



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

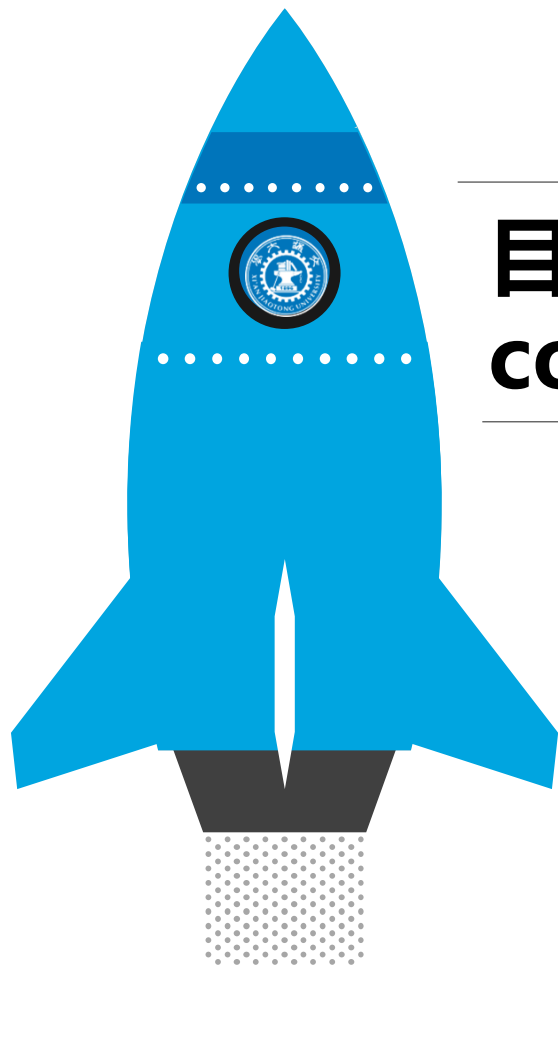
# 硅钢片视觉尺寸测量与表面缺陷检测 方法研究及应用

学生：秦敏杰

指导老师：吕红强

自动控制与检测技术研究所

2023年7月18日



## 目录 content

一、研究背景及意义

二、研究内容

三、现阶段工作进展

四、后期工作计划



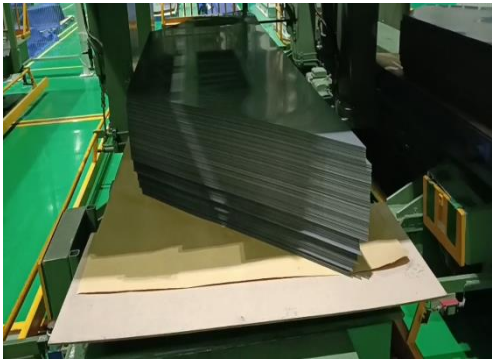
# 1

## 研究背景意义

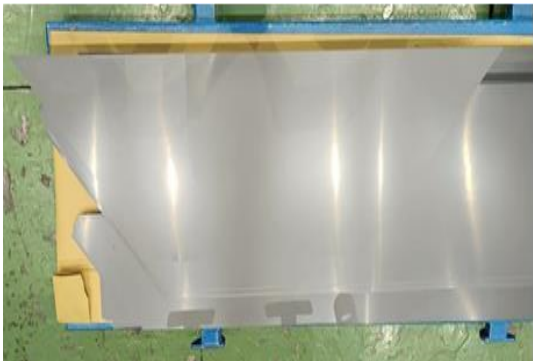
硅钢片是一种含碳极低的硅铁软磁合金，具有导磁率高、矫顽力低、电阻系数大等特性，硅钢片料经过冲剪叠压制作成铁芯，广泛应用于电机、电器、变压器、电工仪表和家电设备中,对尺寸精度和表面质量有较高的要求。



硅钢片生产车间



待剪切硅钢片料



问题	影响	处理现状
尺寸不一致	成品叠压无法对齐，影响铁芯磁感性能	测量平台人工对齐读数
表面缺陷	损坏外观，应力集中，导致破裂和腐蚀	人工分拣

## 尺寸测量

- 人工测量：
  - 效率低
  - 人工成本高
  - 一致性差，易受人为因素影响
  - 自动化程度低
- 视觉测量：
  - 无接触测量，对检测目标无损伤
  - 降低成本
  - 提高精度
  - 提高自动化程度

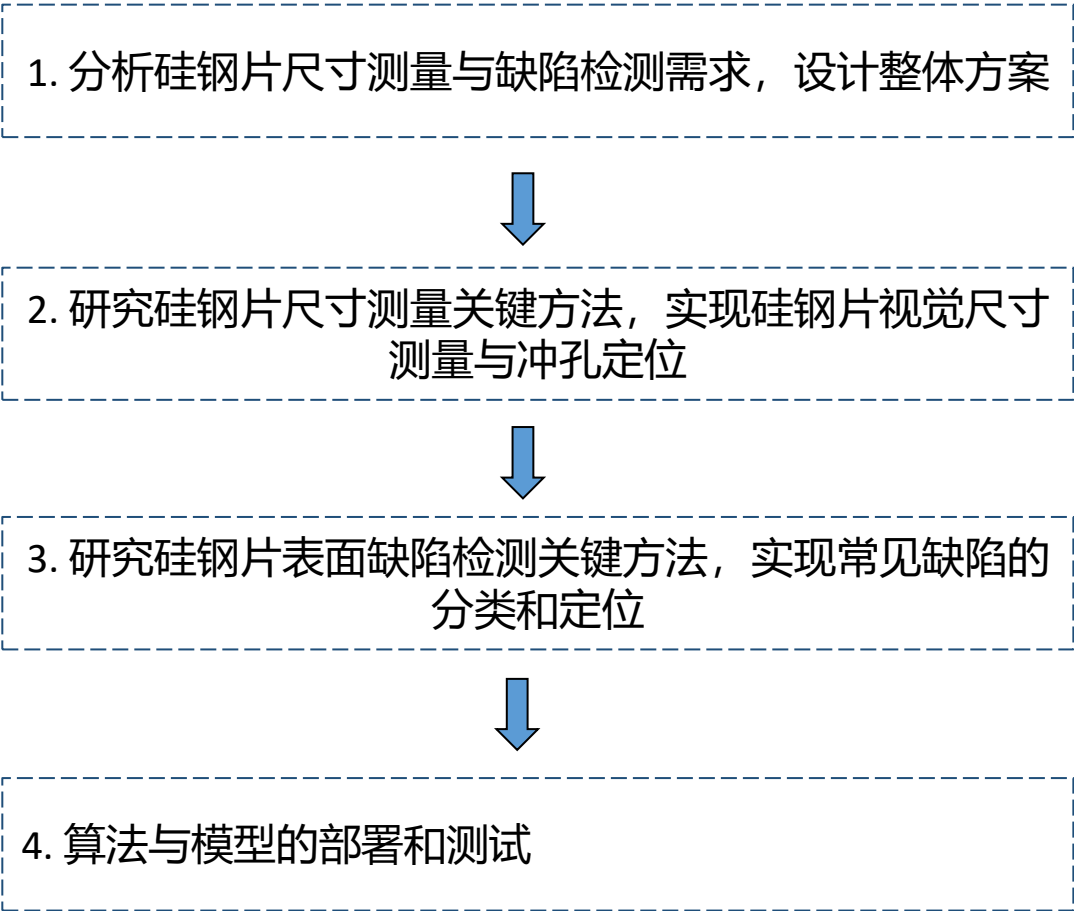
## 缺陷检测

- 人工分拣：
  - 效率低
  - 人工成本高
  - 自动化程度低
- 视觉检测：
  - 提高效率，降低成本
  - 有助于根据缺陷的分布和频率及时调整生产设备或工艺从而避免同类缺陷的扩散；
  - 及时淘汰残次品，为后续产品分级提供依据。



2

# 研究内容



尺寸测量现场技术指标要求

指标名称	指标要求
测量误差	≤1.0mm
误差率	≤0.5%
单张平均测量时间	≤200ms
鲁棒性	能够适应不同光照强度影响

缺陷检测技术指标要求

指标名称	指标要求
缺陷类型	4种
缺陷识别准确率	≥90%
缺陷查全率	≥90%
单张平均检测时间	≤500ms
鲁棒性	能够实现对多种尺度、复杂视觉特征的缺陷识别，适应现场光照影响

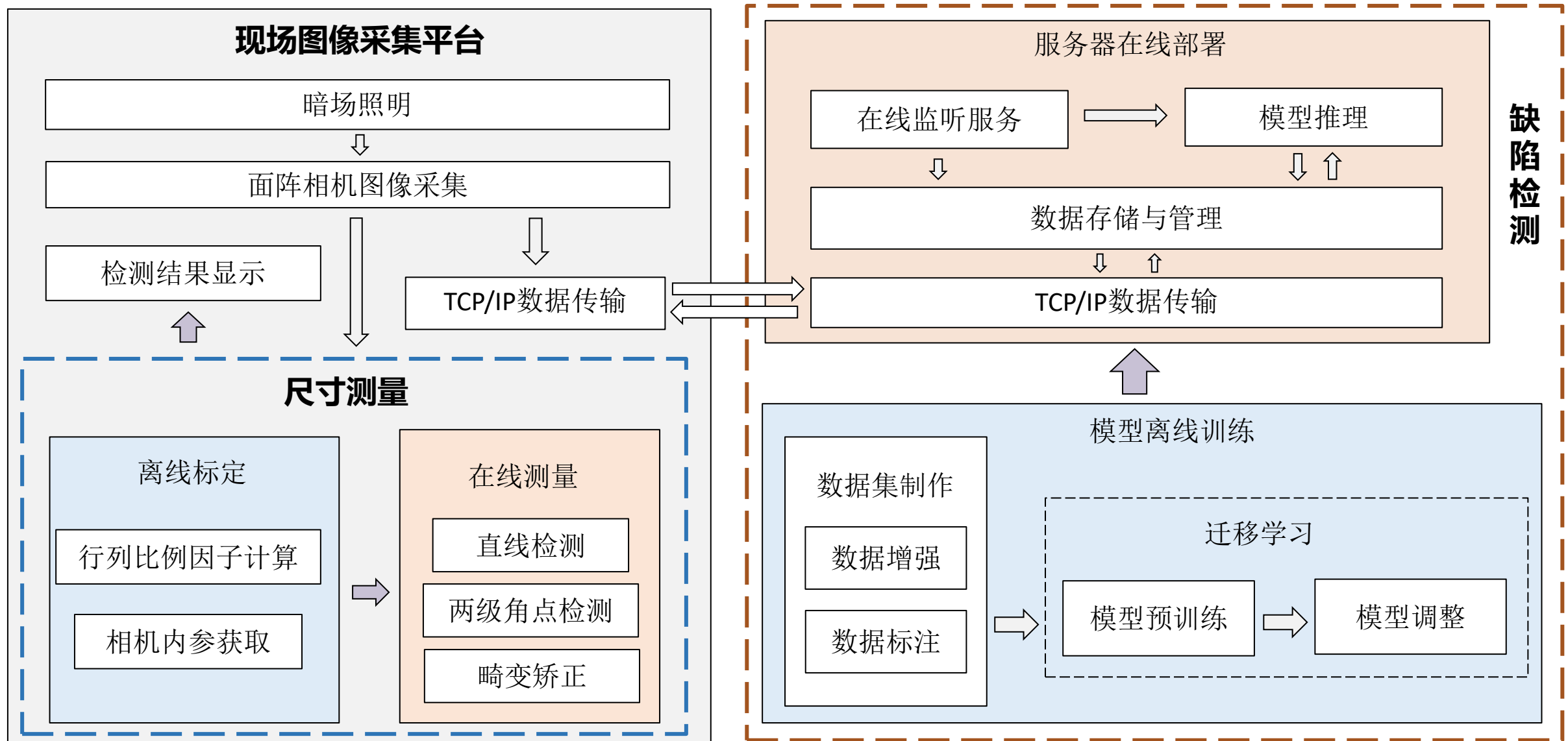


3

## 现阶段工作进展

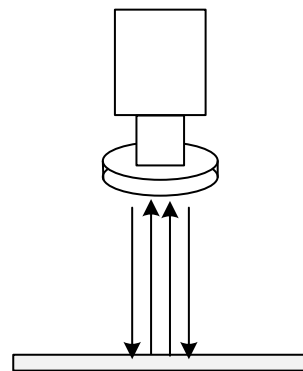


# 总方案设计



## ➤ 明场照明

硅钢片表面光滑，具有强反光特性，明场直接照明，会有大量镜面反射光进入相机，在图像上形成光斑，影响尺寸测量与缺陷检测效果。



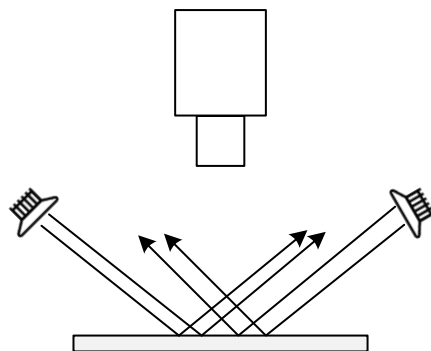
明场照明



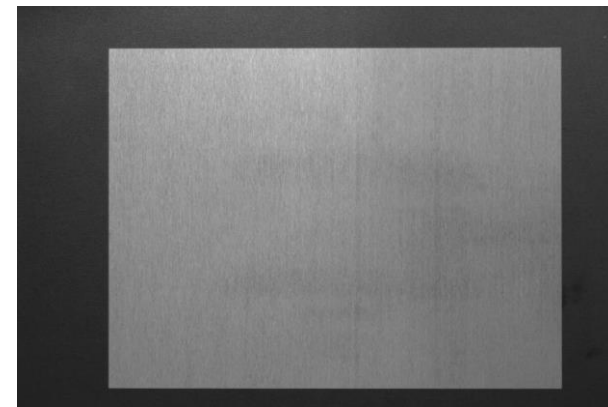
明场拍摄效果

## ➤ 暗场照明

采用两个光源从两侧斜向45°打光，保证镜面反射光无法进入相机，只保留漫反射光照明。

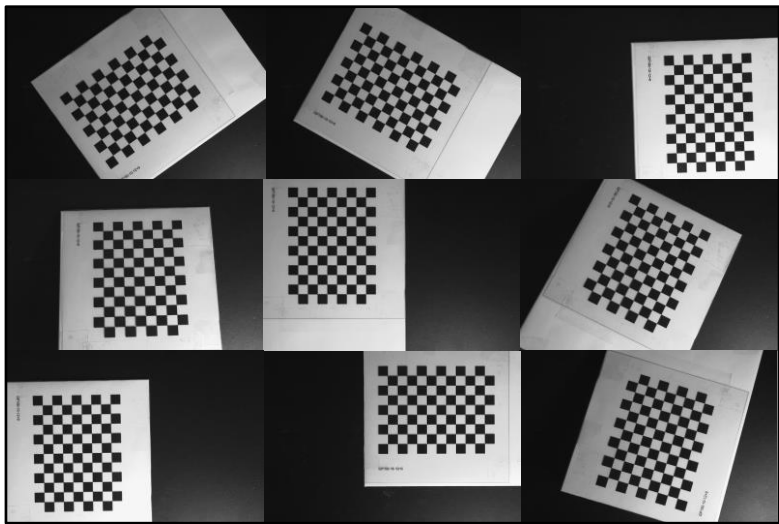


暗场照明

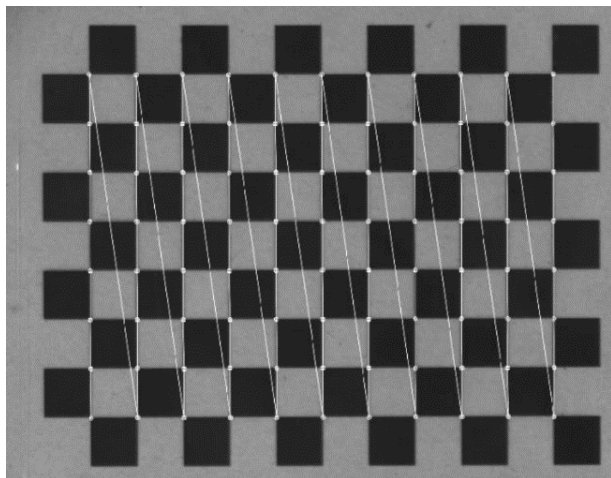


暗场拍摄效果

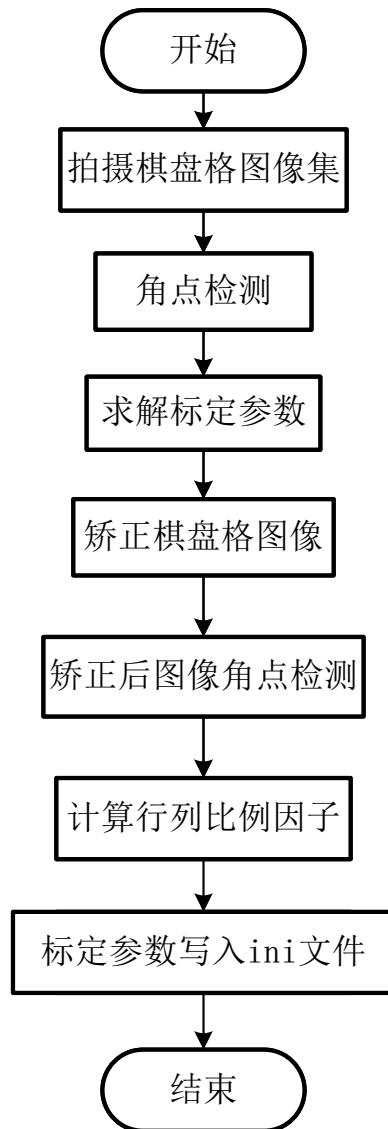
# 相机离线标定



相机采集的不同角度标定板图片



标定板角点提取



$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{内参矩阵}$$

$$J = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad p_1 \quad p_2] \quad \text{畸变系数}$$

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta u \cdot s_r)^2 + (\Delta v \cdot s_c)^2}$$

方程法求解行列比例因子



[标定参数]

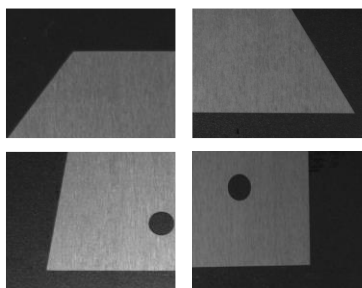
内参矩阵=[[6754.945345,0.,1592.990368],[0.,6757.549607,1029.25162],[0.,0.,1.]]

畸变系数=[[-0.046206,2.747855,-0.004203,-0.005477,-38.075204]]

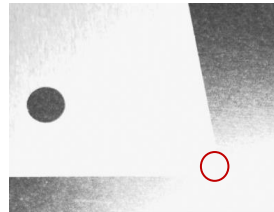
纵横比例因子=[[0.087148,0.086933]]

## ➤ 直接角点检测——基于卷积模板匹配的角点检测

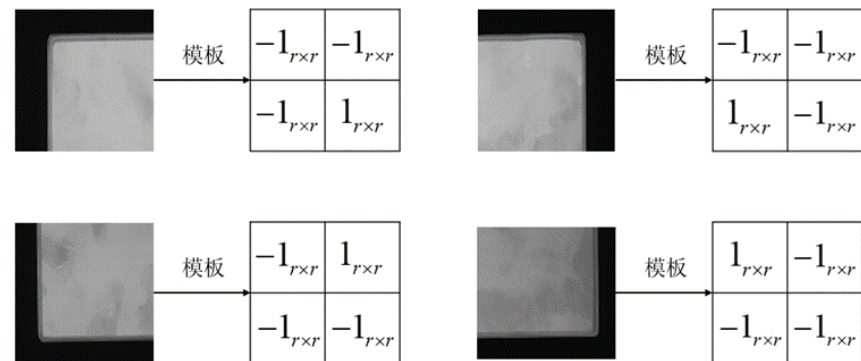
- 样本需进行倾斜校正
- 手动设计卷积模板
- 检测对象角点形状多样，固定模板无法通用
- 受现场光照强度和光斑影响，匹配角点困难



角点形状多样



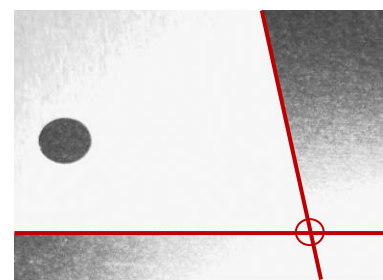
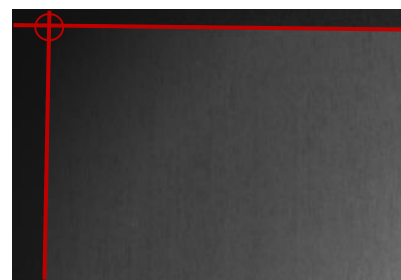
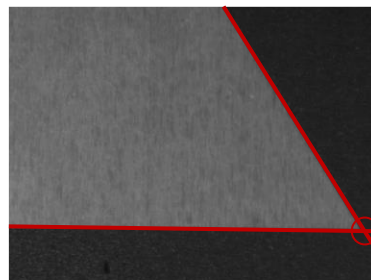
光照不均匀，角点无法匹配



模板匹配角点

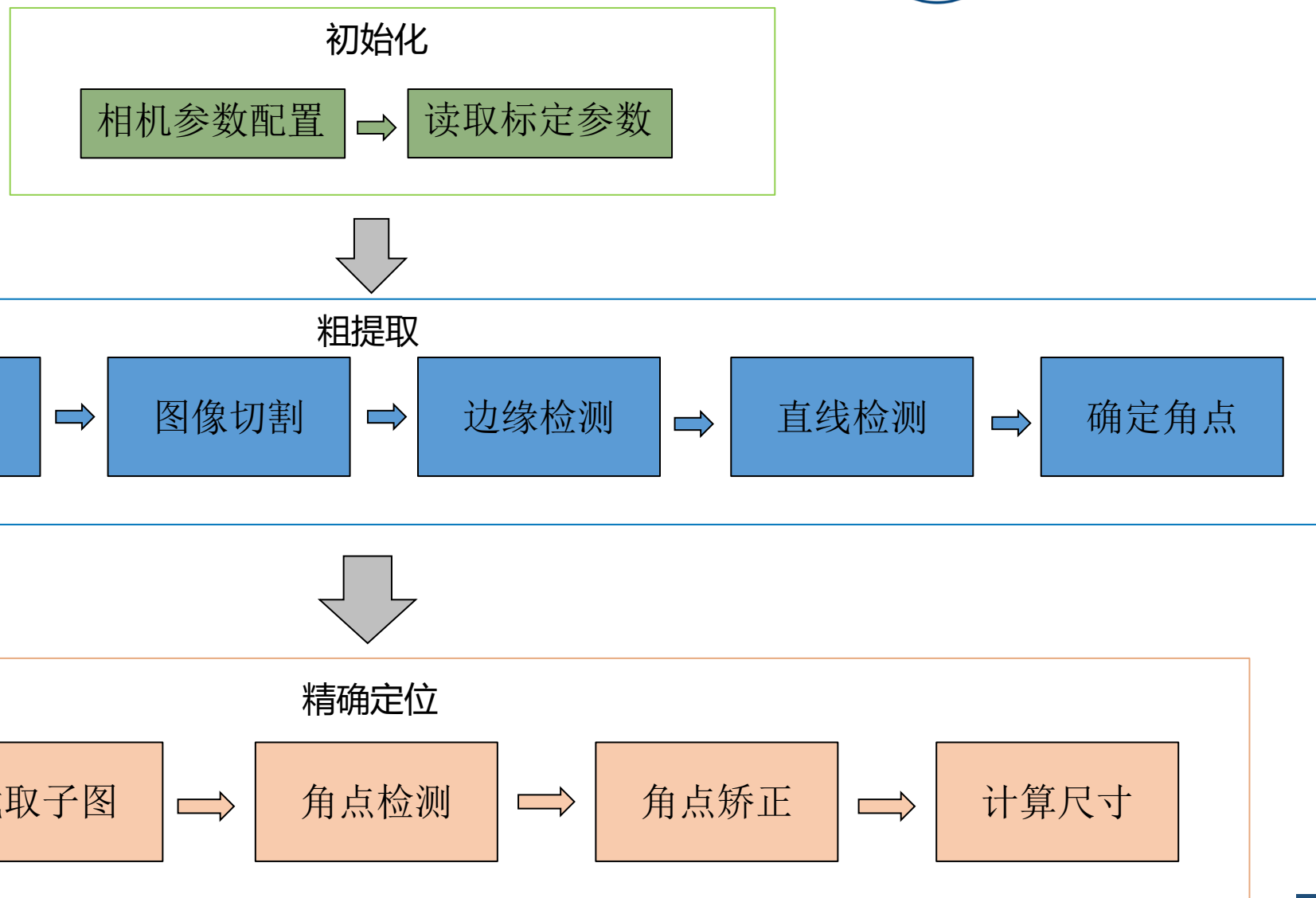
## ➤ 间接角点检测——基于直线检测的角点检测

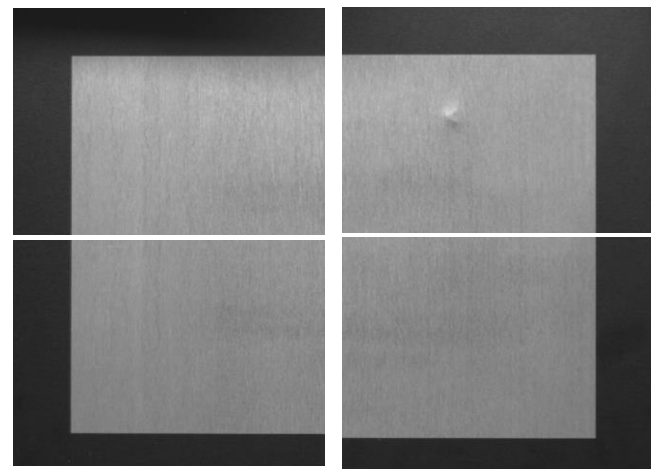
- 检测形成角点的两条边所在直线
- 利用直线交点确定角点坐标
- 直线检测使用范围更大的图像特征，抗干扰性强



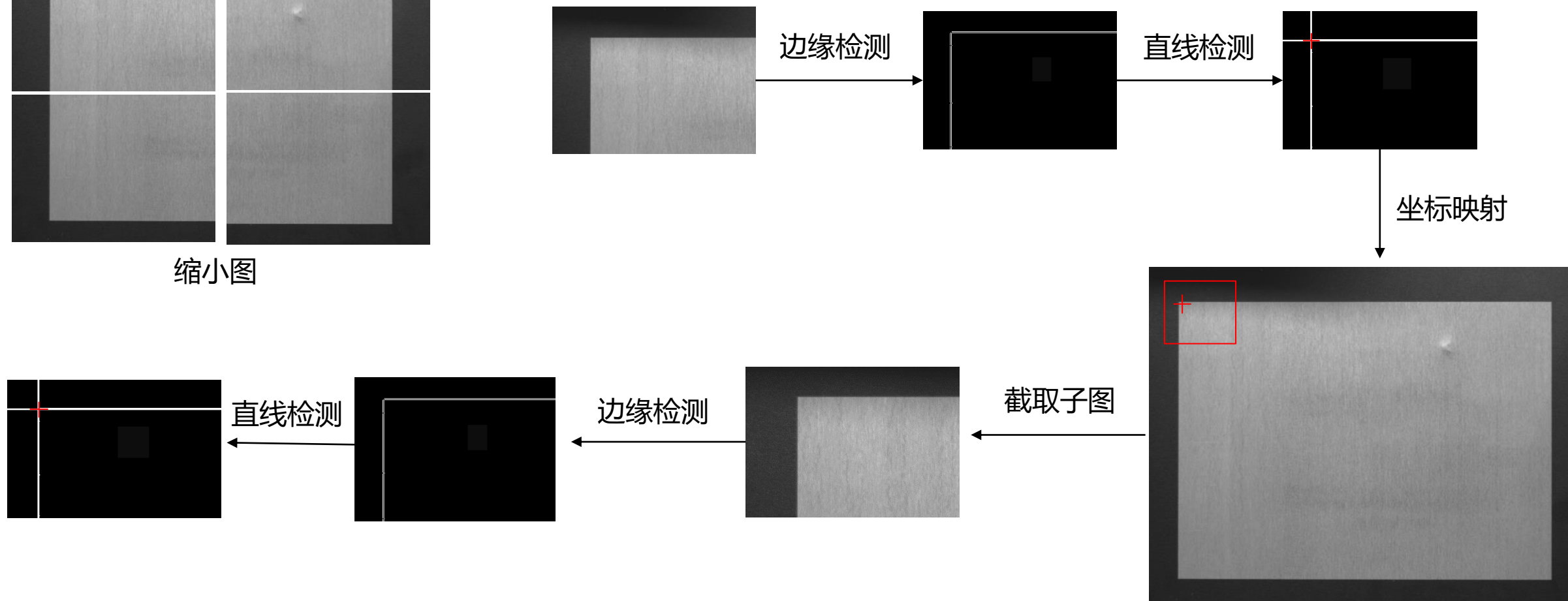
通过直线交点确定角点

## 两级角点检测



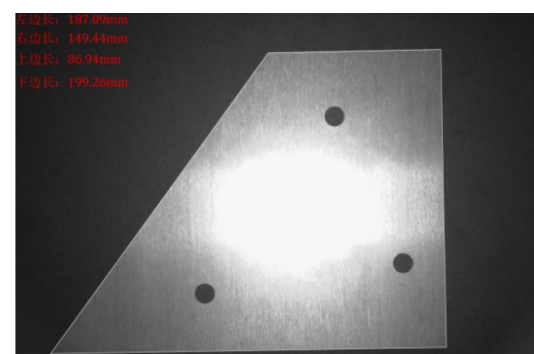
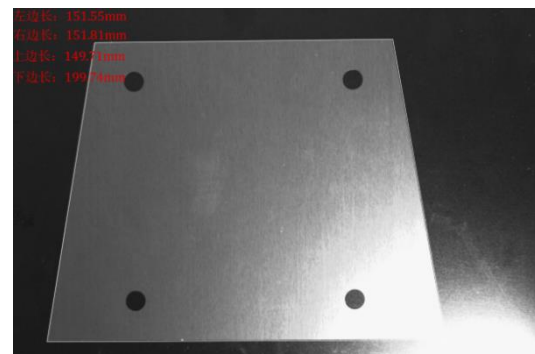
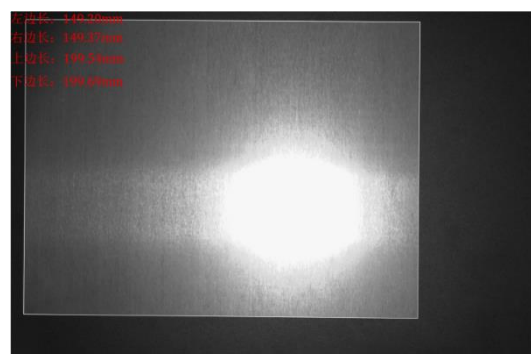
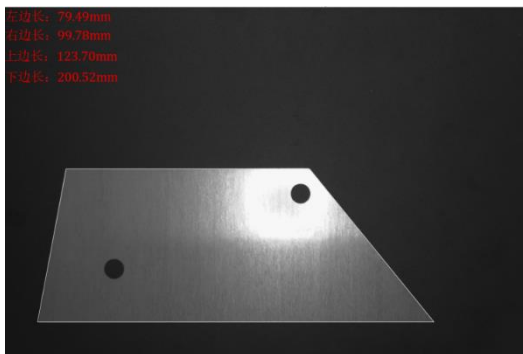
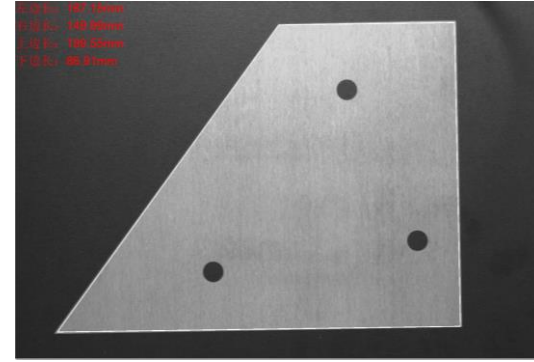
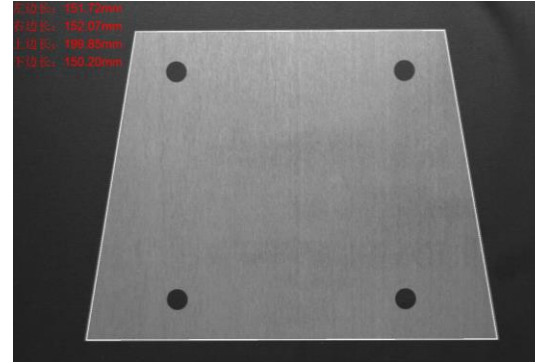
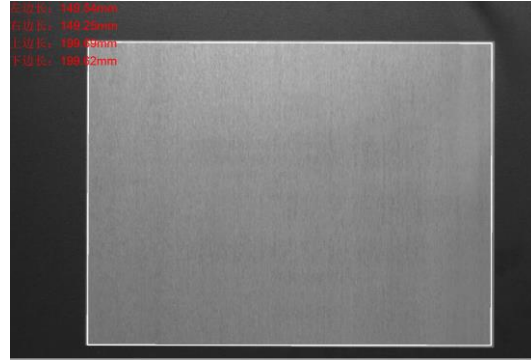
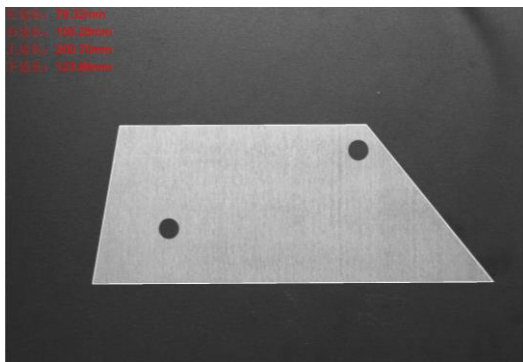


缩小图



原图





在线测量实际效果

理想光照下五种典型形状的测量结果

片料类型	测量项目	测量结果/mm	实际尺寸/mm	误差/mm	误差率/%	测量时间/ms
	上边长	179.83	180	0.17	0.09	67
	下边长	179.66	180	0.34	0.19	
	左边长	149.60	150	0.40	0.27	
	右边长	149.25	150	0.75	0.50	
	上边长	199.69	200	0.31	0.16	69
	下边长	199.62	200	0.38	0.19	
	左边长	149.54	150	0.46	0.31	
	右边长	149.25	150	0.75	0.50	
	上边长	123.61	123	0.61	0.50	68
	下边长	200.46	200	0.46	0.23	
	左边长	99.65	100	0.35	0.35	
	右边长	79.84	79	0.84	1.06	
	上边长	150.20	150	0.20	0.13	76
	下边长	199.86	200	0.14	0.07	
	左边长	151.97	152	0.03	0.02	
	右边长	151.71	152	0.29	0.19	
	上边长	86.91	87	0.09	0.10	74
	下边长	199.55	200	0.45	0.23	
	左边长	187.15	188	0.85	0.45	
	右边长	149.99	150	0.01	0.01	
平均	/	/	/	0.39	0.28	70.8

- 平均误差0.39mm;
- 平均误差率0.28%;
- 平均测量时间70.8ms.



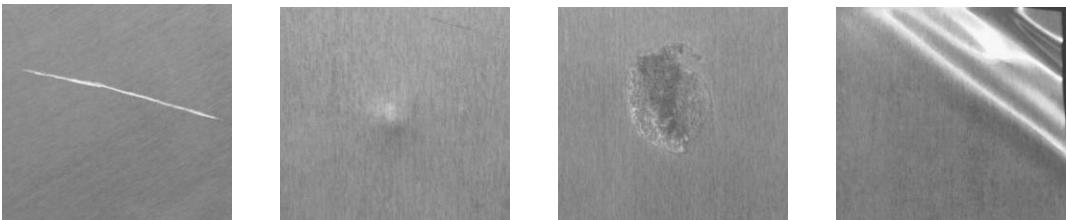
复杂光照下五种典型形状的测量结果

片料类型	测量项目	测量结果/mm	实际尺寸/mm	误差/mm	误差率/%	测量时间/ms
	上边长	179.48	180	0.52	0.29	69
	下边长	179.72	180	0.28	0.16	
	左边长	149.31	150	0.69	0.46	
	右边长	149.22	150	0.78	0.52	
	上边长	199.54	200	0.46	0.23	72
	下边长	199.69	200	0.31	0.16	
	左边长	149.20	150	0.80	0.53	
	右边长	149.37	150	0.63	0.42	
	上边长	123.70	123	0.30	0.24	63
	下边长	200.52	200	0.48	0.24	
	左边长	79.49	79	0.49	0.64	
	右边长	99.78	100	0.22	0.22	
	上边长	149.71	150	0.29	0.19	71
	下边长	199.74	200	0.26	0.13	
	左边长	151.55	152	0.45	0.29	
	右边长	151.81	152	0.19	0.12	
	上边长	86.94	87	0.06	0.07	75
	下边长	199.26	200	0.74	0.37	
	左边长	187.09	188	0.91	0.48	
	右边长	149.44	150	0.56	0.37	
平均	/	/	/	0.47	0.31	

- 平均误差0.47mm;
- 平均误差率0.31%;
- 平均测量时间70ms.

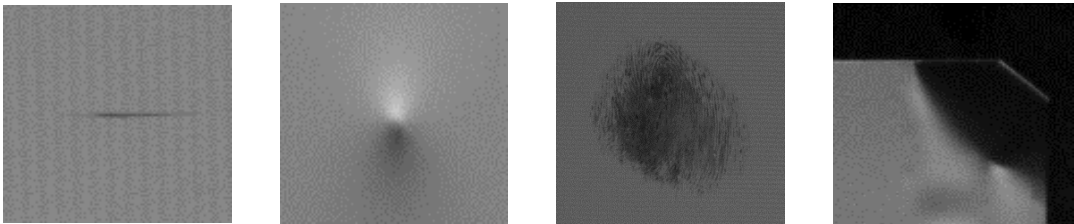
# 缺陷检测——数据集制作

硅钢片缺陷图像



划痕      压凹压凸      氧化油污      卷曲

覆铜板数据集



划痕      压凹压凸      氧化油污      卷曲

labelImg标注工具

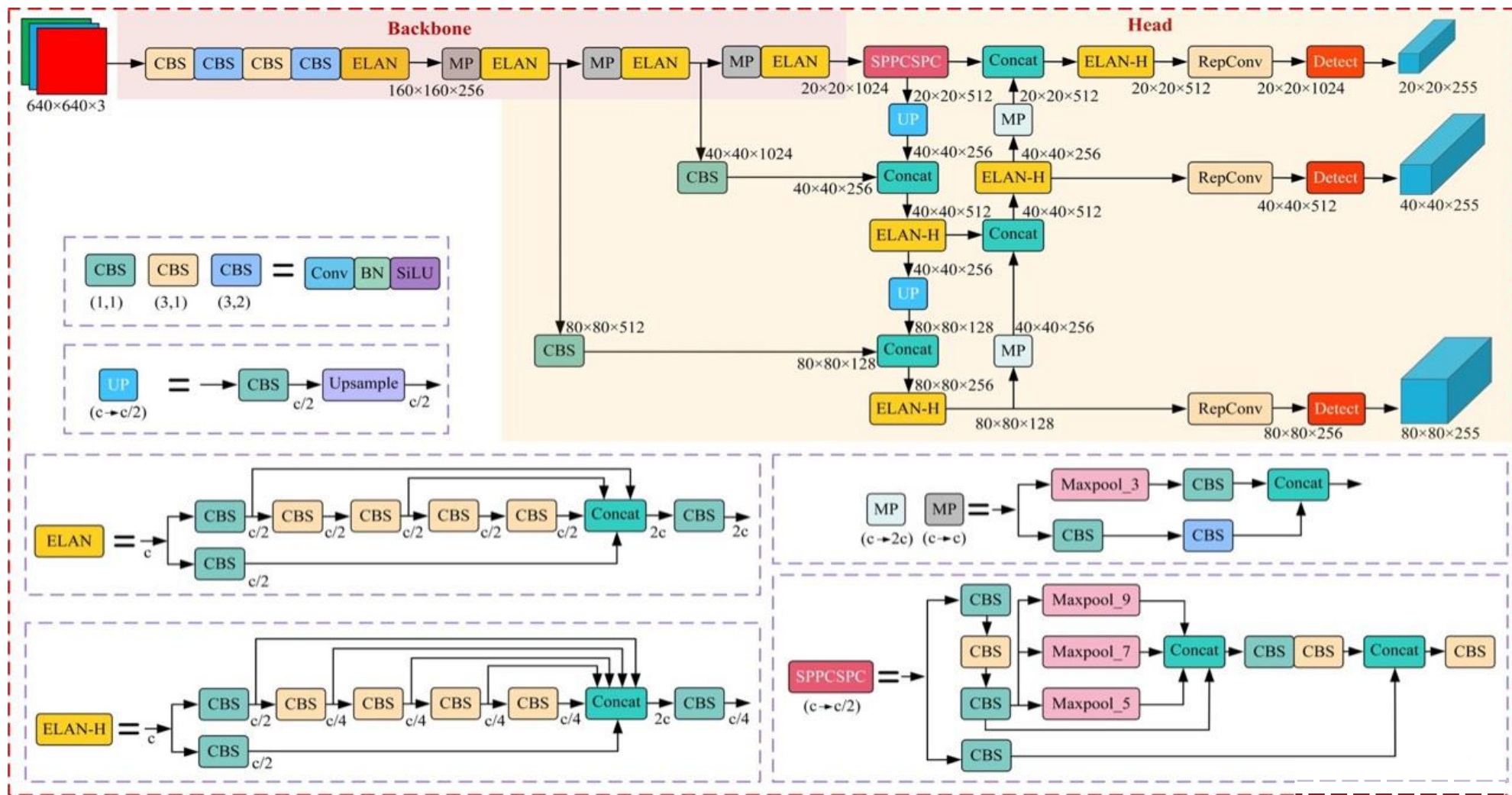


缺陷类型	样本数		缺陷描述
	覆铜板	硅钢片	
划痕	1995	12	长条状明或暗的细线
压凹压凸	3235	13	凹陷或凸起，呈圆锥状
氧化油污	1031	15	片状散布灰黑色特征
卷曲	35	10	边缘卷曲

- 数据增强：随机旋转、缩放、水平或垂直翻转、变换图像亮度、饱和度、对比度
- 数据集划分：训练集：验证集：测试集 = 3：1：1

数据集	缺陷类型	训练集	验证集	测试集
覆铜板	划痕	1197	399	399
	氧化油污	1941	647	647
	压凹压凸	619	206	206
	卷曲	21	7	7
硅钢片	划痕	28	12	8
	氧化油污	32	12	8
	压凹压凸	36	12	12
	卷曲	24	8	8

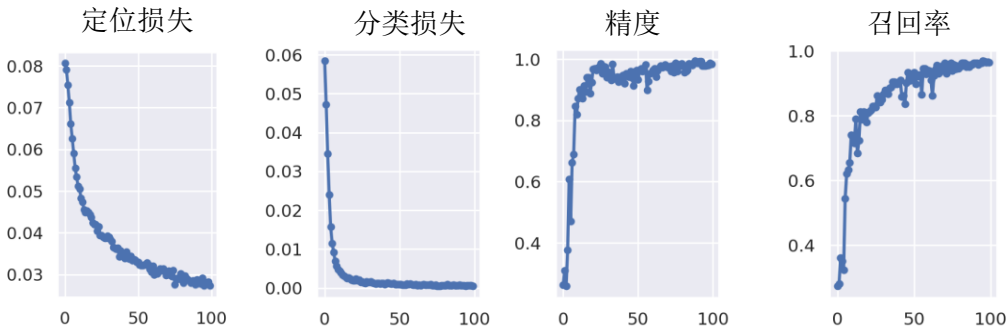
# 缺陷检测——模型训练与测试



YOLOv7模型结构

训练环境

环境名称	型号版本
Ubuntu	16.04.7 LTS
Linux	4.4.0-98-generic
Python	3.6.3
Pytorch	1.13
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-11500
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3090Ti
Cuda	11.7
Packages	numpy, tqdm, opencv-python



训练过程曲线

YOLOv7在覆铜板测试集上的性能指标

缺陷名称	Precision	Recall	AP50
scratches	0.970	0.927	0.977
greasy dirt	0.944	0.888	0.951
concave-convex	0.869	0.869	0.903
curl	0.862	1.000	0.996
均值	0.896	0.899	0.933

YOLOv7在硅钢片测试集上的性能指标

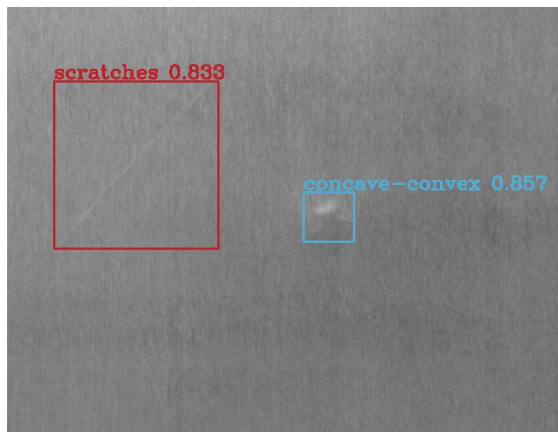
缺陷名称	Precision	Recall	AP50
scratches	0.980	0.909	0.943
greasy dirt	0.942	0.919	0.937
concave-convex	0.995	0.985	0.996
curl	0.979	1.000	0.996
均值	0.964	0.953	0.968



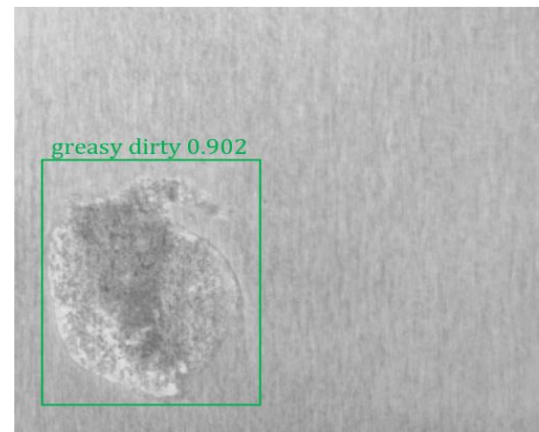
# 缺陷检测——检测结果



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



划痕, 压凹压凸



氧化油污



卷曲



划痕

# 算法封装与模型部署

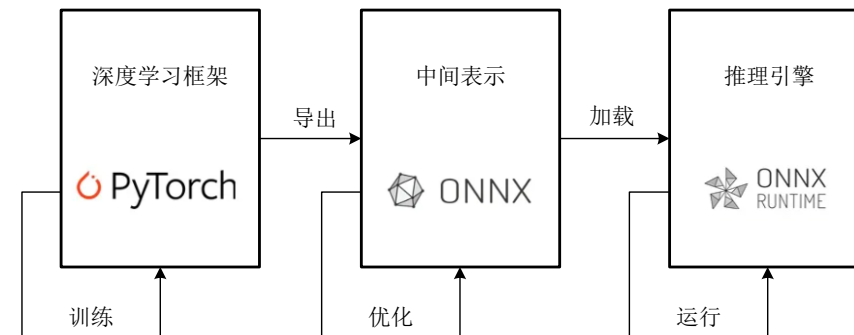


## ➤ 尺寸测量算法封装

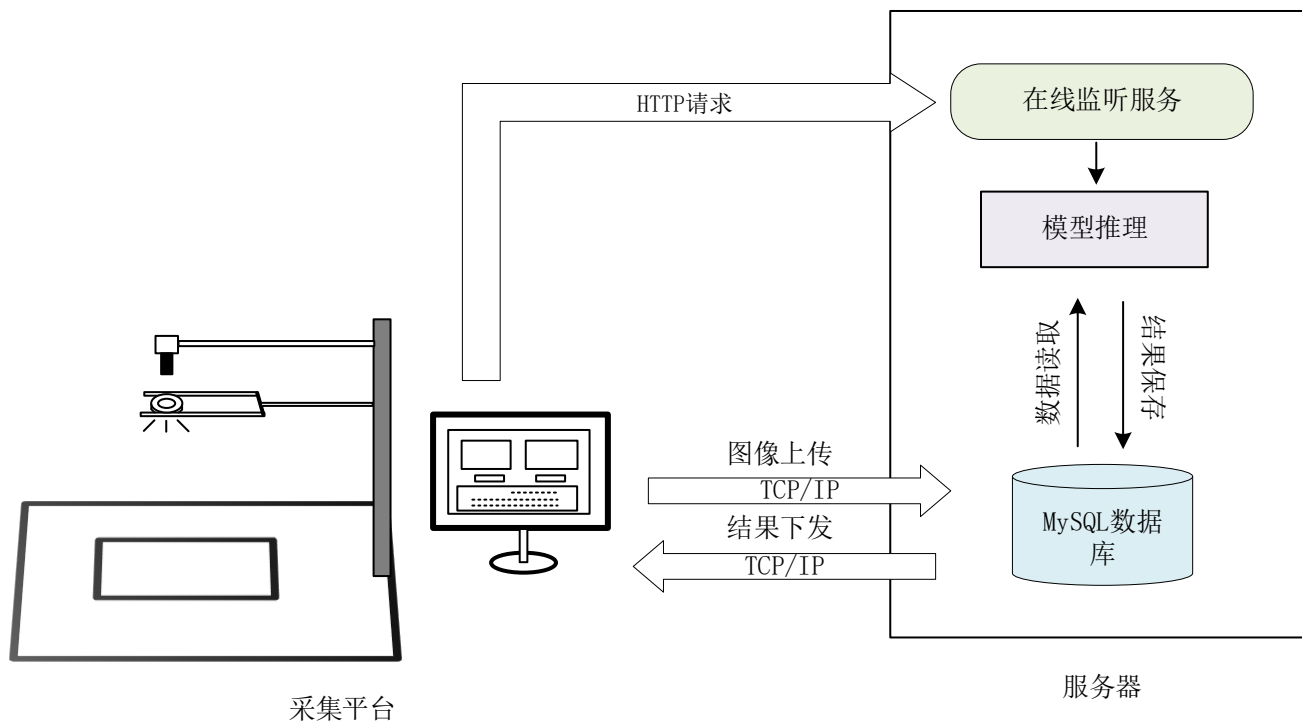
- 尺寸测量算法基于C++和OpenCV库开发，封装为windows平台下可以动态加载的dll动态链接库；

## ➤ 缺陷检测模型部署

- 采用服务端部署方案；
- 模型导出为onnx格式，使用onnx runtime推理引擎进行推理；



模型部署流水线



```
* Running on http://10.180.53.250:5680/ (Press CTRL+C to quit)
('/yolov7', 3, 'pic', 3, 'array')
inference time :0.5587
[[402, 287, 596, 431, 1, 0.757], [536, 540, 836, 949, 1, 0.587], [1230, 502, 1331, 579, 0, 0.497],
[1265, 614, 1320, 671, 0, 0.469]]
update tableout set array_data = %s,array_row = '4',array_col='6' where id = '3'
- - [13/Jul/2023 21:17:55] "GET /yolov7 HTTP/1.1" 200 -
```

服务端在线监听服务

```
mysql> describe tablein;
```

Field	Type	Null	Key	Default	Extra
id	int(11)	NO	PRI	NULL	
pic_data	longblob	YES		NULL	
pic_row	int(11)	YES		NULL	
pic_col	int(11)	YES		NULL	
pic_channel	int(11)	YES		NULL	
int_data	int(11)	YES		NULL	

MySQL数据库表结构

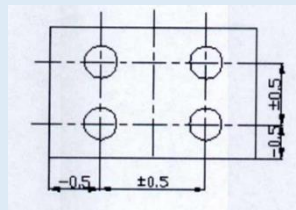
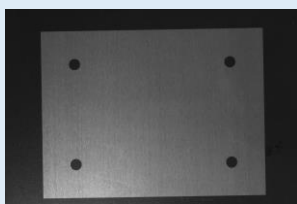


# 4

## 后期工作计划

## 现存问题

- 尺寸测量目前仅实现了对硅钢片的轮廓尺寸测量，还未实现硅钢片上冲孔的定位需求；



- 实际生产现场光照复杂，周围灯光易在硅钢片表面形成光斑，对缺陷视觉特征产生较大影响，不利于缺陷检测；



不同光照下缺陷视觉特征差异大

- 目前已在实验室搭建平台上进行了测试，还未在生产现场实际部署测试。



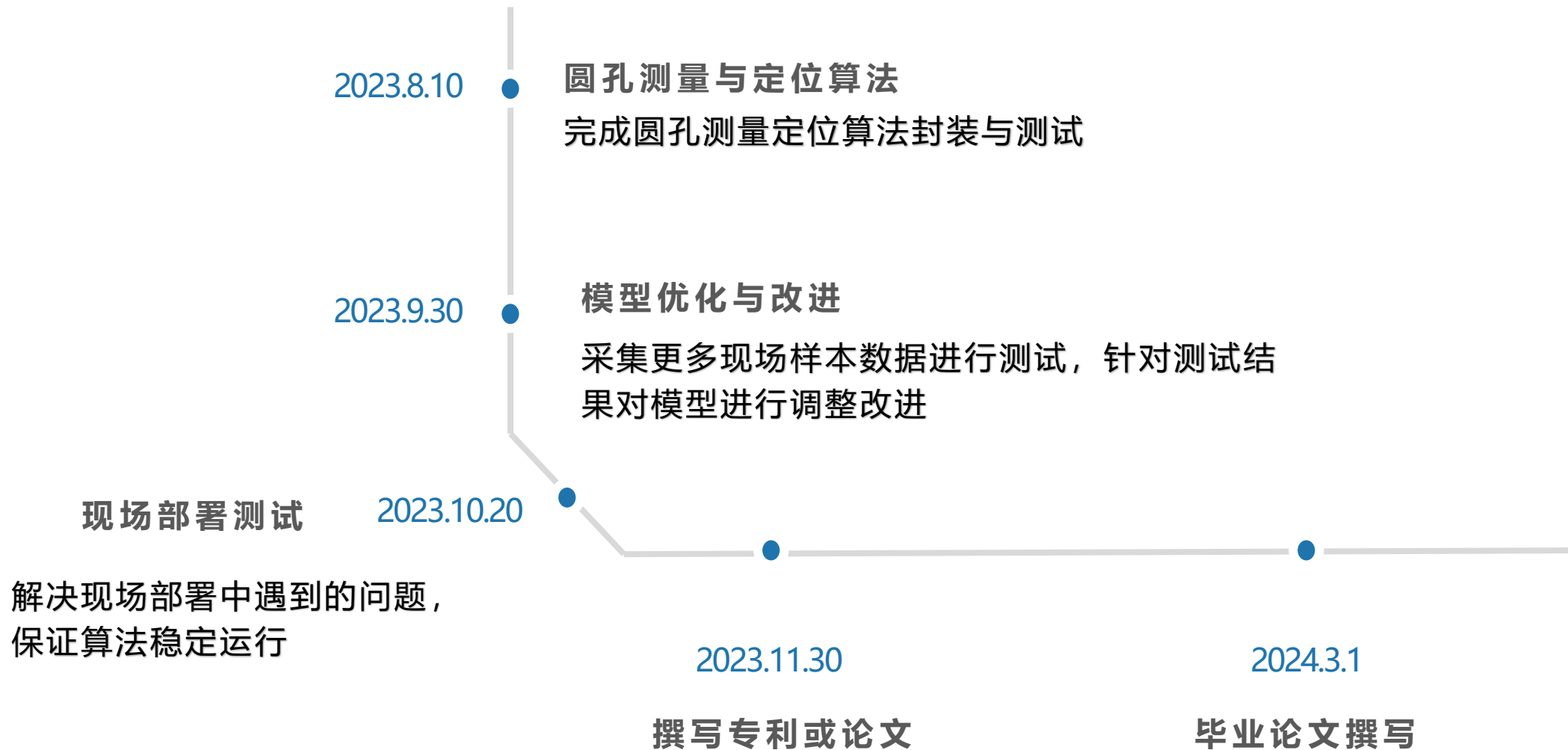
## 后续工作计划

- 研究圆孔定位算法，实现算法封装与集成

- 采集更多现场不同光照下数据进行模型训练
- 优化改进模型结构

- 在实验室已有视觉检测平台进行部署测试
- 现场部署测试，并解决出现的问题





**恳请各位老师批评指正**

