



第三届高效加工技术研讨会——南京

大型复杂曲面薄壁类零件的高性能多轴数控加工优化

The Optimization of High Performance Multi-Axis NC Machining for
the Sheet Parts with Large and Complex Surface

彭芳瑜 教授/博导 zwm8917@263.net, 13986168308

华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心副主任

国家数控重大专项高档数控系统关键共性技术创新平台主任

2012年4月6日

内容提纲

一、研究背景

二、主要研究进展与成果

三、国家数控系统工程技术研究中心简介

一、研究背景

- **大型舰船螺旋桨：**2010年，我国造船完工6560万载重吨，新接订单7523万载重吨，手持订单19590万载重吨，分别占世界市场的43%、54%、41%，均居世界第一。大型定距桨的年需求量为4.3万吨，但年产能力只有1.2万吨，大量依靠进口。



大型复杂曲面薄壁类零件的制造水平成为制约我国核心装备制造企业国际竞争力提升的瓶颈。

一、研究背景

- ❑ **尺寸和重量超大且易变形：**最大船用螺旋桨直径达10米，重量达100吨，且加工时易变形，需要很好的机床—刀具—工件动力学特性；
- ❑ **型面复杂且重叠区域多：**由NURBS自由曲面组成，且叶片与叶片之间存在较大的重叠区域，最大可达25%，加工轨迹优化是能否加工和加工好坏的关键；
- ❑ **加工余量大且分布不均匀：**加工面积达90多平方米，余量达到轴向尺寸的2-3%，背面比工作面的大3倍以上，加工参数优化是提高加工效率的必由之路；



一、研究背景

加工精度——轨迹的几何逼近精度

+ 加工系统形变精度

加工效率——轨迹的几何长度

+ 轨迹的进给速度及速度方向变化率

加工质量——轨迹间的几何残余高度

+ 进给速度的波动 + 加工系统颤振

是一种几何与物理的加工优化！

内容提纲

一、研究背景

二、主要研究进展与成果

三、国家数控系统工程技术研究中心简介

二、主要研究进展与成果

- 1、多轴加工轨迹规划
- 2、多轴数控加工后置处理方法
- 3、多轴数控加工在线运动规划
- 4、多轴数控加工软件开发与实施效果

1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

技术难点： 机床动力学特性对加工质量和效率有重大影响，机床行程大、进给速度高，有回转运动轴、且姿态变化大，动力学特性复杂；



横梁行程8米，滑枕行程2米
最高进给速度10米/分



2-3个回转运动轴；

最大悬臂长度1.3米；

重达0.7吨；

工作姿态变化大；



1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

1) 多轴机床闭链刚度场建模与特性分析

多轴加工系统刚度场建模

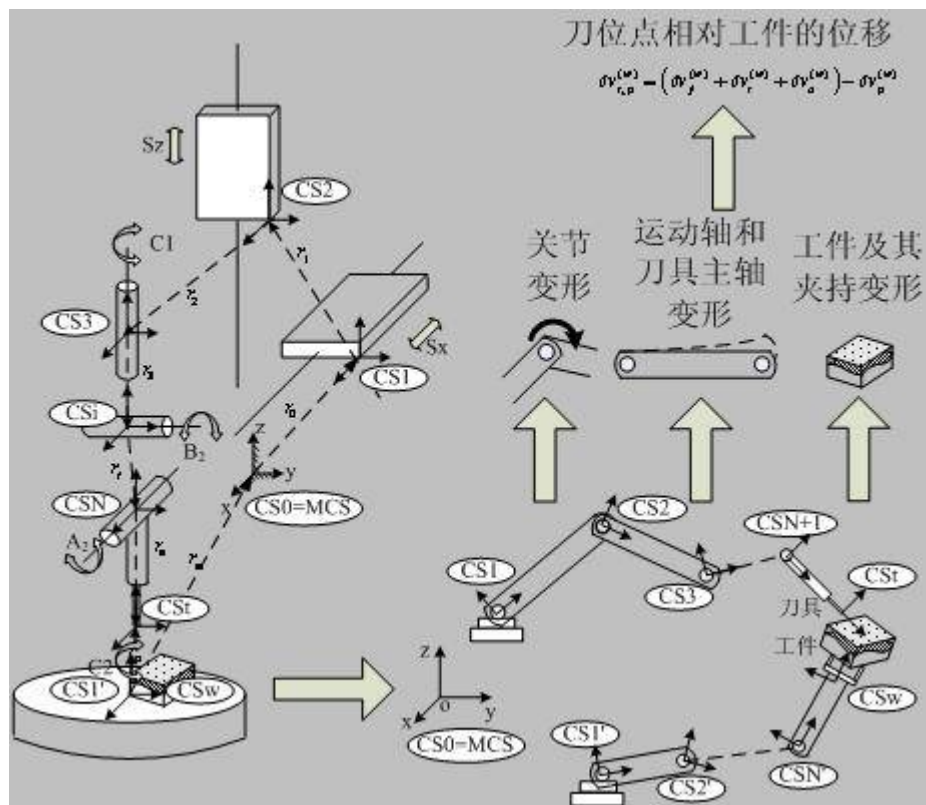
- 仅考虑刀具变形的悬臂梁解析模型（Lacalle et al, 2004; Budak, 2006）；
- 考虑机床变形的矩阵结构模型（Svinin, 2002; Zhang Hua et al, 2004）；
- 考虑机床和刀具变形的有限元离散模型（Huang, Lee, 2001; Mori, 2008）；
- 仅考虑工件变形的有限元离散模型（Ratchev et al, 2004）；
- 考虑刀具和工件变形的有限元离散模型（Wan et al, 2008）；

现有方法的不足：无法反应“机床—刀具—工件”整体加工系统的综合刚度特性；不适用于分析整体加工系统刚性在工作空间的分布规律。

1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

① 多轴机床闭链刚度场数学建模

采用雅克比矩阵、点传递矩阵及有限元等方法，建立多轴数控机床闭链刚度场（“机床—刀具—工件”刚度场）的半解析模型；



$$K_i = (K_{ij}^{-1} + K_{ia}^{-1} + K_{it}^{-1} + K_{ip}^{-1})^{-1}$$

K_{ij} 运动关节变形下任意控制点的综合刚度矩阵

K_{ia} 运动轴变形下任意控制点的综合刚度矩阵

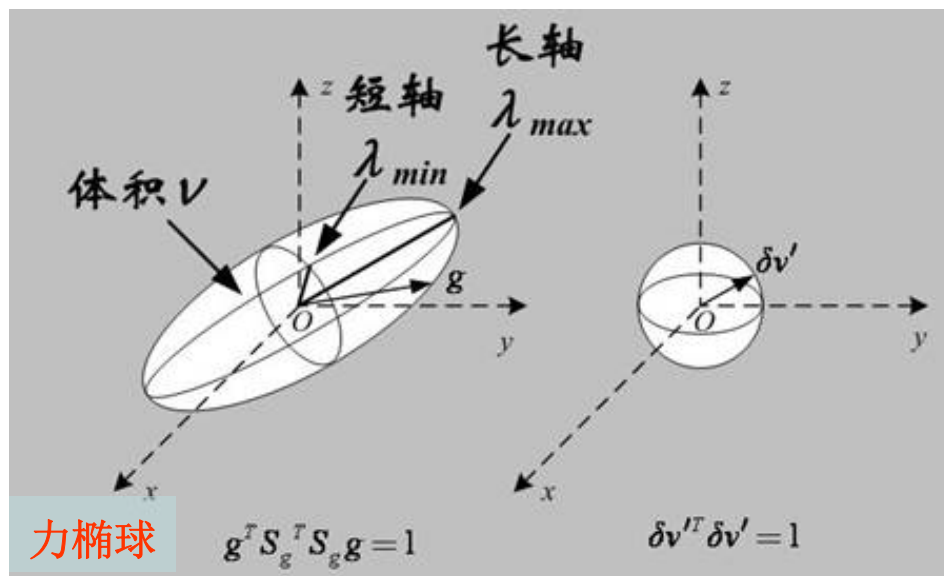
K_{it} 刀具变形下任意控制点的综合刚度矩阵

K_{ip} 工件变形下任意控制点的综合刚度矩阵

1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

② 多轴数控机床刚度性能指标

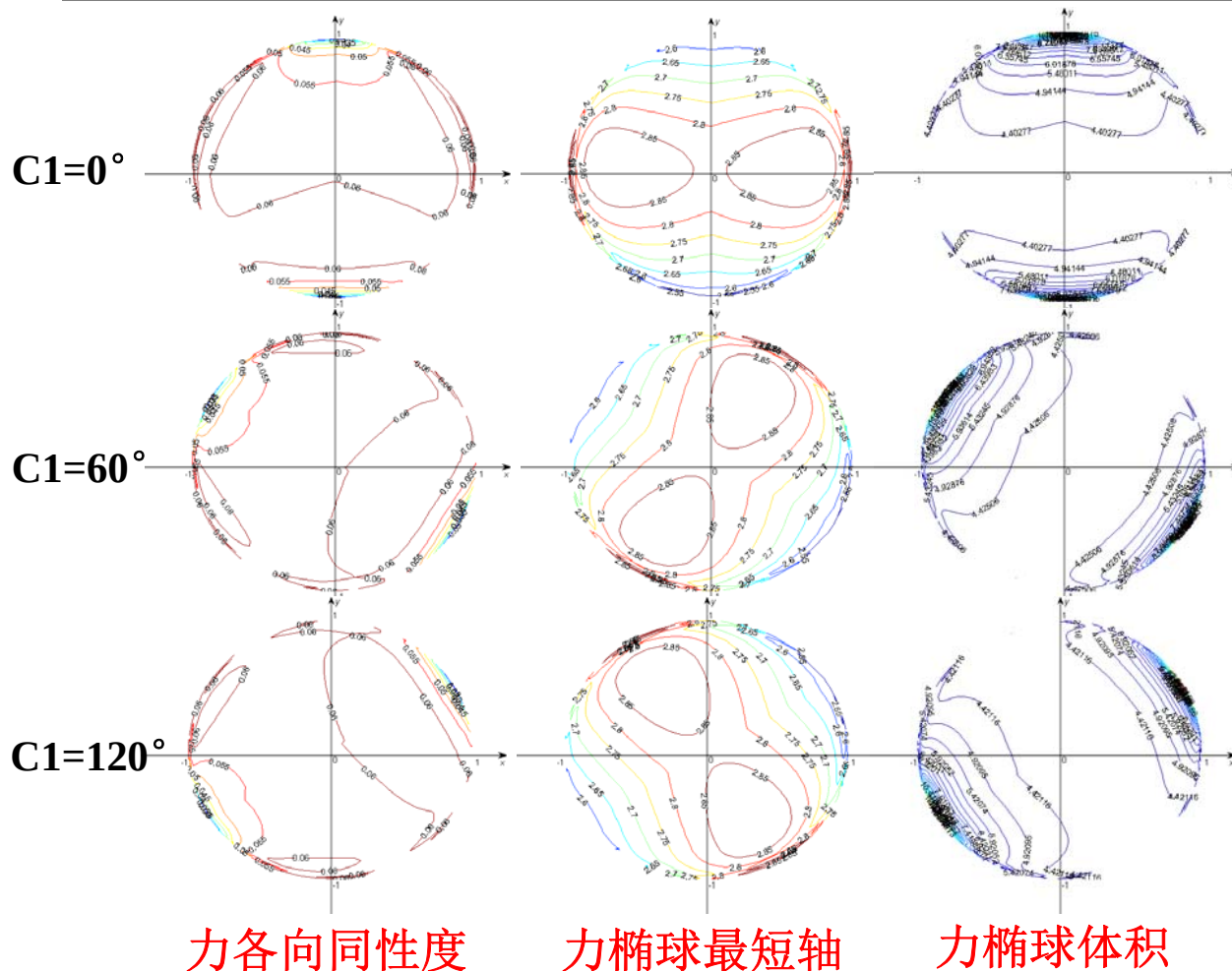
- 使切削力沿力椭球长轴或者长轴附近，可确保刀具加工系统在刚性较好的状态下进行切削加工；
- 刀具姿态一定时，使力椭球短轴极大化或者力椭球体积极大化，可保证刀具加工系统在刚性较好的条件下进行切削加工；



- 反映机床刚度在工作空间中的各向异性程度
 - ✓ 力各向同性度
- 反映机床工作能力
 - ✓ 力椭球的最短轴
 - ✓ 力椭球体积

1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

③ 多轴数控机床刚度性能指标图谱

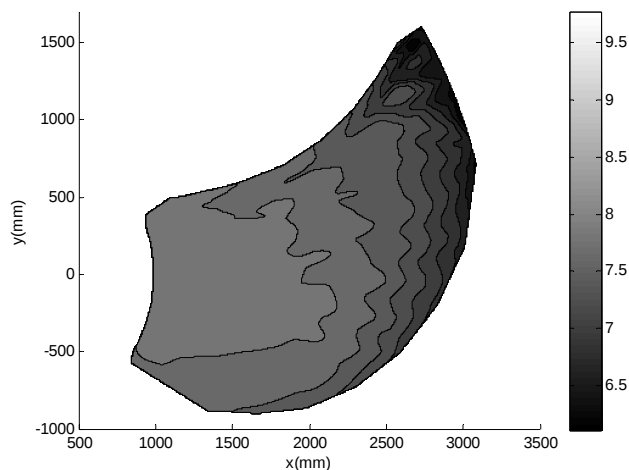


- ▶ 力椭球的各向异性较明显，不同方向的刚度特性相差近20倍；
- ▶ 各种刀具姿态对应的力椭球最短轴值大致相同；
- ▶ 在刀具摆动到不同位置时，力椭球体积变化相差近6.5倍；

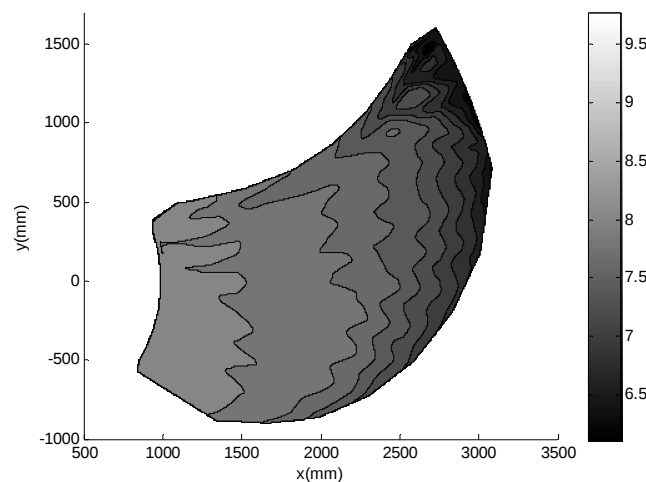
1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

④ 工艺系统刚度性能（力椭圆最短轴）的分布规律

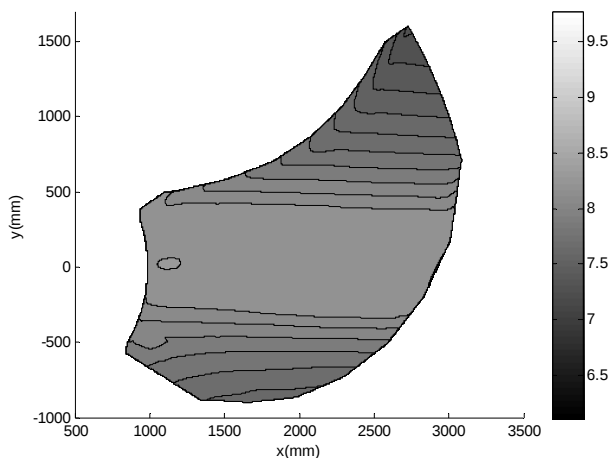
闭链刚度场模型



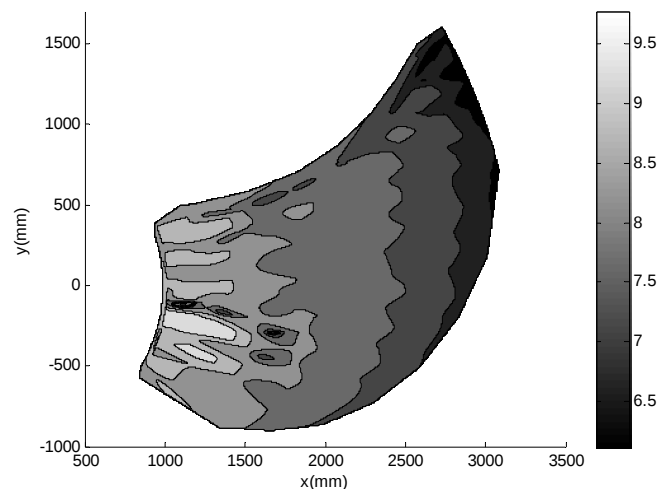
仅考虑
刀具和
工件弱
刚性的
刚度场
模型



仅考虑
机床弱
刚性的
刚度场
模型



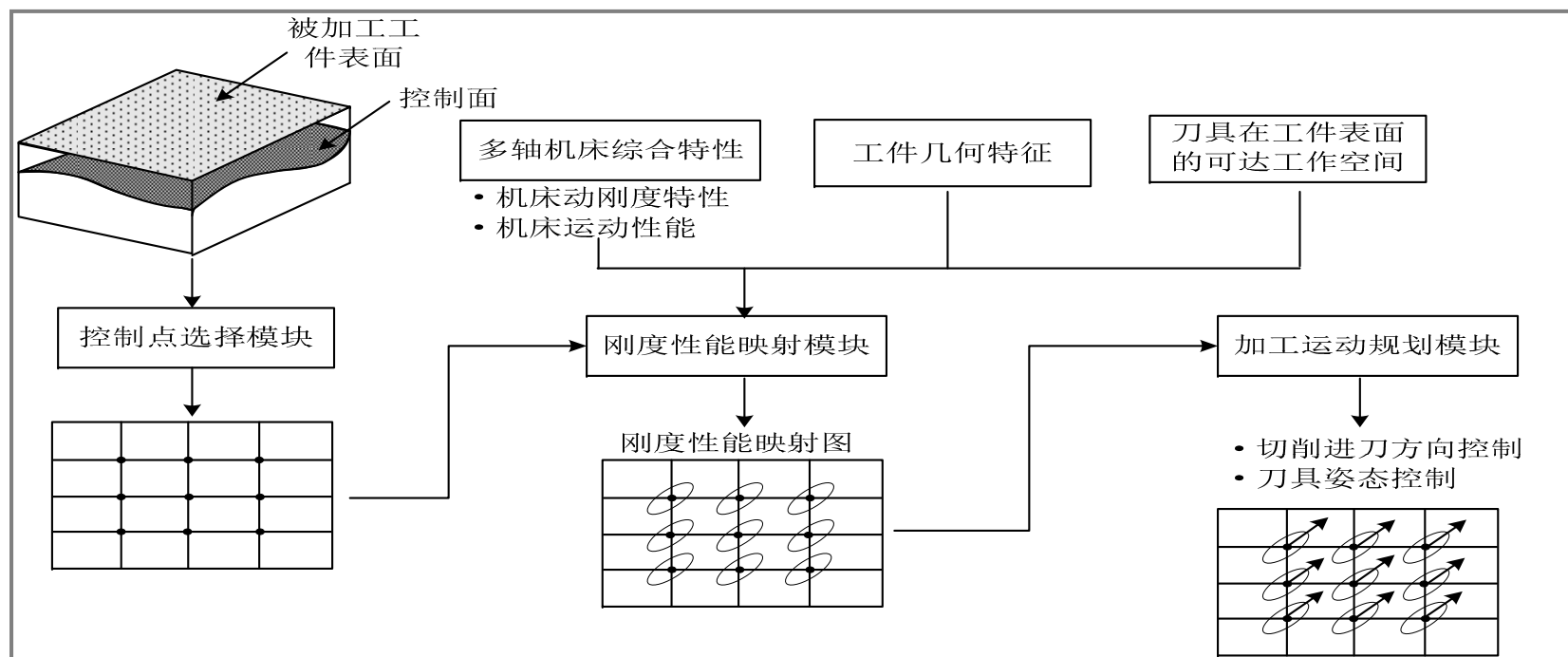
仅考虑
工件弱
刚性的
刚度场
模型



1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

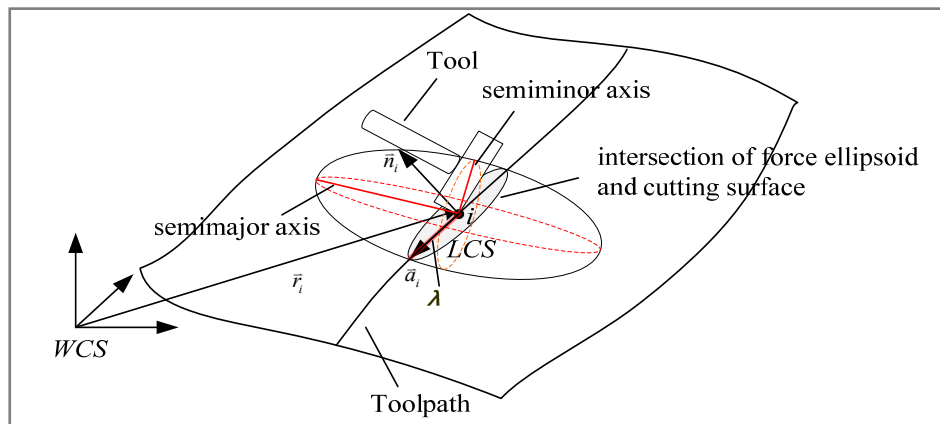
2) 基于刚度场特性的多轴运动轨迹规划

建立基于几何和物理的混合约束条件，在可达空间中，根据加工要求优化刀具姿态、走刀方向，控制进给速度，实现基于机床综合刚度特性和运动特性的刀具轨迹优化；



1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

① 加工轨迹优化模型及其求解策略



面向加工效率的优化模型

$$\max \lambda_a(K, a)$$

$$\text{s.t. } \lambda_{\min}(K) \neq \lambda_a(K) \neq \lambda_{\max}(K)$$

$$\lambda_{\min}(K)^3 \neq 0$$

$$\lambda_{\max}(K)^3 \neq 0$$

力椭圆沿刀具进给方向的半轴长

面向加工精度的优化模型

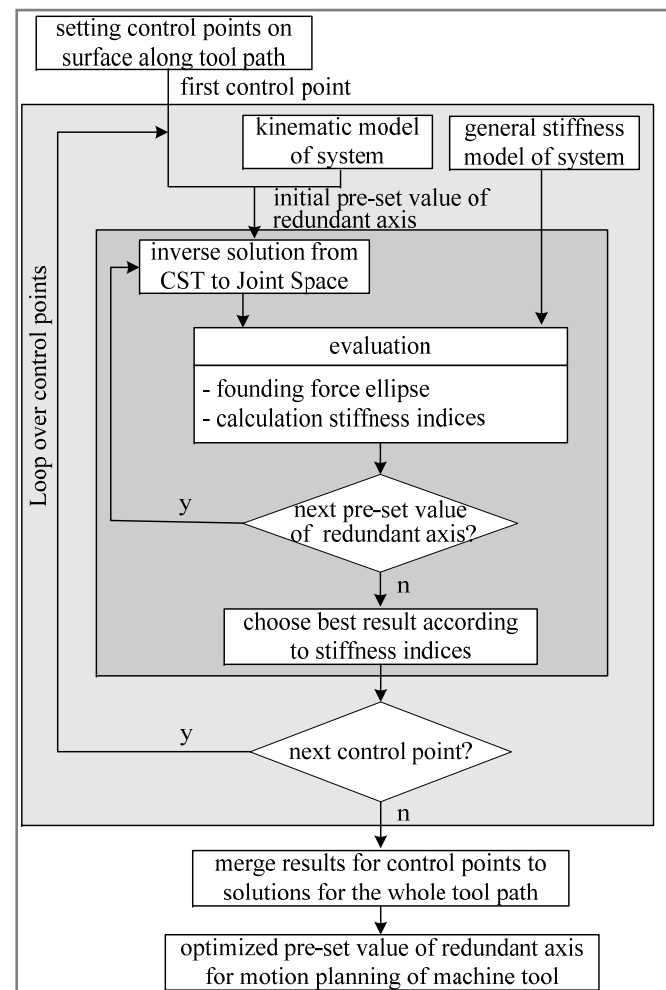
$$\max \lambda_n(K)$$

$$\text{s.t. } \lambda_{\min}(K) \neq \lambda_n(K) \neq \lambda_{\max}(K)$$

$$\lambda_{\min}(K)^3 \neq 0$$

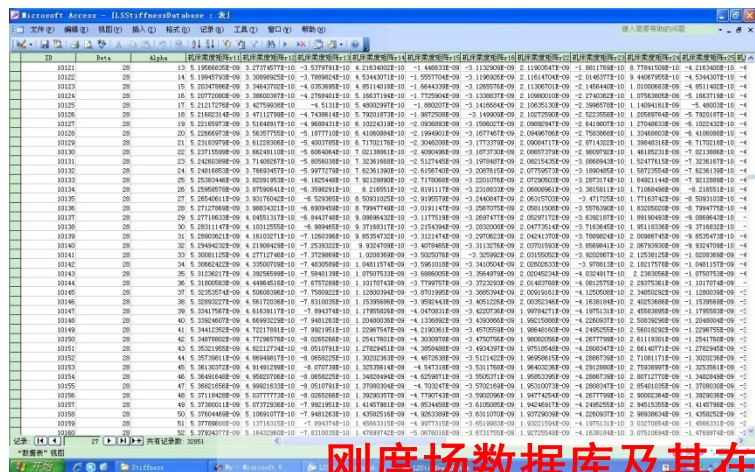
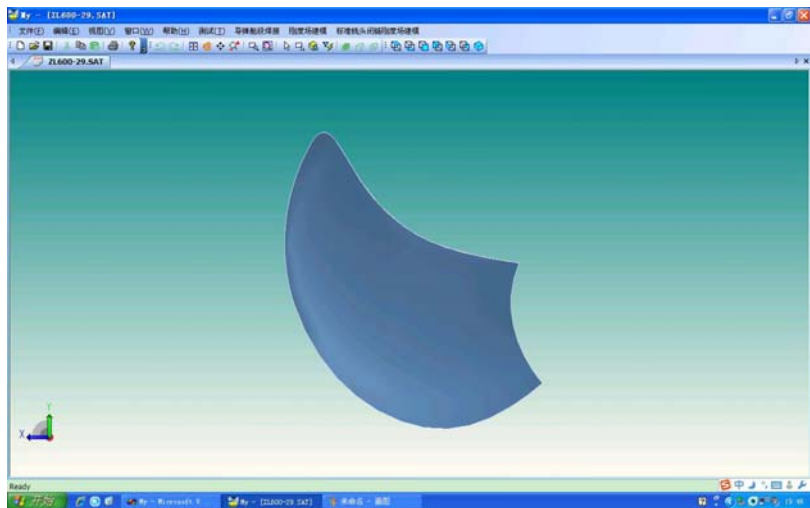
$$\lambda_{\max}(K)^3 \neq 0$$

力椭圆沿曲面主法矢方向的半轴长



1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

② 机床刚度场数据库与应用



标准铣头刚度场建模

机床几何结构参数 关节轴物理参数 刀具主轴物理参数

刀具几何参数

l_s 0.0613 m

l_t 0.041 m

d 0.075 m

D 0.115 m

刀具接触刚度参数

K_{xx} 3729400000 MN/m

K_{yy} 3729400000 MN/m

K_{zz} 8236400000 MN/m

$K_{sitazmz}$ 1020000 MN/m

刀具材料参数

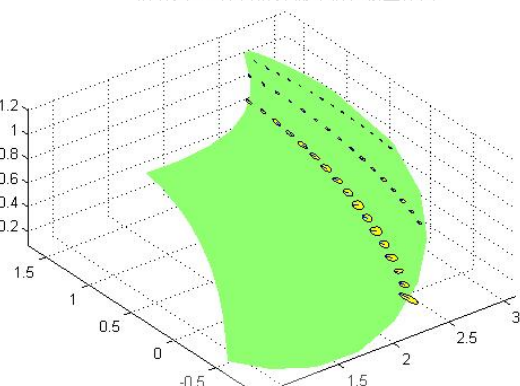
弹性模量 450000000000 MN/m² 泊松比 μ 0.3

刀具姿态

前倾角 5° 侧倾角 5° ☐ 自动优化

刀具主轴参数 应用 取消

沿切线360°方向的力椭圆轴长极坐标图

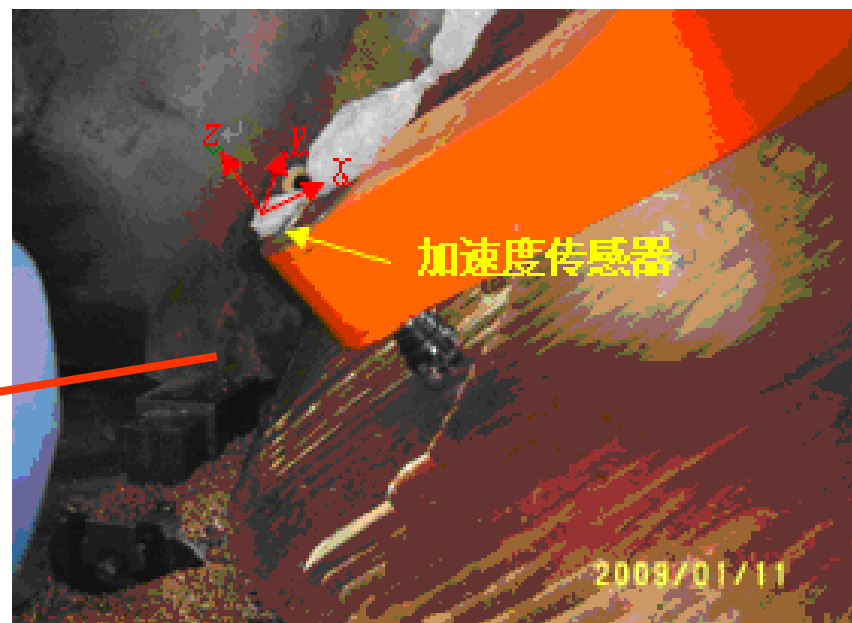
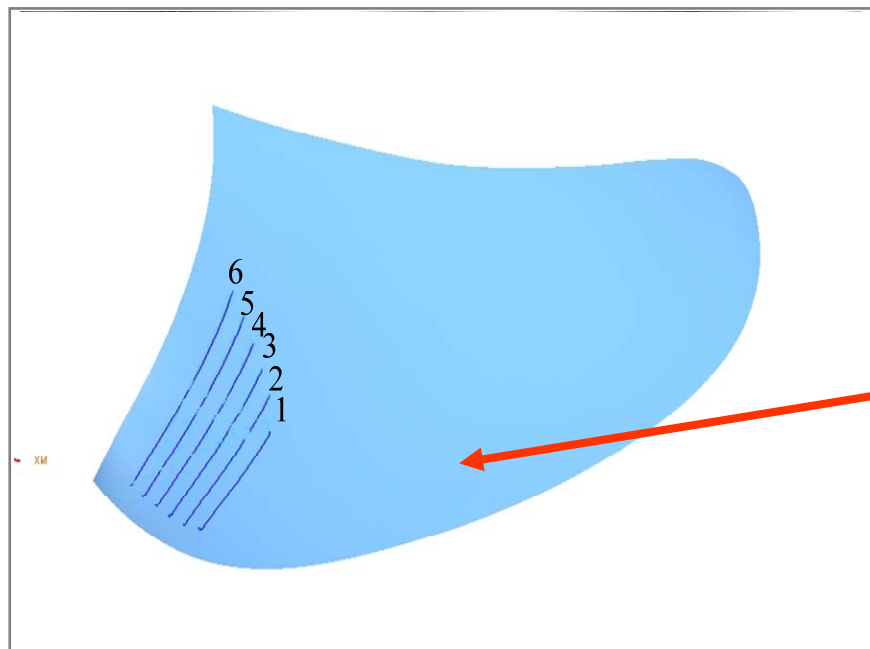


刚度场数据库及其在刀具姿态优化中的应用

1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

③ 大型船用螺旋桨多轴运动轨迹规划优化

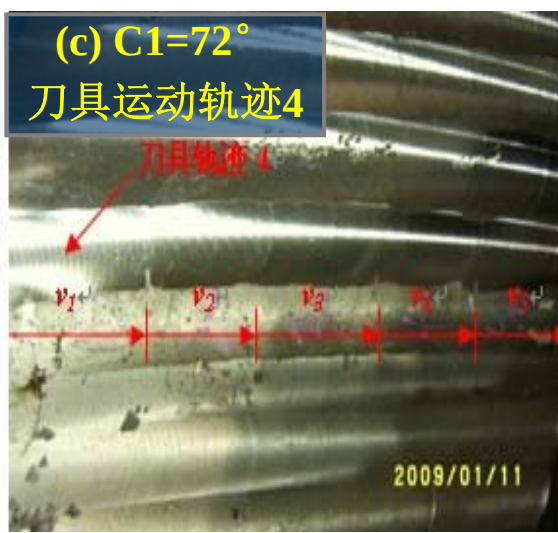
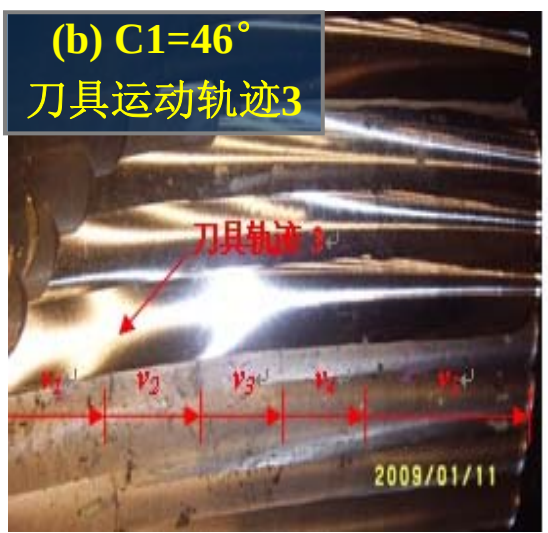
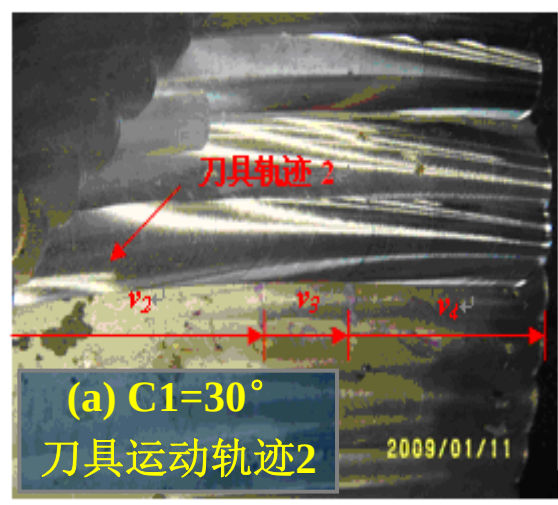
七轴五联动机床特殊铣头具有冗余轴，针对几条相邻刀具轨迹，采用不同的C1摆动角，在铣刀头附近采集加速度振动信号，分析不同C1轴摆角整体机床沿切削方向的刚性大小。



1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

特殊铣头加工大型螺旋桨实验

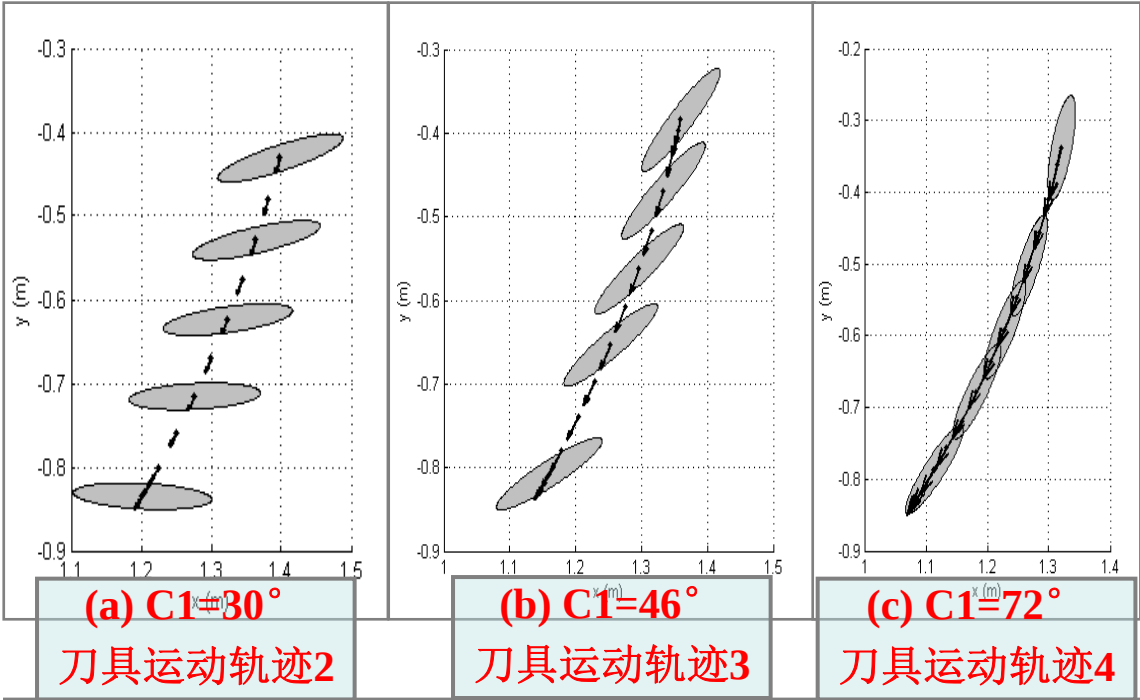
刀具运动轨迹2、3、4实验数据



刀具运动轨迹	2	3	4
辅助轴C1转角(°)	30	46	72
刀具前倾角(°)	5	5	5
进给速度(mm/min)	沿刀具运动轨迹分段进给修调		
切深(mm)	2	2	2
切宽(mm)	74	70	53
主轴转速(rpm)	200	200	200
工件材料参数	硬度H		100
	弹模E(GPa)		201

1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

➤沿切削进给方向机床刚度仿真计算分析



机床沿切削进给方向刚度映射图

刀具运动轨迹	刀具前倾角 (°)	机床刚度性能指标 (MN/m)	沿进给方向机床刚性增加百分比(%)
2	5	3.66	—
3	5	6.41	75.14
4	5	14.83	131.36

从仿真分析结果来看，机床在切削方向上的刚性越大，加工稳定性越好，进给速度则可以越大，进而提高加工效率。

1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

➤沿刀具运动轨迹铣刀头振动能量和加工表面质量对比

刀具进给速度 (mm/min)	刀具运动轨迹						刀具运动轨迹之间振动能量比较(%)		
	2		3		4		3与2对比 (%)	4与2对比 (%)	4与3对比 (%)
	振动 动能 (mm/s) ²	加工 质量	振动 动能 (mm/s) ²	加工 质量	振动 动能 (mm/s) ²	加工 质量			
40	——	——	0.12	表面光滑	0.10	表面光滑	——	——	↓ 19.24
80	7.72	表面出现 颤纹	0.23	表面光滑	0.12	表面光滑	↓ 97.07	↓ 98.49	↓ 47.40
120	26.89	表面出现 明显颤纹	0.39	表面光滑	0.15	表面光滑	↓ 98.53	↓ 99.45	↓ 62.52
160	84.08	表面出现 明显颤纹	1.08	表面出现 颤纹	0.13	表面光滑	↓ 98.72	↓ 99.84	↓ 87.87
200	——	——	22.59	表面出现 明显颤纹	0.12	表面光滑	——	——	↓ 99.45

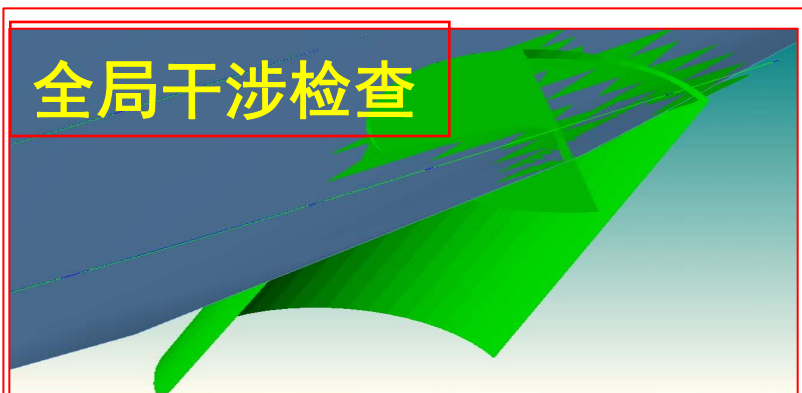
从加工表面质量和铣刀头的振动能量来看，为了保证机床的加工稳定性和提高加工效率，在螺旋桨叶根处宜采用机床辅助轴转角72° 进行加工。

1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

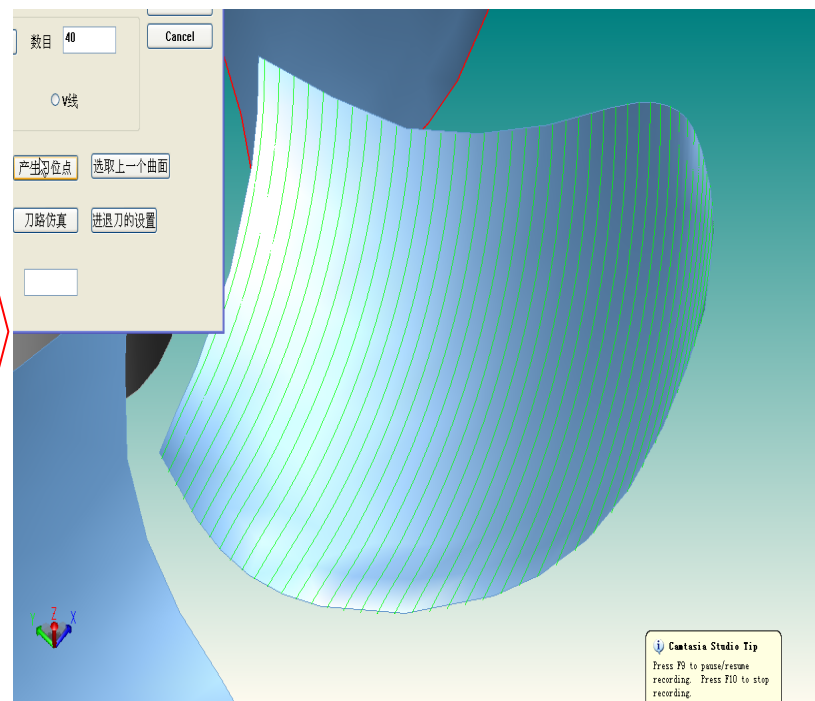
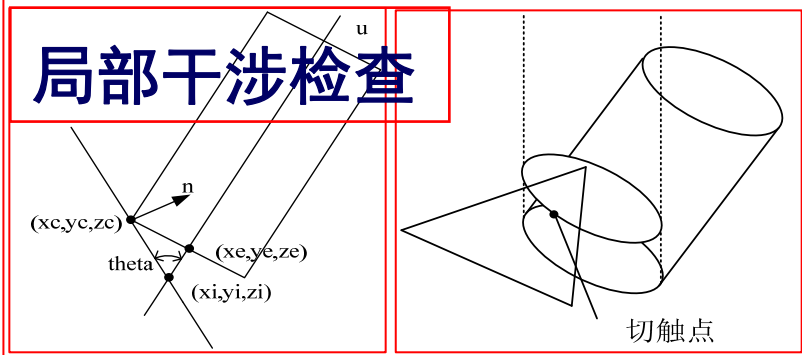
3) 基于几何约束的多轴加工轨迹规划

提出基于全局和局部干涉的混合干涉检查算法，全局干涉检查算法快速定位干涉区域，局部干涉检查算法快速消除干涉量，得到无干涉刀位点。

全局干涉检查



局部干涉检查



1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

算法计算效率比较：（验证对象——大型螺旋桨）

计算机配置：Pentium Dual-Core CPU E5300 @2.60GHz 1.99G

刀具类型：φ125平底刀；刀具姿态：前倾5度

软件	刀路条数 (条)	刀位点数	计算时间 (秒)	平均计算时间 (秒)	平均每个刀位点 计算时间 (秒)
UG NX4	10	247	4.95	0.02004	0.01831
	20	511	9.62	0.01883	
	30	766	13.77	0.01798	
	40	1034	18.67	0.01806	
	45	1159	20.48	0.01767	
	50	1291	22.29	0.01727	
我们 算法	10	282	5.157	0.01829	0.01725
	20	556	9.075	0.01632	
	30	825	14.297	0.01733	
	40	1097	18.891	0.01722	
	45	1231	21.015	0.01707	

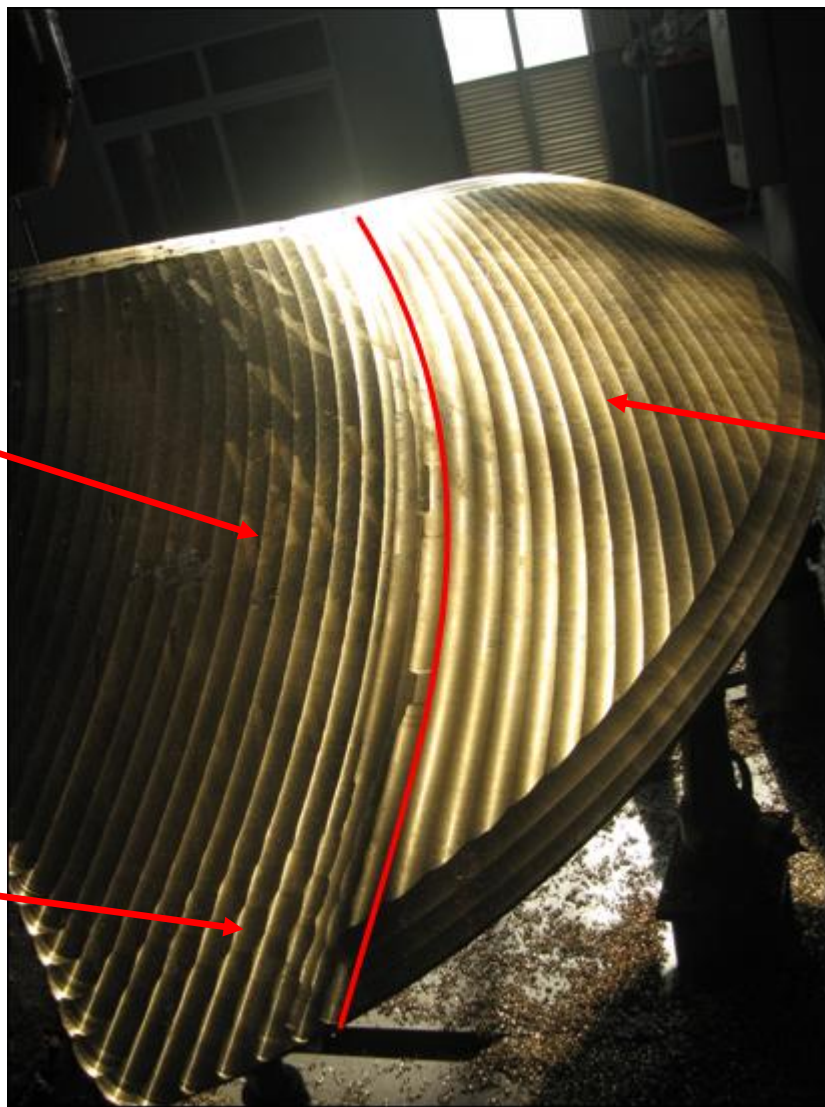
1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

加工效果对比

UG NX所产生路径的加工效果

螺旋桨多轴编程软件产生路径的加工效果

加工出现的鱼鳞纹



1、基于几何及物理混合约束的多轴加工轨迹规划

发明专利

- ✓ 一种基于加工系统刚度特性的多轴数控加工刀具运动规划方法，（**ZL201010197204.0**）；
- ✓ 一种多轴加工系统的相对动刚度获取方法及其应用，（**201110312129.2**）；

发表文章

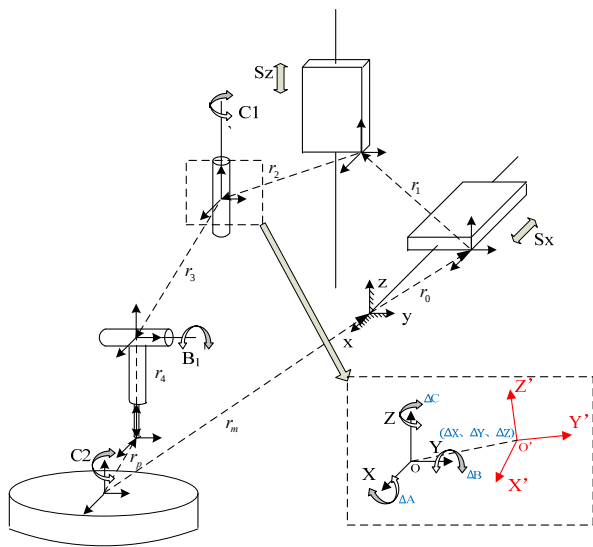
- ✓ **F. Peng**, Y. Zhou, B. Li. Parameterized modeling and dynamic analyzing for the Drive at Center of Gravity (DCG) feed drives. International Journal of Robotics and Automation, Vol. 24, No. 3, 2009: 194-202. **(SCI)**
- ✓ 闫蓉, 陈威, **彭芳瑜**, 林森, 李斌. 多轴加工系统闭链刚度场建模与刚度性能分析. 机械工程学报, 2012, 48(1): 177-184. **(EI)**
- ✓ R. Yan, **F. Y. Peng**, J. Z. Yang, and B. Li. Tool Posture Optimization Subjected to the Rigidity of Multi-axis Machine Tool. Key Engineering Materials Vols. 392-394 (2009) pp 271-277. **(EI)**
- ✓ Yan Rong, **Peng Fangyu**, Chen Wei, Yang Jianzhong, Lin Sen. Closed-loop stiffness modeling and stiffness performance analysis for multi-axis process system. ICIRA 2010, 11: 754-765. **(EI)**

2、多轴数控加工后置处理

1) 考虑多轴数控机床结构误差的全微分运动学求解

技术难点： 机床由于安装、制造与变形等因素将产生几何误差，每个运动轴有六项误差，包括：

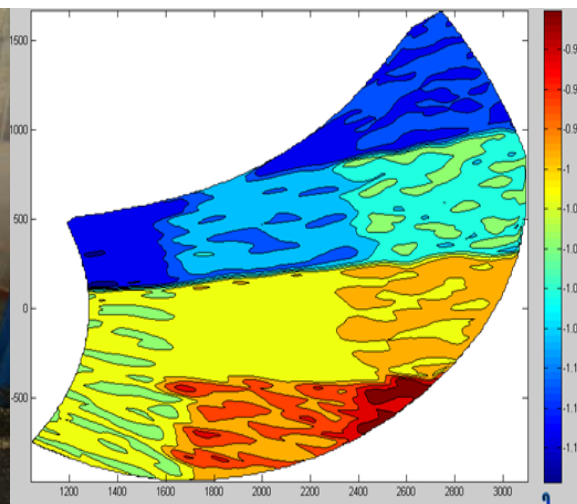
绕X、Y、Z三个轴的微小转动增量 ΔA 、 ΔB 、 ΔC 和沿X、Y、Z三个轴的微小平动增量 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 。



机床考虑几何误差运动链



螺旋桨加工叶面



加工误差仿真

2、多轴数控加工后置处理

基于机床运动学求解的补偿方法

□公式推导法

(R.-S. Lee , 1997; Chen-Hua She , 2007)

公式推导法求解精确，但不具有通用性，且复杂结构机床无法采用公式推导法

□几何求解法

(Jae-Deuk Yun , 2009)

几何法推导困难，不适合广泛使用

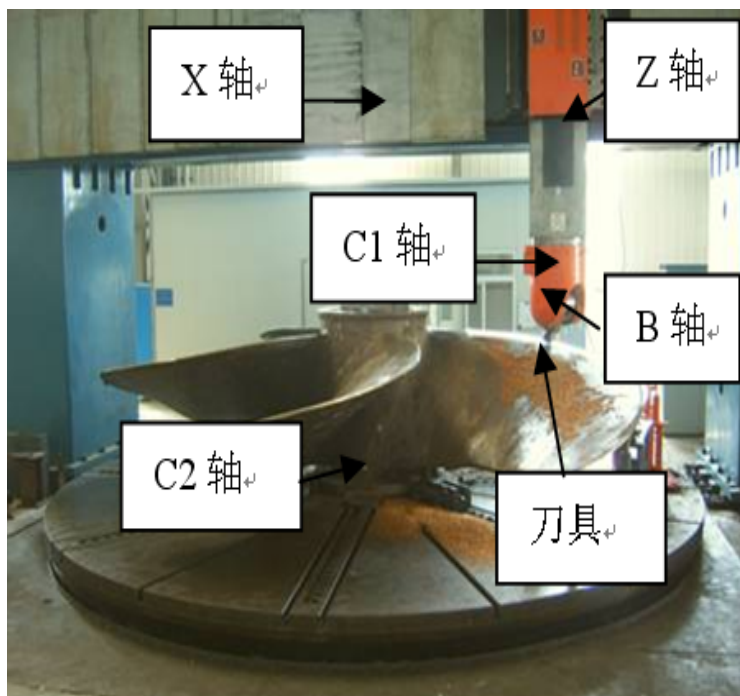
□数值求解法

(何耀雄，周云飞，2002)

数值方法通用性好，但是迭代易出现不收敛情况，造成计算误差，且计算时间很长

2、多轴数控加工后置处理

① 建立含结构误差的机床运动学模型



大型螺旋桨加工机床
标准铣头配置结构

$$\begin{cases} Q_{MW} [U_W & 0]^T = Q_{MT} [0 & 0 & 1 & 0]^T \\ Q_{MW} [P_W & 0]^T = Q_{MT} [0 & 0 & 0 & 1]^T \end{cases}$$

其中

$$Q_{MW} = (E + \Delta Q_{MC_2}) Q_{MC_2}$$

$$Q_{MT} = (E + \Delta Q_{MX}) Q_{MX} \times (E + \Delta Q_{XZ}) Q_{XZ} \times \\ (E + \Delta Q_{ZC_1}) Q_{ZC_1} \times (E + \Delta Q_{C_1 B_1}) Q_{C_1 B_1} \times (E + \Delta Q_{B_1 T}) Q_{B_1 T}$$

误差变换齐次阵

$$\Delta Q_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & -\Delta C & \Delta B & \Delta X \\ \Delta C & 0 & -\Delta A & \Delta Y \\ -\Delta B & \Delta A & 0 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2、多轴数控加工后置处理

② 结构误差敏感性分析与误差标定

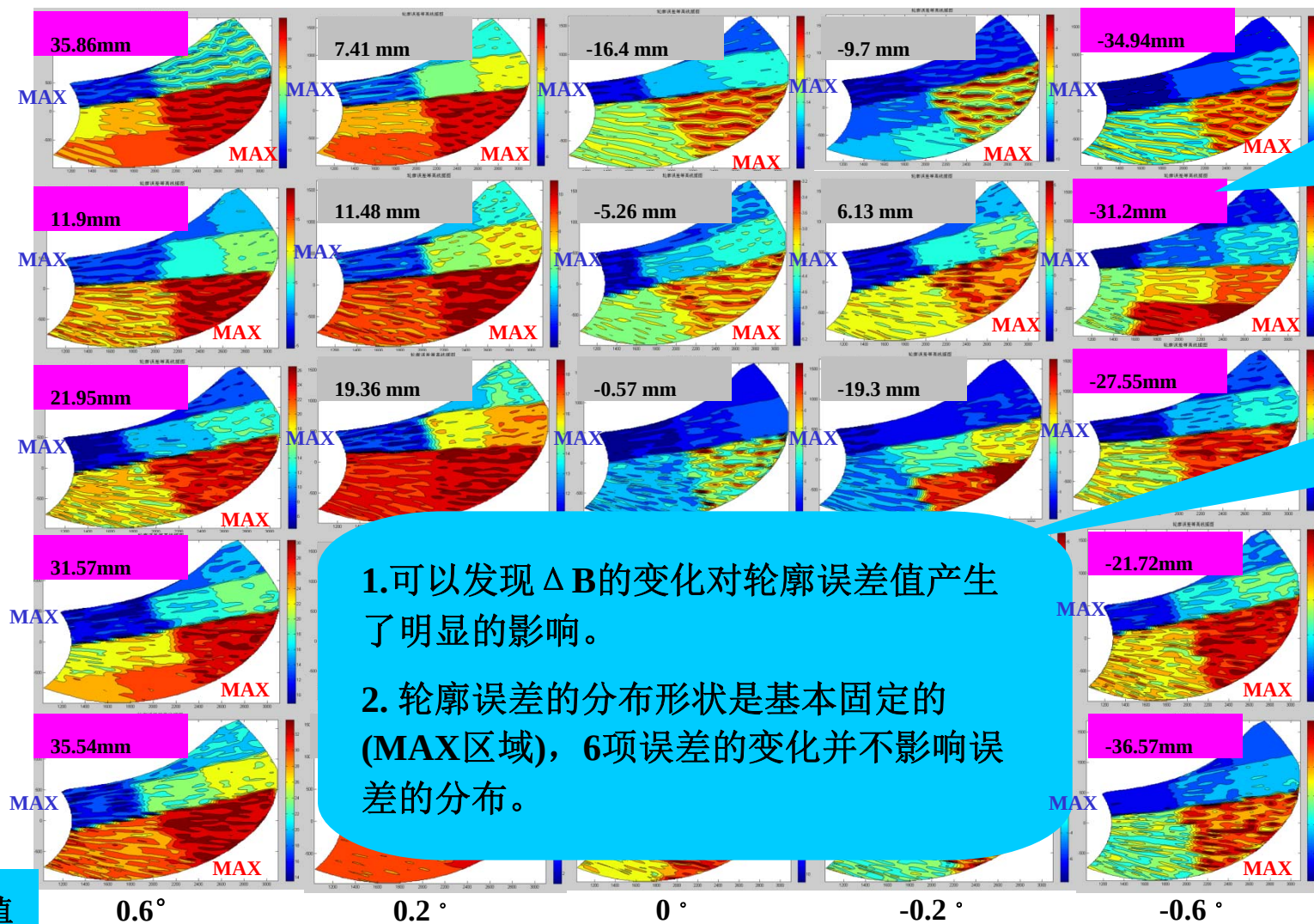
➤正交实验法分析结构误差敏感性:每个运动轴有6个误差分量，在几何误差标定实验和误差建模时，根据误差对零件轮廓误差的影响次序进行简化；采用正交试验法确定几何误差敏感性。

X _i	ΔA_i (°)	ΔB_i (°)	ΔC_i (°)	ΔX_i (mm)	ΔY_i (mm)	ΔZ_i (mm)	极值(mm)	均方差 (mm)
1.	-0.6.	-0.6.	-0.6.	-0.6.	-0.6.	-0.6.	9.0629, 35.6870.	26.0201.
2.	-0.6.	-0.2.	0.	0.2.	0.6.	-0.2.	-5.0880, 7.4115.	3.9065.
3.	-0.6.	0.	0.6.	-0.2.	0.2.	0.	-16.4552, -9.6181.	13.4630.
4.	-0.6.	0.2.	-0.2.	0.6.	0.	0.2.	-9.7086, -1.4039.	7.4698.
5.	-0.6.	0.6.	0.2.	0.	-0.2.	0.6.	-34.9432, -13.2705.	26.9228.
6.	-0.2.	-0.6.	0.6.	0.2.	0.	0.6.	-1.9839, 22.3372.	11.9460.
7.	-0.2.	-0.2.	-0.2.	-0.2.	-0.2.	-0.6.	2.6914, 11.4810.	8.2857.
8.	-0.2.	0.	0.2.	0.6.	-0.6.	-0.2.	-5.2622, -2.9684.	4.2698.
9.	-0.2.	0.2.	-0.6.	0.	0.6.	0.	-3.1367, 6.1344.	2.3378.
10.	-0.2.	0.6.	0.	-0.6.	0.2.	0.2.	-31.2028, -9.1710.	22.0927.
11.	0.	-0.6.	0.2.	-0.2.	0.6.	0.2.	4.5232, 27.9497.	17.9000.
12.	0.	-0.2.	-0.6.	0.6.	0.2.	0.6.	10.8063, 19.3643.	16.6958.
13.	0.	0.	0.	0.	0.	-0.6.	-0.5780, -0.3883.	0.5303.
14.	0.	0.2.	0.6.	-0.6.	-0.2.	-0.2.	-19.3333, -10.4996.	16.3218.
15.	0.	0.6.	-0.2.	0.2.	-0.6.	0.	-27.5306, -4.4109.	17.6145.
16.	0.2.	-0.6.	0.	0.6.	-0.2.	0.	9.3353, 31.5727.	22.3482.
17.	0.2.	-0.2.	0.6.	0.	-0.6.	0.2.	-6.0918, 3.3627.	2.3100.
18.	0.2.	0.	-0.2.	-0.6.	0.6.	0.6.	3.3049, 5.6245.	4.6391.
19.	0.2.	0.2.	0.2.	0.2.	0.2.	-0.6.	-12.5997, -3.6826.	9.3081.
20.	0.2.	0.6.	-0.6.	-0.2.	0.	-0.2.	-21.7275, 2.1961.	11.4447.
21.	0.6.	-0.6.	-0.2.	0.	0.2.	-0.2.	13.5406, 35.5419.	27.3902.
22.	0.6.	-0.2.	0.2.	-0.6.	0.	0.	1.5554, 9.9052.	7.6260.
23.	0.6.	0.	-0.6.	0.2.	-0.2.	0.2.	9.7185, 16.7785.	13.7689.
24.	0.6.	0.2.	0.	-0.2.	-0.6.	0.6.	-6.9885, 5.4487.	3.6518.
25.	0.6.	0.6.	0.6.	0.6.	0.6.	-0.6.	-36.5795, -10.0600.	26.7362.

6因素5水平的X轴正交实验表

2、多轴数控加工后置处理

➤ X轴-正交实验法得到的轮廓误差分布图



当 $\Delta B = \pm 0.6^\circ$ 时，对应轮廓误差的极值

当 $\Delta B = \pm 0.2^\circ$ 时，对应的轮廓误差值

1. 可以发现 ΔB 的变化对轮廓误差值产生了明显的影响。
2. 轮廓误差的分布形状是基本固定的 (MAX 区域)，6 项误差的变化并不影响误差的分布。

2、多轴数控加工后置处理

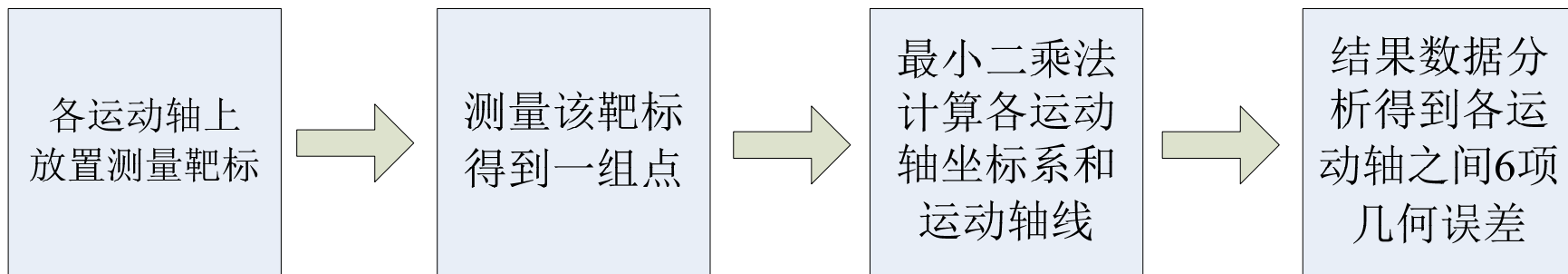
►各运动部件6项误差敏感性分析表

运动部件	6项误差对加工曲面轮廓误差影响从大到小
刀具	z向线性误差→x向线性误差→绕x轴转动误差→绕z轴转动误差→绕y轴转动误差→y向线性误差
B1轴	绕y轴转动误差→y向线性误差→z向线性误差→绕x轴转动误差→绕z轴转动误差→x向线性误差
C1轴	x向线性误差→z向线性误差→绕z轴转动误差→绕y轴转动误差→y向线性误差→绕x轴转动误差
Z轴	绕x轴转动误差→x向线性误差→z向线性误差→绕z轴转动误差→y向线性误差→绕y轴转动误差
X轴	绕y轴转动误差→y向线性误差→绕x轴转动误差→x向线性误差→绕z轴转动误差→z向线性误差
C2轴	绕y轴转动误差→y向线性误差→绕x轴转动误差→x向线性误差→绕z轴转动误差→z向线性误差

2、多轴数控加工后置处理

► 大型螺旋桨加工机床几何误差标定实验

标定流程



大型螺旋加工机床



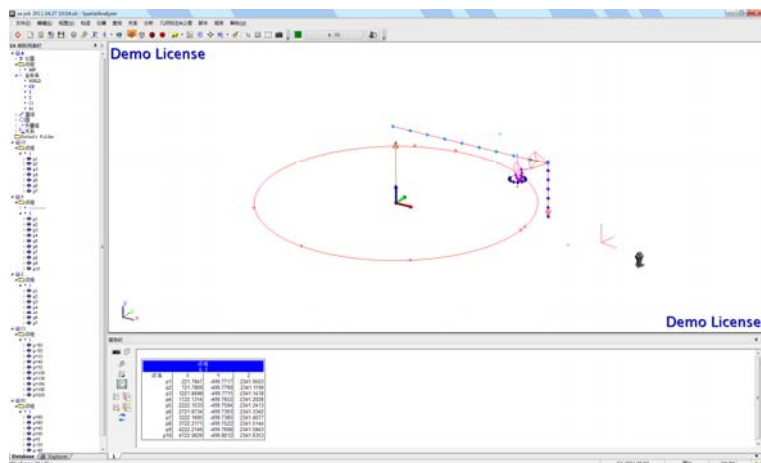
API激光跟踪仪



实际测量情况

2、多轴数控加工后置处理

测量数据分析



标准铣头配置机床轴系

	<u>Dx (mm)</u>	<u>Dy (mm)</u>	<u>Dz (mm)</u>	<u>Rx(Degree)</u>	<u>Ry (Degree)</u>	<u>Rz (Degree)</u>
C2	0	0	0	0	0	0
X	0	0	0	0	-0.0077	0
Z	0	0	0	-0.0027	0.0007	0
C1	0 ⁽¹⁾	0.7596	0 ⁽¹⁾	0.0099	0.0108	0 ⁽¹⁾
B1	0.0634	0	0	0.0285	0	0

标准铣头配置下各轴6项误差

	<u>Dx (mm)</u>	<u>Dy (mm)</u>	<u>Dz (mm)</u>	<u>Rx(Degree)</u>	<u>Ry (Degree)</u>	<u>Rz (Degree)</u>
C2	0	0	0	0	0	0
X	0	0	0	0	-0.0083	0
Z	0	0	0	0.0016	-0.0021	0
C1	0 ⁽¹⁾	0.8313	0 ⁽¹⁾	0.0157	-0.0004	0
B2	0	0.0537	0	0	0.0017	0
A2	0	0	0	0 ⁽¹⁾	-0.0002	0.0195

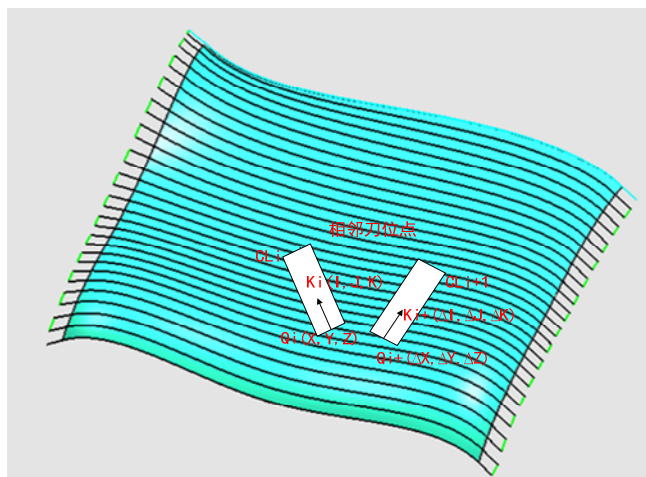
特殊铣头配置下各轴6项误差

特殊铣头配置机床轴系

2、多轴数控加工后置处理

③ 含结构误差的多轴机床运动学求解

➤ 基于全微分的机床运动学求解



公式表示为

$$P_{i+1} = P_i + \begin{bmatrix} \Delta Q_x & \Delta K_x \\ \Delta Q_y & \Delta K_y \\ \Delta Q_z & \Delta K_z \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

相邻刀位点空间关系

全微分定义：

□ 函数 $z=f(x, y)$ 存在偏导数 $f'_x(x, y)$, $f'_y(x, y)$

□ $f'_x(x, y)\Delta x + f'_y(x, y)\Delta y$ 与全增量 Δz 之差趋近于0

□ 函数 $z=f(x, y)$ 在 (x, y) 处的全微分可表示为：

$$dz = f'_x(x, y)\Delta x + f'_y(x, y)\Delta y$$

加工段为保证连续性和平稳性，轨迹一般连续可微。由机床运动变换关系，刀位点可表示为

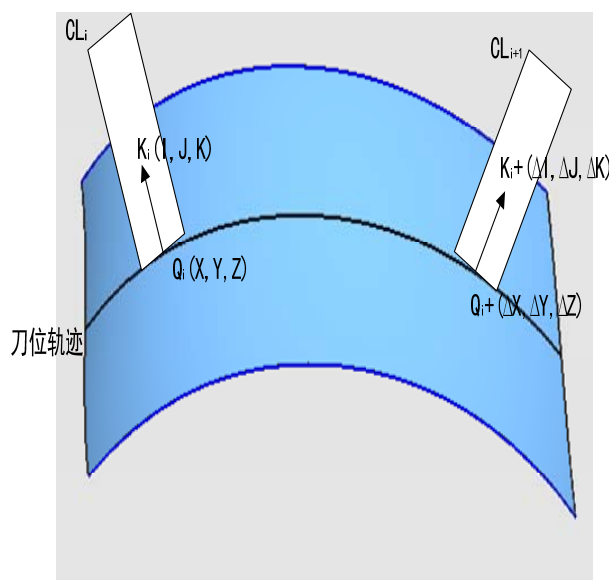
$$P = f(M, \phi) = {}^W Q_T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

由全微分定理知相邻刀位可以用全微分形式表示

2、多轴数控加工后置处理

➤ 基于全微分的机床运动学求解

采用全微分形式描述相邻刀位点空间关系，使复杂的运动学逆向求解转化为求解以各轴运动增量为变量的线性方程组求解问题。



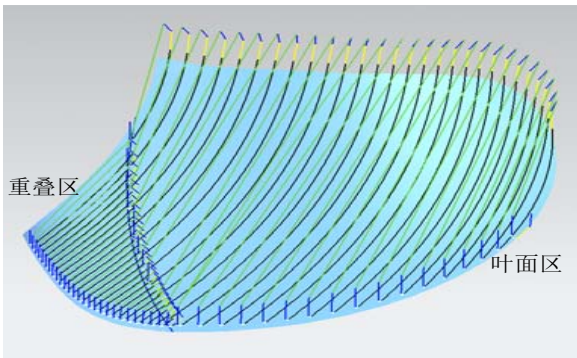
相邻刀位点空间关系

$$\begin{aligned} P_{i+1} = P_i &+ \frac{\partial f(M, \phi)}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial f(M, \phi)}{\partial Y} \Delta Y + \\ &\frac{\partial f(M, \phi)}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial f(M, \phi)}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial f(M, \phi)}{\partial C} \Delta C \end{aligned}$$

由上式得到以各运动轴增量为变量的线性方程组：

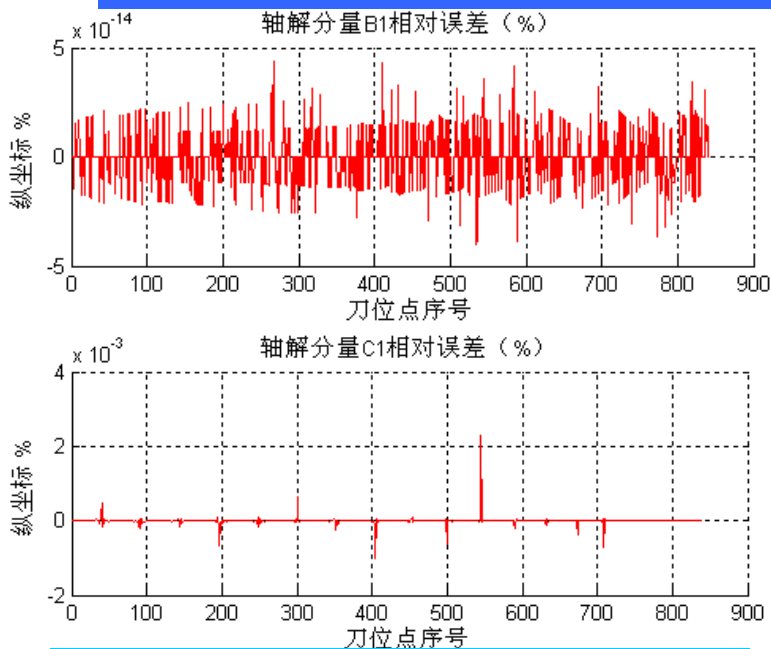
$$\begin{cases} a_{11}\Delta A + a_{12}\Delta C + a_{13} = 0 \\ a_{21}\Delta A + a_{22}\Delta C + a_{23} = 0 \\ a_{31}\Delta A + a_{32}\Delta C + a_{33} = 0 \\ a_{41}\Delta A + a_{42}\Delta C + a_{43}\Delta X + a_{44}\Delta Y + a_{45}\Delta Z + a_{46} = 0 \\ a_{51}\Delta A + a_{52}\Delta C + a_{53}\Delta X + a_{54}\Delta Y + a_{55}\Delta Z + a_{56} = 0 \\ a_{61}\Delta A + a_{62}\Delta C + a_{63}\Delta X + a_{64}\Delta Y + a_{65}\Delta Z + a_{66} = 0 \end{cases}$$

2、多轴数控加工后置处理

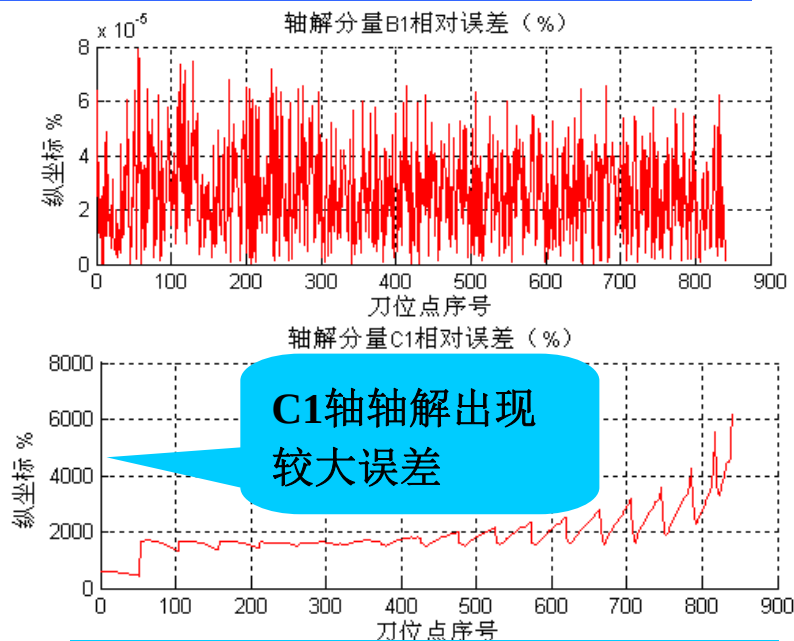


以大型螺旋
桨加工机床
为验证对
象，加工型
号ZL700的

分别采用全微分算法、数值法进行运动学求解，结果对比如下：

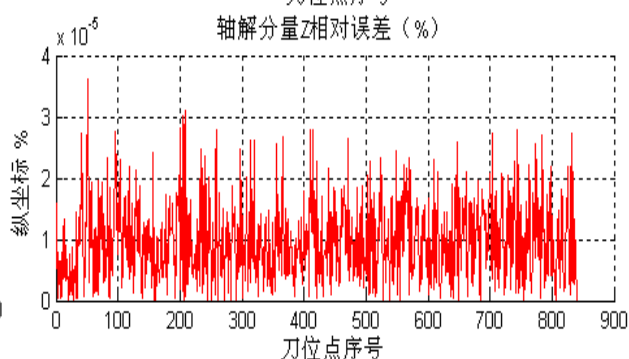
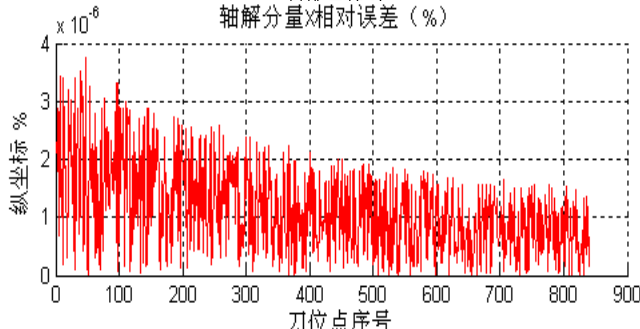
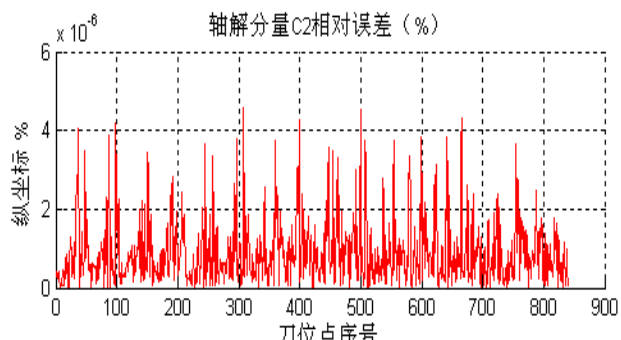
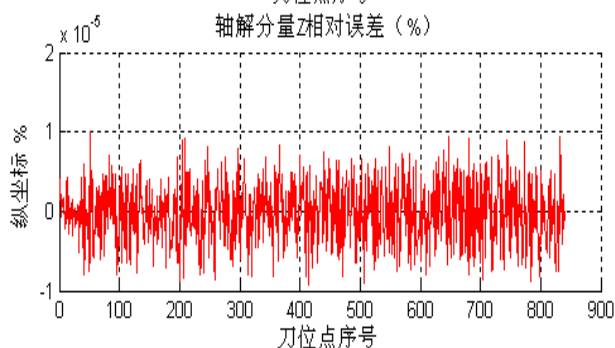
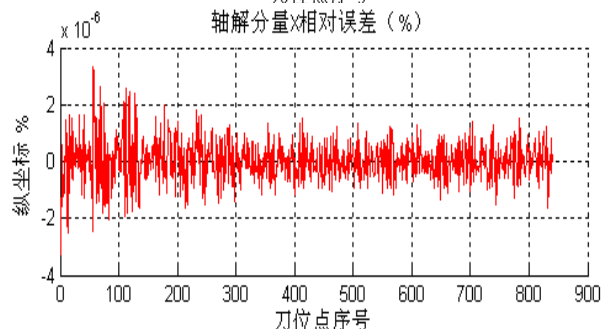
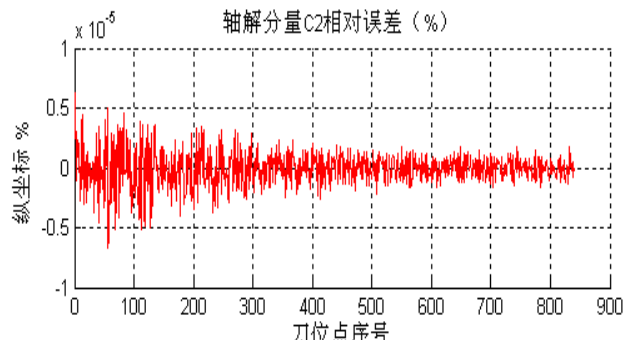


全微分法求解结果相对误差



数值算法求解结果相对误差

2、多轴数控加工后置处理



全微分算法求解结果相对误差

数值算法求解结果相对误差

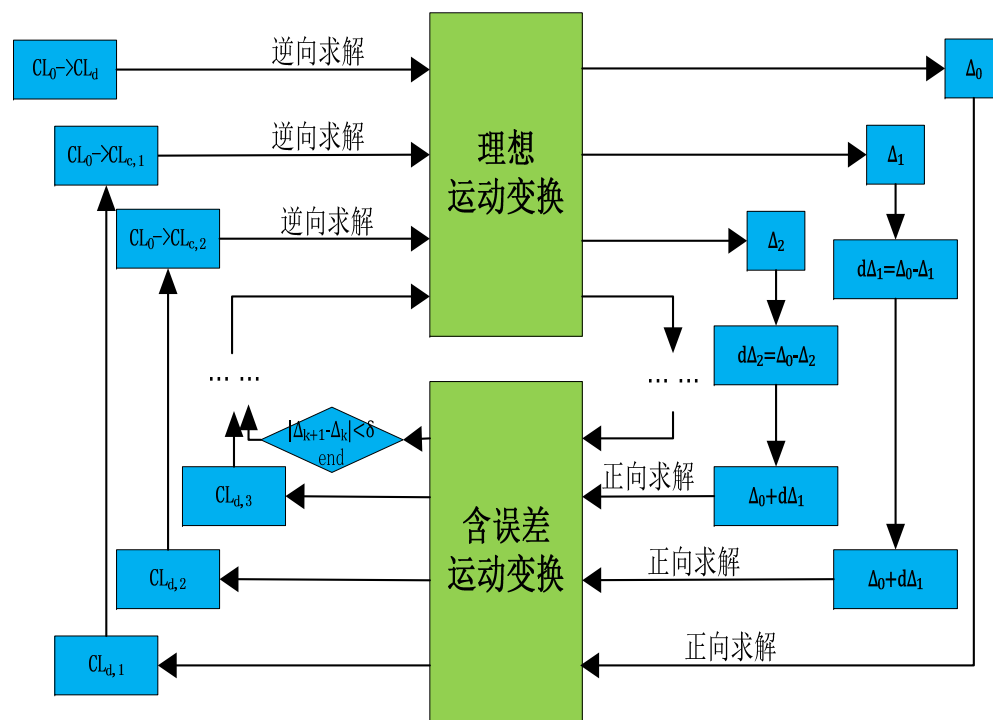
□全微分算法与机床具体结构无关，通用性好

□全微分算法求解速度快，在主频为2.6GHz的计算机上计算840个刀位点仅需5秒，而数值方法则需几个小时，求解精度高，不存在奇异现象

□全微分算法，算法流程简单，易于编程实现

2、多轴数控加工后置处理

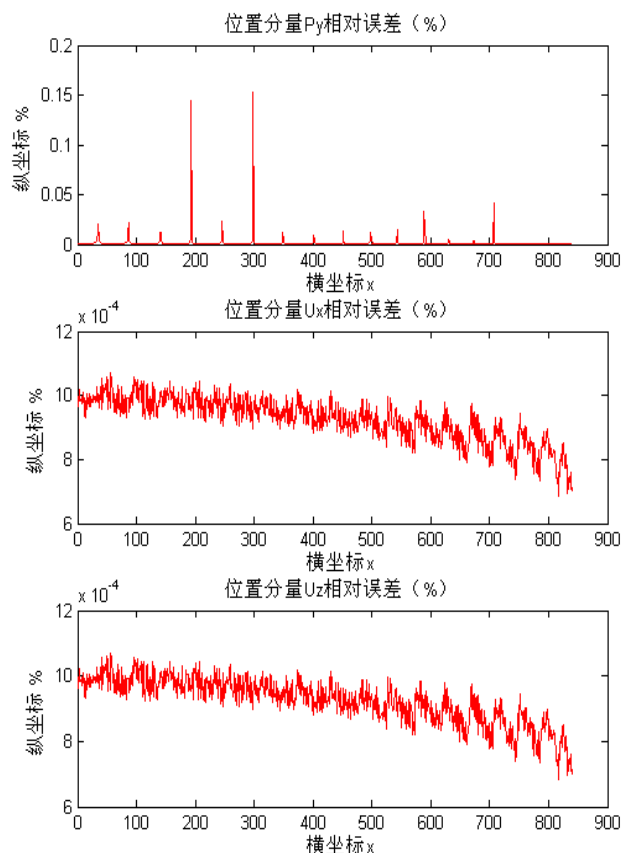
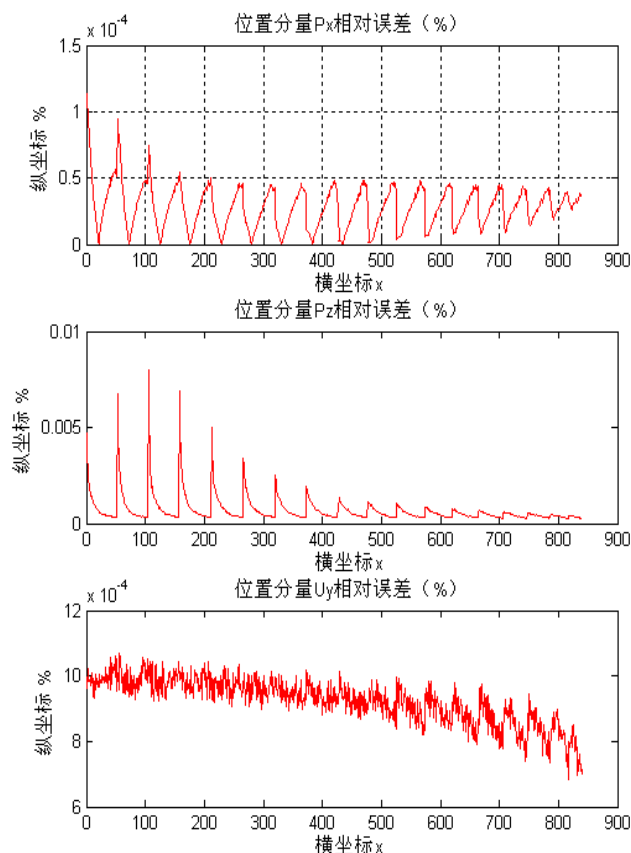
➤含结构误差的机床运动学求解



算法示意图

2、多轴数控加工后置处理

为进一步验证算法准确性，将迭代法求解结果代入含结构误差运动学模型正向计算刀位点



迭代法求解结果正向计算得到的刀位点与理想刀位点的相对误差极小，可知新的方法准确可靠。

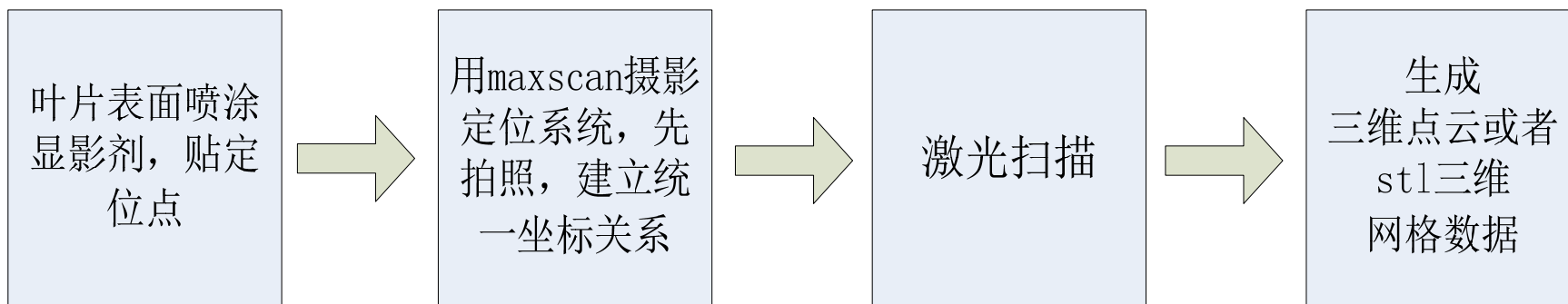
■ 误差补偿算法通用性好

■ 求解速度快，收敛性好，易于实现

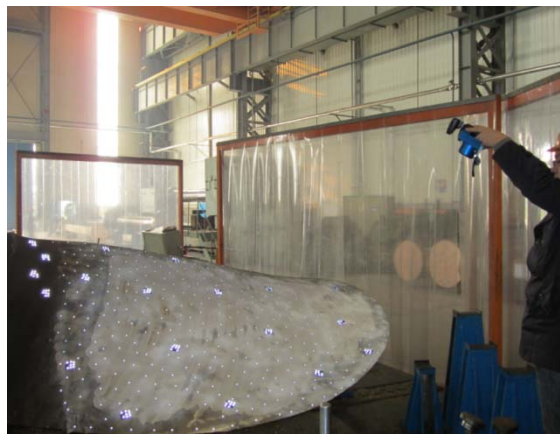
2、多轴数控加工后置处理

④ 复杂曲面零件加工形貌测量实验

➤ 测量流程



测量零件



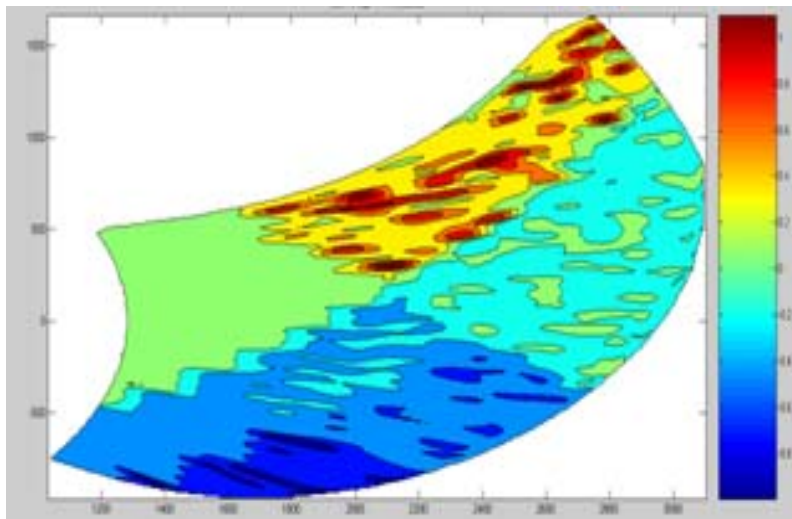
单相机系统



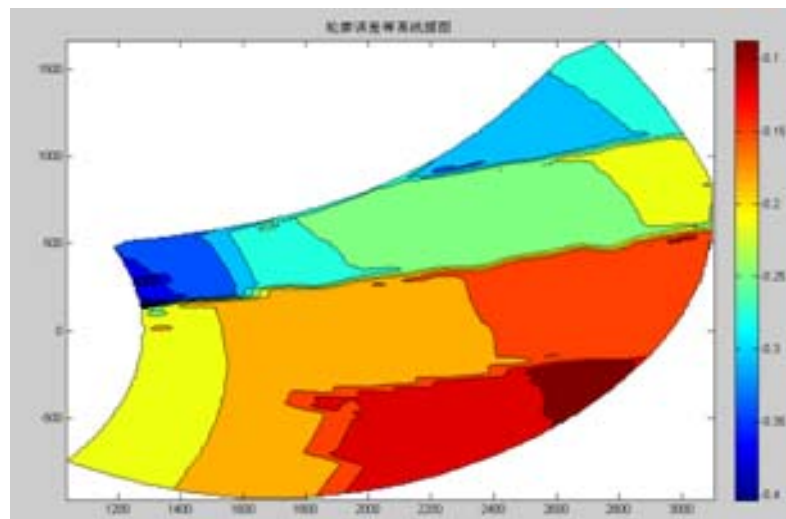
三维激光扫描仪

2、多轴数控加工后置处理

➤ 测量数据分析



几何误差引起的加工误差分布



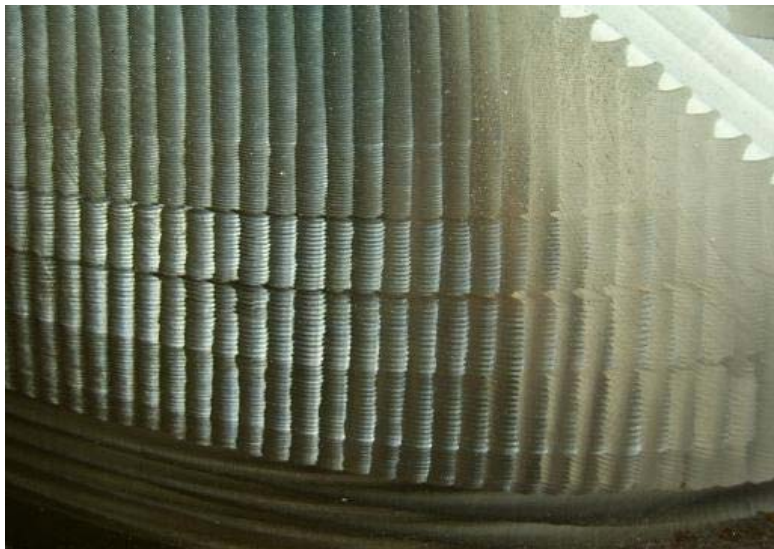
补偿几何误差后测量结果

- ▣ 对叶片进行几何误差补偿，形貌测量结果与理论模型对比；
- ▣ 几何误差补偿后，螺旋桨叶面的加工误差明显减小，由4mm减小到0.4mm

2、多轴数控加工后置处理

2) 基于非线性映射关系的多轴数控加工进给速度优化

技术难点： 进给速度具有非线性映射关系；加工余量分布不均匀；机床—刀具—工件的切削过程稳定性与刀具姿态、工件支撑密切相关；



进给速度的非线性映射对
加工质量的影响



刀具姿态、工件支撑与切削
过程稳定性密切相关

2、多轴数控加工后置处理

① 基于非线性映射关系的多轴数控加工进给速度建模

根据机床运动学理论，计算机床关节空间广义距离，由给定的指令速度，计算各关节运动时间，然后结合数控系统插补方法进行进给速度反算，获得代码行的指令速度。

位移增量法分析关节空间机床各轴的速度、加速度

$$\Delta P_{wk} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2 + \Delta A^2 + \Delta B^2}$$
$$F_i = \frac{S_{n+1} - S_n}{\Delta t} \quad a_i = \frac{2(F_{n+1} - F_n)}{t_{n+1} + t_n} \quad i = X, Z, B_1, C_1, C_2, A_2, B_2$$

微分思想分析笛卡尔空间刀具相对工件的速度、加速度

$$P_i = F(X, Z, A, B, C)$$

$$dP_i = \frac{\partial F}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial F}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial F}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial F}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial F}{\partial C} \Delta C \quad i = X, Y, Z$$

$$V_i = \frac{dP_i}{dt} = \frac{\partial F}{\partial X} \frac{\Delta X}{dt} + \frac{\partial F}{\partial Z} \frac{\Delta Z}{dt} + \frac{\partial F}{\partial A} \frac{\Delta A}{dt} + \frac{\partial F}{\partial B} \frac{\Delta B}{dt} + \frac{\partial F}{\partial C} \frac{\Delta C}{dt}$$

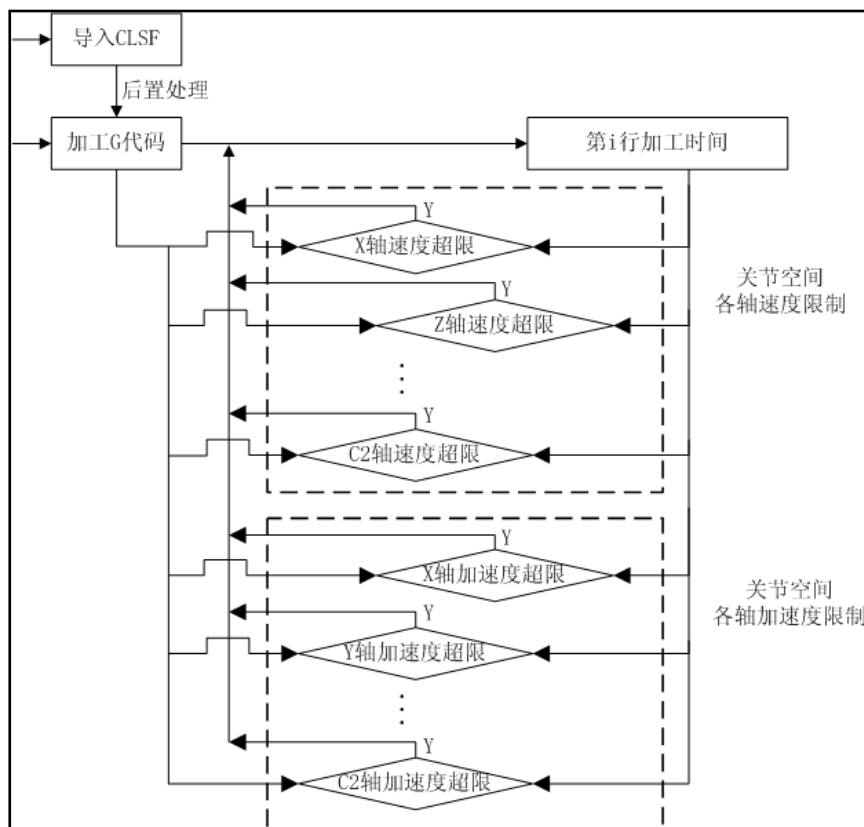
$$V_i = f(X, Z, A, B, C)$$

$$dV_i = \frac{\partial f}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial f}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial f}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial f}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial f}{\partial C} \Delta C \quad i = X, Y, Z$$

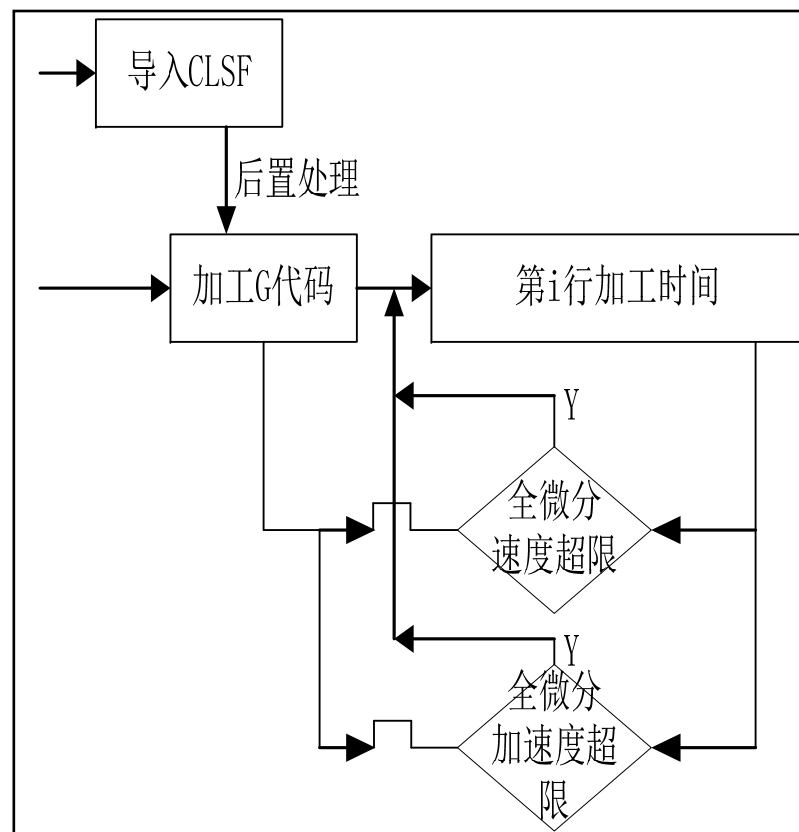
$$a_i = \frac{dV_i}{dt} = \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\Delta X}{dt} + \frac{\partial f}{\partial Z} \frac{\Delta Z}{dt} + \frac{\partial f}{\partial A} \frac{\Delta A}{dt} + \frac{\partial f}{\partial B} \frac{\Delta B}{dt} + \frac{\partial f}{\partial C} \frac{\Delta C}{dt}$$

2、多轴数控加工后置处理

② 关节空间机床各轴以及笛卡尔空间刀具相对工件表面速度、加速度限制与优化流程



关节空间进给速度、加速度优化流程图



笛卡尔空间进给速度加速度优化流程图

2、多轴数控加工后置处理

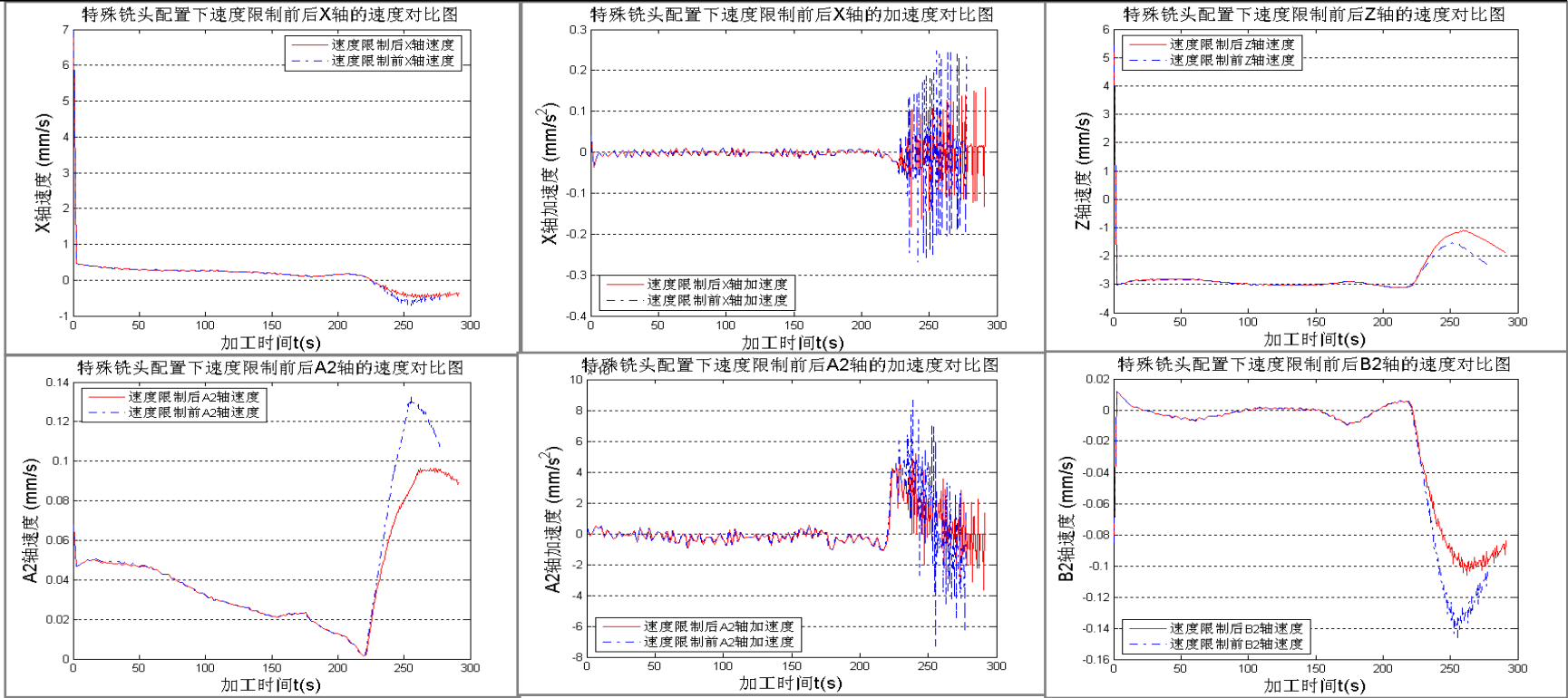
➤ 速度平滑前后特殊铣头进给速度对比

输入的进给速度(mm/min)：进给速度300，进/退刀速度600，快进/快退2000

N61	Tm=7648	X=1973.163	Z=1483.477	B=-32.512	C1=105.424	C2=14.208	F=155.018	300.000	580.577
N62	Tm=7656	X=1974.434	Z=1462.355	B=-33.806	C1=105.406	C2=12.956	F=165.837	300.000	542.703
N63	Tm=7644	X=1976.238	Z=1441.018	B=-34.853	C1=105.580	C2=11.771	F=168.070	300.000	535.492
N64	Tm=7622	X=1977.937	Z=1420.586	B=-35.401	C1=105.839	C2=10.694	F=161.386	300.000	557.670
N65	Tm=7604	X=1979.213	Z=1401.312	B=-35.495	C1=106.100	C2=9.707	F=152.414	300.000	590.496
N66	Tm=7593	X=1980.000	Z=1382.962	B=-35.303	C1=106.312	C2=8.772	F=145.128	300.000	620.144
N67	Tm=7594	X=1980.677	Z=1364.634	B=-35.143	C1=106.490	C2=7.827	F=144.911	300.000	621.070
N68	Tm=7596	X=1981.323	Z=1346.270	B=-35.026	C1=106.650	C2=6.873	F=145.151	300.000	620.042
N69	Tm=7597	X=1982.002	Z=1327.846	B=-34.951	C1=106.805	C2=5.909	F=145.603	300.000	618.119
N70	Tm=7598	X=1982.719	Z=1309.381	B=-34.904	C1=106.959	C2=4.939	F=145.921	300.000	616.773
N71	Tm=7599	X=1983.455	Z=1290.867	B=-34.884	C1=107.109	C2=3.963	F=146.286	300.000	615.233
N72	Tm=7600	X=1984.195	Z=1272.293	B=-34.889	C1=107.251	C2=2.983	F=146.744	300.000	613.315
N73	Tm=7601	X=1984.902	Z=1253.677	B=-34.910	C1=107.382	C2=1.999	F=147.062	300.000	611.985
N74	Tm=7601	X=1985.565	Z=1235.024	B=-34.942	C1=107.502	C2=1.012	F=147.325	300.000	610.895
N75	Tm=7601	X=1986.183	Z=1216.329	B=-34.984	C1=107.609	C2=0.024	F=147.646	300.000	609.567
N886	Tm=6335	X=1296.099	Z=1076.472	B=-44.608	C1=109.989	C2=-16.836	F=197.334	300.000	456.080
N887	Tm=1584	X=1296.571	Z=1071.285	B=-44.656	C1=110.066	C2=-17.128	F=197.355	300.000	456.030
N888	Tm=792	X=1296.806	Z=1068.691	B=-44.679	C1=110.104	C2=-17.274	F=197.349	300.000	456.044
N889	Tm=4000	X=1297.398	Z=1088.592	B=-44.679	C1=110.188	C2=-17.358	F=298.643	300.000	301.363
N890	Tm=3000	X=1300.401	Z=1188.096	B=-44.679	C1=110.607	C2=-17.776	F=1990.960	2000.000	2009.081
N891	Tm=26042	X=1184.503	Z=1700.570	B=-38.238	C1=97.360	C2=13.474	F=1830.406	1830.406	3024.141
N892	Tm=9990	X=1178.175	Z=1622.026	B=-38.238	C1=94.374	C2=16.461	F=473.252	600.000	760.695
N893	Tm=20065	X=1192.065	Z=1555.351	B=-38.238	C1=97.914	C2=12.920	F=203.661	300.000	441.911
N894	Tm=6252	X=1195.069	Z=1535.953	B=-38.903	C1=98.585	C2=11.480	F=188.388	300.000	477.737

2、多轴数控加工后置处理

➤ 速度平滑前后特殊铣头各轴运动速度对比

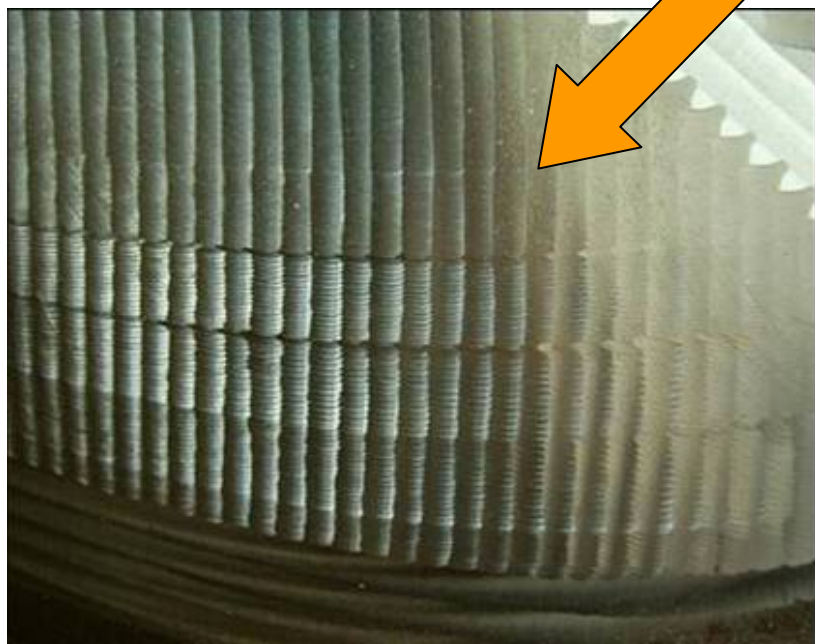
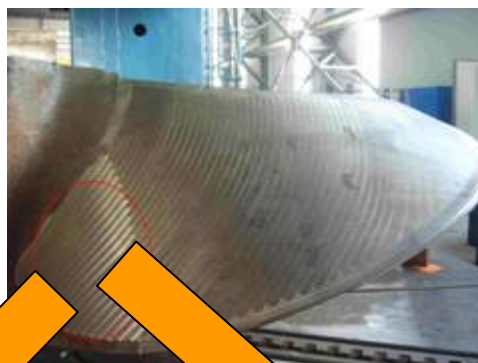


特殊铣头进给速度优化控制参数

	X轴		Z轴		A ₂ 轴		B ₂ 轴		C ₂ 轴		笛卡尔空间	
	速度	加速度	速度	加速度	速度	加速度	速度	加速度	速度	加速度	速度	加速度
特殊铣头	3000	4000	3000	4000	72	720	1200	720	54	720	2000	4000

2、多轴数控加工后置处理

加工效果对比



进给速度平滑前

进给速度平滑后

进给速度的非线性映射对加工质量的影响

2、多轴数控加工后置处理

➤发明专利:

- ✓ 考虑机床结构误差的多轴数控加工后置处理方法（**201110324390.4**）；
- ✓ 一种多轴数控机床通用后置处理方法（**201110324388.7**）；
- ✓ 一种多轴数控加工的进给速度平滑方法（**ZL201110045684.3**）。

➤发表文章:

- ✓ **PENG Fangyu, Zhang Mingsheng, YAN Rong, Ma Jiyang. Electro-mechanical simulation and analysis of space error for multi-axis laser welding, Institution of Mechanical Engineers, Volume 225, Issue 3, September 2011: 272-279. (SCI)**
- ✓ 杨建中, 杜璇, 黄科, 王宝山, 彭芳瑜. 面向速度各点异性的刀具运动扫掠体建模与仿真, 中国机械工程, 2011, Vol. 21: 2593-2597.
- ✓ 彭芳瑜, 马吉阳, 王力, 闫蓉, 李斌. 任意结构多轴数控机床后置处理的全微分求解算法, 机械工程学报, 复审通过. (EI)
- ✓ **MA Jiyang, PENG Fangyu, YAN Rong, WU Jing. A Geometric Error Identification and Simulation Method Based on Laser Tracker for Large-scale Multi-axis NC Machine Tools, ICMSE2012, Xiamen, china, accept.**

3、多轴数控加工在线运动规划

1) NURBS曲线与连续小线段高速高精在线运动规划

➤ 研究背景

✓ 参数化的样条插补

恒参数增量法 — Bedi(1993), Wang和Yang等(1993)

泰勒级数近似法 — Huang和Yang(1992), Shpitalnil等 (1994)

速度自适应法 — Yeh和Hsu(1999), 张伟(2002), 游有鹏等(2000)

最小加加速度法 — Erkorkmaz和Altintas(2001), Tounsi 等(2003)

✓ 连续小直线段插补

✓ 滑动缓冲区法 — Han等(1999)

✓ 过渡段法 — 叶佩青和赵慎良(2004)

✓ 自适应前瞻法 — 徐志明等(2003)

✓ 考虑机床的物理约束及动力学特性的插补

扭矩和功率限制 法 — Farouki等(2000), 陈金成等(2002)

频域分析法 — Liu等(2005)

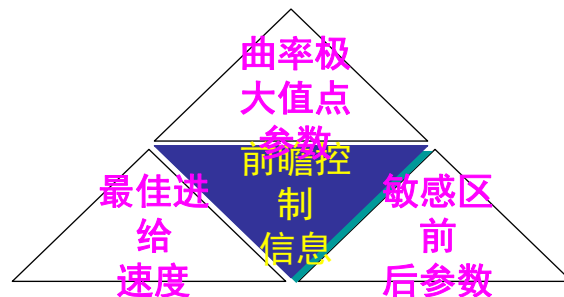
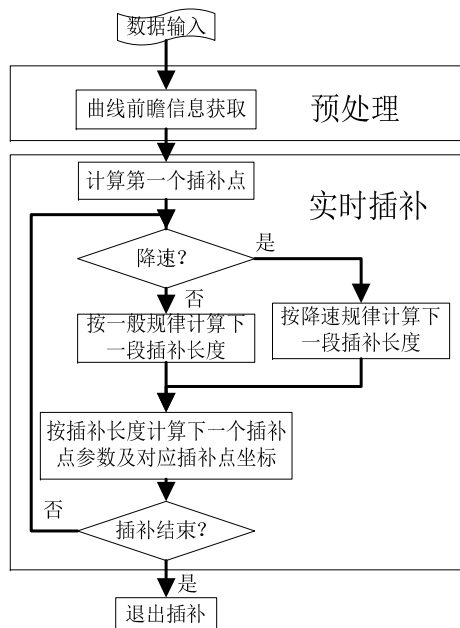
恒切削力法 — Geels (1996), Tounsi 等(2003)

恒材料去除率法 — Tikhon (2004)

3、多轴数控加工在线运动规划

① NURBS曲线的高速高精在线运动规划

将曲线按曲率变化分成若干个区域，曲率极大值前后的区域称为敏感区，两个敏感区之间的则为一般区域，在敏感区，进行特定的降速及升速处理；在一般区域，进行正常速度规划。



曲率极大值点参数通过二次遗传算法获得

$$\kappa = \frac{|\vec{r}' \times \vec{r}''|}{|\vec{r}'|^3} = \frac{\left[\begin{matrix} |y' & z'|^2 & |z' & x'|^2 & |x' & y'|^2 \end{matrix} \right]^{1/2}}{\left[(x')^2 + (y')^2 + (z')^2 \right]^{3/2}}$$

由曲线曲率、插补精度、插补周期确定的速度约束

$$v_m = \frac{\sqrt{8\rho\delta}}{T}$$

由机床动力学特性确定的速度约束

$$\begin{cases} \left| F_{kx} \operatorname{sgn}(\dot{x}) + F_{vx} \dot{x} + F_s(\gamma, t) \frac{1}{1 + (\frac{\dot{x}}{\dot{x}_s})^2} \operatorname{sgn}(\dot{x}) \right| \dot{x} + K_{cx}^* \dot{x}^{\beta_s} \dot{x} + \left(m_x + \frac{2\pi J_x}{l_x^2} \right) \ddot{x} \leq P_{mx} \\ \left| F_{ky} \operatorname{sgn}(\dot{y}) + F_{vy} \dot{y} + F_s(\gamma, t) \frac{1}{1 + (\frac{\dot{y}}{\dot{y}_s})^2} \operatorname{sgn}(\dot{y}) \right| \dot{y} + K_{cy}^* \dot{y}^{\beta_s} \dot{y} + \left(m_y + \frac{2\pi J_y}{l_y^2} \right) \ddot{y} \leq P_{my} \\ \left| m_z g_z^z + (F_{kz} \operatorname{sgn}(\dot{z}) + F_{vz} \dot{z} + F_s(\gamma, t) \frac{1}{1 + (\frac{\dot{z}}{\dot{z}_s})^2} \operatorname{sgn}(\dot{z})) \dot{z} + K_{cz}^* \dot{z}^{\beta_s} \dot{z} + \left(m_z + \frac{2\pi J_z}{l_z^2} \right) \ddot{z} \right| \leq P_{mz} \end{cases}$$

$|\dot{x}| \leq a_{mx}, |\dot{y}| \leq a_{my}, |\dot{z}| \leq a_{mz}$

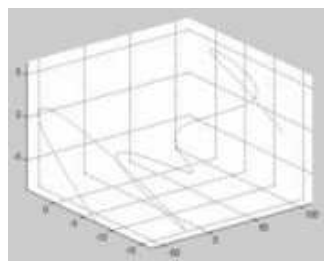
最佳进给速度确定

敏感点对应临界弧长

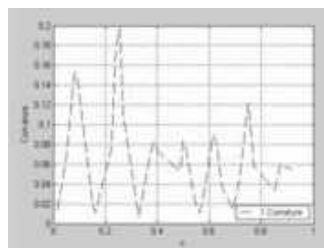
$$L_c = 4 (v_i - v_{i-1})T$$

3、多轴数控加工在线运动规划

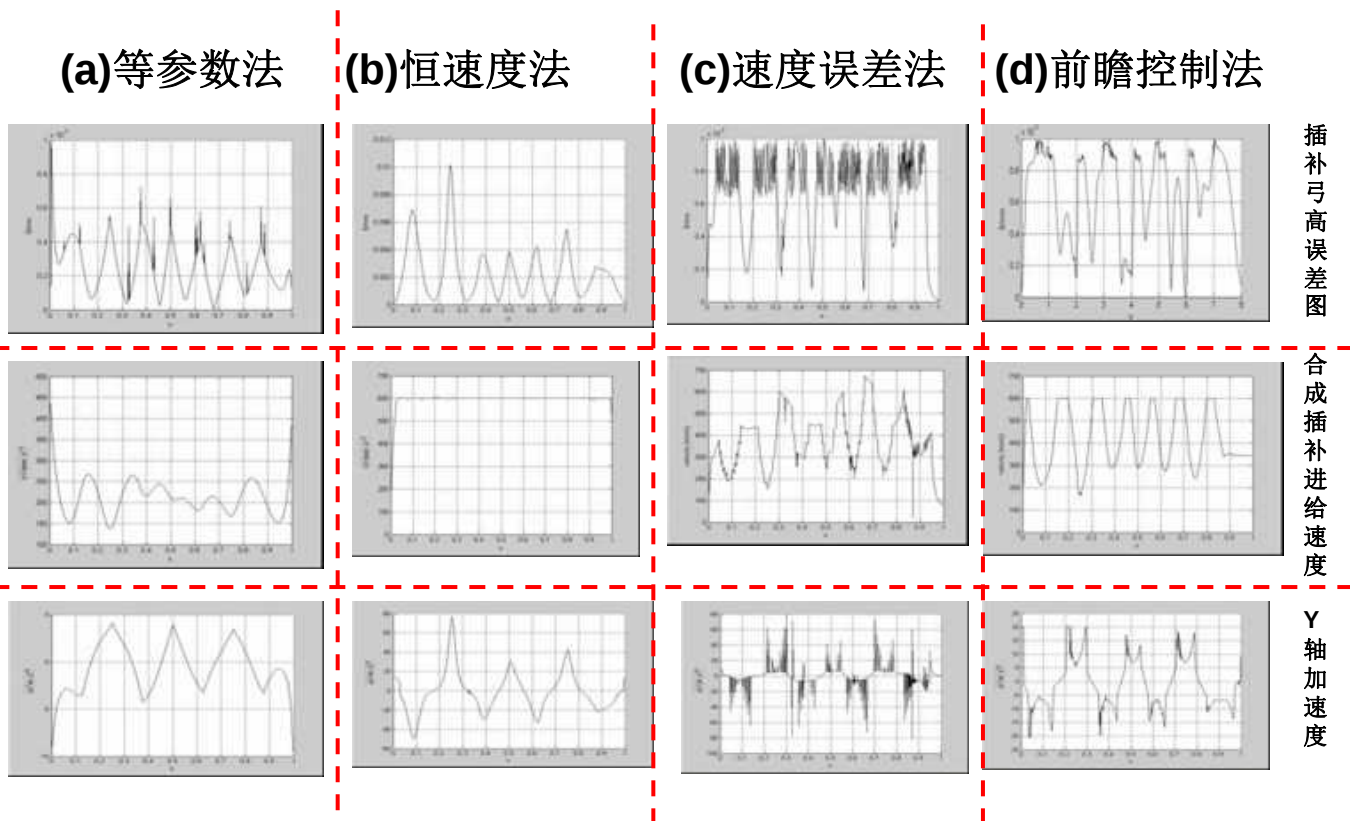
➤ 计算结果与对比分析



插补曲线图



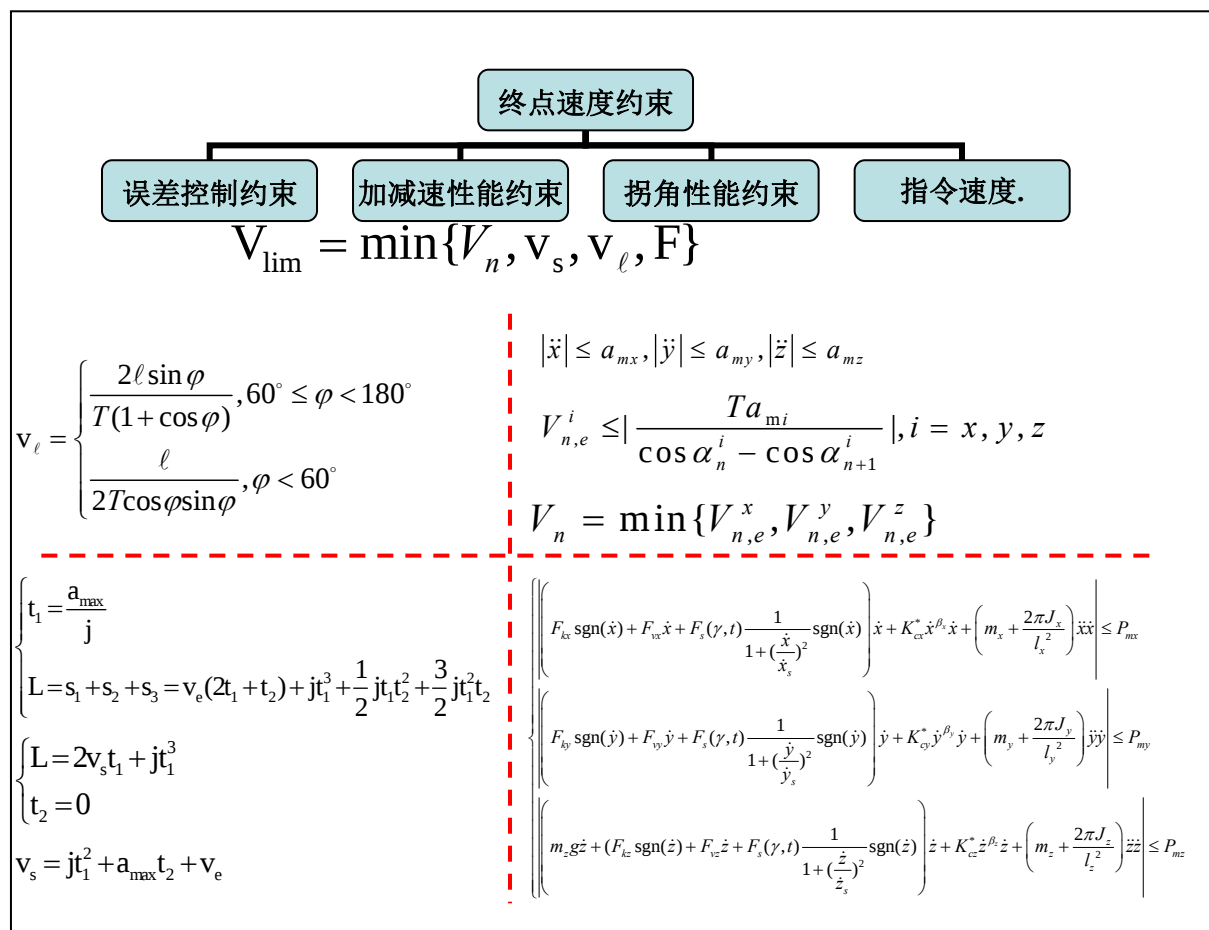
曲线曲率图



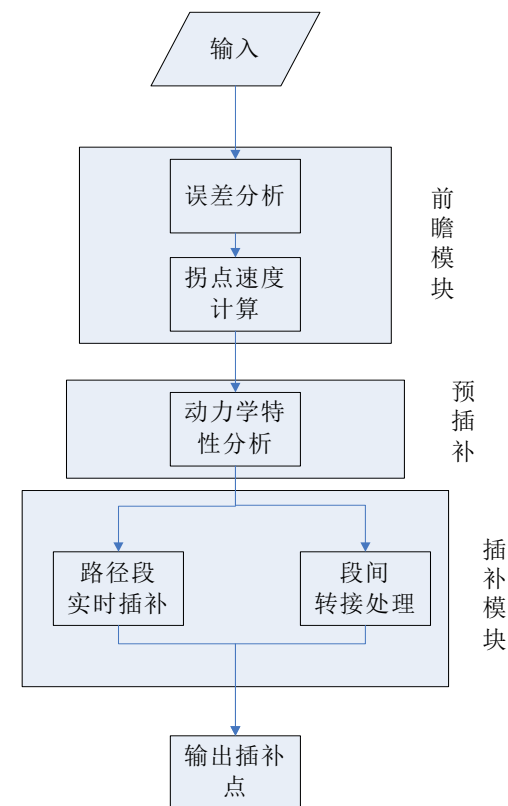
基于曲线与机床动力学特性的前瞻控制法，插补弓高误差均满足插补精度的要求，且分布比较均匀；在满足插补精度的前提下，速度曲线更平滑，高速加工的时间也更长。

3、多轴数控加工在线运动规划

② 连续小线段的高速高精在线运动规划



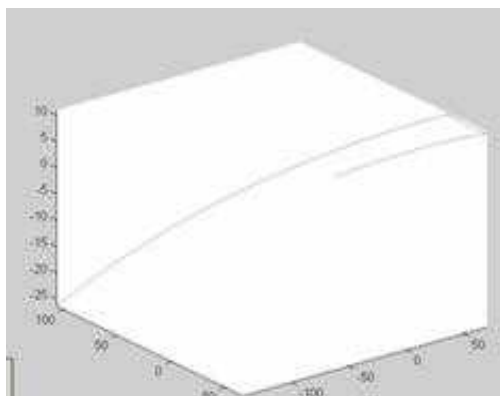
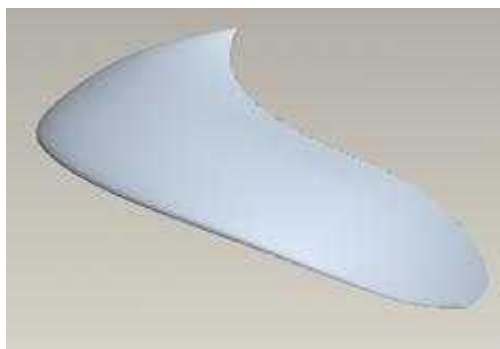
连续小线段高速插补的几何及物理混合约束条件



基于前瞻控制的连续小线段高速插补算法流程图

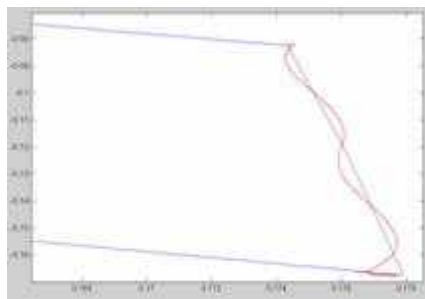
3、多轴数控加工在线运动规划

➤ 计算结果与对比分析

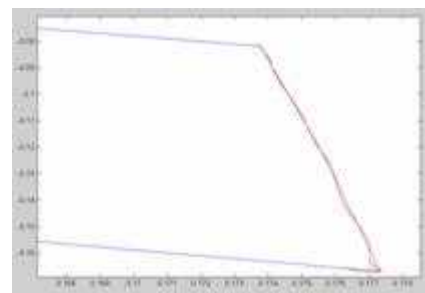


选取的加工曲线段截自螺旋桨桨叶曲面，共有57段，每段长度约为6-7mm

约束条件下与无约束条件下的加工效果对比

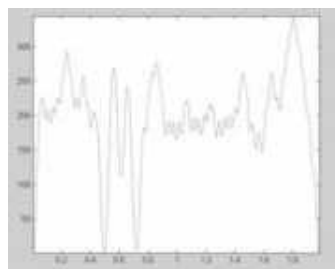


(a)无机床动力学约束条件

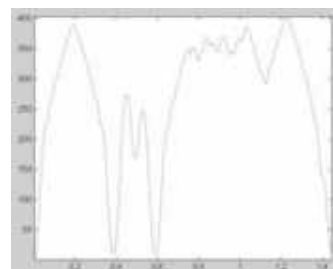


(b)有机床动力学约束条件

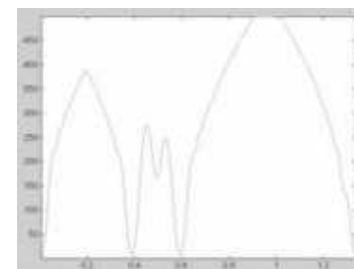
误差控制对插补结果的影响



(a) 拐角精度0.001mm
平均速度196.6mm/s



(b) 拐角精度0.002mm
平均速度270.4mm/s

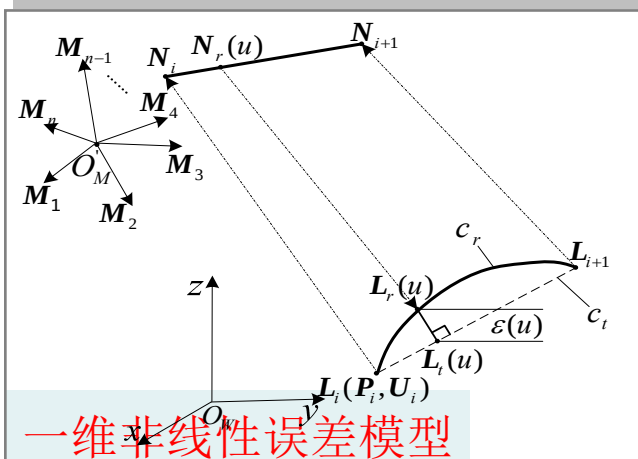


(c) 拐角精度0.005mm
平均速度292.6mm/s

3、多轴数控加工在线运动规划

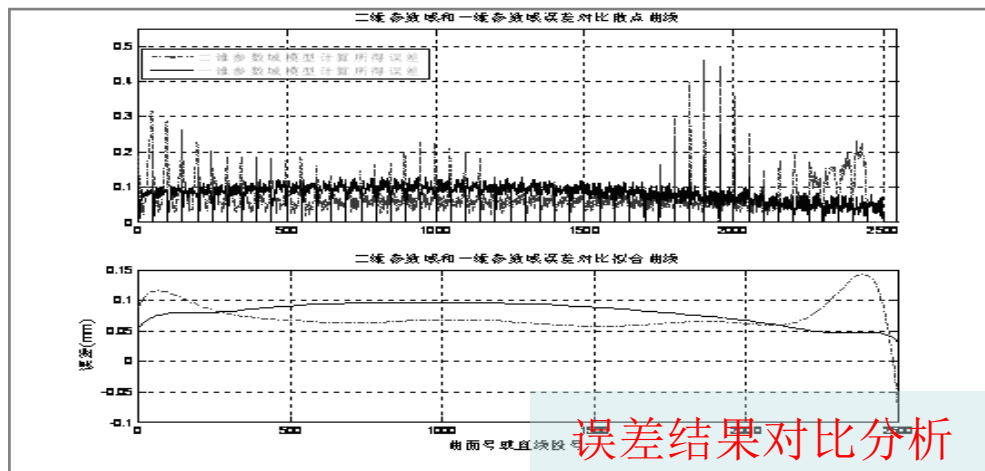
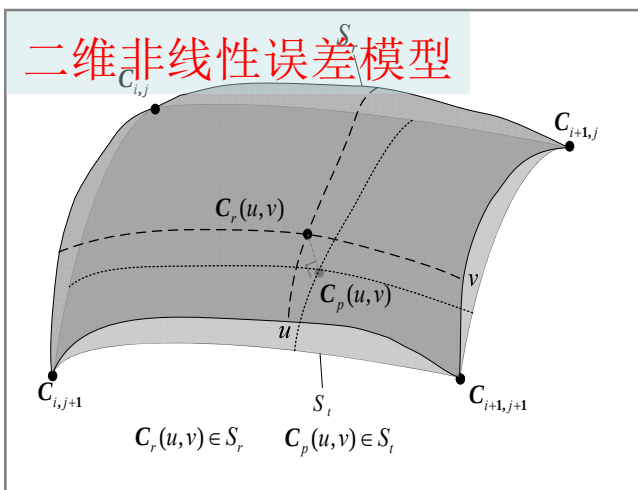
2) 多轴加工非线性误差精确建模与姿态补偿

➤ 针对自由曲面，建立二维参数域非线性误差精确求解模型。



$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon(u_1), \varepsilon(u_2), \varepsilon(u_3), \dots, \varepsilon(u_\rho))$$

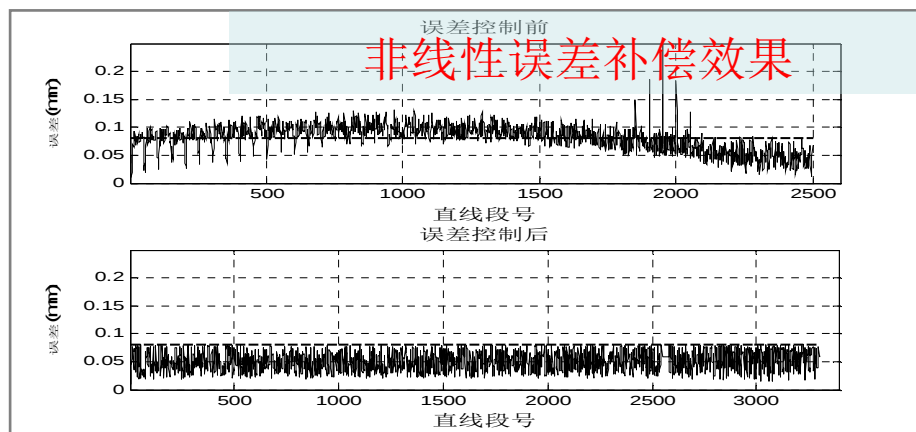
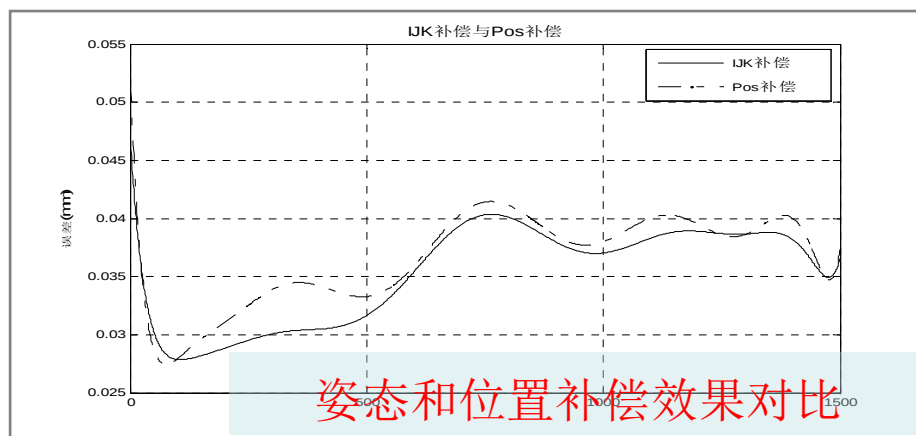
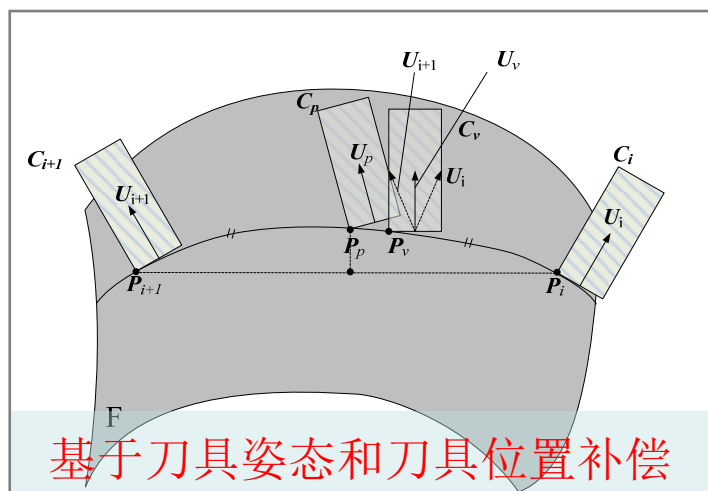
$$\varepsilon_{\max} = \max \begin{pmatrix} \varepsilon(u_1, v_1) & \varepsilon(u_1, v_2) & \varepsilon(u_1, v_3) & \cdots & \varepsilon(u_1, v_\tau) \\ \varepsilon(u_2, v_1) & \varepsilon(u_2, v_2) & \varepsilon(u_2, v_3) & \cdots & \varepsilon(u_2, v_\tau) \\ \varepsilon(u_3, v_1) & \varepsilon(u_3, v_2) & \varepsilon(u_3, v_3) & \cdots & \varepsilon(u_3, v_\tau) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon(u_\rho, v_1) & \varepsilon(u_\rho, v_2) & \varepsilon(u_\rho, v_3) & \cdots & \varepsilon(u_\rho, v_\tau) \end{pmatrix}$$



误差结果对比分析

3、多轴数控加工在线运动规划

- 采用自适应线性化法控制策略，比较基于刀具姿态和基于刀具位置的两种补偿策略的优劣，姿态补偿更有利于减小非线性误差。



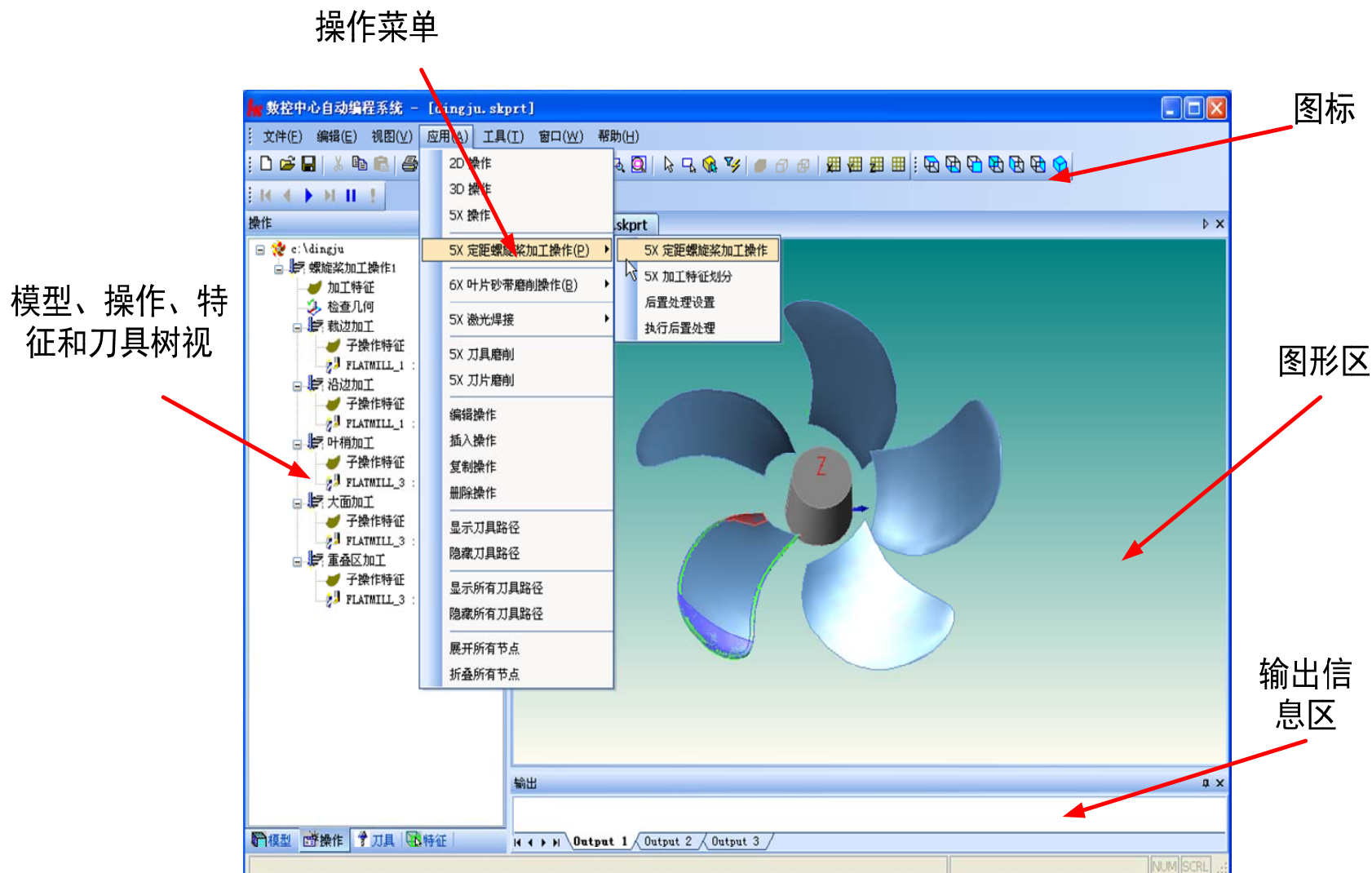
$$\begin{aligned} \text{Pos补偿策略} & \begin{cases} P_p = \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \\ F(P_p, U_p) = 0 \end{cases} \\ \text{IJK补偿策略} & \begin{cases} U_v = \frac{U_i + U_{i+1}}{2} \\ F(P_v, U_v) = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

3、多轴数控加工在线运动规划

➤发表文章:

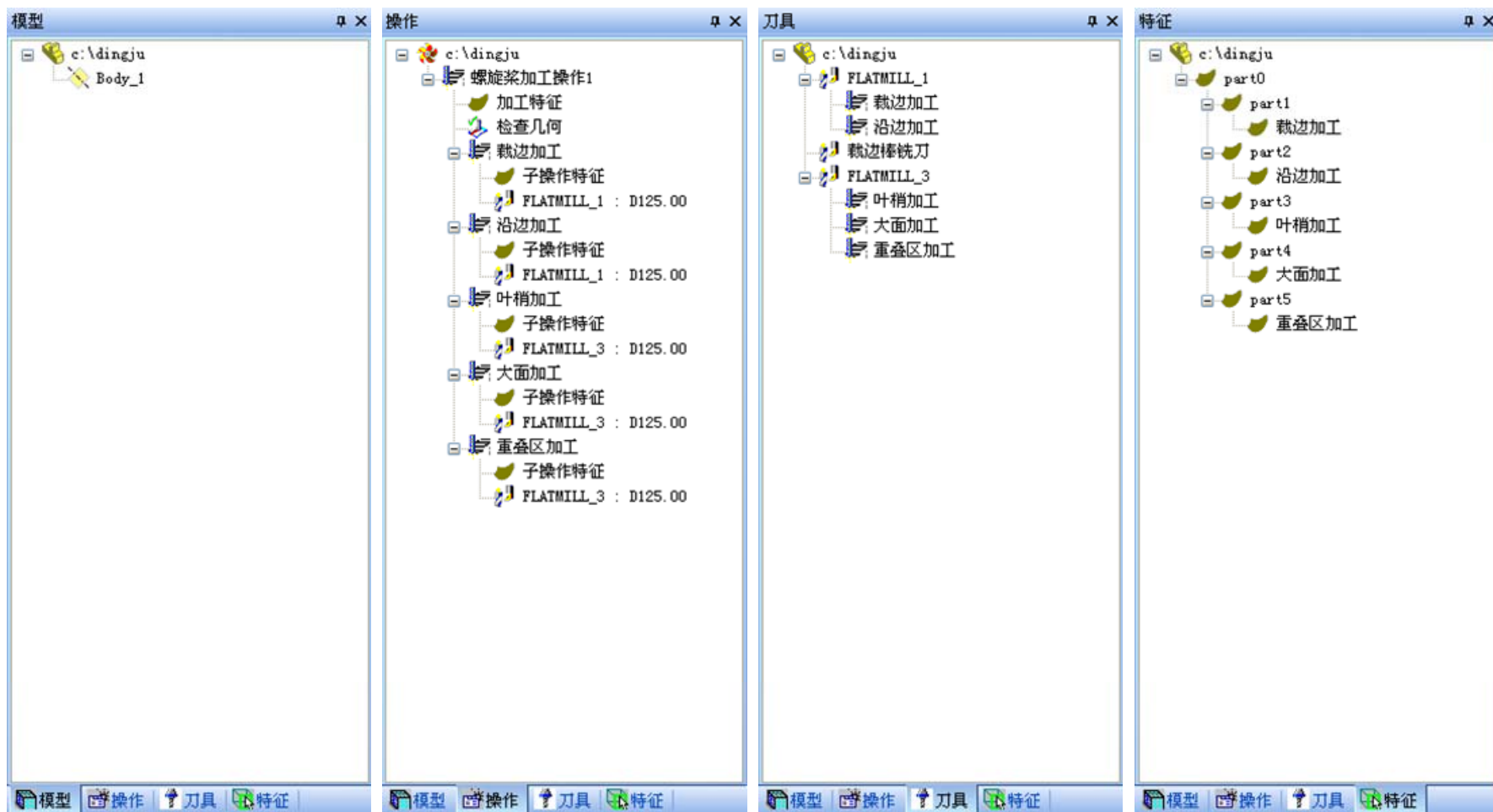
- ✓ **Peng FY**, Chen XB, Zhou Y, Li B. NURBS Curve Interpolation Algorithm Adaptive to the Machine's Kinetic Characteristics. INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIALS & PRODUCT TECHNOLOGY, 2008,33, (1/2): 79-94. (SCI) (EI)
- ✓ **Fangyu Peng**, Xubin Chen, Yong Zhou, Li Li, and Bin Li. Look-ahead Scheme for High Speed Consecutive micro-line Interpolation Based on Dynamics of Machine Tool. International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Part II, LNAI 5315, 2008, 743-753. (EI)
- ✓ **彭芳瑜**, 何莹, 李斌. NURBS曲线高速插补中的前瞻控制. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(5): 625-629. (EI)
- ✓ **彭芳瑜**, 李黎, 陈徐兵, 李斌. 连续小直线段高速高精插补中的动力学约束条件. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(12): 1812-1816. (EI)
- ✓ **陈威**, **彭芳瑜**, 闫蓉等. 多轴加工非线性误差精确建模与姿态补偿, 中国机械工程, 2010, 21(23): 2843-2847.

4、多轴数控加工软件开发与实施效果



4、多轴数控加工软件开发与实施效果

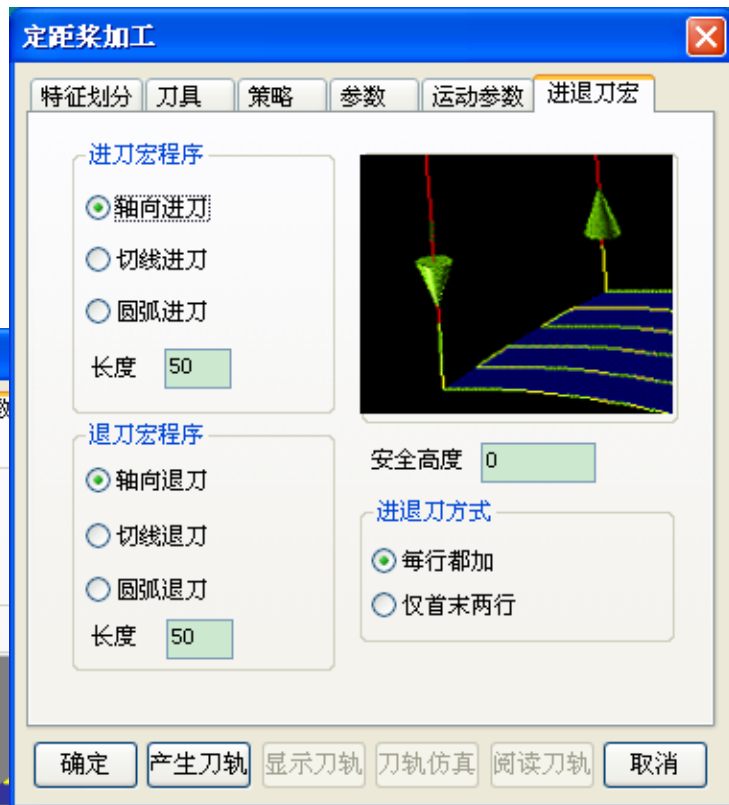
- 树视管理



4、多轴数控加工软件开发与实施效果



4、多轴数控加工软件开发与实施效果



4、多轴数控加工软件开发与实施效果

➤ 软件著作权:

- ✓ 华中螺旋桨加工系统软件[简称: **HCNC-NERP**] **V1.0**, 证书号: 软著登字**2011SR014334**号, 著作权人: 华中科技大学;
- ✓ 华中复杂拼缝激光焊接自动编程系统[简称: **HCNC-LaserWelding**] **V1.0**, 证书号: 软著登字**2010SR014077**号, 著作权人: 华中科技大学;
- ✓ 华中六轴联动砂带磨削自动编程系统软件[简称: **HCNC-BeltGrinding**] **V1.0**, 证书号: 软著登字**2010SR023804**号, 著作权人: 华中科技大学;

4、多轴数控加工软件开发与实施效果

共加工了四个型号的产品。

型号	直径（mm）	叶片数量	重量（kg）	精度等级
ZL600-29A	6600	5	29025	1级
ZL500-77	5650	5	17214	1级
ZL600-33	6600	5	25400	1级
ZL600-37	6450	5	27711.5	1级



ZL500-77



ZL600-33

4、多轴数控加工软件开发与实施效果

在大型汽轮机叶片和核电叶片的磨削加工中进行了应用，并已经投入生产。



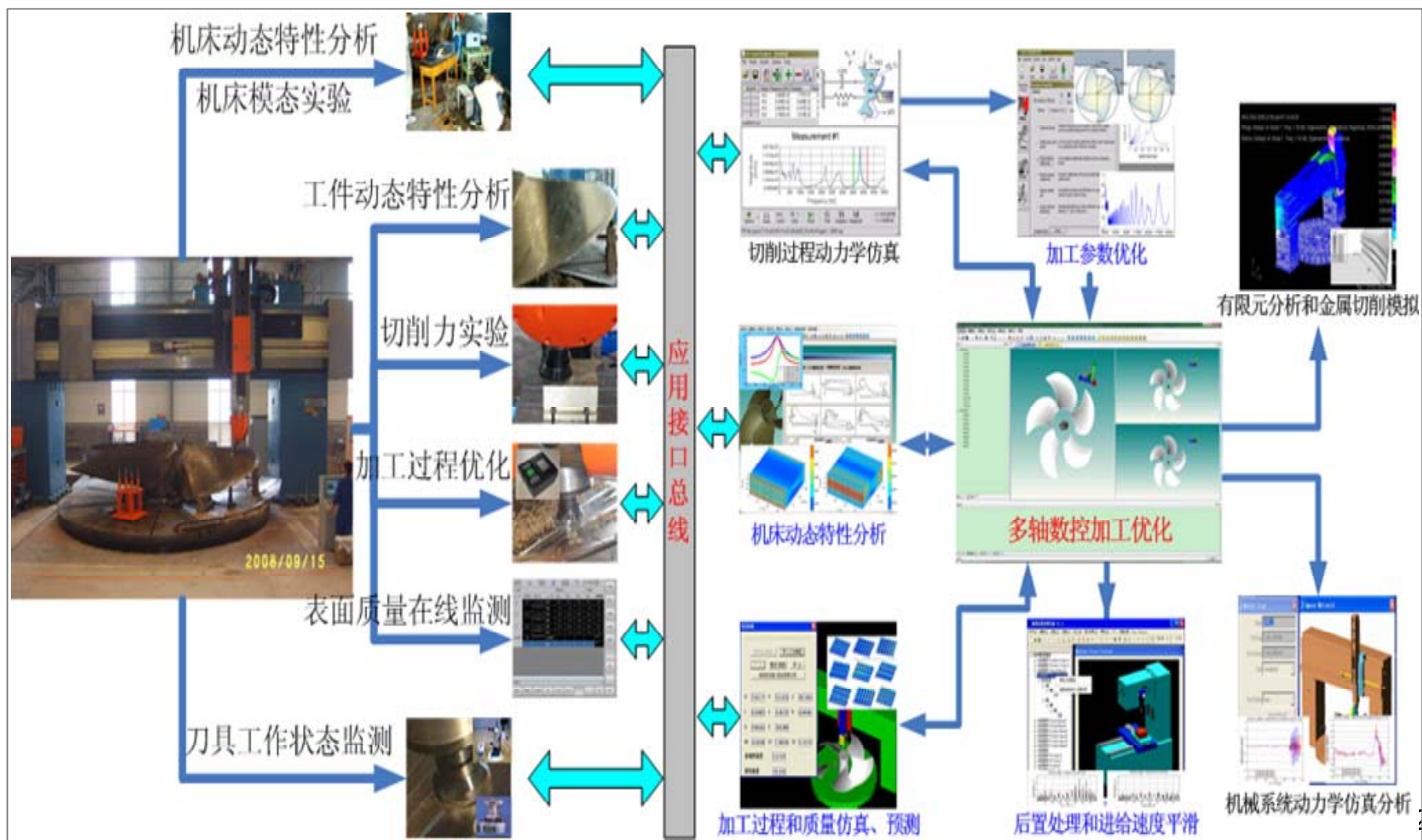
905核电叶片



40英寸叶片

5、主要研究特色

基于几何及物理混合约束的多轴数控加工优化



5、主要研究特色



- ✓ 973课题，高速数控机床动态行为演变及其高精度控制（2005CB724101）；
- ✓ 重点基金项目，大型复杂曲面零件的数字化设计-加工-测量一体化理论与技术（50835004）；
- ✓ 863目标导向项目，大型复杂曲面薄壁类零件高性能多轴数控加工与仿真优化（2009AA04Z149）；

内容提纲

一、研究背景

二、主要研究进展与成果

三、国家数控系统工程技术研究中心简介



工程中心发展历程

1999年

科技部批准建立

2003年

通过验收，评为优秀

2007年

评估为优秀，获滚动再建设支持

2008年

工程中心的产业化基地--华中数控，获
全国首批92家创新型企业之一

2011年

华中数控创业板上市

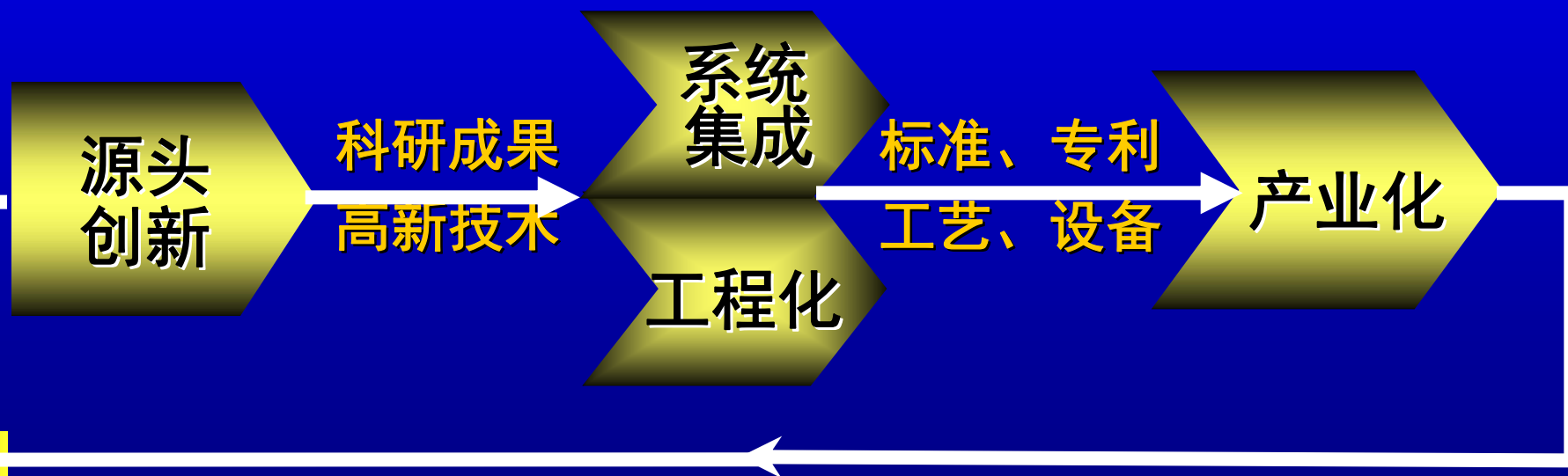
0100010001001000100101010000





工程中心定位

面向 装备制造业国家需求和国际数控技术前沿
开展 应用研究开发及技术转化



构建完整的创新链体系



牵头承担国家科技重大（04）专项数控专项情况

序号	课题名称	课题编号
1	高档数控系统系统关键共性技术创新平台	2010ZX04017-011
2	开放式全数字中高档数控装置	2009ZX04009-011
3	全数字驱动装置、伺服电机和主轴电机	2009ZX04010-011
4	高性能复杂薄壁类零件多轴联动加工技术	2009ZX04014-052
5	数控系统可靠性技术及重型机床运行可靠性研究	2009ZX04014-013
6	重型机床动态综合补偿技术	2009ZX04014-024
7	基于多种国产CPU芯片的跨平台中高档数控装置	2009ZX04009-021
8	内禀矫顽力稀土永磁大扭矩力矩电机及驱动装置	2009ZX04010-032

01000100010010001001001010000



承担国家基础研究重大项目

在研主要基础性项目

01000100010010001001010000

序号	项目类别	项目名称
1	军口973国家重大	XXXXXXXXX焊接控制规律
2	国家973项目	高速数控机床动态行为演变及其高精度控制
4	国防预研	XXXXXXXXX复合焊接技术
6	国家863计划	大型复杂曲面薄壁类零件高性能多轴数控加工与仿真优化
7	国基金	高速数控机床固定结合部单元动力学高精度建模方法研究
8	国基金	基于混合约束的大型复杂曲面类零件多轴数控加工轨迹优化技术
9	国基金	基于机床刚度特性的大型复杂曲面多轴数控加工运动规划
10	国基金	数控机床高速高精运动的傅立叶频域控制方法研究
11	国基金	基于“自激励”的数控装备实验模态分析新方法研究
12	国基金	基于动刚度的多轴数控加工过程稳定性分析与运动规划
13	国基金	激光焊接中微细焊缝中心与法矢检测方法
14	国基金	激光焊接中微细焊缝中心与法矢检测方法



标志性成果

- 1、华中8型高档数控系统
- 2、交流伺服驱动和伺服电机技术
- 3、面向国家重大需求的高档数控机床
- 4、数控系统产业化关键技术与推广应用

01000100010010001001001010000





标志性成果一：华中8型高档数控系统

高档数控系统关键技术取得突破，开发了华中8型系列化高档数控系统，打破国外封锁

0100010001001000100101010000





配套应用10类29多台04专项支持的高档数控机床，包括：

- 高速/精密车削中心
- 高速/精密立式加工中心
- 高速/精密卧式加工中心
- 铣车复合加工中心、
- 数控砂带磨
- 拉刀刃磨床
- 数控工具磨床。

占当前04专项支持的高档数控机床（配国产系统）的80%

01000100010010001001001010000



功能	Simens 840D	Fanuc 30i	华中8型
最大通道数	10	10	8
最大控制轴数	32	40	64
最大联动轴数(每通道)	24	24	8
最小插补周期	0.25ms	0.25ms	0.1ms
系统分辨率	1nm	1nm	1nm
最大运动速度	200m/min	1000m/min	200m/min
总线接口	Profibus	FSSB	NCUC-Bus
小线段、多项式、样条插补	有	有	有
车铣复合	有	有	有
加工过程实时仿真	无	有	实体+线框
五轴RTCP功能	有	有	有
五轴倾斜面功能	有	有	有
空间误差补偿	有	有	有
恒切削力自适应控制	无	无	有
二次开发接口	有	有	有

成绩：华中8型主要功能指标和国际先进系统基本相当



科学技术奖励证书

获奖项目：高档数控系统关键技术研发与推广应用

奖励类别：科技进步奖

获奖等级：壹等奖

获奖单位：华中科技大学

证书编号：2008J-251-1-027-012-D01



二〇〇八年十二月

科学技术奖励证书

获奖项目：高性能数控系统产业化

奖励类别：科技进步奖

获奖等级：壹等奖

获奖单位：华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心

证书编号：2009J-139-1-010-001-02



二〇〇九年十二月

湖北省科技进步一等奖、武汉市科技进步一等奖



光荣入选中华人民共和国建国六十周年成就展

01000100010010001001010000





标志性成果二：交流伺服驱动及伺服电机技术

开发了系列化全数字交流伺服驱动装置

25A、50A、75A、100A、150A、200A、450A

可控制永磁同步、普通主轴、电主轴、直线电机、力矩电机



01000100010010001001010000





伺服电机 — GK8系列伺服进给电机，2000个规格



20机座



30机座



40机座



48机座



55机座



100机座



80机座



71机座



63机座



132机座



160机座



180机座

0100010001001000100101010000



GM8和H-GM7伺服主轴电机，1-400KW



100机座



132机座



180机座

01000100010010001001010000





GZ8系列直驱伺服电机，500-30000NM



100机座



160机座



225机座



315机座



450机座



560机座

01000100010010001001010000



获奖项目：高性能全数字交流伺服驱动和电机关键技术及应用

获奖单位：武汉华中数控股份有限公司
(第2完成单位)

奖励等级：科学技术进步奖一等奖

奖励日期：2010年01月

证书号：2009-178

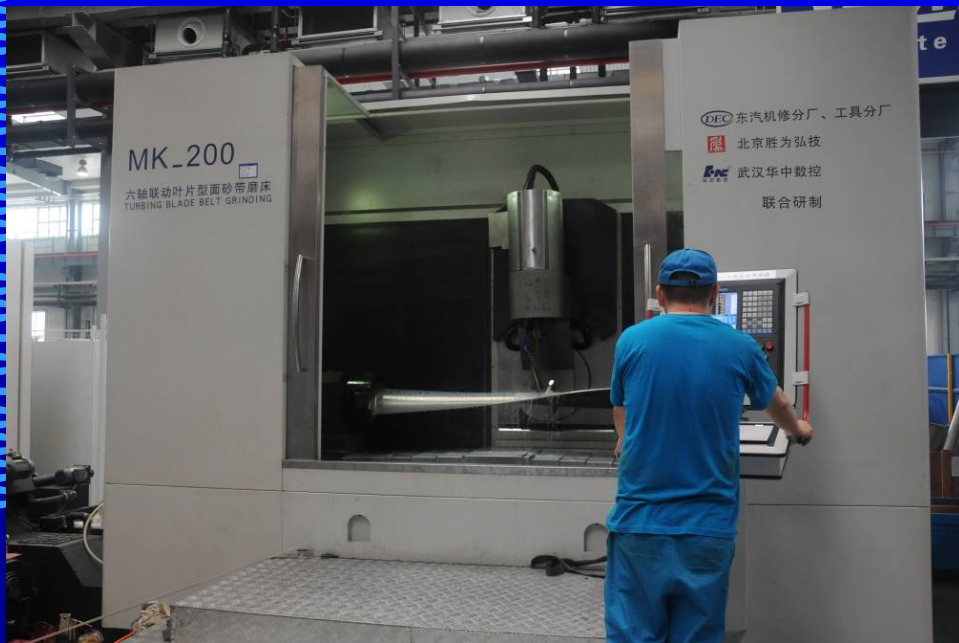




标志性成果三：面向国家重大需求，研制高档数控装备

面向国家重大需求，开发高档数控设备，打破封锁，填补空白

010001000100010001000100010000



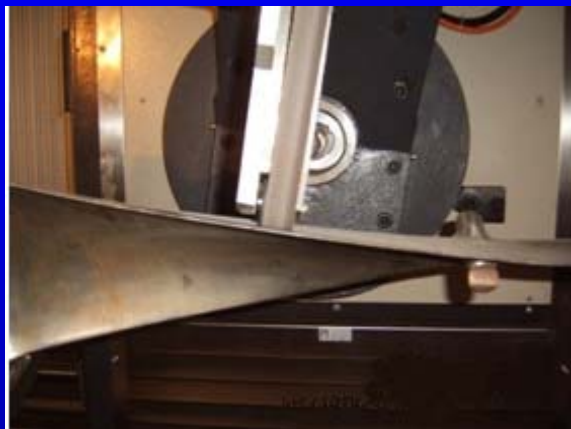
核电叶片加工九轴六联动数控砂带磨床



重型螺旋桨加工七轴五联动车铣复合机床

大型叶片六轴联动数控砂带磨削加工

截止到2011年4月，累计加工905、40英寸、48英寸、57英寸等规格的核电叶片4200片，价值33240万元的叶片。



据核电低压转子装机测试反映，叶片一致性非常好，低压转子在不经配重调整的情况下，高速动平衡效果已经优于法国阿尔斯通制造的转子。



6 April 2012

大型螺旋桨多轴联动数控加工

在镇江中船瓦锡兰螺旋桨有限公司加工了多种型号的螺旋桨产品，产值约2034万元。达到高精度的1级和特高精度的S级。

型号	直径 mm	旋向	叶片 数量	重量 kg	精度 等级
ZL600-29A	6600	右	5	29025	1级
ZL500-77	5650	右	5	17214	1级
ZL600-33	6600	右	5	25400	1级
ZL600-37	6450	右	5	27711. 5	1级
600-51	6000	左	5	18000	1级
700-26	7100	右	4	27001	1级
600-48	6000	右	4	16525	1级
700-24C	7000	右	4	24286	1级
600-49	6120	右	4	14350	1级
600-53	6050	右	4	14610	S级



加工的成品桨在2010年
上海世界博览会上展出



标志性成果四：数控系统产业化关键技术和推广应用

控制轴数从2轴到8轴，满足用户从低端到高端的需求。

0100010001



占国产普及型数控系统国内市场30%以上



谢谢，
敬请批评指正！