

面向人机协作装配单元布局的知识图谱驱动方案生成方法

郭粤琪 樊留群

机械工程与机器人学院, 同济大学 上海 201804

DOI:10.32629/ems.v8i5.20362

[摘要] 针对人机协作装配布局设计中知识分散、约束不统一、方案依赖经验的问题, 本文提出一种知识图谱驱动的布局生成方法: 构建包含产品、工艺、资源与需求的人机协作知识图谱, 形成统一语义网络; 基于图谱路径相似推理筛选候选资源配置与布局原型, 并将其转化为遗传算法的候选集、参数边界与约束, 实现连续布局方案生成。在电池包装配案例实验验证, 所得 Nest 型布局方案使生产节拍降低 13.75%, 物流路径长度降低 9.68%, 协作空间利用率提高 4.5%。

[关键词] 人机协作装配单元; 知识图谱; 布局方案生成; 遗传算法

1 引言

人机协作装配单元需要在有限空间内协调操作人员、协作机器人、工装夹具、检测设备和物流接口, 并同时满足工艺顺序、安全距离、机器人可达性、作业舒适性和空间利用率等要求, 其布局设计本质上是产品结构、装配工艺、资源能力与需求约束共同作用下的综合决策问题。现有研究多将知识建模、资源匹配和布局优化作为相对独立的环节处理, 候选资源、布局类型、参数边界和约束条件仍较多依赖工程经验设定, 导致安全、人因、节拍和空间利用率等跨对象约束难以统一表达, 资源组合与布局原型之间的适配关系缺少解释, 知识推理结果也难以直接转化为优化模型输入, 影响布局方案生成的规范性、可追溯性和可解释性。

本文提出了一种知识图谱驱动的人机协作装配单元布局方案生成方法。该方法构建面向布局设计的产品-工艺-资源-需求 (Product-Process-Resource-Requirement, PPR) 知识图谱, 统一表达产品、工艺、资源和需求约束; 建立基于图谱路径推理的候选资源配置与布局原型筛选机制; 进一步将候选资源、布局原型、参数边界和约束条件转化为遗传算法输入, 实现由知识推理到布局参数求解的连续生成过程。

2 国内外研究现状

人机协作装配单元布局研究主要围绕共享工作空间组织、安全边界设定、机器人可达性、人工操作舒适性和物流路径优化展开。ISO/TS15066 和 GB11291.2 对协作机器人应

用中的安全距离、运行限制和系统集成提出了规范要求^[1,2]; 随着协作机器人应用场景不断扩展, ISO 10218-1:2025^[3]和 ISO 10218-2:2025^[4]进一步对工业机器人本体安全、机器人应用和机器人单元集成提出了更新要求, 为人机协作装配单元中的安全设计和系统集成提供了标准依据; RULA、REBA 等人因评价方法为人工姿态风险和作业负荷分析提供了依据^[5,6]。现有研究能够从安全校核、任务分配和工位布置等方面改善布局方案, 但候选布局类型、资源配置和约束条件仍较多依赖人工经验。

在装配知识建模方面, 研究方法经历了由 BOM、工艺规则库、PPR (Product - Process - Resource) 模型向知识图谱组织方式的发展。知识图谱能够通过实体、关系和属性表达产品结构、工艺任务、设备资源和约束信息, 并支持知识查询、关系推理和资源匹配^[7,8]。但面向人机协作装配单元布局设计时, 需要同时考虑操作者负荷、机器人运行特性、共享区域组织和系统运行效率等因素^[9,10], 传统 PPR 结构对跨对象约束和布局评价指标的表达仍显不足。

知识图谱不仅能够组织设备、工艺和资源关系, 还可以支撑语义检索、制造资源匹配、过程推理和系统决策^[11]。在知识图谱推理方面, 路径相似度、路径约束随机游走和基于语义关系链的推理方法能够利用实体之间的关联, 发现任务、资源、约束和布局对象之间的潜在联系, 为资源匹配和候选方案筛选提供依据^[12]。在布局优化方面, NSGA-II 等多目标

紧凑性、安全适应性、检测衔接和物流连续性五个维度展开。为体现知识图谱路径匹配和规则约束对布局适配性的影响, 本文将布局原型综合得分定义为:

$$S(L_j) = \sum_{q=1}^5 \lambda_q a_{jq} + \gamma P_j, \quad \sum_{q=1}^5 \lambda_q = 1 \quad (3.4)$$

其中, a_{jq} 为候选布局在第 q 个评价维度下的归一化得分, λ_q 为对应权重, P_j 表示由知识图谱路径相似度和规则约束得到的布局适配修正项, γ 为修正系数。

对于正向指标和逆向指标, 进行归一化处理:

$$x^+ = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad x^- = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3.5)$$

经路径推理和规则过滤后, 图谱输出转化为优化模型输入:

$$I_{\text{opt}} = \{C^*, L^*, \Theta, \Omega, W\} \quad (3.6)$$

其中, C^* 为候选资源集合, L^* 为候选布局原型集合, Θ 为参数边界, Ω 为空间边界, W 为评价权重。该转换关系使知识图谱能够向布局优化模型提供候选集合、变量边界和约束条件, 实现知识推理与参数求解之间的衔接。

3.3 布局参数优化模型

布局优化变量包括工作台、人工操作位、协作机器人、视觉检测单元、AGV 停靠位、物料暂存区和 NG 缓冲区等对象的二维坐标与朝向。设布局变量为 x , 本文以生产节拍、物流路径和人机协作程度为主要优化目标, 构建多目标优化模型:

$$\min F(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x)] \quad (3.7)$$

其中, $f_1(x)$ 表示生产节拍, 定义为:

$$f_1(X) = T_c = t_F + t_M(X) + t_R(X) + t_W(X) + t_L(X) \quad (3.8)$$

其中, t_F 表示固定工艺时间; $t_M(X)$ 表示人工移动与取放附加时间; $t_R(X)$ 表示机器人空行程与姿态调整附加时间; $t_W(X)$ 表示人机交接与等待时间; $t_L(X)$ 表示检测与物流衔接附加时间。

人机协作程度 $f_2(x)$ 定义为

$$H_{hrc}(X) = \mu_1 H_d + \mu_2 H_w + \mu_3 H_u + \mu_4 H_s, \quad \sum_{i=1}^4 \mu_i = 1 \quad (3.9)$$

其中, H_d 表示人机作业距离适配度, H_w 表示等待时间

适配度, H_u 表示共享作业区利用水平, H_s 表示任务协同关系支撑度; $\mu_1 \sim \mu_4$ 为权重系数。由于该指标越大越优, 为统一多目标最小化形式, 本文将其转化为协作代价函数:

$$f_2(X) = 1 - H_{hrc}(X) \quad (3.10)$$

物流路径目标函数 $f_3(x)$ 定义为:

$$f_3(X) = L_{in}(X) + L_{out}(X) + L_{NG}(X) \quad (3.11)$$

其中, L_{in} 表示物流 AGV 经由料架到工作台的路径长度, L_{out} 表示成品由工作台到输出的物流长度, L_{ng} 表示由工作台到 NG 缓冲区的分流路径长度。

优化过程需满足场地边界、安全距离、机器人可达性、功能区不重叠和主通道宽度等约束:

$$p_i \in \Omega, \quad d_{hr} \geq d_{\min}, \quad \|p_{\text{task}} - p_{\text{robot}}\|_2 \leq R_{\text{robot}} \quad (3.12)$$

$$A_i \cap A_j = \emptyset \quad (i \neq j), \quad W_{\text{aisle}} \geq W_{\min} \quad (3.13)$$

本文采用非支配排序遗传算法 II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) 求解多目标优化模型。初始化种群由知识图谱输出的候选资源、布局原型和参数边界生成, 通过非支配排序、拥挤度计算、选择、交叉和变异获得推荐布局。

4 电池包人机协作装配单元案例验证

4.1 电池包人机协作装配案例

以电池包人机协作装配单元为对象开展验证, 作业区域尺寸为 $6\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。主要任务包括 AGV 上料、人工定位与预紧、协作机器人终拧、视觉检测、MES 记录以及 NG 分流。布局对象包括工作台、人工操作位、协作机器人、视觉检测单元、AGV 停靠位、物料暂存区和 NG 缓冲区。候选布局原型包括串型、U 型、Nest 型、并型和面对面型。

4.2 候选资源配置与评价

基于电池包装配任务、协作资源能力、工艺接口关系和布局约束, 本文首先从知识图谱中提取候选协作资源配置方案。候选方案主要包括协作机器人、末端工具、工装夹具、检测单元、物流接口和人工操作位等对象, 如表 4.1 所示。候选方案覆盖协作机器人、末端工具、工装夹具、检测单元、物流接口和人工操作位等关键对象, 为后续布局原型评价和参数优化提供输入。

表 4.1 候选协作资源配置方案

编号	协作机器人	末端工具	工装夹具	检测单元	物流接口	人工操作位
C1	UR5e	OnRobot Screwdriver	电池包定位夹具A	海康 MV-CA050-10GM 工业相机	MiR100 移动机器人接口	人工预紧操作位A
C2	UR12e	Atlas Copco QST42 拧紧轴	电池包定位夹具B	Keyence CV-X 系列视觉检测单元	MiR250 双侧物流接口	双侧可达人工操作位
C3	TM12	Atlas Copco QST32 拧紧轴	电池包定位夹具B	海康 MV-CA060-10GM 工业相机	MiR100 单侧物流接口	人工预紧操作位B

在候选资源配置基础上，本文从工艺支撑、能力匹配、接口兼容、空间覆盖、约束满足和布局适配六个维度进行综合评价，结果如表 4.2 所示。C2 方案综合得分最高。该方案采用 UR12e 协作机器人、AtlasCopcoQST42 拧紧轴、KeyenceCV-X 系列视觉检测单元和 MiR250 双侧物流接口，在作业覆盖能力、拧紧能力、检测衔接和双侧物流适配方面表现较优，更适合电池包两侧螺钉预紧、机器人终拧、视觉检测和物流转运等任务需求。

表 4.2 候选协作资源配置方案综合评价

编号	工艺支撑	能力匹配	接口兼容	空间覆盖	约束满足	布局适配	综合得分
C1	0.74	0.72	0.81	0.7	0.86	0.73	0.76
C2	0.93	0.91	0.88	0.94	0.83	0.92	0.90
C3	0.88	0.89	0.86	0.82	0.87	0.85	0.86

本文基于知识图谱中的任务路径、资源能力路径、空间约束路径和评价指标关系，对候选布局原型进行综合适配评价，结果如表 4.3 所示。Nest 型布局综合得分最高。该布局在双侧可达性和协作紧凑性方面表现较好，适合人工预紧与协作机器人终拧围绕同一工作台协同展开。选取 Nest 型作为后续布局参数优化的推荐原型。

4.3 布局优化结果与方案对比

采用遗传算法对 Nest 型布局方案的工作台、人工操作位、协作机器人、检测单元、AGV 接口和缓存区等对象进行坐标求解。如图 4.1 所示，工作台位于装配单元核心区域，

人工操作位与协作机器人围绕工作台布置，便于完成双侧预紧与终拧任务；检测单元、AGV 接口和缓存区沿工艺流向组织，有利于缩短物流转运距离并提高空间利用率。

表 4.3 布局原型综合适配评价结果

布局类型	双侧可达性	协作紧凑性	安全适应性	检测衔接	物流连续性	综合得分
Nest 型	0.88	0.91	0.63	0.79	0.70	0.807
U 型	0.84	0.90	0.66	0.73	0.67	0.784
串型	0.89	0.78	0.80	0.68	0.72	0.776
并型	0.86	0.75	0.91	0.64	0.69	0.765
面对面	0.81	0.76	0.84	0.62	0.65	0.738

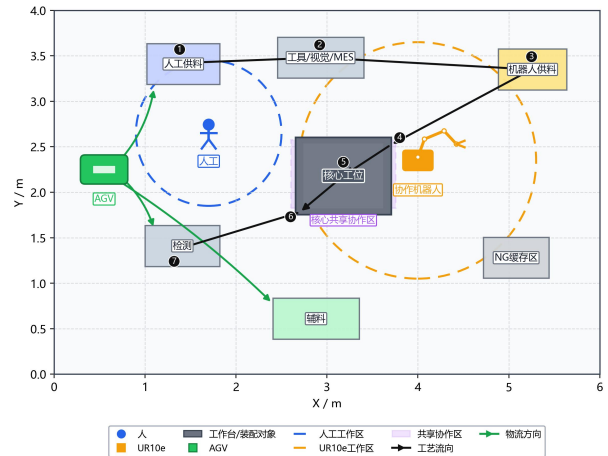


图 4.1 Nest 型最终布局方案

为进一步验证推荐布局的应用效果，本文将企业原方案与本文布局方案在效率、人因、协作和空间指标上进行对比，结果如表 4.4 所示。

表 4.4 企业原方案与本文布局方案对比

方案类型	生产节拍/s	物流路径长度/m	人机等待时间/s	人体疲劳指数
企业原方案	240	12.4	11.5	0.54
本文布局方案	207	11.2	10.2	0.50
方案类型	协作干扰度	人机协作程度	协作空间利用率/%	主通道宽度/m
企业原方案	0.32	0.76	69.4	0.87
本文布局方案	0.41	0.81	73.9	0.86

与企业原方案相比，本文方案在生产节拍、物流路径、等待时间、人体疲劳指数、人机协作程度和协作空间利用率

等指标上均有所改善。其中,生产节拍由 240s 降低至 207s,物流路径由 12.4m 降低至 11.2m,说明推荐布局能够形成更紧凑的作业组织方式。协作干扰度由 0.32 升至 0.41,反映出紧凑布局在提高效率和空间利用率的同时增加了共享作业区内的人机交互强度,实际应用中需结合安全监控、速度限制和区域防护进行控制。

5 总结与展望

本文提出了一种知识图谱驱动的人机协作装配单元布局方案生成方法。通过构建面向布局设计的 PPRR 知识图谱,将产品、工艺、资源、需求纳入统一语义网络,增强安全、人因、空间及评价指标等跨对象约束的表达能力。建立了知识图谱推理方法,将装配任务、资源、布局对象与约束组织为可查询、可推理的关系,支撑候选资源配置与布局原型筛选。提出了图谱路径推理与遗传算法优化的衔接机制,将候选资源、布局原型、参数边界、空间约束与评价权重转化为优化模型可调用信息,实现从知识筛选到参数求解的连续决策。案例结果表明,推荐的 Nest 型布局方案使生产节拍由 240 s 降至 207 s,物流路径由 12.4 m 减至 11.2 m,协作空间利用率由 69.4% 提升至 73.9%,验证了方法可行性。后续将结合仿真与现场数据,分析动态人机交互风险及多任务切换下的布局适应性。

[参考文献]

[1]ISO. Robots and robotic devices — Collaborative robots[S]. ISO/TS 15066:2016, 2016.

[2]中国国家标准化管理委员会. 机器人与机器人装备工业机器人的安全要求 第2部分:机器人系统与集成[S]. GB 11291.2—2013, 2013.

[3]ISO. Robotics — Safety requirements — Part 1: Industrial robots[S]. ISO 10218-1:2025, 2025.

[4]ISO. Robotics — Safety requirements — Part 2: Industrial robot applications and robot cells[S]. ISO 10218-2:2025, 2025.

[5]McAtamney L, Corlett E N. RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders[J]. Applied Ergonomics, 1993, 24(2): 91-99.

[6]Hignett S, McAtamney L. Rapid Entire Body Assessment: REBA[J]. Applied Ergonomics, 2000, 31(2): 201-205.

[7]张栋豪,刘振宇,郑维强,等.知识图谱在智能制造领域的研究现状及其应用前景综述[J].机械工程学报,2021,57(5):90-113.

[8]马忠贵,倪润宇,余开航.知识图谱的最新进展、关键技术和挑战[J].工程科学学报,2020,42(10):1254-1266.

[9]Simões A C, Pinto A, Santos J, Pinheiro S, Romero D. Designing human-robot collaboration workspaces in industrial settings: A systematic literature review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 62: 28-43.

[10]Gualtieri L, Rauch E, Vidoni R. Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 101998.

[11]Wan Y, Liu Y, Chen Z, et al. Making knowledge graphs work for smart manufacturing: Research topics, applications and prospects[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2024, 76: 103-132.

[12]Lao N, Cohen W W. Relational retrieval using a combination of path-constrained random walks[J]. Machine Learning, 2010, 81(1): 53-67.

[13]Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.