

增材制造过程中的  
实时质量监测及闭  
环控制系统



**镭脉工业**  
Laser Pulse

# SLM过程监测的必要性

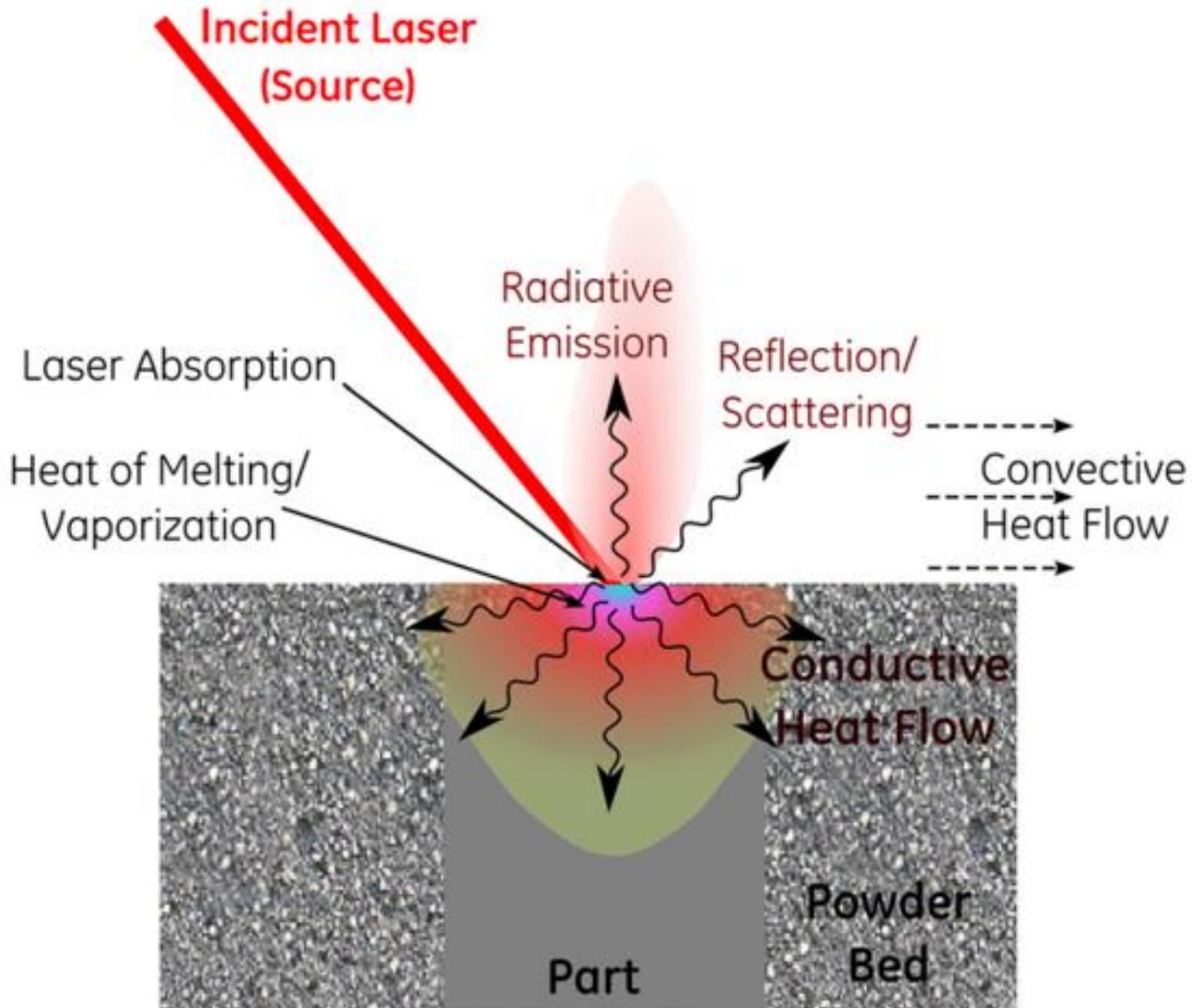


长时间连续加工，长时间处于无人值守工作状态。

产品生产过程中易受材料，设备，环境等多种因素影响导致细微缺陷。

初期细微缺陷无法通过现有常用的工业视觉方法及时发现，错过了最佳的干预时机，导致产品出现重大缺陷，甚至是报废。

核工业等高端工业对装备制造有着极为严苛的质量要求，且必须伴随全生产周期的数据。



除了**过程变量**，许多**过程签名** (Process Signatures) 提供了一个“**过程的声音**” (“Voice of Process”) 用以被**监控**，以提供关于**过程物理**和**最终零件质量指标**的信息。这些**过程特征**是由于**粉末原料加热、熔化和凝固的动态特性**造成的，如图**所示的简化形式的传热过程**。在SLM**过程监测**工作中最**明显**和最**受关注的过程特征**是与**熔池**相关的。

这些“**过程声音**”信号的**测量**包括**声学**和**电磁特征**。在SLM**过程**中，**测量**从**熔池**中发出的**电磁信号**的技术**相对成熟**得多，在**评估熔池大小、温度、稳定性**以及**材料的热历史**方面有很大的**前景**。

# SLM过程监测的技术难点

---

激光功率低

---

激光聚焦距离长

---

激光入射角变化大

---

扫描速度快

---

频繁激光启停

---

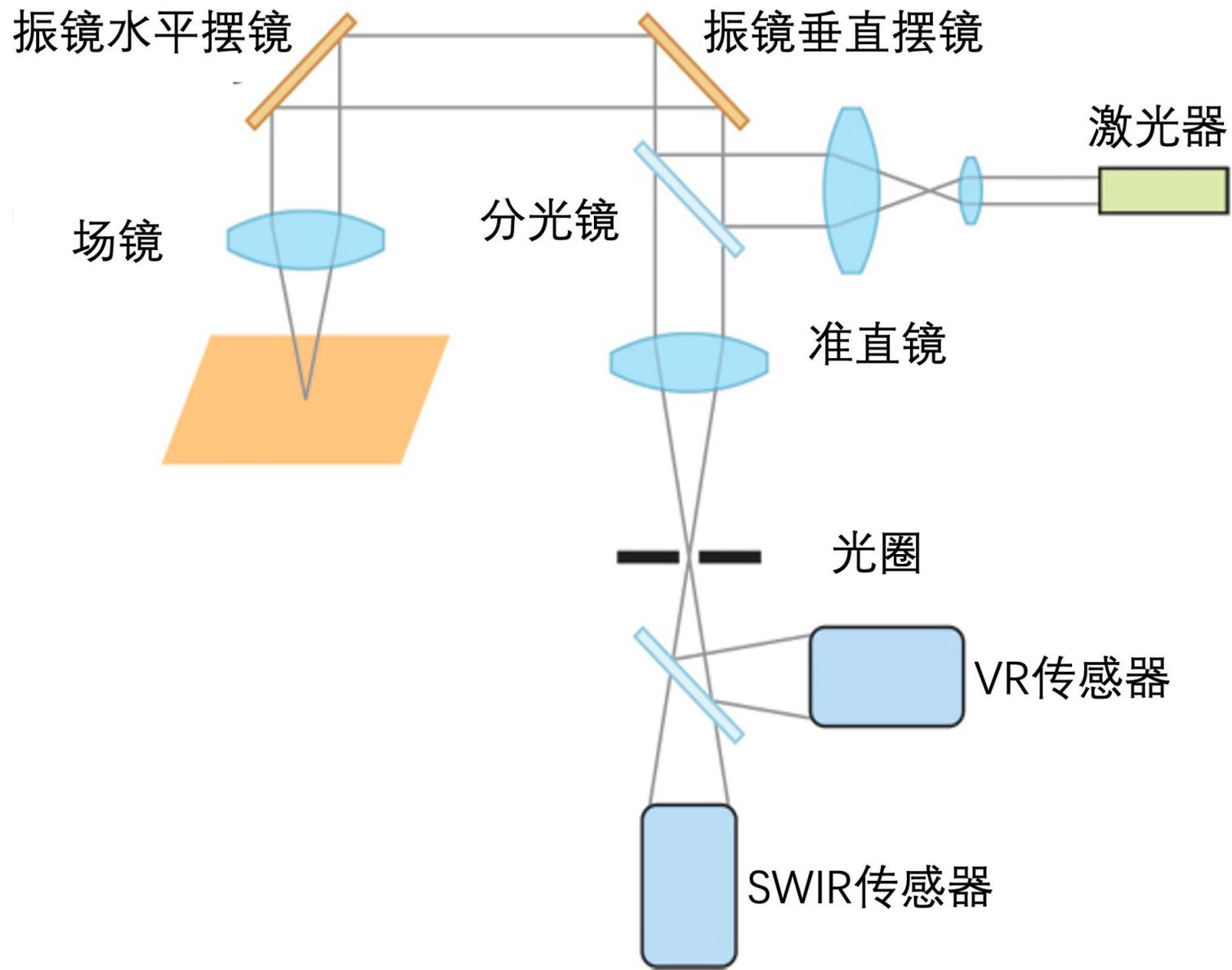
长时间连续加工

---

庞大的数据逆构工作

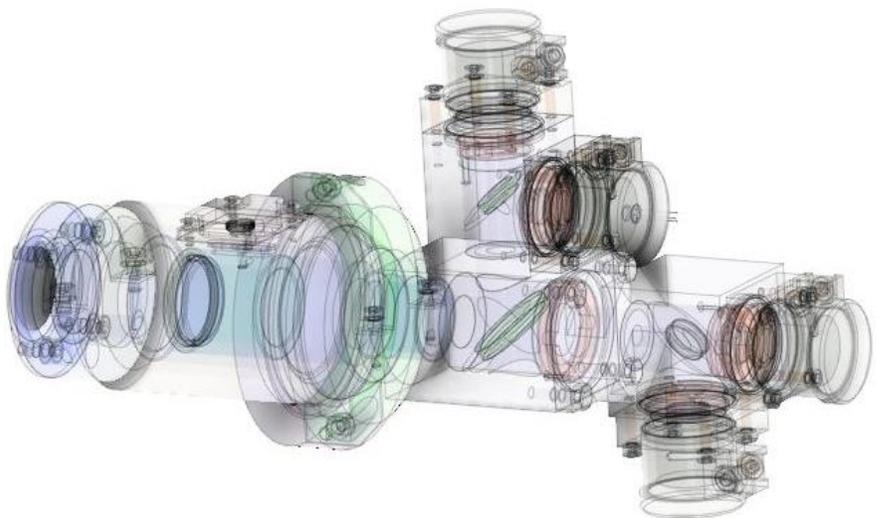
- 光学系统
- 信号处理系统
- 数据处理系统

# 系统原理



# 系统组成

## 光学系统



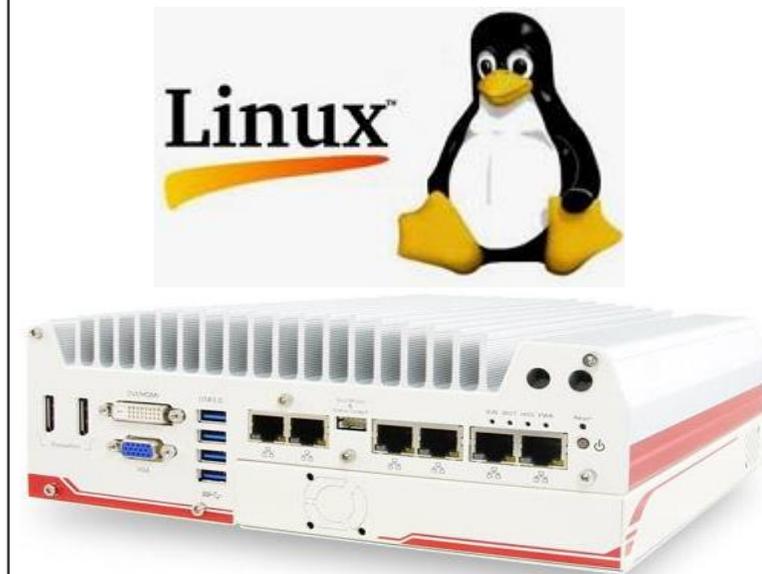
- 高灵敏度**传感器**
- 定制**光学分光系统**
- 高精度**光路对准系统**
- **优异的频率响应特性**
- **抗干扰能力强，屏蔽性能优异**

## 信号处理系统



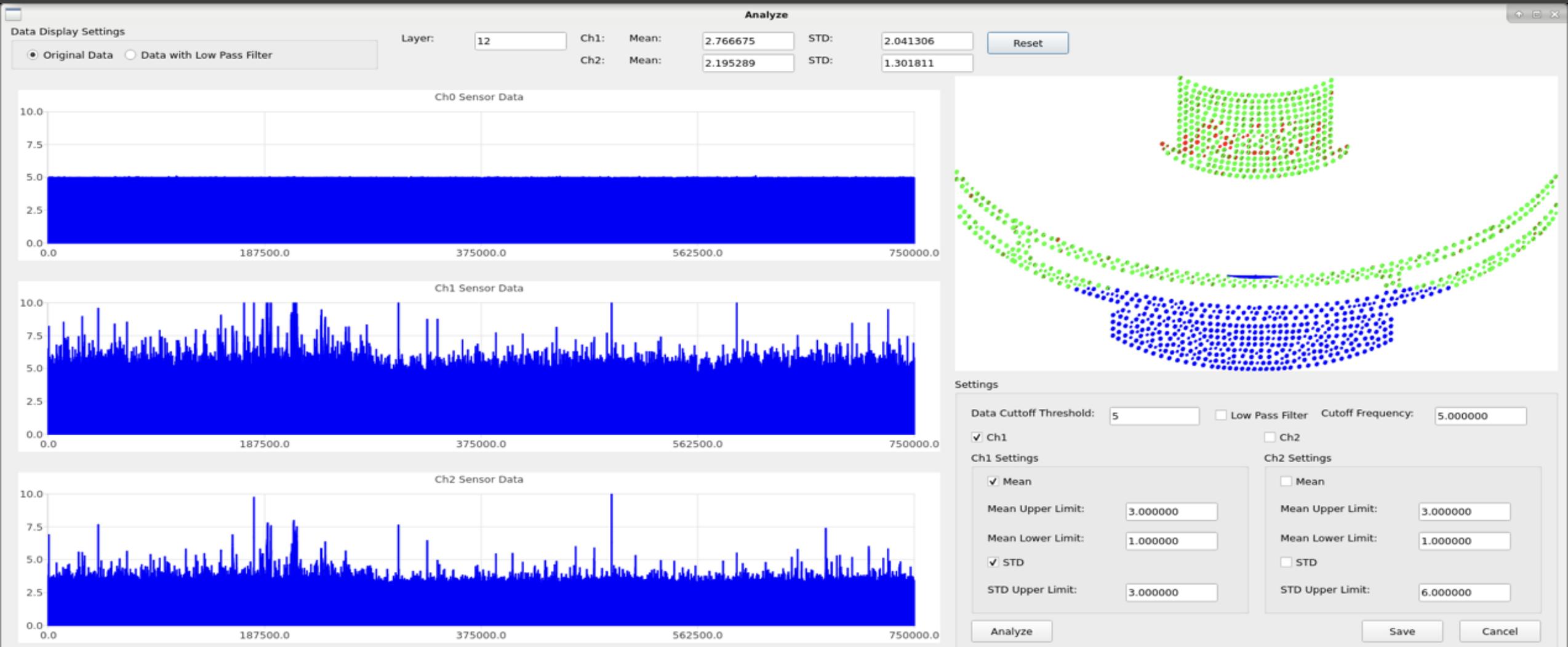
- 特殊**设计高信噪比电路**
- 高性能**多级滤波器**
- **100KHz高速采样频率**
- **低温度偏移系数**

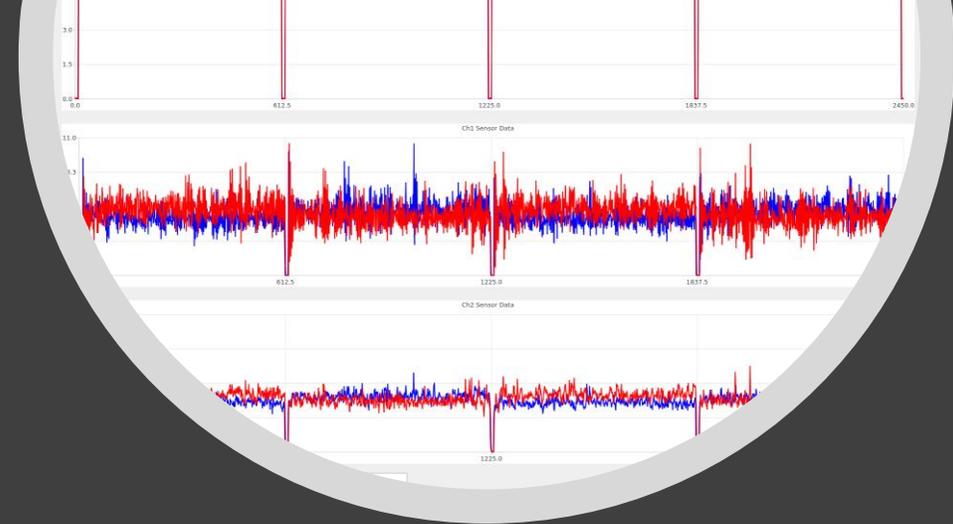
## 数据处理系统



- **Linux系统环境**
- **支持X86与ARM双架构**
- **高通量数据库**
- **数据处理分析算法**
- **路径规划逆构软件**
- **5G远程OTA系统升级**

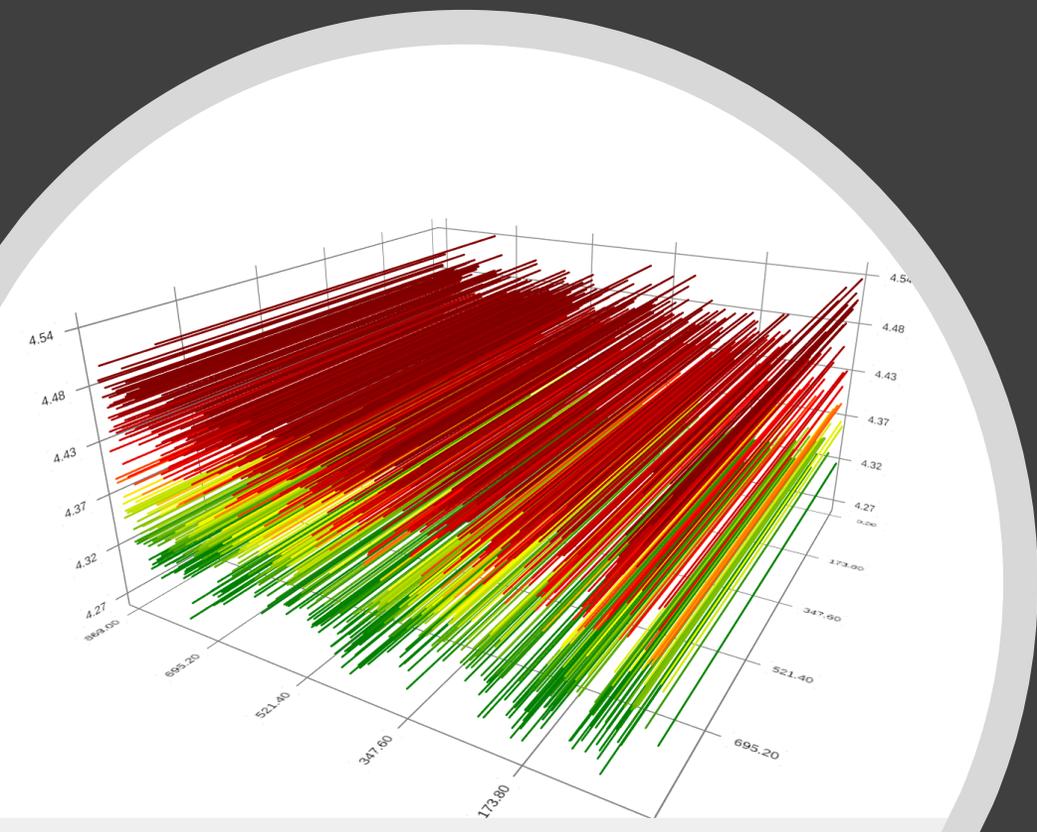
# 数据处理及分析系统软件界面

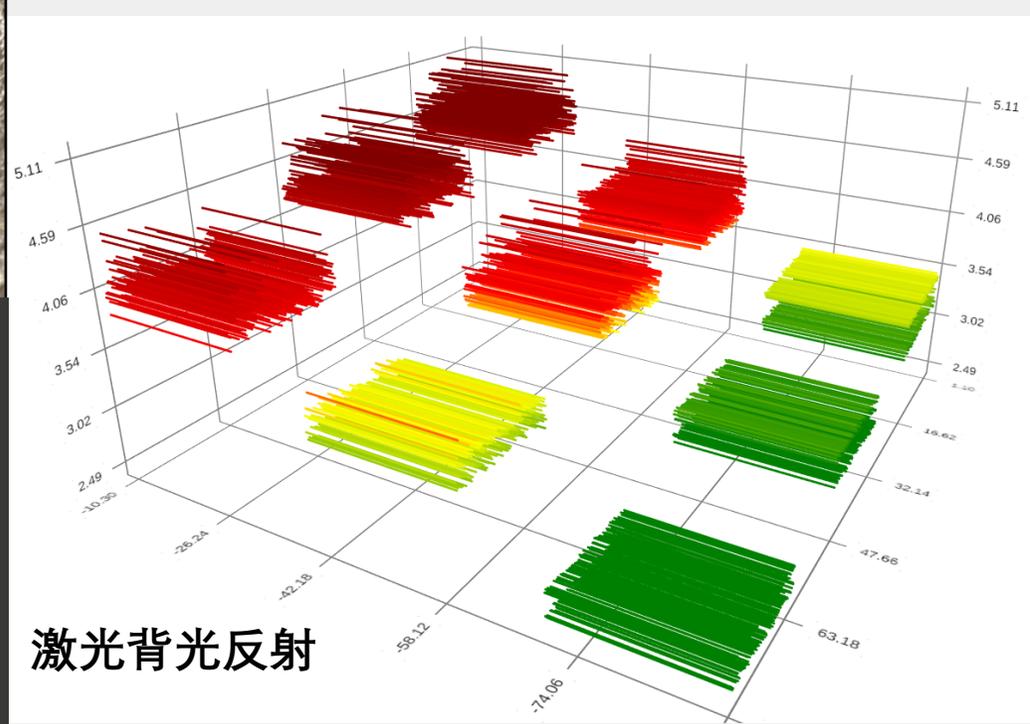
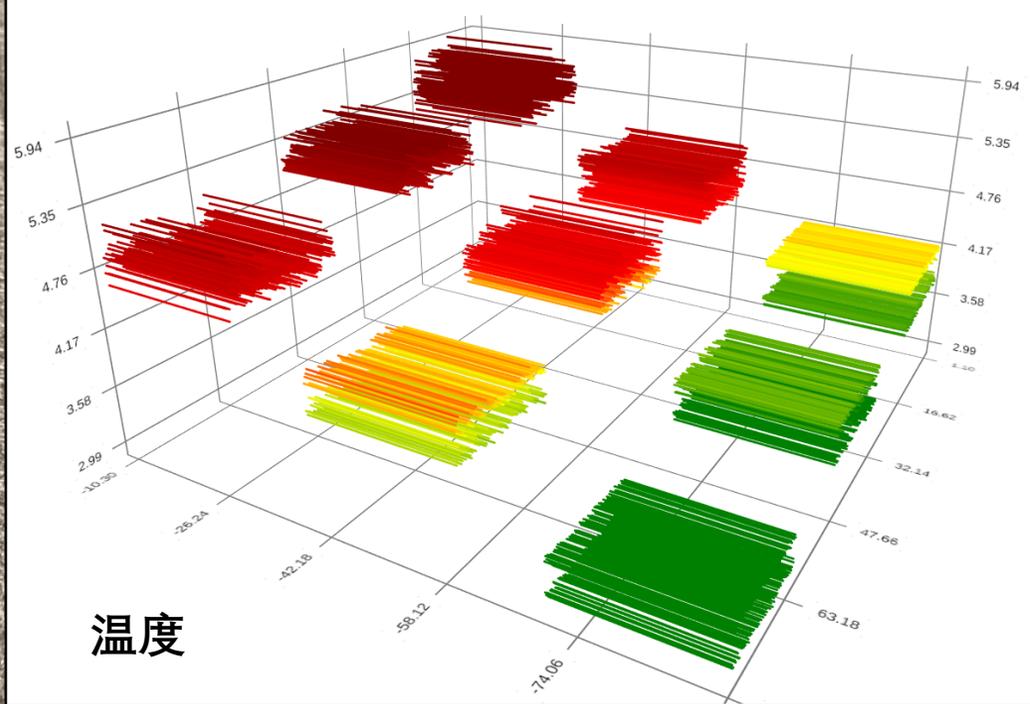
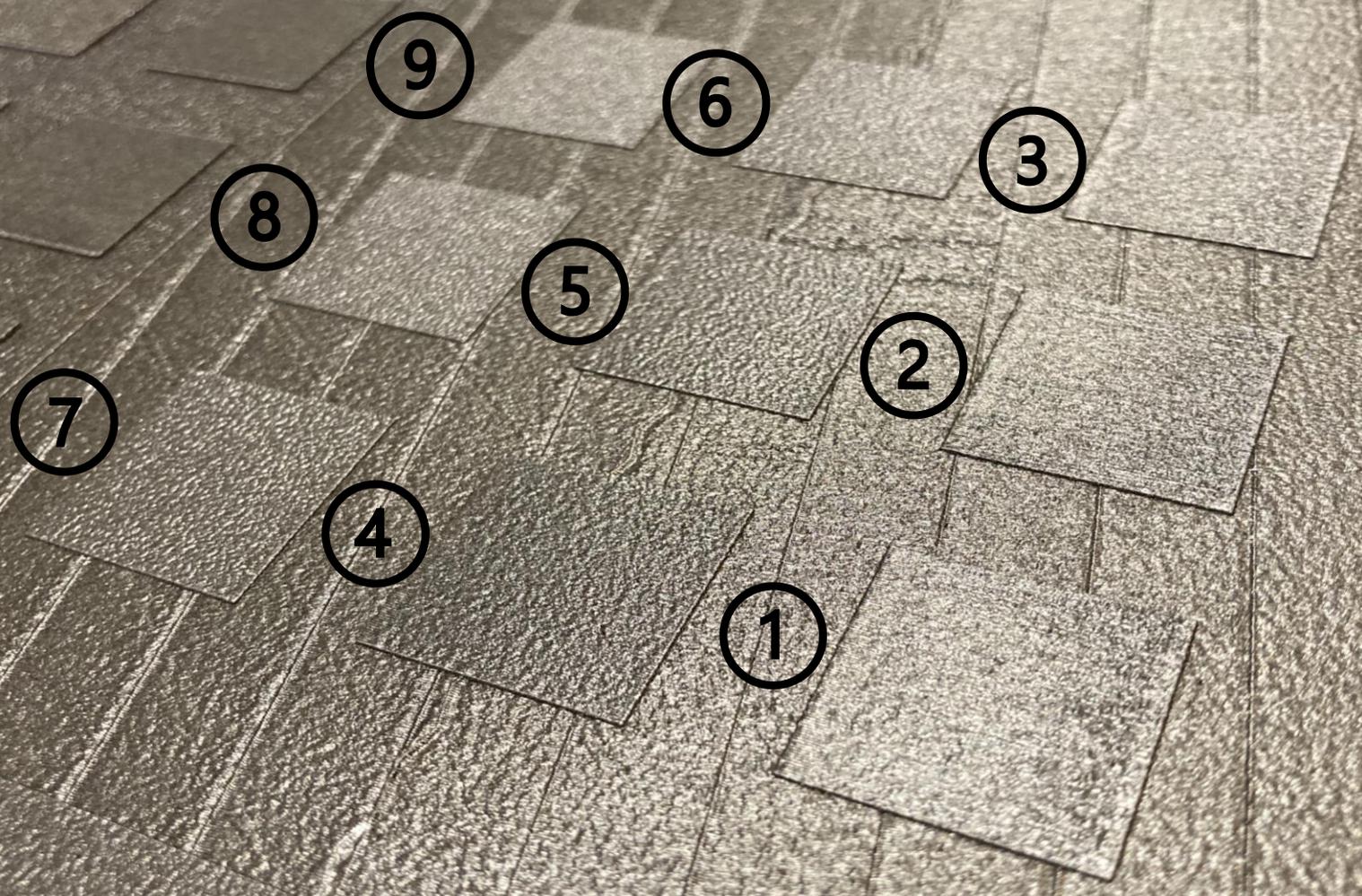




# 系统测试

- 激光功率测试
- 激光焦点测试
- 铺粉与未铺粉测试
- 风场测试
- 工艺参数开发

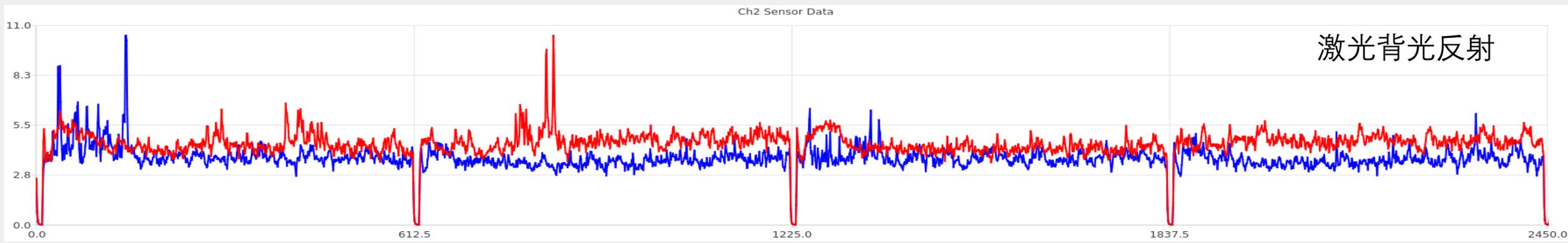
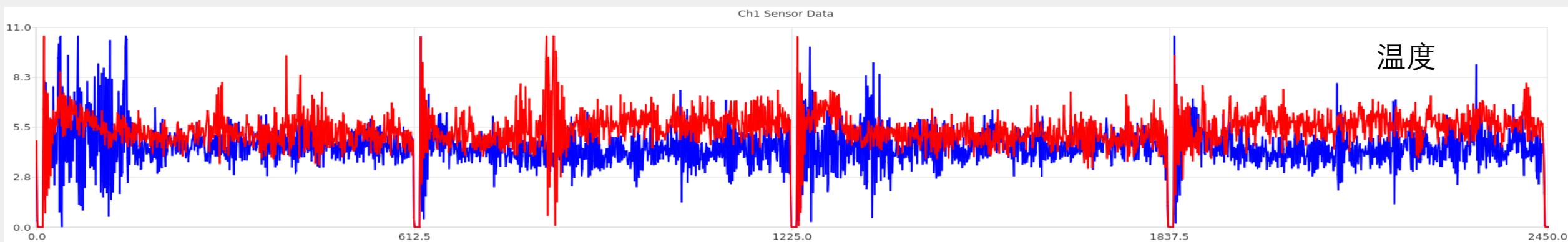
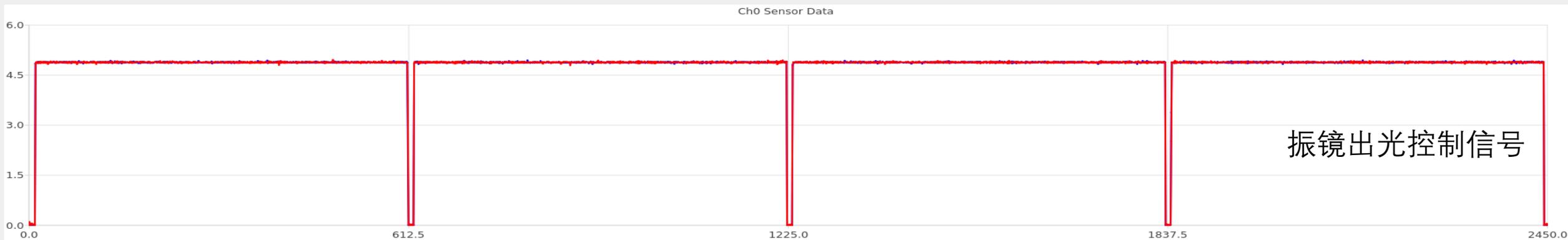




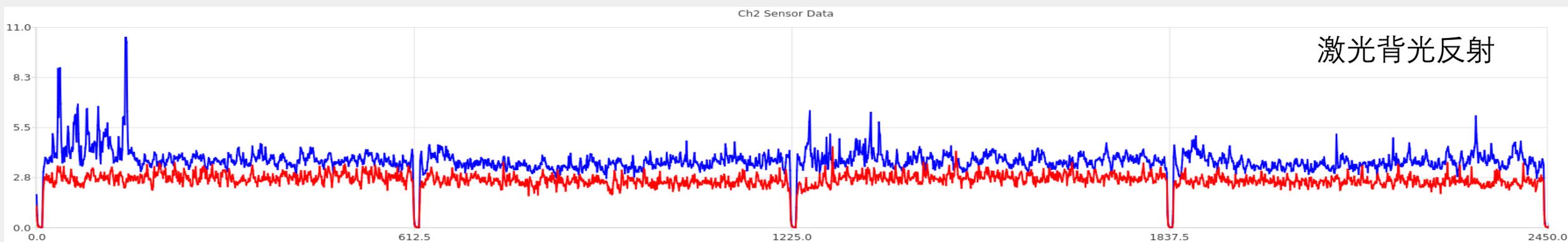
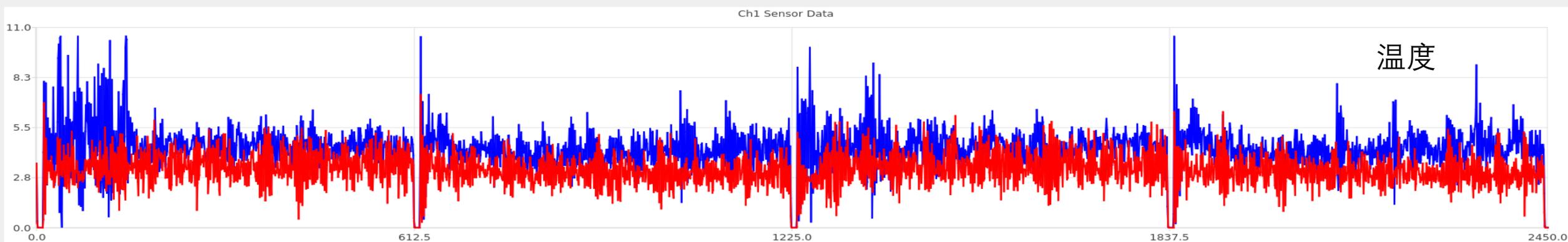
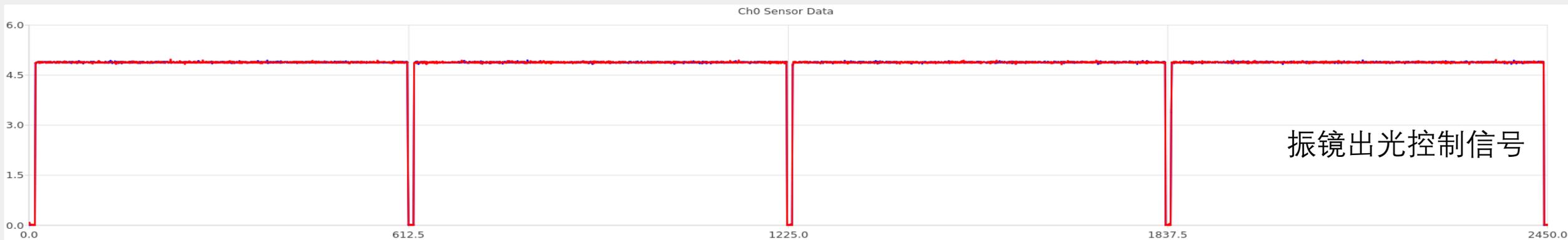
### 激光功率测试：

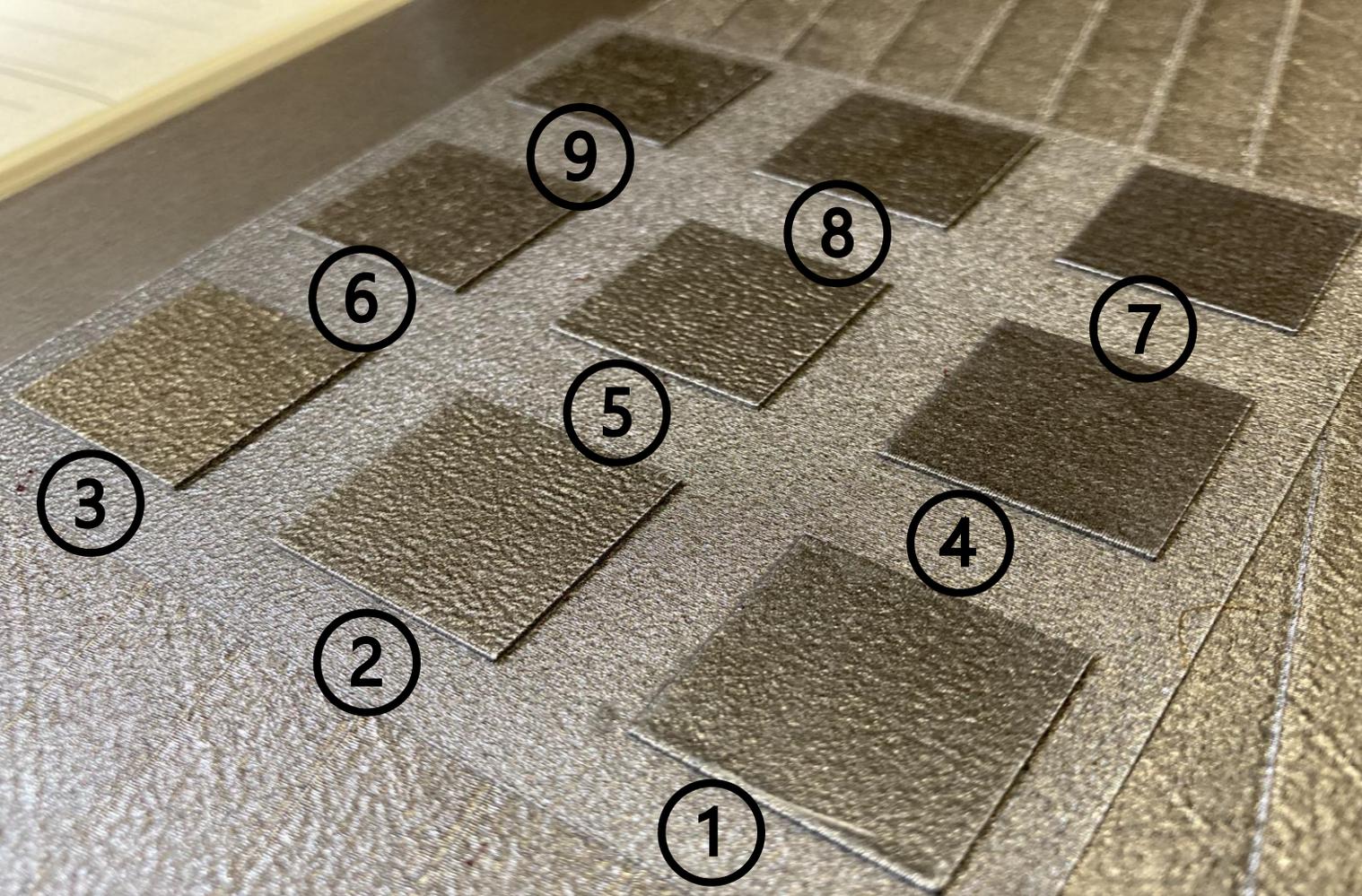
- |                  |                  |
|------------------|------------------|
| 1. 总功率的40%, 200W | 6. 总功率的65%, 325W |
| 2. 总功率的45%, 225W | 7. 总功率的70%, 350W |
| 3. 总功率的50%, 250W | 8. 总功率的75%, 375W |
| 4. 总功率的55%, 275W | 9. 总功率的80%, 400W |
| 5. 总功率的60%, 300W |                  |

# 激光功率测试：60%–80%，300W–400W



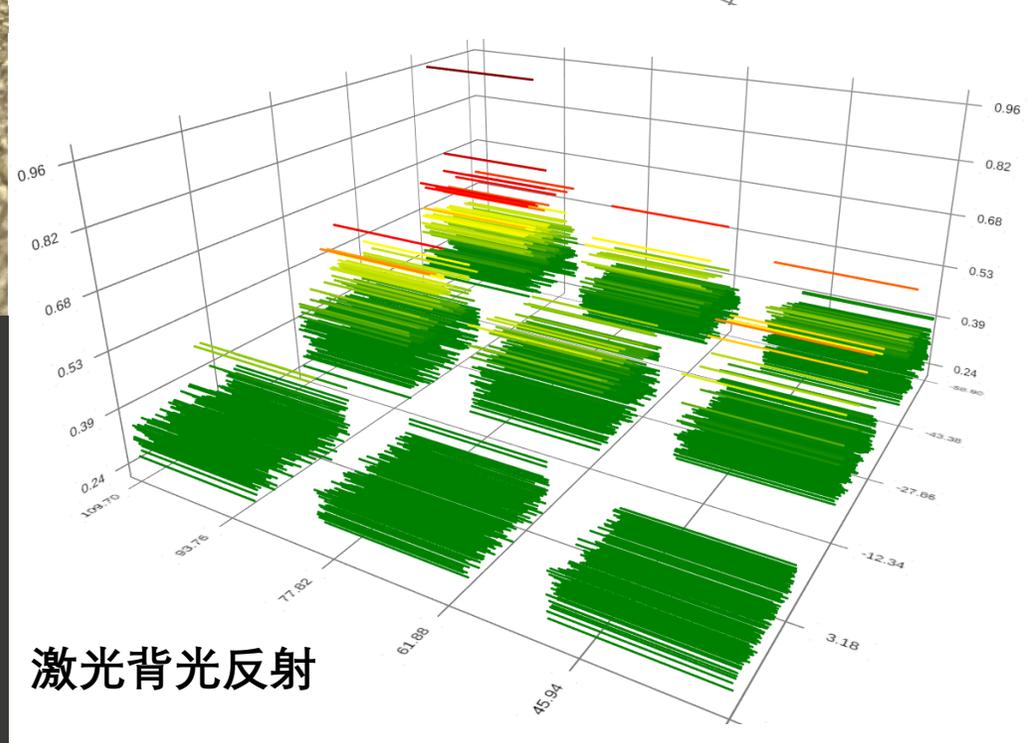
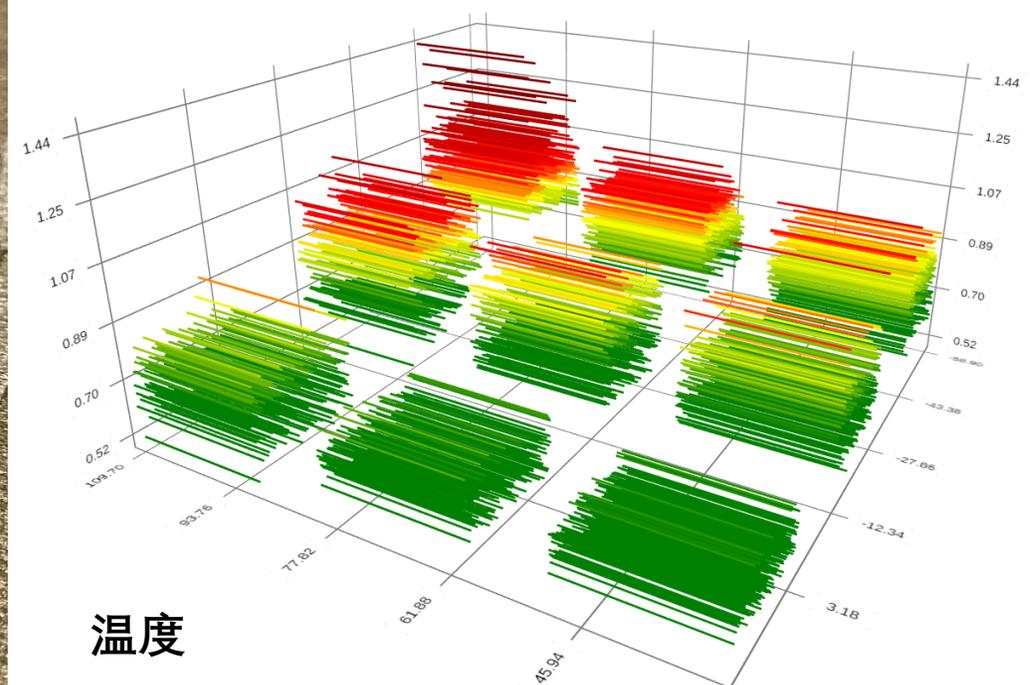
# 激光功率测试：60%-40%，300W-200W





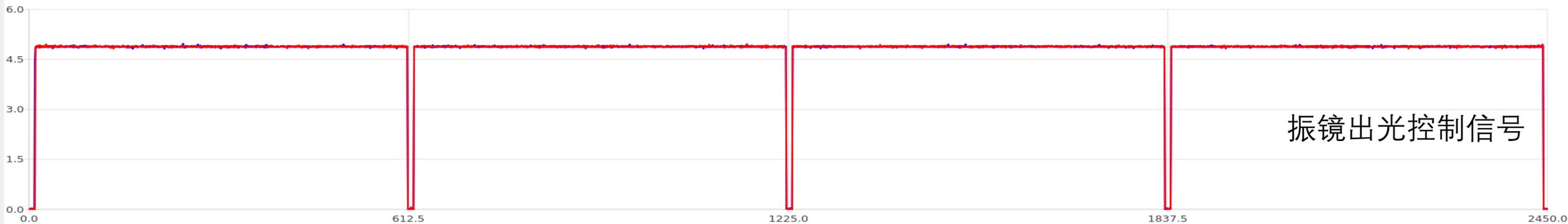
**激光焦点测试：**

1. 光斑直径：0.05mm	6. 光斑直径：0.55mm
2. 光斑直径：0.15mm	7. 光斑直径：0.65mm
3. 光斑直径：0.25mm	8. 光斑直径：0.75mm
4. 光斑直径：0.35mm	9. 光斑直径：0.85mm
5. 光斑直径：0.45mm	

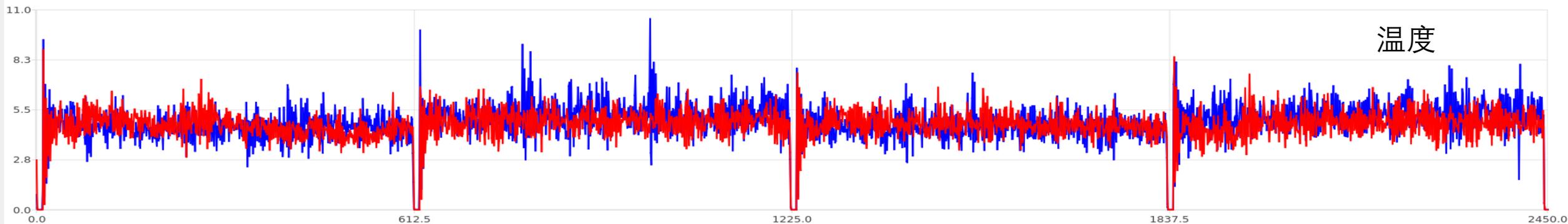


# 激光焦点测试：0.25mm-0.05mm

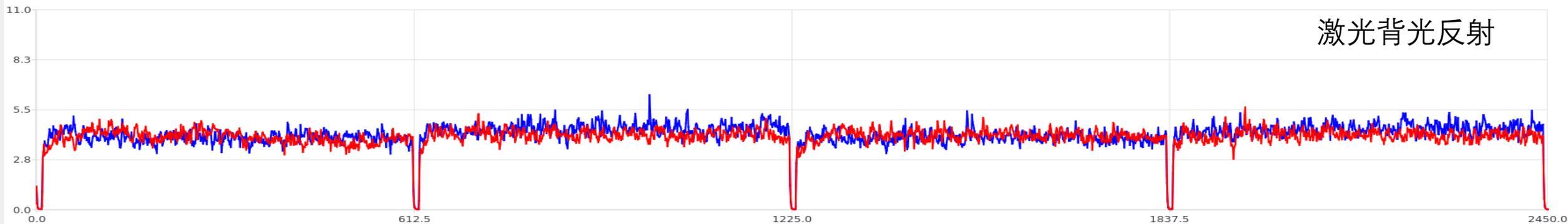
Ch0 Sensor Data



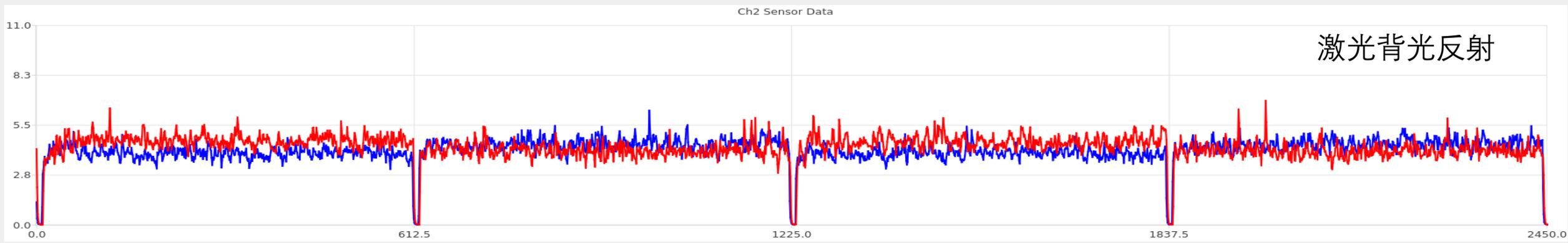
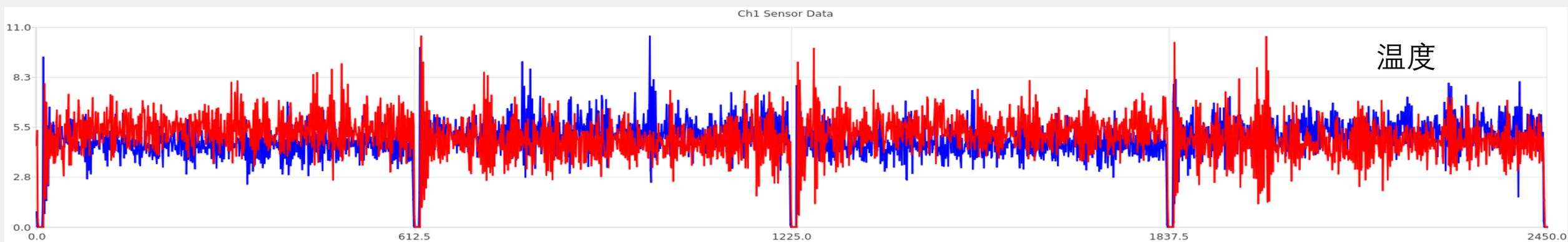
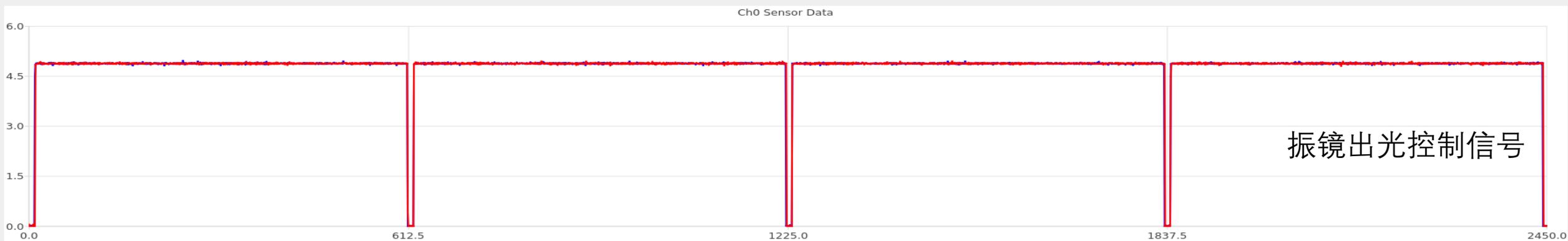
Ch1 Sensor Data

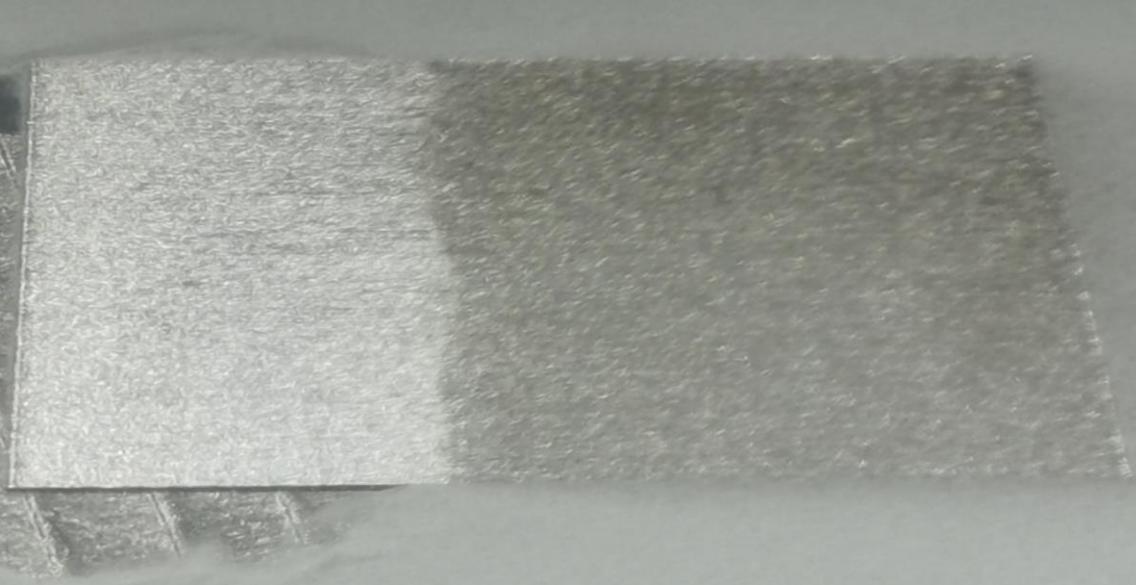


Ch2 Sensor Data

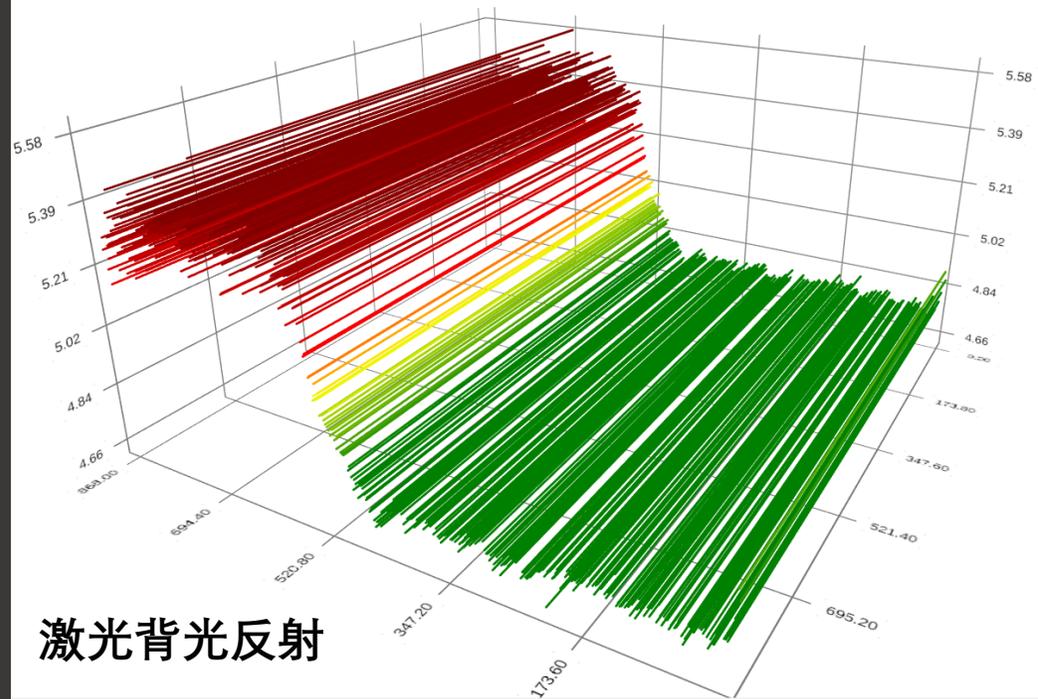
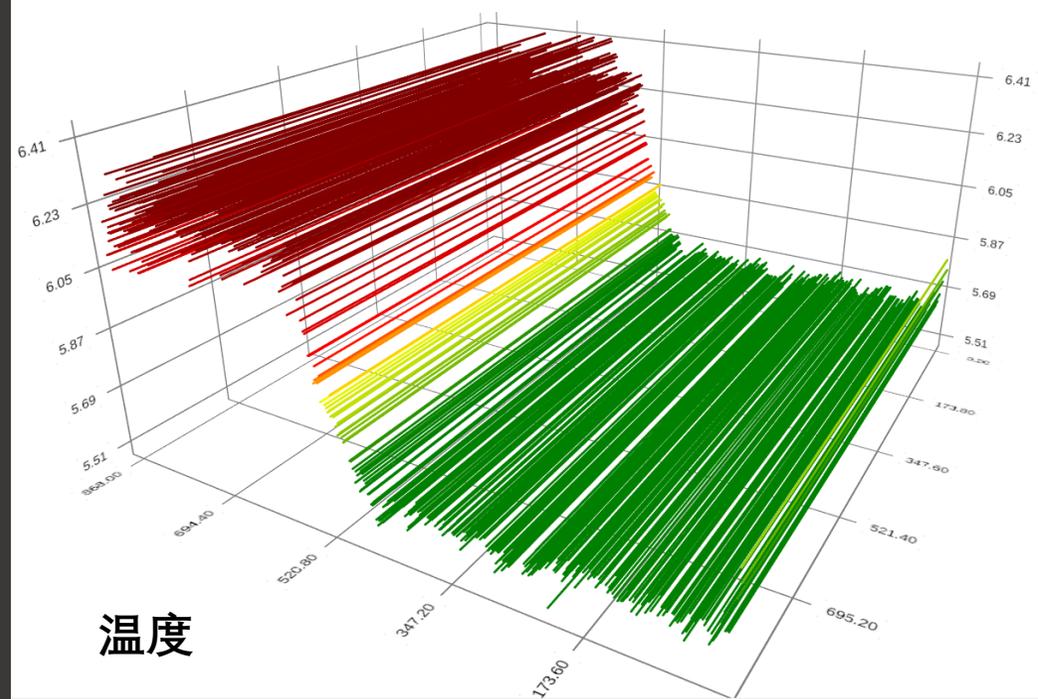
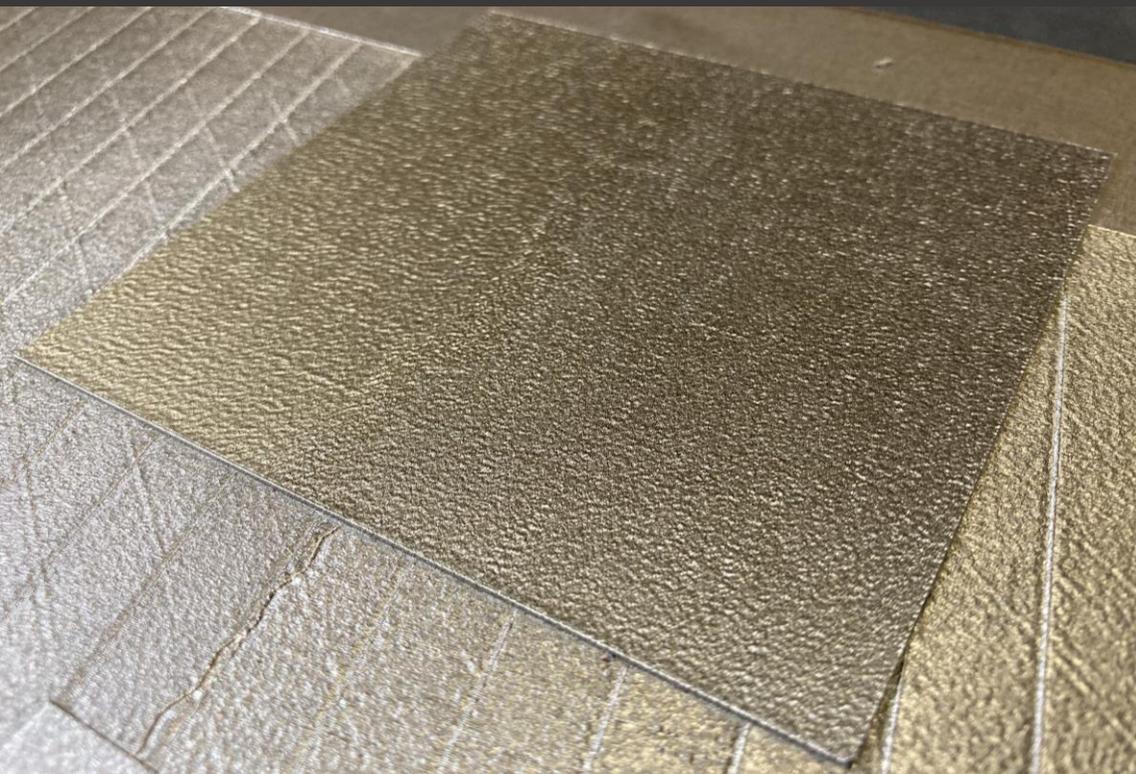


# 激光焦点测试：0.25mm-0.85mm

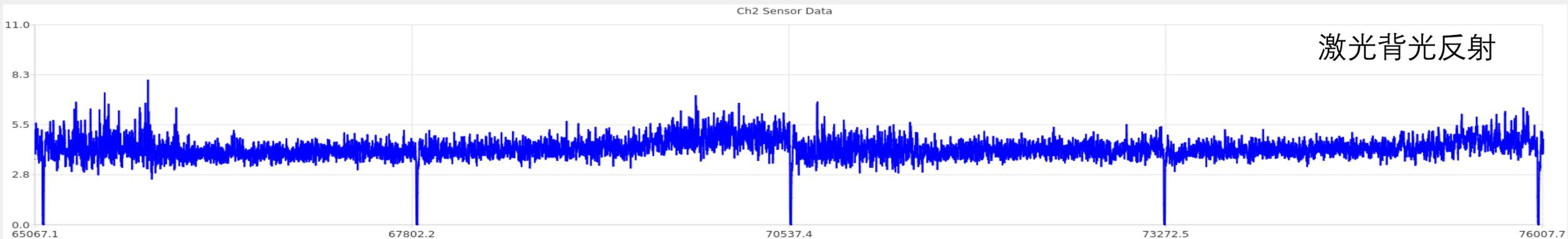
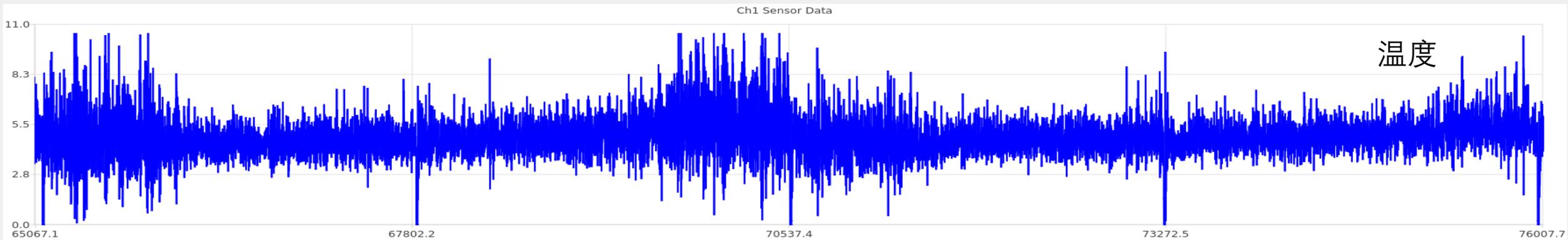
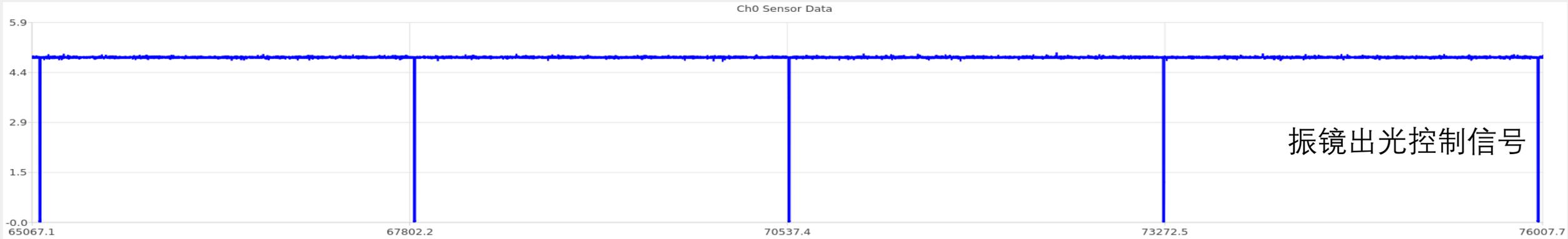


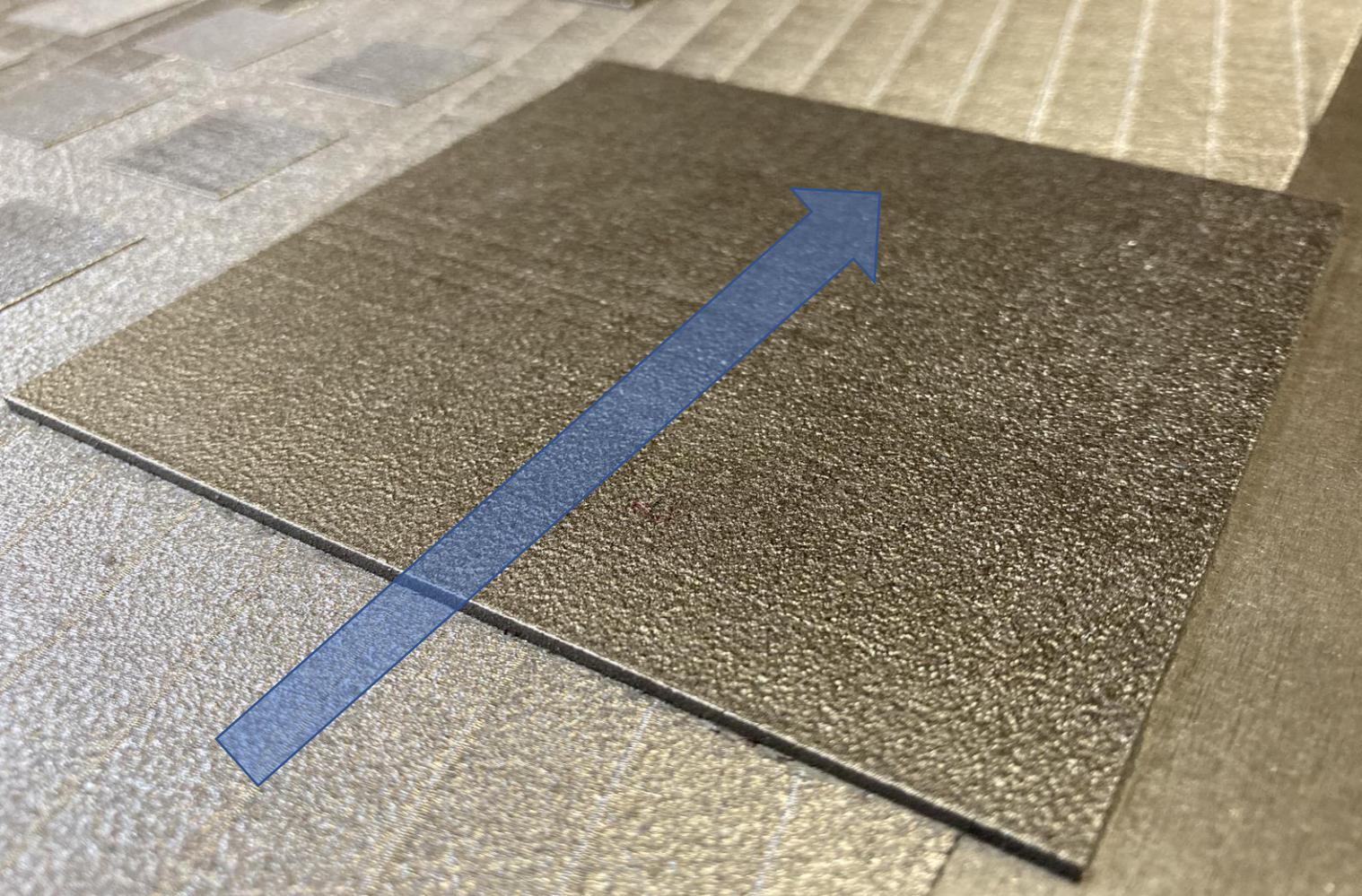


铺粉与未铺粉测试

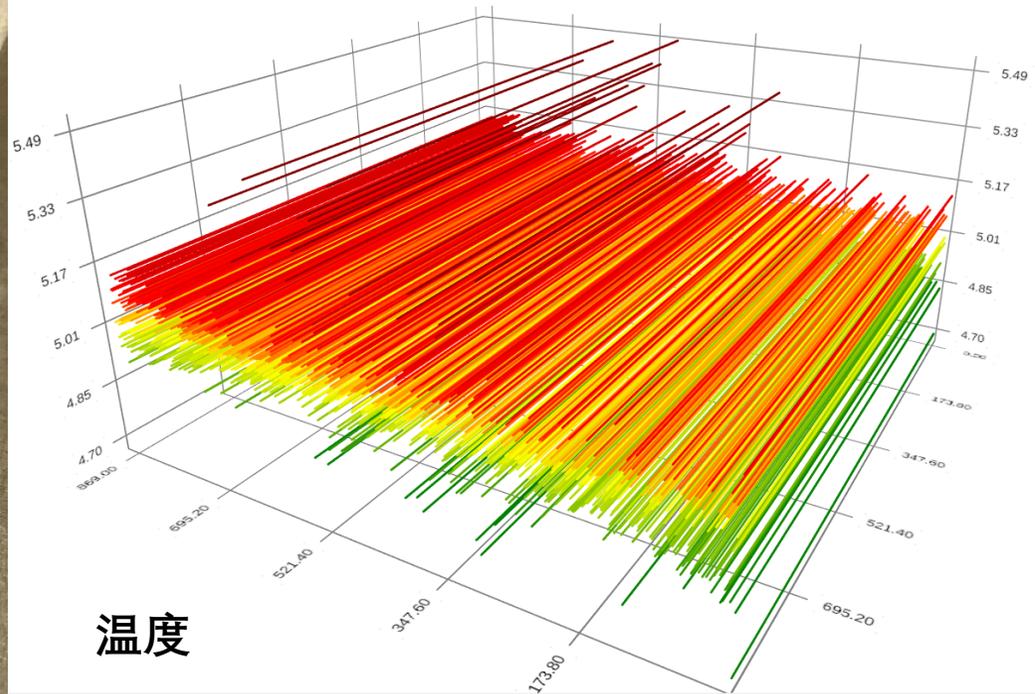


# 铺粉与未铺粉测试

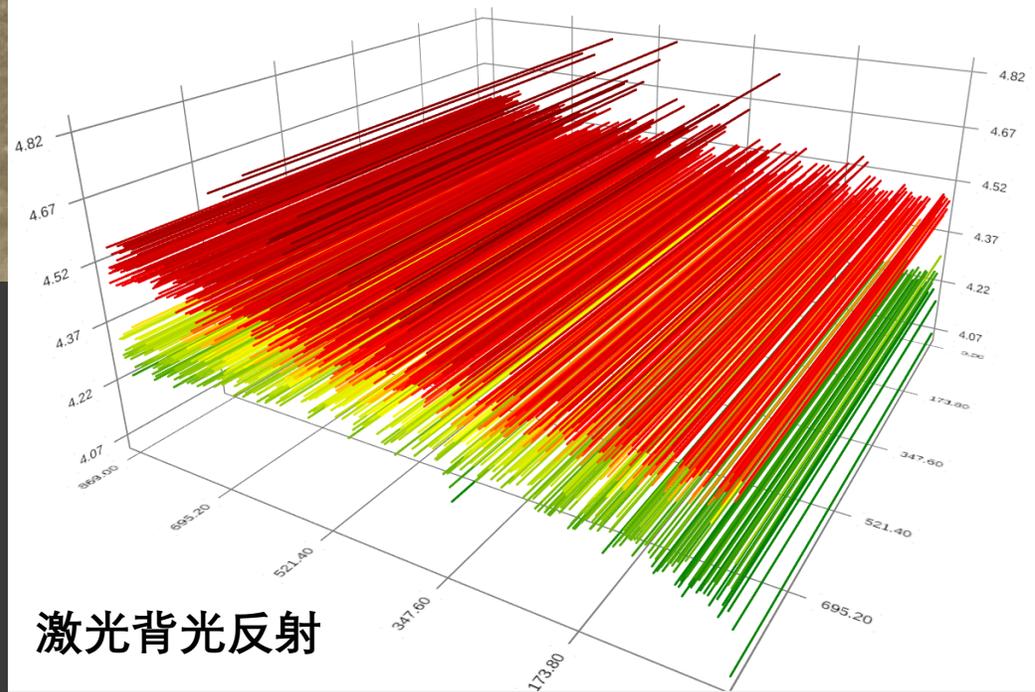




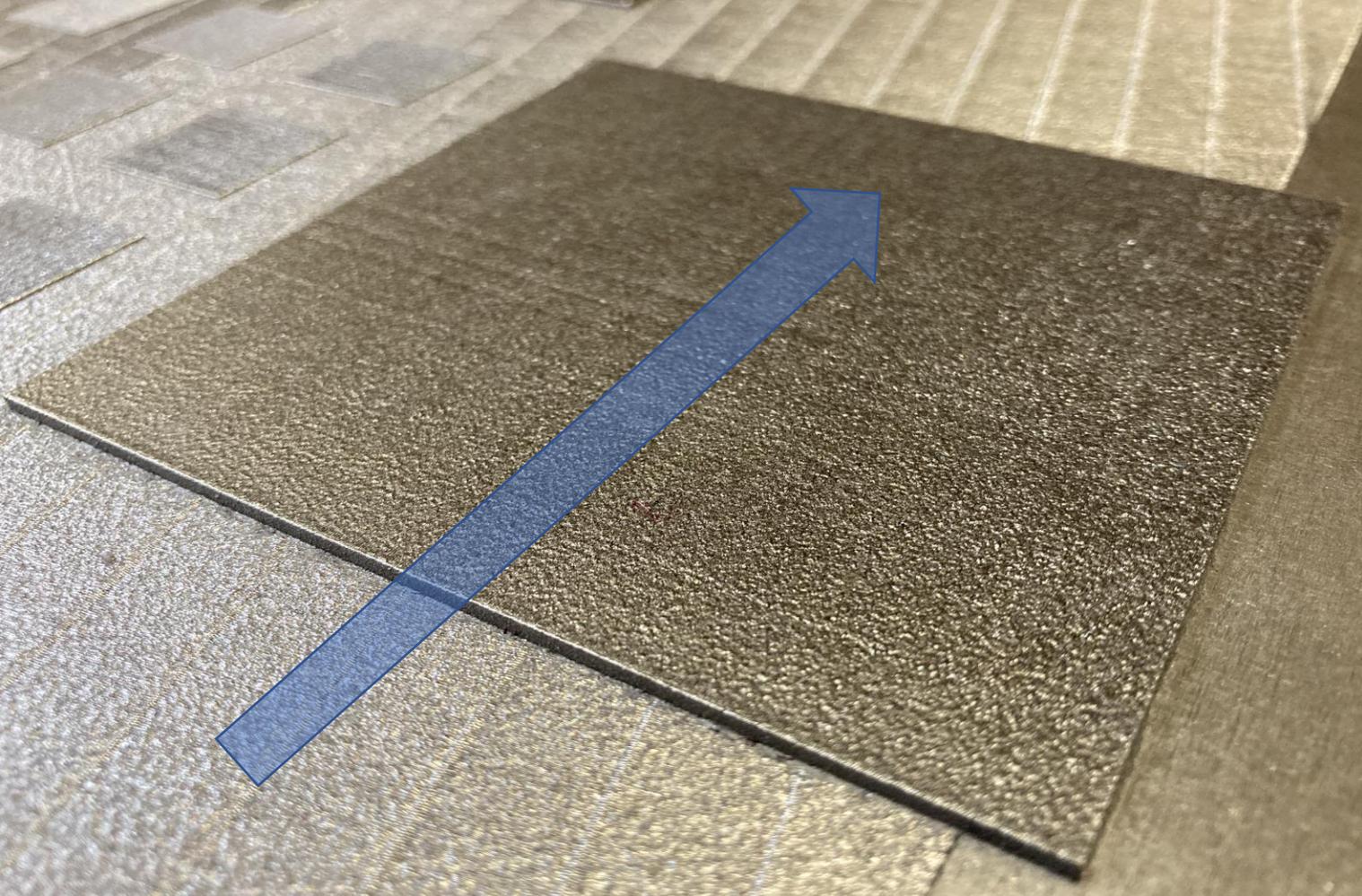
风场测试：  
风场流量：130立方米/小时



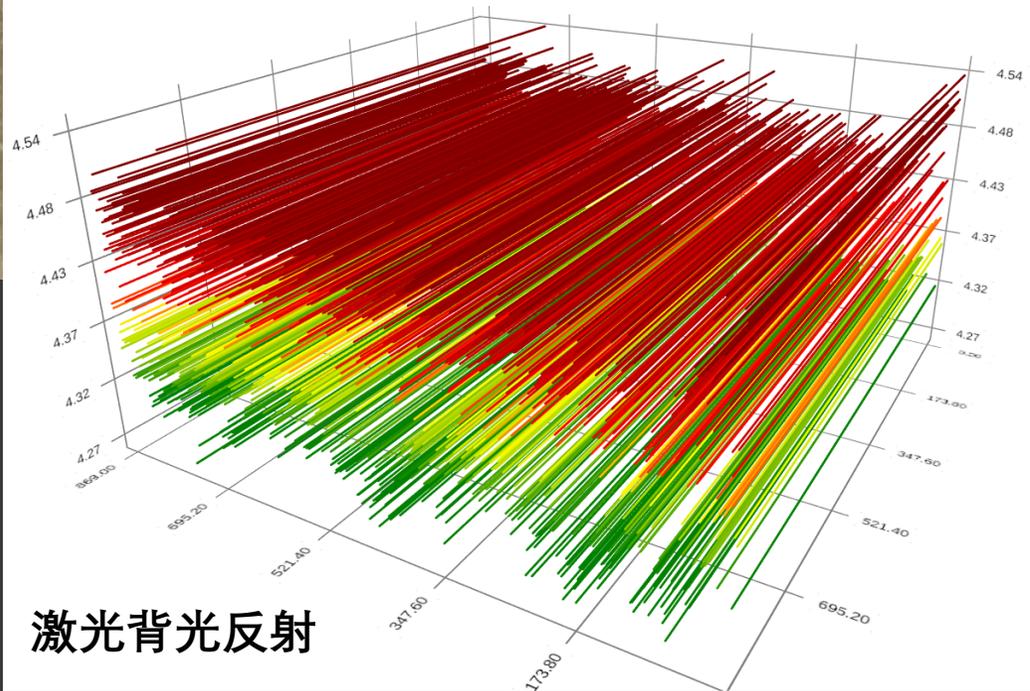
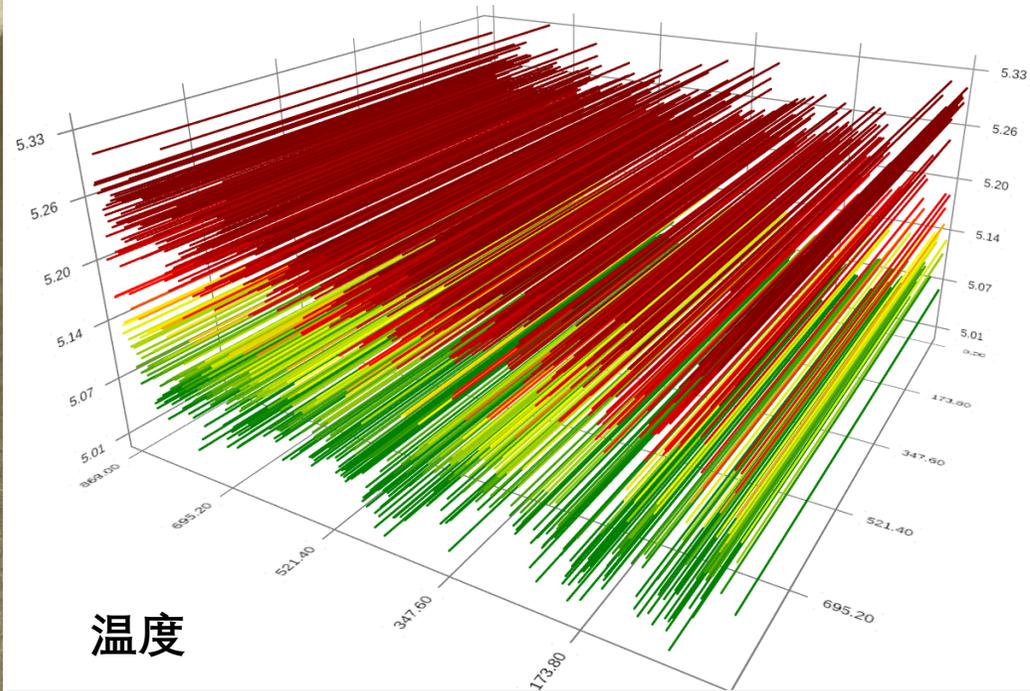
温度



激光背光反射



风场测试：  
风场流量：70立方米/小时

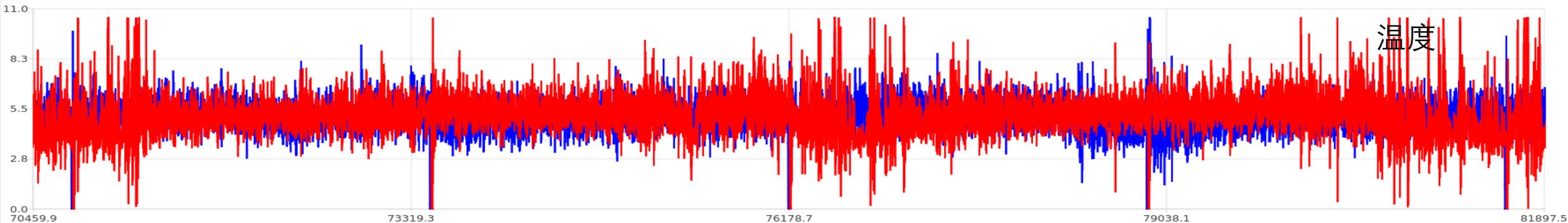


# 风场测试

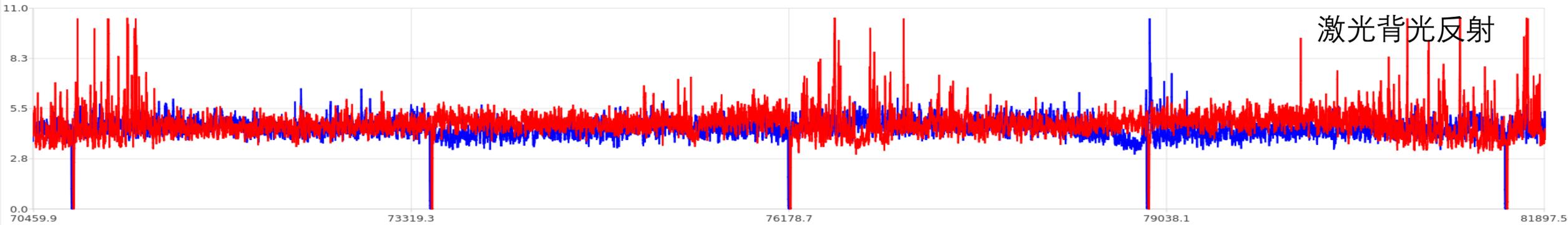
Ch0 Sensor Data



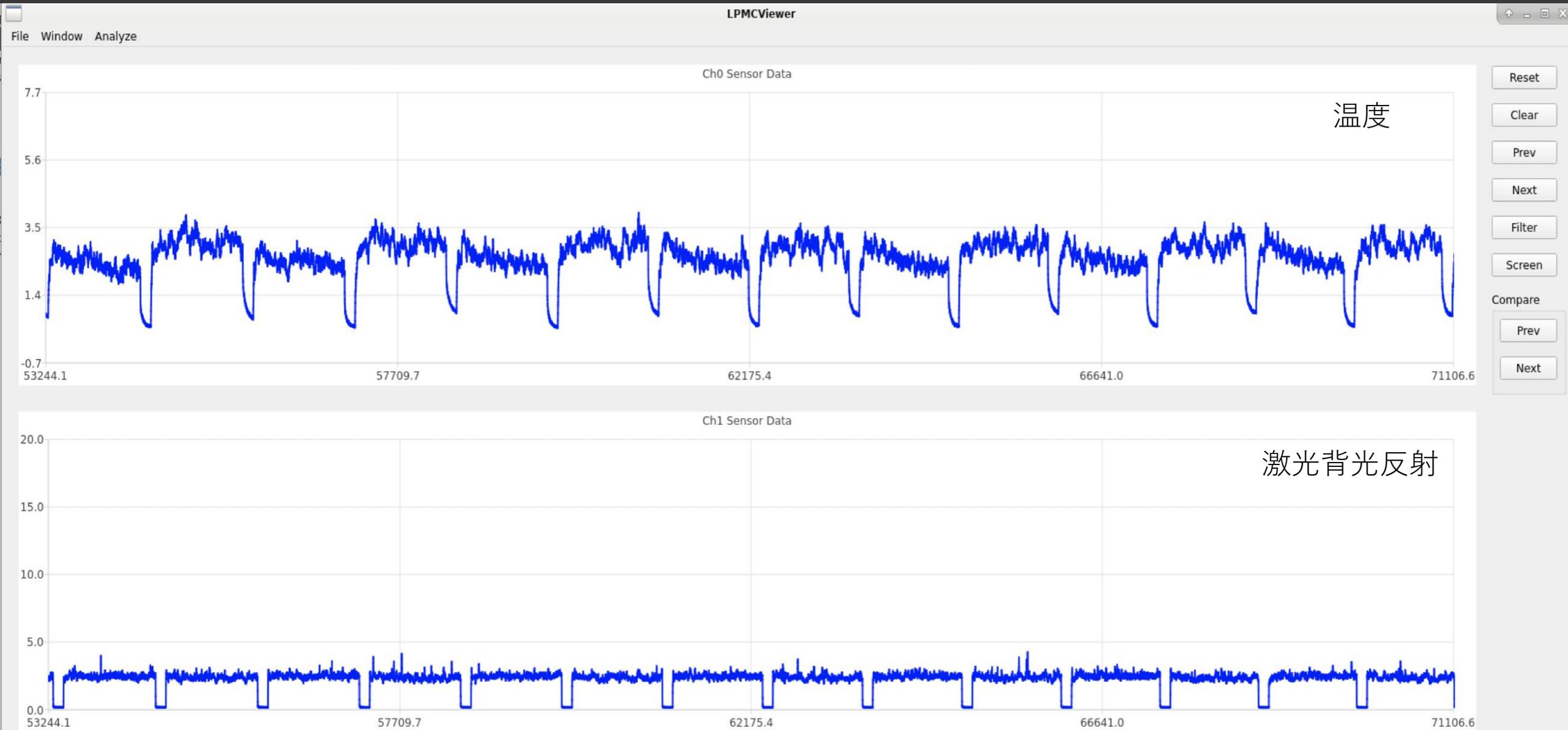
Ch1 Sensor Data



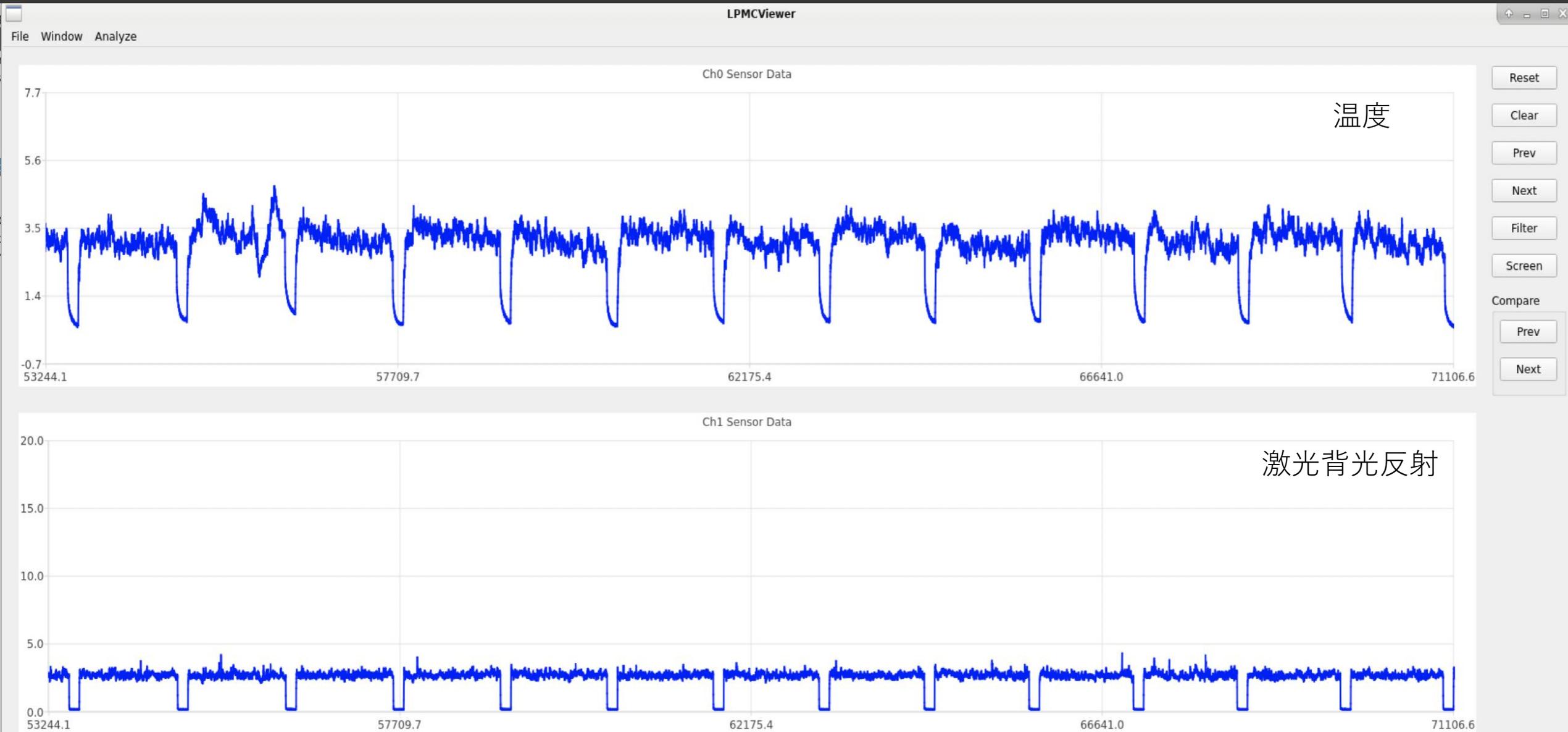
Ch2 Sensor Data



# 240W功率



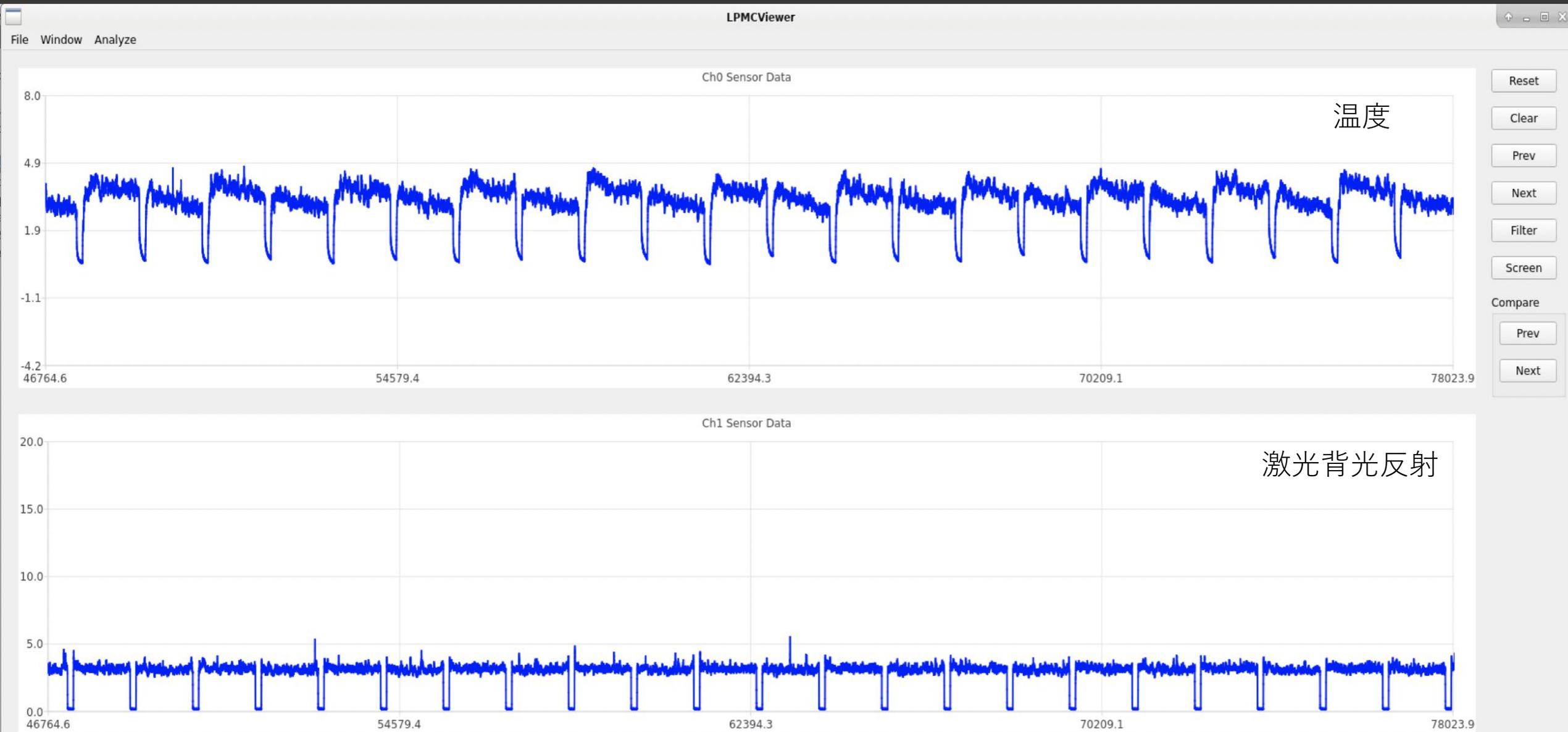
# 270W功率



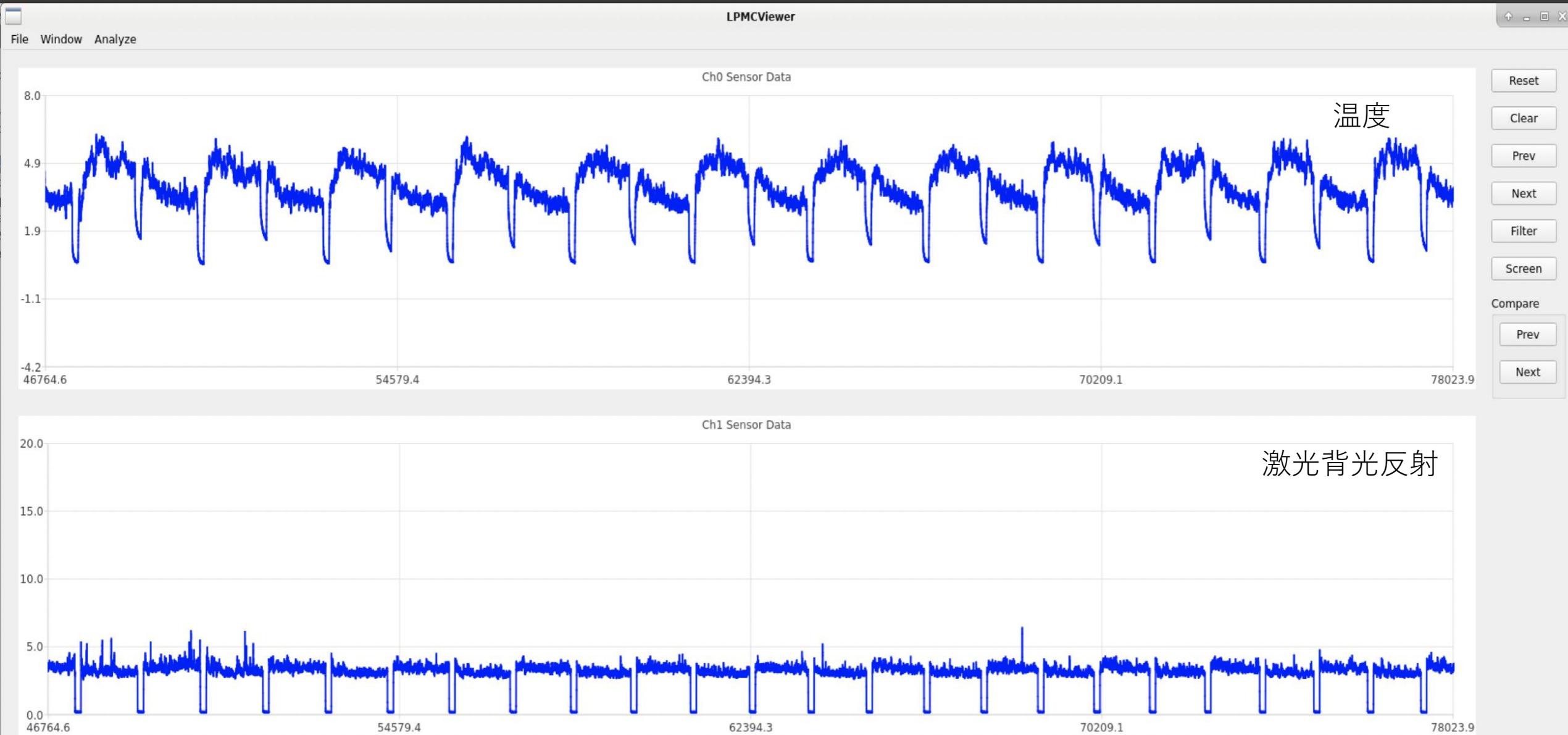
# 300W功率



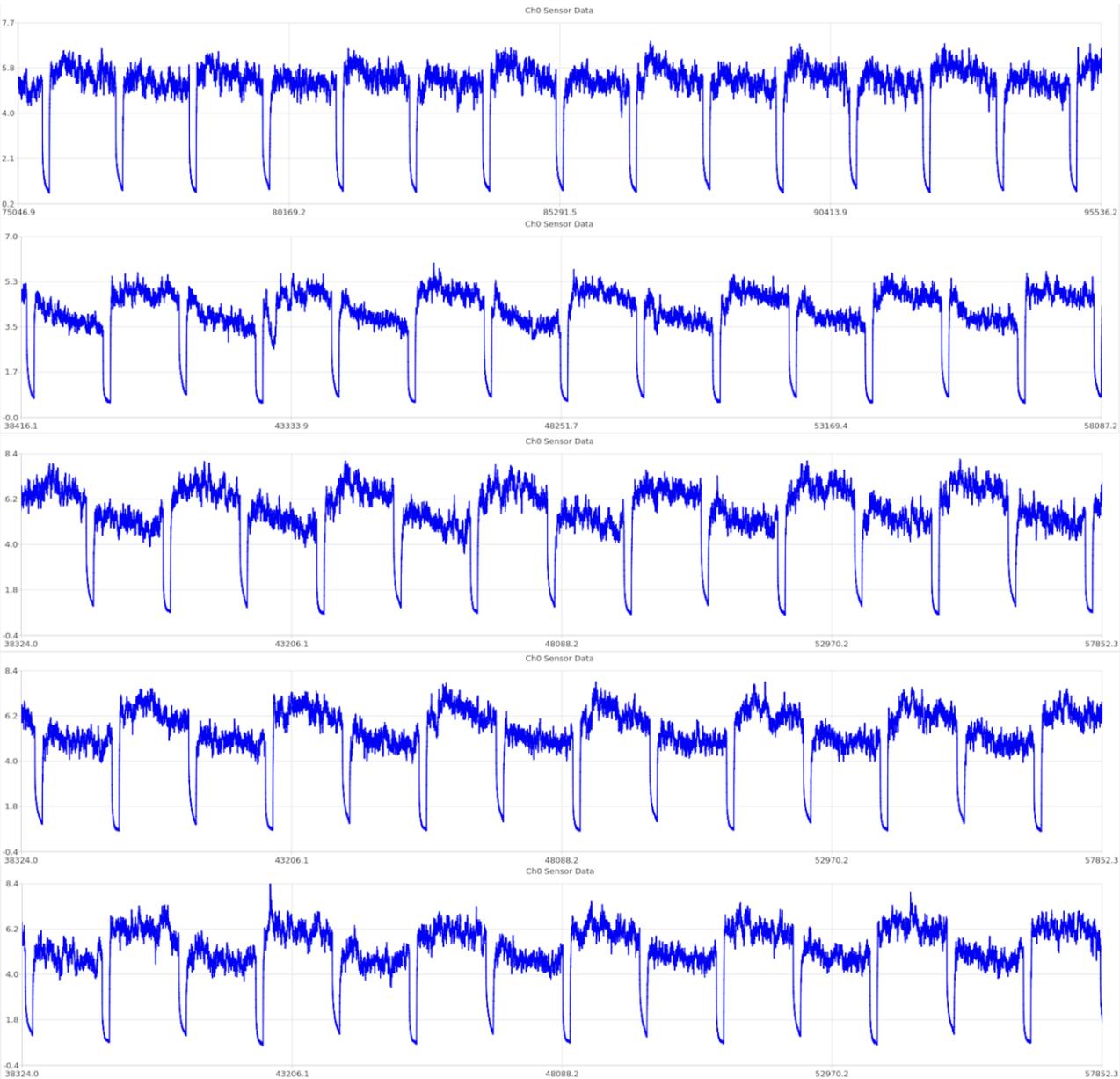
# 330W功率



# 360W功率



# 闭环控制



连续打印15分钟的监测数据

系统在20分钟时发现了曲线变化趋势，并要求打印机调整功率，并通知现场人员。

连续打印30分钟的监测数据

系统在30分钟时持续要求打印机调整功率，并通知现场人员。

连续打印45分钟的监测数据

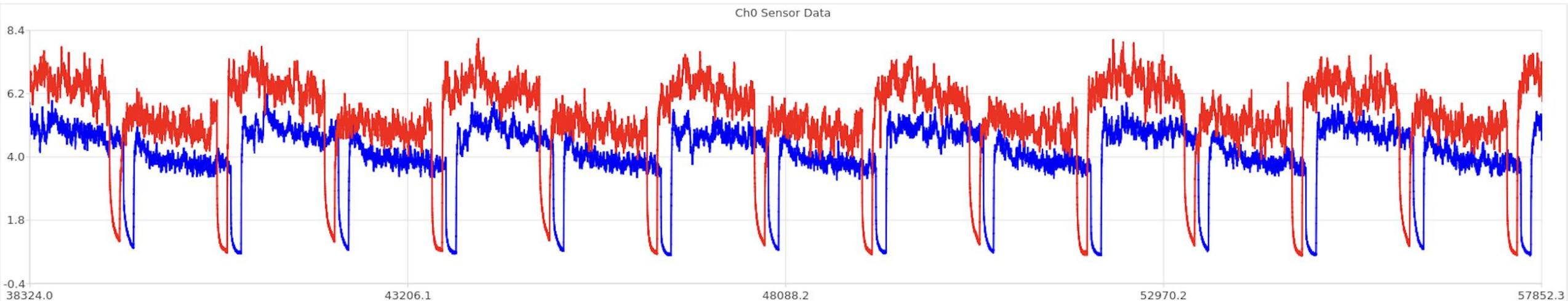
系统在45分钟时持续要求打印机调整功率，通知现场人员，并建议暂停打印。

连续打印60分钟的监测数据

连续打印90分钟的监测数据

系统在90分钟时持续要求打印机调整功率，通知现场人员，并建议终止打印。

# 连续打印30分钟与90分钟的曲线对比



30分钟数据为蓝色曲线

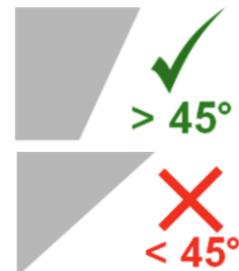
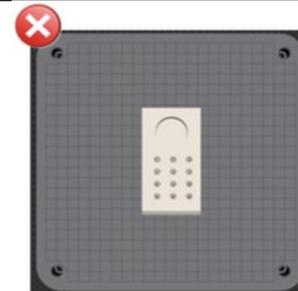
90分钟数据为蓝色曲线

# 实时质量监测基于数据挖掘将实现

过程数据  
人工智能  
材料基因组

设计

- 增材结构设计优化
- 无支撑工艺
- 路径规划优化



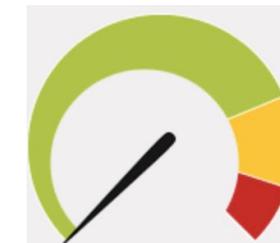
工艺

- 特种材料的快速工艺迭代
- 无支撑工艺优化
- 材料的工艺可行性评估
- 动态工艺研究



设备

- 无人值守下的设备健康度追踪和管理
- 国产替代设备的性能评估和优化
- 过程闭环反馈，过程干预，自我决策系统



产品

- 产品全过程数字化
- 分布式制造质量评估
- 产品生产质量追溯



增材制造过程中的  
实时质量监测及闭  
环控制系统



**镭脉工业**  
Laser Pulse