

ME3221-08

《测试原理与技术》

# 切削力测量实验

结题汇报

Team 7 董前程 庞博 吴欣怡 赵四维



上海交通大学  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

机械与动力工程学院  
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING



# 目录

## CONTENTS



1

实验目的与实验装置

2

实验内容与实验原理

3

实验数据与结果讨论

4

误差分析与实验总结



# 实验目的与实验装置

实验目的 | 实验装置

- 了解切削测力仪的工作原理和测力方法和实验系统；
- 掌握背吃刀量  $a_p$ 、进给量  $f$  和切削速度  $v_c$  对切削力的影响规律。

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结





# 实验目的与实验装置

实验目的 | **实验装置**

实验装置:

➤ Kistler 9257B 多分量测力仪



➤ 德玛吉DMU50联动数控加工中心



实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结



# 目录

## CONTENTS



1

实验目的与实验装置

2

实验内容与实验原理

3

实验数据与分析讨论

4

实验总结





# 实验内容与实验原理

实验内容 | 实验原理

## 实验内容:

利用实验装置完成对直角坐标系下三个方向切削力的测量，依据正交试验的一般方法完成实验结果的分析，探究**背吃刀量、进给量、切削速度**对于切削力的影响。

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

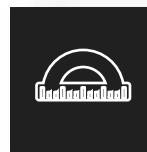
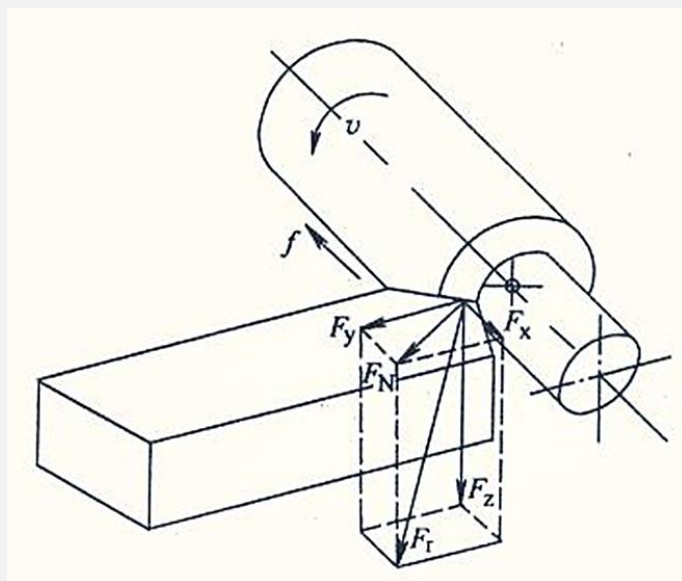
实验总结



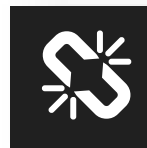
# 实验内容与实验原理

实验内容 | 实验原理

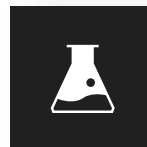
## 切削力 三个主要来源



克服被加工材料**弹性变形**的抗力



克服被加工材料**塑性变形**的抗力



切屑与前刀面的摩擦力、后刀面与过渡表面和已加工表面之间的**摩擦力**

通常我们分为x,y,z三个方向进行研究。

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结



# 实验内容与实验原理

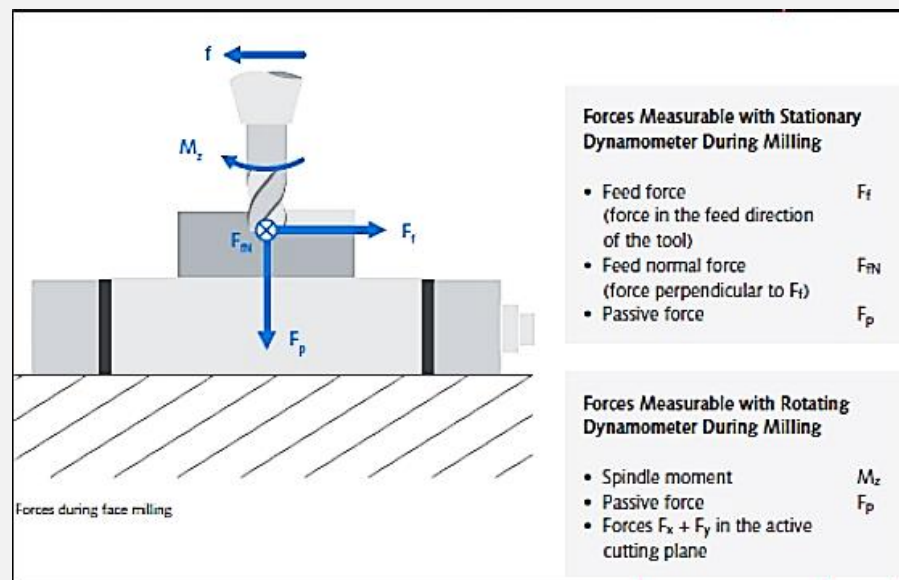
实验内容 | 实验原理

**主切削力  $F_z$** : 过渡表面相切并与基面垂直。用于计算刀具强度、设计机床零件、确定机床功率等。

**进给力 (轴向力)  $F_x$** : 处于基面内并与工件轴线平行, 方向与进给方向相反。用于设计进给机构、计算进给运动功率等。

**背向力 (径向力)  $F_y$** : 处于基面内并与工件轴线垂直。用于计算工件挠度、刀具强度、机床零件强度等。使工件在切削过程中产生振动的主要因素之一。

在铣削过程中, 工件所受切削力可分解为右图所示的三个方向的力, 即  $F_f$ 、 $F_{fN}$ 、 $F_p$



实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结

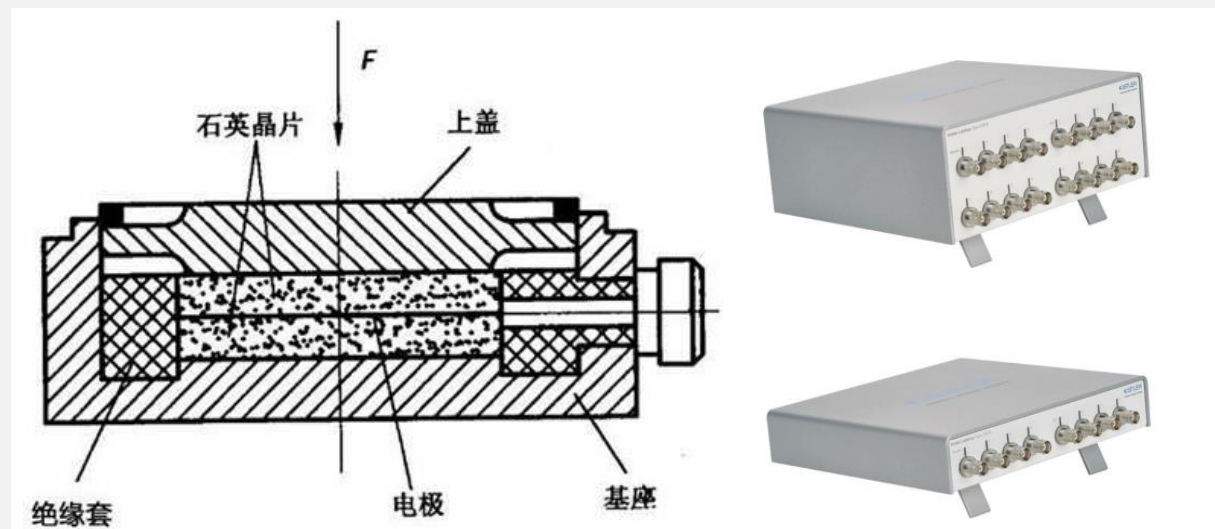
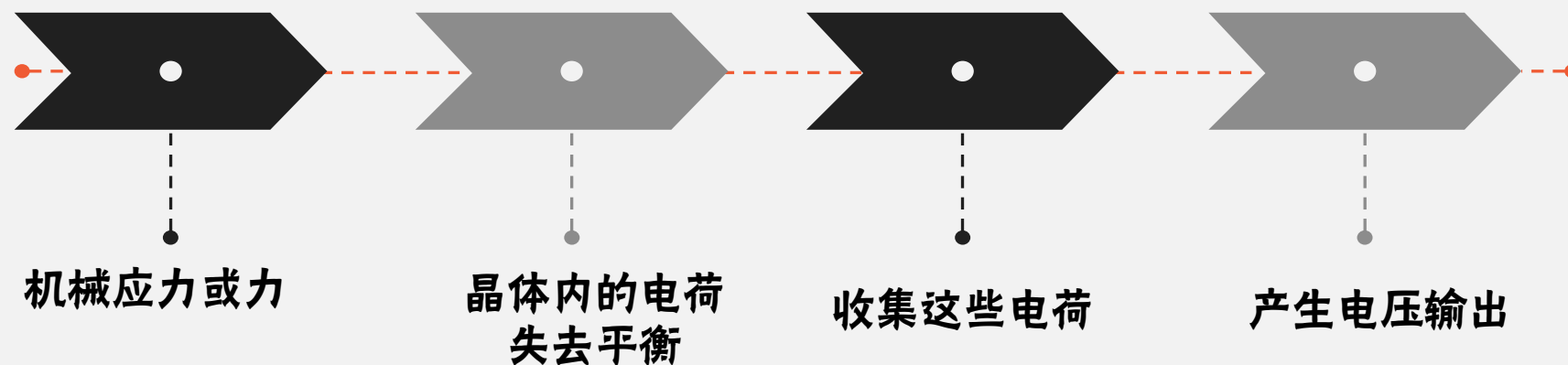




# 实验内容与实验原理

实验内容 | 实验原理

## 压电传感器及其工作原理



实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结



# 实验内容与实验原理

实验内容 | 实验原理

## 一些测量装置的参数和我们实验时的参数设定

KISTLER

measure. analyze. innovate.

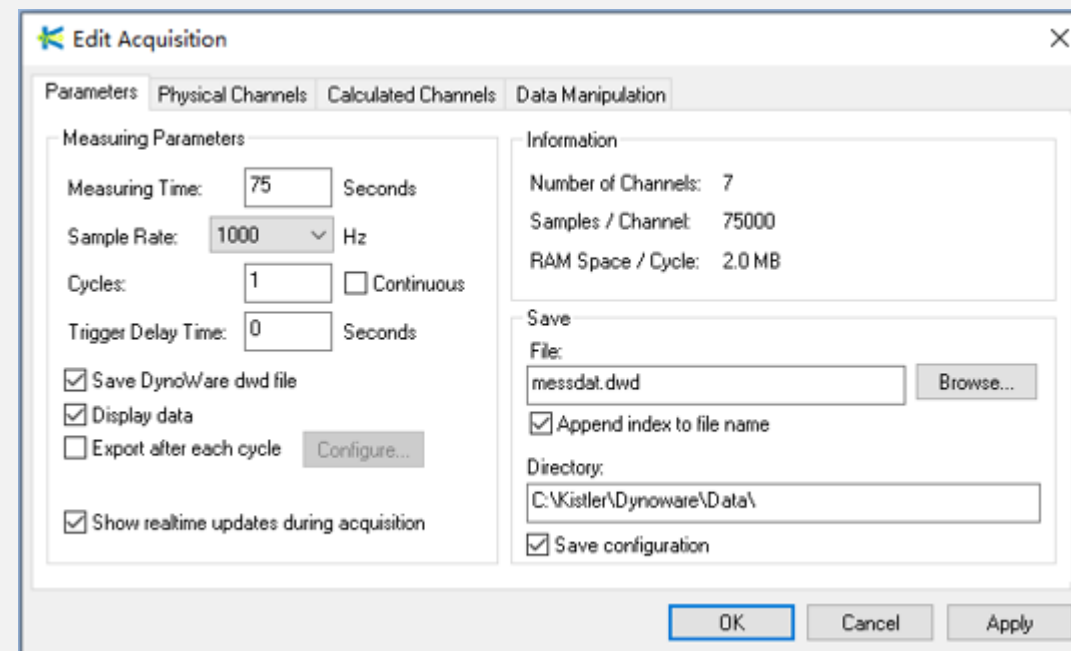
### 电压输出

名义输出范围	V	$\pm 10$
输出阻抗	$\Omega$	10
输入和输出地之间的 最高共模电压	V	50
输出噪音 (所有范围)		
1 Hz ... 100 kHz, typ.	mV <sub>rms</sub>	0.030
1 Hz ... 10 kHz, typ.	mV <sub>rms</sub>	0.012
频率范围 (-3 dB)	Hz	0 ... 100,000
群延迟 (输入至输出, 滤波器关闭)	$\mu$ s	$\leq 14$
零点误差	mV	$< \pm 2$
DAC分辨率 (模拟输出)	Bit	16

### 数据采集

ADC分辨率	Bit	24
内部ADC采样率	kSps	625
每通道的数据采集 速度 (可调)	kSps	100

说明: 对于 $\geq 25$  kSps的数据采集, 抗混叠滤波器自动设置截止频率为 $0.3 \sim 0.45$  x所选的输出更新速率。



左图数据来源于Kistler官方技术参考文档

<https://www.kistler.com/INT/en/>

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结



# 目录

## CONTENTS



1

实验目的与实验装置

2

实验内容与实验原理

3

实验数据与分析讨论

4

实验总结



# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论



*Excel-csv2Python data pre-processing:*

- ✓ 截取数据（舍去主轴未处于工作状态时测得的数据点）
- ✓ 低通滤波（截止频率取切削力频率的1.2倍）
- ✓ 窗口滤波（使得数据曲线分布更加平滑）
- ✓ 绘制散点图
- ✓ 求取信号平均值
- ✓ 消除零飘（主轴运动与振动导致产生零飘信号）

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

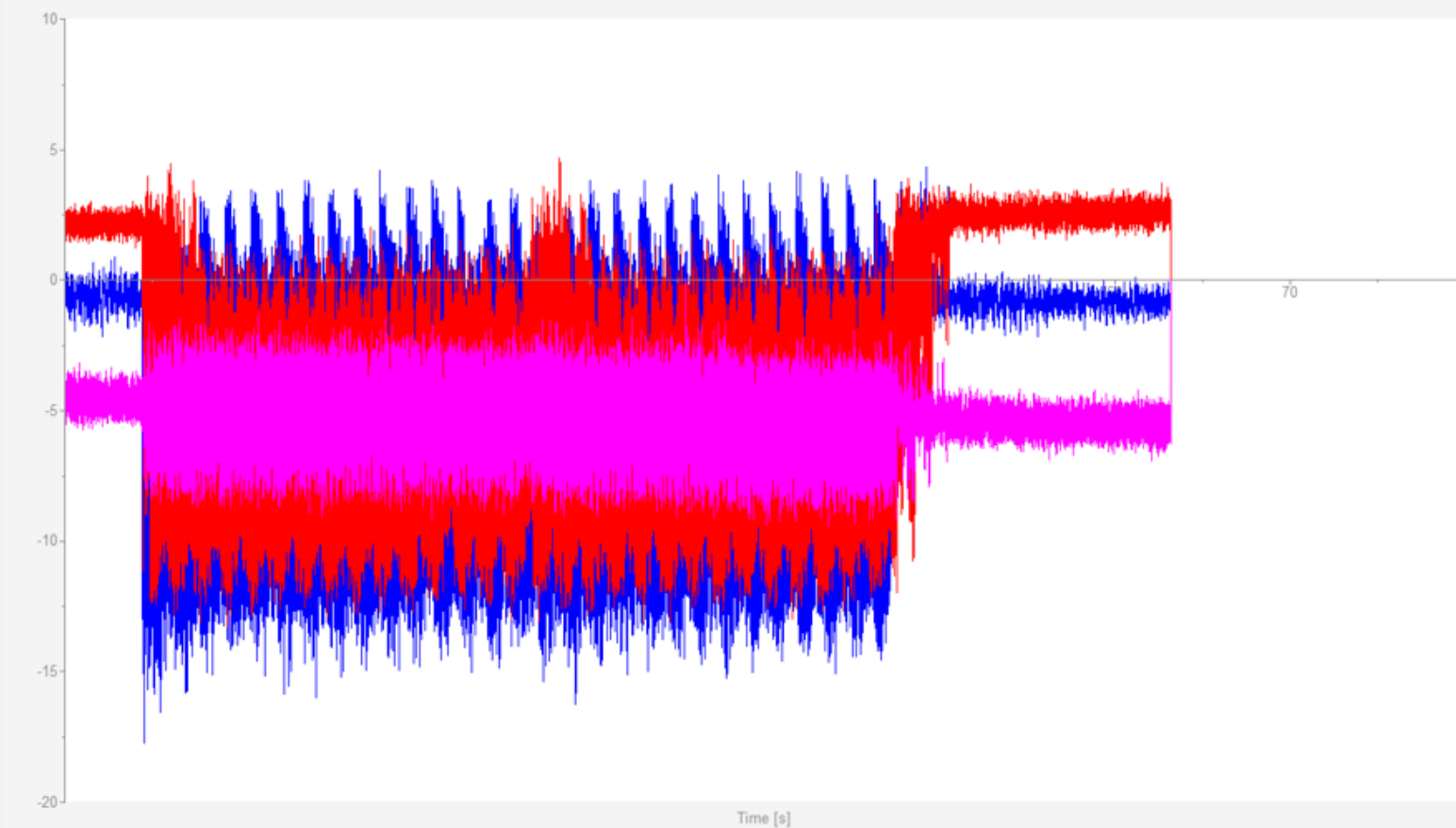
实验总结



# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

以第一组实验的 $F_x$ 为例，简要展示展示数据的处理及效果



原始数据，采集自Kistler 9257B实验设备

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结

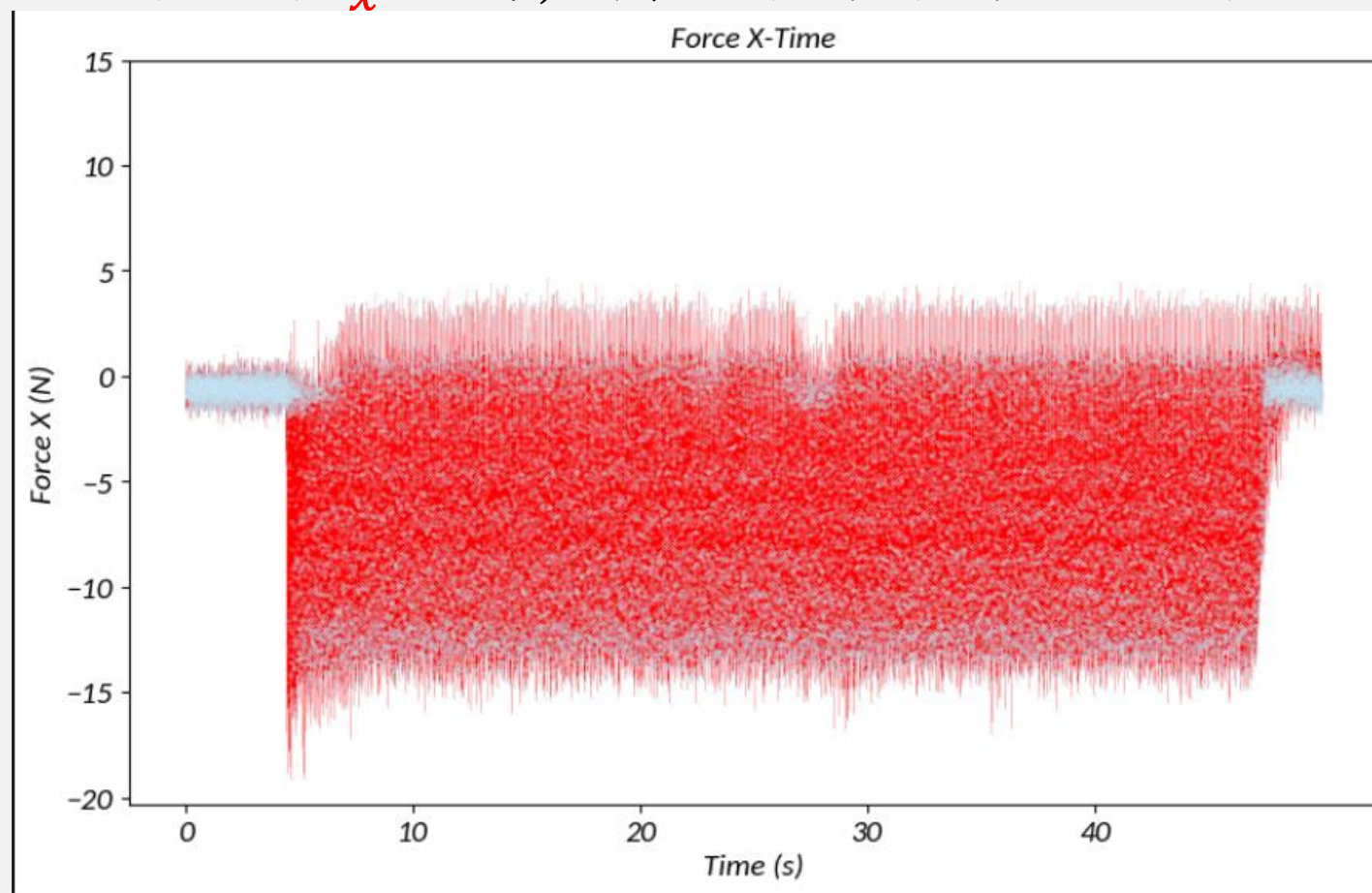




# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

以第一组实验的 $F_x$ 为例，简要展示展示数据的处理及效果



使用Python绘图，选择X分量，描点连线

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

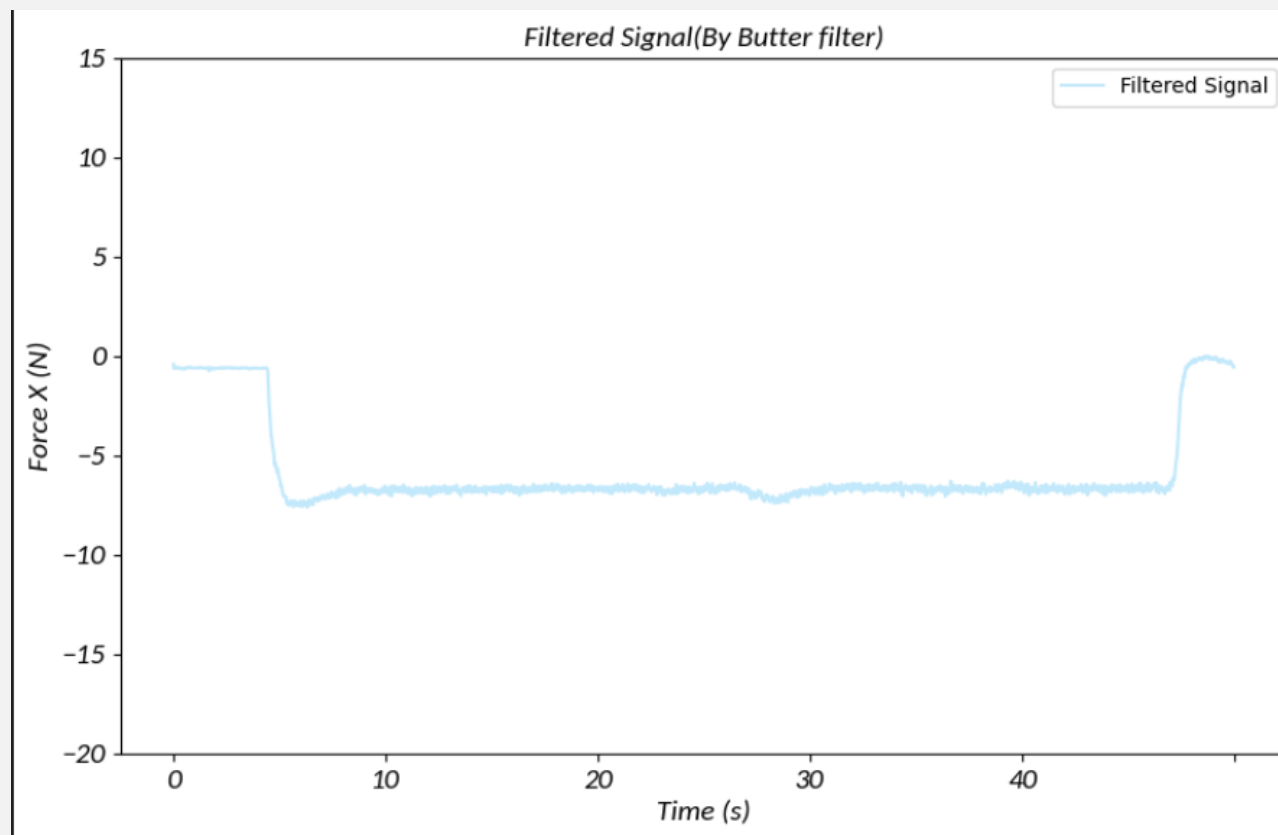
实验总结



# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

以第一组实验的 $F_x$ 为例，简要展示展示数据的处理及效果



采用不同的滤波器进行滤波+平滑  
( 图为 巴特沃斯滤波 + 滑动窗口平滑 )

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

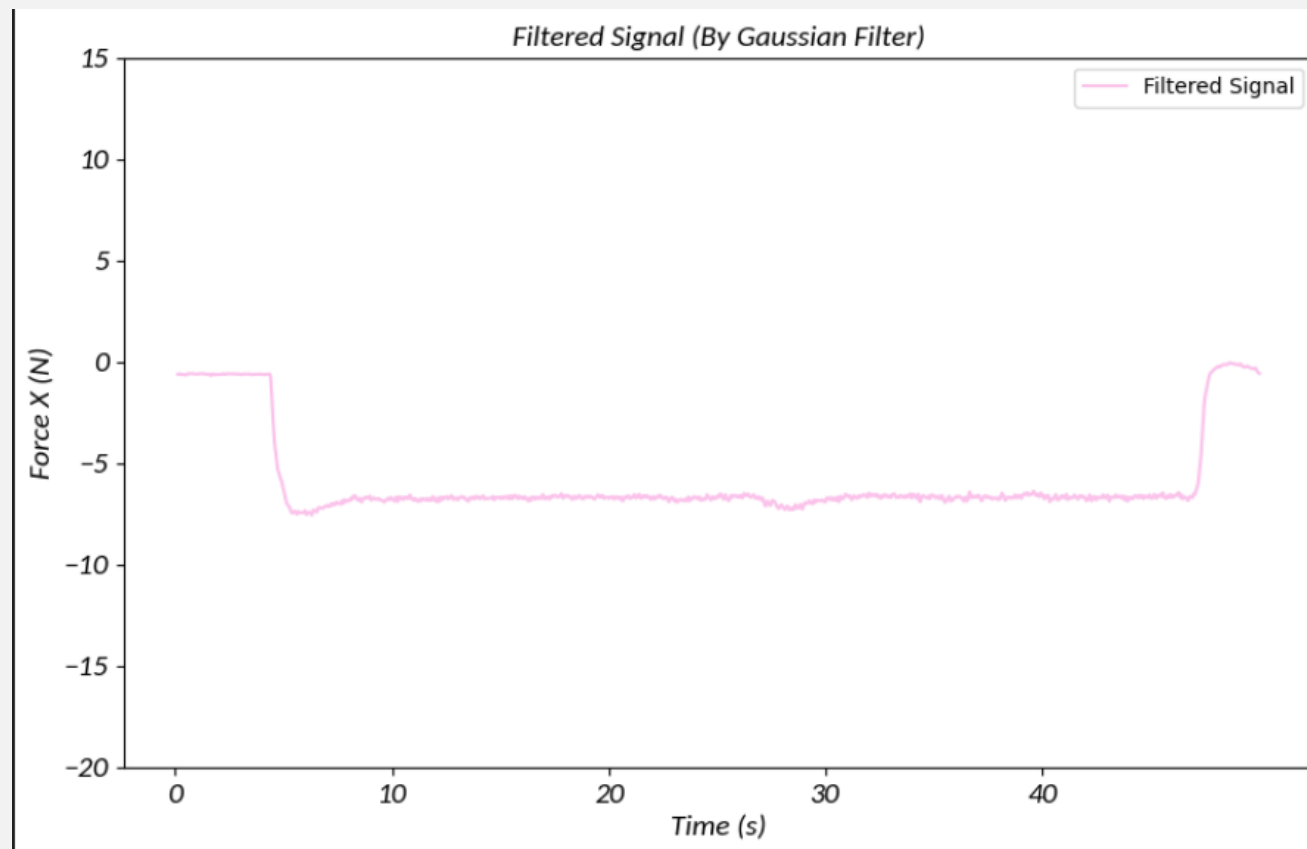
实验总结



# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

以第一组实验的  $F_x$  为例，简要展示展示数据的处理及效果



采用不同的滤波器进行滤波+平滑  
( 图为 高斯滤波器+ 滑动窗口平滑 )

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

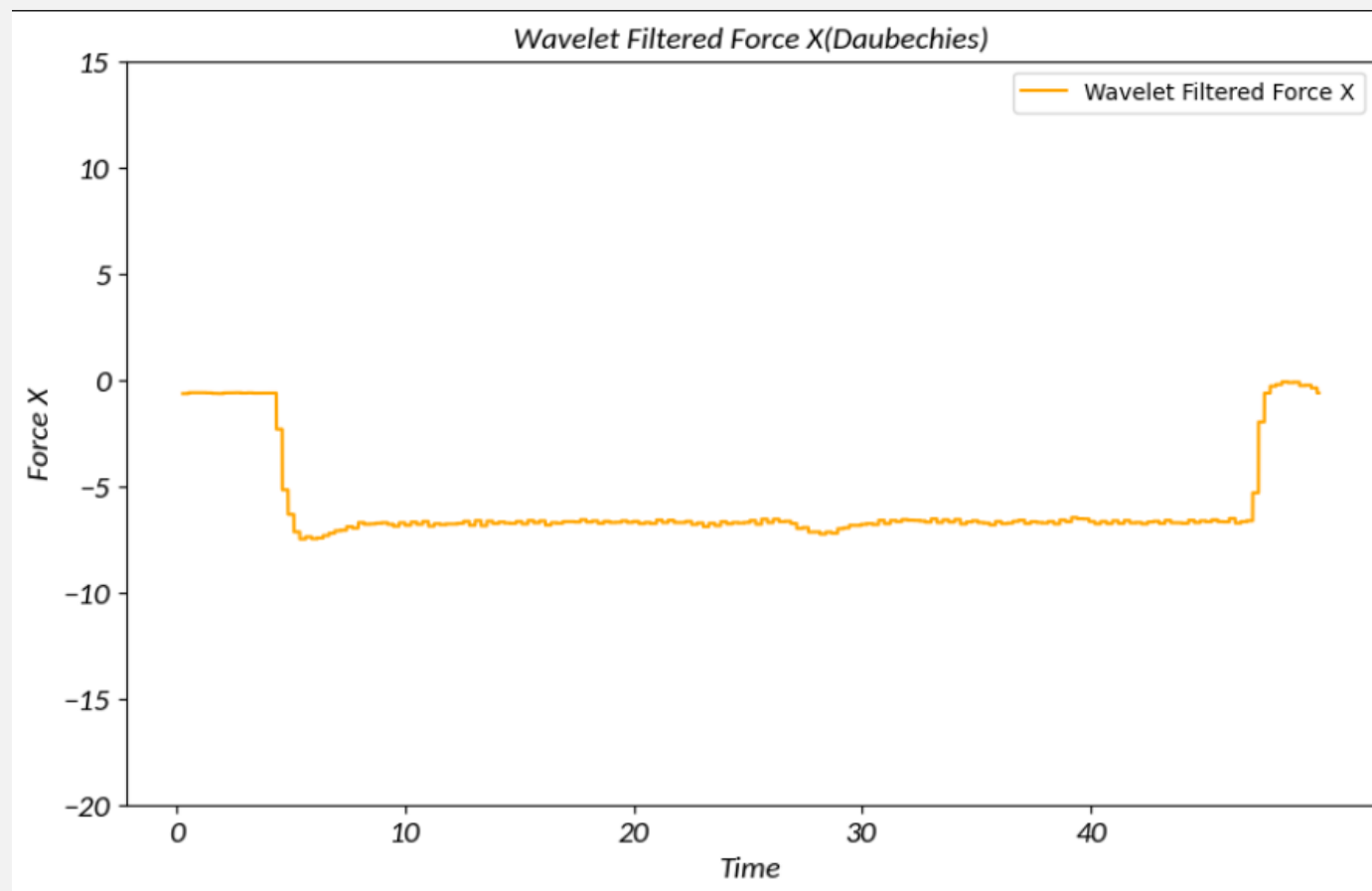
实验总结



# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

以第一组实验的  $F_x$  为例，简要展示展示数据的处理及效果



采用不同的滤波器进行滤波+平滑  
( 图为小波变换滤波+ 滑动窗口平滑 )

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

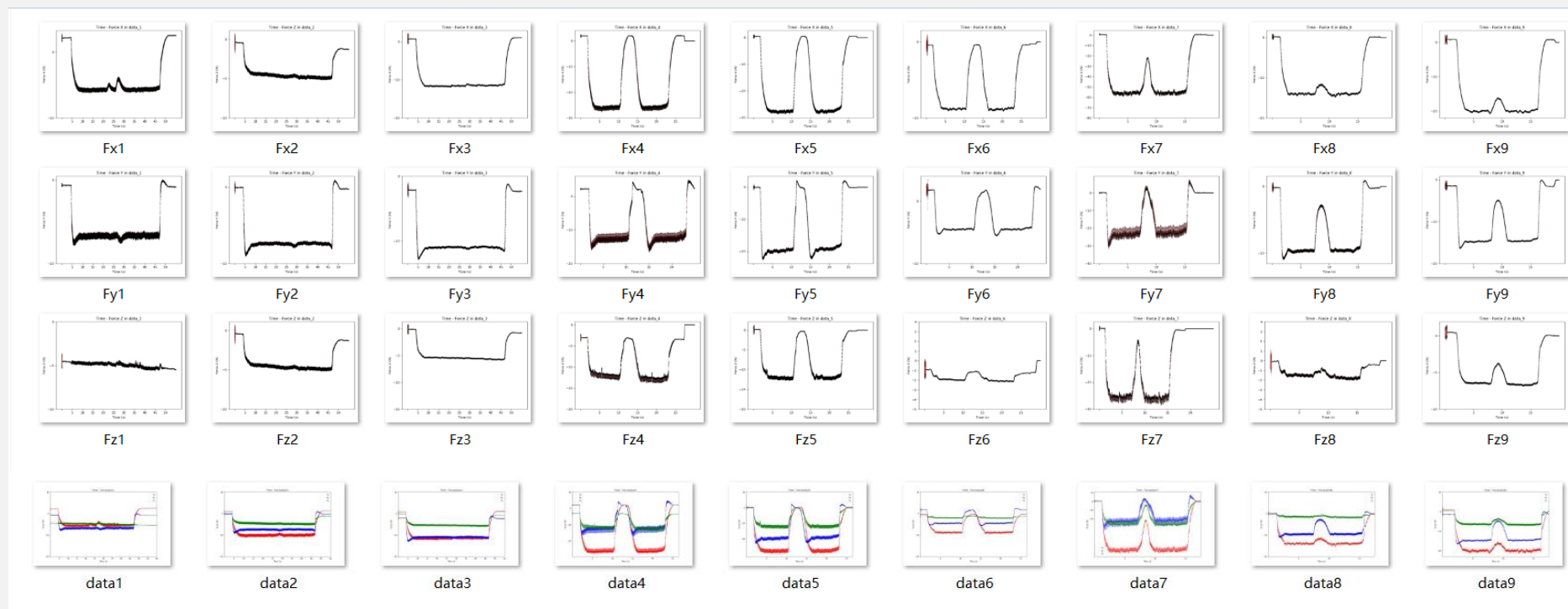
实验总结



# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

## 数据预处理效果展示



实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结





# 实验数据与分析讨论

表1 切削力正交实验结果

序号	进给量	主轴转速	切深	$F_x$	$F_y$	$F_z$
	mm/min	rpm	mm	N	N	N
1	100	1000	1	-7.662	-6.118	-4.525
2	100	2000	2	-10.985	-7.339	-4.281
3	100	3000	3	-12.256	-8.846	-5.378
4	200	1000	2	-27.923	-14.613	-9.696
5	200	2000	3	-28.026	-19.219	-12.194
6	200	3000	1	-8.410	-6.277	-1.148
7	300	1000	3	-56.575	-22.416	-26.135
8	300	2000	1	-14.288	-9.406	-1.692
9	300	3000	2	-20.849	-12.649	-7.121

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结



# 实验数据与分析讨论

上表中对应的正交实验设计表为

表2 正交设计表

序号	进给量 mm/min (因子1)	主轴转速 rpm (因子2)	切深mm (因子3)
1	100 (1)	1000 (1)	1 (1)
2	100 (1)	2000 (2)	2 (2)
3	100 (1)	3000 (3)	3 (3)
4	200 (2)	1000 (1)	2 (2)
5	200 (2)	2000 (2)	3 (3)
6	200 (2)	3000 (3)	1 (1)
7	300 (3)	1000 (1)	3 (3)
8	300 (3)	2000 (2)	1 (1)
9	300 (3)	3000 (3)	2 (2)

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结



# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

以X方向为例，做出极差分析表

表3 Fx极差分析表

项	水平	进给量 mm/min	主轴转速 rpm	切深mm
K值	1	-30.903	-92.160	-30.360
	2	-64.359	-53.299	-59.757
	3	-91.712	-41.515	-96.857
K <sub>avg</sub> 值	1	-10.301	-30.720	-10.120
	2	-21.453	-17.766	-19.919
	3	-30.571	-13.838	-32.286
最佳水平		3	1	3
R		20.270	16.882	22.166
水平数量		3	3	3
每水平重复数r		3	3	3

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结



# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

## 对上表参数的说明

指标	说明
K值	某因素某水平时试验数据求和
$K_{avg}$ 值	对应的K值平均值
最佳水平	某因子时最大 $K_{avg}$ 绝对值对应的水平编号
R	因素的极差值。该值等于某因素时， $K_{avg}$ 绝对最大值减去 $K_{avg}$ 绝对最小值，可结合因素极差值对比各因素的优劣
水平数量	某因素的水平数
每水平重复数r	水平的平均试验重复次数

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结



# 实验数据与分析讨论

对x,y,z三个方向上的力做同样的操作，汇总得到以下总表

表4 极差分析汇总表

因变量	项	进给量 mm/min	主轴转速 rpm	切深mm
Fx	最佳水平	3	1	3
	R	20.270	16.882	22.166
	相对R	0.914	0.762	1
Fy	最佳水平	3	1	3
	R	7.390	5.125	9.560
	相对R	0.773	0.536	1
Fz	最佳水平	3	1	3
	R	6.921	8.903	12.114
	相对R	0.571	0.735	1

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结





# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

a) 对于 $F_x$ : 因子3 (切深) 是影响最大的因素, 其次是因子1 (进给量), 最后是因子2 (主轴转速); 其中因子1、因子3与 $F_x$ 成正相关, 而因子2与 $F_x$ 成负相关。

b) 对于 $F_y$ : 因子3 (切深) 是影响最大的因素, 其次是因子1 (进给量), 最后是因子2 (主轴转速); 其中因子1、因子3与 $F_y$ 成正相关, 而因子2与 $F_y$ 成负相关。

c) 对于 $F_z$ : 因子3 (切深) 是影响最大的因素, 其次是因子2 (主轴转速), 最后是因子1 (进给量); 其中因子1、因子3与 $F_z$ 成正相关, 而因子2与 $F_z$ 成负相关。

综合上述分析可知: 使得 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 均达到最大的组合为

“进给量为**300** mm/min, 主轴转速为**1000** rpm, 切深为**3**mm”

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与结果讨论

实验总结



# 实验数据与分析讨论

实验数据预处理 | 正交实验分析 | 结果讨论

为了更直观地表示极差分析结果，  
我们还绘制了因子各水平平均值（取绝对值）图

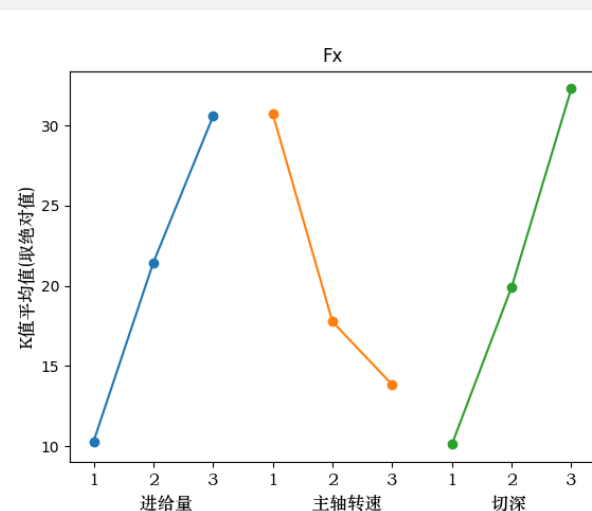


图1 F<sub>x</sub>因子各水平平均值

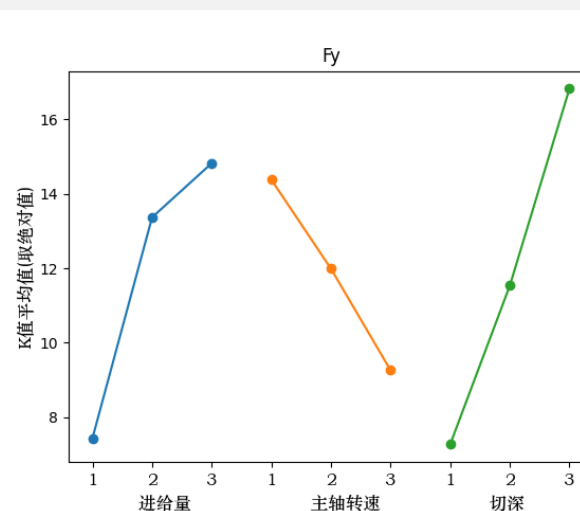


图2 F<sub>y</sub>因子各水平平均值

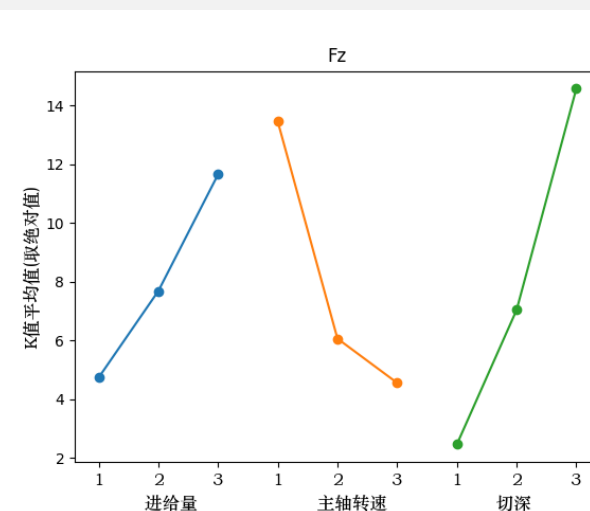


图3 F<sub>z</sub>因子各水平平均值

实验总结



# 目录

## CONTENTS

1

实验目的与实验装置

2

实验内容与实验原理

3

实验数据与结果讨论

4

误差分析与实验总结





# 误差分析与实验总结

## 误差分析 | 实验总结

- 1) **清洁**: 若测压孔端面未清理干净安装, 安装传感器时可能会导致传感器敏感面受伤。输出端应保持清洁干燥, 这样可提高传感器的绝缘阻抗;
- 2) **密封度**: 若传感器密封不好, 测量时容易将传感器安装螺纹损坏, 甚至会将传感器吹出测压孔造成意外事故;
- 3) **安装力矩**: 安装力矩会使传感器本体部件产生预应力, 影响传感器的刚度, 导致传感器的灵敏度发生变化;



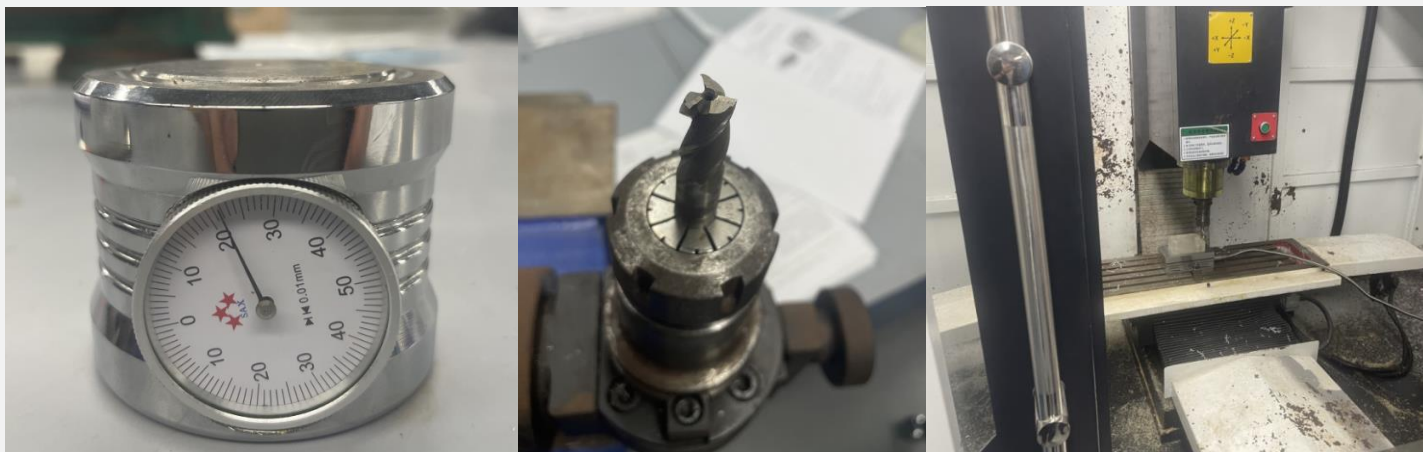
### 实验总结



# 误差分析与实验总结

## 误差分析 | 实验总结

- 4) **时间常数设置**: 压电式传感器的测量误差随频率升高而加大
- 5) **绝缘性能**: 若绝缘性能差将导致输出信号漂移, 甚至电荷放大器会出现饱和现象。电缆接头的不清洁或电缆损坏都会导致绝缘性能的降低。另一方面, 由于电缆在测量中振动会引起干扰信号
- 6) **电磁场干扰及地回路干扰**, 温度、湿度变化的影响。



### 实验总结





# 误差分析与实验总结

误差分析 | 实验总结

正交实验数据:

<https://spssau.com/shareresults.html?shareResult=8C4C9CFBE72B05543C1CD97DCEB86D4D>

滤波器尝试:

<https://nbviewer.org/github/Racheus/ME3221--/blob/main/DataProcessing.ipynb>

实验总结



# 误差分析与实验总结

误差分析 | 实验总结

## 学习内容:

- ✓ 传感器的基本原理
- ✓ 信号处理、滤波器相关算法及实现
- ✓ 正交实验方法
- ✓ 数据处理-极差分析方法
- ✓ 数控车床的操作（当心G00）
- ✓ 绘图美观性考量

## 新知:

- 切削力基础参数知识
- 切削力的测量流程
- 滤波原理

## 未至之境:

- 机械颤振（*chatter*）的研究
- 更优化的数据处理模型搭建
- 切削的深度机械原理
- *AI for detecting?*

30

实验目的与实验装置

实验内容与实验原理

实验数据与分析讨论

实验总结



上海交通大学  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

机械与动力工程学院  
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

# THANKS

董前程 庞博 吴欣怡 赵四维

2023.12.21