \leq -93)$$

$$(-1\ 048 \leq \theta_2 \leq 48)$$

$$(-700 \leq \theta_3 \leq 398)$$

修正后的 $T_x=650, T_y=0, T_z=1\ 093$,将机器人的磨削点位调整至该点,调整位置后磨削机器人与磨削机的摆放情况如图7所示。

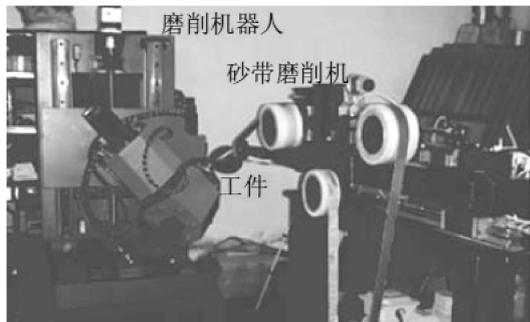


图7 实际磨削机器人样机

下面笔者利用蒙特卡洛算法对灵活空间进行验证,蒙特卡洛法也称作统计模拟法,是以概率统计理论为基础的一种计算方法。在本例中,一定范围内随机取 T_x, T_y, T_z ,对于每一个随机点遍历所有 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$,根据公式(13)求得的 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 取交集,若在上述用虚拟球求得范围内即将该点画出, N 为在虚拟球点的个数。根据该方法验证该点位的正确性如表2所示。

表2 实验结果

编号	T_x	T_y	T_z	N
1	670	30	800	243
2	670	20	900	475
3	670	10	1 000	610
4	670	0	1 100	698
5	670	-10	800	560
6	670	-20	900	430
7	650	30	800	263
8	650	20	900	596
9	650	10	1 000	1 500
10	650	0	1 100	2 564
11	650	-10	800	2 107
12	650	-20	900	1 740
13	630	30	800	794
14	630	20	900	1 042
15	630	10	1 000	1 280
16	630	0	1 100	1 604
17	630	-10	800	1 343
18	630	-20	900	873

由表2可以得出:当 $T_x=650, T_y=0, T_z=1\ 100$ 时灵活空间点位最多,这与之前计算的基本一致,得到

了很好的验证。利用蒙特卡洛算法在 Matlab 上仿真得到的灵活空间如图8、图9所示。

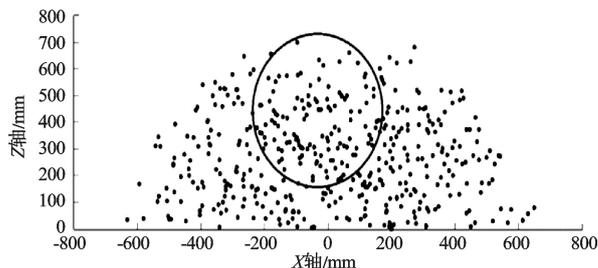


图8 灵活空间在XZ平面投影

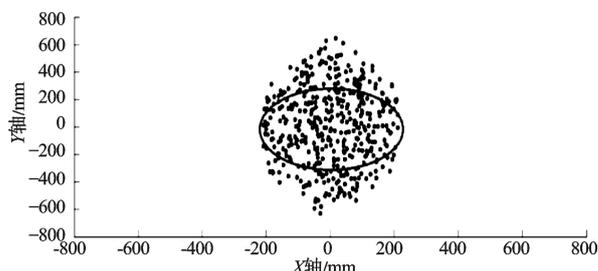


图9 灵活空间在XY平面投影

图8、图9中,圆圈即代表虚拟球的范围,圆点代表整体灵活空间大小,从图中可以看出灵活空间成山状分布在末端法兰第六坐标系上,这与前人的模拟结果一致,圆点范围明显包围了圆圈区域,说明利用虚拟球反算行程的方法有效性。

4 结束语

(1) 本研究介绍了3P3R机器人的结构参数计算与磨削机和机器人摆放位置优化方法,提出了虚拟球计算理论,探索出了一条快速计算机器人磨削点位置的计算方法在理论上给出了公式推导,在充分总结前人经验的基础上,将磨削机器人与磨削机的整体计算进行了系统综合,最后采用蒙特卡洛算法对分析结果进行了验证。

(2) 优化位置后的磨削机可以达到灵活空间最大,减少了重复试凑的工作量,适应的工件种类更多。

(3) 本研究在计算中为了简化模型,忽略了磨削方向和角度等参数,若能将砂带侧的系统进行建模,可以求得的结构会更紧凑,合理。笔者采用上述介绍的计算方法,在实际应用中得到了可行性验证,设计出来的机器人结构可以满足预期的磨削要求。

(下转第1586页)

本文引用格式:

朱鸿泰, 俞超, 周文明. 3P3R型磨削机器人的结构参数计算与优化[J]. 机电工程, 2014, 31(12): 1559-1563, 1586.

ZHU Hong-tai, YUN Chao, ZHOU Wen-ming. Structure parameter calculate and optimization of 3P3R grinding robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(12): 1559-1563, 1586. [《机电工程》杂志: http://www.meem.com.cn](http://www.meem.com.cn)