

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.06.011

阀门喷涂机器人的轨迹规划与优化求解

章 兵, 许 勇

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘 要:为对特定阀门工件的外表自由曲面进行精确喷涂,提出以阀门外形尺寸和机器人本体结构为约束条件,对喷涂机器人的工作空间进行了合理优化。利用 MATLAB 对多变量有约束非线性函数优化求解,得到了机器人主连杆杆长以及相应的关节转角范围;对阀门进行了参数描述,并建立喷涂轨迹路径数学模型;通过基于 ADAMS 的虚拟样机建模、运动仿真和 MATLAB 数值求解的相互协同和相互验证,得到了合理的关节角逆解。通过优化后的逆解进行仿真喷涂验证了轨迹规划和优化求解方法的合理性。

关 键 词:喷涂机器人;轨迹规划;工作空间;ADAMS 软件;MATLAB 软件

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2016)06-0051-06

Trajectory Planning and Optimal Solution of Valve Spraying Robot

ZHANG Bing, XU Yong

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Research on the issues of precise spraying for the free surface aimed at specific valve, under the constraints of the shape dimensions of the valve and the structure of the robot, the working space of the spraying robot is optimized. By using MATLAB to solve the optimization problem of constrained nonlinear function, the length of the main rods and the corresponding range of the robot joint angles were obtained. The parameters of the valve were described and the mathematical model of the spray trajectory was established. Based on mutual cooperation and mutual verification by the ADAMS virtual prototype modeling, motion simulation and MATLAB numerical solution, reasonable the inverse solution of joint angles were obtained. Through the optimization of the inverse solution for simulation spraying, verified the trajectory planning and optimization of the solution method are reasonable.

Key words: spraying robot; trajectory planning; working space; ADAMS software; MATLAB software

喷涂机器人将人从恶劣的喷涂环境中解放了出来,相比于传统人工喷涂,机器人喷涂涂料利用率高^[1];自动化程度高、喷涂效率高;具有较强柔性,适用于多品种、小批量喷涂任务;采用轨迹再现方式实现了全空间位姿控制,轨迹自由度、再现性都很高,工件涂层均匀、喷涂质量好^[2]等,从而得到广泛的工业应用。

由于机器人关节运动的强耦合性,使得其运动轨迹的控制极其复杂^[3],而运动轨迹的精度也是多因素耦合的结果。影响精度的因素包括:机器人零部件的加工制造误差,机器人的安装误差,传动机构的误差,机器人连杆和关节的柔性以及机器人工作环境等^[4-5]。因此研究喷涂机器人在多因素综合作用下的位姿精度

问题也是现阶段实际研究过程中必须要解决的难题。另外,对于机器人的全局性能指标分析和机器人协同作业也是现阶段研究的热点。

研究喷涂机器人轨迹规划的根本目的是为了更好的控制喷涂过程,高质、高效地完成喷涂的作业任务。喷涂机器人的轨迹规划,即根据实际喷涂任务的要求,规划出预期运动的轨迹,喷涂作业过程中随时间变化的末端喷枪速度、位置和姿态,关节角位移、角速度、角加速度的变化规律等^[6]。根据机器人正、逆运动学的规律,相互修正末端和各关节的运动规律,使得机器人在运动过程中要保持运动轨迹平滑,避免位置、速度和加速度的突变^[7]。

收稿日期:2016-07-27;修回日期:2016-09-08

作者简介:章兵(1992),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为喷涂机器人的轨迹规划。E-mail:1208719383@qq.com

本文通过对特定型号的阀门主体表面进行参数描述而得到量化,从而完成喷涂路径的规划,并根据阀门外形尺寸来优化工作空间、机器人的杆长以及相应的关节转角范围。基于 ADAMS 的虚拟样机建模和运动仿真并与 MATLAB 数值仿真方法的相互协同、相互验证,优化机器人喷涂时的运动学逆解,验证了轨迹规划和优化求解方法的有效性。

1 喷涂机器人模型的建立

喷涂在面对复杂曲面或狭窄空间时,要求机器人手臂运动空间大、姿态和轨迹复杂灵活,因而喷涂机器人多选用 6R 构型和 2~3 自由度手腕;本文选用的 SR165 型喷涂机器人就具 6 个转动自由度,如图 1 所示。



图 1 SR165 型机器人结构

Figure 1 Structure of SR165 type robot

利用 ADAMS 进行虚拟样机建模如图 2 所示。机器人主连杆(手臂)由腰部、大臂、小臂和手腕构成,6 个关节均为转动关节。

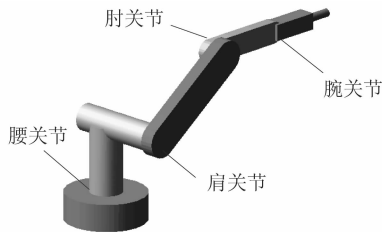


图 2 ADAMS 的虚拟样机

Figure 2 Virtual prototype of ADAMS

根据 D-H 法,建立机器人的杆件坐标系,如图 3 所示。杆件的坐标系建立在杆件 i 与杆件 $i+1$ 之间连接的关节处,根据 D-H 模型的构建规则,从杆件坐标系 (i) 变换到杆件坐标系 $(i+1)$ 只需要经过 4 个子变换即可:绕 z_{i-1} 轴旋转 θ_i ;沿着 z_{i-1} 轴平移 d_i ;绕 x_i 轴旋转 α_i 角及沿着 x_i 轴平移 a_i 。这里 θ_i 为关节变量, d_i 为连杆距离, α_i 为连杆转角, a_i 为连杆长度。并根据喷涂机器人实际的杆件参数建立机器人的 D-H 参数表,如表 1 所示。

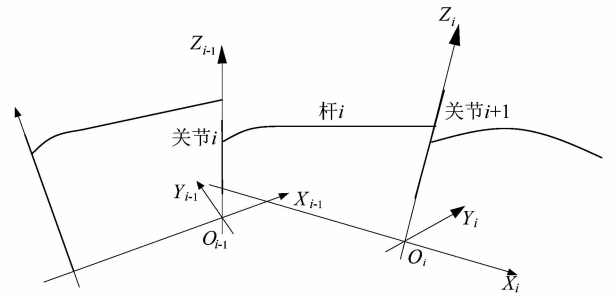


图 3 杆件 i 坐标系的设置

Figure 3 Setting of i -pole coordinate system

表 1 喷涂机器人的 D-H 参数

Table 1 D-H parameters of spraying robot

关节 i	a_i/mm	d_i/mm	$\alpha_i/(\circ)$	$\theta_i/(\circ)$	关节转角范围/ $(\circ)$
1	0	d_1	90	θ_1	-180 ~ 180
2	a_2	0	0	θ_2	-225 ~ 135
3	a_3	0	0	θ_3	-120 ~ 180
4	a_4	d_4	-90	θ_4	-135 ~ 120
5	0	0	90	θ_5	-120 ~ 120
6	0	0	0	θ_6	-150 ~ 135

2 喷涂机器人运动学分析

运动学分析是指在已知各关节运动参数的条件下,来求解末端喷枪的位置和姿态。根据两连杆坐标系之间的齐次变换关系,用 $T_{z_{i-1}}(d)$ 表示沿着 $i-1$ 轴沿 z 方向平移 d 的齐次变换,用 $R_{x_i}(\alpha)$ 表示绕 i 轴旋转 α 角的其次变换,那么得到相邻坐标系 $(i-1)$ 和 (i) 的 D-H 变换矩阵 ${}^{i-1}A_i$ 为:

$${}^{i-1}A_i = R_{x_i}(\theta_i) T_{z_{i-1}}(d_i) T_{x_i}(a_i) R_{x_i}(\alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

那么机器人末端喷枪的正运动学方程为:

$${}^0T_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:

$$P = [p_x \ p_y \ p_z]^T;$$

$$R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}.$$

式中: P ——末端喷枪相对基坐标系的位置向量;

R ——末端喷枪相对基坐标系的姿态矩阵。

解得:

$$\left. \begin{aligned} n_x &= C_1 (C_{234} C_5 C_6 - S_{234} S_6) - S_1 S_5 C_6; \\ n_y &= S_1 (C_{234} C_5 C_6 - S_{234} S_6) + C_1 S_5 C_6; \\ n_z &= S_{234} C_5 C_6 + C_{234} S_6; \\ o_x &= C_1 (-C_{234} C_5 C_6 - S_{234} C_6) + S_1 S_5 S_6; \\ o_y &= S_1 (-C_{234} C_5 C_6 - S_{234} C_6) - C_1 S_5 S_6; \\ o_z &= -S_{234} C_5 C_6 + C_{234} C_6; \\ a_x &= C_1 (C_{234} S_5) + S_1 C_5; \\ a_y &= S_1 (C_{234} S_5) - C_1 C_5; \\ a_z &= S_{234} S_5; \\ p_x &= C_1 (a_4 C_{234} + a_3 C_{23} + a_2 C_2); \\ p_y &= S_1 (a_4 C_{234} + a_3 C_{23} + a_2 C_2); \\ p_z &= S_{234} + a_3 S_{23} + a_2 S_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $S_i = \sin \theta_i$; $C_i = \cos \theta_i$; $C_{23} = \cos (\theta_2 + \theta_3)$; $C_{234} = \cos (\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$; $S_{23} = \sin (\theta_2 + \theta_3)$; $S_{234} = \sin (\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ 。若已知 6 个关节变量 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6$ 的变化规律,那么就可以求出末端喷枪在基础坐标系中的位置和姿态,从而得到末端的喷涂轨迹。

3 喷涂机器人工作空间分析

影响机器人工作空间的实际形状和大小主要是大臂和小臂的参数决定。腰部参数只影响机器人工作位置的高低,机器人手腕结构(由杆 4,5,6 组成)尺寸较小,结构参数的变动范围有限,因此串联机器人的工作空间是由大臂和小臂的长度以及关节角的转动范围来确定。当机器人腰部关节固定时,机器人大臂、小臂及其转动关节就可简化为平面 2R 机械手机构^[8]。

设置喷涂机器人工作空间坐标系与其参考坐标系重合,大臂、小臂的长度分别为 l_2 和 l_3 ,选取 xoz 平面作为机器人工作空间主投影面。如图 4 所示,选定手腕参考点后,平面 2R 机械手的工作空间生成方法为:

①大臂关节 2,小臂关节 3 转角均取其最小值;

②关节 2 转角保持最小值不变,关节 3 转角由最小值增至最大值,得弧 DA ;

③关节 3 转角保持最大值不变,关节 2 转角由最小值增至最大值,得弧 AB ;

④关节 2 转角保持最大值不变,关节 3 转角由最大值减至最小值,得弧 BC ;

⑤关节 3 转角保持最小值不变,关节 2 转角由最大值减至最小值,得弧 CD ,回到初始状态。

在这一过程中手腕参考点的轨迹就形成了一条封

闭的工作空间边界曲线。

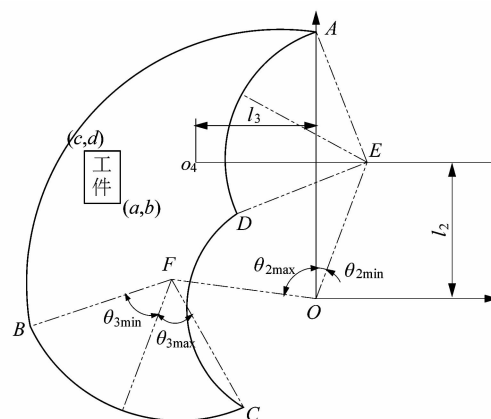


图 4 xoz 平面内喷涂机器人的投影工作空间

Figure 4 Projection working space of spraying robot in plane of xoz

选取喷涂机器人工作空间在 xoz 平面内的投影面积 S_{ABCD} 作为目标函数,要求在工作空间能够容纳被喷涂工件大小(工件宽 $\times$ 工件高)的前提下, S_{ABCD} 最小,以增加机构刚度,减小运动惯量。

$$\left. \begin{aligned} S_{\Delta OEA} &= S_{\Delta OFB}; \\ S_{FBC} &= S_{EAD}; \\ S_{\Delta OCF} &= S_{\Delta OED}; \\ S_{ABCD} &= (S_{OAB} + S_{\Delta OEA} + S_{FBC} + S_{\Delta OCF} - S_{\Delta OFB}) - \\ &\quad (S_{EAD} + S_{OCD} + S_{\Delta OED}) = S_{OAB} - S_{OCD}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

选取决定工作空间的 6 个参数作为设计变量 $X = [l_3, l_3, \theta_{2min}, \theta_{2max}, \theta_{3min}, \theta_{3max}]$,根据被喷涂工件大小、喷涂现场布局和机器人本体结构提出以下约束条件:

$$\left. \begin{aligned} l_2 + l_3 &= 2\,500; \\ 0 \leq l_2 &\leq 1\,500; \\ 0 \leq l_3 &\leq 1\,500; \\ -\frac{2\pi}{3} &\leq \theta_{2min} \leq 0; \\ 0 \leq \theta_{2max} &\leq \frac{\pi}{2}; \\ -\frac{\pi}{3} &\leq \theta_{3min} \leq 0; \\ 0 \leq \theta_{3max} &\leq \frac{5\pi}{9}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在 xoz 平面内被喷涂工件(见图 4)坐标位置参数: $a = -1\,250\text{ mm}$, $b = 750\text{ mm}$, $c = -2\,380\text{ mm}$, $d = 1\,375\text{ mm}$ 。

根据以上约束条件,利用 MATLAB 优化工具箱中的多变量有约束非线性函数 `fmincon` 进行最小值求

解,得出的喷涂机器人主连杆尺寸参数值见表2。

表2 喷涂机器人主连杆参数优化值

Table 2 Main connecting rod parameter optimization of spraying robot

连杆序号	连杆长度/mm	转角范围/(°)
2	1 284	[-120,90]
3	1 216	[-60,100]

4 喷涂机器人的轨迹规划

轨迹规划的基础工作就是对所有相关的因素进行量化表示,通过数量关系来直观的表达轨迹的参数描述。其中包括待喷涂阀门工件表面的曲面特征的表示,末端喷枪的位姿描述和参数路径的表示。

选用上海某公司型号为 H44H 的闸阀,其三维模型如图5所示。阀门的主体外表面近视为圆柱面,为了便于计算,将阀门的主体外表面进行圆柱面拟合。

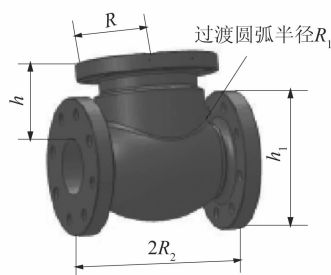


图5 型号为 H44H 的闸阀三维模型

Figure 5 Three-dimensional model of H44H gate valve

圆柱面方程:

$$F(x, y, z) = \{ [(x - x_0)m - (y - y_0)l]^2 + [(y - y_0)n - (z - z_0)m]^2 + [(z - z_0)l - (x - x_0)n]^2 \}^{1/2} - \rho = 0. \quad (6)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 为圆柱面上一点; (m, n, l) 为圆柱面轴线方向的单位向量; ρ 为圆柱面半径。

建立工件坐标系,并且选取 xoy 截面的轨迹曲线作为喷涂轨迹路径,建立如图6所示的 xoy 平面直角坐标系,得到轨迹曲线参数方程:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= R - y \quad 0 < x < h; \\ R_1^2 &= (x - h)^2 + [y - (R + R_1)]^2 \quad h \leq x \leq h + R_1 \sin \alpha; \\ R_2^2 &= \{ x - \sqrt{R_2^2 - [R_1(1 - \cos \alpha) + R]^2} \}^2 + y^2 \\ &\quad h + R_1 \sin \alpha \leq x \leq \sqrt{R_2^2 - [R_1(1 - \cos \alpha) + R]^2} + R_2 \sin \phi. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

因为喷涂工件坐标系与机器人基坐标系的原点不重合,且具有不同的方位,因此存在着平移和旋转坐标变换的复合转换关系,通过变换,可以将曲线上的位

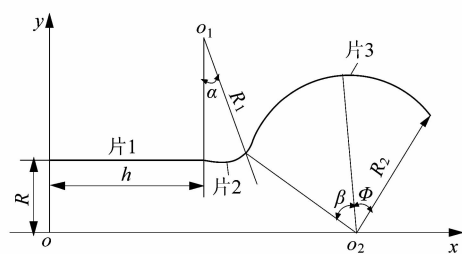


图6 xoy 截面的轨迹曲线

Figure 6 Trajectory curve of xoy section

置坐标映射到机器人的末端。同样,在工件坐标系下曲线的参数方程也可以通过坐标的复合变换得到变换后的曲线方程表达式,但是因为计算量太复杂,变量 x, y 无法完全分离而不可实行。

4.1 基于 ADAMS 运动仿真的逆运动学求解

选取规划的喷涂轨迹曲线上的点,作为机器人末端喷枪所经过的关键喷涂点。选取的方法为:设机器人喷涂末端运动路径的总长度为 L ,末端喷枪运动的总时间为 T 。将规划的运动路径等分成 N 段微小子路径,设第 j 段子路径为 $\Delta\delta_j$, $1 \leq j \leq N$, $\Delta\delta_j$ 的长度为 Δl ; 记喷枪在 $\Delta\delta_j$ 起点时刻为 $t_j = 0$,速度为 v_j ,则喷枪在 $\Delta\delta_j$ 内的运动时间为 $\Delta t_j = \frac{\Delta l}{v_j}$ 。那么 $T = N \times \Delta t_j$, 令 $N = 9$, $T = 18.00$ s, 则 $\Delta t_j = 2.00$ s。选取的关键喷涂点坐标以及对应时刻如表3所示。

表3 关键喷涂点坐标及对应时刻

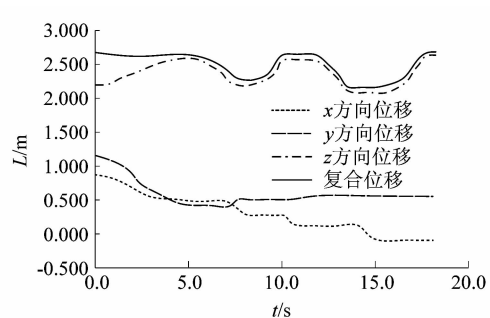
Table 3 Key point of spraying coordinates and corresponding time

时刻/s	x/mm	y/mm	z/mm	时刻/s	x/mm	y/mm	z/mm
0.00	861	1 173	2 207	10.00	300	520	2 565
2.00	454	378	2 483	12.00	106	576	2 572
4.00	459	396	2 276	14.00	104	592	2 086
6.00	310	530	2 178	16.00	-104	591	2 076
8.00	308	519	2 660	18.00	-104	591	2 560

在 ADAMS 的运动仿真环境下,将表中的关键点位移作为喷涂机器人虚拟样机的末端驱动,设置仿真时间为 18.00 s,测得 18.00 s 内喷枪末端位移以及关节转角的连续变化曲线如图7所示。

4.2 基于 MATLAB 数值仿真的逆运动学求解

已知喷涂机器人的末端位姿,可以求出关节转角的近似数值解。在机器人运动学逆解的过程中会发现,在同一末端位姿情况下,一般对应着多组关节转角的数值解(或机器人位姿)。当喷枪姿态平行于 y 轴,



(a) 喷枪末端位移变化曲线

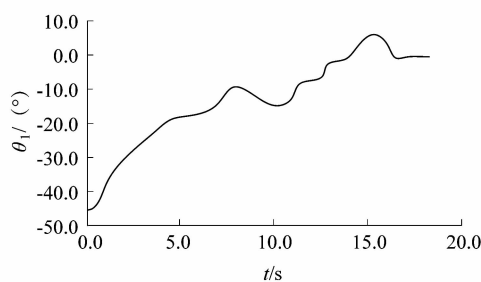
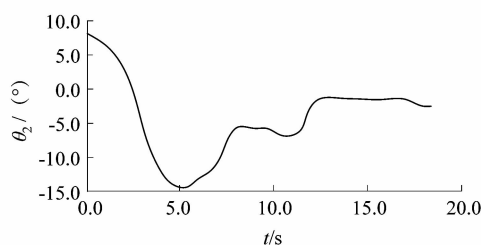
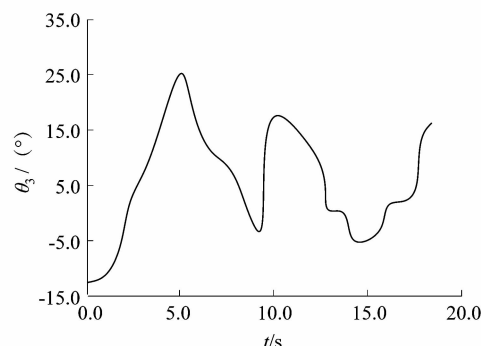
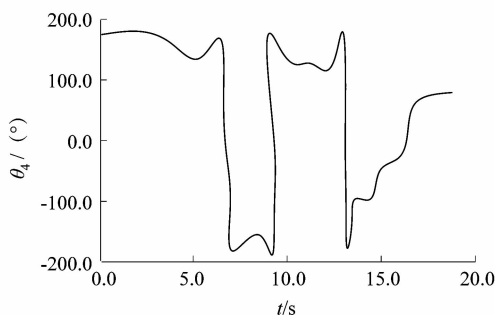
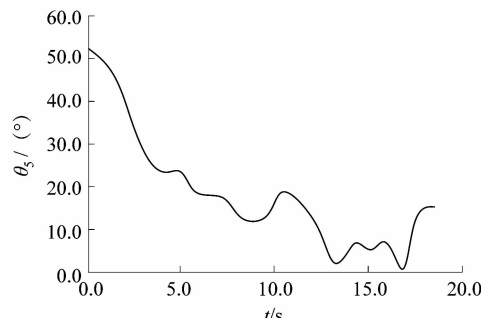
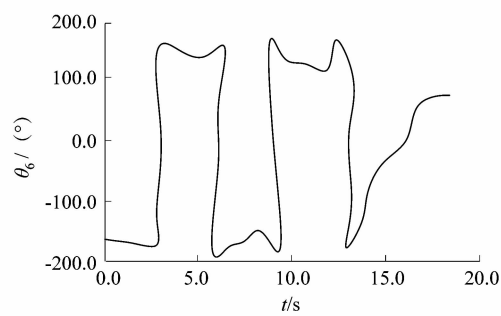
(b) θ_1 (c) θ_2 (d) θ_3 (e) θ_4 (f) θ_5 (g) θ_6

图7 ADAMS 测量的喷枪末端位移及转角

Figure 7 Displacement and rotation angle of end-tip of spray gun for ADAMS measurement

喷枪末端位于表3中 $t = 10.00$ s 对应的关键喷涂点时,利用 MATLAB 优化求解出与该末端位姿相对应的多组 $\theta_1 \sim \theta_6$ 数值解,如表4所示。

根据无碰撞、轨迹连续和能量消耗最小的原则^[9],可以将图7中通过 ADAMS 测得的关节角 $\theta_1 \sim \theta_6$ 的数值与表4中求得的 MATLAB 数值解进行比对,将明显不合理的关节角的解剔除;经过对比筛选后的关节角的数值再次进行插值拟合后,发现关节角 θ_4 和 θ_6 的变化曲线和之前有较大的差别,关节角变化比较平缓,且没有产生突变,如图8所示。

经过正运动学的关节驱动使得末端走出了比较理想的轨迹路径。证明了利用 ADAMS 和 MATLAB 进行运动学逆解相互验证方法的有效性。

另外,还可以利用 ROCAD 工艺仿真过程的干涉检验和各关节转角实时测量功能^[10],进一步进行比对和筛选,可得到较优的 MATLAB 数值解,并通过多次样条曲线的插值处理,使得各关节角的运动曲线平稳,使喷枪末端喷涂稳定从而实现涂层厚度均匀性较好。

喷涂机器人的轨迹规划是一个不断完善和改进的过程,由于机器人正、逆运动学问题的分析和求解是一个相互迭代和优化的过程,因此上述通过 ADAMS 的运动仿真和 MATLAB 的数值计算的过程也具有相互

表4 MATLAB求解的末端位姿对应关节转角
Table 4 End position of corresponding joint angle by MATLAB solution

组别	关节转角/(°)					
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	-60.843 0	163.592 2	-38.934 6	64.763 1	86.078 4	41.439 3
2	-65.759 7	37.083 7	-52.576 7	62.410 9	105.865 1	153.747 8
3	-57.901 9	37.081 0	-84.790 4	-66.243 9	-115.174 6	33.968 0
4	-136.232 5	40.999 7	-145.921 9	-57.288 6	-32.979 7	-0.836 3
5	64.126 9	39.007 5	-145.704 4	-127.656 6	150.050 2	-6.291 3
6	128.891 0	42.069 7	-145.750 7	-110.156 7	73.435 7	24.332 9

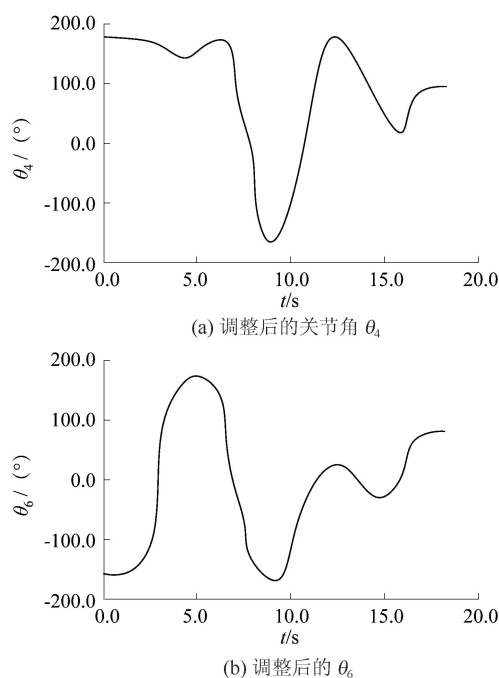


图8 筛选后关节角的变化曲线

Figure 8 Change curve of joint angle after screening

验证、不断迭代优化的特点。在没有进行具体的实验喷涂时,通过多种方式的协同验证是对轨迹路径优化的最好方式。

5 结语

本文通过对喷涂机器人的工作空间的分析求解,以 xoz 平面内的投影面积 S_{ABCD} 作为目标函数,获得了最优的大、小臂杆长及关节转角范围;基于 ADAMS 运动仿真的动态测量功能和 MATLAB 数值仿真的优化求解功能,优化了机器人关节角的运动学逆解,使各关

节角的运动曲线平稳没有突变,达到稳定喷涂的作业要求。

文章提出的喷涂路径规划是在工件静态的情况下进行的,后续的研究需要考虑在工件运动中喷涂路径规划问题,以及工件输送速度、喷枪移动速度与喷枪性能参数间的匹配关系,不断完善喷涂轨迹规划问题的求解。

参考文献:

- [1] 缪东晶,王国磊,吴聊,等.自由曲面均匀喷涂的机器人轨迹规划方法[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(10):1418-1423.
- [2] ATKAR P N, GREENFIELD A, CONNER D C, et al. Uniform coverage of automotive surface patches [J]. International journal of robotics research, 2005, 24(11): 883-898.
- [3] 陈雁,颜华,王力强,等.机器人匀速喷涂涂层均匀性分析[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(8):1210-1213.
- [4] 费晓光.串联机器人位姿误差的综合分析[D].沈阳:东北大学,2009:10-15.
- [5] 刘鹏,宋涛,负超,等.焊接机器人运动学分析及轨迹规划研究[J].机电工程,2013,30(4):390-394.
- [6] 彭南华.经济型喷漆机器人轨迹规划及关节控制研究[D].长沙:中南大学,2009:37-40.
- [7] CHEN Heping, FUHLBRIGGE T, LI Xiongzi. Automated industrial robot path planning for spray painting process: A review [C]//IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. Arlington, VA, USA: IEEE, 2008: 522-527.
- [8] 王战中.喷涂机器人连续3R斜交非球型手腕设计方法与实践[D].天津:天津大学,2008:25-31.
- [9] 付中涛,杨文玉,杨震,等.非球型手腕6R机器人实时高精度逆运动学算法[J].华中科技大学报(自然科学版),2013,41(增刊1):29-33.
- [10] 董诗绘.基于ROBCAD工业机器人规划路径仿真的实现[D].呼和浩特:内蒙古大学,2014:32-43.