



# 轮毂曲面机器人力控磨抛路径规划

学生：王逸潇 导师：费燕琼、丁烨

2020年1月



上海交通大學

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

- 1 选题背景及意义
- 2 研究方法思路
- 3 基于扫掠线的曲面分割
- 4 磨抛局部路径规划
- 5 间隔移动规划
- 6 磨抛工艺实验
- 7 总结与展望



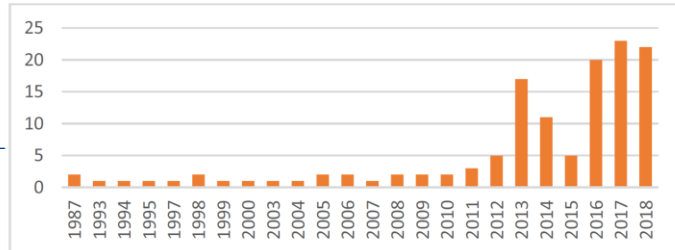
# 1 选题背景及意义



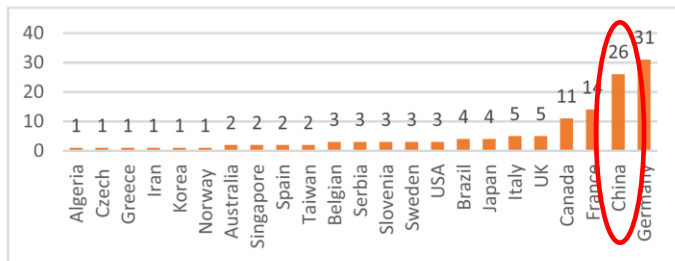


## 选题背景

- 智能制造、工业4.0的大背景下：机器人加工
- 学术界越来越关注机器人加工领域
- 机器人加工所涉及的领域颇广：铣削、切削、磨削
- 汽车轮毂磨抛现状：
  - 以人为主**：工作对象体积质量较大、任务复杂，难以直接应用工业机器人
  - 需求庞大**：数量大；人工成本高



(A) 机器人加工领域论文总数 (从1987年至2018年)



(B) 发表机器人加工领域论文最多的国家和地区

图1：机器人加工领域论文数量趋势图[1]

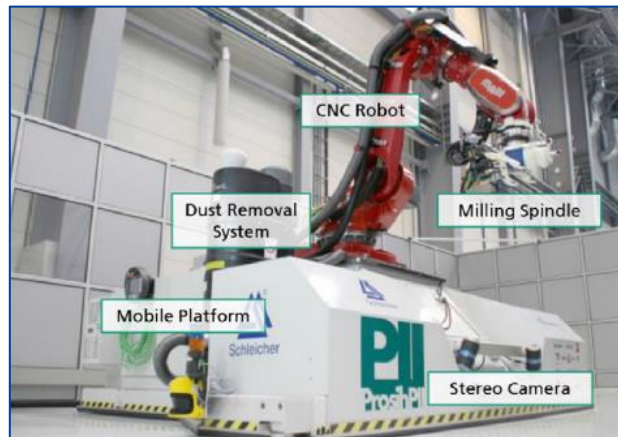


图2：铣削[2]

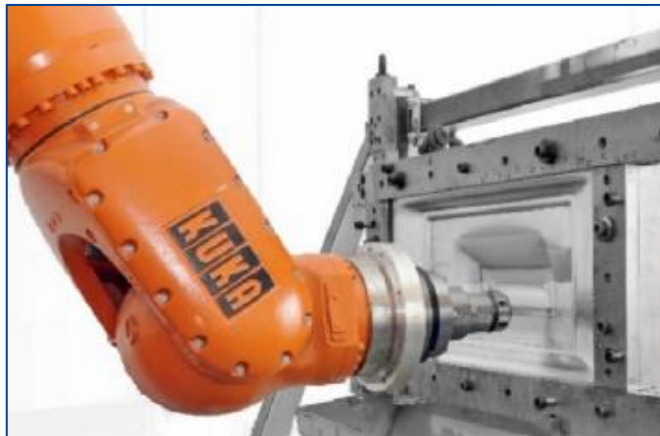


图3：增量式冲压成型[3]

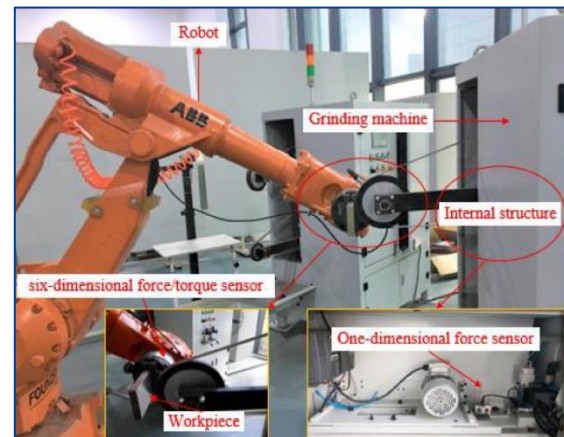


图4：磨削[4]

# 选题背景

## ▪ 轮毂曲面机器人力控磨抛

带磨抛 or 圆盘磨抛

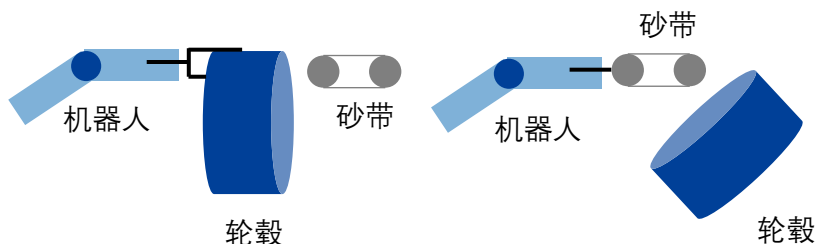
IF 带磨抛

轮毂、砂带体积质量大

导致

工作空间受限  
需考虑动力学

轮毂曲面复杂



轮毂

轮毂

图1: 两种机器人磨抛方式

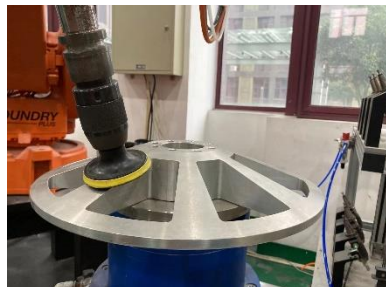
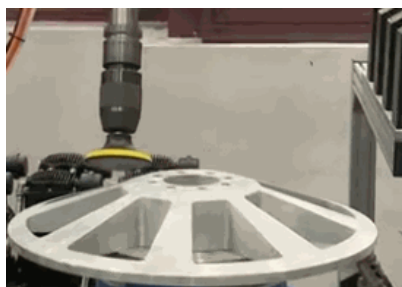
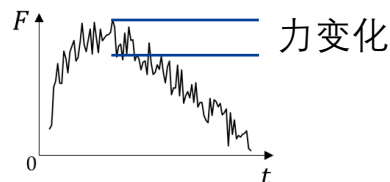


图2: 圆盘打磨 (左) 和抛光 (右)

位置控制 or 力控制

IF 位置控制

力频繁变化导致  
粗糙度变大[5]



磨粒损耗导致  
位置精度变低[6]

磨抛工具截面

原

损耗后

位置误差

示教耗时大, 且存在由装配误差、尺寸误差等  
导致的重复示教[7、8]

存在力过大导致的工具损坏[9]



# 选题意义



## 重要性

路径规划

直接影响

是否能完整地磨抛完待磨曲面

磨抛后表面的残余待磨抛量

## 现状

缺乏磨抛复杂曲面的全覆盖路径规划算法

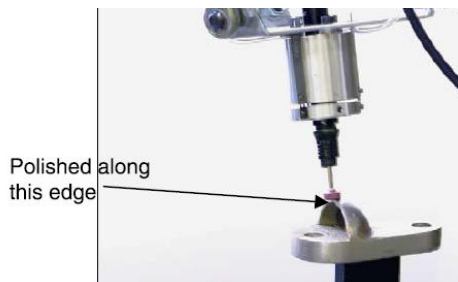


图1: 抛光边缘[10]

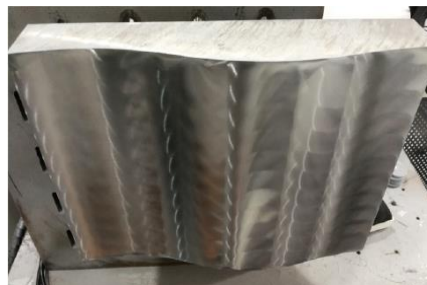


图2: 磨抛简单曲面[11]



图3: 人为设计路径[12]

## 意义

全覆盖路径规划算法[13-17]  
(Coverage path planning, CPP)

轮毂曲面机器人力控磨抛路径规划算法

磨抛力学模型[18、19]

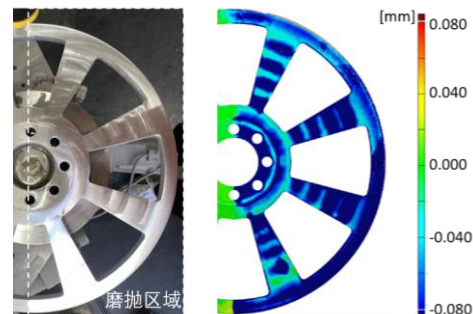


图4: 磨抛结果

## 2 研究方法思路







# 研究方法思路



## 路径种类

常见的  
路径种类

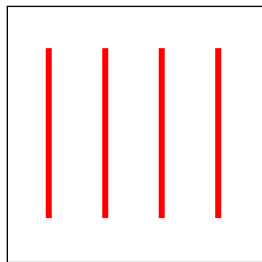


图1: 平行线簇路径

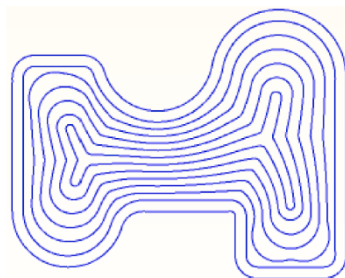


图2: 边界路径[19]

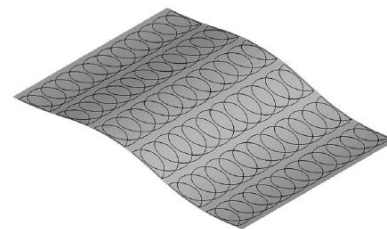


图3: 人为设计的摆线路径[11、20]

选择  
原因

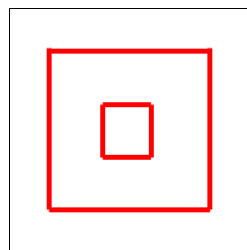
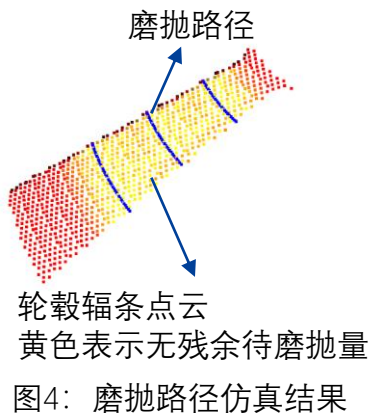
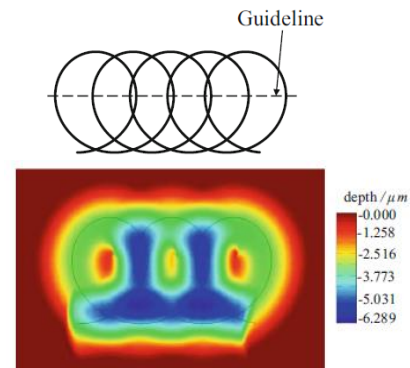


图5: 磨抛边界路径示例





# 研究方法思路

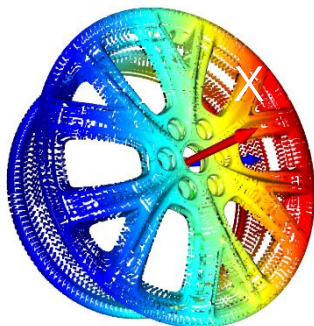
## 基于扫掠线的曲面分割

### 目的

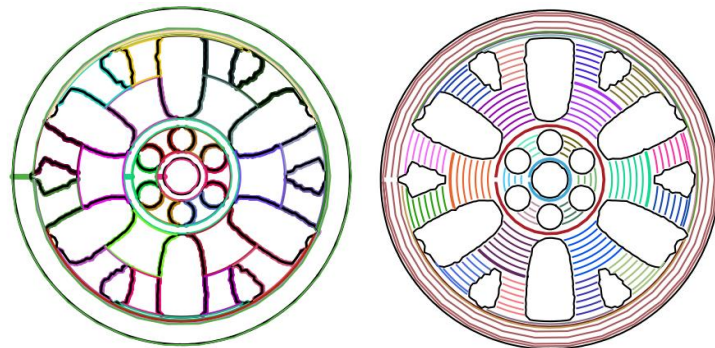
- 减少磨抛工具抬起次数
- 便于路径规划

子曲面  
扫掠线簇连续

输入



输出



研究方法思路

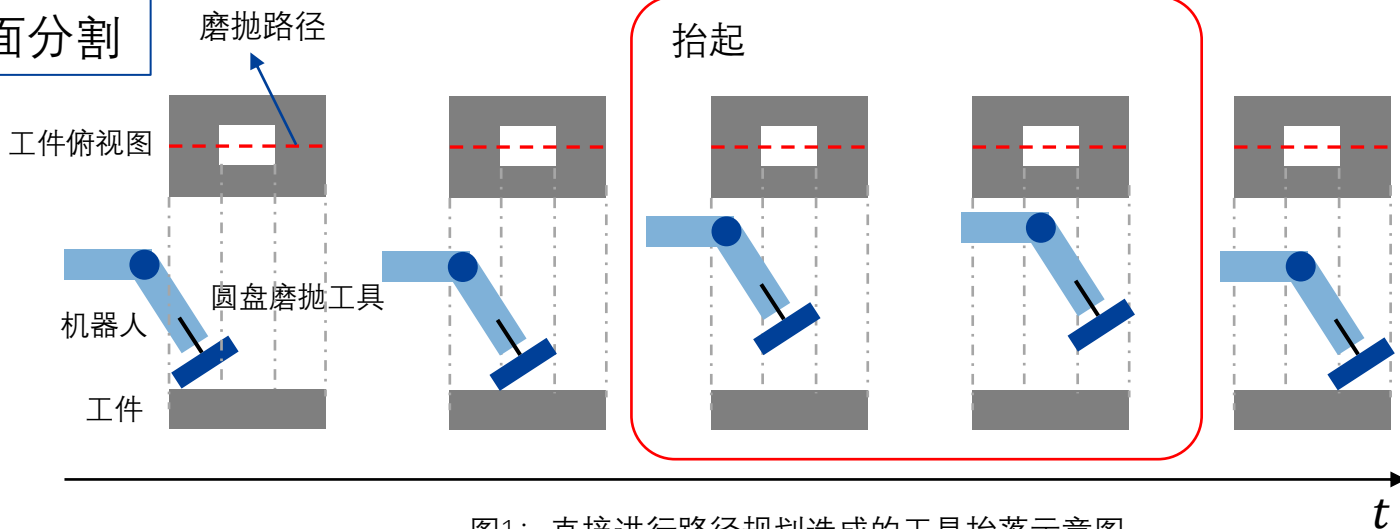


图1: 直接进行路径规划造成的工具抬落示意图

# 研究方法思路



## 磨抛局部路径规划

目的

子曲面各处的磨抛量达到预期

输入

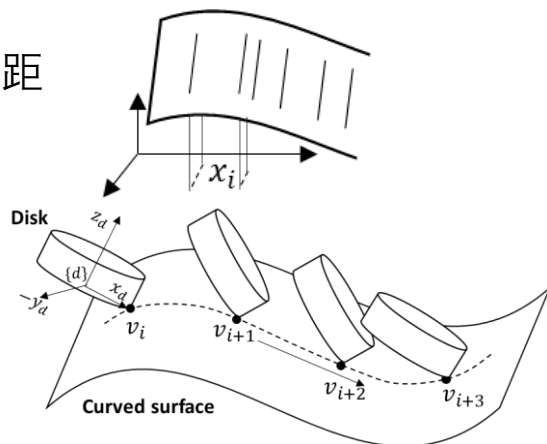
法向磨抛力大小

输出

平行路径间距

进给速度

磨抛力学模型



研究方法思路

## 磨抛间隔移动

目的

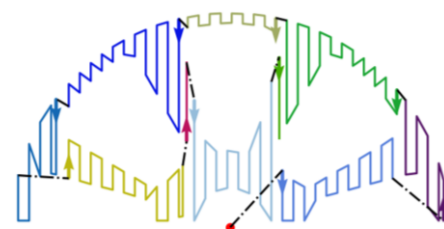
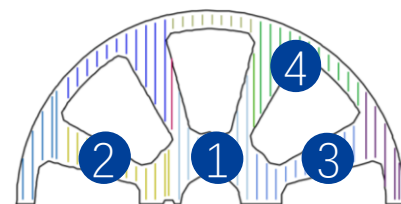
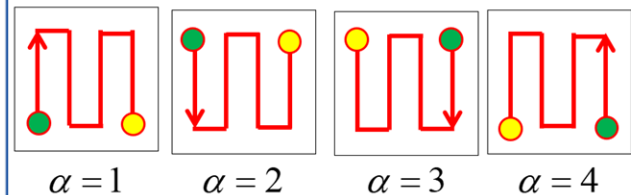
输入

已规划好的局部路径

输出

局部路径种类及磨抛次序

局部路径种类



研究方法思路

# 研究方法思路

## 仿真环境及工艺实验

仿真环境

工件点云

磨抛线段

进给速度

法向磨抛力等工艺参数

磨抛力学

工件上各点的材料去除深度

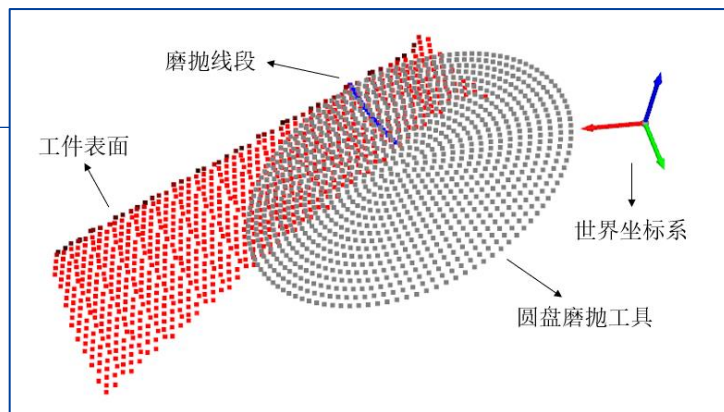
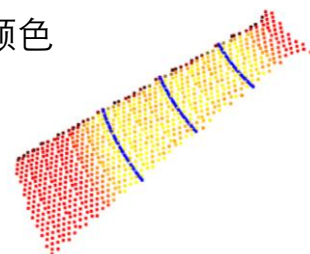


图1：仿真环境示意图

颜色



坐标

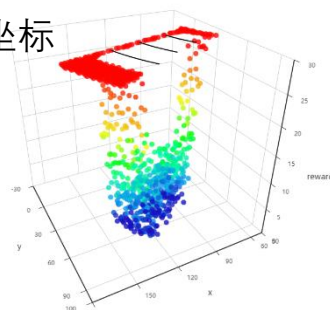


图2：两种残余待磨抛量的表示

工艺实验

研究曲面分割及间隔移动规划效果

研究局部路径规划效果

研究整体轮毂磨抛效果

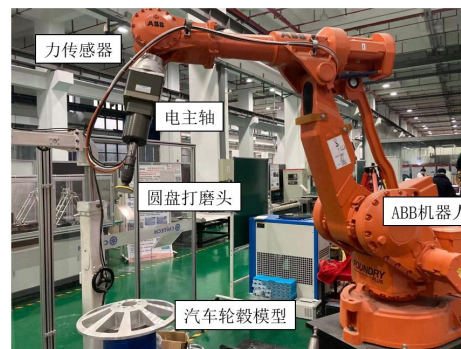


图3：工艺实验平台

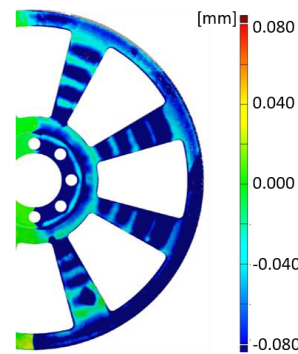


图4：材料去除深度

研究方法思路

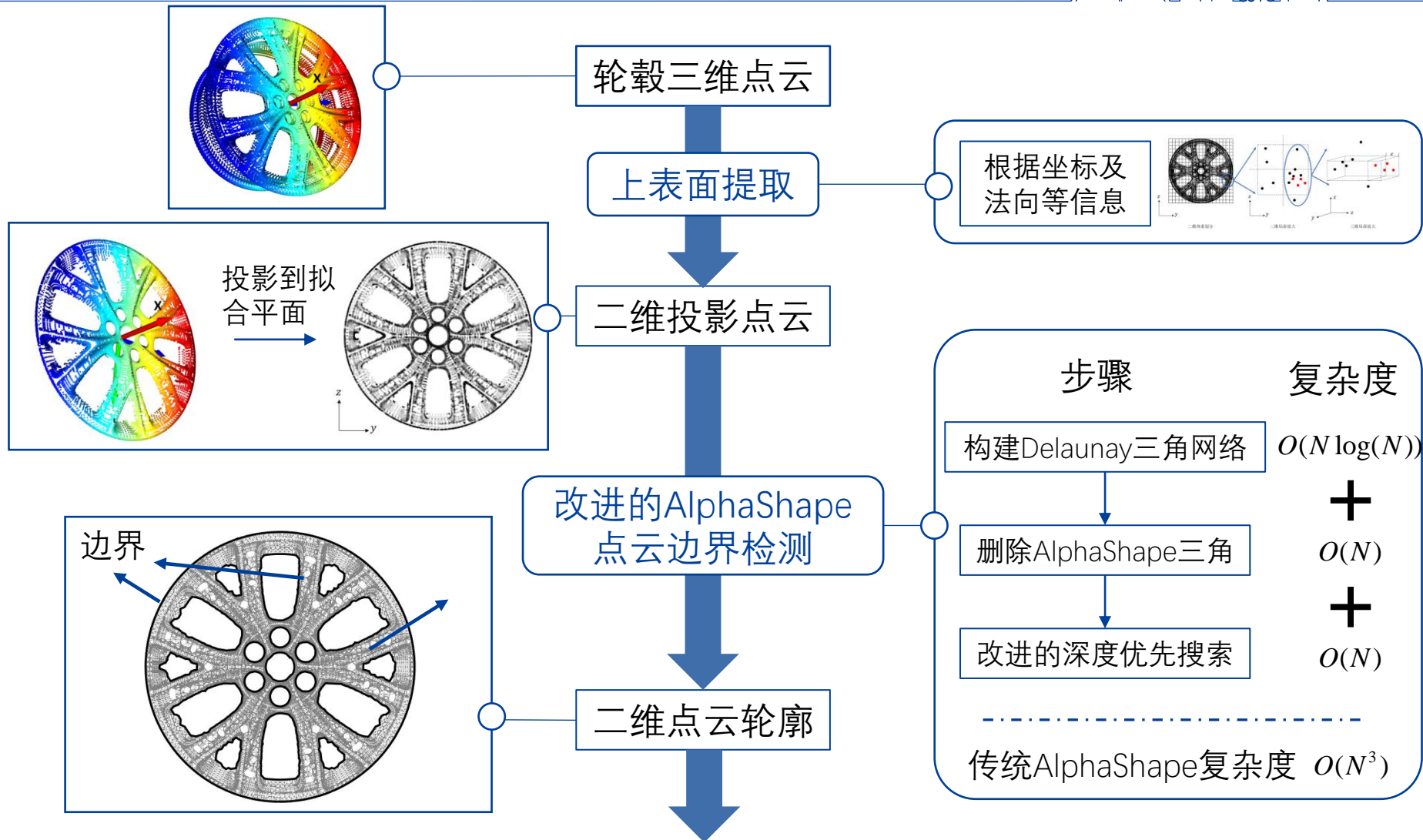
3

基于扫掠线的曲面分割





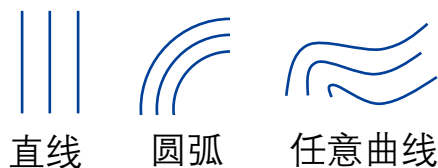
# 上表面提取&点云边界检测



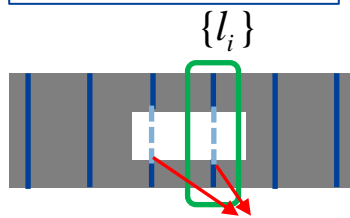
# 基于扫掠线的数值曲面分割算法

注意：扫掠线与磨抛路径种类一致

确定扫掠线种类

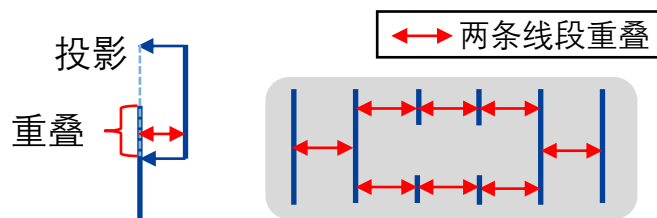


扫过目标区域



扫掠线被边界阻断形成线段

检测扫掠线段重叠性



确定子曲面边界

根据重叠性聚类扫掠线段

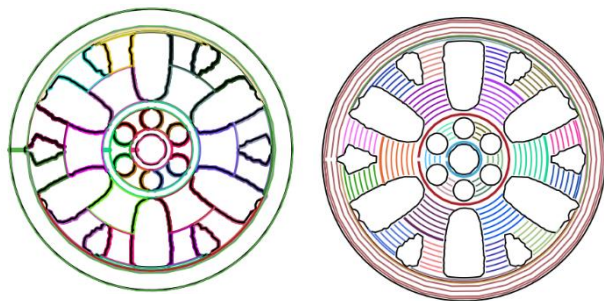
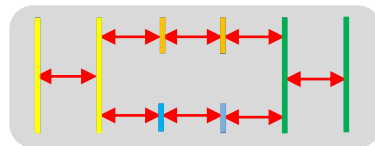
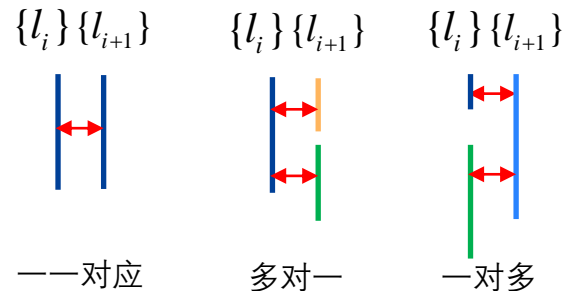


图1：以圆弧为扫掠线的结果。  
子曲面内的圆弧均连续。



对 $\{l_{i+1}\}$ 的几种重叠情况



# 算法对比及实验结果



- 改进的AlphaShape边界检测算法**降低了算法复杂度**

$$O(N^3) \longrightarrow O(N \log(N))$$

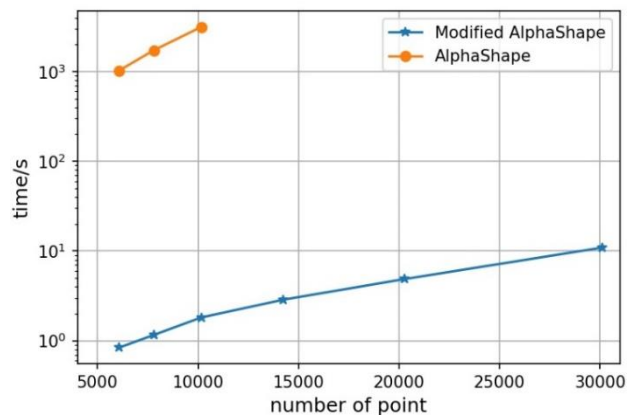


图1：改进前后边界检测耗时对比图

降采样体素大小/mm	点云数量	原AlphaShape耗时/s	改进后AlphaShape耗时/s
6	6082	0.84	1028.52
5	7795	1.16	1723.58
4	10168	1.82	3143.61
3	14247	2.87	>5000
2	20270	4.87	>5000
1	30118	10.93	>5000

表1：改进前后边界检测耗时对比表

- 基于扫掠线的数值曲面分割算法实验结果

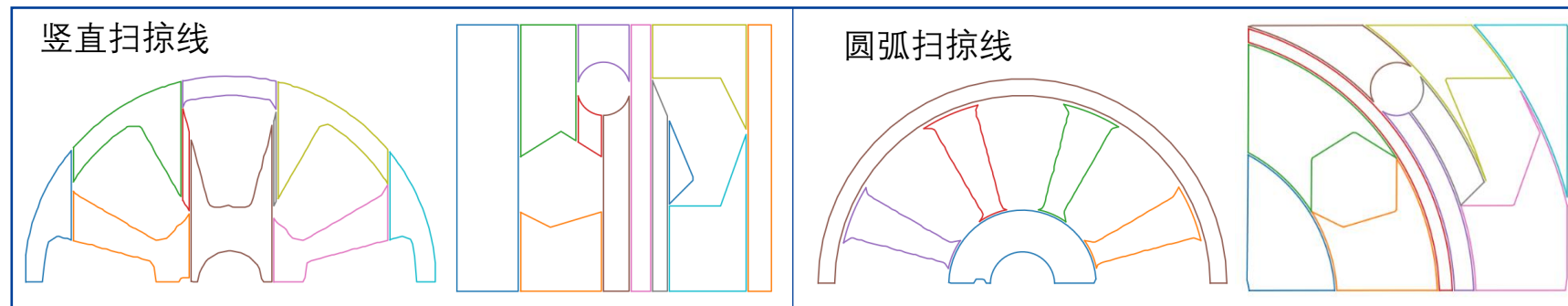


图2：曲面分割示例

## 4 磨抛局部路径规划





# 问题描述

$$\text{残余待磨抛量} = \text{预期磨抛量} - \text{材料去除深度}$$

- 目的：使得子曲面磨抛后的残余待磨抛量达到预期，并限制过磨量。
- 规划变量：磨抛路径的进给速度和路径间距

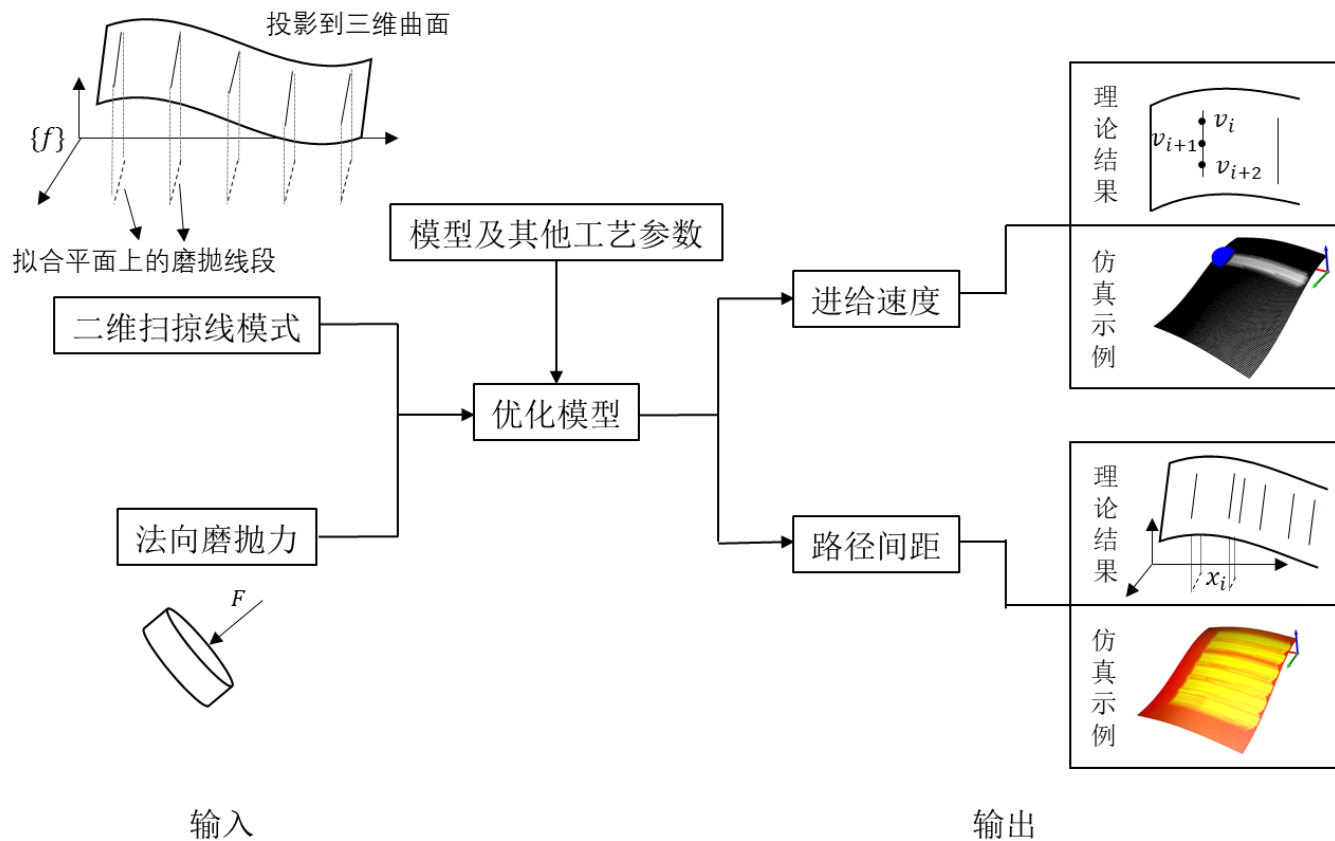


图1：磨抛局部路径规划输入输出示意图

# 磨抛力学模型

- 目的：计算工件各点的单位时间材料去除深度

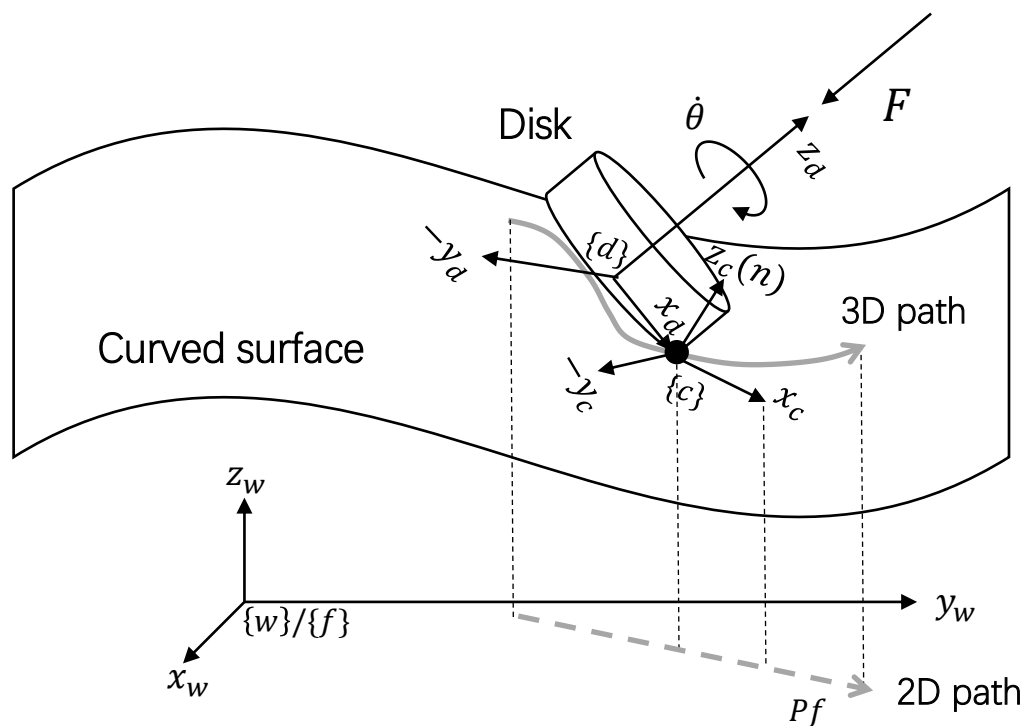


图1：圆盘磨抛几何模型 ( $F = 0$ )

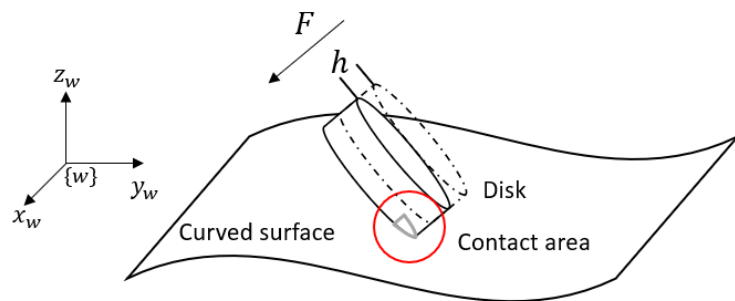


图2：施加法向磨抛力后的几何变化

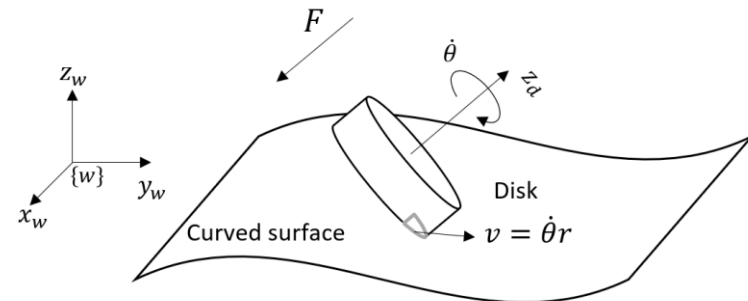


图3：施加法向磨抛力后的材料去除

# 磨抛力学模型

## 接触力学

### 理论

法向磨抛力

$$F = \int_S E (h(s) / H)^\beta ds$$

接触深度

接触区域

离散并化简

$$F = \sum_{i=1}^N \max(0, h_i^0 + h)^\beta W_i = f(h)$$

### 应用

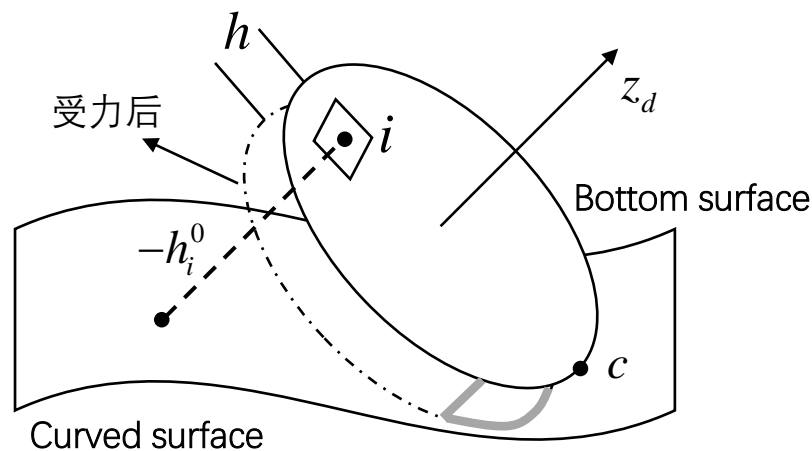
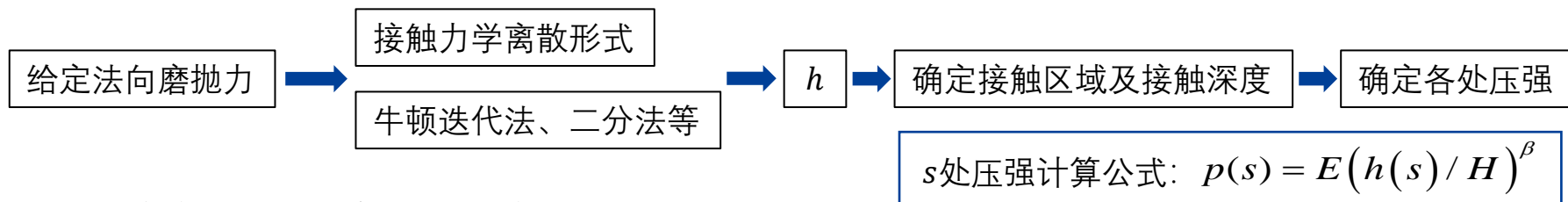


图1: 接触力学离散形式示意图

## 单位时间材料去除深度

$$d(s) = Kp(s)v(s)$$

# 进给速度规划

## 引言

三维磨抛线段

法向磨抛力

接触力学

单位时间材料去除深度  $w_{i,j}$

✗ 某处的驻留时间  $\delta t_i$

残余待磨抛量 = 预期磨抛量 - 材料去除深度

## 优化模型

磨抛总量最大

$$\min - \sum_i \delta t_i \sum_j w_{i,j}$$

$$s.t. \sum_i w_{i,j} \delta t_i \leq Re_j, \forall j \in \{0, 1, 2, \dots, m\}$$

最大磨抛量

$$\delta t_i \geq \frac{\delta s}{V_{max}}, \forall i \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$$

最大进给速度

$$-A_{max} \leq \frac{\delta t_{i-1} - \delta t_{i+1}}{2\delta t_i^3} \delta s \leq A_{max}, \forall i \in \{1, 2, 3, \dots, n-1\}$$

$$-A_{max} \leq \frac{\delta t_0 - \delta t_1}{\delta t_i^3} \delta s \leq A_{max}$$

$$-A_{max} \leq \frac{\delta t_{n-1} - \delta t_n}{\delta t_i^3} \delta s \leq A_{max}$$

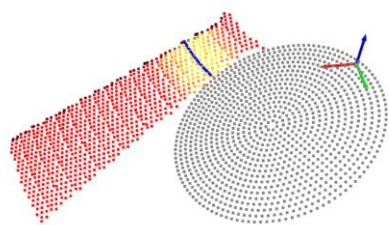
最大进给加速度



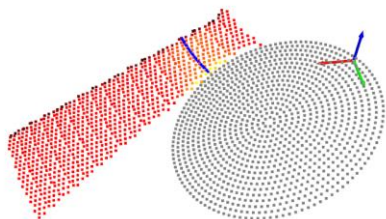
# 进给速度规划实验



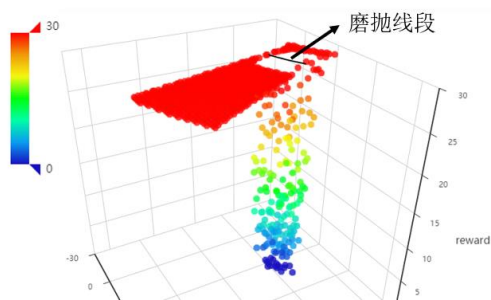
- **恒定**进给速度（对照组）和**变**进给速度（实验组）



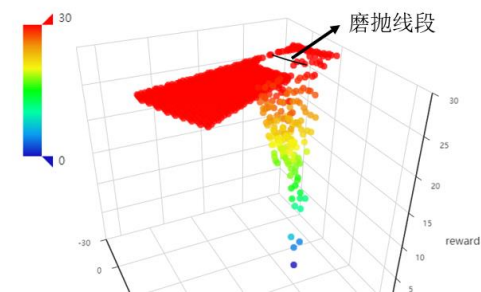
实验组



对照组

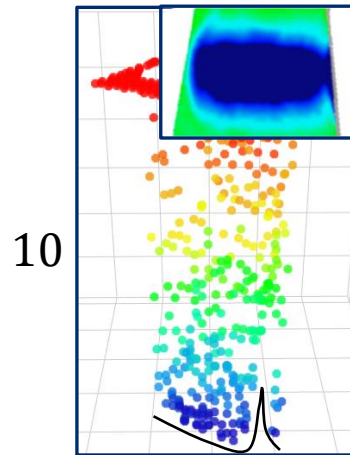
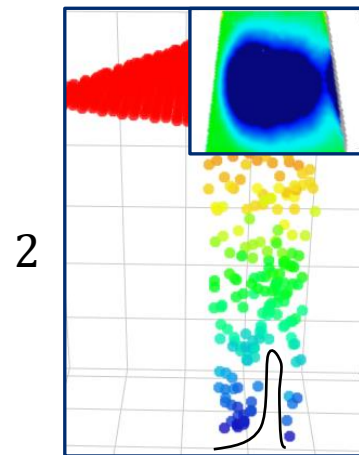
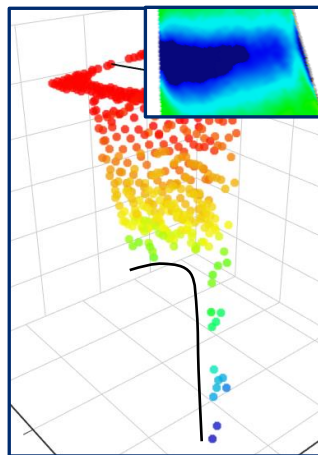
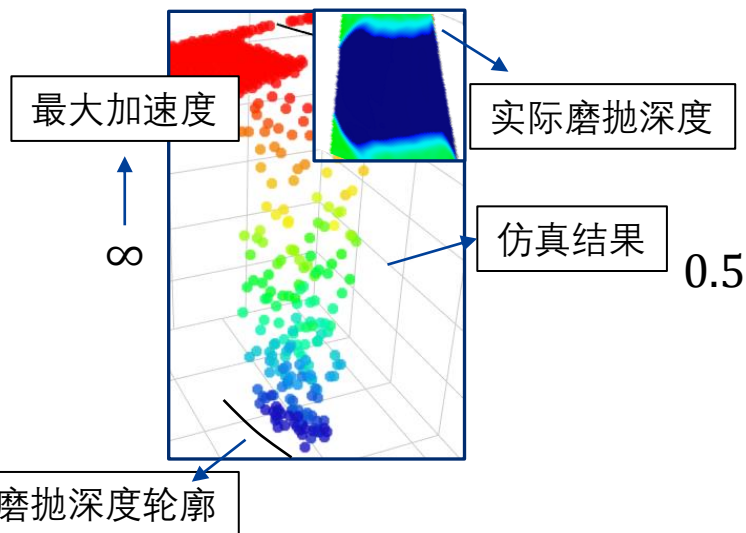


实验组



对照组

- 加速度约束对磨抛效果的影响



# 路径间距规划

- 目标：路径间的区域的平均残余待磨抛量最小
- 贪婪算法

已规划好第 $i$ 条磨抛线段的进给速度

更新工件点云的残余待磨抛量

以第 $i$ 和 $i + 1$ 条路径间的区域的平均残余待磨抛量最小为目标规划下一条磨抛线段位置

进给速度规划

- 全局算法

离散第0到 $n$ 所有磨抛线段

以第0和 $n$ 条路径间的区域的平均残余待磨抛量最小为目标规划所有磨抛线段位置

进给速度规划

路径间的区域内点云

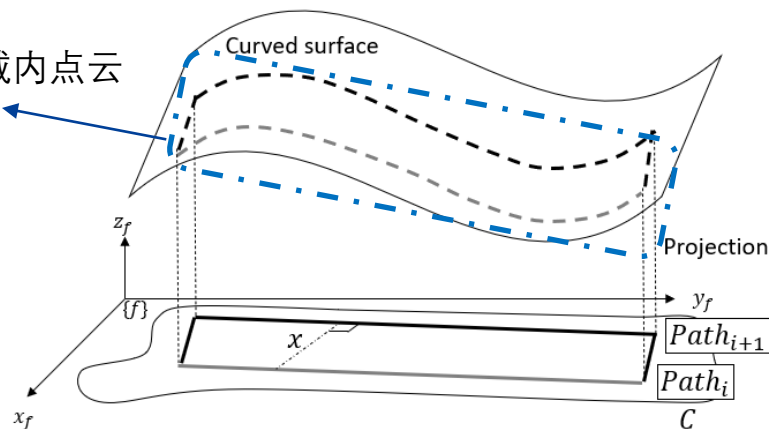
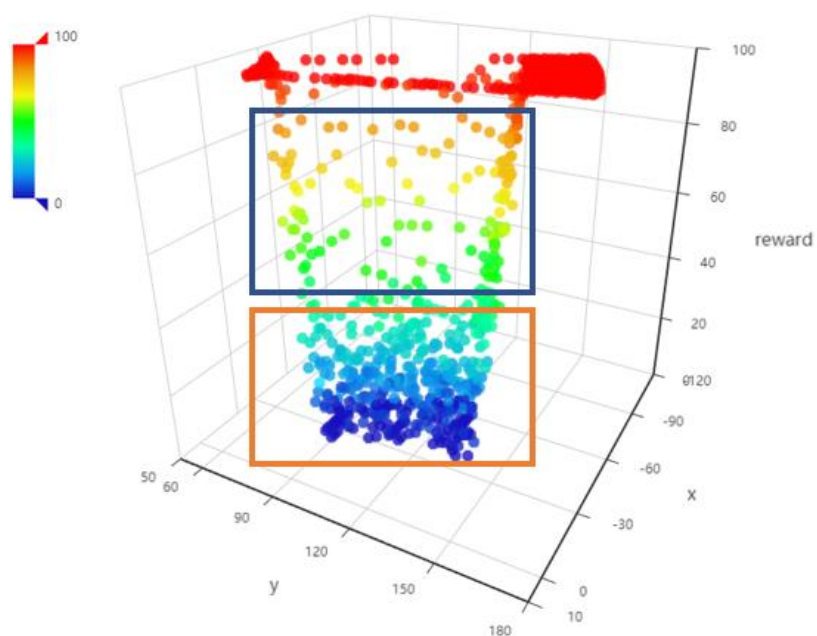


图1：路径间距  $x$  示意图

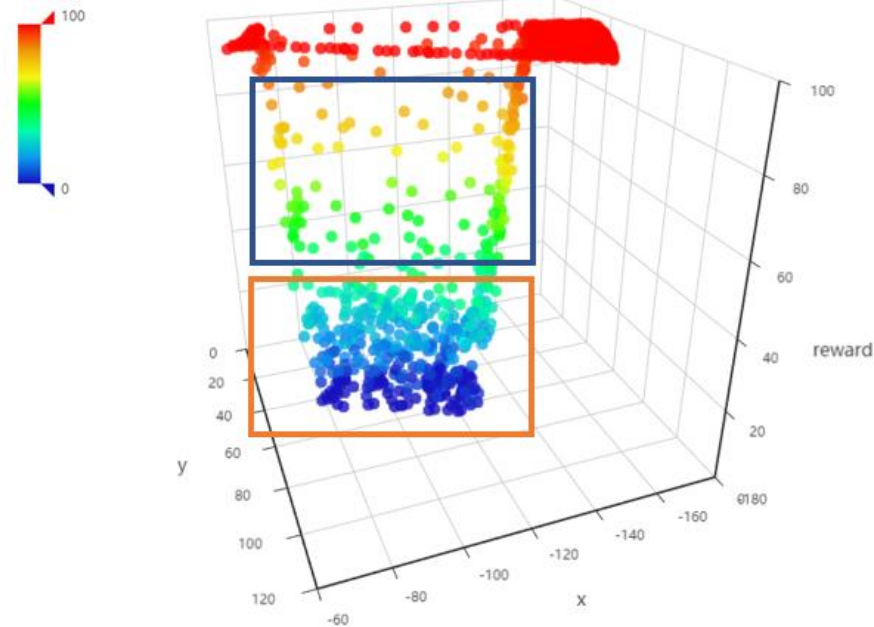
# 路径间距规划实验



- 实验目的：研究贪婪算法和全局算法对磨抛效果的影响



贪婪算法



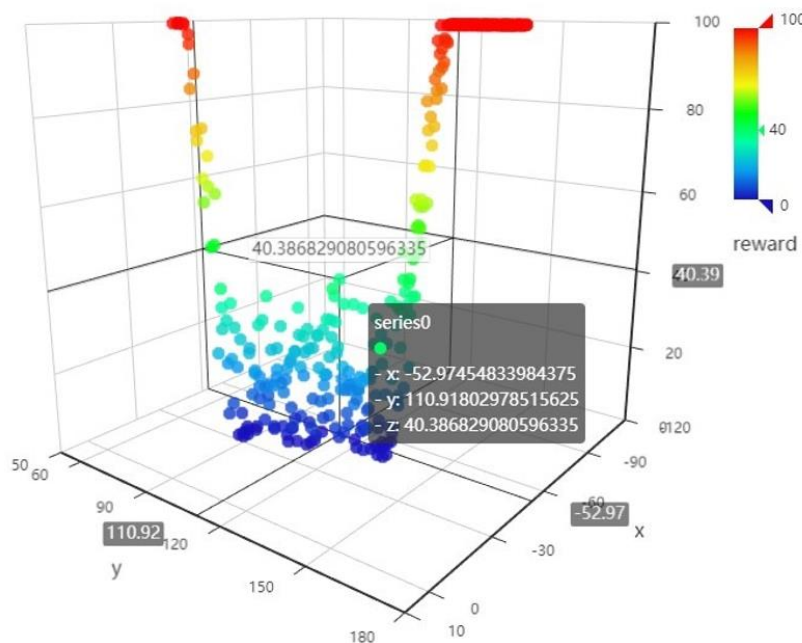
全局算法

图1：路径间距规划后**辐条点云**残余待磨抛量仿真结果

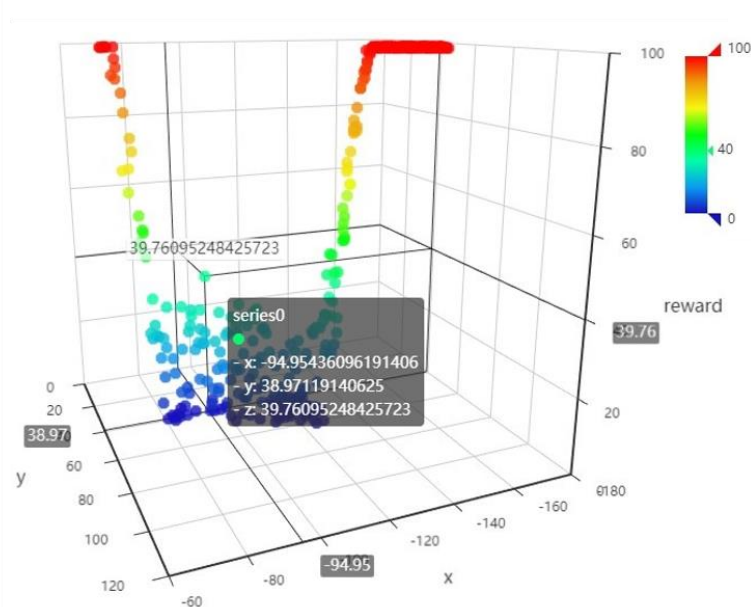
# 路径间距规划实验



- 实验目的：研究贪婪算法和全局算法对磨抛效果的影响



贪婪算法



全局算法

图1：路径间距规划后**辐条轴线附近点云**残余待磨抛量仿真结果



# 路径间距规划实验



- 实验目的：研究贪婪算法和全局算法对磨抛效果的影响

表1：贪婪算法与全局算法仿真结果统计

局部路径规划策略---点云范围	残余待磨抛量均值( $\mu\text{m}$ )	残余待磨抛量标准差( $\mu\text{m}$ )
贪婪算法---路径区域	25.163	28.341
全局算法---路径区域	22.878	26.344
贪婪算法---轴线附近	14.069	11.221
全局算法---轴线附近	10.523	9.679

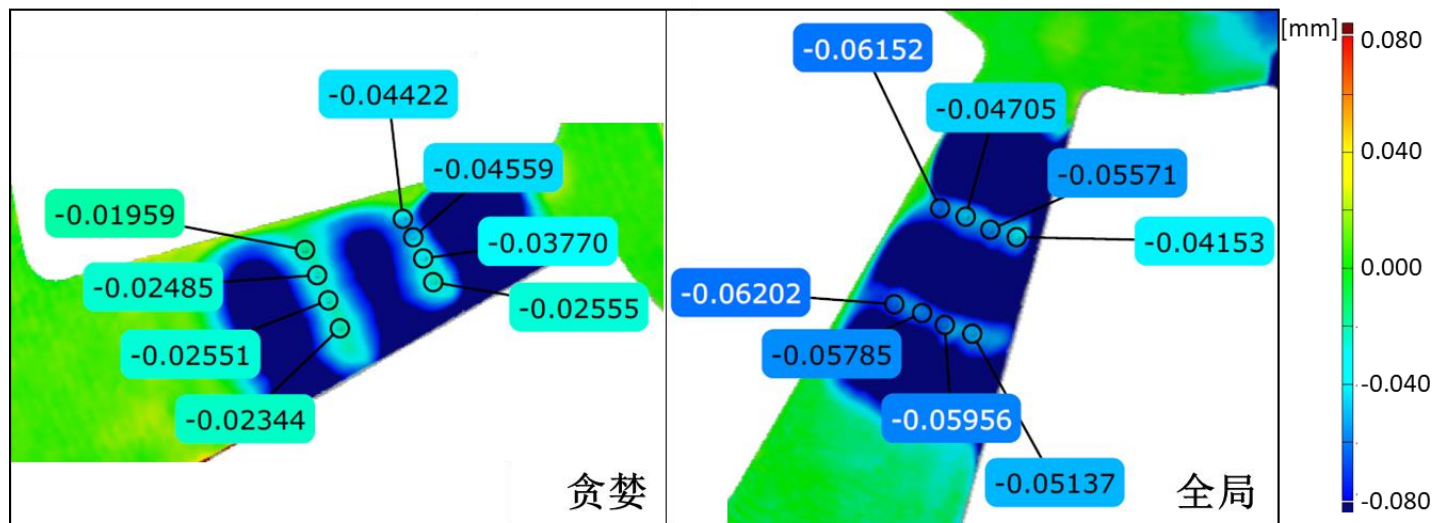


图1：三维扫描所得磨抛深度

5

间隔移动规划



# 问题描述

- 引言：由前两节可得子曲面及子曲面内的局部磨抛路径。本节规划磨抛工具从起始位置到各个子曲面的非磨抛的路径（磨抛间隔移动），以减少非磨抛耗时，提高磨抛效率。
- 输入输出示意图

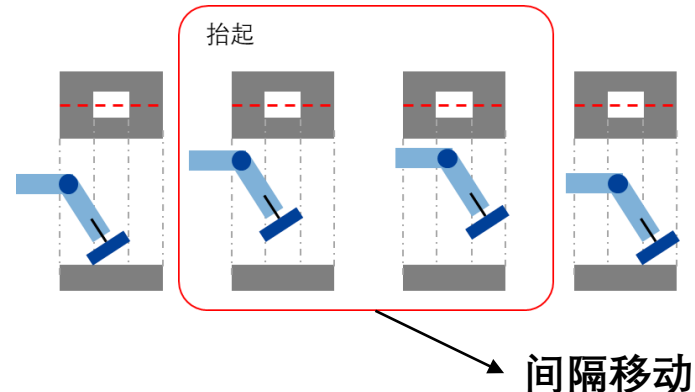


图1：间隔移动示例

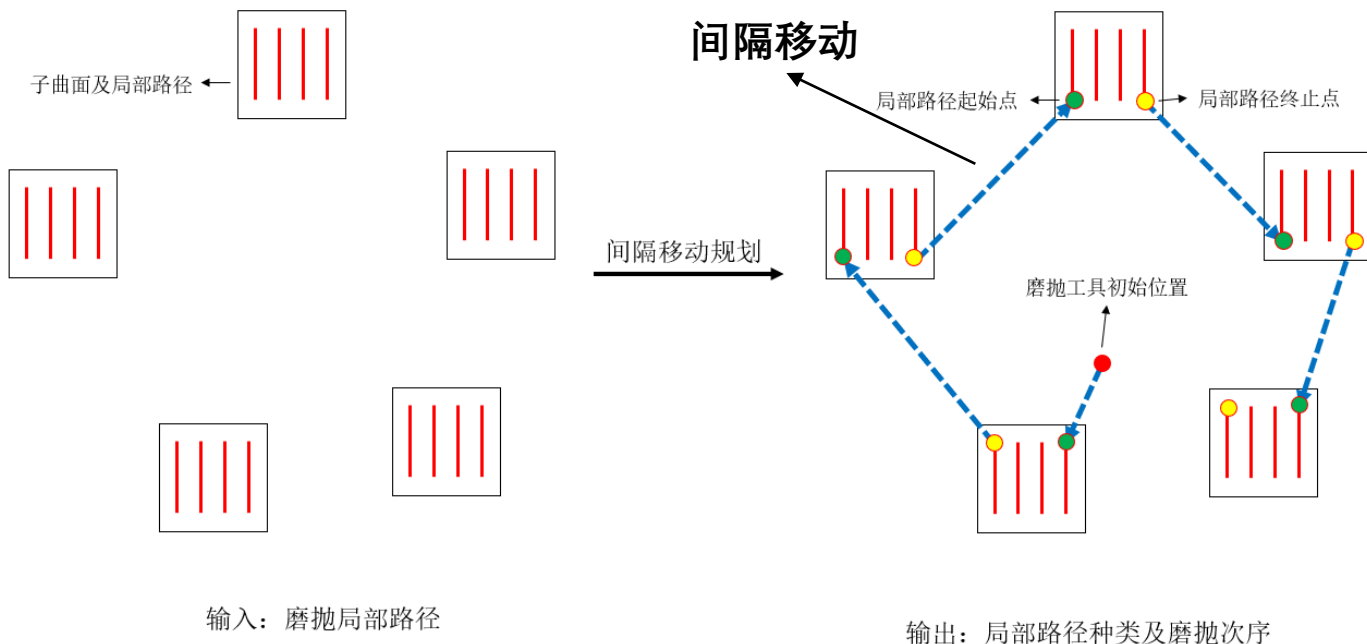


图2：间隔移动输入输出示意图

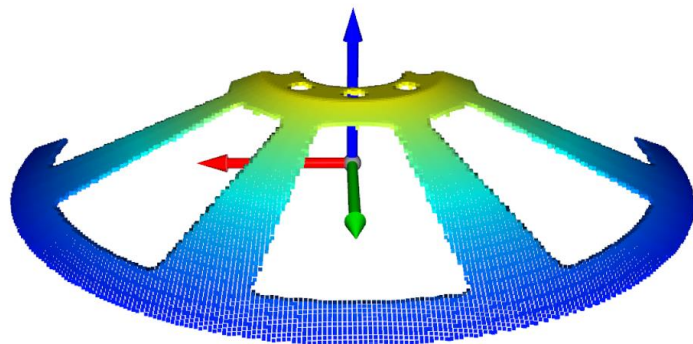
# 算法介绍及仿真实验

- 优化算法：LKH[21]+遗传算法[22]

$$\min_{\alpha_i \in \mathbb{Z}} TSP(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1})$$

$$s.t. \alpha_i \in \{1, 2, 3, 4\}, \forall i \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$$

- 仿真实验



轮毂模型点云

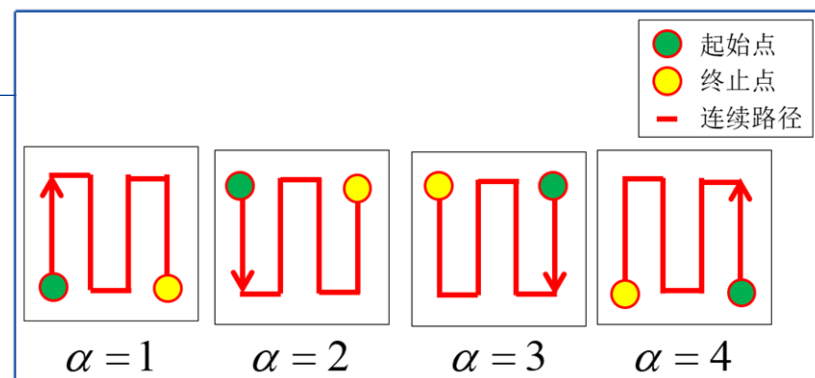
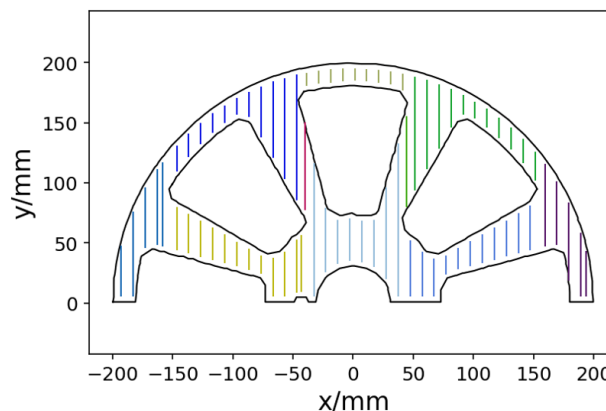


图1：四种典型的磨抛路径

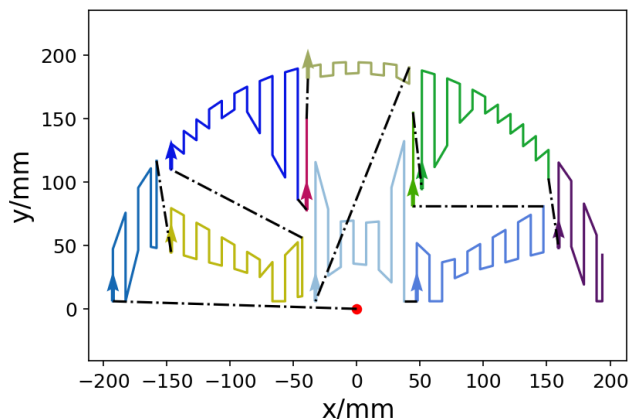


规划好的子曲面及局部路径在拟合平面的投影

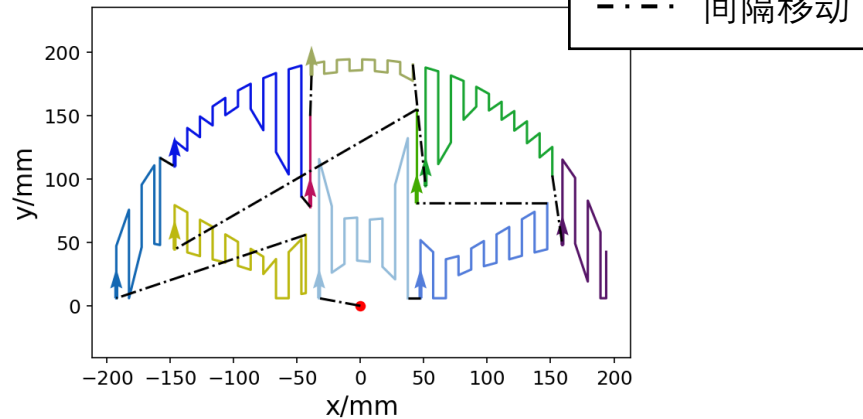
图2：实验对象

# 算法介绍及仿真实验

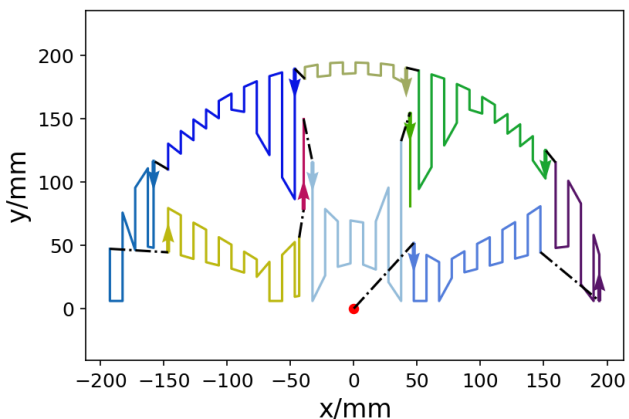
- 仿真实验 1 不进行间隔移动规划  
间隔移动总长为853mm



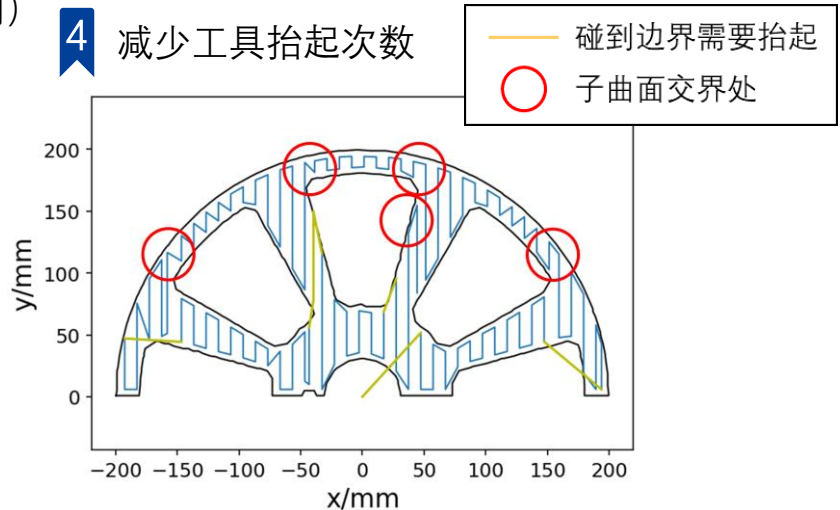
- 2 进行磨抛次序规划  
间隔移动总长为732mm



- 3 进行路径种类规划和磨抛次序规划 (完整的间隔移动规划)  
间隔移动总长为**305mm**



- 4 减少工具抬起次数





6

磨抛工艺实验



# 工艺实验简介



## 实验目的与内容

- 1 研究**曲面分割**及**间隔移动**对**实际磨抛效率**的影响
- 2 研究课题所设计的算法能否**完整**磨抛轮毂，其**磨抛效果**如何
- 3 研究最大加速度对磨抛效果的影响（在前面章节已说明）
- 4 研究贪婪算法和全局算法对磨抛效果的影响（在前面章节已说明）

## 工艺实验流程

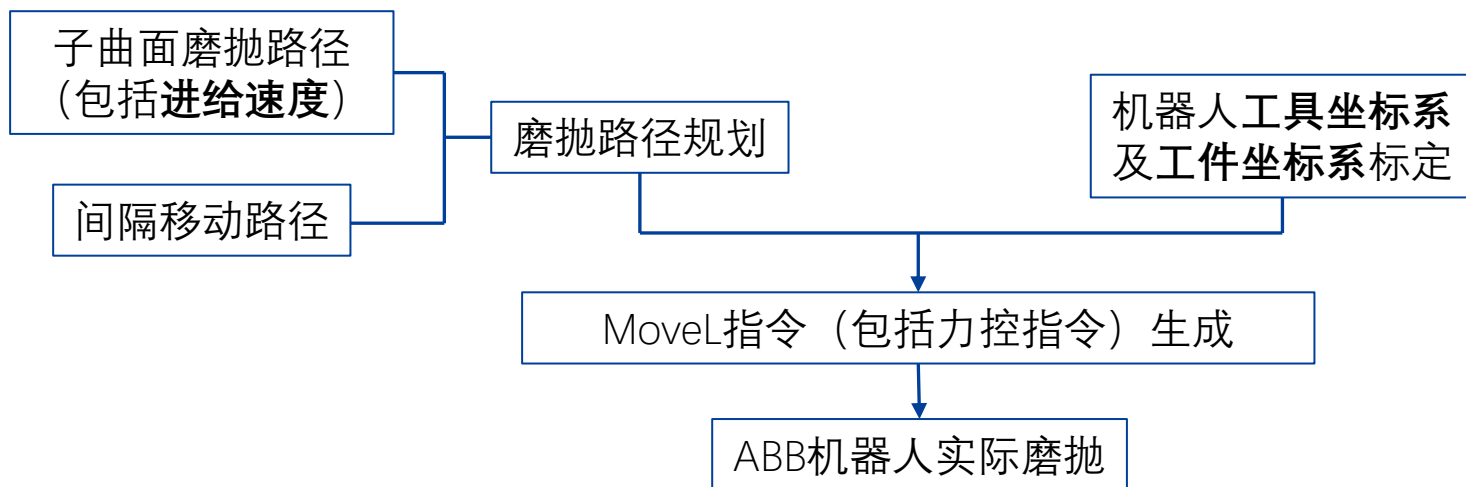


图1：工艺实验流程图

## 实验平台及参数

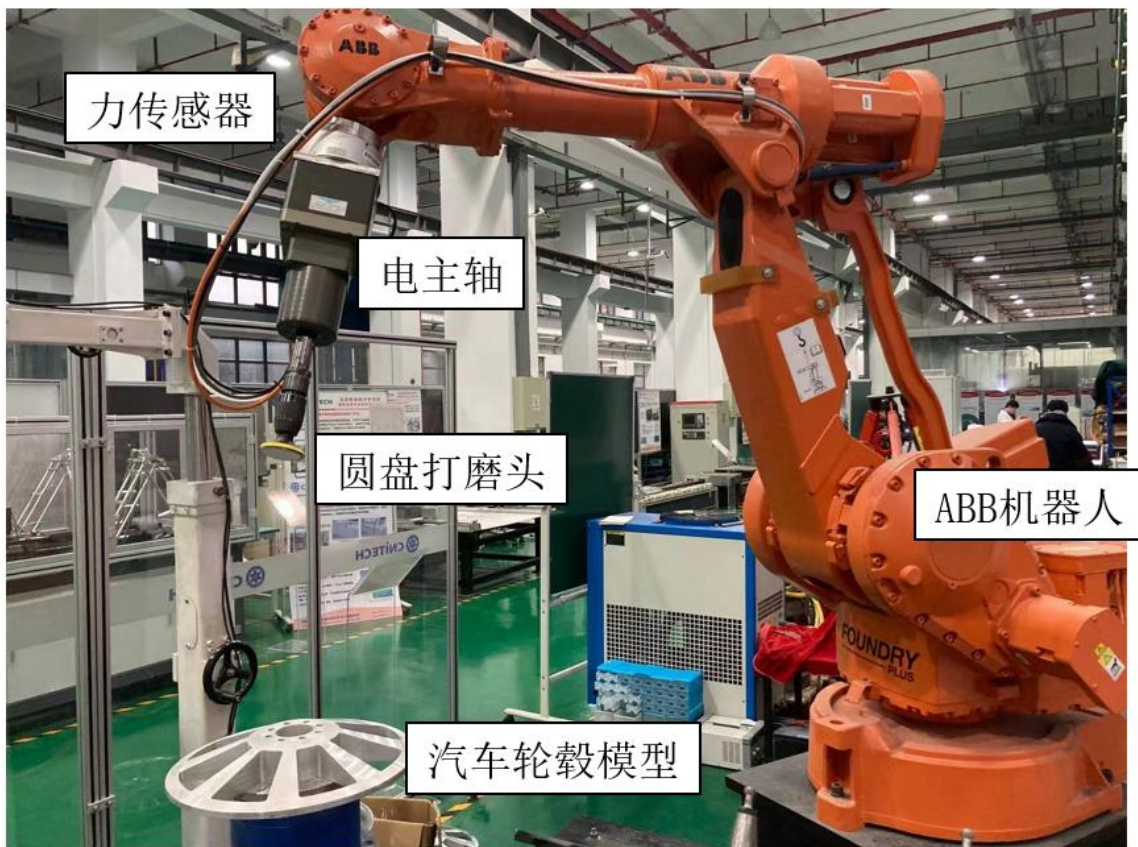


图1：轮毂磨抛工艺实验平台

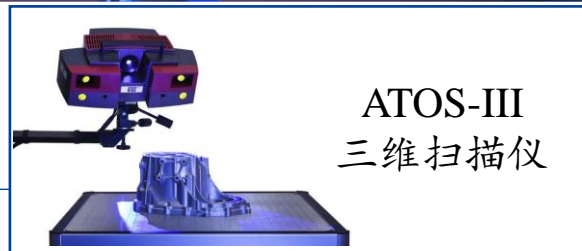


图2：磨抛深度测量工具

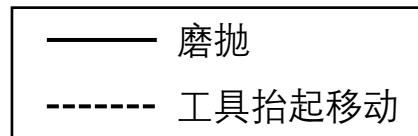
表1：轮毂磨抛工艺实验参数

实验参数	参数值
杨氏模量 $E(\text{MPa})$	0.84
接触力模型幂次系数 $\beta$	0.89
圆盘磨抛工具厚度 $H(\text{mm})$	10
圆盘磨抛工具半径 $R_d(\text{mm})$	37.5
圆盘磨抛工具坐标系欧拉角 $\alpha(\text{rad})$	(0,0.2094,0)
圆盘磨抛工具转速 $n(\text{r/min})$	5000
材料去除系数 $K(\mu\text{m})$	0.0408
最大进给速度 $V_{\max}(\text{mm/s})$	50
最大加速度 $A_{\max}(\text{mm/s}^2)$	10
路径离散点间距 $\delta s(\text{mm})$	1

# 曲面分割及间隔移动



- 实验目的：研究曲面分割及间隔移动对实际磨抛效率的影响
- 实验分组：



- A：直接生成竖直平行线簇构成的磨抛路径
- B：由**竖直**扫掠线进行曲面分割后的磨抛路径
- C：由**竖直**扫掠线进行曲面分割并进行**间隔移动规划**后的磨抛路径
- D：由**圆弧**扫掠线进行曲面分割并进行**间隔移动规划**后的磨抛路径

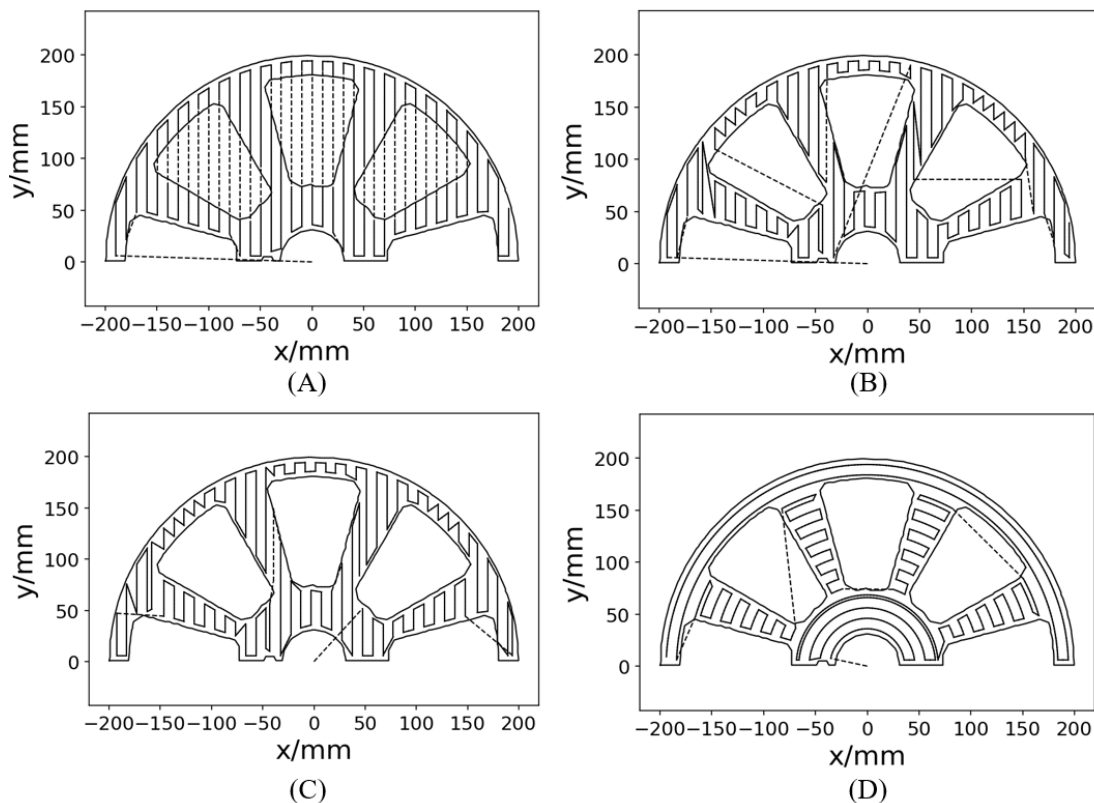


图1：各组磨抛路径的拟合平面投影

# 曲面分割及间隔移动

轮毂曲面机器人力控磨抛路径规划算法

## ■ 实验结果

表1: 实验结果统计表

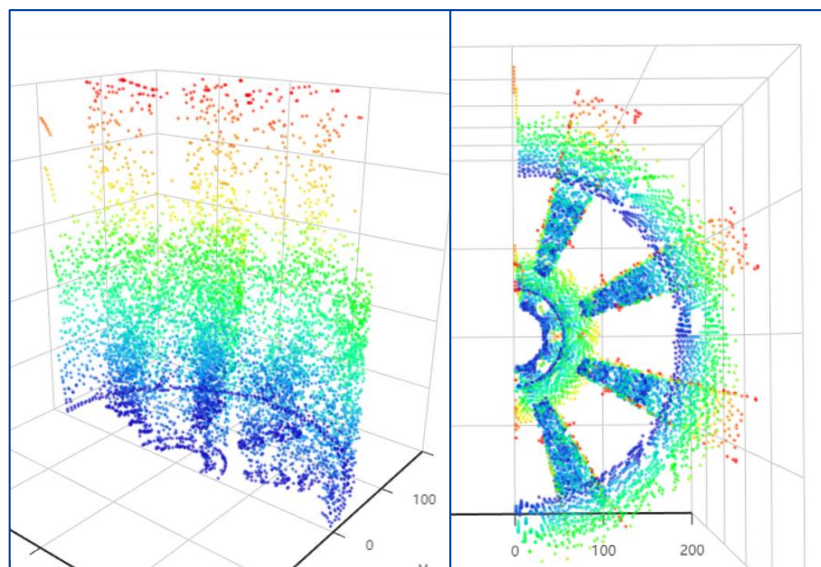
路径种类	A	B	C	D
区域个数		10	10	6
磨抛工具抬起 次数	36	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>6</b>
磨抛间隔移动 总长(mm)	2694	843	<b>660</b>	<b>1188</b>
总耗时(s)	763	484	<b>412</b>	<b>384</b>



# 轮毂整体磨抛实验



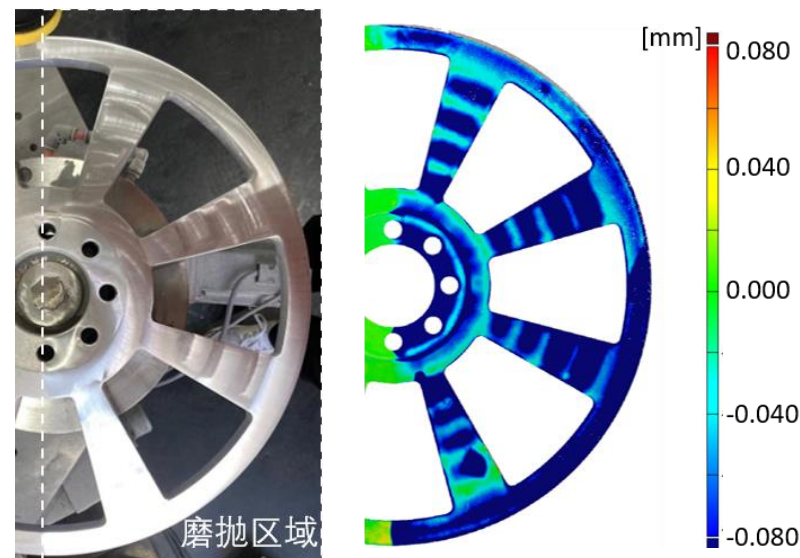
- 实验目的：验证算法是否能够应用于实际轮毂磨抛，即是否能够完整磨抛轮毂表面



侧视图

俯视图

图1：轮毂磨抛仿真结果



实物图

磨抛深度（三维扫描）

图2：轮毂磨抛工艺实验结果

## 7 总结与展望



# 课题总结



## ▪ 主要内容



## ▪ 主要贡献

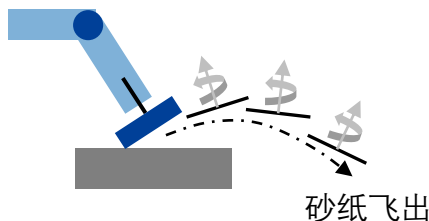
- 本课题实现了对复杂轮毂曲面的**完整磨抛**。而目前机器人磨抛对象主要是简单曲面或人为设定路径。
- 引入了**磨抛力学**模型，并以点云为对象，进行了进给速度规划和路径间距规划。而目前磨抛路径规划以有限元或标记点为对象。
- 探讨了**变进给速度、最大加速度、贪婪全局算法**等影响
- 对复杂轮毂曲面进行了数值曲面分割（改进点云边界检测算法，**大幅降低复杂度**；曲面分割算法具有**通用性**和**多样性**）
- 进行了间隔移动规划。而目前磨抛路径规划中缺乏这部分的研究。
- 对轮毂磨抛进行了建模和仿真
- .....

# 研究展望

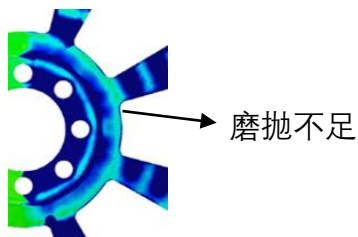


## ❖ 值得研究的问题

1 圆盘磨抛工具与工件表面**非正常接触**时，**高速旋转**的圆盘底面受到不均匀的力，容易使**砂纸飞出**。



2 子曲面的**相邻区域**磨抛不足。



3 全局算法**变量数量过多**，优化求解器不收敛、容易陷入局部最优等。

4 **砂纸损耗**明显，直接影响磨抛效果（材料去除深度）。

## ❖ 研究的方向与展望

根据接触动力学及相关知识，确定砂纸是否飞出的判断依据，从而在路径规划中**引入砂纸不能飞出的约束**。

考虑子曲面之间局部路径规划的**耦合效应**，解决该问题；进行**二次磨抛规划**。

重构优化问题，减少变量数量；分步或迭代求解优化问题；改进现有的优化算法。

砂纸损耗建模，从而规划砂纸更换时间。

# 参考文献



- [1] Ji W, Wang L. Industrial robotic machining: a review[J]. The International Journal of Advanced manufacturing Technology, 2019, 103(1-4): 1239-1255.
- [2] Susemihl H, Brillinger C, Stürmer S P, et al. Referencing strategies for high accuracy machining of large aircraft components with mobile robotic systems[R]. SAE Technical Paper, 2017.
- [3] Buff B, Magnus C, Zhu J H, et al. Robot-Based Incremental Sheet Metal Forming—Increasing the Geometrical Complexity and Accuracy[C]. Key Engineering Materials, 2013: 149-155.
- [4] Xu X, Chen W, Zhu D, et al. Hybrid active/passive force control strategy for grinding marks suppression and profile accuracy enhancement in robotic belt grinding of turbine blade[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 67: 102047.
- [5] Hahn R S. Controlled-force grinding—a new technique for precision internal grinding[J], 1964.
- [6] Shaw M C. Principles of abrasive processing[M]. Oxford University Press on Demand, 1996.
- [7] Zhang H, Chen H, Xi N, et al. On-line path generation for robotic deburring of cast aluminum wheels[C]. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006: 2400-2405.
- [8] Domroes F, Krewet C, Kuhlenkoetter B. Application and analysis of force control strategies to deburring and grinding[J], 2013.
- [9] Pan Z. Intelligent robotic machining with force control[M]. Stevens Institute of Technology, 2005.
- [10] Roswell A, Xi F J, Liu G. Modelling and analysis of contact stress for automated polishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(3-4): 424-435.
- [11] Xu C-Y, Li J-R, Liang Y-J, et al. Trochoidal toolpath for the pad-polishing of freeform surfaces with global control of material removal distribution[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 51: 1-16.
- [12] Chen X. 5-AXIS COVERAGE PATH PLANNING WITH DEEP REINFORCEMENT LEARNING AND FAST PARALLEL COLLISION DETECTION[D]. Georgia Institute of Technology, 2020.



# 参考文献



- [13] Jin J. Optimal field coverage path planning on 2D and 3D surfaces[D]. Iowa State University, 2009.
- [14] Acar E U, Choset H, Rizzi A A, et al. Morse decompositions for coverage tasks[J]. The international journal of robotics research, 2002, 21(4): 331-344.
- [15] Peng C, Isler V. Visual Coverage Path Planning for Urban Environments[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5961-5968.
- [16] Galceran E, Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics[J]. Robotics and Autonomous systems, 2013, 61(12): 1258-1276.
- [17] Xiao M, Ding Y, Fang Z, et al. Contact force modeling and analysis for robotic tilted-disc polishing of freeform workpieces[J]. Precision Engineering, 2020.
- [18] Xiao M, Ding Y. Contact Kinematics between Three-Dimensional Rigid Bodies with General Surface Parameterization[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020: 1-28.
- [19] Huang N, Jin Y, Lu Y, et al. Spiral toolpath generation method for pocket machining[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 139: 106142.
- [20] Wang Q-H, Liang Y-J, Xu C-Y, et al. Generation of material removal map for freeform surface polishing with tilted polishing disk[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9-12): 4213-4226.
- [21] Walshaw C. A multilevel lin-kernighan-helsgaun algorithm for the travelling salesman problem[M]. Citeseer, 2001.
- [22] Deep K, Singh K P, Kansal M L, et al. A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 212(2): 505-518.

谢谢！

