ICAN 2026 • 菲尼克斯杯智能制造多模态控制挑战赛

FDSim · YOLO26s · OPC UA · CRB 1100



医 眼 盯 真

AI MEDICAL VISION · TRUE CHECK

基于视觉识别的药物生产智能检测系统

基于 FDSim 数字孪生平台与 YOLO26s 深度学习模型，

实现 4 类药板缺陷的实时检测与机械臂自动分拣。

团队名称：医眼盯真队

TECHNICAL REPORT

2026 年 7 月

目 录

CONTENTS

1 项目概述 5

1.1 项目背景 5

1.2 项目目标 6

1.3 团队简介 6

2 行业痛点与需求分析 7

2.1 行业痛点 7

2.1.1 人工目检效率低、漏检率高 8

2.1.2 缺陷药品市场风险高，合规压力大 8

2.1.3 传统机器视觉适应性差 8

2.1.4 产线各环节断链，数据无法回溯 8

2.2 需求总结 9

2.3 需求与技术指标对应关系 9

3 系统总体方案设计 10

3.1 系统总体架构 10

3.2 系统工作流程 11

3.3 系统选型 11

4 关键技术与实现 12

4.1 仿真产线与检测工位搭建 12

4.2 视觉识别算法实现 13

4.2.1 缺陷类型定义 13

4.2.2 算法选型 13

4.2.3 算法流程 14

4.2.4 数据集构建 14
4.2.5 模型训练 14
4.2.6 模型测试 15
4.3 OPC UA 通信与产线控制 16
4.3.1 通信协议选型 16
4.3.2 通信架构与信号定义 16
4.3.3 通信时序 16
4.3.4 信号蓝图控制逻辑 17
4.4 实时监控看板 17

5 系统运行与测试结果 18
5.1 测试环境与方案 18
5.2 系统联调过程 19
5.3 识别效果展示 19
5.4 测试结果总结 20

6 技术难点与创新点 21
6.1 技术难点与解决方案 21
6.1.1 小尺度缺陷难以检出 21
6.1.2 仿真系统与 AI 模型的实时协同 22
6.1.3 缺陷样本稀少、分布不均 22
6.1.4 异构系统集成复杂 22
6.2 创新点 22

7 总结与展望 23
7.1 项目总结 23
7.2 未来展望 23

附录 A 项目源程序清单 24

01

CHAPTER 01

Project Overview

项目概述

从行业现状出发，阐明项目目标与团队定位

1 项目概述

1.1 项目背景

药品安全直接关系人民群众的生命健康。泡罩包装（药板）是片剂、胶囊等固体药品最主要的包装形式之一，在高速自动化生产过程中，受供料异常、设备振动、模具磨损、铝箔材料缺陷等因素影响，药板可能出现缺药（空泡）、错药（混药）、药片破损、包装破损等典型缺陷。缺陷药品一旦流入市场，轻则引发投诉与召回，重则危及患者用药安全，企业还将面临 GMP 合规处罚与品牌信誉损失。因此，药品生产环节的质量检测是制药企业不可或缺的生命线。

随着智能制造与人工智能技术的发展，以深度学习为核心的机器视觉检测正在替代传统人工目检，成为药品质量管控的主流方向；同时，数字孪生技术为产线方案的验证与迭代提供了零停机、低成本的仿真环境。本作品依托菲尼克斯智能制造数字孪生开发平台（**FDSim**），将 AI 视觉检测、工业通讯与机器人分拣融为一体，构建了一套完整的药物生产智能检测系统。

1.2 项目目标

本项目以“药品泡罩包装缺陷的自动化检测与分拣”为目标，在数字孪生环境中完成以下工作：

（**1**）基于 **FDSim** 平台搭建药品生产仿真产线，实现药板的随机生成、输送与缺陷注入；

（**2**）自主构建药板缺陷数据集并训练 YOLO 缺陷检测模型，实现 **4** 类典型缺陷的高精度实时识别；

（**3**）基于 **OPC UA** 工业通讯协议实现视觉识别服务与仿真产线的双向联动，驱动机械臂对不良品自动分流；

（**4**）开发实时监控看板，实现检测过程可视化与检测数据的记录追溯。

1.3 团队简介

“医眼盯真”团队名称取义“以 AI 之眼，盯药品之真”，致力于将人工智能技术应用于药品生产质量管控场景。团队成员分工覆盖仿真产线搭建、视觉算法训练、通讯联调与系统集成等环节，具备完整的工程实现能力。

02

CHAPTER 02

Industry Pain Points

行业痛点与需求分析

梳理人工目检、传统机器视觉与产线数据孤岛三大困境

2 行业痛点与需求分析

2.1 行业痛点

2.1.1 人工目检效率低、漏检率高

药板缺陷形态细小、种类多样，长期依赖人工目视检测。质检人员在高强度、长时间作业下极易产生视觉疲劳，漏检率与误检率随工时显著上升，检测标准难以统一，无法匹配现代高速产线的生产节拍。

2.1.2 缺陷药品流出风险高，质量合规压力大

缺药直接影响患者单次用药剂量，错药更可能引发用药事故。制药企业一旦放行缺陷产品，将面临药品召回、GMP 认证处罚乃至法律风险，质量检测环节的可靠性直接决定企业生存。

2.1.3 传统机器视觉泛化能力不足

基于模板匹配与人工特征的传统机器视觉方案，对光照变化、药板位置偏移、缺陷形态差异非常敏感，换产换型时需要重新设计与调参，部署维护成本高，难以适应多品种、小批量的柔性生产趋势。

2.1.4 检测与执行脱节，数据无法闭环

许多产线的检测设备与分拣执行机构相互独立，检测结果无法实时驱动后续动作；检测数据缺乏统一记录与管理，出现质量问题时难以追溯定位，无法形成“检测—判定—分拣—追溯”的质量闭环。

2.2 需求分析

针对上述痛点，系统需满足以下需求：

需求类别	具体需求

检测能力	覆盖缺药、错药、药片破损、包装破损 4 类典型药板缺陷，识别准确率高
实时性能	检测与判定在产线节拍内完成，实时触发分拣动作，不影响生产效率
联动能力	检测结果实时下发执行机构，不良品自动分流，无需人工干预
追溯能力	检测数据（类别、置信度、时间）自动记录，支持统计与追溯
验证成本	方案先在数字孪生环境中验证，零停机、低风险，再向真实产线迁移

表 2-1 系统需求分析

2.3 痛点与技术方案对应关系

行业痛点	对应技术方案
人工目检效率低、漏检率高	YOLO 深度学习视觉检测，7×24 小时稳定工作，标准统一
缺陷药品流出风险高	高精度模型（mAP50≈0.995）+ 机械臂强制分流，双重把关
传统视觉泛化能力差	数据驱动的深度特征，配合数据增强，对光照/偏移鲁棒
检测与执行脱节	OPC UA 双向通讯 + 监控看板，检测-分拣-追溯全闭环

表 2-2 痛点与技术方案对应关系

03

CHAPTER 03

System Architecture

系统总体方案设计

提出"仿真实时孪生 + AI 视觉"闭环方案

3 系统总体方案设计

3.1 系统总体架构

系统采用“数字孪生仿真层—通讯层—智能视觉识别层”三层架构，如图 **3-1** 所示。仿真层基于 **FDSim** 平台构建药品生产数字孪生产线，包含创造者药品生成模块、传送带系统、工业相机、**CRB 1100** 机械臂与信号蓝图控制逻辑；通讯层采用 **OPC UA** 工业标准协议，通过 VT（Vision Trigger）触发信号与 VR（Vision Result）结果信号实现双向数据交互；智能视觉识别层由图像采集模块、**YOLO26s** 推理引擎、缺陷分类判定模块与实时监控看板组成。

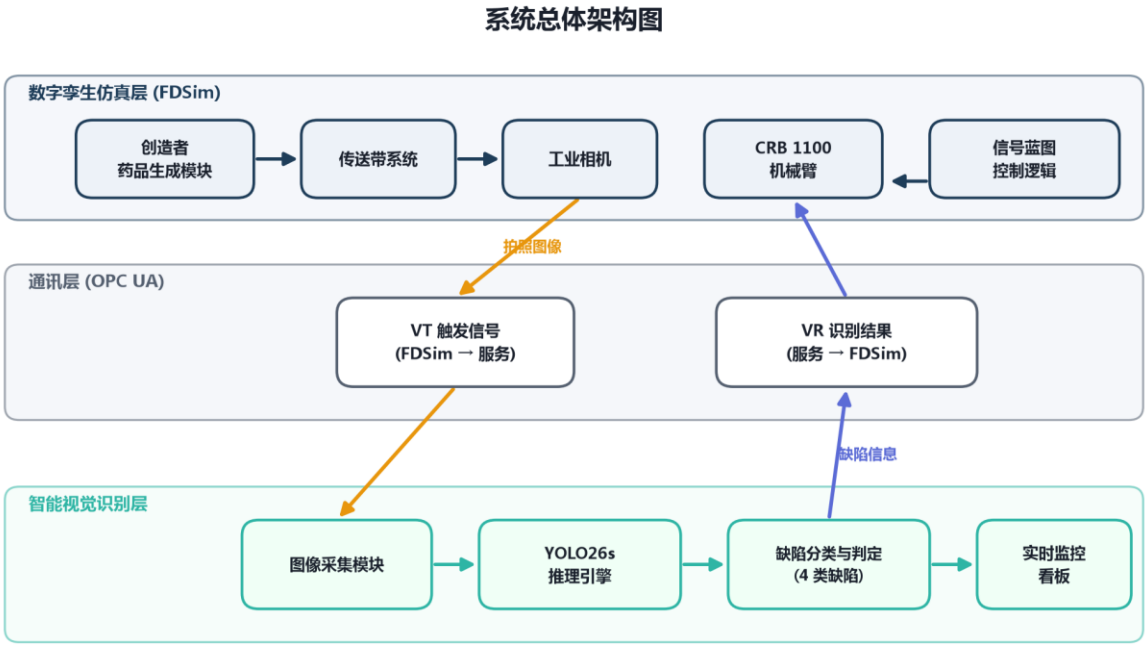


图 3-1 系统总体架构图

3.2 系统工作流程

系统工作流程如图 **3-2** 所示：创造者按设定概率生成含随机缺陷的药板，经传送带输送至相机检测工位；相机完成拍照后，**FDSim** 通过 **OPC UA** 写入 VT=**1** 触发视觉识别服务；服务采集图像并调用 **YOLO26s** 模型推理，将缺陷类别、置信度与位置信息写入 VR 信号回传 **FDSim**；信号

蓝图解析判定结果——合格药板继续输送进入良品区，不合格药板由机械臂抓取分流至不良品箱，同时监控看板记录缺陷数据，形成完整质量闭环。

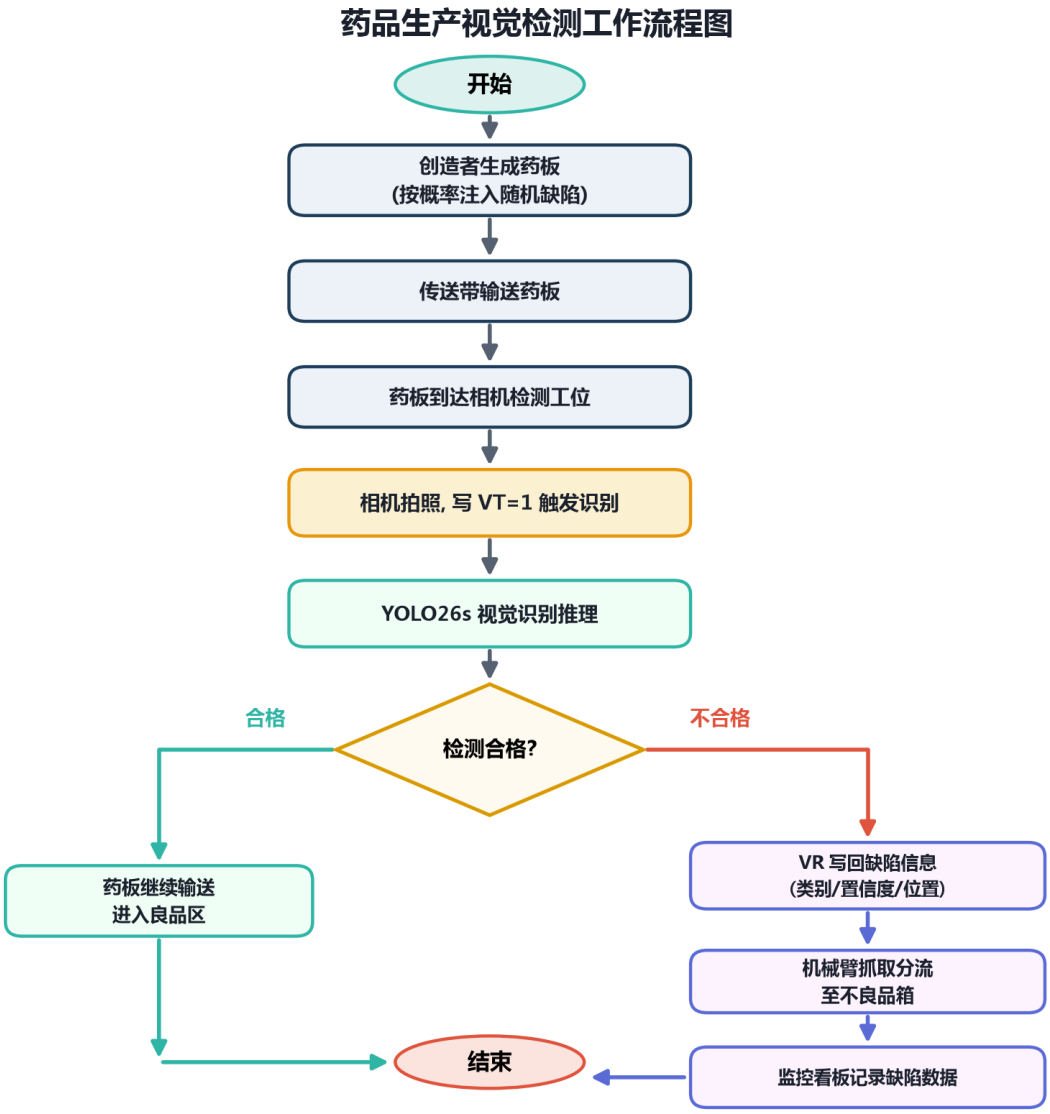


图 3-2

3.3 系统组成

模块	技术选型	功能
仿真产线	FDSim 数字孪生平台	药板生成、输送、相机/机械臂工位仿真
执行机构	CRB 1100-4/0.475-2 机械臂	不良品抓取分流
视觉算法	YOLO26s（Ultralytics）	4 类药板缺陷检测

通讯服务	vision_service（OPC UA 服务端）	触发监听、推理调度、结果回写
监控看板	vision_dashboard（Web）	实时画面、统计与缺陷记录

表 3-1 系统组成与技术选型

04

CHAPTER 04

Key Implementation

关键技术与实现

产线搭建、YOLO26s 训练、OPC UA 通信与监控面板

4 关键技术与实现

4.1 数字孪生仿真产线搭建

FDSim 是菲尼克斯电气推出的智能制造数字孪生开发平台，支持真实物理引擎仿真、信号蓝图可视化逻辑编排，并可通过 **OPC UA** 与外部系统互联互通。本项目基于 **FDSim** 搭建了完整的药品泡罩包装生产仿真产线，整体布局如图 **4-1** 所示。

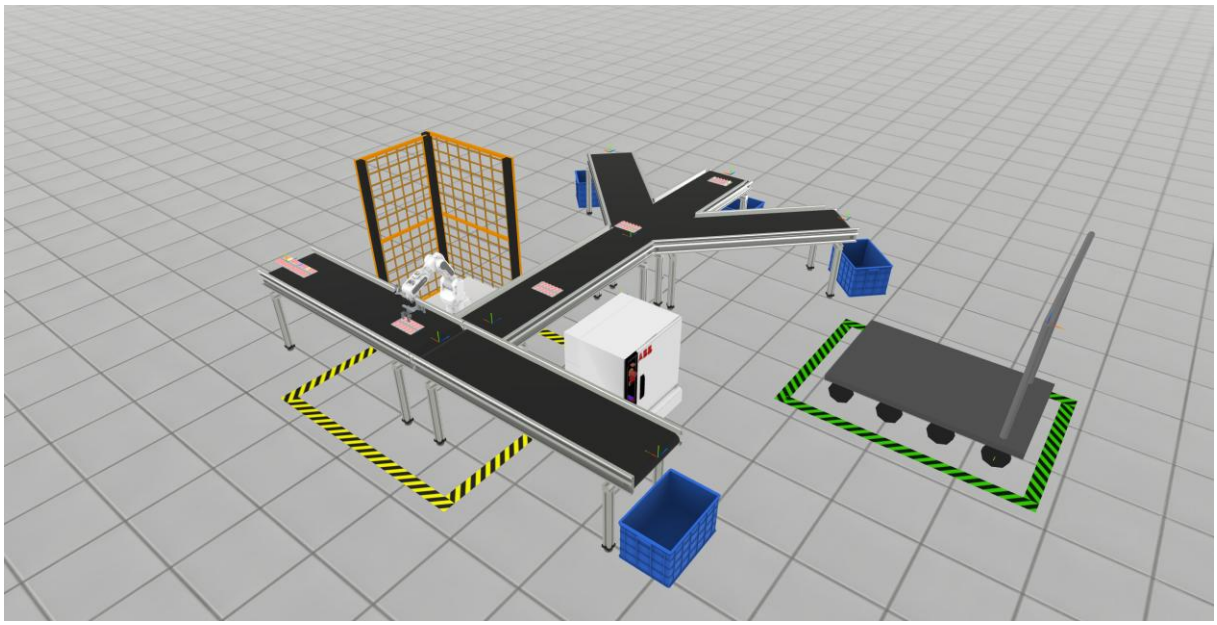


图 4-1 药品生产仿真产线总览

产线核心为“创造者”药品生成模块。为真实模拟生产中的缺陷分布，团队设计了药品生成逻辑：创造者按设定概率生成含随机缺陷（缺药、错药、药片破损、包装破损）的药板产品，缺陷类型与位置随机分布，如图 **4-2**、图 **4-3** 所示。该设计使仿真环境具备与真实产线一致的不确定性，为视觉模型的训练与测试提供了数据基础。

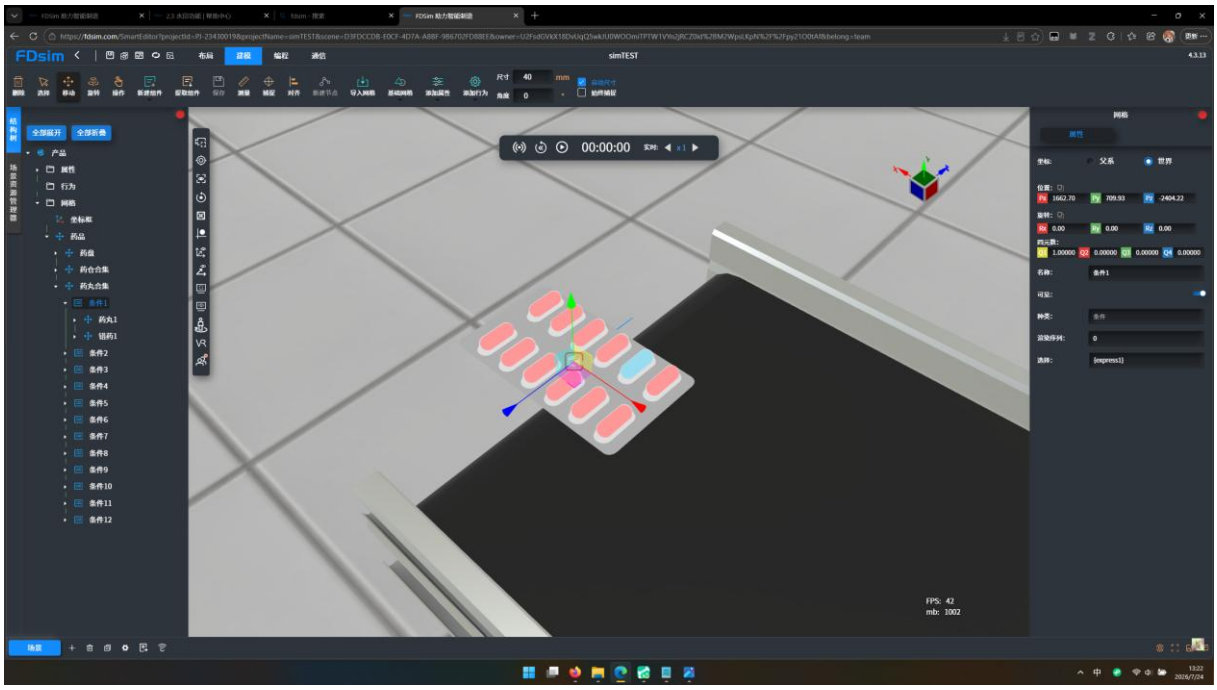


图 4-2 创造者药品生成逻辑

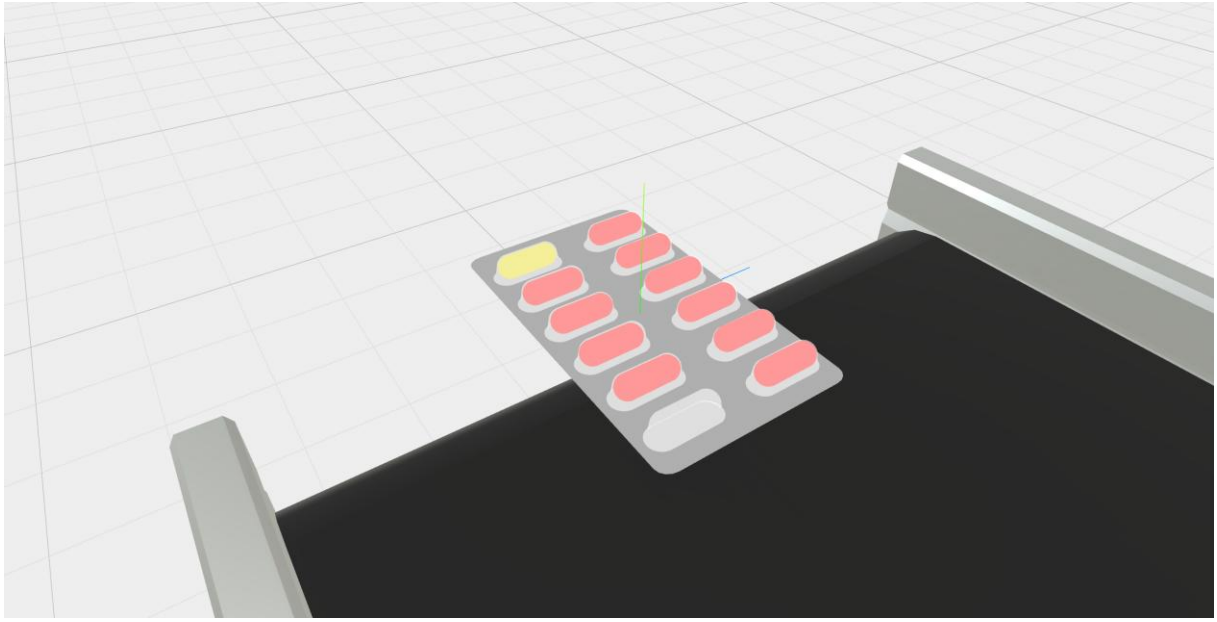


图 4-3 药板生产与输送

检测工位由工业相机与 **CRB 1100-4/0.475-2** 机械臂组成，如图 **4-4** 所示。相机安装于传送带上方，对经过的药板进行定点拍照；机械臂位于检测工位下游，根据视觉判定结果对不良品执行抓取分流。**CRB 1100** 系列机械臂负载 **4**kg、工作半径 **0.475**m，重复定位精度高，满足药板轻载高速分拣需求。

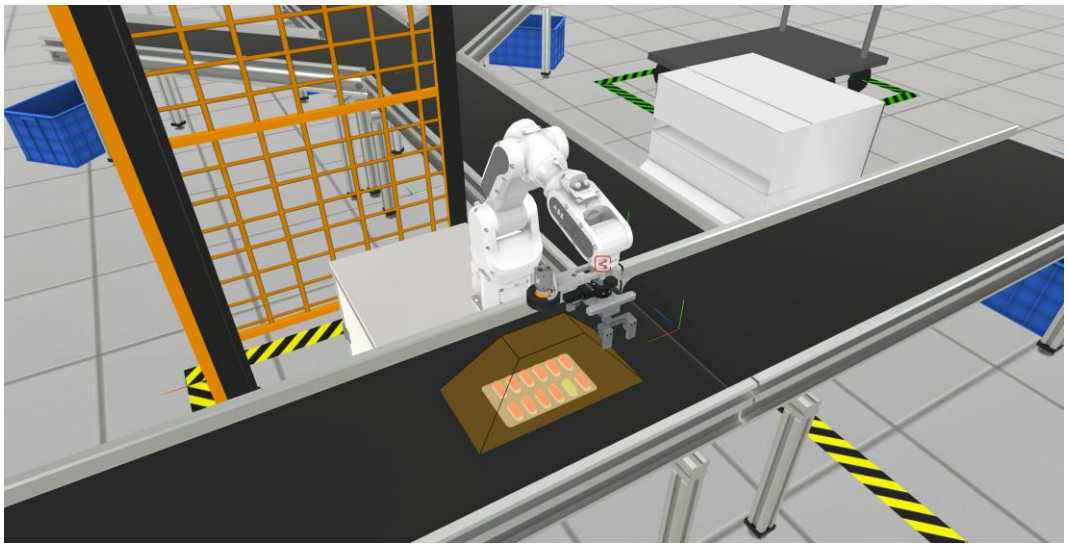


图 4-4 CRB 1100-4/0.475-2 机械臂与相机检测工位

4.2 视觉识别算法设计

4.2.1 缺陷类型定义

结合药品生产实际与仿真场景设定，系统定义 **4** 类药板缺陷，如表 **4-1** 与图 **4-5** 所示。凡检出任一缺陷即判定为不良品。

缺陷类别	英文标签	缺陷描述
缺药	empty_pill	泡罩内缺失药片（空泡）
错药	wrong_color	药片颜色/品类错误（混药）
药片破损	pill_broken	药片碎裂、残缺
包装破损	pack_damaged	泡罩铝箔破损、撕裂

表 4-1 药板缺陷类型定义

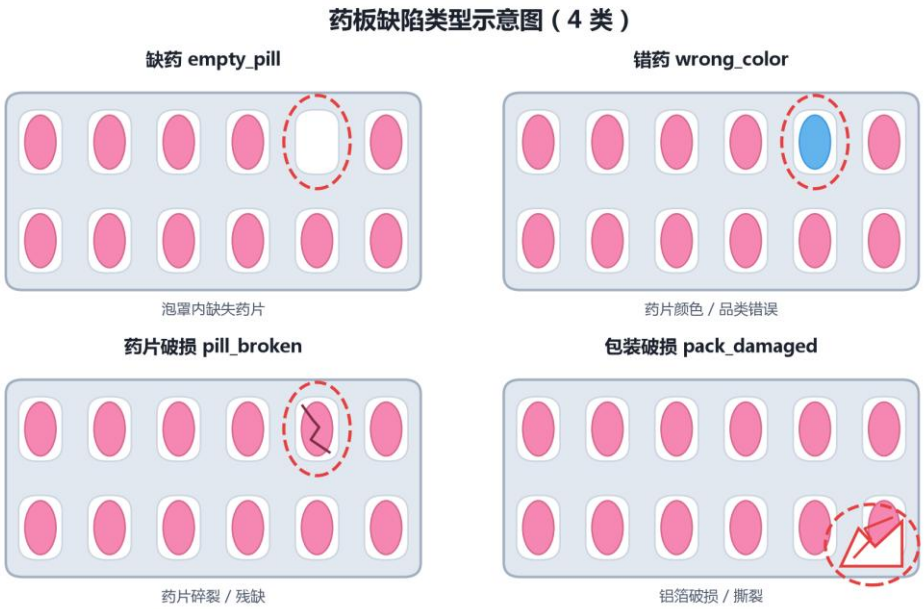


图 4-5 药板缺陷类型示意图

4.2.2 算法选型

缺陷检测需要在产线节拍内同时完成缺陷定位与分类，属于典型的目标检测问题。方案选型对比如下：两阶段检测器（Faster R-CNN 等）精度高但推理慢，难以满足实时性；传统模板匹配泛化差、维护难；单阶段检测器 YOLO 系列将定位与分类统一为回归问题，一次前向推理即可输出全部结果，兼顾速度与精度。

本项目选用 **YOLO26s**（Ultralytics）作为检测模型：s 级模型参数量小、推理速度快，可满足产线实时性要求；基于预训练权重迁移学习，在小样本数据集上即可收敛到高精度；配合 Ultralytics 完善的训练与部署工具链，工程落地效率高。

4.2.3 算法流程

视觉识别算法流程如图 **4-6** 所示：相机采集的原始图像经尺寸缩放、归一化预处理后输入 **YOLO26s** 检测网络，依次经过 Backbone 特征提取、Neck 多尺度特征融合与 Head 目标检测头，再经非极大值抑制（NMS）后处理，输出缺陷类别、置信度与位置坐标，最终汇总判定药板为良品或不良品。

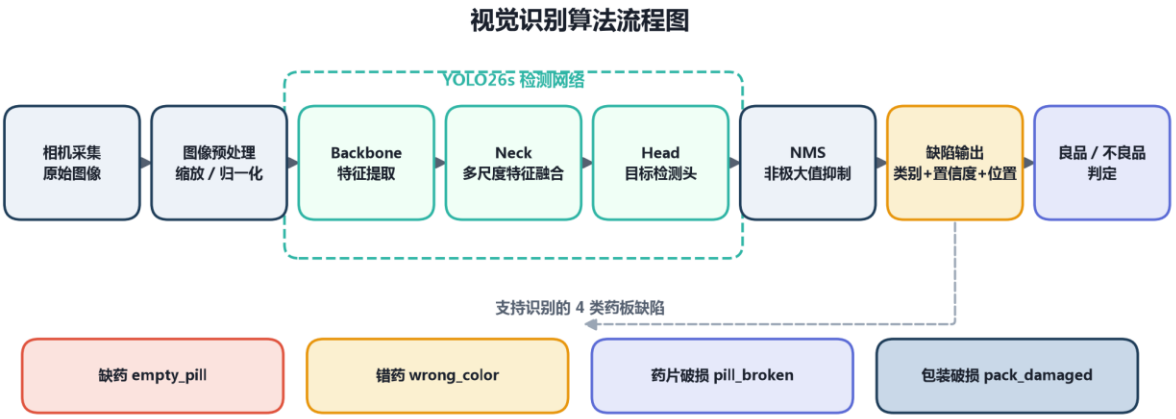


图 4-6 视觉识别算法流程图

4.2.4 数据集构建

团队基于仿真环境构建药板缺陷数据集，全部按 YOLO 格式完成标注。采用仿真合成数据具有三方面优势：缺陷类型、数量与位置完全可控，类别分布均衡；标注自动生成，零人工成本且无标注错误；无需停产采数，数据获取成本低、周期短。

4.2.5 模型训练

模型训练基于 Ultralytics 框架在 GPU 上完成，主要训练参数如表 **4-3** 所示。训练过程采用 Mosaic 拼图、随机翻转、HSV 色彩扰动、RandAugment 等数据增强策略提升模型泛化能力；采用余弦学习率衰减与早停机制防止过拟合。

参数	设置	参数	设置
基础模型	yolo26s.pt（预训练）	优化器	MuSGD
训练轮数	150 epochs	初始学习率	0.01（余弦衰减）
批大小	32	输入尺寸	256×256
早停耐心	50 epochs	数据增强	Mosaic/翻转 /HSV/RandAugment

表 4-3 模型训练主要参数

训练过程损失与指标曲线如图 **4-7** 所示。随着训练进行，box_loss、cls_loss、dfl_loss 均稳定收敛，精确率、召回率快速上升并保持高位，**mAP50** 在约 **20** 轮后即接近 **1.0** 并趋于平稳，**mAP50-95** 持续爬升，训练过程无过拟合现象。

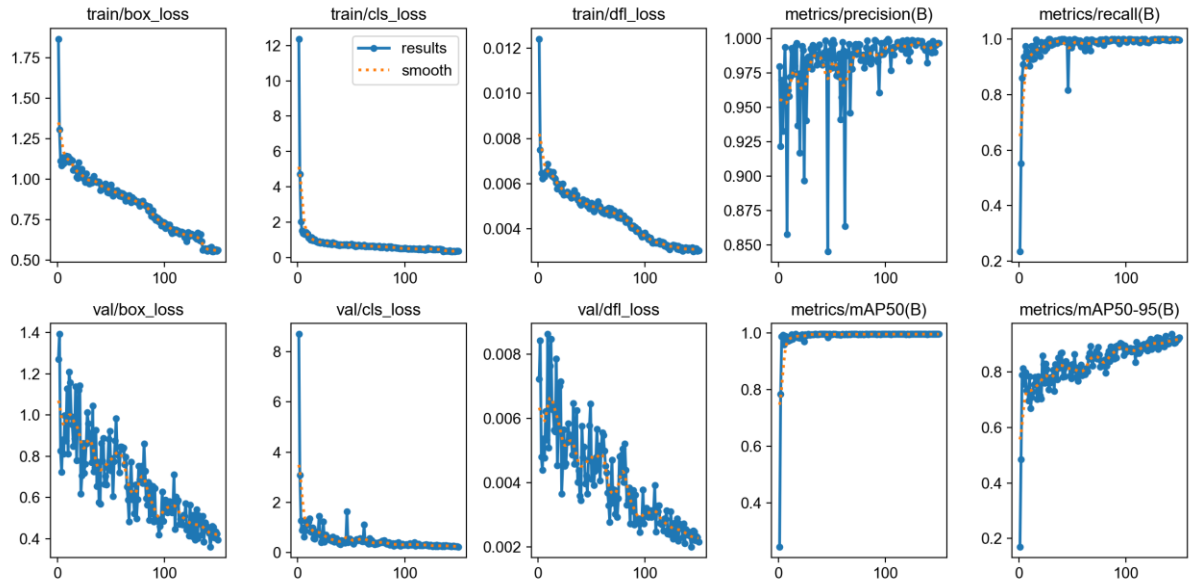


图 4-7 模型训练损失与指标曲线

4.2.6 性能评估

训练完成后在独立测试集上评估，模型最终性能指标如表 **4-4** 所示，归一化混淆矩阵如图 **4-8** 所示。

评估指标	数值	说明
mAP50	0.995	IoU=0.50 时平均精度均值
mAP50-95	0.921	IoU=0.50~0.95 平均精度均值
Precision	0.968	检出缺陷中真实缺陷占比
Recall	0.988	真实缺陷被检出的比例

表 4-4 模型性能评估指标

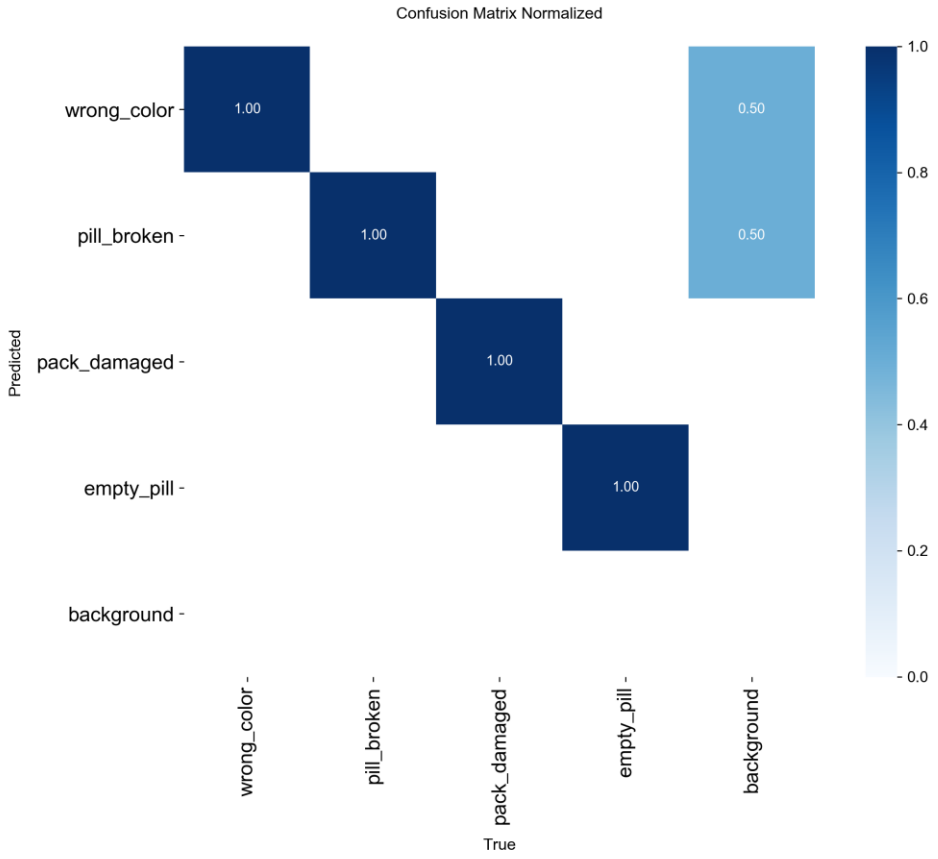


图 4-8 归一化混淆矩阵

结果表明：模型对缺药（empty_pill）与药片破损（pill_broken）两类缺陷实现 **100%** 准确识别；包装破损（pack_damaged）识别准确率 **95%**；错药（wrong_color）识别准确率 **90%**，少量样本与药片破损、背景存在混淆，主要因颜色缺陷特征尺度较小。整体 **mAP50** 达 **0.995**、召回率 **0.988**，漏检率极低，满足药品质量检测“宁严勿宽”的应用要求。

4.3 OPC UA 通讯与联动控制

4.3.1 通讯协议选型

OPC UA 是工业自动化领域主流的跨平台通讯标准，具备平台无关、安全可靠、语义化建模等优势，是连接 IT 视觉系统与 OT 产线控制的理想选择。**FDSim** 平台原生支持 **OPC UA** 客户端，因此项目采用 **OPC UA** 作为视觉服务与仿真产线之间的通讯协议。

4.3.2 通讯架构与信号定义

通讯架构采用“服务端—客户端”模式：视觉识别服务 vision_service 作为 **OPC UA** 服务端，对外暴露信号节点；**FDSim** 作为 **OPC UA** 客户端，读写信号节点完成数据交互。信号定义如表 **4-5** 所示。

信号	全称	方向	功能
VT	Vision Trigger	FDSim → 服务	药板到位拍照触发信号
VR	Vision Result	服务 → FDSim	识别结果（缺陷类别/置信度/位置）

表 4-5 OPC UA 信号定义

4.3.3 通讯时序

系统通讯时序如图 **4-9** 所示：药板到达检测工位后，**FDSim** 写入 VT=**1** 触发拍照；vision_service 监听触发信号，采集相机图像并完成 **YOLO26s** 推理；随后将识别结果写入 VR 信号；**FDSim** 信号蓝图解析 VR，控制机械臂执行分流或放行；VT 复位后进入下一检测周期，实现“触发—识别—回写—执行”的全流程闭环。

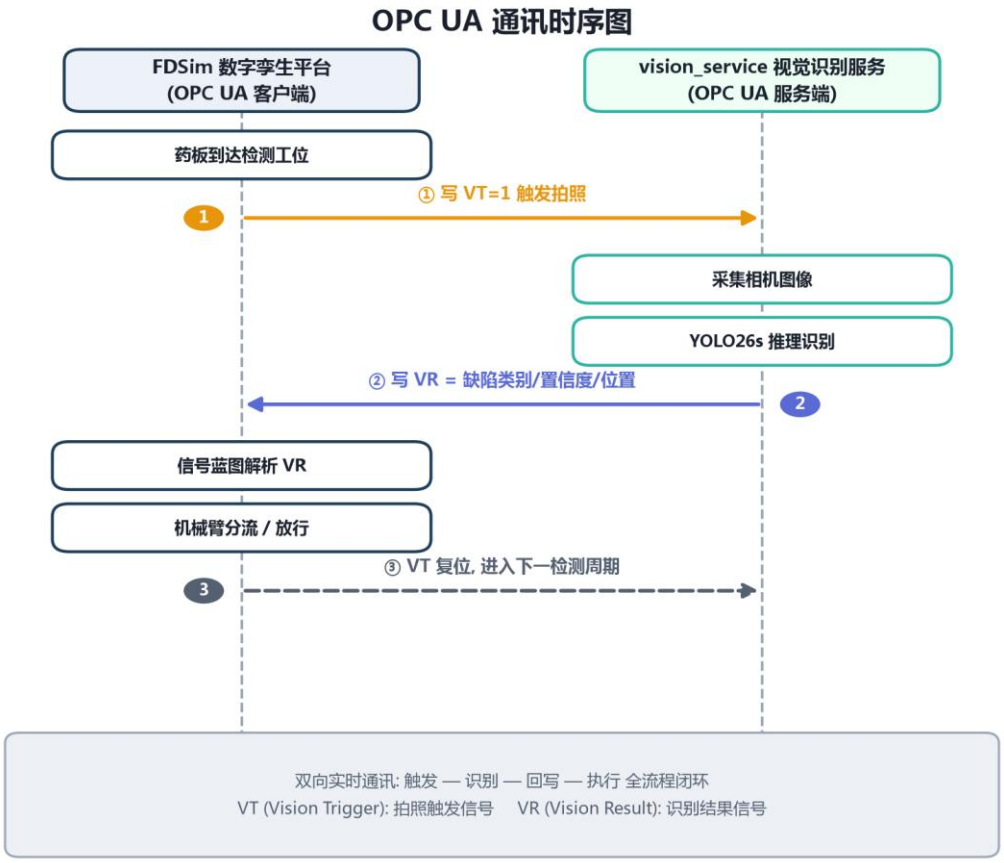


图 4-10 OPC UA 通讯时序图

4.3.4 信号蓝图联动逻辑

产线控制逻辑通过 **FDSim** 信号蓝图实现，如图 **4-10** 所示。蓝图节点完成传送带节拍控制、VT 信号写入、VR 信号读取与解析、机械臂动作触发等功能，将视觉判定结果无缝转化为产线物理动作，实现不良品自动分流。



图 4-10 信号蓝图联动逻辑

4.4 实时监控看板

为实现检测过程可视化与数据追溯，团队开发了基于 Web 的实时监控看板（vision_dashboard），浏览器访问 localhost:**8000** 即可使用，运行界面如图 **4-11** 所示。看板主要功能包括：

（**1**）实时画面区：实时显示相机采集画面与 AI 检测框标注结果，当前识别缺陷类别、置信度与识别时间一目了然；

（**2**）统计卡片区：累计检测、良品、缺陷品、累计缺陷四项核心指标实时统计；

（**3**）最新缺陷列表：按时间倒序记录每一次缺陷检测结果（缺陷类型、置信度、识别时间），支持质量追溯；

（**4**）自动刷新：看板每秒自动刷新，与产线节拍同步，零人工干预运行。

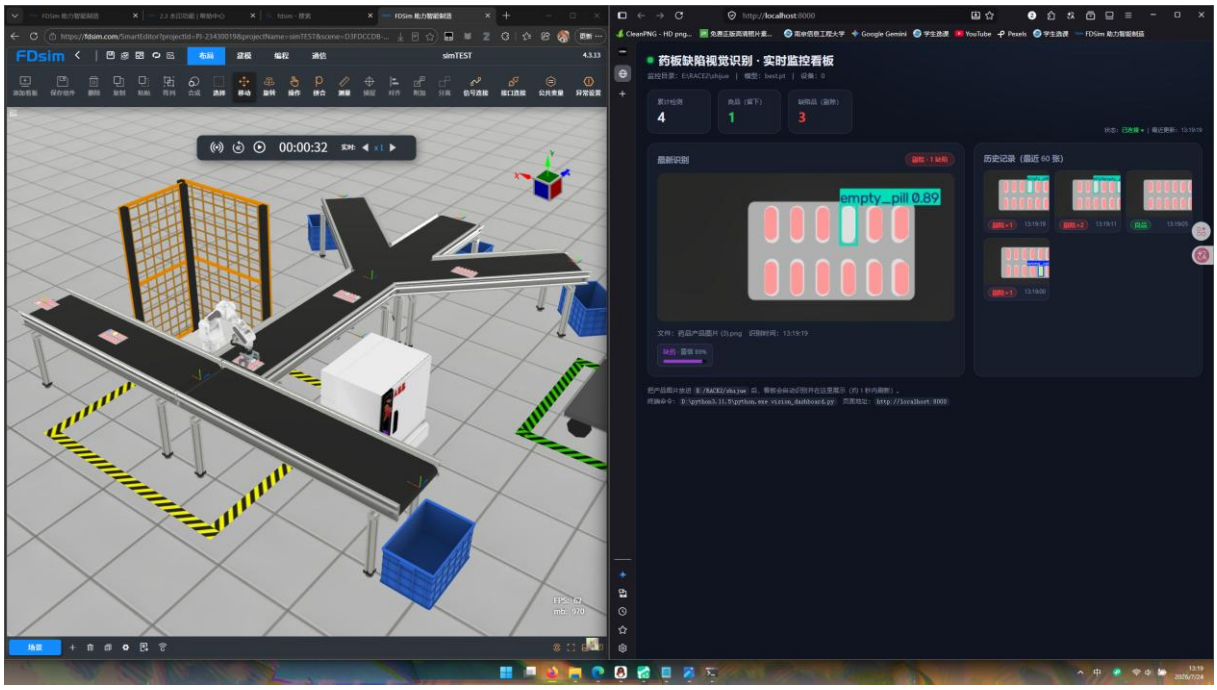


图 4-11 实时监控看板运行界面

05

CHAPTER 05

Verification & Results

系统运行与测试结果

系统联调、识别效果展示与四项关键指标

5 系统运行与测试结果

5.1 测试环境与方法

测试环境：**FDSim** 数字孪生平台 + Python **3.11** + Ultralytics **YOLO26s** 推理服务，视觉服务与 **FDSim** 通过 **OPC UA** 互联。测试方法：启动完整产线连续运行，创造者按概率生成含随机缺陷的药板，观察视觉识别、信号联动与机械臂分流的完整闭环，并通过监控看板统计检测数据。

5.2 系统联调运行

图 **5-1** 为系统联调运行场景。药板经传送带到达相机工位后触发视觉识别，识别结果实时叠加显示缺陷类别与置信度，不良品由机械臂准确抓取分流，全流程自动运行、节拍稳定。

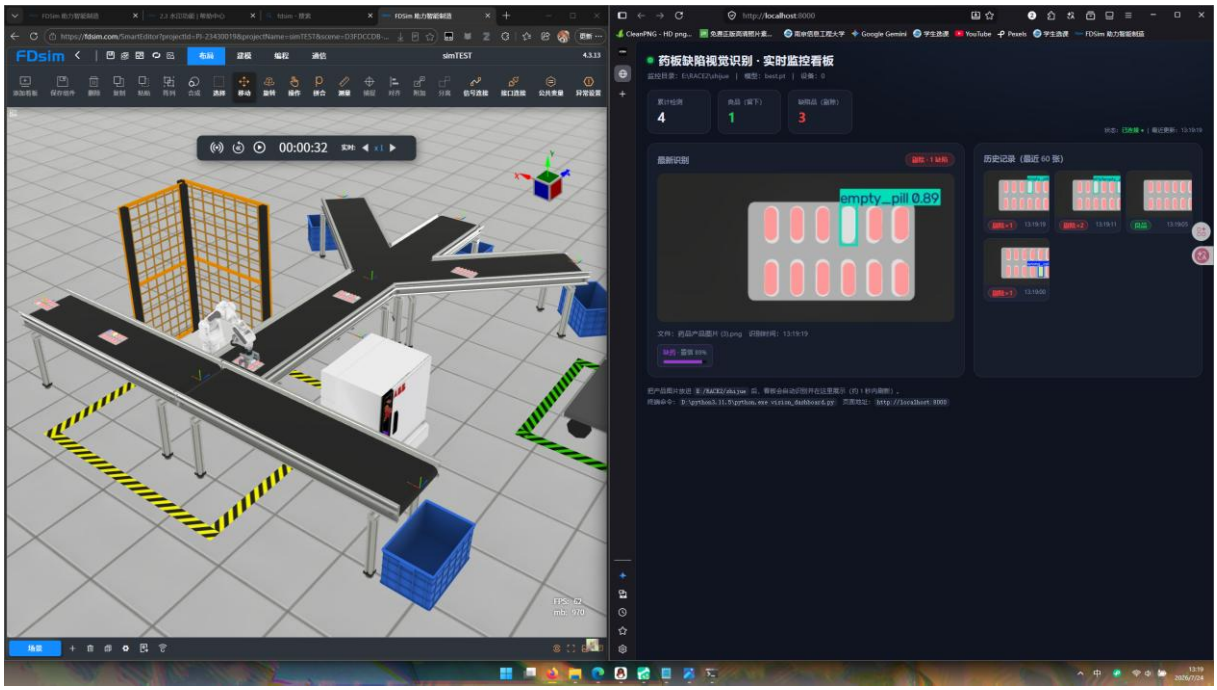


图 5-1 视觉识别与产线联调运行

5.3 识别效果展示

图 **5-2** 为模型在测试集上的批量识别效果，图 **5-3**、图 **5-4** 为视觉识别图集样本。可见模型能够稳定检出药板上的各类缺陷并给出准确的类别判定与位置标注，置信度普遍较高。

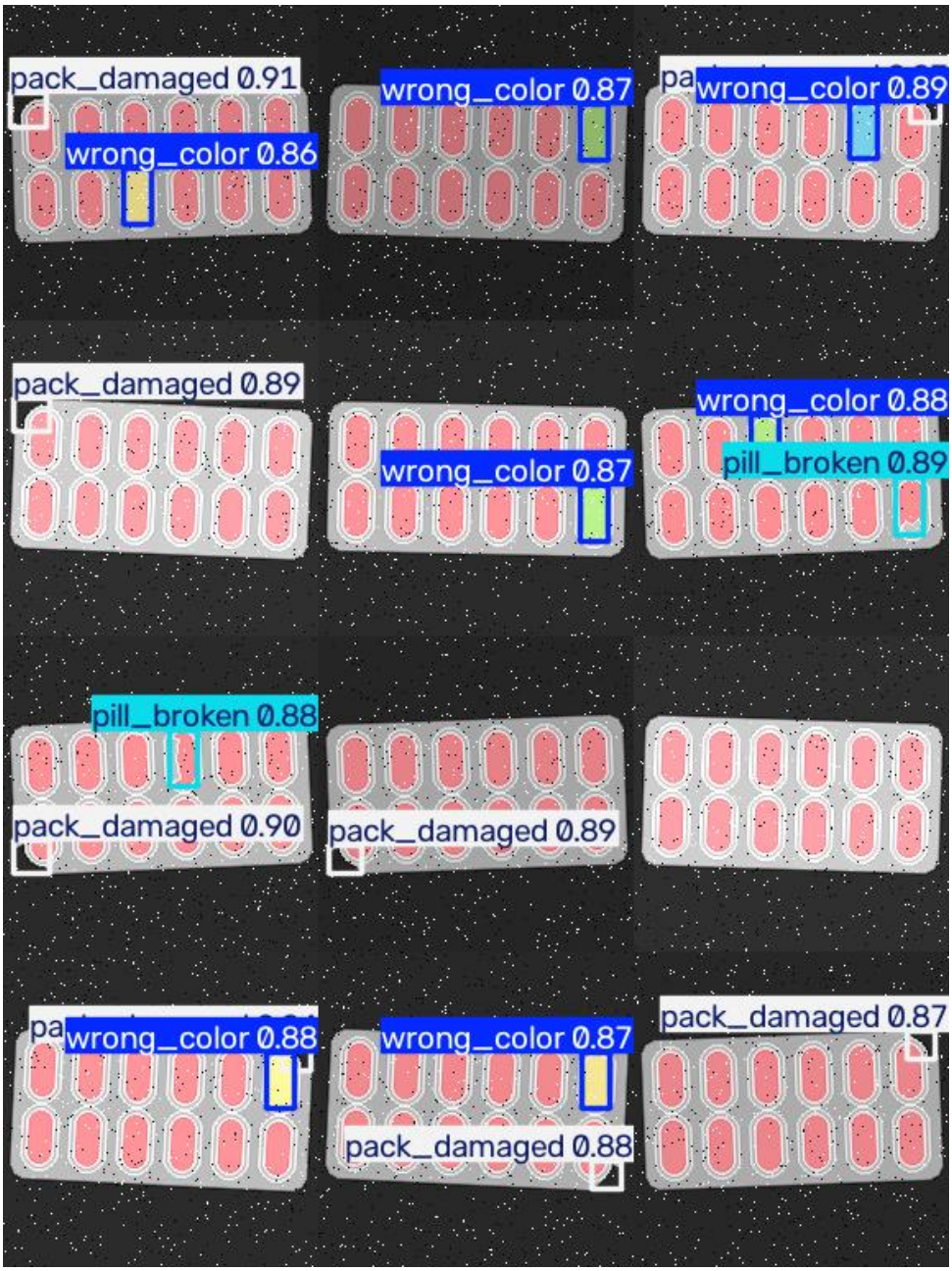


图 5-2 测试集批量识别效果

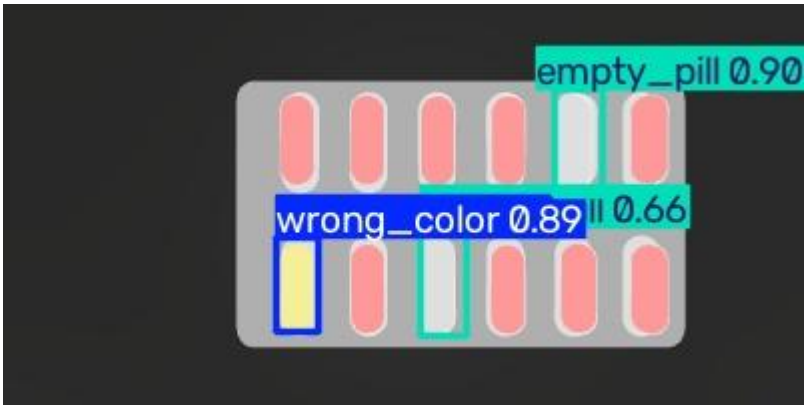


图 5-3 视觉识别样本（一）

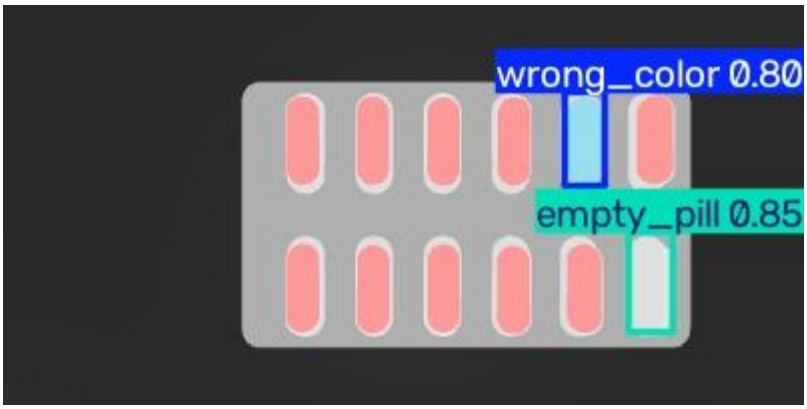


图 5-4 视觉识别样本（二）

5.4 测试结果分析

综合模型评估与产线联调结果：

（**1**）检测精度：测试集 **mAP50** 达 **0.995**、召回率 **0.988**，缺药与药片破损两类缺陷识别准确率 **100%**，满足药品质检要求；

（**2**）实时性能：单次推理耗时在产线节拍允许范围内，VT/VR 信号交互稳定，未出现通讯中断或信号丢失；

（**3**）分拣执行：机械臂对不良品分流动作准确、响应及时，良品全部正常放行，无误剔、漏剔；

（**4**）数据追溯：监控看板完整记录每次检测结果，缺陷类型、置信度、时间可查可溯，形成质量闭环。

06

CHAPTER 06

Challenges & Innovation

技术难点与创新点

小目标识别、实时协同、缺陷可控生成与异构系统集成

6 技术难点与创新点

6.1 技术难点与解决方案

6.1.1 小尺度缺陷特征微弱

错药等缺陷在药板图像中占比小、特征微弱，极易漏检。解决方案：采用 **256×256** 高分辨率输入保留细节特征，配合 Mosaic、RandAugment 等数据增强扩充缺陷形态，模型召回率达 **0.988**，错药识别准确率 **90%**。

6.1.2 仿真系统与 AI 服务的实时协同

视觉推理耗时与产线节拍必须严格匹配，否则会出现漏拍、误触发。解决方案：设计 VT/VR 握手机制——**FDSim** 写 VT 触发、服务推理完成写 VR 应答、信号蓝图确认后 VT 复位，形成可靠的时序闭环。

6.1.3 缺陷样本获取难、分布不均衡

真实产线缺陷样本稀少且分布不均，直接训练易过拟合。解决方案：利用仿真环境可控生成缺陷样本，缺陷类型、数量、位置可调，构建类别均衡的合成数据集，实现小样本下的高精度训练。

6.1.4 多子系统集成复杂

系统涉及仿真平台、AI 推理、工业通讯、机器人控制多个技术栈。解决方案：采用分层解耦架构，各子系统通过标准接口（**OPC UA** / HTTP）互联，独立开发、统一联调，显著降低集成复杂度。

6.2 创新点

（**1**）AI 视觉与数字孪生深度融合：在 **FDSim** 数字孪生产线中闭环运行自研视觉检测模型，实现“虚拟验证、零停机试错”的智能制造新模式；

（**2**）面向药板缺陷的专用检测模型：自主构建药板缺陷数据集并训练 **YOLO26s** 模型，**4** 类缺陷 **mAP50** 达 **0.995**，针对小尺度缺陷优化显著；

（**3**）轻量级全栈实现：视觉服务、**OPC UA** 通讯与监控看板均以 Python 轻量化实现，部署成本低、可移植性强，便于向真实产线迁移；

（**4**）检测数据全程追溯：检测结论、置信度、时间戳自动记录并可视化，为药品质量追溯与工艺改进提供数据支撑。

07

CHAPTER 07

Conclusion & Outlook

总结与展望

总结项目成果并规划四条未来发展路径

7 总结与展望

7.1 项目总结

本项目围绕药品泡罩包装质量检测场景，完成了“医眼盯真”药物生产智能检测系统的设计与实现：在 **FDSim** 数字孪生平台搭建了含随机缺陷注入的药品生产仿真产线；自主构建药板缺陷数据集，训练 **YOLO26s** 模型实现 **4** 类缺陷检测，**mAP50** 达 **0.995**、召回率 **0.988**；基于 **OPC UA** 实现视觉服务与产线的双向联动，机械臂对不良品自动分流；开发实时监控看板实现检测数据可视化与追溯。系统形成了“检测—判定—分拣—追溯”的完整质量闭环，达到了预期目标。

7.2 不足与展望

（**1**）向真实产线迁移：当前系统运行于数字孪生环境，未来将结合真实相机标定、光照补偿与域自适应技术，缩小仿真到现实的差距；

（**2**）缺陷类型扩展：可进一步覆盖铝箔褶皱、印刷缺陷、异物混入等更多缺陷类型，提升系统适用面；

（**3**）边缘部署优化：通过模型剪枝、量化与 TensorRT 加速，将推理服务部署至边缘计算设备，进一步降低延迟；

（**4**）数据价值挖掘：基于累积的检测数据开展缺陷归因分析，反向指导生产工艺优化，实现从“检出缺陷”到“预防缺陷”。

附录 A 项目源程序清单

文件	功能说明
vision_service.py	视觉识别推理服务（OPC UA 服务端），监听 VT 触发、推理并回写 VR

vision_dashboard.py	实时监控看板服务（Flask），统计与展示检测数据
dashboard.html	监控看板前端页面
opcua_probe.py	OPC UA 通讯测试工具
train_pill.py	药板缺陷检测模型训练脚本
predict_pill.py / predict_demo.py	模型推理与效果演示脚本
data.yaml	数据集配置（4 类缺陷标签）
best.pt	训练完成的最优模型权重

表 A-1 源程序文件清单