适合多种机床结构的数控系统5坐标变换库

靳 阳 郇 极 肖文磊 郭成军

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 研究了适合多种结构布局形式的统一坐标变换方法,开发出数控系统5坐标变换函数库,并作为坐标变换控制模块集成到数控系统中. 分析了5坐标数控机床运动学模型,归纳出12种5坐标数控机床结构布局,并推导了对应的坐标变换数学算法. 通过结构分析和数学变换将12种算法扩展归纳到3类基础算法,并基于3类基础算法开发出适合多种机床结构布局的5坐标变换库. 利用机床三维仿真系统验证了5坐标变换库的可行性,并将该坐标变换库集成到北京航空航天大学开发的CH-2010开放式数控系统中.

关 键 词: 5坐标数控机床; 坐标变换; 数控系统

中图分类号: TG 659

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)06-0842-07

5-coordinate transformation technology of CNC system for a variety of structures of machine tools

Jin Yang Huan Ji Xiao Wenlei Guo Chengjun

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The uniform method of coordinate transformation was studied, which is suited for a variety of structures of 5-axis machine tool. CNC(computer numerical control) coordinate transformation library was developed, which could be integrated into CNC system as a coordinate transformation control module. The kinematics of 5-axis machine tool was analyzed, 12 types of 5-axis machine tool structure were listed, and the corresponding coordinate transformation algorithms were derived. 3 types of basic algorithms were obtained through mathematical transformation, and a 5-coordinate transformation library was developed based on the basic algorithms. The feasibility of 5-coordinate transformation library was verified by a 3D simulation system, and the library was integrated into CH-2010 open CNC system developed by Beijing University of Aeronautics and Astronautics.

Key words: 5-axis machine tool; coordinate transformation; CNC(computer numerical control) system

1 数控系统的坐标变换功能

5坐标数控铣床和加工中心有刀具双摆动、转台双摆动和转台/刀具摆动3大类常见机械结构,每一类结构又包含多种可能组合.

由于传统的数控系统只具有机床坐标轴的直线插补功能,在5坐标铣削加工时,必须由数控加工编程系统的后置处理软件根据机床结构布局(含刀具长度信息)将CAD/CAM系统生成的刀位数据(含刀尖位置和刀具姿态信息)经过坐标变换计算转换成机床进给轴的位置,并离散化成小直线段,生成在数控系统上运行的数控加工程序,如图1a所示. 当刀具长度改变时,通常需要由后置处理软件生成新的数控程序[1-3].

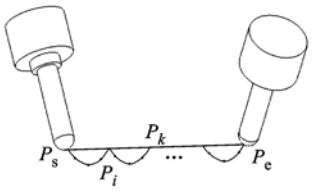
当前一些最先进的数控系统集成有坐标变换处理功能,可以将来自CAD/CAM系统的刀位数

收稿日期: 2011-04-12; **网络出版时间**: 2012-06-19 10:36

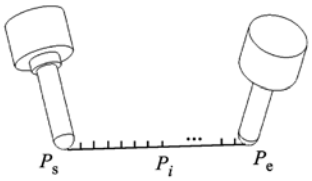
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120619.1036.001.html

作者简介: 靳 阳(1984-),男,北京人,博士生,jinyang_1984@126.com.

据P_s和P_e直接输出给数控系统,插补模块按直线P_sP_e插补,如图 1b 所示.



a　小直线段插补

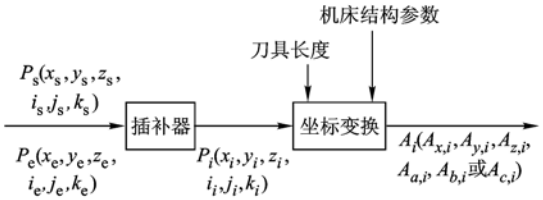


b　经坐标变换处理的插补

P_s,P_e—生成的刀位数据(包括刀尖位置和刀具姿态值);P_k—离散化后的小直线段;P_i—机床各进给轴按照插补器的输出位置运动合成后刀具的运动轨迹(为空间曲线),产生了非线性误差.

图 1　数控系统 5 坐标插补

坐标变换模块根据机床结构和刀具长度信息完成坐标变换计算,实时生成机床坐标轴位置,控制机床运动,控制流程如图 2 所示. 坐标变换计算需要给数控系统输入机床结构参数和刀具长度信息,当刀具长度改变时,不需要改变数控加工程序[4].



$P_s(x_s,y_s,z_s,i_s,j_s,k_s)$,$P_e(x_e,y_e,z_e,i_e,j_e,k_e)$—刀具在机床工件坐标系中的位置;$P_i(x_i,y_i,z_i,i_i,j_i,k_i)$—插补器输出的工件坐标系插补点位置;$A_i(A_{x,i},A_{y,i},A_{z,i},A_{a,i},A_{b,i})$—经坐标变换后的机床直线坐标轴和主轴或转台摆角位置(其中,摆角根据机床结构取$A_{a,i}$,$A_{b,i}$,$A_{c,i}$中的 2 个).

图 2　具有坐标变换功能的数控系统控制流程

此外,具有坐标变换功能的数控系统还能提供空间刀具半径补偿、倾斜面加工等空间加工功能[4-5].

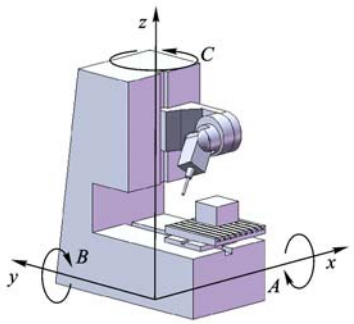
5 坐标数控铣床和加工中心的转台和主轴摆动结构能够组合出 12 种布局形式. 由于坐标变换模块开发工作量大,大多数数控系统只提供最常用机床结构布局的坐标变换模块算法;还有一些数控系统的坐标变换模块是以面向用户的开放模块方式提供的,由机床用户根据机床结构自行编写坐标变换模块[6].

本文研究和分析了对应 12 种机床结构布局形式的运动学算法,归纳出 3 类基础算法及其逆变换的显式算法,由此开发出坐标变换库模块. 根据机床结构,设置坐标变换库模块参数,即可选择坐标变换算法,实现控制功能. 采用机床三维仿真系统[7]完成了所有 12 种机床结构布局的仿真验证. 最后将坐标变换库模块集成到北京航空航天大学开发的 CH-2010 开放式数控系统中,实现了控制功能.

2　坐标变换方法

2.1　坐标系定义

通常 5 坐标数控机床的运动控制轴正交设置,直线坐标轴和旋转坐标轴遵循右手笛卡尔坐标系. 图 3 为机床坐标系.



x,y,z—直线轴;A,B,C—旋转轴,遵循右手法则,正方向分别与x,y,z轴正方向一致.

图 3　机床坐标系

首先定义坐标变换规则:式(1)为坐标系平移变换矩阵,式(2)~式(4)分别为绕x,y,z轴的旋转变换矩阵.

$$\boldsymbol{T}_{\text{trans}}(x,y,z)=\begin{bmatrix}1&0&0&x\\0&1&0&y\\0&0&1&z\\0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{R}_x(A)=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&\cos A&-\sin A&0\\0&\sin A&\cos A&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{R}_y(B)=\begin{bmatrix}\cos B&0&\sin B&0\\0&1&0&0\\-\sin B&0&\cos B&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{R}_z(C)=\begin{bmatrix}\cos C&-\sin C&0&0\\\sin C&\cos C&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{4}$$

2.2 坐标变换原理

数控系统坐标变换的目的是用机床运动轴位置值表示刀尖位置及刀具姿态,数控系统通过控制机床各轴的合成运动完成对刀具的控制. 因此机床的结构布局不同,坐标变换的关系也不同. 图 4 为具有刀具 AB 摆角的 5 坐标数控机床坐标系关系和相应偏移向量示例.

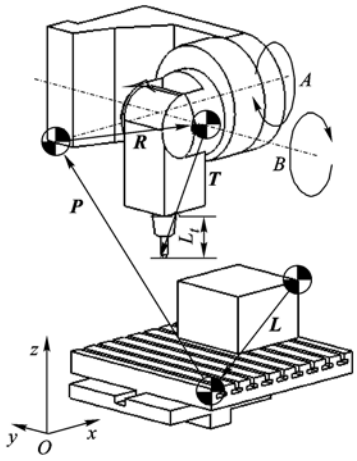


图 4 刀具 AB 摆角 5 坐标数控机床

坐标变换计算使用以下变量描述多种 5 坐标数控机床的机械结构,包括:

$\boldsymbol{L}(l_x,l_y,l_z)$,工件坐标系到工作台坐标系的向量;

$\boldsymbol{P}(p_x,p_y,p_z)$,工作台坐标系到 A 轴中心的向量,其中包含直线坐标 x,y,z;

$\boldsymbol{R}(r_x,r_y,r_z)$,$A$ 轴中心到 B 轴中心的向量;

$\boldsymbol{T}(t_x,t_y,t_z)$,$B$ 轴中心到刀尖的向量;

L_t,刀具长度值,包含于向量 $\boldsymbol{T}$ 中.

其中,向量 $\boldsymbol{P}$ 可分解为多个直线平动,在此为简化计算只取直线平动的合成.

刀位数据中,刀尖在工件坐标系中的位置为 (Q_x,Q_y,Q_z),刀具姿态单位化向量在坐标轴的投影为 (i,j,k),如图 5 所示.

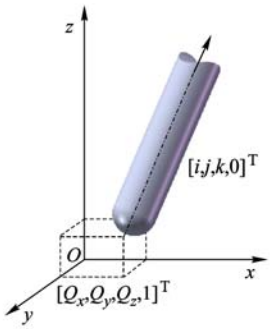


图 5 刀位数据的几何表示

图 4 中机床的坐标变换过程如式(5)[8-10]所示.

$$\begin{bmatrix} i & Q_x \\ j & Q_y \\ k & Q_z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_{\text{trans}}(l_x,l_y,l_z)\cdot\boldsymbol{T}_{\text{trans}}(p_x,p_y,p_z)\cdot \boldsymbol{R}_x(A)\cdot\boldsymbol{T}_{\text{trans}}(r_x,r_y,r_z)\cdot\boldsymbol{R}_y(B)\cdot \boldsymbol{T}_{\text{trans}}(t_x,t_y,t_z)\cdot\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中,$[0,0,0,1]^{\mathrm{T}}$ 为刀尖点;$[0,0,-1,0]^{\mathrm{T}}$ 为刀具在机床坐标系中的姿态向量;其余向量按照图 4 的定义并依据式(1)~式(4)的规则分别代入展开.

2.3 逆运动学算法的显式表达

数控系统 5 坐标变换库中的算法应该是显式表达,可以保证集成在数控系统中的计算耗时是固定的. 在此给出图 4 所示机床 5 个进给轴坐标的显式表达式. 由式(5)求解,得到图 4 中刀具 AB 摆角 5 轴数控机床 x,y,z,A,B 5 个进给轴坐标的显式表达式,见式(6).

$$\left.\begin{aligned} A &= \arctan 2(j,-k) && -\pi/2 \leqslant A \leqslant \pi/2 \\ B &= \arctan(-i) && -\pi/2 \leqslant B \leqslant \pi/2 \\ x &= p_x = Q_x - \cos B\cdot t_x - \sin B\cdot t_z - r_x - l_x \\ y &= p_y = Q_y - \sin A\cdot\sin B\cdot t_x - \\ &\quad \cos A\cdot t_y + \cos B\cdot\sin A\cdot t_z - \\ &\quad \cos A\cdot r_y + \sin A\cdot r_z - l_y \\ z &= p_z = \sin B\cdot\cos A\cdot t_x - \sin A\cdot t_y - \\ &\quad \cos B\cdot\cos A\cdot t_z - \sin A\cdot r_y - \\ &\quad \cos A\cdot r_z - l_z \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

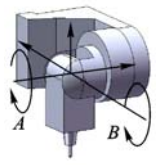
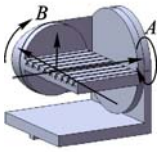
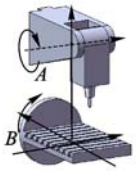
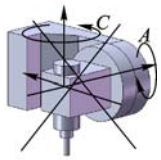
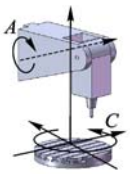
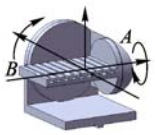
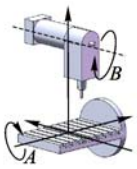
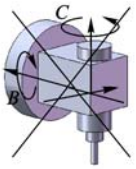
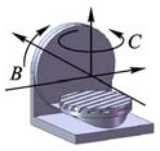
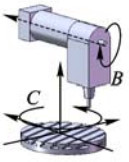
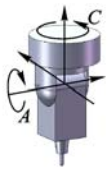
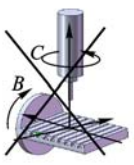
3 坐标数控机床结构布局形式

根据机床转动副(转台和主轴摆角)的布局,可以将机床结构布局分为 3 种基本类型:类型Ⅰ,刀具双摆动;类型Ⅱ,转台双摆动;类型Ⅲ,转台/刀具摆动. 其中每一基本类型中又具有多种结构布局组合方式. 表 1 中按照排列组合原理列举了 5 坐标数控机床的结构布局简图,共有 18 种可能. 排除某一旋转轴与机床主轴重合的情况,合理的结构布局共有 12 种.

使用常规的坐标变换方法,需要建立 12 种坐标变换显式计算公式. 本文研究出 12 种机床结构布局分类的相似关系,将 12 种坐标变换压缩成 3

种基础算法,大大简化了坐标变换模块的开发工作.

表 1　5 轴数控机床结构布局形式

转角	结构布局形式		
	类型Ⅰ	类型Ⅱ	类型Ⅲ
AB			
	11	21	31
AC			
		22	32
BA			
	12	23	33
BC			
		24	34
CA			
	13		
CB			
	14		

4　算法简化方法

4.1　算法分类

在表 1 的同一基本类型中,任选某一种结构布局的算法作为该类的基础算法. 根据同类型结构布局之间的相似性,通过对基础算法进行一定规则的扩展,即可实现该基础算法向该类内其余 3 种算法的变换. 现将结构布局 11,21,31 对应的算法分别命名为 CT1,CT2 和 CT3,作为 3 类基础算法. CT1 对应结构 11,12,13 和 14,CT2 对应结构 21,22,23 和 24,CT3 对应结构 31,32,33 和 34. CT1 的显式表达式为式(6),CT2 为式(7),CT3 为式(8):

$$\left.\begin{aligned}
&A = \arcsin(-j) \quad -\pi/2 \leqslant A \leqslant \pi/2\\
&B = \arcsin 2(i,-k) \quad -\pi/2 \leqslant B \leqslant \pi/2\\
&x = p_x = \cos B\cdot(Q_x - l_x) +\\
&\qquad \sin B\cdot(Q_z - l_z) - r_x - t_x\\
&y = p_y = \cos B\cdot\sin A\cdot(Q_x - l_x) -\\
&\qquad \cos B\cdot\sin A\cdot(Q_z - l_z) +\\
&\qquad \cos A\cdot(Q_y - r_y - l_y) - t_y + \sin A\cdot r_z\\
&z = p_z = -\cos A\cdot\sin B(Q_x - l_x) +\\
&\qquad \cos A\cdot\cos B\cdot(Q_z - l_z) +\\
&\qquad \sin A\cdot(Q_y - r_y - l_y) - t_z - \cos A\cdot r_z
\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

$$\left.\begin{aligned}
&A = \arcsin(j) \quad -\pi/2 \leqslant A \leqslant \pi/2\\
&B = \arctan 2(i,-k) \quad -\pi/2 \leqslant B \leqslant \pi/2\\
&x = p_x = \sin B\cdot(Q_z - l_z) +\\
&\qquad \cos B\cdot(Q_x - l_x) - t_x\\
&y = p_y = Q_y - l_y + \sin A\cdot l_z - \cos A\cdot t_y\\
&z = p_z = -\sin B\cdot(Q_x - l_x) +\\
&\qquad \cos B\cdot(Q_z - l_z) - \cos A\cdot t_z - \sin A\cdot t_y
\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

4.2　对基础算法的扩展规则

通过对机床结构布局相似性的分析,可以获得基础算法向某一结构布局坐标变换算法的扩展方法和规则. 以结构布局 13 为例,其对应的基础算法为 CT1,变换计算扩展原理和规则如图 6 所示.

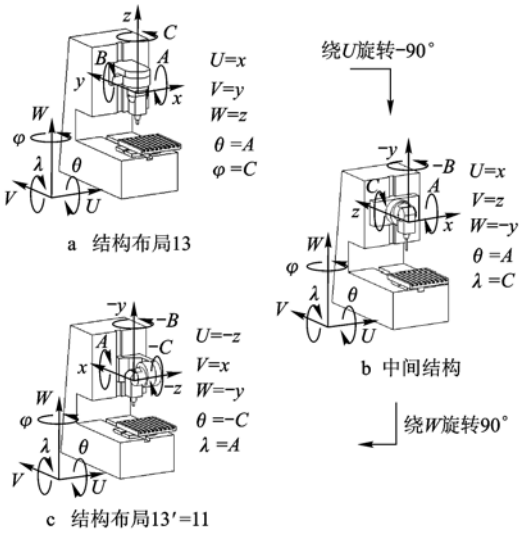


图 6　扩展过程

1）建立坐标系 $UVW\theta\lambda\varphi$ 作为基础坐标系.

2）结构布局 13 刀具 CA 摆角型(图 6a)经 2 次旋转可以变换成结构布局 11 刀具 AB 摆角型,命名为结构布局 13′(图 6c). 2 次旋转依次是:绕 U 轴旋转 $-90°$(图 6b),绕 W 轴旋转 90°(图 6c). 此时的结构布局 13′与结构布局 11 相同,均为刀具 AB 摆角型.

3）对图 6c 结构布局 11 在基础坐标系 $UVW\theta\lambda\varphi$ 下利用 CT1 完成坐标变换计算,得到机床 5 个进给轴的位置值.

4）基础坐标系 $UVW\theta\lambda\varphi$ 中 5 个进给轴的位置值满足如下对应关系:$U=-z, V=x, W=-y, \theta=-C, \lambda=A$. 依此关系,得到结构 13 的 5 个进给轴 $xyzAC$ 的位置值,坐标变换完毕.

将结构布局 13 映射到其对应的基础结构(结构布局 11)的坐标系变换过程如下:

1）建立图 6a 中结构布局 13 的机床结构参数矩阵 $\boldsymbol{M}$:

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} Q_x & i & l_x & r_x & t_x \\ Q_y & j & l_y & r_y & t_y \\ Q_z & k & l_z & r_z & t_z \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

其中,(Q_x, Q_y, Q_z) 为刀尖在工件坐标系中的位置;(i,j,k) 为刀具姿态单位化向量在坐标轴的投影;$\boldsymbol{L}(l_x, l_y, l_z)$ 为工件坐标系到工作台坐标系的向量;$\boldsymbol{R}(r_x, r_y, r_z)$ 为 C 轴中心到 A 轴中心的向量;$\boldsymbol{T}(t_x, t_y, t_z)$ 为 A 轴中心到刀尖的向量.

2）建立图 6c 中结构布局 11 的机床结构参数矩阵 $\boldsymbol{M}'$:

$$\boldsymbol{M}'=\begin{bmatrix} Q_u & r & l_u & r_u & t_u \\ Q_v & s & l_v & r_v & t_v \\ Q_w & t & l_w & r_w & t_w \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中,(Q_u, Q_v, Q_w) 为刀尖在工件坐标系中的位置;(r,s,t) 为刀具姿态单位化向量在坐标轴的投影;$\boldsymbol{L}(l_u, l_v, l_w)$ 为工件坐标系到工作台坐标系的向量;$\boldsymbol{R}(r_u, r_v, r_w)$ 为 θ 轴中心到 λ 轴中心的向量;$\boldsymbol{T}(t_u, t_v, t_w)$ 为 λ 轴中心到刀尖的向量.

3）用齐次变换矩阵表示 2 次正向旋转如式(11)所示:

$$\boldsymbol{P}_{\text{rot}}=\boldsymbol{R}_z\left(\frac{\pi}{2}\right)\cdot\boldsymbol{R}_x\left(-\frac{\pi}{2}\right)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

4）结构 13 正向旋转:绕 U 轴旋转 $-90°$(图 6b),绕 W 轴旋转 90°(图 6c),经旋转的机床结构参数矩阵满足关系 $\boldsymbol{M}'=\boldsymbol{P}_{\text{rot}}\cdot\boldsymbol{M}$,即

$$\boldsymbol{M}'=\begin{bmatrix} -Q_z & -k & -l_z & -r_z & -t_z \\ Q_x & i & l_x & r_x & t_x \\ -Q_y & -j & -l_y & -r_y & -t_y \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

5）对图 6c 中的结构 11 利用 CT1 完成坐标变换计算,机床结构参数由矩阵 $\boldsymbol{M}'$ 提供,在基础坐标系 $UVW\theta\lambda\varphi$ 中的 CT1 对应为

$$\theta=\arctan 2(s,-t) \quad -\pi\leqslant\theta\leqslant\pi$$

$$\lambda=\arcsin(-r) \quad -\pi/2\leqslant\lambda\leqslant\pi/2$$

$$U=p_u=Q_u-\cos\lambda\cdot t_u-\sin\lambda\cdot t_w-r_u-l_u$$

$$V=p_v=Q_v-\sin\theta\cdot\sin\lambda\cdot t_u-\cos\theta\cdot t_v+\cos\lambda\cdot\sin\theta\cdot t_w-\cos\theta\cdot r_v+\sin\theta\cdot r_w-l_v$$

$$W=p_w=Q_w+\sin\lambda\cdot\cos\theta\cdot t_u-\sin\theta\cdot t_v-\cos\lambda\cdot\cos\theta\cdot t_w-\sin\theta\cdot r_v-\cos\theta\cdot r_w-l_w$$

6）至此,得到结构布局 11 的 5 个进给轴在基础坐标系中的坐标值 U, V, W, θ, λ.

7）用齐次变换矩阵表示 2 次反向旋转,如式(12)所示:

$$\boldsymbol{N}_{\text{rot}}=\boldsymbol{R}_x\left(\frac{\pi}{2}\right)\cdot\boldsymbol{R}_z\left(-\frac{\pi}{2}\right)=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

8）将 5 个轴的求解结果反向旋转则得到图 6a 中结构布局 13 的 5 个进给轴在机床坐标系中的坐标值 x, y, z, A, C,如式(13)所示:

$$\begin{bmatrix} X & A \\ Y & 0 \\ Z & C \\ 1 & 1 \end{bmatrix}=\boldsymbol{N}_{\text{rot}}\cdot\begin{bmatrix} U & \theta \\ V & \lambda \\ W & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} V & \lambda \\ -W & 0 \\ -U & -\theta \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

12 种可能结构布局与基础算法间的映射关系如表 2 所示,相应的旋转变换矩阵 $\boldsymbol{P}_{\text{rot}}$ 如表 3 所示. 在数学上,$\boldsymbol{N}_{\text{rot}}$ 为 $\boldsymbol{P}_{\text{rot}}$ 的逆矩阵,在此不予一一列举.

使用同样映射方法,可以完成结构布局 11 向结构布局 12,14 的映射,结构布局 21 向结构布局 22,23,24 的映射以及结构布局 31 向结构布局 32,33,34 的映射(如表 2 所示).

表 2　结构布局映射关系

类型Ⅰ	映射关系	类型Ⅱ	映射关系	类型Ⅲ	映射关系
11	$U=x$ $V=y$ $W=z$ $\theta=A$ $\lambda=B$	21	$U=x$ $V=y$ $W=z$ $\theta=A$ $\lambda=B$	31	$U=x$ $V=y$ $W=z$ $\theta=A$ $\lambda=B$
12	$U=y$ $V=-x$ $W=z$ $\theta=B$ $\lambda=-A$	22	$U=x$ $V=-z$ $W=y$ $\theta=A$ $\lambda=-C$	32	$U=x$ $V=-z$ $W=y$ $\theta=A$ $\lambda=-C$
13	$U=-z$ $V=x$ $W=-y$ $\theta=-C$ $\lambda=A$	23	$U=-y$ $V=x$ $W=z$ $\theta=-B$ $\lambda=A$	33	$U=-y$ $V=x$ $W=z$ $\theta=-B$ $\lambda=A$
14	$U=-z$ $V=y$ $W=x$ $\theta=-C$ $\lambda=B$	24	$U=-y$ $V=-z$ $W=x$ $\theta=-B$ $\lambda=-C$	34	$U=y$ $V=-z$ $W=-x$ $\theta=B$ $\lambda=-C$

表 3　旋转变换矩阵 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{rot}}$

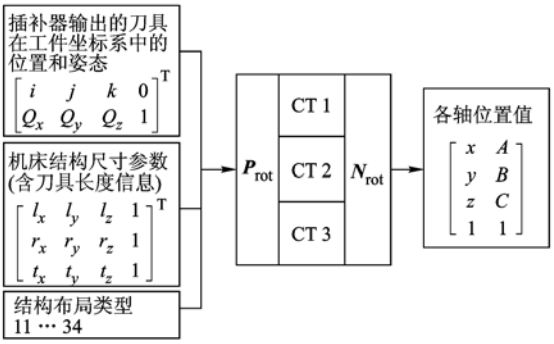
类型Ⅰ	$\boldsymbol{R}_{\mathrm{rot}}$	类型Ⅱ	$\boldsymbol{R}_{\mathrm{rot}}$	类型Ⅲ	$\boldsymbol{R}_{\mathrm{rot}}$
11	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$	21	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$	31	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$
12	$\begin{bmatrix}0&1&0\\-1&0&0\\0&0&1\end{bmatrix}$	22	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&-1\\0&1&0\end{bmatrix}$	32	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&-1\\0&1&0\end{bmatrix}$
13	$\begin{bmatrix}0&0&-1\\0&0&0\\0&-1&0\end{bmatrix}$	23	$\begin{bmatrix}0&-1&0\\1&0&0\\0&0&1\end{bmatrix}$	33	$\begin{bmatrix}0&-1&0\\10&0&0\\0&0&1\end{bmatrix}$
14	$\begin{bmatrix}0&0&-1\\0&1&0\\1&0&0\end{bmatrix}$	24	$\begin{bmatrix}0&-1&0\\0&0&-1\\1&0&0\end{bmatrix}$	34	$\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&-1\\-1&0&0\end{bmatrix}$

5　5 坐标变换库在数控系统中的集成

数控系统中,插补器计算结果经过坐标变换计算得到各进给轴在该控制周期内的位置值(如图 2 所示). 本文开发的 5 坐标变换库包含了 12 种常用 5 坐标数控机床的坐标变换数学算法,根据所控制机床的结构布局类型,通过参数设置,控制系统执行所选择的坐标变换计算.

5 坐标变换库在数控系统数据流中的位置已由图 2 给出. 每个控制周期(插补周期),插补器输出一次刀尖位置和刀具姿态值,坐标变换模块使用对应的机床结构布局类型参数、算法和刀具长度值,计算出对应的机床进给坐标轴位置指令 A_x,A_y,A_z,A_a,A_b 或 A_c,控制机床进给运动.

图 7 所示为 5 坐标变换库的结构. 坐标变换模块中还包含奇异点判断功能,本文不做介绍.



机床结构尺寸参数在数控系统中的机床结构参数中设定;t_x,t_y,t_z 由刀具长度值和机床尺寸共同确定,刀具长度的值可在数控系统的刀具参数中更改;CT1,CT2,CT3—对应机床结构布局形式的坐标变换算法模块,由机床结构布局参数 11,12,…,34 选定.

图 7　5 坐标变换库结构

6　验　证

CNC-Simulator 是北京航空航天大学数控及伺服技术实验室开发的一种机床三维仿真系统[7]. 该系统集成有数控功能模块,依据结构布局和尺寸,利用 CAD 软件建立机床实体模型,用运动指令 G 代码控制机床模型完成相应仿真运动,其坐标变换接口可集成该 5 坐标变换库.

图 8 是在该系统上建立的一个刀具 CA 摆角 5 坐标数控铣床模型(符合结构布局 13). 向 CNC-Simulator 软件输入 G 代码,包括刀位数据 $P_{\mathrm{s}}(x_{\mathrm{s}},y_{\mathrm{s}},z_{\mathrm{s}},i_{\mathrm{s}},j_{\mathrm{s}},k_{\mathrm{s}})$ 和 $P_{\mathrm{e}}(x_{\mathrm{e}},y_{\mathrm{e}},z_{\mathrm{e}},i_{\mathrm{e}},j_{\mathrm{e}},k_{\mathrm{e}})$. 应用图形仿真功能,实现了该数控铣床三维实体模型的视觉仿真,在计算机上观察实体模型的动态姿态,与输入 G 代码描述的机床运动姿态吻合. 同时,CNC-Simulator 软件还能够输出该数控铣床模型的 5 坐标轴位置值. 应用机床结构布局 13 对

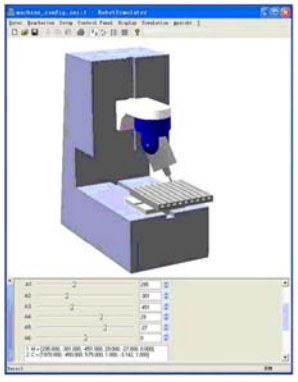


图 8　刀具 CA 摆角 5 坐标数控机床仿真图像

应的正向运动学算法,将该位置值变换为在工件坐标系下的刀位数据;经正变换的刀位数据与 CNC-Simulator 软件的输入 G 代码描述的刀位信息一致,验证了本坐标变换库的正确性. 表 4 中记录了输入 CNC-Simulator 软件 G 代码中某点的刀位数据、CNC-Simulator 软件输出的 5 坐标轴位置值以及该 5 坐标轴位置值经正向运动学算法计算后的刀位数据.

表 4 数据对比

参数	输入 G 代码的刀位数据	输出 5 坐标轴位置值	经正变换的刀位数据
x/mm	27.251 000 000 000 0	336.600 939 553 661	27.251 000 000 000 0
y/mm	133.282 000 000 000	-558.187 644 421 357	133.282 000 000 000
z/mm	73.702 000 000 000 0	328.949 145 742 752	73.702 000 000 000 0
i	0.303 639 945 944 128		0.303 639 945 942 443
j	-0.604 877 592 405 396		-0.604 877 592 402 038
k	0.736 156 152 886 668		0.736 156 152 890 122
A/(°)		-137.404 999 999 708	
C/(°)		26.656 000 000 000 0	

经仿真验证,机床 CAD 模型的刀尖位置和刀具姿态与编程指令的刀位数据一致,证明了该 5 坐标变换库的正确性.

将该 5 坐标变换库集成到北京航空航天大学开发的 CH-2010 数控系统中,并实现了控制功能. CH-2010 数控系统针对特殊机床结构设计有专用坐标变换模块,该模块在数控系统控制流程中位于图 2 中的坐标变换模块的位置. 将该 5 坐标变换库替换原有专用坐标变换模块,即实现了在 CH-2010 数控系统中的集成.

7 结 论

本文针对常见 5 坐标数控铣床和加工中心归纳出 12 种可能的结构布局,并分别推导出运动学算法;将 12 种算法通过扩展归纳到 3 类基础算法,得到统一的扩展规则;根据上述结果,开发出数控系统 5 坐标变换库,该库可作为坐标变换计算模块集成到数控系统中. 利用 CNC-Simulator 机床三维仿真系统验证了该 5 坐标变换库的正确性,并顺利集成在北京航空航天大学开发的 CH-2010 开放式数控系统中.

集成有该函数库的数控系统可以由刀位数据直接控制机床运动,无须用小线段处理走刀轨迹,并且避免了非线性误差的出现. 此外,集成在数控系统中的 5 坐标变换模块还包括对机床奇异点的判断功能,由于篇幅限制,本文不做介绍.

参考文献 (References)

[1] 任永强,杨建国. 五轴数控机床综合误差补偿解耦研究[J]. 机械工程学报,2004,40(2):55 - 59
Ren Yongqiang, Yang Jianguo. Study on decoupling of synthesis error compensation for a 5-axis CNC machine tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(2): 55 - 59 (in Chinese)

[2] 王丹,陈志同,陈五一. 五轴加工中非线性误差的检查和处理方法[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(9):1003 - 1006
Wang Dan, Chen Zhitong, Chen Wuyi. Detection and control of non-linear errors in 5-axis machining[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(9): 1003 - 1006 (in Chinese)

[3] 李永桥,陈强,谌永祥. 五坐标加工中非线性误差校核及超差处理方法的研究[J]. 制造技术与机床,2010(8):100 - 102
Li Yongqiao, Chen Qiang, Chen Yongxiang. Research on check of the non-linear errors and processing method for over-proof in 5-axis NC machining[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2010(8): 100 - 102 (in Chinese)

[4] GE Fanuc Automation. FANUC series 30i user's manual[R]. B-63944EN/03, 2008

[5] 梁全,王永章. 五轴数控系统 RTCP 和 RPCP 技术应用[J]. 组合机床与自动化加工技术,2008(2):62 - 65
Liang Quan, Wang Yongzhang. Study on the RTCP and RPCP function of the 5-axis CNC[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2008(2): 62 - 65 (in Chinese)

[6] SIEMENS. SINUMERIK 840D sl NCU manual[R]. 6FC5397-0AP10-2BA0, 2007

[7] Xiao Wenlei, Liu Yanqiang, Loeis K. A universal virtual manufacturing system for cutting machines[C]//Proceedings of International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture. London: Institution of Engineering and Technology, 2010: 374 - 379

[8] Lee R S, She C H. Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13: 658 - 665

[9] She C H, Chang C C. Design of a generic five-axis postprocessor based on generalized kinematics model of machine tool[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007(47): 537 - 545

[10] She C H, Lee R S. A postprocessor based on the kinematics model for general five-axis machine tools[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2000, 2(2): 131 - 141

(编 辑:文丽芳)