

# 基于汽车生产案例的工业协作机器人安全性应用风险研究

巩 潇, 赵郑斌, 李梦玮, 崔登祺

(中国软件评测中心(工业和信息化部软件与集成电路促进中心), 北京 100084)

**摘要:** 工业协作机器人的应用被认为是解决所有安全自动化问题的简单方法, 但越来越多的协作机器人是在没有进行深入分析的情况下安装的。因此, 以汽车电机印刷电路板(PCB)的生产为案例, 分析工业协作机器人在生产制造过程中的有限空间下进行汽车电机印刷电路板(PCB)的联合生产和单元测试的可能性, 并采用风险评估的手段针对协同机器人的安全性、效率、灵活性等方面进行综合评估, 发现采用协作机器人的生产模式不仅无法提升生产效率, 而且存在一定的生产安全风险。工业协作机器人的应用一定要经过严密的设计和安全性分析, 即使在特别安全的环境下, 也要对员工进行专业的培训。

**关键词:** 工业物联网; 信息物理系统; 工业机器人; 协作机器人; 安全风险评估; 数据建模

**中图分类号:** TP242.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-1302(2024)07-0118-02

## 0 引言

工业物联网(IIoT)和信息物理系统(CPS)是推进智能制造和企业数字化转型的关键核心技术, 而工业机器人在实现这一目标方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。特别是, 工业协作机器人的应用已经改变了生产线和柔性制造/组装单元的整个概念, 成为生产的有机组成部分, 并且发挥着核心作用<sup>[2]</sup>。在协作机器人架构设计中必须引入新的安全标准<sup>[3]</sup>, 以详细说明这些机器人的应用和设计特点。协作机器人(Co-Robots, CoRs 或 CoBots)允许人类和机器人同时安全地参与到公共工作空间中, 它可能不仅涉及机械手, 还涉及能够完成自主导航的移动机器人<sup>[4-6]</sup>。本文以汽车电机的印刷电路板(PCB)的生产为案例, 分析工业协作机器人在生产制造过程中的有限空间下进行汽车电机印刷电路板(PCB)的联合生产和单元测试的可能性, 并采用风险评估的手段针对协同机器人的安全性、效率、灵活性等方面进行综合评估。

## 1 案例建模

本部分针对生产单元的工作过程构建相应的数据模型。该单元的目的是执行汽车电机印刷电路板(PCB)的生产活动, 如图1所示。该过程分为测试阶段和生产阶段, 包括手工生产(即非协作机器人生产模式)与协作机器人两种生产模式。在非协作机器人生产模式中分为两个阶段。第一阶段, PCB的最终组装。根据生产的需要, 可以在三种不同的产品上进行组装, 且这些产品可以以两种不同的方式组装。将两个或三个(取决于型号)机械部件(通量冷凝器(FC))连

接到PCB上的准备位置(两个相对或三个相邻), 每个位置用两个M5螺钉连接。这些零件是相同的, 可以提供一个共同的分配器。第二阶段, 两种不同的电子测试在两台独立的机器上进行。测试机器的周期范围是固定的( $t=60 \sim 65$  s), 仅根据所需的工艺和产品略有变化。

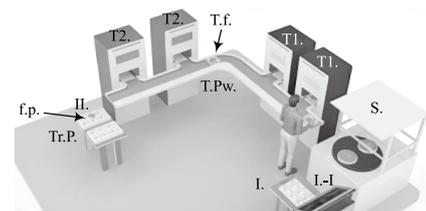


图1 汽车电机印刷电路板(PCB)的生产过程

生产过程中所有PCB都具有定位孔, 可用于简单的机械抓取(抓取孔标记为G1、G2), 整体的精度(直径和位置)能够满足任务要求; 并且它们都被放置在安全的地方, 可以简单实现对抓取力的限制和对机器人运动加速度的限制, 以保护产品的脆弱部位。真空夹持也被认为具有几乎相同的可接受的效果, 可以通过相同的机械方法, 使用改进的抓取爪来抓取FC的位置。在组装和测试单元之间也有一个临时存储单元, 以规定等待时间。所有零件必须按照螺丝刀单元、T1(试验机1)和T2的工艺顺序进行。以某公司的PCB生产过程为例, 该公司在布局安排和机器人运动尚未确定的情况下, 坚持使用最初概念中规定的精确设备。但这项任务并不是单元中流程(测试和组装)的自动化, 而是用更高水平的自动化来改进整个流程, 使用相同的设备, 使单元内的物料流动自动化。在任务中将测试机器的排列改变为交替模式, 以平衡机器人运动的路径长度。在Process Simulation编程环

境中对单元进行重新定位和布局调整后设计(如图2所示)。通过分析发现,在协作方式的选择、机器人的选择以及机器人在单元中所扮演的角色等方面仍有许多问题。这对电池的安全性、初始成本、周期时间、可靠性、成本回报等许多重要方面都有影响。

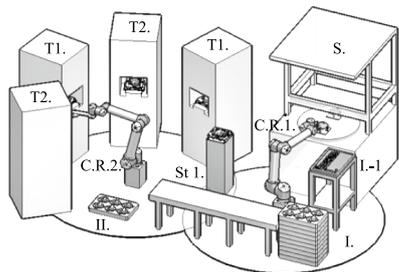


图2 协作机器人生产模式示意图

## 2 安全风险评估方法

安全风险评估是常见的工业网络和工业场景的安全性评估方法。风险评估过程包括迭代过程风险分析、风险评估和风险控制,在风险大幅降低后,确定剩余风险<sup>[7-8]</sup>。

本文构建的协作机器人生产过程模型的具体实施步骤如下:第一步是识别在作业和其他活动中可能发生的所有危险。在机器人单元运行过程中,最典型的危险是机械性的,其他因素的影响如电、热、振动、噪声也是很重要的,本文只考虑机械危害。第二步是确定所有涉及工人和机器人之间身体接触风险的相关案例。根据文献[9],可能的接触分为准静态(连续)和瞬态(短范围)接触。对于准静态接触,会产生对工作人员安全的峰值力和最大压力值。在瞬态情况下,峰值力和最大压力可能是静态情况下的两倍。如果在使用过程中,这些力(或压力)超过规定的限制,则必须采用其他措施降低接触的程度,包括被动和主动安全设计<sup>[10-11]</sup>,如增加接触面的尺寸、消除尖锐的边缘、平滑表面、使用可变形部件、在硬表面上填充或吸收能量以减少冲击。主动方法包括降低移动部件的速度,使用分隔符或使用传感器信号来预测和检测可能的接触。这些措施是在碰撞前系统基于控制的限制条件和基于工作空间监测的传感器或在碰撞后系统基于机器人集成传感器而实现的<sup>[9,12]</sup>。然而,即使应用了这些方法,仍然存在对给定应用的风险评估执行不当的问题,机器人应用仍然可能给操作员带来危险。因此,即使完全依据ISO/TS 15066标准也不能完全保证机器人的安全性,只有在设计正确的情况下才能保证尽可能安全应用机器人。此外,这种安全意味着受伤的风险(甚至是严重的)仍然存在。知道这一点对于工人和机器人在根据PFL(功率和力限制)操作的混合环境中协作进行小部件组装是非常重要的。当协作机器人不断地与很多人一起工作时,风险评估则是一项艰巨的任务。

在本案例的分析中,工人手臂、上半身和头部更可能受伤。

如果机器人进入工人的工作空间,机器人可能会与工人相撞;如果工人站在机器人和机器之间,工人可能会被挤压。显然,如果允许工人只进入他们通常工作的适当位置(零件堆栈、成品零件面板等),这种风险可以大大降低。但也可能发生导致压扁损伤的准静态接触。例如,工人的手会夹在机器人夹持器和坚硬的表面(桌子、转移板等)之间。目前,设计机器人仅用于简单的半手动零件供应,但工人进入机器人的工作空间是不可避免的。虽然合适的调速板转换器或输送机可以防止这种情况,但由于存在供应、可用空间、适应性和调度等问题,公司一般不采用这些方法。对于机器人的清洗和拆卸,应该在断电模式下正确执行。正常检查电池内部的频率不是基于电池的当前状态(例如堆叠已满),而是由外部生产条件决定的。为了不破坏工厂外部的物流,工人们必须根据整个生产线的调度来更换单元内两个栈中的托盘。这意味着只允许短时间延迟或不允许延迟。

## 3 结语

工业物联网(IIoT)和信息物理系统(CPS)是推进智能制造和企业数字化转型的关键核心技术,而工业机器人在实现这一目标方面发挥着重要作用。特别是,工业协作机器人的应用已经改变了生产线和柔性制造/组装单元的整个概念,成为生产的有机组成部分,并且发挥着核心作用。

在没有深入分析的情况下在工业生产过程中安装越来越多的协作机器人不仅无法提升生产效率,而且存在一定的生产安全风险。本文以汽车电机印刷电路板(PCB)的生产为案例,分析工业协作机器人在生产制造过程中的有限空间下进行汽车电机印刷电路板(PCB)的联合生产和单元测试的可能性。由于可以选择的机器和方法种类繁多,应用程序设计阶段的预先规划变得更加复杂。因此,与其仅仅使用协作机器人来简化方法,还不如更全面地寻找最优解。将所有的协作方法结合起来一起使用将会产生一个非常安全的机器人环境。但是,无论使用何种安全方法,都不会百分之百安全。在设计这些环境时应该始终经过详细的建模分析,即使在最安全的情况下,工人也必须接受专业的培训。

注:本文通讯作者为赵郑斌。

## 参考文献

- [1] 刘瑞, 张伟静. 空间集聚能否提升中国制造业韧性——基于产业适应性结构调整的视角[J]. 当代财经, 2021, 42(11): 16-27.
- [2] 崔登祺, 李梦玮, 赵郑斌, 等. 工业机器人安全性问题研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(12): 99-104.
- [3] 刘心. 智能控制技术在工业机器人控制领域中的应用[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(15): 177-178.

(下转第123页)

平。写卡模块如图 8 (e) 所示, 支架上面安装有写卡盒, 将标签置于写卡盒上方即可完成对标签的写卡。

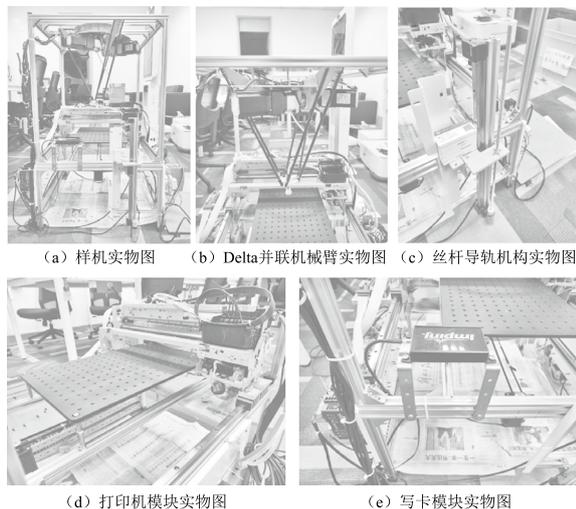


图 8 样机实物图

#### 4 结 语

本研究实现了 UHF RFID 标签彩色印刷写卡一体机机械结构的设计和样机的验证, 成功实现了 RFID 空白标签上料、彩色印刷、标签数据写入、标签数据校验、成品标签下料等工序的全自动运行。在机械臂设计上没有选择传统的静平台结构, 而是将其功能分开并由两个子模块承担, 极大地提高了系统的稳定性并降低了制造成本。但在样机调试过程中, 发现丝杆导轨机构的微型直流电机和气泵工作时噪声较大, 后续可以考虑重新选型解决该问题。此外, 本研究中的打印机的打印质量不高, 后续可以考虑更换 UV 打印模块解决该问题。

作者简介: 杨志杰 (1987—), 男, 江苏扬中人, 硕士, 研究方向为物联网智能信息处理。

(上接第 119 页)

[4] 陈孙杰. 工业机器人驱动系统现状与展望 [J]. 数字化用户, 2021, 3 (1): 28-31.  
 [5] 南博. 机器人技术在自动化控制领域中运用 [J]. 内燃机与配件, 2019, 40 (20): 231-232.  
 [6] 莫云杰, 林明, 林永才. 用于工业机器人控制的实时以太网的设计 [J]. 计算机与数字工程, 2020, 48 (11): 2750-2754.  
 [7] 李超. 基于深度强化学习的双臂机器人控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.  
 [8] ENRÍQUEZ J G, JIMÉNEZ-RAMÍREZ A, DOMÍNGUEZ-MAYO F J, et al. Robotic process automation: a scientific and industrial systematic mapping study [J]. IEEE access, 2020, 34 (1): 3281-

作者简介: 巩 潇 (1985—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为机器人检测认证技术。  
 赵郑斌 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为机器人检测认证技术。

#### 参 考 文 献

[1] 于文平. 《2017—2018 中国物联网发展年度报告》发布 [J]. 物联网技术, 2018, 8 (10): 5-6.  
 [2] 刘琰, 杨博, 冯雪, 等. UHF RFID 标签性能分级评价标准及评价方法研究 [C]// 中国标准化年度优秀论文 (2022) 论文集. 北京: 中国标准化协会, 2022.  
 [3] 彭赢. 基于物联网的 RFID 标签打印机的研究与设计 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.  
 [4] CLAIRE S. Zebra release small, low-cost RFID printer/encoder [J]. RFID journal, 2013, 11 (20): 8.  
 [5] 吕高仁. RFID 标签打印系统和方法: CN100471680C [P]. 2009-03-25.  
 [6] 方海峰, 许佩雯, 万信飞, 等. 基于并联机器人可回收垃圾分拣系统的设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020, 62 (11): 24-27.  
 [7] 阮佳晨. 并联机器人机构设计及动力学仿真研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.  
 [8] 张勇, 张宪民, 胡俊峰. 高速并联机械手最优时间轨迹规划及实现 [J]. 机电工程技术, 2010, 39 (10): 42-45.  
 [9] 马凡凡. 高速并联机器人设计及关键技术研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.  
 [10] 于雪蕊. 一种冗余驱动的 Delta 并联机构的特性及其实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
 [11] 丁培燎. Delta 并联机器人运动学分析与控制系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.  
 [12] 韩威. 高精度 Delta 机器人的开发及应用 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.  
 [13] 刘琪. 柔性机械手及其夹持力控制 [D]. 淮安: 淮阴工学院, 2022.  
 [14] 杨乾坤, 王晓红. UV 数码打印机的研制与应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 273.  
 [15] 徐海飞. 基于 ISO 18000-6C 标准的 UHF RFID 读写器设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

3283.  
 [9] CHECKOWAY S, MCCOY D, KANTOR B, et al. Comprehensive experimental analyses of automotive attack surfaces [J]. Proceedings of the 20th USENIX Security Symposium, 2011, 9 (1): 321-324.  
 [10] 赖红清. 先进装备制造业数字化管理平台的设计与实现——以佛山为例 [J]. 商业经济, 2022, 41 (1): 38-41.  
 [11] 高嘉材. 六轴协作机器人的运动控制系统设计 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.  
 [12] SHELHAMER E, LONG J, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2017, 39 (4): 640-651.