

增强器二极磁铁自动化生产线 进展

康文 牟智慧

代表CEPC增强器磁铁团队



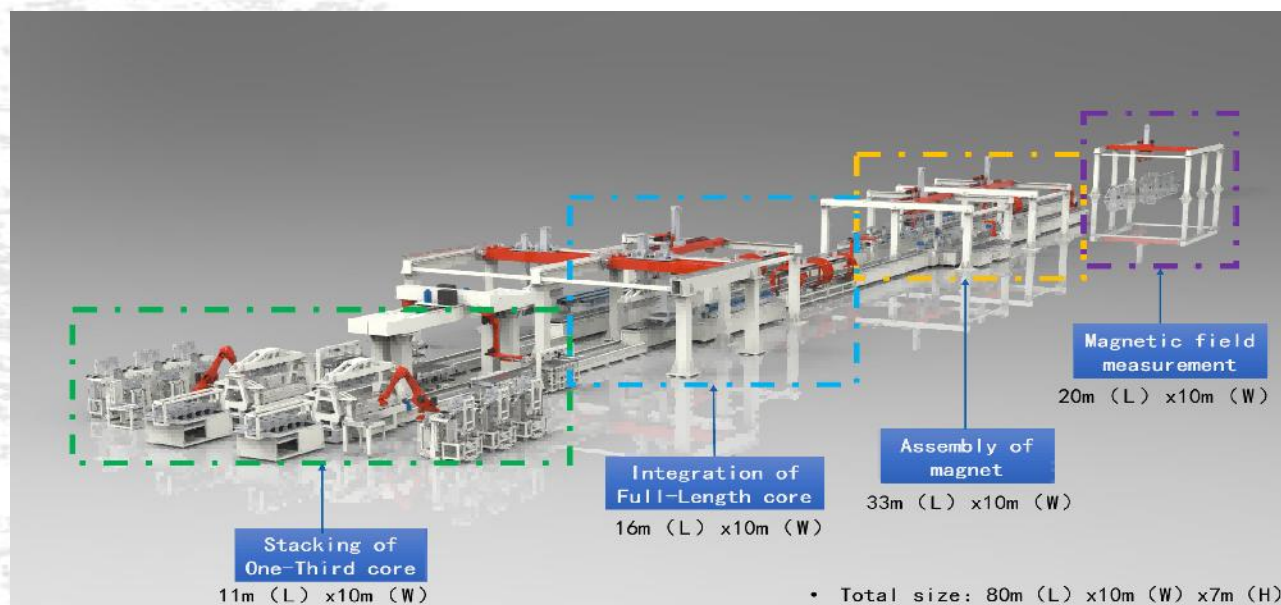
中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

目录



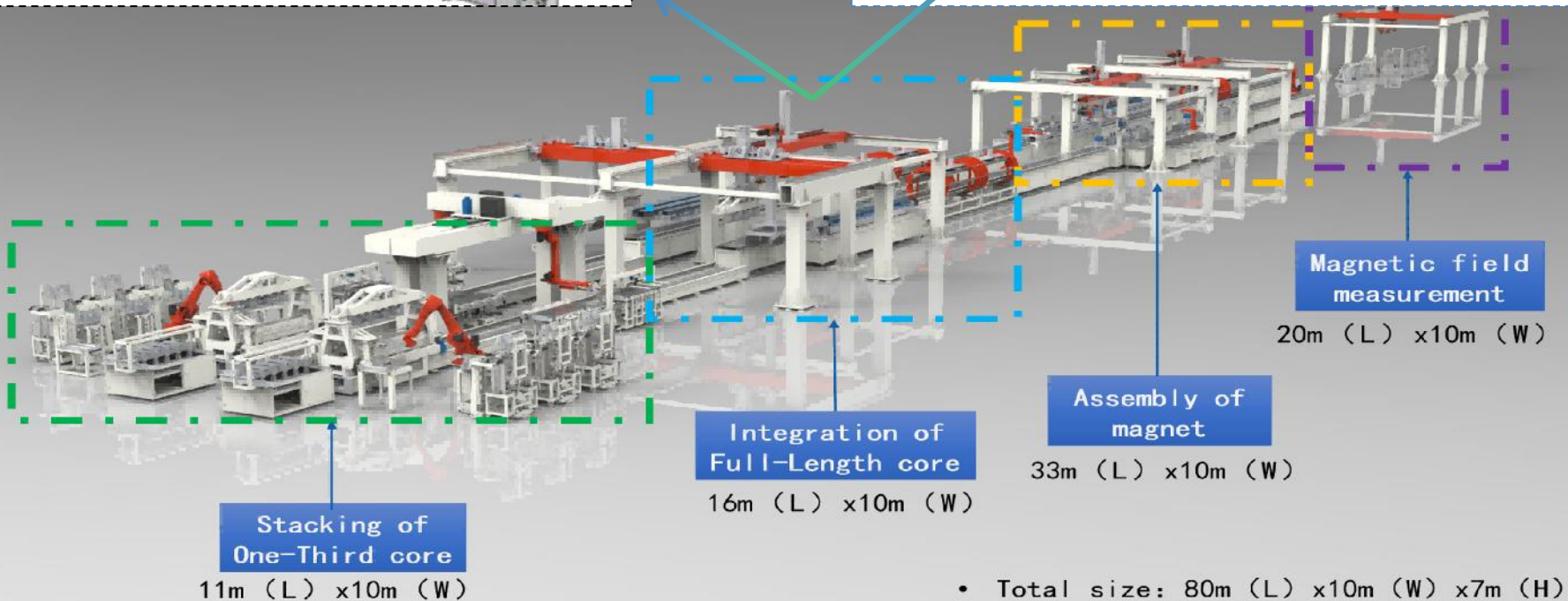
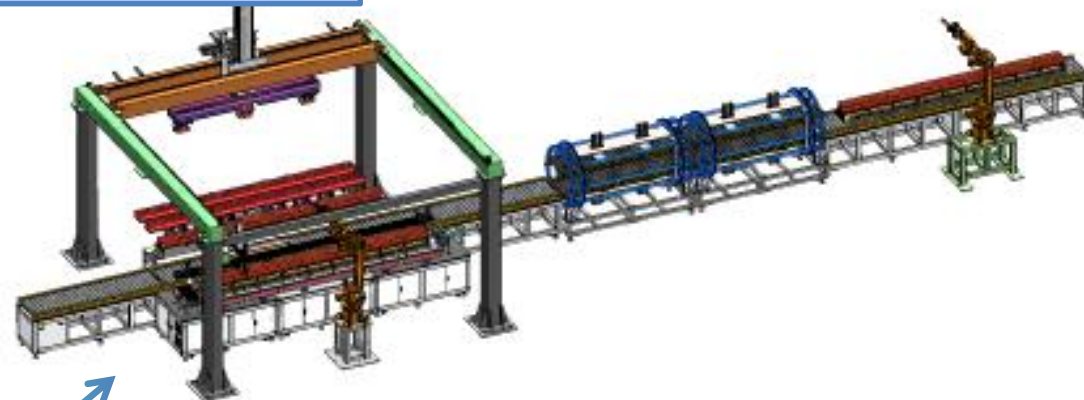
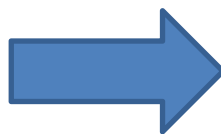
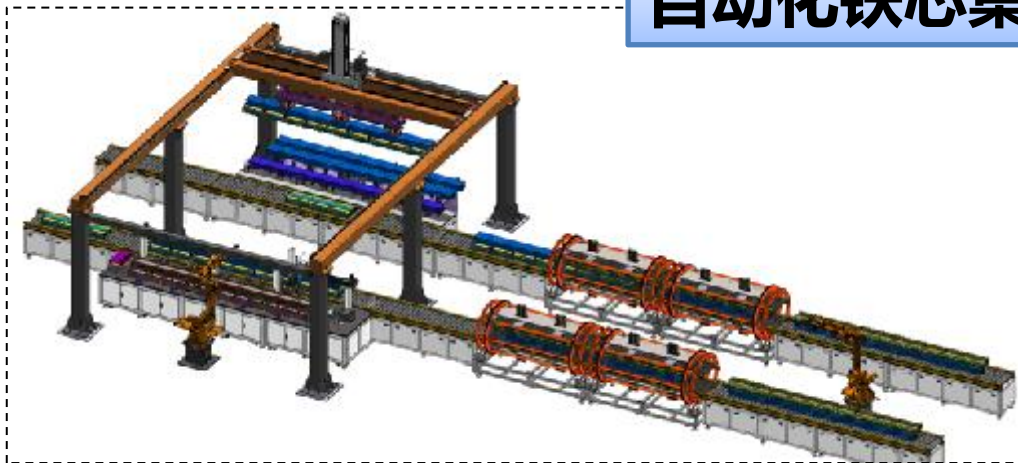
中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

- 生产线布局优化
- 自动化铁芯叠装系统
 - 冲片叠装部分
 - 拉板焊接部分
- 工作计划



生产线布局优化

自动化铁芯集成系统-双线改单线



生产线布局优化

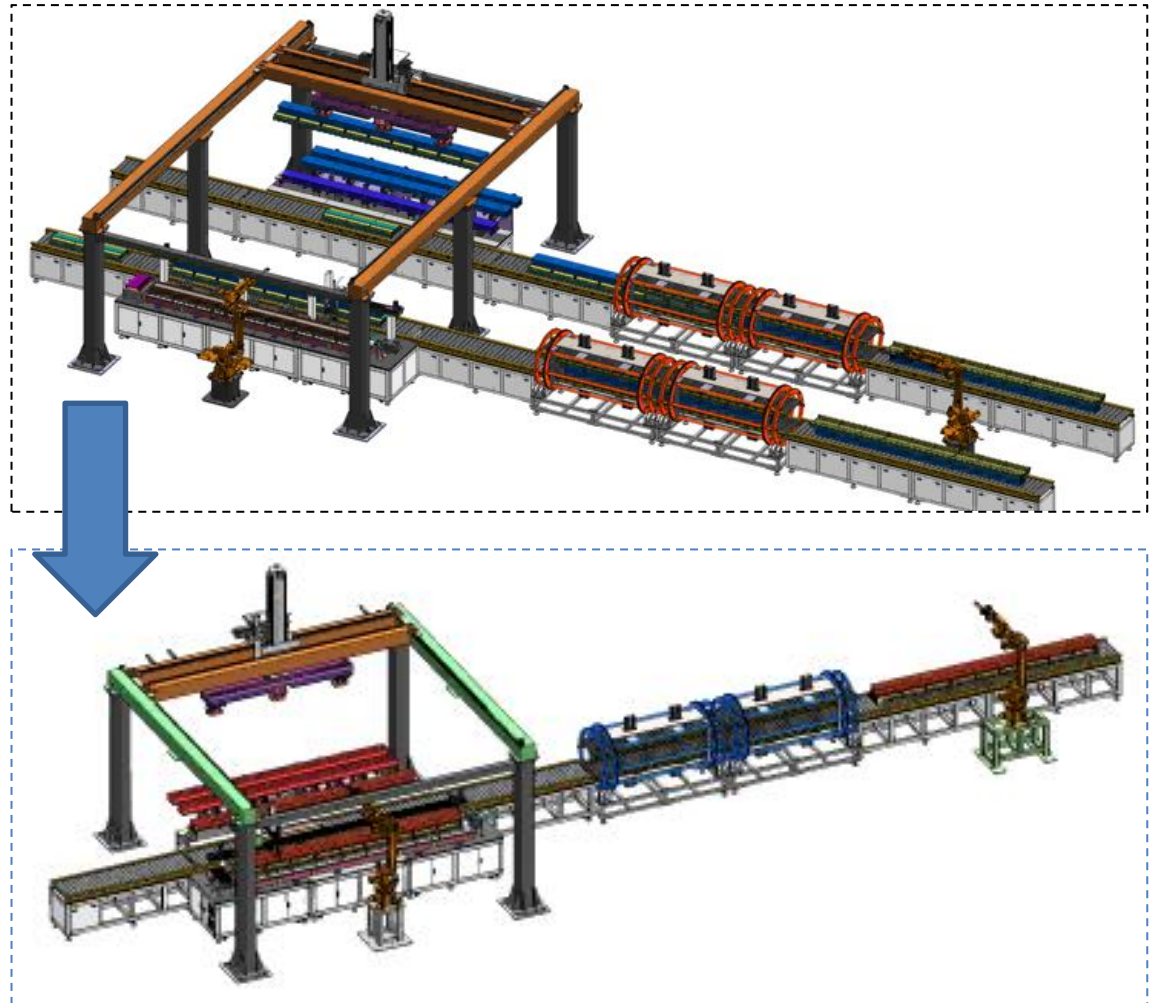
自动化铁芯集成系统-双线改单线

一、布局重构：双线合并与空间集成

- **合并单线流**：取消了原方案中占地面积大、物料跨区域流转困难的“双线并行”布局。通过移除中间宽大的通道障碍，将左右两侧独立的输送线合二为一，构建为高效单线流。
- ✓ 大幅节省了车间通道面积，使前后工序的物理衔接更加紧密。
- **立体空间集成**：针对原设备沿长边双侧分布、导致空间占用过高的问题，新方案采用紧凑型集成化设计，对厂房要求更低。

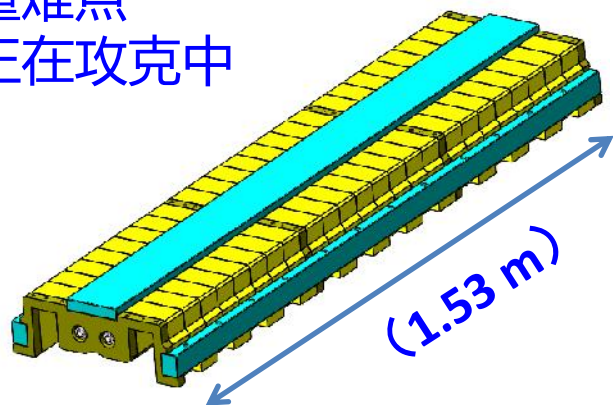
二、成本精益分配：降低初投，保障调试

- ✓ 结构精简减少了设备的制造成本，降低了产线的固定资产初次投入，为后续高难度的现场调试、以及调试过程中可能面临的设备改造与技术攻关提供了充足的资金支持，提升了项目整体的抗风险能力。

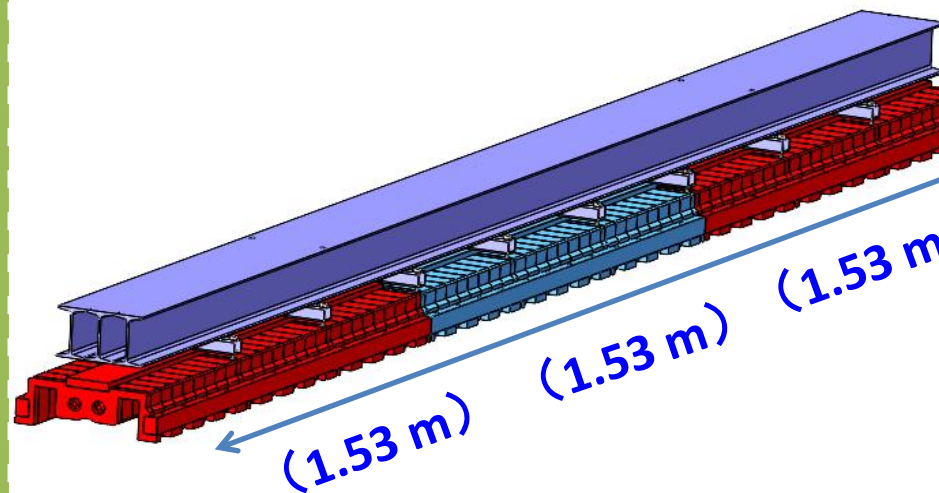
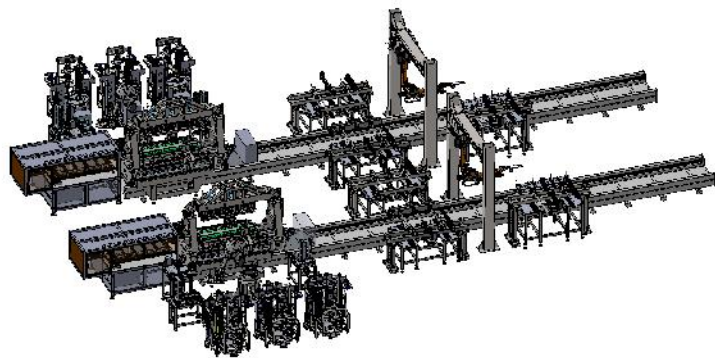


生产线系统生产的产品

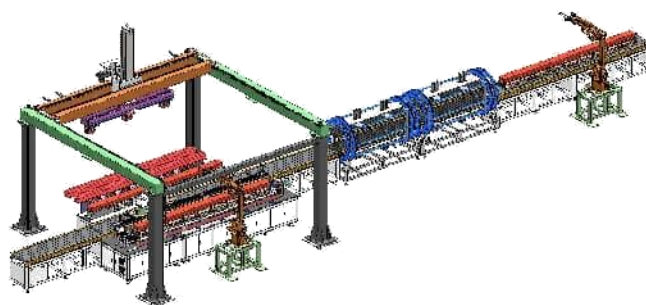
重难点
正在攻克中



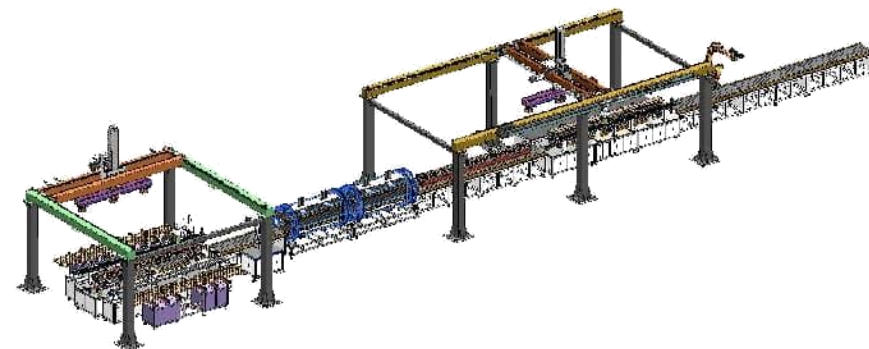
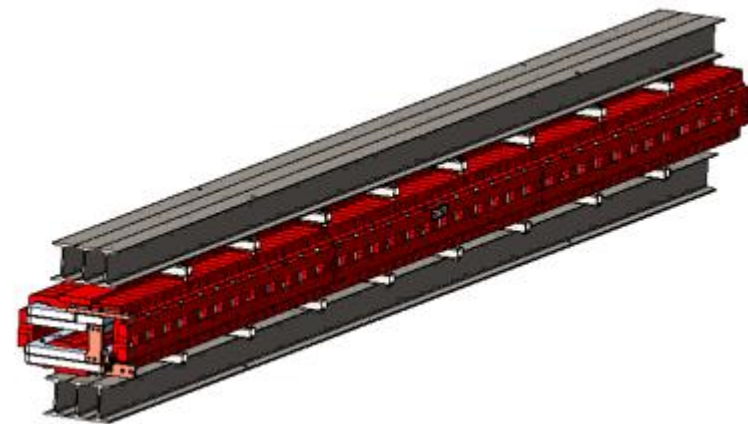
自动化铁芯叠装系统



自动化铁芯集成系统



自动化磁铁总装系统



自动化铁芯叠装系统

冲片叠装功能区

拉板焊接功能区

节拍
瓶颈

双线并行
功能分区

自动叠装平台

叠装机器人

拉杆自动
装配设备

视觉系统

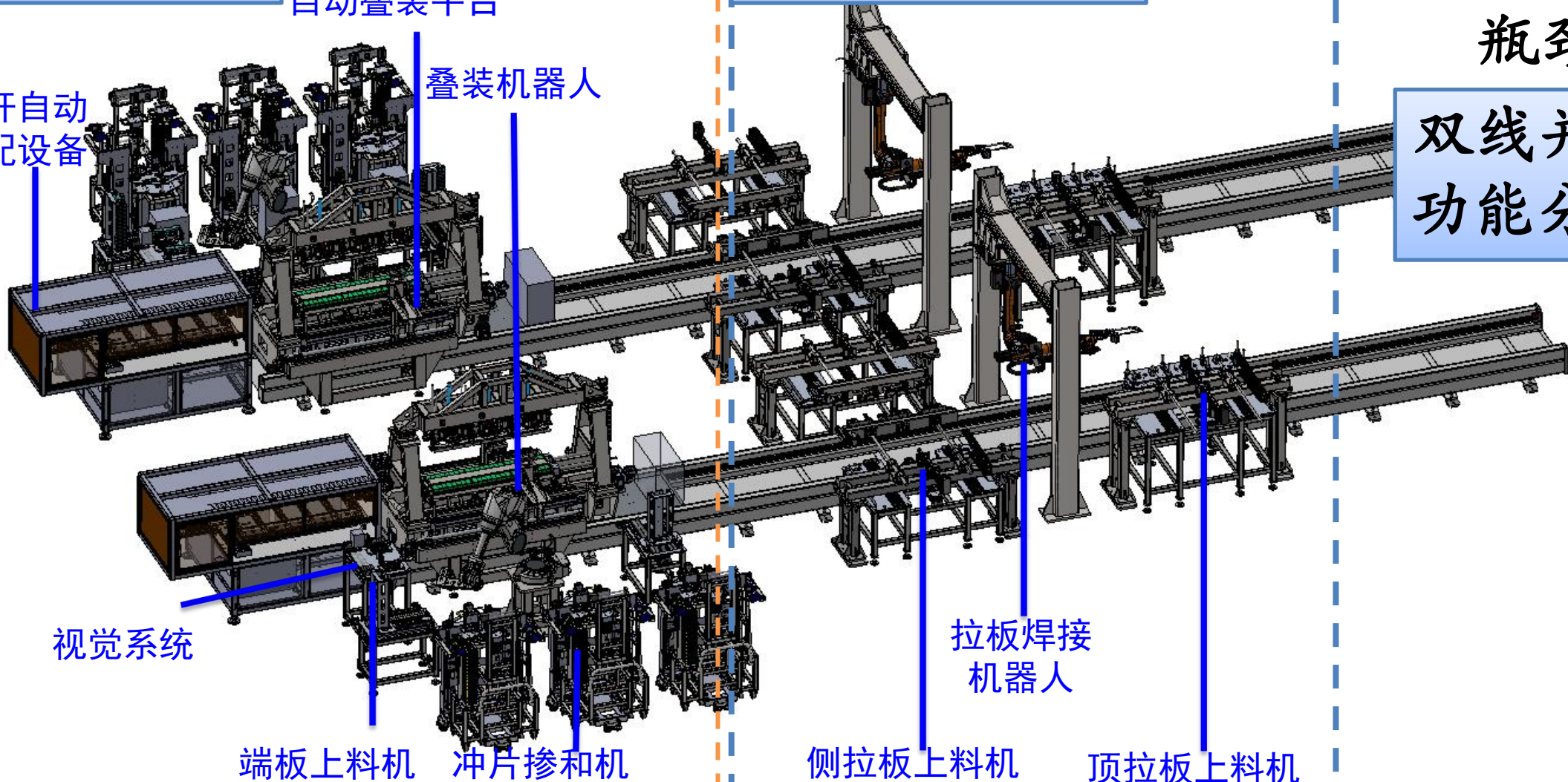
端板上料机

冲片掺和机

拉板焊接
机器人

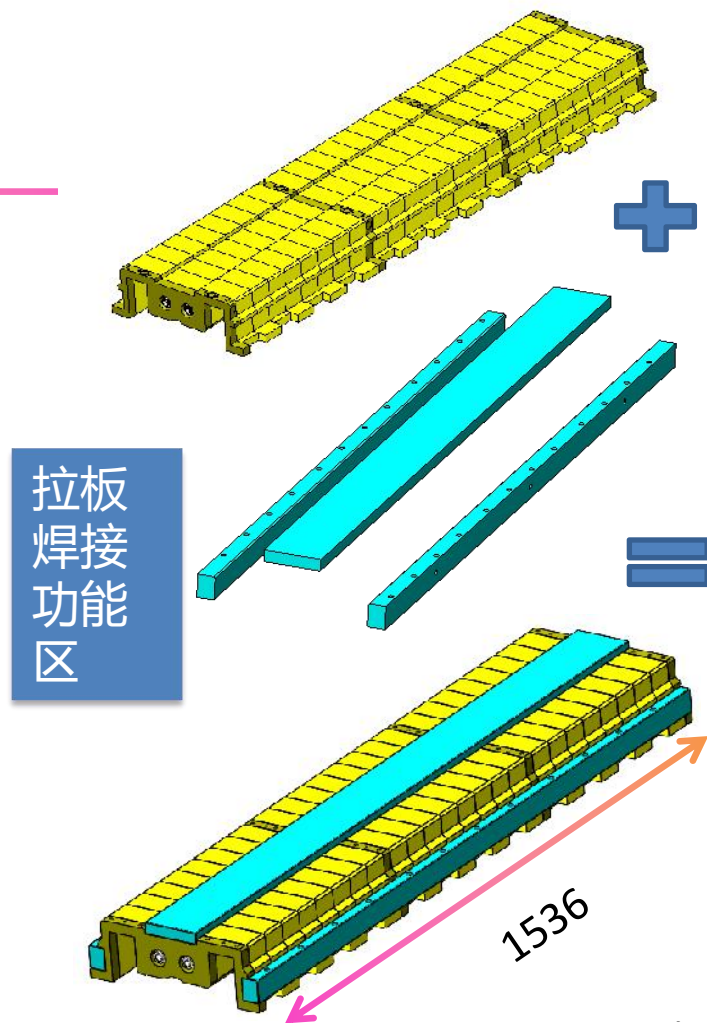
侧拉板上料机

顶拉板上料机



自动化铁芯叠装系统

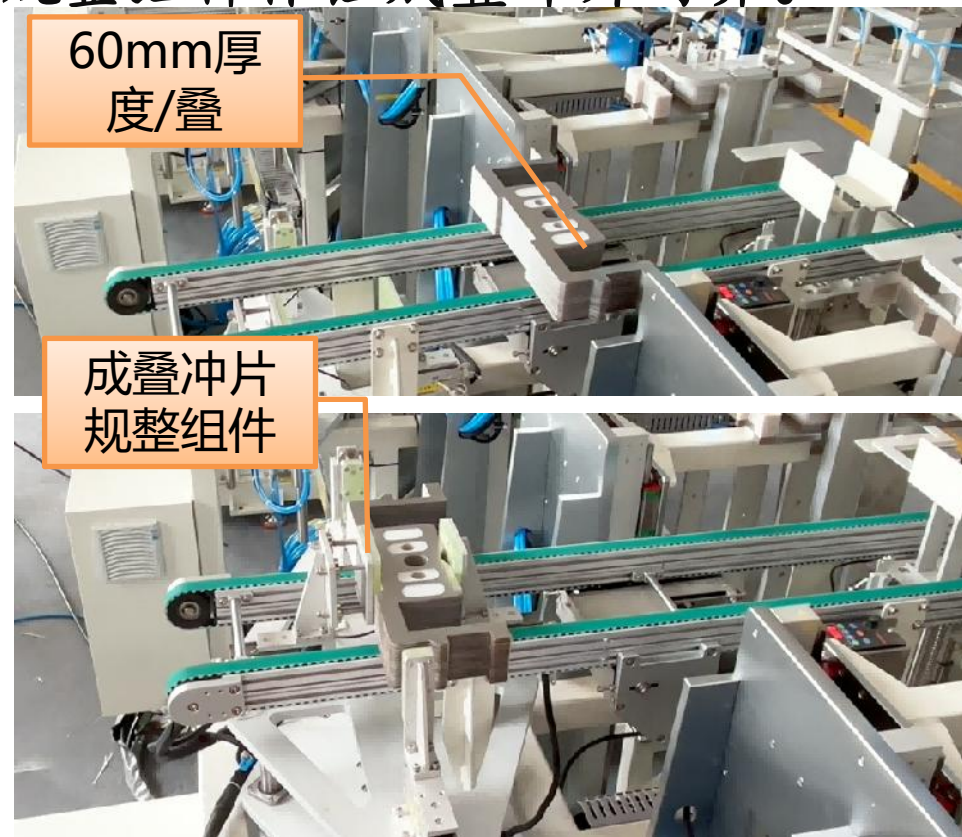
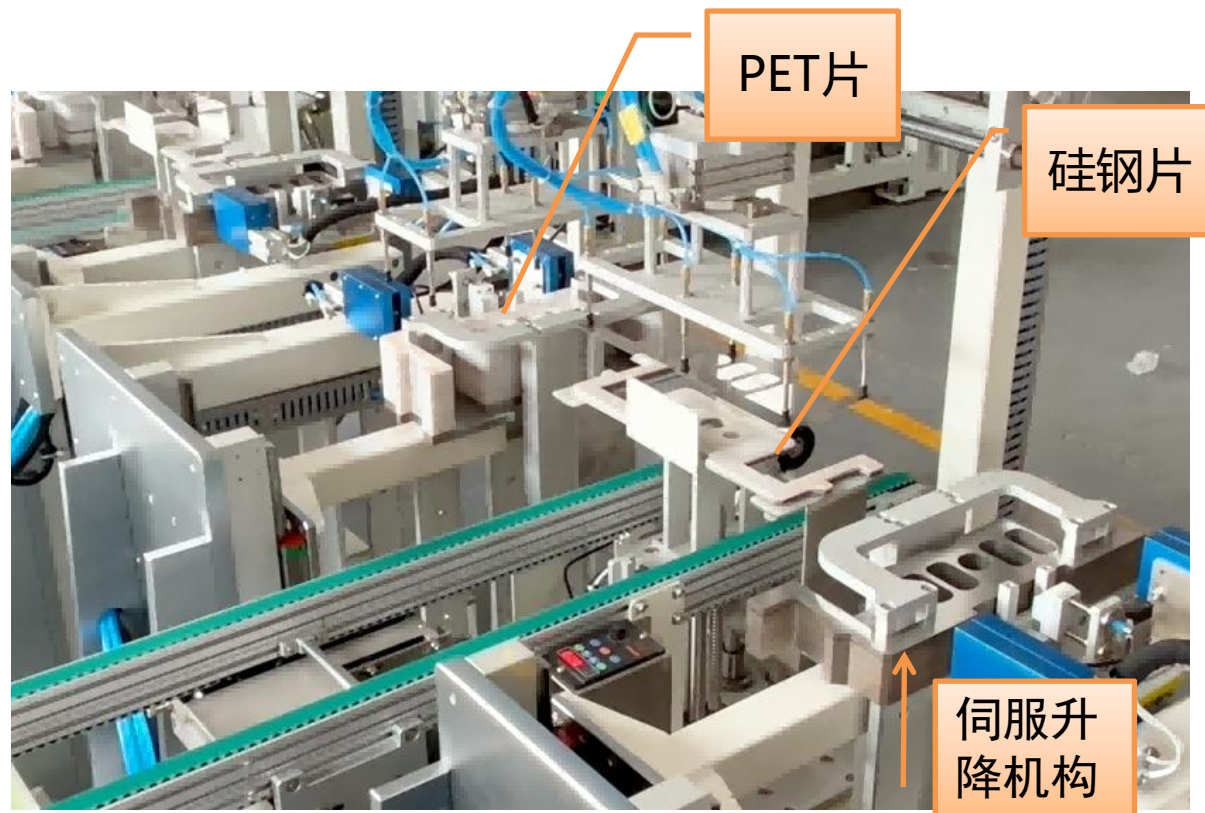
目前，自动化铁芯叠装系统的第一个功能区：**冲片叠装**，已经完成调试。



自动化铁芯叠装系统

冲片叠装 动作流程

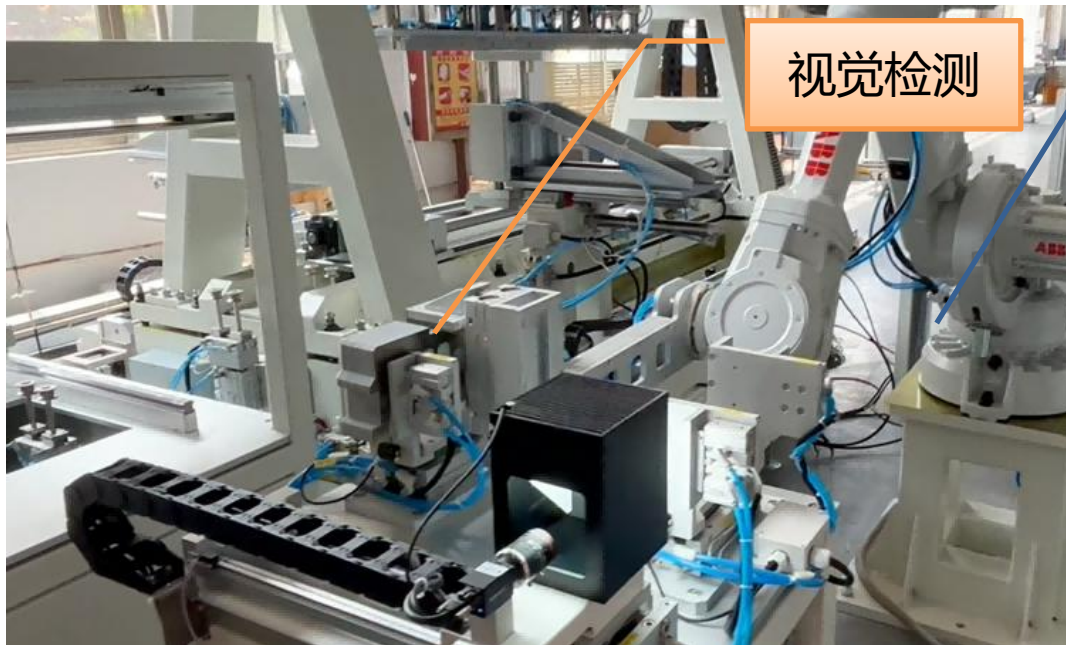
- **物料抬升：**伺服升降机构将料堆抬升至吸取位置，同时承料台升起至掺合位。
- **混配与输送：**气缸与真空吸盘协调作业，交替抓取钢片与塑料片（PET），按序混合成60mm一叠，随后由输送带向前运送。
- **末端对齐定位：**每叠冲片到达输送带末端时，规整组件保证成叠冲片对齐。



自动化铁芯叠装系统

冲片叠装 动作流程

- **视觉检测识别：**机械手抓取 60 mm 料包移动至视觉检测站，夹爪气缸动作将冲片压紧固定。随后，相机组件在气缸驱动下横移至检测位，进行高速拍照。
- **核对钢片与 PET 片的数量及混配顺序；**确认是否存在片材粘连现象
- **检测无误后，**PLC发送信号，机器人取走合格品，夹具复位，整个过程与机器人、PLC紧密联动，实现了在线全检。



自动化铁芯叠装系统

冲片叠装 动作流程

- **机器人堆叠与压紧：**堆叠机器人将检测合格的叠片包放置于堆叠平台上。平台的压紧臂将新的成叠冲片与既有冲片料堆合拢压紧，同时规整组件启动整形，将突起、歪斜等冲片推向平台定位面，以保证叠装精度。
- **轴向夹紧力控制：**压紧臂施加的夹紧力用于在轴向固定冲压片材。
- **压力边界阈值：**夹紧压力切勿过大。必须保持合理的压力范围，以确保规整组件能够顺畅地对齐片材，避免因过度压紧导致冲片变形或对齐阻力过大。



自动化铁芯叠装系统

冲片叠装 动作流程

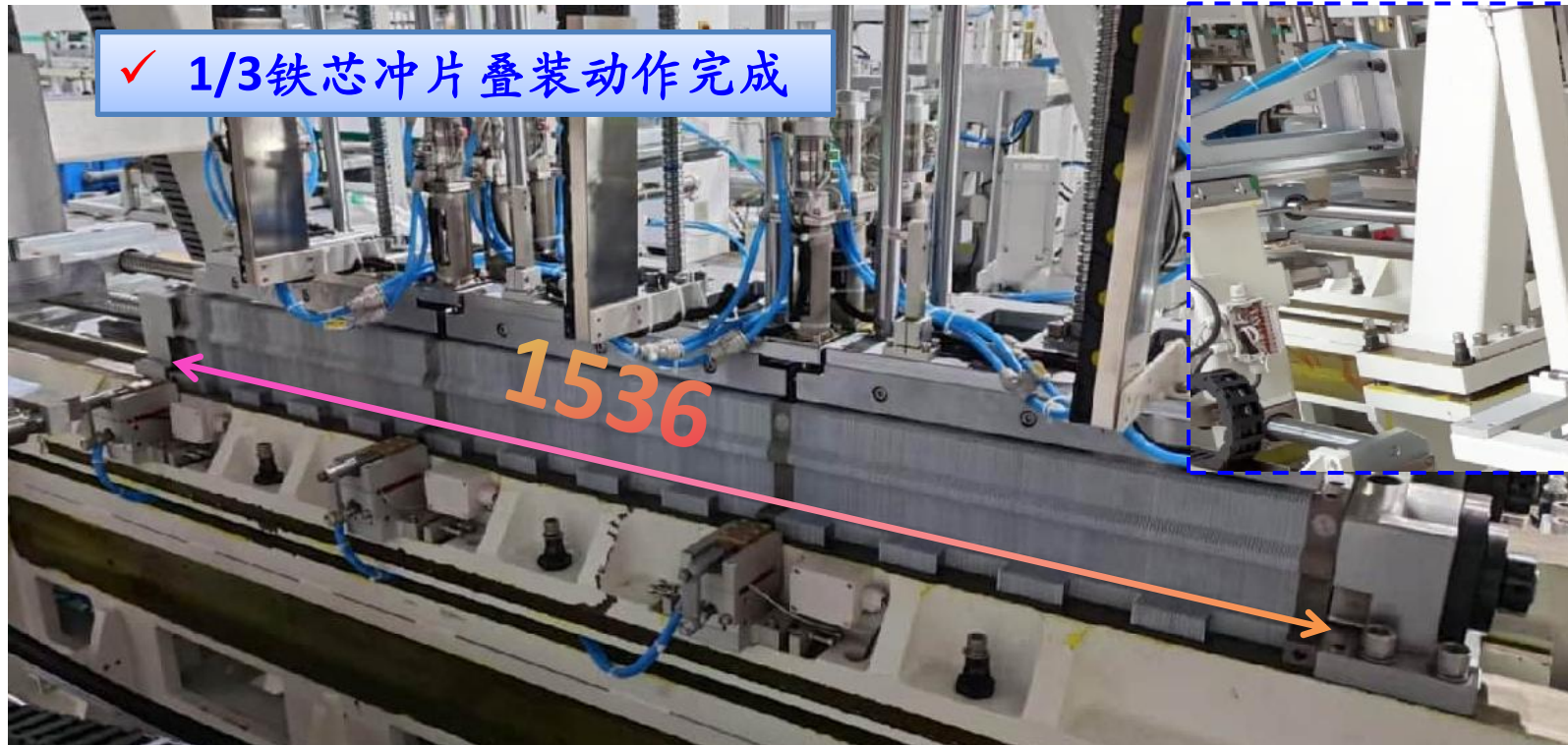
- **结构拆解：**为确保预紧力的有效传递并降低整体调整难度，每个独立的三分之一铁芯单元，被进一步拆分为3个长度为528mm的预紧单元。在每个预紧单元的末端，均配置有DT4实芯隔板，作为后续长度锁定与定位的基准面。
- **长度与平面度复核：**叠片完成后，对每个预紧单元的整体长度、平面度进行精密测量。
- **双向销钉锁定：**对于尺寸检测合格的单元，在隔板的侧面和顶面安装销钉进行物理限位，从而锁定该单元的最终长度。
- **分段限位方案的核心目的在于优化压缩过程中的力学行为：消除累积摩擦力；确保预紧力均匀传递。**



自动化铁芯叠装系统

冲片叠装 动作流程

- **整体结构刚性锁定阶段：**
- **拉杆自动穿装：** 在全部 3 个预紧单元堆叠完成并检测合格后，中央送料机启动，将拉杆整体推入铁芯内部的预留通道中。
- **端部螺母紧固：** 拉杆就位后，机械臂执行末端锁紧工序，对拉杆两端的端部螺丝进行定量扭矩拧紧，实现铁芯整体的最终轴向紧固。



拉杆自动穿装

自动化铁芯叠装系统

冲片叠装 调试

1. 六轴机器人上下料工艺与调试

• 核心工序：多工位闭环搬运

六轴机器人通过定制夹爪，依次从各工位完成取/放料动作。串联起冲片掺和、端板上料、视觉检测和铁芯叠装等核心单元，实现全流程自动化流转。

• 现场调试：高精度示教与速度优化

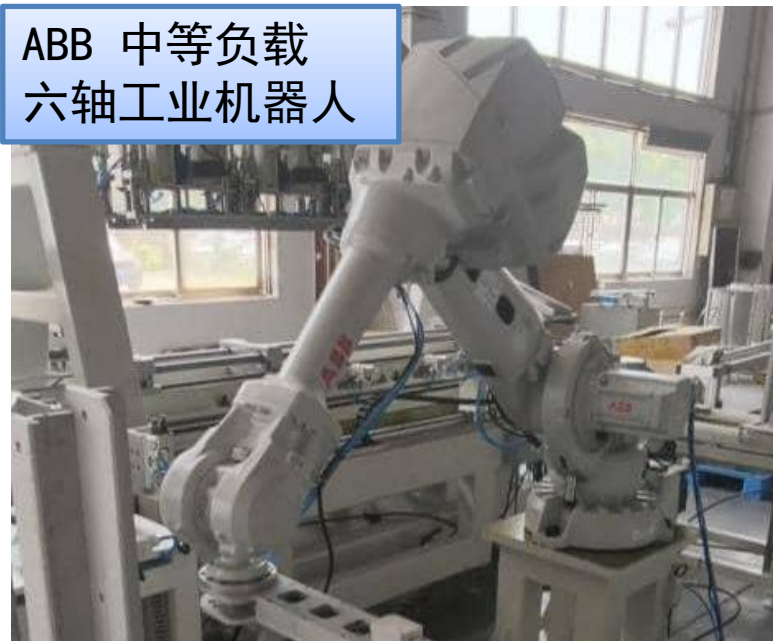
通过高频次的工程示教与硬件微调，确保产线运行的轨迹精度与节拍平顺性。

• **空间坐标示教**：使用示教器反复修正机器人在各目标点的空间坐标与姿态，保证抓取与放置的**定位精度**。

• **夹爪气缸微调**：通过**调速阀**优化气缸动作速度，使夹紧与松开动作快速且柔和，避免对工件造成**冲击损伤**。

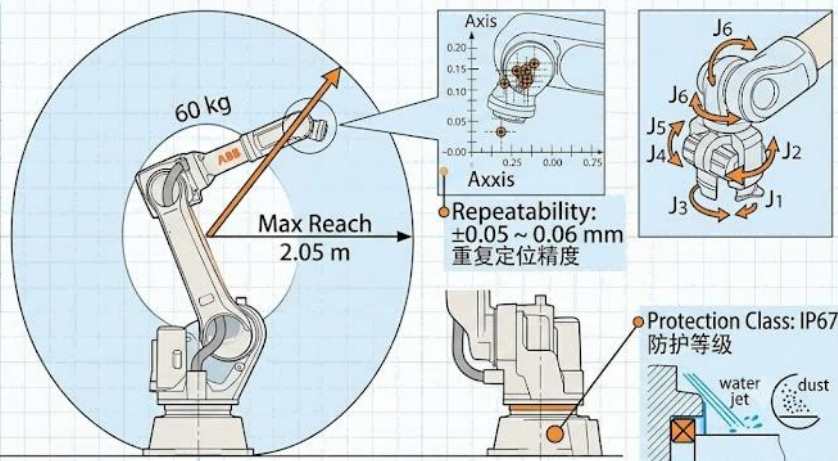
• **生产节拍优化**：通过平滑运动轨迹，消除无效等待时间，实现**高效、流畅的节拍化作业**。

ABB 中等负载
六轴工业机器人



序号	动作名称	动作/信号反馈
01	夹具夹紧-抓夹末端	到位光电开关
02	取冲片-掺合规整位	机器人取料
03	取端板-端板上料位	机器人取料
04	放冲片-视觉检测位	机器人放料
05	取冲片-视觉检测位	机器人取料
06	端板上料-叠装平台	机器人放料
07	冲片上料-叠装平台	机器人放料

系列：IRB 4600
型号：IRB 4600-60/2.05
负载能力：60 kg
最大工作范围（臂展）：2.05 m
轴数：6-Axis
重复定位精度：±0.05~0.06 mm
防护等级：IP67
本体重量：445 kg



自动化铁芯叠装系统

冲片叠装
调试

2.高精度与高稳定性-叠装台与预紧力调试

叠装台是该流水线中集“物理定位、几何约束、力学预紧、尺寸检测”于一体的核心工作站。

- **目标控制边界：**

叠装长度： 1536 ± 1 mm，预紧单元长度： 528 ± 0.3 mm。

目标轴向预压强 > 3 MPa，且控制平面拱起量 < 0.02 mm。

- **调试暴露的物理缺陷与技术瓶颈：**

缺陷一：形变超差。按标称配比以及标称端/隔板尺寸初始预压时，铁芯未压到目标长度即发生目视可见的剧烈拱起。

缺陷二：压力与尺寸链脱节。尝试通过人工常规手段“减少钢片或者 PET”来消除拱起，尺寸虽然达标，但监控实际压强不满足 > 3 MPa 的设计要求。

- **解决方案：**

- ✓ **预紧力传动改型：**高强度的链轮链条传动；

- ✓ **上压机构引入减速器：**抑制拱起

- ✓ **最终确立的“尺寸链动态补偿”工艺：**

“恒定叠片数量，动态端板补偿”

	钢片数量/片	PET片数量/片		
第1个预紧单元	160	160		
第2个预紧单元	160	160		
第3个预紧单元	160	160		
	理论长度/mm	实测长度/mm	要求预紧力/MPa	实测预紧力/MPa
第1个预紧单元	527.5 ± 0.3	527.445 ✓	> 3	5.71 ✓
第2个预紧单元	1031.5 ± 0.6	1031.442 ✓	> 3	4.61 ✓
第3个预紧单元	1536 ± 1.0	1535.98 ✓	> 3	4.18 ✓

3.全流动作检测闭环

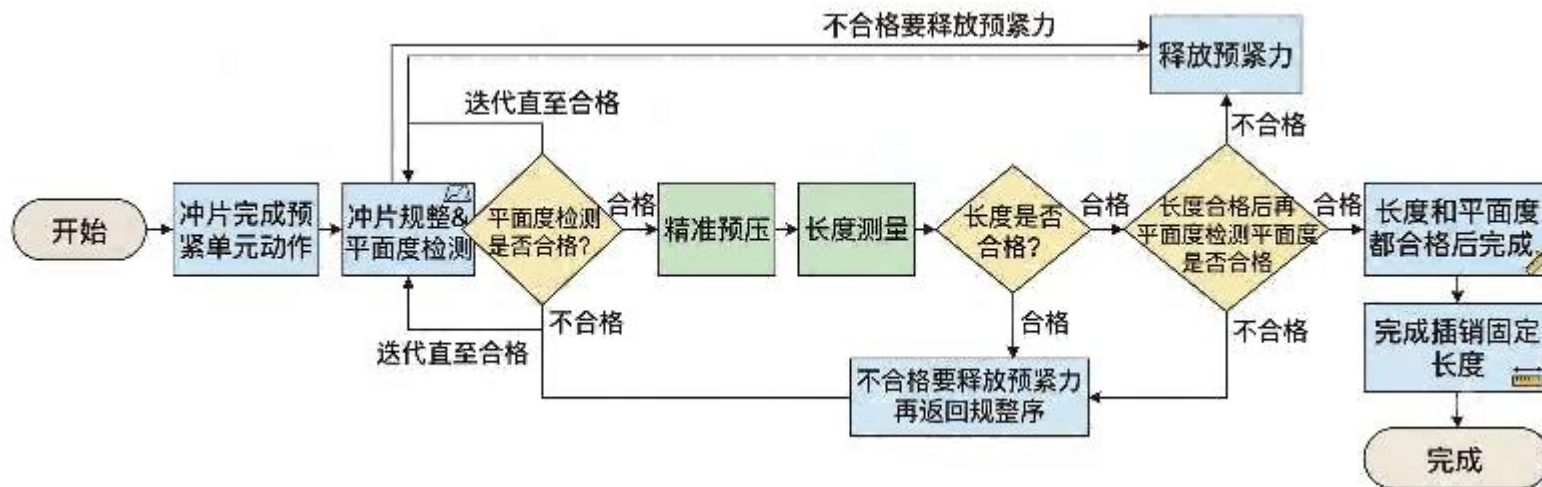
冲片在完成预紧单元以及整个叠装单元的动作后，**必须通过严格的“时序-检测-动作”闭环控制链。**

初检：规整机构执行物理对齐后，系统首先进行平面度在线检测。

异常迭代循环：若判定不合格，物料必须返回规整机构重新校正并触发复检，直至收敛合格。

定量预压与二次全形貌复核：在初检合格的边界条件下，伺服系统驱动丝杠执行精密预压并测量实时长度。在达到标称预压强后，必须在加压状态下执行第二次平面度检测，以全面评估并抑制高弹性片材在轴向高压下可能诱发的二次失稳（拱起）现象。

终点状态锁定：当且仅当铁芯总长（ $1536\pm 1\text{mm}$ ）与加压平面度同时满足控制阈值时，PLC下达动作指令控制插销伸出，完成物理长度的最终刚性固定。

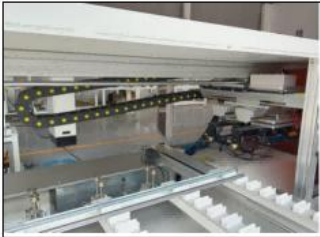
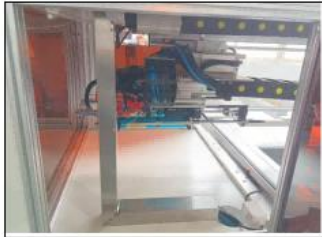

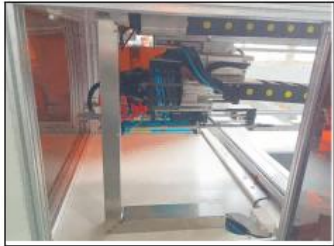
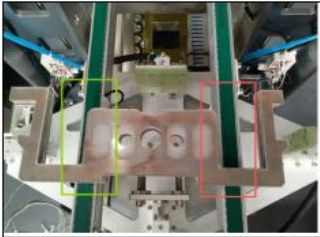





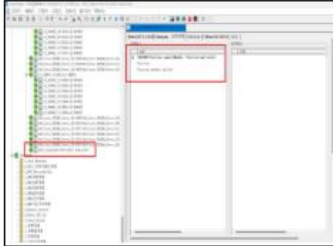



双重闭锁控制，
杜绝了应力释放变形的隐患。

自动化铁芯叠装系统

冲片叠装 调试

调试阶段项目问题管理清单-节选

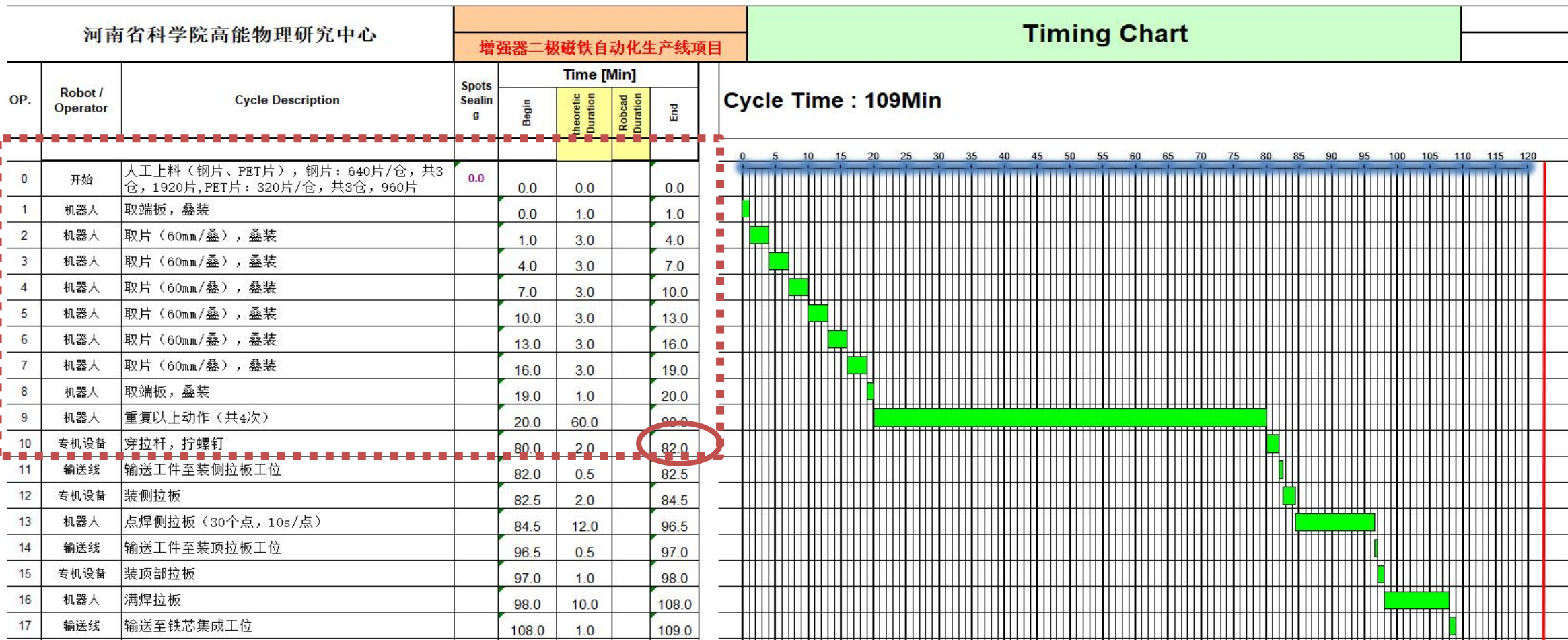
序号	工位	问题描述	问题照片	解决方案	整改后照片				
1	拉杆上料	穿拖链伺服线缆长度不够。		5米线缆更换10米线缆。		修改机械安装，机械挤装板固定安装孔改为可调节的长条孔。		现场走线需求，增加走线槽。	
2	冲片掺和	冲片输送皮带间距太宽，掺和好的冲片有歪斜散落风险。		减小输送带绿色同步带间距。		涉支撑零件，按照机械图纸铣掉干涉部分。		工整改，补加工小车左侧底部倒角。	
3	冲片掺和	旋转小气缸与横移大气缸干涉。		机械更改设计。		产品开发人员同事联系在于通讯从站组态与匹配，发现是槽位不匹配，修改slot配置后问题解决。		源线和信号线走线增多，防止相机平移检测时角度大导致线缆损坏的问题。	

自动化铁芯叠装系统

冲片叠装
调试

节拍测试

➤ 冲片叠装动作原设计节拍为82分钟，实际测试时间可控制在80分钟以内

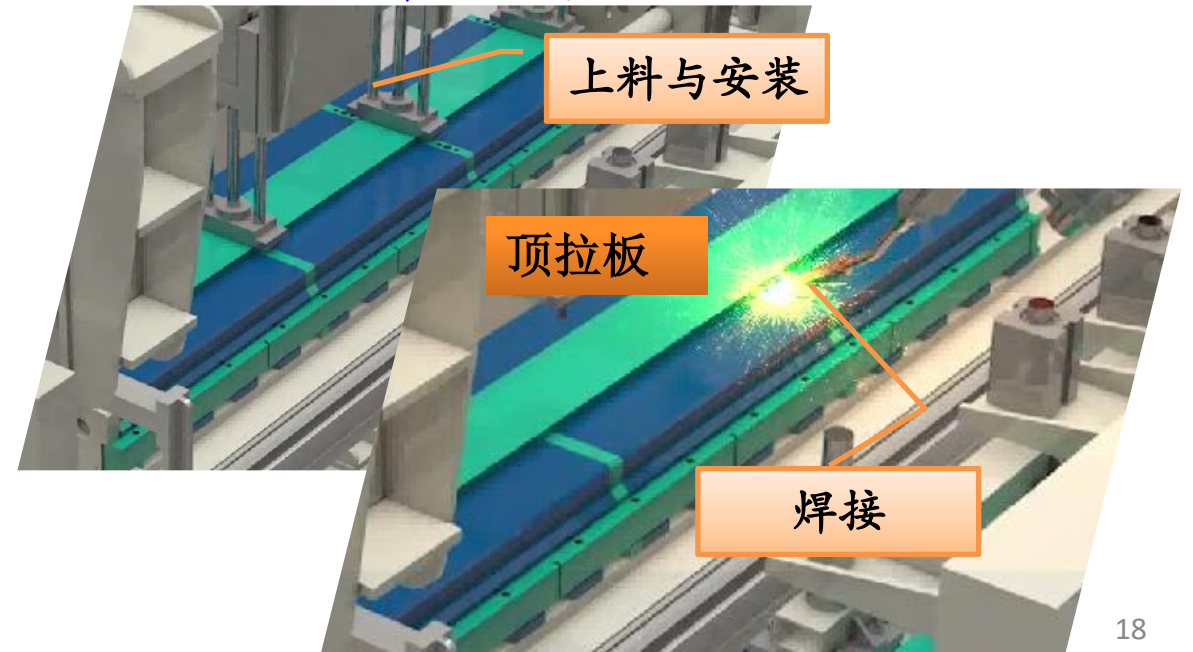
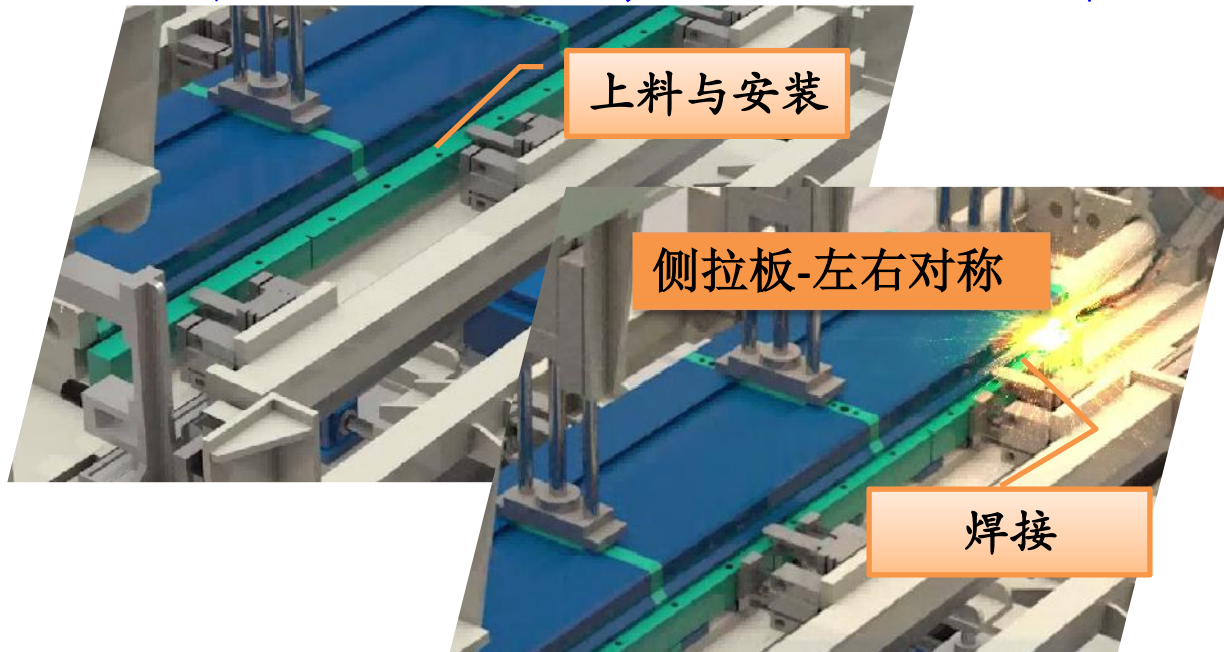


自动化铁芯叠装系统

拉板焊接 部件组装

在完成上述的叠片预紧与尺寸锁紧后，系统进入最终的框架刚性强化阶段。

- 多维拉板自动上料：上下料机械臂执行多自由度轨迹运动，分别抓取侧拉板与顶拉板，将其精密运送至铁芯单元的侧面与顶面指定装配基准位。
- 机器人自动化焊接：拉板定位锁紧后，焊接机器人激活预设焊接程序，沿轴向对拉板与已叠装端板/隔板主体进行高精度融合焊接。
- 焊接完成后，标志着单个三分之一长度铁芯单元的基本制造与框架强化整体宣告结束。
- 硬件装配状态：目前，用于拉板自动上料、分段定位以及机器人焊接的专用功能装备正处于现场



项目各阶段时间安排

自动化铁芯叠装焊接系统

6月30日拉板焊接部分组装完成；
7月中旬调试完成；
7月底完成首套系统整体联调。

自动化铁芯集成系统

7月30日开始组装
8月上旬组装完成
8月底调试完成。

自动化磁铁总装系统

8月中旬完成正式加工前设计与
工艺评审
9月底完成加工
10月上旬完成组装并开始调试
10月底完成调试

自动化磁测预备系统

10月20日完成正式加工前设计与
工艺评审
11月底完成加工
12月上旬完成组装并开始调试
12月底实现基本功能

- 和利时公司当前正处于采购与外协体制变革期。由于所有正式加工任务在启动前均需通过内部二次评审，导致采购与外协业务在统筹一体化管理的过程中出现流程冗余、审批周期拉长。
- 该瓶颈已成为导致当前项目产品交付逾期的最主要原因。

发明专利申请

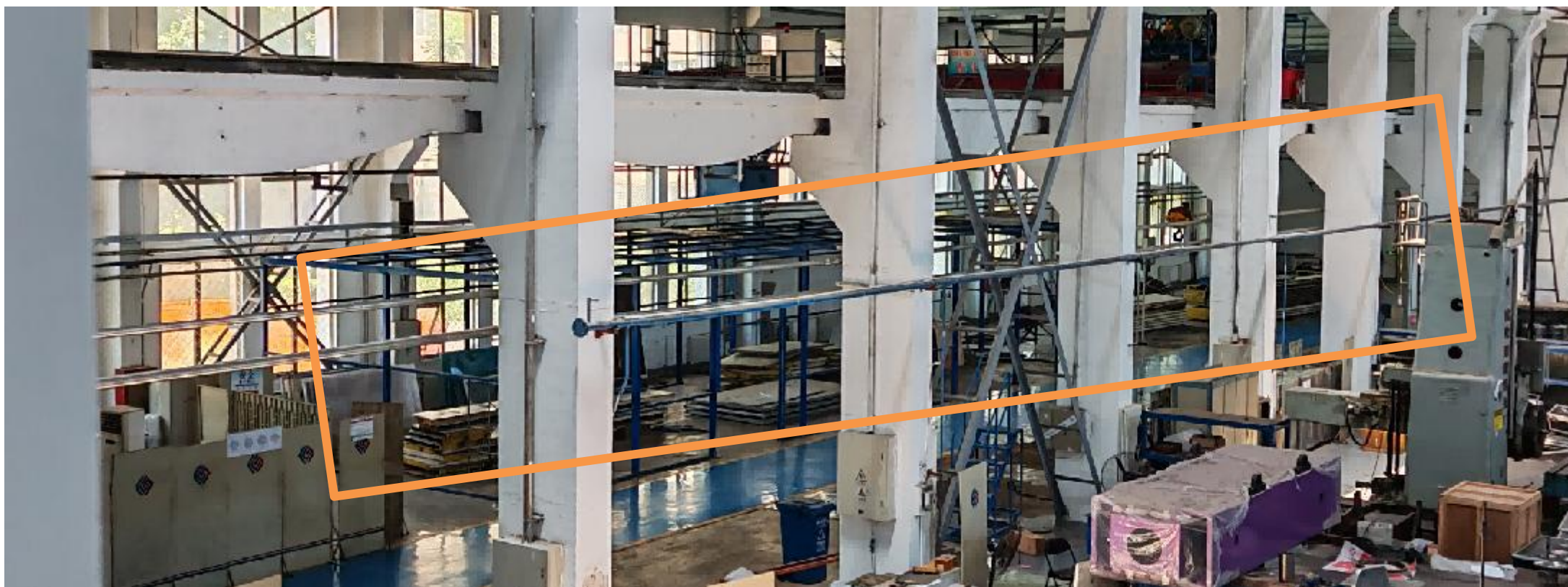
- 设备总体：已与专利代理完成申请定稿
 - 一种用于大型加速器的超长低场高精度磁铁
 - 一种用于大型加速器磁铁的自动化生产线及其控制方法

- 生产线分系统：正在布局
 - 自动化叠装（含平台、机械臂抓取、规整、预紧、测量）
 - 半铁芯三合一组合（含规整平台、检测、自动锁钉、180度翻转台，需结合背景）

玉泉路工厂一车间

原厂设备已搬离

首套-三分之一铁芯自动化生产线预计8月初运到玉泉路





中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

谢谢!

请观看一段视频