DOI: 10.3901/JME.2021.07.204

考虑任务复杂性的人机联合任务分配问题研究*

孔繁森^{1,2,3} 高天宇^{1,2} 李惠敏^{1,2} 卢振林^{1,2}

(1. 吉林大学机械与航空航天工程学院 长春 130022;

2. 吉林大学未来工厂的设计与规划吉林省重点实验室 长春 130022;

3. 吉林大学数控装备可靠性教育部重点实验室 长春 130022)

摘要: 在生产线上, 机器人加入的直接目的是降低人的劳动强度, 提高生产线的效率。关于人机联合任务分配问题多以成本和时间为目标进行任务分配, 则建立了考虑任务复杂性的人机联合任务分配模型, 旨在获得最优资源利用方案。首先从操作过程和决策过程两方面给出了人机联合装配操作复杂度的评价方法; 其次, 开发了基于操作复杂度的人机联合任务分配模型, 该模型以资源利用均衡率、工人操作复杂度均衡率、平均决策过程复杂度为约束条件, 以最小化平衡滞延时间为目标, 在任务分配中, 假设机器人承担操作任务的决策复杂度小于工人承担操作任务的决策过程复杂度, 并兼顾工人操作任务复杂度的均衡, 优化得到人机联合任务分配方案。案例研究证明了所建模型的可行性。

关键词: 人机; 任务分配; 装配复杂度; 装配线平衡

中图分类号: TG156

Research on Human-robot Joint Task Assignment Considering Task Complexity

KONG Fansen^{1,2,3} GAO Tianyu^{1,2} LI Huimin^{1,2} LU Zhenlin^{1,2}

(1. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022;

2. Jilin Provincial Key Laboratory of Designing and Planning for Factory, Jilin University, Changchun 130022;

3. Key Laboratory of CNC Equipment Reliability of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract: In the production line, the direct purpose of robot is to reduce the labor intensity and improve the efficiency of the production line. In the literature, the assignment problem of human-robot joint task is usually carried out with cost and time as the goal. A human-robot joint task assignment model considering the complexity of the task is established to obtain the optimal resource utilization scheme. In this paper, the operation complexity evaluation method of human-robot joint assembly is given from two aspects of operation process and decision process. Second, developed based on the complexity of the operation of human-robot combination task allocation model, the model to take advantage of resource equilibrium rate, average workers operation complexity and decision-making process complexity as constraint conditions, to minimize hysteresis time delay between the balance as the goal, in the task assignment, assume that the robot decision-making process complexity is less than the workers responsible for operating the complexity of the decision-making process, responsible for operation and the balance of both workers operating task complexity, optimizing man-machine combination task allocation scheme. The case study proves the feasibility of the proposed model.

Key words: human-robot; task allocation; assembly complexity; assembly line balancing

0 前言

随着机器人技术的成熟和发展, 适龄劳动力资

源的匮乏, 生产线中以机器人换人是企业主们广泛关注的问题, 工人和机器人协同作业也成为最近国内外学术界普遍关注的研究主题。人机协作 (Human-robot collaboration) 的想法产生诞生于 1995 年的通用汽车基金会, 该基金会为帮助装配线上的工人更好地完成作业而赞助了这个项目。它们通过

* 吉林省科技发展规划资助项目(2020122355JC)。20200609 收到初稿, 20201218 收到修改稿

采用机器人辅助操作, 在保证安全的前提下让机器人与工人协同作业^[1]。其中, 人机协作的任务分配问题是学界研究的热点之一。TAKATA 等^[2]提出以机器人投资和劳动力成本在内的预期总生产成本最小化为目标的人机任务分配方法, 并考虑了未来产品种类及其生产量的变化情况。GUALTIERI 等^[3]通过对现有制造系统的评估, 以确定人机协作模式并将手工装配工作站转换为协作工作站。CHEN 等^[4]提出一种以最小化装配时间和支付成本为目标基于遗传算法的人机任务实时分配算法。SMITH 等^[5]研究了人机协作系统中每个元素的性能, 以成本函数为目标对工人完成装配任务的时间和疲劳程度进行了评价。NIKOLAKIS 等^[6]提出了通用动态调度模型以描述人机协作方式。RANZ 等^[7]提出一种兼顾人和机器人实际能力的任务分配方法, 实现任务需求与人机协作能力的匹配。BOGNER 等^[8]在印刷电路板的实际生产过程中应用一种整数线性规划模型优化协调人机之间的任务分配。TSAROUCHI 等^[9]提出了一种可以确定布局空间中所有组件的位置的决策框架, 对人和机器人的任务进行了初步分配, 并在一个汽车行业的案例研究中进行了测试。后来他们又基于平均资源利用率、平均流动时间、人机工程学等多准则提出了一种人机协作装配单元任务规划的方法^[10]。

上述文献大多将研究集中在近身人机协同作业问题的研究, 主要涉及的问题有: 安全设计、意图识别、路径规划和任务分配。在上述任务分配的研究中, 主要是以时间和成本为目标进行分配, 并辅以复杂数学模型进行求解。本文研究与文献中的研究略有不同, 本文并不强调人与机器人的近身协作, 而关注的是生产线的减人增效问题。这类问题的主要研究主题是: ① 在一条装配线规划或改造中引入几个机器人; ② 确定机器人数量后, 人机任务如何分配问题; ③ 人机混合生产线的任务负荷平衡问题, 且平衡目的是保证生产线的流动性。本文认为在进行人机联合任务分配时, 要充分考虑机器人不适合做具有复杂认知操作的任务, 适合简单重复性工作的特点, 对装配任务进行合理分配, 以充分利用工人和机器人的各自优势, 同时还要兼顾生产线的流动性, 进而使人机联合作业生产线的生产能力和稳定性都得到提高。

1 装配任务复杂性的度量

本文使用两种复杂性对人机协作任务进行描

述, 一是总的装配复杂性, 包括物理负荷与认知负荷; 二是决策过程复杂性。本文在进行人机任务分配时考虑了工艺过程复杂性、操作复杂性和决策复杂性。

1.1 工艺过程复杂性

工艺过程复杂性是描述产品装配所需执行的每个任务及任务之间的关系深度的函数, 大小取决于装配任务的数量和紧前紧后关系。

假设 $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_m)$ 为产品装配所需作业元素的集合, 每个作业元素间有 $r = (r_1, r_2, r_3)$ 个关联关系, 式中 r 的大小分别等于与本作业单元相关的前序的个数、后序的个数以及与本作业单元并行的装配单元数, 基于以上关系, 工艺过程复杂性的信息熵度量

$$H_D = -\sum_{i=1}^3 p_i \cdot \lg p_i \quad (1)$$

$$p_i = \frac{r_i}{r_1 + r_2 + r_3}$$

式中, H_D 为工艺深度复杂度,。

1.2 操作过程复杂性

操作过程复杂性包括静态和动态的任务差异不确定性。静态复杂性不会随时间的变化而改变, 只与产品的结构以及工艺有关。动态复杂性则由诸如材料短缺、设备故障, 供应商可靠性不足而引起的交期和数量变化等内外部因素引起。动态复杂性与时间相关。

本文参考 EIMARAGHY 等^[11]提出的制造复杂性评价模型, 从规模 H 、难度 K_C 、多样性 D_R 度量操作过程复杂性。前两者为静态复杂性, 与产品设计结构有关。后者属动态复杂性, 与装配过程相关。

(1) 规模 H 。

规模是指满足设计需求的加工程序、设备、夹具、治具和量检具的信息量。在人机联合装配系统中, 主要考虑工人的操作单元数, 对各个工位所应用的夹具、量检具等考虑相对较少。因此, 这里只考虑各个作业单元的动素数目, 如移物、定位、装配和拆卸。通过对这几种动素的测量, 可以计算出工人在执行操作时能为产品增值的操作数, 用信息熵表示规模因子 H 如下

$$H_i = \lg C_i \quad (2)$$

式中, H_i 为第 i 个作业单元的规模, C_i 为第 i 个作业单元的动素数。

(2) 难度 K_C 。

难度是指操作难度。这里从分析装配操作的基本动作入手对难度进行测量。装配的难度取决于所

有作业单元装配操作的难度和操作总数, 因此, 相对操作难度可表示为

$$K_C = \frac{\text{所有作业元素的相对操作难度之和}}{\text{操作总数}} \quad (3)$$

影响操作难度的基本动作相互作用且较为复杂, 本文基于文献[12]介绍的方法, 利用神经网络对各个作业元素的难度进行评价。

由于在汽车零部件的装配过程中, 定位、紧固、压配、密封、固定操作对装配任务的复杂性影响较大, 因此在这里作重点说明。

1) 定位: 定位是把零件或工具放在正确的位置上, 以方便后续的操作。零件的尺寸、定位方式、方向等都会对定位有所影响。在装配定位时, 限制的自由度越多, 定位难度就越小。定位方式、定位角度与相对操作难度的关系如表 1 和表 2 所示。

表 1 与定位方式相关的操作难度表

定位方式	相对操作难度
无定位原件	1.0
双销定位	1.0
短边定位	0.7
长边导向	0.4
凹凸面配合	0

表 2 与定位角度相关的操作难度表

定位角度	相对操作难度
$\alpha=0$ 或 360	0
$0<\alpha<45$ 或 $315<\alpha<360$	0.3
$45<\alpha<90$ 或 $270<\alpha<315$	0.5
$\alpha=90$ 或 270	0.7
$90<\alpha<270$	1.0

2) 紧固: 紧固是指利用紧固件使多个零部件连接在一起, 可分为机械紧固、非机械紧固和非紧固。这里考虑的紧固类型及其操作难度如表 3 所示。

表 3 与紧固类型相关的相对操作难度

紧固类型	相对操作难度
整体紧固件	0
专用紧固件	0.2
机械紧固件	按钮配合紧固件 0.4
	螺纹紧固件 0.6
	垫圈、开口销等 0.7
非机械紧固件	粘接 1.0
	高温焊接 1.0
非紧固工艺	配合连接 0.9

3) 压配: 压配是指用压力将零件固定在某个位置。在装配操作中, 需要配合面来压装。配合性质

决定配合面之间的紧密性, 可依据配合孔轴之间公差带的位置, 将配合类型分为间隙、过渡和过盈。压配及相对操作难度如表 4 所示。

表 4 与压配相关的相对操作难度

配合性质	压入方式	相对操作难度
间隙配合	套筒压入法	0
	套筒压入法	0.3
过渡配合	压力机械压入法	0.6
过盈配合	温差法	1.0

4) 密封: 当有密封操作时设定其难度为 1, 无密封操作时设定其难度为 0。

5) 固定: 固定是指在装配操作中拧紧零件防止其移动。操作空间与可及性对固定操作的影响很大, 详见表 5。

表 5 影响固定的因素及操作难度

定位角	相对操作难度
操作空间与可及性良好	0
可及性良好, 操作空间不好	0.3
可及性不好, 操作空间良好	0.6
操作空间与可及性不好	1.0

(3) 多样性 D_R 。

多样性 D_R 与装配系统是否是多品种装配有关, 若只有 1 种产品, 则其取值为 0, 若有多种产品, 则 D_R 使用信息熵定义为

$$D_R = -q \cdot \lg q \quad (4)$$

$$q = \frac{1}{n}$$

式中, n 为要装配的产品品种数。

那么, 操作过程复杂性的度量模型可表示为

$$H_P = K_C(1 + D_R)H \quad (5)$$

式中, H_P 为操作过程复杂度; H 为规模; K_C 为难度; D_R 为多样性。

1.3 决策过程复杂性

本文在文献[13]的基础上, 从装配操作的感知过程和认知过程两方面建立装配工人的装配决策过程复杂性模型如下。

(1) 感知过程。

装配操作的感知过程主要考虑各个作业单元之间的关系。对于工作任务 X_i 有 m 个作业单元, 可以表示为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m]$, 作业单元之间的关系和为 L , 每个作业单元的关系总和为 L_i , 定义作业单元之间关系的感知复杂度就是

$$H(X_i) = -\sum_{i=1}^m o_i \lg o_i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m o_i = 1 \quad o_i = \frac{L_i}{L}$$

(2) 认知过程。

根据第二代人因可靠性分析方法，装配认知包括观察、解释、计划以及执行，可进一步细分为协调、联络、对比等 15 个决策活动。这些决策活动和决策功能的对应关系如表 6 所示，需统计每个作业单元所涉及到的活动数量，计算过程与感知过程相同，详见文献[14]。本文用 $R(X)$ 来表示认知复杂度。

表 6 认知活动与认知功能对应表

认知活动类型	认知功能			
	观察	解释	计划	执行
协调			√	√
联络				√
对比		√		
诊断		√	√	
评价		√	√	
执行				√
识别		√		
保持			√	√
监视	√	√		
观察	√			
计划			√	
记录		√		√
调整	√			√
扫视	√			
检验	√	√		

综上所述，决策过程复杂度可表示为

$$H_C = H(X) + R(X) \quad (7)$$

式中， H_C 为决策过程复杂度； $H(X)$ 为决策感知复杂度； $R(X)$ 为决策认知复杂度。

因此，可将装配复杂性的度量模型表示为

$$H_T = H_D + H_P + H_C \quad (8)$$

式中， H_T 为总的装配复杂度； H_D 为工艺深度复杂度； H_P 为操作过程复杂度； H_C 为决策过程复杂度。

2 人机联合任务分配模型的建立

2.1 任务分配框架模型

2.1.1 模型假设

在人机协作装配线中，本文假定所有的任务都被分配给各个资源，且所有任务分配须满足优先关系条件。为了方便模型说明，这里假设如下。

(1) 操作完成时间取决于操作主体是工人还是协作机器人。

(2) 每一个任务必须进行分配。

(3) 忽略安装时间及在制品库存的影响。

(4) 在进行任务分配时，为保证操作的连续性，应尽量减少任务切换次数。

2.1.2 任务分配的框架模型

本文将提出一个多阶段的流程规划模型对人机协作任务分配进行描述。在对传统装配系统进行改造升级时，通过以机代人降低运营成本、提高生产效率，为实现这一目标需要回答以下问题：首先，是需要引入几个机器人，使运营成本在经济合理范畴内；其次，在任务分配中，如何考虑任务复杂度问题。

基于上述目的，本文提出了如图 1 所示的人机联合任务分配框架模型，该模型按以下几个阶段执行任务分配

(1) 模型的数据输入。

当进行任务分配时，产品和零件的设计特征需要输入，如零部件的特征、每一道工序的操作时间和装配操作复杂度等。

(2) 加工提取。

提取任务分配模型所需要的数据，其中最为重要的就是操作时间和任务复杂度。

(3) 资源需求计算。

本文以最小化人机协作装配系统的成本为目标来确定系统中工人和协作机器人的最优数目。影响人机协作装配系统成本的因素和大小已在表 7 中列出。值得注意的是，由于协作机器人在国内应用不广泛，后文中计算时使用的是来自文献[15]的数据，并将结算单位转化为人民币。

使用下式计算人机协作装配系统每小时成本 C

$$C = \frac{C_{hrc} \cdot N_r + C_{feed} \cdot N_r + C_{wb} \cdot N_h}{h_{pb}} + C_{op} \cdot N_h \quad (9)$$

表 7 成本计算所用参数的定义及大小

定义	大小
协作机器人的价格 C_{hrc} /元	234 093
柔性给料机的价格 C_{feed} /元	6 2424.8
工人所用工作台的价格 C_{wb} /元	2 340.93
必须全额偿还投资成本的总小时数 h_{pb} /h	3 680
低水平工人的时薪 C_{opLow} /(元/小时)	94.83
高水平工人的时薪 C_{opHigh} /(元/小时)	118.54
工人的数量 N_h	-
协作机器人的数量 N_r	-

图1 人机协作任务分配框架模型

(4) 方案生成与评价筛选。

评价指标的选择直接关系到最终分配方案的优劣。本文提出了一种多准则装配任务分配评价方法对方案进行评价筛选。图1给出了用户反馈和筛选的流程,共有四个指标。

时间利用均衡率(TUR):表示装配操作中资源对时间利用的均衡化水平,旨在避免有些资源承担任务的时间过长,有些资源承担任务的时间过少,其定义如下

$$TUR = \frac{\sum_i T_i}{n \times \max T_i} \quad (10)$$

式中, T_i 为劳动资源 i 的工作时间; $\max T_i$ 为所有劳动力资源工作时间最大值。

工人任务复杂度均衡率(HBR):在进行人机协作装配任务分配时无需考虑机器人所承担任务复杂度,但需保证每个工人所承担任务复杂度的均衡性,这个均衡性指标定义为

$$HBR = \frac{\sum_{k=1}^H H_T(h)}{h \times \max H_T(h)} \quad (11)$$

式中, H 表示工人的总数; $\max H_T(h)$ 表示所有装配操作复杂度的最大值。

平均决策过程复杂度(ACC):表示机器人或者工人承担任务的平均决策过程复杂度。在分配任务时,需要保证机器人所承担任务的决策复杂度低于工人任务的决策复杂度,相关指标定义如下

$$ACC_R = \sum_{r=1}^R \frac{H_C(r)}{r} \quad (12)$$

$$ACC_H = \sum_{h=1}^H \frac{H_C(h)}{h} \quad (13)$$

式中, $H_C(r)$ 为机器人 r 承担任务的决策复杂度; R 为机器人的总数。 $H_C(h)$ 为工人 h 承担任务的决策复杂度; h 为工人的总数。

平衡滞延时间(BD):是指各个资源工作时间与需求节拍的差的总和。

$$BD = \sum_{k=1}^n (C - P_n) \quad (14)$$

式中, C 为需求节拍, P_n 是指第 n 个装配资源的含量时间, n 表示这个系统里所有的装配资源数。

(5) 模型的数据输出。

经过数据输入、加工提取、资源数计算、任务分配方案评价与筛选后,就得到了具体的装配任务分配方案,并在装配任务分配方案的指导下对设施布局进行规划。

2.2 人机协作任务分配的数学模型及求解

在人机协作装配系统中,假设工人和机器人的总数确定。装配任务需要在满足有限关系约束的条件下,将所有的作业任务分配给工人和机器人。这里将人机协作装配任务分配的目标设定为,使装配操作的平衡滞延时间最小

$$\min BD = \sum_{k=1}^n (C - P_n) \quad (15)$$

$$\text{s.t. } TUR(h,r) \geq \alpha$$

$$HBR(h,r) \geq \beta$$

$$ACC_R(h,r) < ACC_H(h,r)$$

式中, α 为限定的最小的时间利用均衡率; β 为限定

的最小的工人任务复杂度均衡率。

本文问题是典型的 *NP-HARD* 问题, 因此, 为求解本文给出的任务分配数学模型, 这里设定了一种特定的编码方法, 并利用遗传算法进行人机协作装配任务的分配, 图 2 给出了相应的遗传算法求解流程图。

图2 遗传算法的流程图

本文需要把装配系统中的作业分配给工人和协作机器人, 为使整个装配操作的平衡滞延时间最小, 需要把任务 τ 分配给 h 个工人和 r 个机器人, 得到人机任务分配集合 $P(h, r)$, 这种人机任务协作模式可以表示为

$$P(h, r) = [\tau, h, r, \varepsilon, c] \quad (16)$$

式中, τ 为生产某一个型号的产品所需要的 n 个工序, $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n\}$; h 为工人的数量; r 为机器人数量; ε 为任务的操作时间 $\varepsilon = \{\varepsilon^r, \varepsilon^h\}$, 这两者分别为机器人和工人操作所需时间; c 为操作复杂度, $c = \{H_D, H_P, H_C\}$ 。

编码方式: 分配方案具有大量的解, 为了方便

描述每个解决方案, 本文作如下定义, 在 τ 中的 n 个工序里, 每个都包含若干个作业元素, $\tau = \{J_{11}, J_{12}, \dots, J_{1m_1}\}, \dots, \{J_{n1}, J_{n2}, \dots, J_{nm_n}\}$ 。在某一任务单元中, 工人和机器人有各自对应的一组生产步骤, 对工人有 $\tau_i^h = \{\tau_{i1}^h, \tau_{i2}^h, \tau_{i3}^h, \dots, \tau_{ij}^h\}$, 对机器人有 $\tau_i^r = \{\tau_{i1}^r, \tau_{i2}^r, \tau_{i3}^r, \dots, \tau_{ik}^r\}$ 。使用“1”标记的作业由工人或者协作机器人完成, 每一道工序既可以人或机单独完成, 也可以双方协作完成, 如图 3 所示。

图3 任务操作模式及编码方式

交叉: 选取两条染色体父代 1 和父代 2 交叉, 例如 $\tau_a = \{\tau_{a1}, \tau_{a2}, \tau_{a3}, \dots, \tau_{an}\}$, $\tau_b = \{\tau_{b1}, \tau_{b2}, \tau_{b3}, \dots, \tau_{bn}\}$, 在随机选取的 τ_{ai} 和 τ_{bi} , $1 \leq i \leq n$ 之间进行, 整体调换任务分配内容, 如图 4 所示。

图4 交叉编码方式

变异: 选择一条染色体作为父代, 随机产生突变点, 如选取操作步骤 τ_i 进行突变操作, 则有: $\tau_i^h = \{\tau_{i1}^h, \tau_{i2}^h, \tau_{i3}^h, \dots, \tau_{ij}^h\}$, $\tau_i^r = \{\tau_{i1}^r, \tau_{i2}^r, \tau_{i3}^r, \dots, \tau_{ik}^r\}$, 在其中随机选取一个任务交换, 根据优先关系, 重新排列变异点后面的基因段, 如图 5 所示。

图5 变异编码方式

3 减速器装配线的人机协作改造

3.1 案例概况及装配复杂度的计算

本文选用 Y 公司减速器装配线为案例背

景, 对其进行人机协作的改造升级, 其原始布局如图 6 所示, 其装配流程图如图 7 所示。改造升级前, 该装配线共有 18 个工人完成 34 个作业元素。

工艺过程复杂度取决于每一个作业单元在整个装配流程中所处位置, 按式(1)计算可得各个作业单元的工艺过程复杂度, 如表 8 所示。

图 6 减速器装配线的布局图

图 7 减速器装配线装配流程图

表 8 各作业单元工艺过程复杂度统计值

工序号	工艺过程复杂度	工序号	工艺过程复杂度
1	0.21	18	0.27
2	0.26	19	0.25
3	0.30	20	0.24
4	0.33	21	0.22
5	0.35	22	0.21
6	0.37	23	0.18
7	0.39	24	0.16
8	0.40	25	0.13
9	0.41	26	0.10
10	0.41	27	0.06
11	0.42	28	0.00
12	0.30	29	0.24
13	0.30	30	0.30
14	0.30	31	0.22
15	0.29	32	0.34
16	0.28	33	0.37
17	0.28	34	0.40

根据本文对操作过程复杂度的定义, 按式(2)~(5)计算可得各个作业元素操作过程复杂度统计如表 9 所示。

接下来计算决策复杂度, 在减速器装配线中, 依据工人在操作过程中需要处理的信息量和信息之间的关系, 按照式(4)~(5)得到决策感知和决策认知复杂度值, 汇总后各作业单元的决策过程复杂度如表 10 所示。

在对各作业单元工艺过程、操作过程和决策过程复杂度计算后, 相加可得各作业单元的装配复杂度如表 11 所示。

表 9 各作业单元操作过程复杂度统计值

工序号	规模	难度	多样性	操作复杂度	工序号	规模	难度	多样性	操作复杂度
1	0.30	0.86	0.15	0.30	18	0.48	0.81	0.15	0.44
2	0.48	0.86	0.15	0.47	19	0.70	0.72	0.15	0.58
3	0.30	0.81	0.15	0.28	20	0.30	0.81	0.15	0.28
4	0.60	0.97	0.15	0.67	21	0.30	0.79	0.15	0.27
5	0.48	0.81	0.15	0.44	22	0.48	0.74	0.15	0.40
6	0.60	0.81	0.15	0.56	23	0.48	0.79	0.15	0.43
7	0.48	0.86	0.15	0.47	24	0.70	0.86	0.15	0.69
8	0.30	0.86	0.15	0.30	25	0.78	0.87	0.15	0.78
9	0.78	0.89	0.15	0.80	26	0.30	0.81	0.15	0.28
10	0.30	0.81	0.15	0.28	27	0.48	0.86	0.15	0.47
11	0.48	0.93	0.15	0.51	28	0.90	0.90	0.15	0.93
12	0.60	0.90	0.15	0.62	29	0.90	0.97	0.15	1.01
13	0.60	0.80	0.15	0.56	30	0.90	0.89	0.15	0.93
14	0.30	0.56	0.15	0.20	31	0.48	0.98	0.15	0.54
15	0.30	0.86	0.15	0.30	32	0.78	0.88	0.15	0.79
16	0.48	0.86	0.15	0.47	33	0.60	0.86	0.15	0.59
17	0.78	0.86	0.15	0.77	34	0.78	0.56	0.15	0.51

表 10 各个作业单元决策过程复杂度统计值

工序号	感知过程	认知过程	决策过程	工序号	感知过程	认知过程	决策过程
1	0.27	1.89	2.16	18	0.47	1.97	2.44
2	0.43	1.98	2.41	19	0.47	1.97	2.44
3	0.47	1.82	2.29	20	0.47	1.84	2.31
4	0.50	1.97	2.47	21	0.47	1.84	2.31
5	0.42	1.95	2.37	22	0.47	1.89	2.36
6	0.38	1.98	2.36	23	0.47	1.84	2.31
7	0.34	1.85	2.19	24	0.47	1.89	2.36
8	0.43	1.92	2.35	25	0.47	1.92	2.39
9	0.47	1.98	2.45	26	0.47	1.89	2.36
10	0.47	1.84	2.31	27	0.43	1.89	2.32
11	0.47	1.97	2.44	28	0.43	1.89	2.32
12	0.47	1.89	2.36	29	0.43	1.98	2.41
13	0.47	1.98	2.45	30	0.43	1.98	2.41
14	0.47	1.82	2.29	31	0.43	1.97	2.39
15	0.47	1.89	2.36	32	0.43	1.97	2.39
16	0.47	1.97	2.44	33	0.43	1.97	2.39
17	0.47	1.94	2.41	34	0.27	1.82	2.10

表 11 各个作业单元装配复杂度统计值

工序号	工艺过程	操作过程	决策过程	装配复杂度
1	0.21	0.30	2.16	2.67
2	0.26	0.47	2.41	3.15
3	0.30	0.28	2.29	2.87
4	0.33	0.67	2.47	3.47
5	0.35	0.44	2.37	3.17
6	0.37	0.56	2.36	3.29
7	0.39	0.47	2.19	3.04
8	0.40	0.30	2.35	3.05
9	0.41	0.80	2.45	3.65
10	0.41	0.28	2.31	3.01
11	0.42	0.51	2.44	3.37
12	0.30	0.62	2.36	3.28
13	0.30	0.56	2.45	3.31
14	0.30	0.20	2.29	2.78
15	0.29	0.30	2.36	2.95
16	0.28	0.47	2.44	3.20
17	0.28	0.77	2.41	3.45
18	0.27	0.44	2.44	3.15
19	0.25	0.58	2.44	3.27
20	0.24	0.28	2.31	2.83
21	0.22	0.27	2.31	2.80
22	0.21	0.40	2.36	2.97
23	0.18	0.43	2.31	2.93
24	0.16	0.69	2.36	3.21
25	0.13	0.78	2.39	3.30
26	0.10	0.28	2.36	2.74
27	0.06	0.47	2.32	2.85
28	0.00	0.93	2.32	3.25
29	0.24	1.01	2.41	3.66
30	0.30	0.93	2.41	3.63
31	0.22	0.54	2.39	3.15
32	0.34	0.79	2.39	3.52
33	0.37	0.59	2.39	3.36
34	0.40	0.51	2.10	3.00

3.2 案例中人机联合的任务分配

(1) 模型数据的输入和加工提取。

输入并提取该减速器装配线 34 个作业单元的各项数据。该装配线的总加工周期为 1 064 s, 理论最少工作站数目为 11, 因此这里假定工人和协作机器人加起来的资源总数为 11。

(2) 资源需求计算。

由于本文要在装配系统中加入协作机器人, 以

每小时的成本为约束确定人机协作装配系统中工人和协作机器人的数目。其中装配操作小时成本可按照式(9)计算求得如下: 按照传统装配模式, 单位成本为 1 050.13 元/时; 如果将传统装配系统改造升级为人机协作装配系统, 随着协作机器人数目的增加, 单位成本会逐渐降低, 当 4 人 7 机协作时, 单位成本达到低值 1 040.73 元/时, 低于 11 人的装配系统。

(3) 方案的评价与筛选。

本文使用 Visual C++编写求解程序, 生成任务分配方案。第一步, 对程序进行初始化, 读入初始数据, 如优先关系、工作时间、各作业元素的任务复杂度、各作业单元的决策过程复杂度等; 第二步, 计算适应度值, 并将方案按照适应度大小排序; 第三步, 对产生的初始方案种群进行交叉和变异操作; 第四步, 判断时间利用均衡率和任务复杂度均衡率是否符合要求; 第五步, 对机器人所承担任务的决策过程复杂度和平衡滞延时间进行优化, 最后记录任务分配方案。并依据机器人所承担的任务决策过程复杂度对分配方案进行筛选。首先, 在对时间利用均衡率和任务复杂度均衡率不加以限制的条件下, 计算求得不同人机组合时机器人承担任务的决策过程复杂度, 如表 12 所示。随着机器人数的增多, 机器人承担任务的决策过程复杂度也在增大, 随着工人数目的增多, 机器人承担任务的决策过程复杂度逐渐降低。

表 12 机器人任务的决策过程复杂度统计值

机器人的 决策复杂 度		机器人数目								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
工 人 数 量	1	43	70	79	109	92	115	101	110	
	2	0	19	42	44	59	59	90	82	
	3	0	4	20	30	36	46	49	39	
	4	0	0	0	10	12	26	32	41	
	5	0	0	0	6	5	6	17	16	
	6	0	0	0	2	3	3	15	16	
	7	0	0	0	0	1	6	10	11	
	8	0	0	0	0	0	2	5	5	
	9	0	0	0	0	0	1	0	8	

(4) 模型数据的输出。

如前所述, 最佳的装配资源总数为 11, 而当协作机器人数目大于等于 7 时, 装配系统的运作成本才小于 11 人的情况。接下来限制时间利用均衡率大于 80%, 工人操作复杂度均衡率大于 80%, 以最小化平衡滞延时间为目标, 求解各组合中机器人承担任务的决策复杂度如表 13 所示。

表 13 限制条件下机器人任务决策复杂度统计值

机器人的决策复杂度	机器人数量			
	7	8	9	10
1				110.02
2			87.83	
3		61.55		
4	33.12			

基于机器人决策复杂度最小原则，选取了 7 机 4 人组合的方案，虽然此时单位成本并非最小，但机器人所承担任务的决策过程复杂度最小，最符合本文使机器人承担更多决策过程复杂度低的任务的思想，此时的资源的时间利用均衡率为 83%，工人任务操作复杂度均衡率为 84%，平衡滞延时间为 93 s。生产节拍由 96 s 变为 116 s。本文绘制了如图 8 所示的任务分配甘特图。

本方案未必是传统意义上的最优方案，但该方

案利用了机器人和工人的各自优势，将决策过程复杂度较低、相对简单重复的工作分配给了机器人，并兼顾了工人装配任务复杂度的均衡。提高了装配线的柔性，以应对装配过程中的干扰因素，实现人机协同生产。本文依据该方案绘制了改进后的减速器装配线的布局图，如图 9 所示。

图 8 人机联合任务分配甘特图

图 9 重新布局设计方案

4 结论与展望

(1) 基于装配复杂性对人机联合任务进行分配，建立了人机联合任务分配框架模型，以时间利用均衡率、工人任务复杂度均衡率、平均决策过程复杂度为评价指标，以最小化平衡滞延时间为目标进行方案筛选，计算机器人承担任务的最低决策过程复杂度，从而得到联合优化的任务分配方案。案例研究表明人机联合可以充分利用工人和机器人的优点，使工人承担决策过程复杂度较高的工作，机器人承担简单重复且单一的工作，实现柔性生产，降低企业运营成本，提高生产效率。

(2) 给出了一个在装配线中引入机器人，并对其进行合理的任务负荷和复杂性分配的程序框架，但没有进行详细的成本研究，如改建的拆弃成本如

何考虑，还有一个问题本文称联合分配，而没有称协同任务分配，其原因在于本文忽视了人与机器人的近身同台协作问题，这些问题均有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] WANG L, GAO R, VÁNCZA J, et al. Symbiotic human-robot collaborative assembly[J]. CIRP Annals, 2019, 68(2): 701-726.

[2] TAKATA S, HIRANO T. Human and robot allocation method for hybrid assembly systems[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 9-12.

[3] GUALTIERI L, RAUCH E, VIDONI R, et al. An evaluation methodology for the conversion of manual assembly systems into human-robot collaborative workcells[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 38: 358-366.

[4] CHEN F, SEKIYAMA K, CANNELLA F, et al. Optimal

- subtask allocation for human and robot collaboration within hybrid assembly system[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2014, 11(4): 1065-1075.
- [5] SMITH T, BENARDOS P, BRANSON D. Assessing worker performance using dynamic cost functions in human robot collaborative tasks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(1): 289-301.
- [6] NIKOLAKIS N, KOUSI N, MICHALOS G, et al. Dynamic scheduling of shared human-robot manufacturing operations[J]. Procedia CIRP, 2018, 72: 9-14.
- [7] RANZ F, HUMMEL V, SIHN W. Capability-based task allocation in human-robot collaboration[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 9: 182-189.
- [8] BOGNER K, PFERSCHY U, UNTERBERGER R, et al. Optimized scheduling in human-robot collaboration—a use case in the assembly of printed circuit boards[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(16): 5522-5540.
- [9] TSAROUCHI P, SPILIOTOPOULOS J, MICHALOS G, et al. A decision making framework for human robot collaborative workplace generation[J]. Procedia CIRP, 2016, 44: 228-232.
- [10] TSAROUCHI P, MAKRIS S, CHRYSSOLOURIS G. On a human and dual-arm robot task planning method[J]. Procedia CIRP, 2016, 57: 551-555.
- [11] ELMARAGHY WH, URBANIC RJ. Modelling of Manufacturing Systems Complexity[J]. CIRP Annals, 2003, 52(1): 363-366.
- [12] 徐兵. 基于操作难度指标的可装配性评价方法[D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
- XU Bing. The Assemblability evaluation method based on operation difficulty[D]. Suzhou: Suzhou University, 2008.
- [13] 孔繁森, 叶正梗. 生产作业可操作性评价理论方法框架模型研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 198-208.
- KONGFansen, YE Zhenggeng. Research on evaluation method framework model of production job operability[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 198-208.
- [14] 高云鹏. 基于复杂度的工人与机器人协同作业任务分配问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- GAOYunpeng. The task allocation of human-robot collaboration(HRC) based on complexity[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [15] FACCIO M, BOTTIN M, ROSATI G. Collaborative and traditional robotic assembly: A comparison model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(2): s00170-018-03247-z.
-
- 作者简介: 孔繁森(通信作者), 男, 1965 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为工业工程相关领域, 工厂设计与规划, 制造系统建模仿真与优化, 以人为核心的生产工程问题。
- E-mail: kongfs@jlu.edu.cn