DOI: 10.3969/j.issn.2095－509X.2018.04.005

UP50 工业机器人加工大直径螺纹的运动学分析

张永贵,邹　琰,黄中秋,程　兵
(兰州理工大学机电工程学院,甘肃 兰州　730050)

摘要: 为了实现在施工现场用机器人加工修复大型零部件,对 Motoman UP50 工业机器人建立运动学模型并求解逆运动学。首先建立空间倾斜螺旋线模型,计算螺旋线节点位姿,验证机器人模型与各节点位姿的准确性。然后计算节点在关节空间中的位移、速度、加速度向量。最后比较和分析得到的向量,所得结论可为 UP50 工业机器人在关节空间的倾斜螺旋轨迹规划提供更准确的算法依据和更详细的理论基础。

关键词: 机器人; 螺旋轨迹; 运动学

中图分类号: TH124　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 2095－509X(2018)04－0021－06

工业机器人是现代工厂实现生产自动化、信息化的重要装备,可用于焊接、喷涂和搬运等作业。如果在工业机器人末端装上相关驱动装置和刀具,即可代替机床的加工进给运动,这将有助于解决传统机床在施工现场加工大型零部件时存在的装夹困难、运输成本高、耗费时间长等问题。如大直径螺纹[1]在施工现场损坏后,如运用机器人可实现现场直接加工修复,那么以上的问题将会得到较好的解决。本文以机器人在不同进给速度下,加工不同大直径螺纹为实例,分析总结机器人各关节在关节空间的变化情况,以便为进行关节空间螺旋轨迹规划获得更好的基础条件。

由于现在大部分工业机器人采用的插补方式是直线插补和圆弧插补,很少采用螺旋插补,因此可以借鉴工业机器人在笛卡尔空间的轨迹规划方法和数控机床螺旋插补原理,对螺旋线进行插入节点分割,在保证一定精度要求的前提下,在两个分割节点之间运用机器人现有插补方式进行插补,以达到运用工业机器人进行螺旋插补的目的。

1　工业机器人 Motoman UP50 模型的建立

1.1　机器人运动学正解

采用 D－H 法[2]建立机器人的运动学方程。定义机器人不同位姿时,坐标系 $\{i+1\}$ 与坐标系 $\{i\}$ 的变换矩阵为:

$$ {}^{i}_{i+1}\boldsymbol{T} = Rot(z_i,\beta_{i+1}+\theta_{i+1}) \cdot Trans(z_i,d_{i+1}) \cdot Rot(x_{i+1},\alpha_{i+1}) \cdot Trans(x_{i+1},a_{i+1}) \tag{1} $$

式中: z_i 为坐标系 $\{i\}$ 中的 z 轴; θ_i 为机器人第 i 个关节角; β_i,d_i,α_i,a_i 为机器人零位时的连杆参数值。本文采用后置坐标系方法[3]建立机器人坐标系,如图 1 所示,得到的 Motoman UP50 对应连杆参数[4]见表 1。

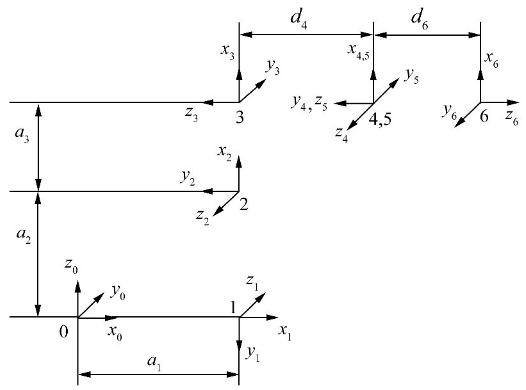

图 1　D－H 坐标系

表 1　机器人连杆参数表

α_i /(°)	β_i /(°)	a_i /mm	d_i /mm	θ_i /(°)
－90	－90	145	0	θ_1
180	0	870	0	θ_2
－90	0	110	0	θ_3
90	0	0	－1 025	θ_4
－90	0	0	0	θ_5
180	0	0	－175	θ_6

收稿日期: 2017－03－06

作者简介: 张永贵(1966—),男,甘肃兰州人,兰州理工大学教授,博士,主要研究领域为工业机器人及其应用技术、珩磨加工工艺及其专家系统。

表中: α_i 为 z_{i-1} 轴绕 x_{i-1} 轴旋转至 z_i 轴时的扭角,正负通过右手法则判断;β_i 为机器人在零位时各关节的关节角度;a_i 为 z_{i-1} 轴与 z_i 轴之间的公垂线长度,正向与 x_i 一致;d_i 为 x_{i-1} 轴沿 z_i 轴移动至 x_i 轴时的位移,正向与 z_i 一致;θ_i 为 x_{i-1} 轴绕 z_i 轴旋转至 x_i 时的转角,正负通过右手法则判断。

将表 1 的连杆参数代入式(1),得到各连杆变换矩阵:

$$ {}_1^0\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 145c_1 \\ s_1 & 0 & c_1 & 145s_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}_2^1\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} s_2 & -c_2 & 0 & 870s_2 \\ -c_2 & -s_2 & 0 & -870c_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}_3^2\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} c_3 & 0 & -s_3 & 110c_3 \\ s_3 & 0 & c_3 & 110s_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}_4^3\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & -c_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1\,025 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}_5^4\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} c_5 & 0 & -s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}_6^5\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} c_6 & s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & -c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -175 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

式中 c_1 为 $\cos\theta_1$,s_1 为 $\sin\theta_1$,以此类推。

根据以上连杆变换,即可推导机器人末端坐标系与基坐标系之间的变换矩阵,如式(2)所示:

$$ {}_6^0\boldsymbol{T}={}_1^0\boldsymbol{T}\cdot{}_2^1\boldsymbol{T}\cdot{}_3^2\boldsymbol{T}\cdot{}_4^3\boldsymbol{T}\cdot{}_5^4\boldsymbol{T}\cdot{}_6^5\boldsymbol{T} \tag{2} $$

即:

$$ {}_6^0\boldsymbol{T}=[\boldsymbol{n}\quad\boldsymbol{o}\quad\boldsymbol{a}\quad\boldsymbol{p}]=\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3} $$

式中:$\boldsymbol{p}$ 为刚体在固定坐标系中位置的齐次坐标表示形式;$\boldsymbol{n}$,$\boldsymbol{o}$,$\boldsymbol{a}$ 为刚体坐标系的轴和固定坐标系的轴之间的方向余弦,并用齐次坐标形式的(4×1)列阵分别表示。式(3)即为 UP50 型机器人运动学的正解。

1.2 机器人运动学逆解

求解机器人运动学逆解的方法有很多,在此应用代数法[5]来求解 Motoman UP50 工业机器人运动学逆解。

$$ \theta_1=\arctan[2(175a_y-p_y,175a_x-p_x)] \tag{4} $$

$$ \theta_2=\arctan[2(A2,B2)]-\arctan\{2[C2/\rho,\pm\sqrt{1-(C2/\rho)^2}]\} \tag{5} $$

式(5)中正负号对应于 θ_2 的 2 个解,在求解具体工业机器人运动学逆解时,可通过数据验证确定正负号[6]。

$$ \theta_3=\arctan[2(110B3+1\,025A3,110A3-1\,025B3)] \tag{6} $$

$$ \theta_4=\arctan[2(B4,A4)] \tag{7} $$

$$ \theta_5=\arctan[2(-A4,175B5c_4)] \tag{8} $$

$$ \theta_6=\arctan[2(B6,A6)] \tag{9} $$

其中:$A2=(p_z-175a_z)$,$B2=145+175(a_xc_1+a_ys_1)-p_xc_1-p_ys_1$,$\rho=\sqrt{A2^2+B2^2}$,$C2=\dfrac{A2^2+B2^2-110^2-1\,025^2+870^2}{2\times870}$,$A3=A2c_2-B2s_2-870$,$B3=A2s_2+B2c_2$,$A4=c_1s_{(2-3)}p_x+s_1s_{(2-3)}p_y-145s_{(2-3)}+p_zc_{(2-3)}-870c_3-110$,$B4=p_yc_1-p_xs_1$,$B5=-c_{(2-3)}c_1a_x-c_{(2-3)}s_1a_y+s_{(2-3)}a_z$,$A6=-c_{(2-3)}c_1n_x-c_{(2-3)}s_1n_y+s_{(2-3)}n_z$,$B6=-c_{(2-3)}c_1o_x-c_{(2-3)}s_1o_y+s_{(2-3)}o_z$。

2 普通螺旋线

设螺旋线的半径 $r=50$mm,螺距 $p=6$mm(以下如不特殊说明,都是以 mm 为单位),螺旋倾角为 ψ_0。假设螺旋线轴线与工件坐标系{W}的 z 轴重合,且起始点从其 x 轴开始,螺旋线的空间坐标原点为$(x_t,y_t,z_t)=(0,0,0)$,则螺旋线在工件坐标系{W}中的参数方程[7]如式(10)所示。

$$ \begin{cases} x=x_t+r\cdot\cos\left(\dfrac{2\pi}{p}\cdot\varphi\right) \\ y=y_t+r\cdot\sin\left(\dfrac{2\pi}{p}\cdot\varphi\right) \\ z=z_t+\varphi \end{cases} \tag{10} $$

式中:φ 为参数变量。

螺旋倾角 ψ_0 可由式(11)得出:

$$ \psi_0=\arctan[2(\frac{p}{2\pi r})] \tag{11} $$

φ 从 0 到 p 变化一次,生成一个螺距的螺旋线。运用 MATLAB 可显示在基坐标系{o}下的螺旋线图形,如图 2 所示。

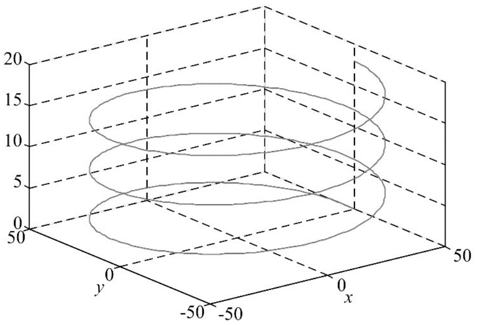

图 2　螺旋线

3　倾斜螺旋线各节点的位姿

3.1　截取节点

螺旋线是机器人末端执行器的运动路径,如果要对螺旋线轨迹进行规划,就必须在螺旋线上截取一系列的路径节点,而且这些节点的位姿需用齐次矩阵的形式表示出来。

采用折线拟合螺旋线的方法[8],向 xoy 平面投影(如图 3 所示)。设步进角为 α_c,控制误差为 δ_{max}(普通数控加工误差可取 0.01mm)[9]。

在 xoy 平面上:

$$\delta = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{1}{2}l_{xy}\right)^2} = r - r\cos\frac{\alpha}{2} \leqslant \delta_{max}$$

即:

$$\alpha_c \leqslant 2 \cdot \arccos(1 - \delta_{max}/r) \tag{12}$$

根据步进角选取节点,节点数为:

$$n = ceil(2 \cdot \pi/\alpha_c)$$

式中: $ceil$ 为 MATLAB 函数。向正无穷取整得到的 n 为 158。

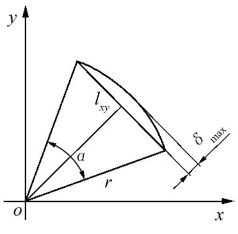

图 3　投影图

3.2　节点姿态和位置

为了得到更精确的分析结果,取 3 个螺距的螺旋线进行分析、研究。

假设工件坐标系{W}相对基坐标系{o}的变换为${}^{o}_{W}\boldsymbol{T}$:

$${}^{o}_{W}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1\,000 \\ 0 & 0.866 & -0.500 & 1\,000 \\ 0 & 0.500 & 0.866 & 500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2.1　节点位置

由上可知,在螺旋线上截取的节点数为 n,则螺旋线方程式(10)中变量 φ 的步进为 p/n。现假设 φ 从 0 每隔 p/n 取点,到 $3p$ 为止,然后通过螺旋线方程式(10)可得各节点在工件坐标系的位置坐标 $(x_W(i), y_W(i), z_W(i))$。机器人末端坐标系原点的齐次矩阵序列 $\boldsymbol{T}_W(:,:,i)$ 如式(13)所示:

$$\boldsymbol{T}_W(:,:,i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_W(i) \\ 0 & 1 & 0 & y_W(i) \\ 0 & 0 & 1 & z_W(i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

已知${}^{o}_{W}\boldsymbol{T}$ 和 $\boldsymbol{T}_W(:,:,i)$,可求得 $\boldsymbol{T}_o(:,:,i)$,如式(14)所示:

$$\boldsymbol{T}_o(:,:,i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_o(i) \\ 0 & 1 & 0 & y_o(i) \\ 0 & 0 & 1 & z_o(i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

其中 $(x_o(i), y_o(i), z_o(i))$ 为${}^{o}_{W}\boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{T}_W(:,:,i)$ 矩阵的最后一列。

3.2.2　节点姿态

假设在开始控制机器人时,机器人末端刀具上空间直角坐标系 3 个坐标轴的方向与参考坐标系各坐标轴的方向对应一致。已知刀具旋转轴线与关节 6 轴线夹角为 90°,末端坐标系 yoz 平面是砂轮所在平面,末端坐标系的 x 轴方向是电主轴所在方向。具体变换如下:

1) 空间直角参考坐标系固定不动,使与机器人末端刀具固接的空间直角坐标系绕空间直角参考坐标系的 y 轴旋转 $-\pi/2$,这样会让机器人的末端坐标系轴 x 与空间直角参考坐标系的 z 轴重合,此时呈竖直向上的形状。

2) 将与机器人末端执行器固接的直角坐标系再绕空间直角参考坐标系的 z 轴旋转 π,这样会让机器人的末端坐标系 z 轴方向与空间直角参考坐标系的 x 轴重合。

3) 由于工件坐标系相对于基坐标系的变换为${}^{o}_{W}\boldsymbol{T}$,所以需将机器人的末端坐标系再绕空间直角参考坐标系 x 轴旋转 $\pi/6$。

4) 以上已经假设过此空间螺旋线的倾角为 ψ_0,因此使机器人末端坐标系绕空间螺旋轴 $\boldsymbol{k}$ 旋转 ψ_0,最终可得到机器人末端坐标系姿态矩阵 $\boldsymbol{T}_r$。

经过以上 4 步变换后,可以得到与机器人末端执行器固接的空间直角坐标系姿态矩阵 $\boldsymbol{T}_r$。调用 MATLAB 函数 angvec2tr( ) 可得节点姿态矩阵 $\boldsymbol{T}_r$,具体表达式如式(15) 所示:

$$\boldsymbol{T}_r = angvec2tr(\psi_0, \boldsymbol{k}(i,:)) \cdot Rot(x, \pi/6) \cdot Rot(z, \pi) \cdot Rot(y, -\pi/2) \tag{15}$$

式中空间螺旋轴 $\boldsymbol{k}$ 是在空间螺旋线上随着机器人末端位置改变而不断变化的单位方向向量(机器人末端沿螺旋线上升过程中,出现在每个节点所处圆平面上的圆半径方向,方向朝里),$\boldsymbol{k}$ 的数学计算公式在 MATLAB 中可用数学函数 reshape( )[10] 得到。具体表达式如式(16) 所示:

$$\boldsymbol{k} = reshape\{[\cos(\frac{2\pi}{p} \cdot \theta), \sin(\frac{2\pi}{p} \cdot \theta), zeros(1, 3n+1)], 3n+1, 3\} \tag{16}$$

由此可知,$\boldsymbol{k}$ 是一个$(3n+1) \times 3$ 阶矩阵,矩阵的每一个行向量代表对应节点的螺旋轴单位方向向量。

最后,在得到节点位置矩阵和姿态矩阵后,运用 MATLAB 循环程序将两者融合成节点位姿矩阵 $\boldsymbol{T}(:,:,i)$,矩阵 $\boldsymbol{T}$ 是 $4 \times 4 \times (3n+1)$ 阶矩阵,即$(3n+1)$ 个节点在基坐标系{o} 的位姿矩阵序列,节点位置如图 4 所示。

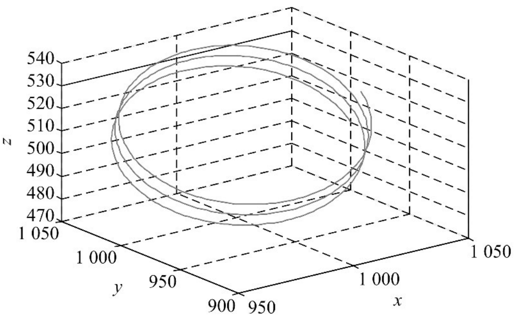

图 4　节点位置

4　验证机器人模型

因为本实验取 3 个螺距的螺旋线进行分析、研究,所以总节点数为 $3 \times 158 + 1 = 475$。

取第一个节点来验证机器人模型正、逆解准确性,并确定唯一逆解。由以上 MATLAB 程序可得前两个点的位姿序列如下:

$$\boldsymbol{T}(:,:,1) = \begin{bmatrix} -0.000\,000 & -0.000\,000 & 1.000\,000 & 1\,050.000\,000 \\ -0.516\,445 & -0.856\,319 & -0.000\,000 & 1\,000.000\,000 \\ 0.856\,319 & -0.516\,445 & -0.000\,000 & 500.000\,000 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

求节点 1 在关节空间对应的位移向量。在式(5) 的计算中,分别取负号、正号,可得:

$$\boldsymbol{q}_1 = \begin{bmatrix} 0.851\,966\,327\,173\,272 \\ 0.246\,038\,733\,458\,226 \\ -0.200\,882\,343\,361\,829 \\ -1.209\,251\,841\,191\,569 \\ 0.934\,988\,548\,399\,245 \\ 0.461\,040\,275\,483\,944 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{q}_2 = \begin{bmatrix} 0.851\,966\,327\,173\,272 \\ -1.045\,337\,484\,791\,300 \\ -1.119\,413\,101\,038\,106 \\ -0.896\,511\,279\,033\,732 \\ 0.972\,502\,551\,327\,438 \\ 0.929\,809\,295\,998\,442 \end{bmatrix}$$

将 $\boldsymbol{q}_1$ 代入式(3) 中,得

$$\boldsymbol{T}_1 = \begin{bmatrix} -0.000\,000 & -0.000\,000 & 1.000\,000 & 1\,050.000\,000 \\ -0.516\,445 & -0.856\,319 & -0.000\,000 & 1\,000.000\,000 \\ 0.856\,319 & -0.516\,445 & -0.000\,000 & 500.000\,000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000\,000 \end{bmatrix}$$

将 $\boldsymbol{q}_2$ 代入式(3) 中,得

$$\boldsymbol{T}_2 = \begin{bmatrix} -0.462\,321 & 0.102\,411 & 0.880\,778 & 432.485\,034 \\ -0.167\,983 & -0.985\,436 & 0.026\,405 & 322.733\,813 \\ 0.870\,655 & -0.135\,748 & 0.472\,791 & 552.979\,462 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000\,000 \end{bmatrix}$$

经过比较发现:取正号时,求解的位姿与实际位姿相差非常大;而取负号时,误差则非常小。综上可知:在求解 θ_2 的式(5) 中,取负号满足计算要求。

5　螺旋线各节点的位移、速度、加速度向量图像

5.1　各节点关节空间的位移向量

对运动学逆解表达式(4) ~(9) 进行编程,可得 475 个节点在关节空间的位移向量。通过 MATLAB 可分别显示 6 个关节在各节点关节角的连线,使 6 个关节在关节空间的关节角变化更直观,如图 5 所示。

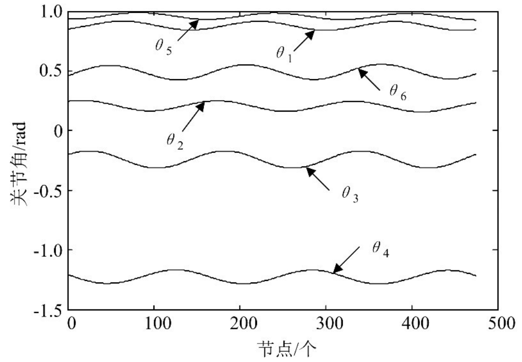

图 5　关节角

5.2　各节点关节空间的速度向量

关节速度求解公式,如式(17)所示:

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{-1}\dot{\boldsymbol{x}} \tag{17}$$

式中: $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})$ 为机器人雅克比矩阵,是 $6 \times n$ 的偏导数矩阵。

工业机器人末端在工作空间的速度表示为:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{v} = [v_x \quad v_y \quad v_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^{\mathrm{T}}$$

设机器人末端在 z 轴方向为恒速:

$$v_z = 0.2\mathrm{mm/s} \tag{18}$$

则第 i 个节点的其余速度分量可表示为:

$$\omega_z(i) = 2\pi/(\frac{\rho}{v_z}); \omega_x(i) = 0; \omega_y(i) = 0$$

$$v_x(i) = w_z(i) \cdot r \cdot \sin[(i-1) \cdot \alpha_c]$$

$$v_y(i) = w_z(i) \cdot r \cdot \cos[(i-1) \cdot \alpha_c]$$

用矢量积法计算 Motoman UP50 工业机器人的速度雅克比矩阵,并用特殊点验证雅克比矩阵的准确性。

计算 $\boldsymbol{J}$ 内元素的方法相同,本文只给出 $\boldsymbol{J}_1$ 各元素:

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{J} = [\boldsymbol{J}_1 \quad \boldsymbol{J}_2 \quad \boldsymbol{J}_3 \quad \boldsymbol{J}_4 \quad \boldsymbol{J}_5 \quad \boldsymbol{J}_6] \\ &\boldsymbol{J}_1 = [j_{11} \quad j_{21} \quad j_{31} \quad j_{41} \quad j_{51} \quad j_{61}] \end{aligned} \tag{19}$$

$j_{11} = -145s_1 - 870s_1s_2 - 110s_1s_{(2-3)} - 1\,025s_1c_{(2-3)} - 175s_1c_{(2-3)}c_5 - 175c_1s_4s_5 - 175s_1s_{(2-3)}c_4s_5$, $j_{21} = 145c_1 + 870c_1s_2 + 110c_1s_{(2-3)} + 1\,025c_1c_{(2-3)} + 175c_1c_{(2-3)}c_5 - 175s_1s_4s_5 + 175c_1s_{(2-3)}c_4s_5$, $j_{31} = 0$, $j_{41} = 0$, $j_{51} = 0$, $j_{61} = 1$。

为了验证得到的速度雅克比的准确性,计算 $\boldsymbol{q} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \pi/2 \quad 0]$ 时的机器人雅克比,结果为:

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1\,155 & -285 & 0 & -175 & 0 \\ 1\,170 & 0 & 0 & 175 & 0 & 0 \\ 0 & -1\,025 & 1\,025 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

如 $\boldsymbol{J}$ 的第一列为 $[0 \quad 1\,170 \times \mathrm{d}\theta_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \mathrm{d}\theta_1]$,则表示在位姿 $\boldsymbol{q} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \pi/2 \quad 0]$ 时,关节 1 的微分转动 $\mathrm{d}\theta_1$ 反映到末端在基坐标系下的微分运动为 $[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \pi/2 \quad 0]$,由此可知速度雅克比是准确的。

已知速度雅克比矩阵、操作空间的机器人末端速度,可获得 475 个节点在关节空间的速度向量。通过 MATLAB 可分别显示 6 个关节在各节点角速度的连线,使 6 个关节在关节空间的角速度变化更加直观。

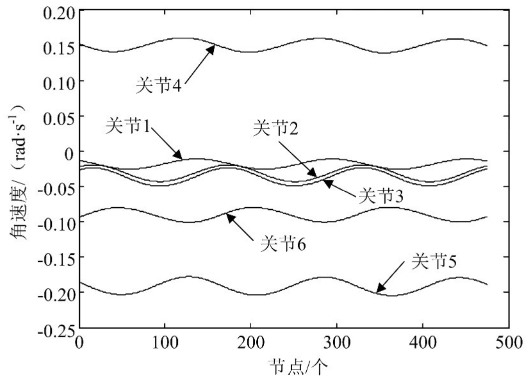

图 6　关节角速度

5.3　各节点关节空间加速度向量

机器人末端加速度方程为:

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{-1}[\ddot{\boldsymbol{x}} - \dot{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}] \tag{20}$$

其中:

$$\dot{\boldsymbol{J}}_{mn}(\boldsymbol{q}) = \sum \frac{\partial \boldsymbol{J}_{mn}(\boldsymbol{q})}{\partial \boldsymbol{q}_i} \cdot \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}_i}{\mathrm{d}t} = \dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{mn} \tag{21}$$

式中: $\boldsymbol{H}_{mn}$ 为雅克比矩阵 $\boldsymbol{J}$ 的第 m 行 n 列元素 J_{mn} 对 $\boldsymbol{q}$ 的偏导数,为 6×1 矩阵。

引进矩阵层如下所示:

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_{11} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \boldsymbol{H}_{66} \end{bmatrix}_{6 \times 6 \times 6} \tag{22}$$

称 $\boldsymbol{H}$ 为二阶系数矩阵,并规定

$$\boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{11} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{66} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \tag{23}$$

结合式(20) ~ (23) 有:

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{-1}(\ddot{\boldsymbol{x}} - \dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\dot{\boldsymbol{q}}) \tag{24}$$

根据式(24) 可算得 $\boldsymbol{H}_{mn}$,最后可得二阶系数矩阵 $\boldsymbol{H}$。

因为在操作空间里的机器人末端速度为匀速,所以可得: $\ddot{\boldsymbol{x}} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^{\mathrm{T}}$。

对式(24) 编程,求得 475 个节点在关节空间的加速度向量。通过 MATLAB 可分别显示 6 个关节在各节点角加速度的连线,使 6 个关节在关节空间的角加速度变化更加直观,如图 7 所示。

5.4　不同加工速度加工不同直径螺纹

采用上述计算、仿真过程,得到以不同速度 v_z 加工不同直径螺纹的全部结果。例如: 用 $v_z = 0.1\mathrm{mm/s}$ 的速度分别加工直径 64mm ~ 280mm 的螺纹,其他亦是如此。

v_z 分别取 0. 1mm/s、0. 2mm/s、0. 4mm/s、0.5mm/s、0. 8mm/s、2mm/s、3mm/s、4mm/s、5mm/s。

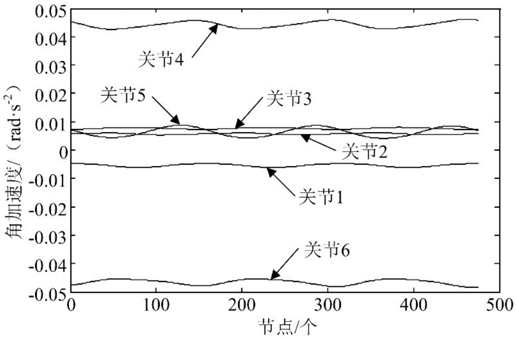

图 7　关节角加速度

普通大直径螺纹参数见表 2。

表 2　螺纹参数　　mm

直径	64	72	80	90	100	110	125
螺距	4	6	6	6	6	6	8
直径	140	160	180	200	220	250	280
螺距	8	8	8	8	8	8	8

6　结论

1) 相同的速度 (v_z) 下,随着加工螺纹直径的增大,各关节位移变化幅度增大,速度变化幅度增大,加速度变化幅度减小。

2) 相同加工直径下,随着加工速度的增大,各关节速度增大,加速度也增大。

3) 机器人有针对地修复加工大直径螺纹,可大大提高其加工精度和效率。

参考文献:

[1] 彭成勇,楼一珊,曹元平,等. 钻铤螺纹连接疲劳失效研究[J]. 石油钻探技术,2006,34(6):20-22.

[2] HAYATI S A. Robot arm geometric link parameter estimation [C]//Decision and Control. [S. l.]: IEEE, 1983: 1477-1483.

[3] 龚振邦,王勤悫. 机器人机械设计[M]. 北京:电子工业出版社,1995:44-111.

[4] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,1996:15-30,94-115.

[5] MAYER G E. Differential kinematic control equations for simple manipulators[J]. IEEE Translation on Systems, Man, and Cybernetics, 1981, 11(6):456-460.

[6] 张永贵,刘晨荣,刘鹏. 工业机器人运动学逆向建模[J]. 机械设计与制造,2014,11(3):123-126.

[7] 罗良玲,刘旭波. 基于时间分割法的圆柱螺旋线直接插补算法[J]. 南昌大学学报(工科版),2001,23(4):57-59.

[8] 黄建. 数控加工空间运动平滑路径的规划[D]. 扬州:扬州大学,2013:17.

[9] 陈萧. 大口径螺纹加工的分析和实现[J]. 南通职业大学学报,2009,23(2):98-101.

[10] 陈富久. 基于 Robotics Toolbox 的工业机器人螺旋轨迹研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016:39-42.

The kinematics analysis on the machining large diameter thread with UP50 robot

ZHANG Yonggui, ZOU Yan, HUANG Zhongqiu, CHENG bing

(School of Mechanical and Electrical Engineering,

Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou, 730050, China)

Abstract: Aiming at machining and repairing large parts with robot, it establishes the kinematics model and analyzes the inverse kinematics to Motoman UP50 robot. It builds the tilted spiral model in the space and calculates the node pose of the spiral line, verifies the veracity of robot model and each node pose, analyzes the displacement vector, the velocity vector and acceleration vector of the nodes in the joint space. Comparing some vectors, it provides the more accurate algorithm basis and theoretical basis for the tilted spiral trajectory planning of UP50 robot in the joint space.

Key words: robot; spiral trajectory; kinematics