



五轴数控加工精度建模、 分析及控制技术



科学出版社

五轴数控加工精度建模、分析及控制技术

丁国富 江磊 朱绍维 马术文 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从五轴数控加工及精度相关技术理论的角度,全面系统地介绍了五轴数控加工及精度的理论基础和关键技术,主要内容包括五轴数控机床的运动学建模、后置处理、综合误差建模、几何误差测量及补偿、热误差补偿、样条插补、加工表面质量控制以及加工仿真技术,各章节内容相对独立。本书从理论到实例,阐述了作者在五轴数控加工及精度研究方面的进展。通过本书的学习,读者可从各个方面掌握五轴数控加工及精度相关技术。

本书可作为各类大学机械类制造专业学生和教师的参考书,也可作为各研究机构、企业工程技术人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

五轴数控加工精度建模、分析及控制技术/丁国富等著. —北京:科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-047641-8

I. ①五… II. ①丁… III. ①数控机床-加工 IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第049127号

责任编辑:邓 静 张丽花 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术服务咨询有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第一版 开本:720×1000 B5(1/16)

2016年6月第一次印刷 印张:17

字数:332 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

航空发动机叶片、飞机结构件、汽车覆盖件模具等大量采用五轴数控加工技术。掌握五轴数控机床加工技术对我国航空、航天、军事、科研、精密器械、高精医疗设备的发展有非常重要的支撑作用。但我国在五轴数控机床的数控系统及其零部件等方面长期依赖国外进口，先进技术被封锁和形成瓶颈，引进的五轴数控机床多为国外淘汰产品，且技术和系统封闭，这对使用和掌握五轴数控加工技术带来了非常大的难度。面对国外制造列强对五轴数控机床的限制性购买，我国要发展成为军事、经济上的强国，必须研制和掌握自己的五轴数控机床及加工技术。为此，我国在最近几年，开展了“高档数控机床及基础装备”专项项目研究，集中全国在五轴数控机床研制的主机厂、应用厂商、科研院所的优势力量，开展五轴数控机床的研制和在典型航空、轮船、发动机、汽车等领域的重点应用研究，笔者所领导的团队有幸在五轴数控加工技术的相关领域参与了多项研究工作。

笔者在五轴数控加工研究和人才培养过程中发现，虽然研究单位、人员众多，但有关五轴数控机床及加工技术方面可供参考的书籍很少，相关研究文章侧重点不一样，也不具有系统性，没有国产化的应用软件或系统作为支撑，这显然对掌握五轴数控加工技术带来了难度。为此，笔者萌生了积累最近 10 多年研究结果，写一本有关五轴数控加工及精度技术方面著作的想法，以期为五轴数控加工及精度技术应用、人才培养提供一些力所能及的帮助。经过笔者团队成员的共同努力，整理出项目有关的五轴数控加工及精度技术方面研究成果，并系统性地归纳，形成了本书。

本书共 11 章。第 1 章简述了五轴数控机床及加工技术的应用情况，介绍了主要研究内容，并给出了本书重点写作的部分；第 2 章介绍了以工作台为惯性体的五轴数控机床多体拓扑结构模型，将各种结构形式的五轴数控机床按照结构系列进行统一描述，形成了各种五轴机床统一运动学模型；第 3 章通过分析五轴数控机床拓扑体之间的运动变换和位置变换，构建了五轴数控机床运动学分析方程，统一了非正交与正交五轴数控机床的运动学方程，并对各种结构的五轴数控机床后置处理算法进行详细分析；第 4 章介绍了基于多体系统的综合误差建模技术，在运动学模型的基础上加入误差项，建立了包含多项误差因素的五轴数控加工通用综合误差模型；第 5 章介绍了五轴数控机床、夹具、刀具的几何误差测量、辨识与补偿控制技术，形成了精度预测模型；第 6 章介绍了五轴数控机床热误差测量、辨识、建模与补偿技术，提供了热误差控制的通用处理方法；第 7 章针对侧铣波纹误差，介绍了五轴数控加工的表面质量控制方法；第 8 章介绍了改进的五轴数控加工样条插补算法，以提高插补平稳性；第 9 章介绍了五轴数控加工可视仿真算法及技术；第 10 章介绍

了五轴数控仿真系统的开发方法;第 11 章介绍了五轴数控加工后置处理系统实现技术及系统的开发。

本书是集体智慧的结果,其中第 4、5 章由朱绍维、江磊撰写,第 6 章由马术文撰写,第 7、8 章由江磊撰写,其余部分由笔者及多位博士生和硕士生合作而写,江磊对全书汇总付出了艰辛的努力。本书写作得到其他诸多同志的支持,首先感谢成都飞机工业集团有限责任公司数控加工厂汤立民教授级高工、隋少春、郭志平、韩雄、宋智勇及其他工程师,他们为本书研究提供了项目、试验设备及工程应用的便利;感谢笔者项目组团队的所有教师和研究生,他们的研究成果极大地丰富了本书内容,本书的成果是他们共同努力的结果。最后要感谢西南交通大学机械工程学院领导及科学出版社的领导和编辑的支持和帮助,使得本书能够顺利出版。

在本书著成之际,恰逢国家“十三五规划”纲要颁布,其中讲到在“十三五”期间中国要做的 100 件大事的第 28 件是“研制高档数控机床”,本书可谓生逢其时。然而,五轴数控加工及精度技术博大精深,内容丰富广泛,本书的内容重在五轴数控机床运动学、综合误差统一建模、精度的辨识分析与误差控制、加工参数优化、加工仿真与后置处理等方面,这只是五轴数控加工技术的冰山一角,需要更多的研究来丰富和充实。本书所涉及的内容也没有完全归纳出该领域的技术内容,还需要进一步完善。

如此种种,限于作者水平,肤浅和粗糙之处敬请同行多多指教,书中疏漏和不当之处也敬请读者批评指正。

丁国富

2016 年 3 月

主要符号表

$a_{X_max}/a_{Y_max}/a_{Z_max}$	机床平动轴最大运动加速度限值
$a_X/a_Y/a_Z$	机床坐标系下的平动轴加速度
a_n	刀位轨迹在工件坐标系的法向加速度
a_t	刀位轨迹在工件坐标系的切向加速度
a_{t_max}	刀位轨迹在工件坐标系的切向加速度
a_c	侧铣加工的径向切深
a_p	侧铣加工的轴向切深
a_f	铣刀的每齿进给量
df	微切削刃的合成切削力
df_a	微切削刃的轴向切削力
df_t	微切削刃的切向切削力
dz	刀具沿垂直于轴线方向的微分厚度
E	工件坐标系中切削点的空间误差
e	工件坐标系中刀轴矢量的空间误差
$e_x/e_y/e_z$	工件特征的预测误差
$e_X/e_Y/e_Z/e_A/e_B/e_C$	进给轴伺服跟随误差
e_p	微切削刃的瞬时切削层厚度
e_c	圆角中心点到刀轴径向距离
$f_{平均}$	整个刀具切削刃上的周转平均切削力
F	机床的进给速度
$F_{cX/cY/cZ}$	切削力在工件坐标系的分量
$F_{cX/cY/cZ}$	切削力在机床坐标系的分量
h	侧铣加工的切削层高度
h'_c	圆角中心点到刀尖点的竖直高度

H	阿当姆斯显式公式的节点间距
$I_{A/B/C}$	转动轴的转动惯量
$I_{sX/sY/sZ}$	平动轴的丝杠转动惯量
K_a	微切削刃的轴向切削力系数
K_r	微切削刃的径向切削力系数
K_t	微切削刃的切向切削力系数
l_c	刀具体建模长度
l_{ctr}	刀头长度
Δl	测量点的误差分量
$l_X/l_Y/l_Z$	反射镜在测量原点的偏移量
L	低序体算子
L	刀位点到相邻转动轴轴线的距离
L_H	工件的名义孔距
L_T	实际刀具长度
L_G	转动轴误差测量杆的长度
$m_X/m_Y/m_Z$	平动轴的质量
M_T	伺服电机额定转矩
$M_{cA/cB/cC}$	切削力造成的转动轴转动力矩
$M_{X/Y/Z/A/B/C}$	进给轴的伺服电机的实际转矩
$M(x_M, y_M, z_M)$	点 M 在测量坐标系的坐标
n	刀位轨迹的法向矢量
$N_{i,3}(u)$	3 次 B 样条基函数
p_t	刀位轨迹的切向矢量
$p_X/p_Y/p_Z$	平动轴的滚珠丝杠导程
$P_T(x_T, y_T, z_T)$	刀位点在相邻刀具转动体子坐标系的初始位置坐标
$P_w(x_w, y_w, z_w)$	工作台转动子坐标系在工件坐标系的初始位置坐标

$P_W(x, y, z)$	工件坐标系中的刀尖点位置坐标
$P_H(x_H, y_H, z_H)$	高序转动体子坐标系原点在低序转动体子坐标系的位置坐标
P_{cij}	网格单元 A_{ij} 中心点在绝对坐标系下的位置矢量
P_E	切削点相对工件坐标系的位置误差矢量
P_v	视点中心在绝对坐标系中的位置矢量
r	切削刃的圆角半径
R	理想的刀具半径
R_T	实际刀具半径
R'	直线插补段内的理想加工曲面投影半径
ΔS	直线插补段内的理想加工曲面投影弧长
$S_X/S_Y/S_Z$	X 轴、Y 轴、Z 轴相对初始位置的平动量
$S_{\text{转}}$	侧铣加工的刀具每转切削刃扫掠面积
S_i	从 P_{i-1} 到 P_i 的侧铣加工切削刃扫掠面积
S'_i	从 P_{i-1} 到 P_i 的侧铣加工刀轴扫掠面积
\bar{S}	侧铣加工的额定切削刃扫掠面积
S_T	刀具坐标系
S_W	工件坐标系
S_D	第四轴坐标系
S_E	第五轴坐标系
t_n	第 n 段指令所对应的执行时间
$t(x_t, y_t, z_t)$	刀触点在工件坐标系的位置矢量
t_m	进给加减速周期
T	插补周期
$T_{j \rightarrow i}$	体 B_j 相对于 B_i 的位置变换矩阵
T_i	体 B_i 在自身坐标系下的运动变换矩阵
T_t	体间平移运动变换矩阵
T_r	体间旋转运动变换矩阵

T_s	体间运动变换矩阵
T_w	工作台坐标系到工件坐标系的静止位置变换矩阵
T_T	刀位点到相邻低序体坐标系的静止位置变换矩阵
T_H	高序体子坐标系到低序体子坐标系的静止位置变换矩阵
$T_X/T_Y/T_Z/T_A/T_B/T_C$	机床运动轴的运动变换矩阵
$T_{D \rightarrow T}$	第四轴坐标系到刀具坐标系的变换矩阵
$T_{E \rightarrow D}$	第五轴坐标系到第四轴坐标系的变换矩阵
$T_{T \rightarrow E}$	刀具坐标系到第五轴坐标系的变换矩阵
$u_{Bs/Be}$	后加减区间起/止点的样条参数
$u_{Fs/Fc}$	前加减区间起/止点的样条参数
u_{new}	新加密刀位点的 NURBS 样条参数
u	NURBS 样条参数
$U_W(u_x, u_y, u_z, 0)$	工件坐标系中的刀轴矢量
U_T	刀具坐标系中的刀轴矢量
$U_{W_实际}$	刀轴在工件坐标系的实际矢量
U_{W_new}	新加密刀位点的刀轴矢量
U_{W_E}	刀轴相对工件坐标系的方向误差矢量
$v_{X_max/Y_max/Z_max}$	机床平动轴最大运动速度限值
$v_X/v_Y/v_Z$	刀位点相对工件坐标系的指令运动速度
v	刀位点在工件坐标系的速度
v_{Bs}/v_{Be}	后加减速区间起/止点的刀位点速度
v_c	刀位点的指令速度
v_e	刀位点在加减速区间的终止速度
v_{Fs}/v_{Fc}	前加减速区间起/止点的刀位点速度
v_s	刀位点在加减速区间的起始速度

v_z	微切削刃 dz 的每转进给距离
$v_{\lambda i}$	加工公差为 λ 时的刀位点速度
V_i	NURBS 曲线第 i 控制点坐标
w_i	NURBS 曲线第 i 控制点权因子
W	五轴数控机床工件的拓扑体名称
$x/y/z$	刀位点在工件坐标系下的坐标参数
$x_s/y_s/z_s/\alpha_s/\beta_s/\gamma_s$	数控指令的起点位置代码
$x_c/y_c/z_c/\alpha_c/\beta_c/\gamma_c$	数控指令的终点位置代码
X/Y/Z/A/B/C	机床运动轴(拓扑体)的名称
$X/Y/Z/\alpha/\beta/\gamma$	机床进给轴相对初始位置在机床坐标系的运动量
$X_s/Y_s/Z_s$	平动轴相对机床坐标系在对刀时的初始位置
δ_{\max}	最大插补误差
$\delta_{t_{\max}}$	最大直线插补误差
$\delta_{n_{\max}}$	最大刀轴摆动误差
ΔB	定位销基准不重合误差
Δl_i	第 i 段插补周期的进给量
ΔL_T	刀具长度误差
ΔL_G	转动轴误差测量杆的长度变化量
ΔL	相邻刀位点或方位点的距离
$\Delta x_F/\Delta y_F/\Delta z_F/\Delta \alpha_F/\Delta \beta_F/\Delta \gamma_F$	夹具坐标系安装误差
$\Delta x_M/\Delta y_M/\Delta z_M$	测量点 M 的位置误差
ΔR_T	刀具半径误差
ΔS_n	第 n 段指令的当量位移
$\Delta x/\Delta y/\Delta z/\Delta \alpha/\Delta \beta/\Delta \gamma$	五轴数控机床进给轴的几何误差参数
$\Delta x_W/\Delta y_W/\Delta z_W/\Delta \alpha_W/\Delta \beta_W/\Delta \gamma_W$	在工件坐标系中, 工件位姿误差
$\Delta x_T/\Delta y_T/\Delta z_T/\Delta \alpha_T/\Delta \beta_T/\Delta \gamma_T$	刀具安装位置误差

$\Delta X^{(n)}/\Delta Y^{(n)}/\Delta Z^{(n)}/\Delta A^{(n)}/\Delta B^{(n)}/\Delta C^{(n)}$	第 n 段指令进给轴在机床坐标系的运动量
$\Delta x^{(n)}/\Delta y^{(n)}/\Delta z^{(n)}$	第 n 段指令刀位点在工件坐标系下的移动增量
$\Delta T_X/\Delta T_Y/\Delta T_Z/\Delta T_A/\Delta T_B/\Delta T_C$	机床进给轴的综合几何误差变换矩阵
ΔT_T	刀具安装误差变换矩阵
ΔT_F	夹具安装误差变换矩阵
$\Delta \alpha_{YZ}/\Delta \beta_{XZ}/\Delta \gamma_{XY}$	平动轴间位置垂直度误差
Δ	NURBS 曲线的矩阵算子
$\omega_{A_max/B_max/C_max}$	机床转动轴最大运动速度限值
$\varepsilon_{A_max/B_max/C_max}$	机床转动轴最大运动加速度限值
$\varepsilon_{sX/sY/sZ}$	平动轴的丝杠转动加速度
$\varepsilon_{A/B/C}$	转动轴的转动加速度
$\theta_{sX/sY/sZ}$	平动轴的丝杠转角
τ	刀位轨迹的切向矢量
$\tau_{x/y/z}$	刀位点轨迹切向矢量在工件坐标系的分量
$\lambda_{CL/UCL}$	侧铣加工的弓高误差
λ	加工允差
α_c	下圆锥母线与刀轴矢量夹角
α'	非正交轴与正交轴角度差(绕 X 轴)
β'	非正交轴与正交轴角度差(绕 Y 轴)
β_c	刀具上圆锥母线与刀轴矢量夹角
γ'	非正交轴与正交轴角度差(绕 Z 轴)
Ψ	铣刀的切削角
σ	铣刀微切削刃的切出角
ξ	转动轴非稳定状态的微转角限值
ρ	刀位轨迹的曲率半径

目 录

前言	
主要符号表	
第 1 章 绪论	1
1.1 五轴数控加工机床的类别与特点	1
1.2 五轴数控加工的分类与特点	5
1.3 五轴数控加工技术的研究内容	7
1.4 本书的主要内容	12
参考文献	13
第 2 章 基于多体系统的五轴数控机床运动学建模	15
2.1 国内外研究现状	15
2.2 基于多体系统的五轴数控机床结构描述	16
2.2.1 五轴数控机床拓扑结构	16
2.2.2 五轴数控机床低序体阵列	18
2.3 基于多体系统的五轴数控机床运动学理论	19
2.3.1 多体系统运动变换原理	19
2.3.2 五轴数控机床坐标系设置	23
2.3.3 五轴数控机床变换矩阵	23
2.3.4 五轴数控机床运动学方程	24
2.3.5 五轴数控机床运动学约束条件	27
2.4 本章小结	35
参考文献	35
第 3 章 五轴数控机床后置处理	37
3.1 国内外研究现状	37
3.2 五轴数控机床后置处理算法	39
3.2.1 刀具/工作台转动型五轴数控机床运动学求解	39
3.2.2 工作台转动型五轴数控机床运动学求解	50
3.2.3 刀具转动型五轴数控机床运动学求解	53
3.3 五轴数控机床工作空间分析及超程现象	57
3.3.1 基于工件坐标系的五轴数控机床工作空间分析	57

3.3.2	五轴数控机床加工超程分析	60
3.4	本章小结	64
	参考文献	64
第4章	五轴数控加工综合误差建模	67
4.1	国内外研究现状	67
4.2	五轴数控加工工艺误差源分析	68
4.2.1	切削加工前产生的误差	68
4.2.2	切削加工中产生的误差	69
4.2.3	切削加工后产生的误差	70
4.3	五轴数控机床误差定义	70
4.3.1	机床几何误差	70
4.3.2	机床伺服跟随误差	72
4.3.3	工件安装位姿误差	72
4.3.4	刀具几何误差和安装误差	72
4.4	机床进给轴几何误差模型	73
4.5	五轴数控加工误差综合模型	74
4.6	本章小结	78
	参考文献	79
第5章	五轴数控机床的几何误差检测与补偿	81
5.1	国内外研究现状	81
5.2	五轴数控机床平动轴几何误差检测	84
5.3	五轴数控机床转动轴几何误差检测	88
5.3.1	工作台转动轴几何误差的测量	88
5.3.2	刀具转动轴几何误差的测量	92
5.4	工件位姿误差测量与辨识	96
5.5	零件尺寸和形状精度预测	101
5.5.1	轮廓法向误差预测与误差比重分析	101
5.5.2	尺寸精度与形状精度预测	102
5.6	几何误差补偿算法	104
5.6.1	补偿算法流程	104
5.6.2	补偿中的转角突变	107
5.7	本章小结	109
	参考文献	109

第 6 章 五轴数控机床的热误差补偿	112
6.1 国内外研究现状	112
6.2 五轴数控机床的主要热源及热误差机理	118
6.3 五轴数控机床温度的测量及测温点优化	120
6.3.1 测温装置的选择	120
6.3.2 关键测温点	121
6.3.3 关键测温点计算实例	123
6.4 五轴数控机床热误差和温升的关系模型	124
6.4.1 热误差建模的多元线性回归模型	124
6.4.2 热误差补偿的径向基神经网络模型	126
6.5 五轴数控机床热误差补偿技术	129
6.5.1 热误差补偿原理	129
6.5.2 热误差补偿方式	129
6.5.3 热误差补偿的实现技术	131
6.6 本章小结	133
参考文献	133
第 7 章 五轴数控加工表面质量控制	137
7.1 国内外研究现状	137
7.2 加工表面波纹缺陷控制策略	140
7.2.1 侧铣加工的切削力模型	140
7.2.2 转动轴不稳定状态的定义	144
7.2.3 波纹缺陷控制流程	145
7.3 切削力不稳定状态的调整	146
7.3.1 切削刃扫掠面积的计算	146
7.3.2 进给速度的调整	147
7.4 转动轴运动不稳定状态的调整	148
7.4.1 非单调不连续转动或往复转动	148
7.4.2 单调不连续转动	148
7.5 本章小结	150
参考文献	150
第 8 章 五轴数控加工样条插补	154
8.1 国内外研究现状	154
8.2 五轴数控加工的样条曲线格式	156
8.3 五轴数控加工的样条曲线构造方法	157
8.3.1 样条曲线的矩阵表示	157

8.3.2	样条曲线的节点矢量	159
8.3.3	样条曲线的控制点	159
8.3.4	样条曲线的参数	160
8.4	五轴数控加工的样条插补算法	161
8.4.1	刀位点预插补	162
8.4.2	加减速区间调整	164
8.5	本章小结	170
	参考文献	170
第 9 章	数控加工仿真技术	174
9.1	国内外研究现状	174
9.2	刀具扫描体创建	178
9.2.1	包络面	179
9.2.2	临界轮廓线	180
9.2.3	扫描体模型构建	183
9.3	工件模型 CSG 表达	185
9.4	工件模型 CSG 渲染	189
9.4.1	渲染算法	189
9.4.2	渲染效率	192
9.4.3	渲染流程	195
9.5	本章小结	196
	参考文献	196
第 10 章	五轴数控加工仿真系统 MSIM 开发	200
10.1	系统框架搭建	200
10.2	加工仿真系统几何建模	202
10.2.1	机床建模	202
10.2.2	刀具建模	206
10.2.3	毛坯建模	208
10.3	五轴数控加工仿真流程	208
10.3.1	NC 代码解析	209
10.3.2	机床运动控制	212
10.4	几何模型建模及实例库模块	213
10.4.1	几何建模模块	213
10.4.2	实例库模块	218
10.4.3	加工仿真模块	220

10.5 本章小结	220
参考文献	220
第 11 章 五轴数控加工通用后置处理系统 MPOST 开发	221
11.1 通用后置处理系统设计方案	222
11.2 数据库设计	223
11.2.1 刀位语句格式库	224
11.2.2 数控代码格式库	231
11.2.3 机床拓扑库	239
11.2.4 机床实例库	244
11.3 后置处理流程	245
11.3.1 刀位预处理	245
11.3.2 运动求解	248
11.4 五轴数控加工通用后置处理系统 MPOST 模块	249
11.5 本章小结	256
参考文献	256

第 1 章 绪 论

五轴数控加工技术集成了计算机控制、高性能伺服驱动和精密加工技术，主要原理是由 CAD/CAM 编程软件将工件的几何信息、加工信息等转换成数控代码并送入到数控系统中，数控系统译码、插补后计算得到各坐标轴的运动信息，执行装置将这些运动信息转化为机床部件运动，通过机床结构将各轴运动合成形成复杂的刀具运动轨迹，从而加工出符合设计要求的零件。

五轴数控加工较三轴数控加工具有如下一系列优势：

(1) 增强制造复杂零件的能力，可以加工一般三轴数控机床所不能加工或很难一次装夹完成加工的连续、平滑的自由曲面；

(2) 可以实现工件一次装夹，集中工序进行高精、高效和复合加工，从而保证工件各个表面间的位置精度^[1-2]；

(3) 可以提高空间自由曲面的加工精度、质量和效率；对于某些零件，五轴加工可以比三轴加工提高 10~20 倍的加工效率^[3]；

(4) 减少专用刀具、夹具的费用；

(5) 实现高效高速加工；

(6) 适应产品全数字化生产。

1.1 五轴数控加工机床的类别与特点

五轴数控机床是在三轴数控机床的基础上增加两个旋转轴所构建的加工设备，具有科技含量高、精密度高的特点，在复杂曲面的高效、精密、自动化加工方面，有着三轴数控机床所不能比拟的优势，对一个国家的航空、航天、军事、科研、精密器械、高精医疗设备等行业有着举足轻重的影响力，是解决大型薄壁零件、整体叶轮、涡轮机叶片、精密光学零件与模具加工等问题的关键设备，能极大地提高加工效率、生产能力和加工质量，缩短加工周期，降低加工成本^[3]。它集计算机控制、高性能伺服驱动和精密加工技术于一体，应用于复杂曲面的高效、精密、自动化加工^[4]。作为五轴数控技术中的一个类型，五轴数控机床已成为评价一个国家生产设备自动化水平的重要标志^[5]。

从理论上讲，加工任意复杂的零件，刀具相对于工件最少需要五个独立的自由度。其原因在于：从刚体运动几何学的角度来分析，任何一个刚体在空间具有六个自由度，即加工机床的刀具和被加工工件共需要十二个自由度。考虑到刀具和工件之间相同的平移或转动自由度可以合并，故刀具相对于被加工工件具有六个独立的