

基于多模态感知的机器人自适应装测技术研究

黄 睿, 邹旭军, 成 锐, 张继涛, 陈 超, 吴 军

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 本文系统研究了面向复杂、精密插拔场景的机器人自适应装测技术, 旨在突破传统刚性自动化方案的局限性, 实现制造过程的柔顺化与智能化进化。以“柔顺插拔”为核心, 深入探讨了从机构设计、感知认知到控制决策的全链条关键技术。本文构建了一个基于视觉、力位控制等多模态信息融合的感知系统, 实现了对接触状态、相对位姿误差的精准估计。并通过搭建智能化机器人工业场景实验平台和批量部署应用, 对所提出的理论与方法进行了验证。本文所研究的技术能够显著提升机器人在高精度环境下插拔装配任务的成功率、效率 and 安全性, 为智能制造系统的进化提供了新的技术路径与理论支撑。

关键词: 柔顺插拔; 多模态感知; 线缆装配; 背板插装; 智能制造

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A

Research on Robot Adaptive Insertion and Measurement Technology Based on Multimodal Perception

HUANG Rui, ZOU Xujun, CHENG Rui, ZHANG Jitao, CHEN Chao, WU Jun

(ZTE Corporation, Shenzhen 518000, China)

Abstract: This paper systematically investigates robot adaptive insertion and measurement technology for complex and precise plugging scenarios, aiming to overcome the limitations of traditional rigid automation solutions and achieve compliant and intelligent evolution in manufacturing processes. Focusing on “compliant insertion,” it thoroughly explores key technologies across the full chain from mechanism design to perception-cognition and control-decision-making. A multimodal perception system integrating vision and force-position control is constructed to enable accurate estimation of contact states and relative pose errors. Through the establishment of an intelligent robotic industrial experimental platform and batch deployment applications, the proposed theories and methods are validated. The developed technology significantly enhances the success rate, efficiency, and safety of robotic plugging assembly tasks in high-precision environments, providing new technical pathways and theoretical foundations for the evolution of intelligent manufacturing systems.

Keywords: compliant insertion; multimodal perception; cable assembly; backplane insertion; intelligent manufacturing

1 引言

随着智能制造的快速发展, 机器人技术在工业自动化中的应用日益广泛。然而, 在精密装配和测试领域, 如 3C 行业机框类产品单板和线缆插拔中, 传统机器人往往受限于刚性结构和单一感知模式, 难以适应复杂多变的工

作环境^[1]。本文旨在探索一种融合视觉、力位控制等多模态感知能力的机器人系统, 实现对不同规格单板和线缆模块智能识别与精准操作。通过设计创新的机构、集成先进的感知控制技术, 实现以下技术指标: 单板插板成功率大于 99%; 单次插板的节拍为 15~18s; 力控的精度 $\pm 0.5\text{N}$,

力控节拍小于 200ms，位置精度保证在 $\pm 0.5\text{mm}$ ；保证插拔过程掉板、损坏单板或损坏机框的现象为零发生，并在

实际生产线上进行验证，本文将展示该系统如何提升制造效率和产品质量，技术路线图如图 1 所示。

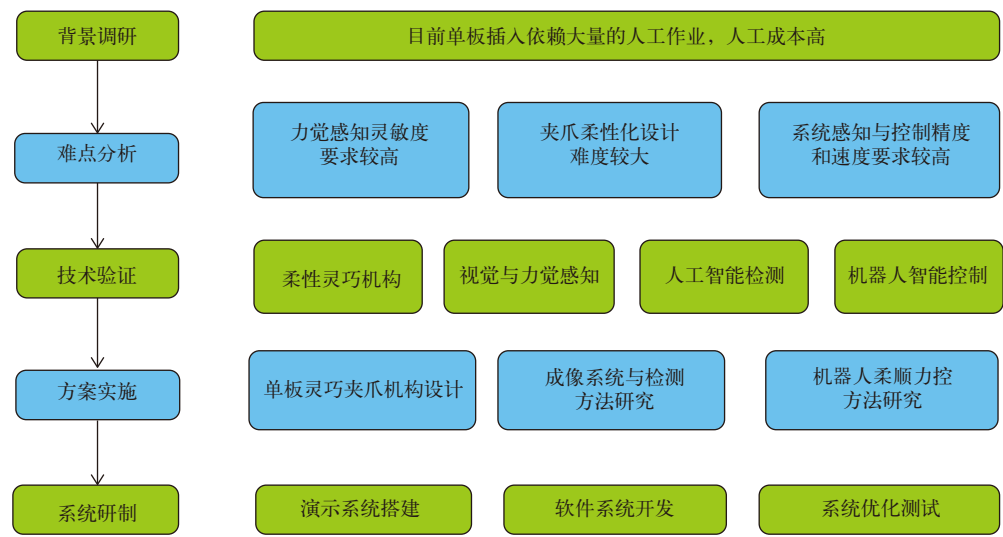


图 1 技术路线图

2 机构设计创新

传统工业机器人末端夹爪一般多应用于结构化环境，存在刚性强、自由度少和定制化设计等特点^[2]，导致此类夹爪无法实现单板或线缆柔性抓取，且可能存在刚性插入失败从而损坏产品情况。本文中机构设计创新在于实现了从刚性执行到自适应插拔。

2.1 单板柔顺夹持机构

针对机框类设备中常见单板插拔需求，本文设计了

一种具有柔顺性的夹持装置和夹持动作。

(1) 单板夹持结构设计

末端夹爪通过气缸的夹紧力夹紧单板，通过调整夹紧力保证单板夹持稳定性；为防止单板因为自重导致姿态重复性差，上方设计了多排齿卡在单板的机械槽内，下方通过较大面积的夹爪平面托住单板，夹取单板示意如图 2 所示^[3]。

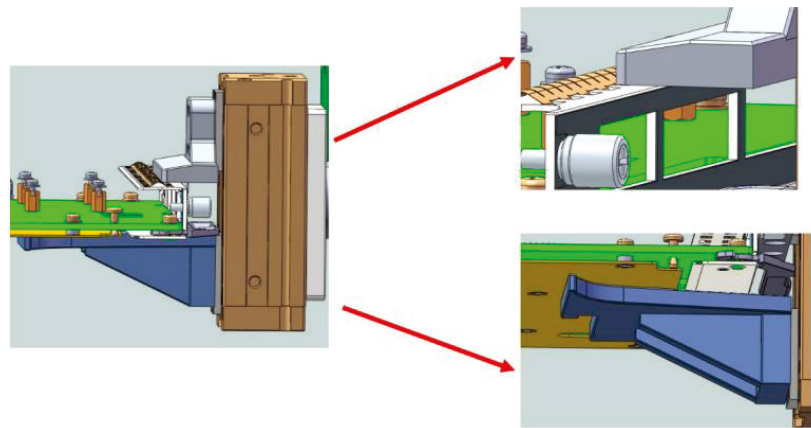


图 2 夹爪夹取示意图

(2) 夹爪动作设计

由于单板分为大小多种不同类型，其插拔方式也不同。大、小板插入过程类似，如图 3 所示。

针对两种不同单板，在夹爪上集成了两个钩爪。大板通过夹爪左侧的钩槽固定锁扣，在拔出锁扣的同时将单板拉出一段距离，最后通过夹爪将其完全拔出，如图 4

所示；小板则通过右侧的侧钩锁住单板上的钩槽将其拖出一部分后使用夹爪将其夹出，如图 5 所示。

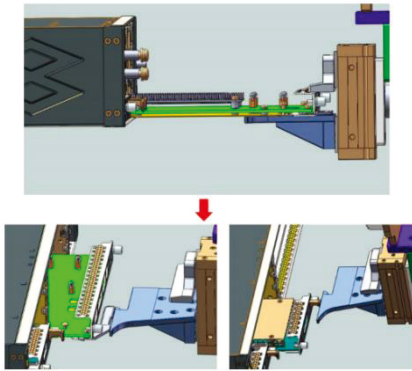
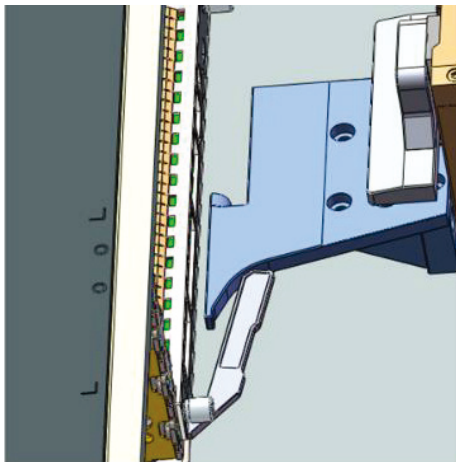
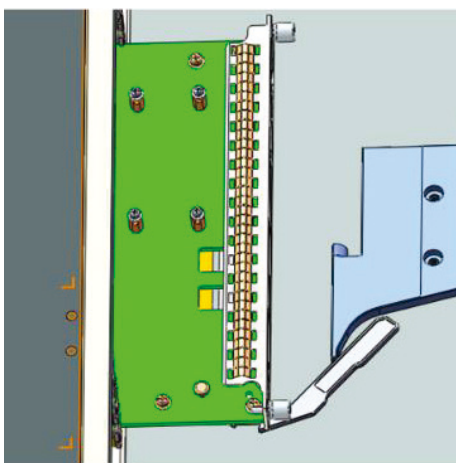


图 3 插入过程示意图



a) 末端手爪解锁单板锁扣



b) 末端手爪拔出单板至1/3位置

图 4 大板拔出过程

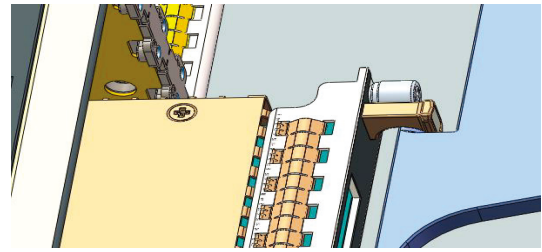


图 5 小板侧钩示意图

2.2 线缆模块夹持机构

针对整机测试过程中常见的多种线缆插拔需求，设计了一套线缆模块夹持机构和夹取动作。

(1) 夹爪结构设计

采用双指气动夹爪，通过对定位模块的夹取，提升夹取稳定性，并防止夹伤线缆插头，线缆夹持方案如图 6 所示。

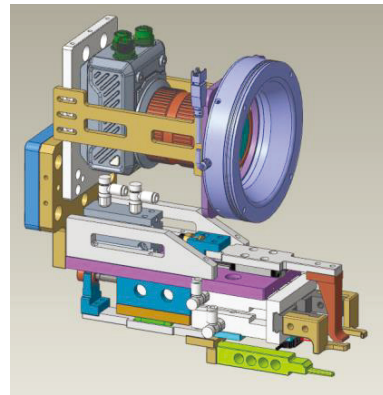


图 6 线缆夹持方案图

(2) 夹爪动作设计

利用机器人末端力传感器实现插拔过程中的力/位混合控制，先通过视觉或传感器定位插座位置，再通过柔顺控制实现精准插拔^[4]，夹爪夹具线缆定位模块示意如图 7 所示。

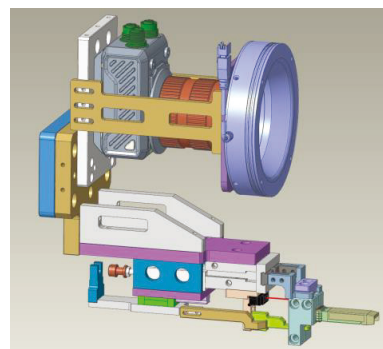


图 7 夹爪夹取示意图

2.3 线缆模块化快换机构

为实现对多类型线缆的兼容抓取，开发了一套线缆导

向与定位模块机构，每个线缆模块包含差异化插头的固定模块和标准化底座，可适配不同插头类型，如图 8 所示。

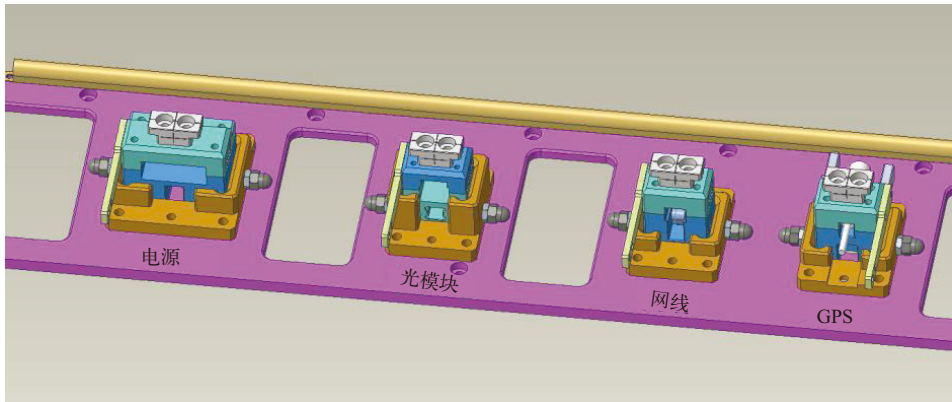


图 8 线缆插头模块示意

3 感知控制融合

3.1 机器人视觉引导

机器人通过视觉引导定位消除偏差，保证机器人末端夹爪可以精确抓取到单板或线缆，其方案示意图如图 9 所示。

根据模拟实际场景，设计了“眼在手上”的相机引导定位方案^[5]，通过对来料视觉定位，确保目标物处于正确角度，让机器人能够更精确定位目标物，并完成抓取，其流程如图 10 所示。

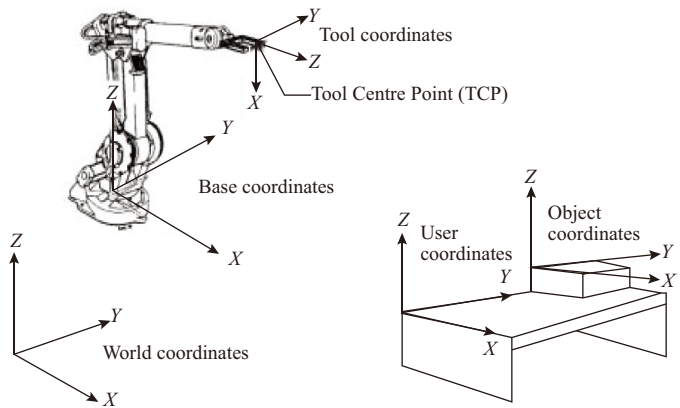


图 9 视觉引导抓取方案示意图

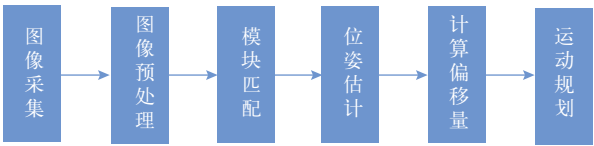


图 10 视觉引导抓取定位流程

3.2 “视觉引导 - 自适应力控”控制架构

由于结构尺寸公差、安装误差和视觉检测精度等因素影响，仅通过视觉引导修正机器人动作，难以确保装

测过程产品受力在安全范围。为了确保装配过程安全性，装配动作需要柔顺自适应^[6]。

通常机器人阻抗控制和导纳控制能较好地完成简单柔顺控制。但单板装配和线缆插拔需要同时对力和位置有高精度控制，既要在垂直面方向上进行力控制，又要在切面方向进行位置控制，这就需要用到力位混合控制，其原理控制框图如图 11 所示。柔性装配过程，按照时间顺序的动作序列如图 12 所示。

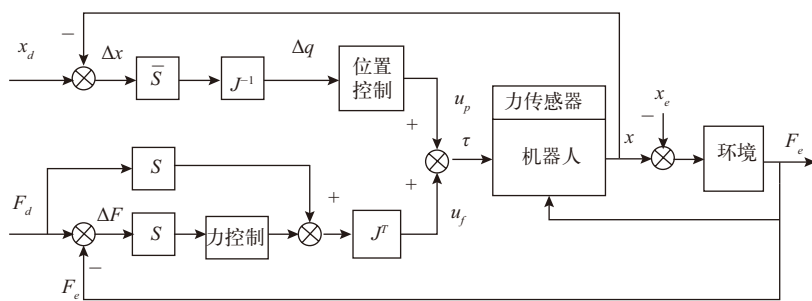


图 11 力位混合控制原理框图

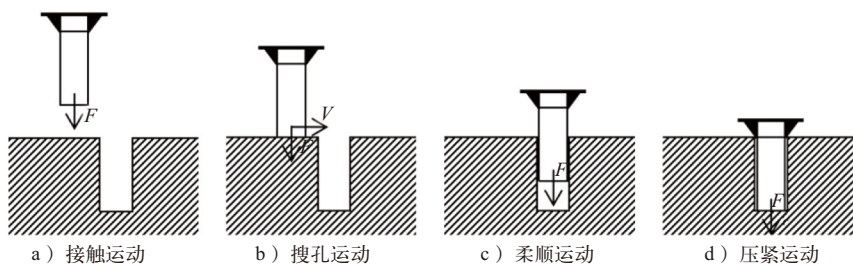


图 12 柔性装配过程的 4 种动作序列

1) 接触运动：在单板与插槽接触前，为了确保接触安全，需要采用柔顺控制，可采用阻抗或导纳控制；

2) 搜孔运动：当单板与槽位接触后，单板可能没有正确插入到槽中，这时采用力位混合控制，对单板向下施加轴向压力，同时沿接触面不断移动搜索槽孔，通过力的变化找到孔位。

3) 柔顺运动：在搜孔运动完成后，需要继续向槽内运动。由于槽位轴线与单板轴线实际并不平行，如采用常规机器人运动，会导致运动卡死甚至损坏器件，此段插入动作采用柔顺运动。

4) 压紧运动：在柔顺运动完成后，单板大部分已经插入槽位，但是由于接触摩擦力等因素影响，单板可能未插入到位，此时就需要采用压紧运动使单板与槽位完全贴合^[7]。

4 系统集成应用与验证

4.1 单板柔性插装和线缆柔性插/拔分工序独立验证

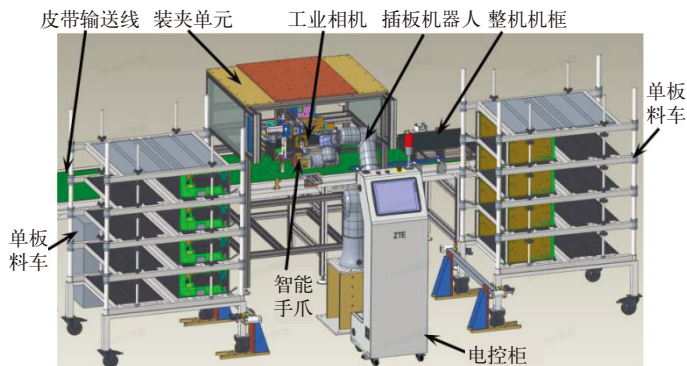
在应用层面，本文选取了 ITBBU 整机产品作为技术落地验证。该产品在整机制造过程中，在配板工序需要装配多种类型单板，在整机测试工序需要对整机电源、

网口、光口和射频口等接口进行遍历测试。由于整机机框是钣金结构，产品来料一致性差，对单板装配和线缆插拔的自适应性和精度要求极高，传统自动化方案无法有效解决，一直采用人工作业。通过部署上述设计创新与感知控制融合方案，分别在整机配板工序和整机测试工序成功实现了自适应柔性插板和插/拔多类型线缆。

(1) 单板自适应柔性插装验证

ITBBU 单板自适应配板工位图如图 13 a 所示，其各组件功能为①插板机器人：实现从单板料车自适应精确取板和在插槽槽位自适应插板；②工业相机：视觉引导插板机器人，实现取板粗略定位；③智能手爪：实现不同类型单板自适应抓取与抓取检测；④皮带输送线：工序衔接，实现整机自动上下料；⑤装夹单元：对整机进行夹持和定位；⑥单板料车：待装配单板周转车；⑦电控柜：工位主控，提供人机交互界面，实现工位各组件交互控制与状态显示。

ITBBU 单个自适应插板工位需要自动配置两种类型单板，实际生产部署如图 13 b 所示，效果为①力控精度 $\leq 0.5\text{N}$ ；②位置精度 $\leq 0.5\text{mm}$ ；③单次完整插板节拍 $\leq 19\text{s}$ ；④插板成功率 $\geq 99.9\%$ ；⑤安全性：全程精确力控及监测，整机产品“0”损伤。



a) ITBBU单板自适应配板工位示意图



b) ITBBU单板自适应配板工位实际作业图

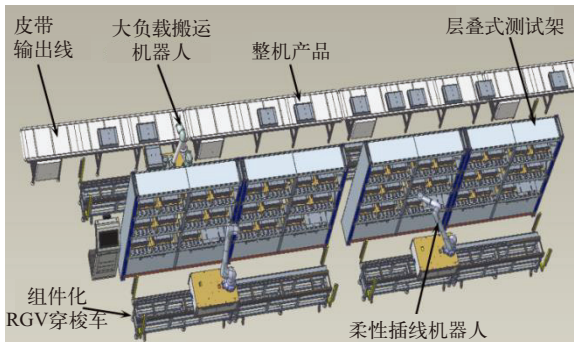
图 13 ITBBU 自适应配板示意图

(2) 多类型线缆柔性插装验证

ITBBU 整机测试系统整体工位图如图 14a 所示，各组件的功能为①大负载搬运机器人：实现整机产品在皮带输送线的精准取放和上/下料层叠式测试架；②层叠式测试架：包含 3 层测试架，单层 4 个简易整机放置位，实现整机产品自动测试，支持快换和型号兼容；③柔性接线机器人：低成本柔性协作机器人+多模态感知+智能插拔控制算法，实现整机产品测试线缆拟人柔性接/拆线；④组件化 RGV 穿梭车：标准单元模组，易拼接拆卸，

实现协作机器人快速移动与精准停靠；⑤智能手爪：实现不同类型线缆模块自适应抓取与抓取检测；⑥皮带输送线：工序衔接，实现整机产品自动上下料；⑦通用调度台：实现整线调度、状态监控、安全监测及防护。

ITBBU 整机测试自适应插线工位支持 48 个整机产品并行测试，实际生产部署如图 14b 所示，效果为①力控精度 $\leq 0.5\text{N}$ ；②位置精度 $\leq 0.5\text{mm}$ ；③单次接线节拍 $\leq 11\text{s}$ ；④插线成功率 $\geq 99.5\%$ ；⑤安全性：全程精确力控及监测，整机产品“0”损伤。



a) ITBBU整机测试自动柔性插拔线缆工位示意图



b) ITBBU整机测试自动柔性插拔线缆工位实际作业图

图 14 ITBBU 整机测试示意图

4.2 单板柔性插装和线缆柔性插/拔同工序混合验证

有线产品 IPTN 在整机制造过程中，在整机刷槽位工序需要满框配置 10 块测试环境单板，同时对外连接电源接口和网口线缆到测试环境，进行整机槽位信号的满流量遍历测试。由于 IPTN 整机机箱是钣金结构主体，产品来料一致性差，同时测试环境单板面板上都带有锁

扣，对单板锁扣解锁与锁定、单板插/拔和线缆插拔的灵活性、自适应性和精度要求极高，传统自动化方案无法有效解决，一直采用人工作业。通过部署上述设计创新与感知控制融合方案，在 IPTN 在整机刷槽位工序成功实现了多数量、类型单板和线缆的自适应柔性混合插拔。

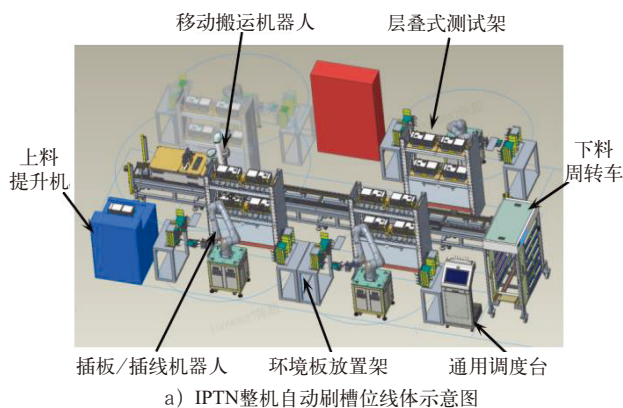


图 15 IPTN 整机自动刷槽位示意图

IPTN 整机自动刷槽位线体如图 15a 所示，其各组件的功能为①移动搬运机器人：RGV+ 大负载机器人，实现整机产品上 / 下料转运；②层叠式测试架：包含 2 层测试架，单层 2 个简易整机放置位，实现整机产品自动测试，支持快换和型号兼容；③插板 / 插线机器人：低成本柔性协作机器人 + 多模态感知 + 智能插拔控制模型算法，实现整机产品测试环境单板和环境线缆拟人柔性插 / 拔；④上料提升机：与前工序装配线衔接，实现整机产品自动运转至上料位；⑤下料周转车：与后工序整机线衔接，实现整机产品测试完毕周转至整机业务线；⑥环境板放置架：测试环境板放置架，提供单个柔性插板工站 40 块环境单板的缓存放置位；⑦通用调度台：实现整线调度、上 / 下电控制、状态监控、安全监测及防护。

IPTN 整机自动刷槽位线包含 3 个柔性插拔工站，每个工站支持 4 个整机产品并行测试，实际生产部署如图 15b 所示，应用效果为①力控精度 $\leq 0.5\text{N}$ ；②位置精度 $\leq 0.5\text{mm}$ ；③单次插 / 拔板 & 接 / 拆线节拍 $\leq 55\text{s}$ ；④插线成功率 $\geq 99.5\%$ ；⑤安全性全程精确力控及监测，整机产品“0”损伤。

5 基于多模态感知的机器人自适应技术研究

5.1 基于多模态感知的机器人自适应装测技术平台

在前述对机器人柔性自适应智能作业的技术研究和实践的基础上，成功开发出一套适用于 3C 电子设备精密装配和测试领域的机器人自适应柔性装测平台，其平台框架如图 16 所示。

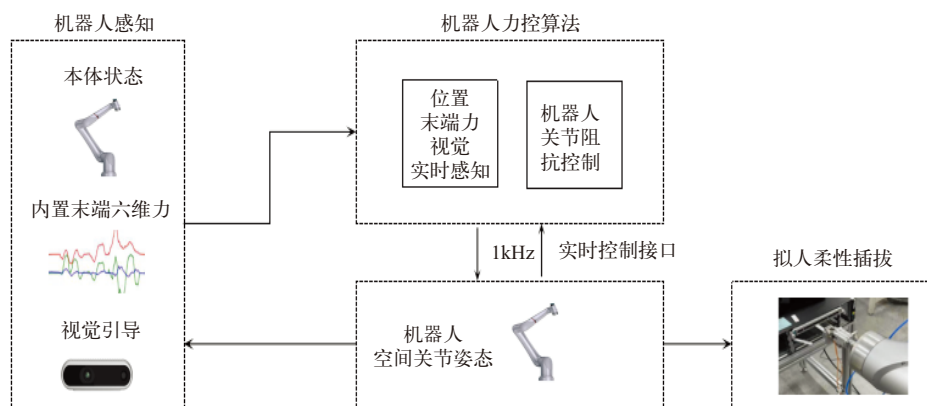


图 16 机器人自适应柔性装测平台框架示意图

该平台主要包含多模态感知装置、机器人及柔性力控算法 3 个部分，其工作原理：

1) 通过机器人末端六维力传感器和视觉定位引导，高精度检测机器人当前状态（关节位置、关节速度，TCP

末端受力及作业对象的空间姿态)；

2) 机器人力控算法感知数据处理组件，对感知数据进行实时处理；

3) 机器人自适应柔性控制算法，通过 1kHz 实时控制接口，动态调整机器人动作姿态；

4) 通过感知 - 控制 - 感知，形成高实时 (1kHz)、高精度 (位置 $\leq 0.5\text{mm}$ ，力控 $\leq 0.5\text{N}$) 的闭环控制策略。

该平台在工厂实际部署，首次实现了拟人自动化作业批量工程化应用，能够模拟人手操作，实现典型 3C 装测场景中部件精密装配、多类型线缆、单板的自适应柔性插装作业。实践结果也表明，该平台系统不仅能够显著提高生产效率和产品质量，还具备良好的稳定性和可靠性。

当前虽然在机器人多模态感知和自适应力控上取得了突破，但在不同实际场景推广落地时，依然需要通过机器人预设的视觉引导和力控搜索策略来完成对环境的适应性，机器人所有动作均由人工预设，无法从经验中自主学习优化，同时机器人末端智能化手爪定制化设计比重仍偏高，平台机器人作业控制泛化性仍相对较

差，尚未突破机器人智能化的自主学习、判断和决策难题。

5.2 智能化机器人工业场景落地探索与展望

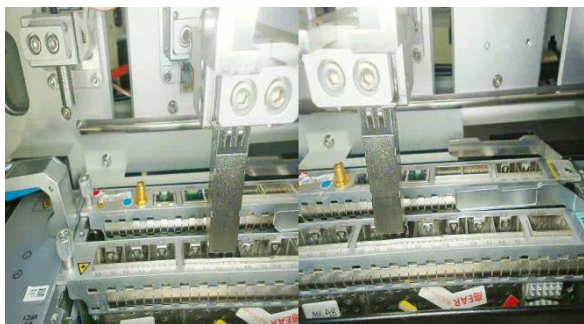
具身智能机器人，代表了工业自动化向非结构化、高柔性、高智能方向演进的重要趋势。其核心在于通过物理具身、环境交互和持续学习，实现超越预编程的场景泛化能力，使机器人具备更接近人类的自适应性和决策能力，这种高度自主的具身智能不再需要人为的规则设计和干预，能在新的情境中自行探索有效的行为策略，这将极大提高机器人在复杂场景中的泛化能力，推动机器人应用迈向新的未来^[8]。

(1) 基于模仿学习免编程的机器人控制应用探索

针对机器人需要预设编程的问题，采用 ACT 模仿学习算法实现机器人免编程进行电源接头和光模块的自动插拔，如图 17 所示，其效果为①电源头插接：动作示范次数 100 次，成功率 90% 以上；②光模块插接：动作示范次数 100 次，成功率 85% 以上。基于 ACT 模仿学习的机器人智能化控制，机器人无需重新编程，展现出了一定灵活性、易用性。



a) 机器人免编程插拔电源接头示意图



b) 机器人免编程插拔光模块示意图

图 17 基于 ACT 模仿学习算法机器人插拔作业示意图

(2) 人形机器人应用探索

当前一些人形机器人头部厂商已经开展搬箱子、分拣、扫码和质检等场景的试点探索。人形机器人作为通用机器人终极载体，展现出其在工业场景应用落地的独特潜力。

1) 环境普适性：双足形态天然适配为人类设计的环境（楼梯、通道、操作台），降低环境改造成本；

2) 任务通用性平台：拟人化设计（双足移动、多指灵巧手、头眼协同）使其理论上能使用人类工具、执行多样化任务，是终极通用机器人载体的理想形态。

3) 人机协作亲和性：形态与动作模式接近人类，更易被接受和理解，便于无缝协作。

4) 复杂动作潜力：双足移动具有更高的地形适应性（理论上），多自由度躯体可实现更复杂的全身协调操作^[9]。

本文利用人形机器人在 3C 制造物料自动拣选上进行了初步探索，通过“人形机器人 + AGV”多机器人协同应用，实现线边仓物料拣选与配送上线的全流程无人作业。该作业模式适配性强，可以直接融入现有生产环境，无需大规模改造。通过调度系统对人形机器人下发拣选任务，机器人可自主规划行走路径与调整抓取目标姿态，

如图 18 所示。



图 18 人形机器人自动拣选物料示意图

6 结束语

基于多模态感知的机器人自适应装测技术的研究，为智能制造领域带来了新的突破点，但尚未突破机器人智能化的自主学习、判断和决策难题。具身智能机器人，尤其是人形机器人，能够有效应对工业制作过程中的多型号小批量柔性生产、非结构化环境变化自适应、机器人泛化作业，以及机器人自主学习和决策等需求。虽然当前具身智能机器人在感知认知、决策规划、灵巧控制、高效学习、作业精度及节拍，以及系统集成落地等方面仍面临巨大技术挑战，但 AI 大模型、先进传感器、仿生驱动和强化学习等技术的迅猛发展正加速突破这些壁垒。随着相关技术不断成熟和完善，相信未来将会有更多高效、智能且安全可靠的智能化新范式涌现出来。IM

参考文献

- [1] 吴昊天, 王耀南, 朴玄斌, 等. 智能制造工业机器人技术应用及发展趋势 [J]. 中国工程科学, 2025, 27 (3):

83-97.

- [2] SONG J Z, CHEN Q L, LI Z D. A peg-in-hole robot assembly system based on Gauss mixture model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67 (1): 1-8.
- [3] WANG S, CHEN G D, XU H, et al. A robotic peg-in-hole assembly strategy based on variable compliance center[J]. IEEE Access, 2019 (7): 167534-167546.
- [4] 杨彦超, 王红旗, 刘群坡, 等. 基于力/位混合控制的工业机器人精密装配研究 [J]. 制造业自动化, 2021, 43 (3): 56-59.
- [5] 卢军, 孙姝丽, 宋岳秦. 面向自动化精密装配的视觉定位引导系统 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020 (2): 111-114.
- [6] BELTRAN-HERNANDEZ C C, PETIT D, RAMIREZ-ALPIZAR I G, et al. Variable Compliance Control for Robotic Peg-in-Hole Assembly: A Deep-Reinforcement-Learning Approach[J/OL].(2020-11-21)[2025-06-16]. <https://arxiv.org/abs/2008.10224v3>.
- [7] 陶永, 王田苗. 机器人学及其应用导论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- [8] 克来格. 机器人学导论 [M]. 负超, 王伟, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] 林奇, 朴钟宇. 现代机器人学 [M]. 于靖军, 贾振中, 译. 北京: 机械工业出版社, 2020.

作者简介: 黄睿 (1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能制造, 工业自动化及制造业中试平台。

邹旭军 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能制造, 工业软件及工业自动化。

收稿日期: 2025-07-21