

用于钻头刃磨的运动合成方法研究

李信能 陈鼎昌

(北京航空航天大学 707 教研室, 北京, 100083)

RESEARCH ON KINEMATIC SYNTHESIS OF A ROBOT MANIPULATOR FOR DRILL GRINDING

Li Xinneng, Chen Dingchang

(Faculty 707, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘要 提出一种六自由度机械手的运动合成方法应用于钻头的刃磨, 该方法利用运动的合成形成了刃磨钻头后刀面所需的刃磨运动, 从而使得刃磨的调整变得十分方便。刃磨参数可以根据钻尖几何参数对机械手运动方程进行求解得到, 刃磨出钻尖的测量结果与理论值基本一致。

关键词 钻头, 磨, 机器人臂, 运动学

中图分类号 V261.25, TG713

Abstract The kinematic synthesis of a six degree-of-freedom robot manipulator is analyzed and the methodology is employed for grinding of drill flanks. The method synthesizes the mechanism to obtain the necessary motion of drill grinding process, so that the grinding manipulator is mechanically simple and flexible, and the adjustment and setup of the parameters are very easy. Kinematic equations of the manipulator are established and the orientation and position matrix of the drill point is developed. In a prototype grinding machine several drills are ground successfully to provide initial confirmation of the theory.

Key words drill bits, grinding, kinematics, robot arms

数控钻头刃磨机的出现, 使得刃磨各种精确复杂的钻型成为可能^[1~3], 这些机床的设计一般都是建立在特定钻头数学模型的基础上, 例如锥面、螺旋面、复杂螺旋面。因此机床的专用性较强, 通用性受到限制。此外, 为了刃磨复杂的钻型(例如群钻), 则机床的运动轴数目需要多达七个以上, 调整复杂; 另一方面, 钻头的刃磨都是围绕钻尖部分, 运动范围和幅度都不大, 正好利用机械手可以产生空间任意形状的运动轨迹, 因此可以刃磨任意形状的钻型。本文通过理论和实验将机械手的运动合成应用于钻头刃磨。

1 操作手的运动方程

试验用六自由度机器人, 如图 1 所示, 它具有三个移动关节和三个转动关节, 关节运动变量为 $d_1, d_2, d_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。终端运动和各连杆之间的相对运动坐标系, 如图 1 所示。

设相邻连杆之间的齐次变换为 T_{n-1}^n , 则操作手终端连杆 L_6 相对于基础连杆 L_0 的运动变换矩阵 T_0^6 为

$$T_0^6 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 T_5^6 \quad (1)$$

1993 年 3 月 6 日收到, 1993 年 7 月 2 日收到修改稿

考虑换轴变换, 得操作手运动方程

$$T_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & c_1 s_2 s_3 - c_3 s_1 & c_1 s_2 c_3 + s_1 s_3 & -L_1 c_1 c_2 + L_2 s_1 - d_2 \\ s_1 c_2 & s_1 s_2 s_3 + c_1 c_3 & s_1 s_2 c_3 - c_1 s_3 & -L_1 s_1 c_2 - L_2 c_1 + d_3 \\ -s_2 & c_2 s_3 & c_2 c_3 & L_1 s_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $c_i = \cos\theta_i (i = 1, 2, 3)$, $s_i = \sin\theta_i (i = 1, 2, 3)$

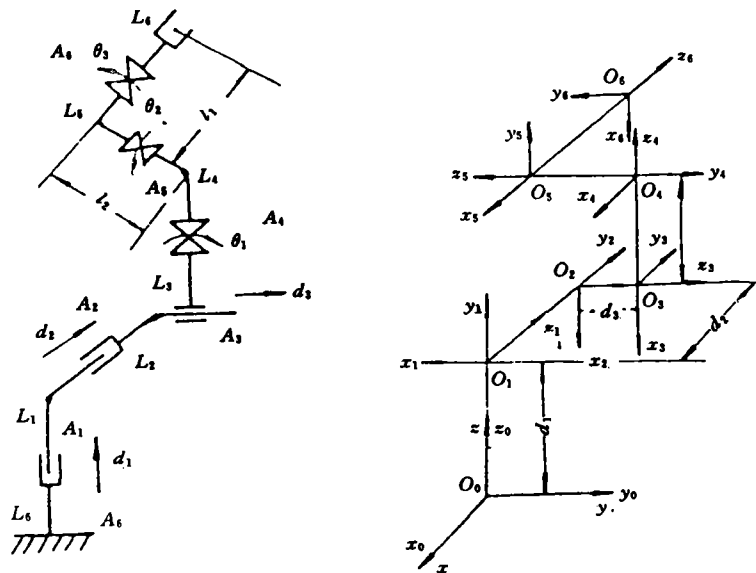


图1 用于钻头刃磨的六自由度操作手及坐标系设置示意图

2 钻头位姿描述及关节运动量求解^(3, 4)

在机器人工作空间内, 钻头的空间位置由向量 \vec{p} 表示; 钻头的空间姿势由向量坐标系 \vec{n} 、 \vec{s} 、 \vec{a} 来描述。

以钻头后刀面锥面刃磨法为例, 当按四参数锥面刃磨法进行刃磨时, 刃磨参数为 φ 、 θ 、 ω 、 x , 磨削成形运动是钻头绕假想锥轴摆动, 工作台沿砂轮的径向或轴向进给, 利用砂轮的圆柱面或端面成形出锥面, 刃磨原理图如图2所示。

钻头在刃磨过程中每一时刻的姿态即是钻头绕空间锥轴(以任意空间向量 \vec{K} 表示)作定轴转动所呈现的姿态, 可以用当量轴-角法求得。

空间锥轴向量 \vec{K} 可以用刃磨参数表示⁽³⁾, 即

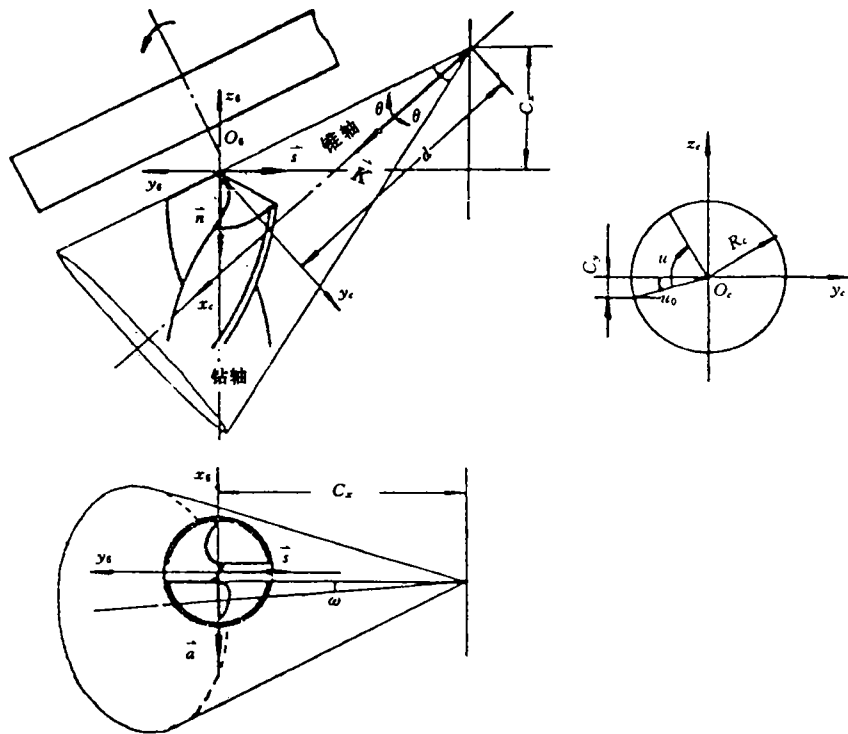


图 2 锥面刃磨模型中钻头的位姿描述

$$\vec{K} = (k_x, k_y, k_z) = (\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma) \tag{3}$$

$$k_x = -\frac{\cos\varphi\cos\omega}{\sqrt{\cos^2\omega \cos^2\varphi + \sin^2\varphi}} \tag{4}$$

$$k_y = \frac{\sin\varphi\cos\omega}{\sqrt{\cos^2\omega \cos^2\varphi + \sin^2\varphi}} \tag{5}$$

$$k_z = -\frac{\sin\varphi\sin\omega}{\sqrt{\cos^2\omega \cos^2\varphi + \sin^2\varphi}} \tag{6}$$

所以

$$T_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \text{Rot}(\vec{K}, \mu) \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 n_x &= \cos^2 \alpha (1 - \cos \mu) + \cos \mu \\
 n_y &= \cos \alpha \cos \beta (1 - \cos \mu) + \cos \gamma \sin \mu \\
 n_z &= \cos \alpha \cos \gamma (1 - \cos \mu) - \cos \beta \sin \mu \\
 s_x &= \cos \alpha \cos \beta (1 - \cos \mu) - \cos \gamma \sin \mu \\
 s_y &= \cos^2 \beta (1 - \cos \mu) + \cos \mu \\
 s_z &= \cos \beta \cos \gamma (1 - \cos \mu) + \cos \alpha \sin \mu \\
 a_x &= \cos \alpha \cos \gamma (1 - \cos \mu) + \cos \beta \sin \mu \\
 a_y &= \cos \beta \cos \gamma (1 - \cos \mu) - \cos \alpha \sin \mu \\
 a_z &= \cos^2 \gamma (1 - \cos \mu) + \cos \mu \\
 p_x &= -L_1 + R_c \sin \varphi (\cos \mu_0 - \cos(\mu - \mu_0)) \\
 p_y &= -L_2 + R_c \cos \varphi (\cos \mu_0 - \cos(\mu - \mu_0)) \\
 p_z &= R_c (\sin \mu_0 + \sin(\mu - \mu_0))
 \end{aligned} \tag{8}$$

上式中 L_1, L_2 为机床结构参数

$$R_c = C_x \sin \theta \sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \varphi_0 \cos^2 \omega} + 1} \tag{9}$$

$$\mu_0 = \sin^{-1}(C_y / R_c) \tag{10}$$

求解操作手运动方程式(2)、式(7), 并考虑实际刃磨时, 需将水平 x, y 导轨旋转一角度 φ_0 (φ_0 为钻头半锋角), 以便利用砂轮的外圆周刃磨, 因此各关节运动量的解为

$$\theta_1 = \operatorname{tg}^{-1}(n_y / n_x) \tag{11}$$

$$\theta_2 = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{-n_z}{n_x \cos \theta_1 + n_y \sin \theta_1}\right) \tag{12}$$

$$\theta_3 = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{a_x \sin \theta_1 - a_y \cos \theta_1}{-s_x \sin \theta_1 + s_y \cos \theta_1}\right) \tag{13}$$

$$d_1 = p_z - L_1 \sin \theta_2 \tag{14}$$

$$d_2 = \sin \varphi_0 (p_x + L_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_2 \sin \theta_1) + \cos \varphi_0 (p_y + L_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos \theta_1) \tag{15}$$

$$d_3 = -\cos \varphi_0 (p_x + L_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_2 \sin \theta_1) + \sin \varphi_0 (p_y + L_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos \theta_1) \tag{16}$$

3 六轴插补程序设计及钻头刃磨试验

3.1 插补算法的选择

数控加工可用的插补算法很多, 如逐点比较法、最小偏差法、数字积分法(DDA)、目标点跟踪法等等。针对六轴联动, 采用比值积分算法。该方法特别适合于多坐标联动控制, 插补时, 脉冲的分配也比较均匀。

比值积分法的算法原理是设需插补的轨迹终点 M 的坐标为 $M(M_1, M_2, M_3, \dots, M_n)$, 其中绝对值最大者的坐标值设为 MAX , 则 $\delta_i = \frac{M_i}{MAX}$ 为第 i 维坐标的判别函数。设 R_1, R_2, \dots, R_n 为 n 坐标值寄存器, R_1', R_2', \dots, R_n' 为 n 维坐标值的累加器, 则插补运算的规则为

$$\text{若 } \delta_i = \frac{R_i}{MAX} \geq 1, \text{ 则 } i \text{ 坐标方向上走一步, } R_i + R_i' - MAX \rightarrow R_i';$$

$$\text{若 } \delta_i = \frac{R_i}{MAX} < 1, \text{ 则 } i \text{ 坐标方向上不走步, } R_i + R_i' \rightarrow R_i'$$

开始插补前, R_i' 累加器中预先设置好与 R_i 寄存器中相同的坐标值。

3.2 插补程序设计及刃磨试验

机械手的 6 个运动关节均由步进电机驱动, 控制器为 Z80 单板机。刃磨试验前, 首先将钻头的理论几何参数输入到计算机中, 根据锥面刃磨理论计算出一组刃磨参数^(2, 3), 再根据前述运动合成方法计算出各关节的关节运动坐标和步进电机的运动量; 最后将 6 个电机运动量(脉冲数)传入到单板机中, 调用六坐标比值积分插补程序进行插补加工^[1]。刃磨试验举例如下:

例 1 钻头理论几何参数为: 直径 $D=9.9\text{mm}$, 钻芯厚度 $W=2r_0=1.63\text{mm}$, 螺旋角 $\beta_0=30^\circ$, 锋角 $2\varphi_0=118^\circ$, 横刃斜角 $\psi=50^\circ$, 主刃外缘结构圆周后角 $\alpha_f=10^\circ$ 。计算出的锥面刃磨参数为: $\varphi=30^\circ$, $\theta=29^\circ 6'$, $\omega=3^\circ 48'$, $C_x=3.75\text{mm}$, $C_y=1.06\text{mm}$, $C_z=2.51\text{mm}$ 。

用合成法刃磨出的钻头如图 3 所示。钻头几何参数的测量结果为: $D=9.9\text{mm}$, $W=1.63\text{mm}$, $\beta_0=30^\circ$, $2\varphi_0=118^\circ 40'$, $\psi=50^\circ 11'$, $\alpha_f=9^\circ 53'$ 。测量结果与理论值基本一致。

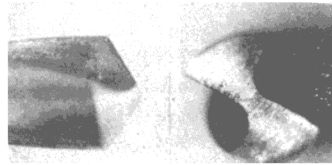


图 3 用合成法刃磨的钻头

例 2 钻头理论几何参数为: $D=7\text{mm}$, $2r_0=1.03\text{mm}$, $2\varphi_0=118^\circ$,

$\psi=50^\circ$, $\alpha_f=12^\circ$ 。计算出的刃磨

参数为: $\varphi=40^\circ$, $\theta=19^\circ 6'$, $\omega=$

$2^\circ 45'$, $C_x=4.69\text{mm}$, $C_y=0.8\text{mm}$,

$C_z=3\text{mm}$ 。钻头几何参数的测量值

为: $D=7\text{mm}$, $2r_0=1.03\text{mm}$, $2\varphi_0=$

$118^\circ 55'$, $\psi=49^\circ 11'$, $\alpha_f=11^\circ 53'$ 。测量结果与理论值基本一致。

参 考 文 献

- 1 Wu S M, Fugelso M A. A microprocessor controlled twist drill grinder for automated drill production. Trans ASME J of Eng for Industry. 1979; 101(2): 325—329
- 2 Armarego E J A, Rotenberg A. An investigation of drill point sharpening by the straight LID conical grinding method 1. Int J Mach Tool Des Res. 1973; 13: 155—164
- 3 李信能. 麻花钻与群钻的计算机辅助设计(CAD)与自动化刃磨研究. 北京航空航天大学博士论文, 1990
- 4 Richard P P. Robot Manipulators. Mathematics, Programming and control. Massachusetts: MIT Press, 1982