

面向工时预估的物联网车间人员动态调度技术研究

熊鑫,唐敦兵,潘俊峰,王震

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对物联制造车间人机协作调度中人员参数的问题,提出基于人员层次技能树的任务匹配度模型和基于学习曲线的人员工时预估模型,结合实际的车间和相关理论基础,提供具体实现的解决思路。将所提出的两种模型在真实物联制造车间中进行性能验证测试,实验结果表明:所提方法可有效提高人员动态调度的效率。

关键词:物联制造;人机协作;动态调度

中图分类号:TH164 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)02-0004-03

Research on Personnel Dynamic Scheduling Technology in IoT Manufacturing Workshop

XIONG Xin, TANG Dunbing, PAN Junfeng, WANG Zhen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In light of the problem of personnel parameters in human-machine cooperative scheduling in IoT manufacturing workshop, a task matching degree model based on personnel level skill tree and an operation time prediction model of the personnel based on learning curve are proposed. Combined with the actual workshop and relevant theoretical basis, specific solutions are provided. The performance of the proposed two models is verified in the real IoT manufacturing workshop, which shows that the methods can improve the efficiency of personnel dynamic scheduling.

Keywords: IoT manufacturing; human machine cooperation; dynamic scheduling

0 引言

在智能制造的发展背景下,车间将面临更多不确定性的、高复杂度的事件,单靠人类的智慧或者机器的智能无法解决。解决上述问题的有效方式是将人和机器有机结合并协作互动起来,通过物联技术和信息集成技术,将设备和人的优势充分发挥出来,实现最优精细化生产。

在人机协作领域,BOUSDEKIS A 等^[1]发挥人类智慧和机器智能的各自优势,提出了面向 Operator 4.0 的 HCPS (human-cyber-physical-systems) 框架,使人类、网络系统和物理系统在最佳互补中协同工作,Operator 4.0 和 HCPS 框架也成为了人机协作的热门。ROMERO D 等^[2-3]基于 Operator 4.0,结合嵌入式技术、现代通信信息技术等,强化了人员在智能车间的能力,协作机器更高效地完成生产任务,并分析探讨了人机协同的混合增强智能模型。在后续的研究中,研究者们开始将人机协作运用到实际的物联制造车间中。GUERIN C 等^[4]基于工业 4.0 背景,探索了车间数据和信息的获取、汇总、可视化和再利用的方法,并通过智能用户界面,指导工人完成车间任务。ROBINSON S 等^[5]基于可视化交互仿真和人工智能,预测不同策略操作系统下人类决策的性能,并寻找出优化改进的策略。

由于机器设备存在固有的性能参数,而系统很难通过数值化参数来统一描述人员的工作情况。针对这一问题,

本文给出了任务匹配度和人工工时预估两项基于动态调度关键技术指标的研究。

1 基于技能树模型的任务匹配

随着信息化和智能化的发展,车间人员的技能水平也呈现出多元化和层次化的特点。在人机任务的动态调度中,系统将衡量工作人员的技能水平是否具备完成该任务的需求,将其抽象成一个树的结构模型。例如,在进行刀具更换的过程中,分为车刀、铣刀和尖刀等刀具,对于不同类型的刀具,在操作时,又需要对应领域技能的人员来执行任务。可以通过这种加权树的层次结构类比成人员的技能层次结构,也称该树形结构为层次技能树模型(HST)。

本文定义一个 HST,根节点 $S = \{S, [s[1], s[2], \dots, s[k]]\}$,其中 $s[1], s[2], \dots, s[k]$ 是根节点下的子树。如图 1 所示,一个 $s \in S$,都相对应了一个键值对 $\langle k(s), v(s) \rangle$,其中 $k(s)$ 代表技能, $v(s)$ 代表该技能所占的权重。一个技能人员 $w \in W$,都相对应着一个节点和权重不同的 HST。

对于每个节点 s , $f_{\text{ather}}^{(n)}(s)$ 表示比 s 高 n 层的父节点集合,其中 $f_{\text{ather}}^{(0)}(s) = s$, $c_{\text{hild}}(s)$ 表示 s 的子节点集合。如图 1 所示, $f_{\text{ather}}^{(1)}(\langle \text{车床}, 1.0 \rangle) = \langle \text{机床维护}, 3.3 \rangle$, $c_{\text{hild}}(\langle \text{刀具更换}, 2.2 \rangle) = \{ \langle \text{车刀}, 0.5 \rangle, \langle \text{铣刀}, 0.7 \rangle, \langle \text{尖刀}, 1.0 \rangle \}$,

基金项目:国家自然科学基金项目(52075257);江苏省重点研发计划项目(BE2021091)

第一作者简介:熊鑫(1996—),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为物联环境下的智能制造系统研究。

$c_{\text{hild}}(<\text{车刀}, 0.5>) = \emptyset$ 。其中 $<R, 11.2>$ 代表 S 的根节点, 11.2 代表该工作人员的所有技能权重总值。

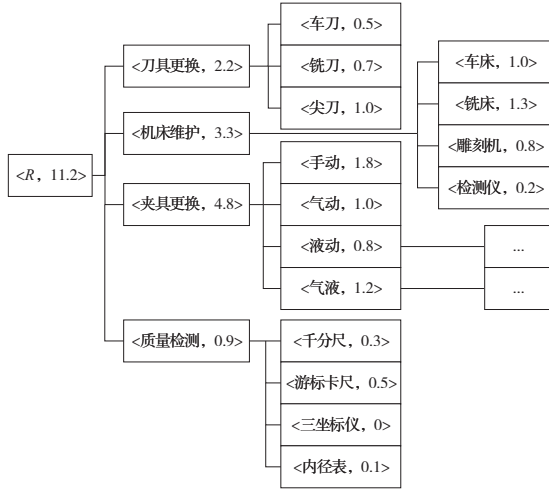


图1 HST模型示意图

通过对比权重的高低,可以看出人员对加工任务的适合程度。但是,动态化的物联制造车间中,有时会遇到匹

配不到拥有该技能的工作人员的情况,那么可以选择具备相关技能的人员,有助于任务的执行。比如,对于气动夹具更换,如果匹配不到具备该技能的人员,则具备液动夹具更换技能的人员更适合胜任该任务,这是因为液动夹具更换和气动夹具更换属于同一项技能的子技能。

对于任意一个加工任务 $t_i \in T$, 定义这个任务的技能需求 $R_{t_i} = \{r_{t_i}(s_1), \dots, r_{t_i}(s_n)\}$, 其中 s_i 表示完成该任务所需要的技能, $r_{t_i}(s_i)$ 表示技能 s_i 在任务 t_i 中所占的百分比。技能需求 R_{t_i} 是事先由任务发布者定义, 为了限制计算复杂度, 集合的大小不超过 5, 并且该集合中每一个元素 s_i 都相互独立, 即不存在父子或者祖先关系。

本文通过定义 $m(w_i, t_i)$ 来描述工作人员 w_i 对于加工任务 t_i 的匹配度, $m(w_i, t_i)$ 的值越大, 说明该人员越适合该任务。例如, 一个任务的技能需求 $R = \{\text{车床维护}: 0.6, \text{气动夹具更换}: 0.4\}$, 可以看出车床维护和气动夹具更换对该加工任务的影响较大, 但车刀更换和手动夹具更换的技能对该任务也有间接影响, 而手动夹具更换的影响要大于车刀更换的影响, 因为夹具之间存在共性。从树的结构来看, 手动夹具更换的传播距离要比车刀更换的距离更近。因此, 在 HST 中, 本文给出 $m(w_i, t_i)$ 的计算公式为:

$$\delta_1(w_i, t_i) = \sum_{s \in R_{t_i}} r_{t_i}(s) s_{w_i}(s) \quad (1)$$

$$\delta_2(w_i, t_i) = \sum_{s \in R_{t_i}} r_{t_i}(s) \left(\sum_{n=1}^{d_{\text{epth}}(s)-1} \frac{\sigma^n \sum_{s' \neq f^{(n-1)}(s), s' \in c_{\text{hild}}(f^n_{\text{ather}}(s))} s_{w_i}(s')}{\|c_{\text{hild}}(f^n_{\text{ather}}(s))\| - 1} \right) \quad (2)$$

$$m(w_i, t_i) = \delta_1(w_i, t_i) + \delta_2(w_i, t_i) \quad (3)$$

式中: $\delta_1(w_i, t_i)$ 表示人员 w_i 对于任务 t_i 的技能水平影响值; $\delta_2(w_i, t_i)$ 表示人员 w_i 对于非任务 t_i 的技能水平影响值; σ 为系数, 代表两个技能的关联程度。

本文基于 Rasch 的概率模型来初始化技能水平。当系统拥有一个新员工时, 将通过技能问卷评价以及任务考察对新员工的技能进行打分, 完成该人员层次技能树模型的初始化权重。但该方式无法精准实时地反映该人员的技能水平, 因此, 本文通过反馈积分动态更新人员技能模型。人员的工作任务来源是辅助底层设备实现智能化, 故一个任务执行的优劣由设备智能体进行评判。设定一个评价积分 $\delta \in [-\tau, \tau]$, 若 $\delta < 0$, 说明机器不满意此次人员的操作, 则进一步降低人员在该技能上的权重值, 反之亦然。不管机器对任务完成的评价如何, 都会通过评价积分反馈, 并更新人员技能模型。

2 基于学习曲线的工时预估

机械设备在执行任务时, 可以根据代码控制以及加工参数预计加工时长, 但人员执行任务的工时是难以衡量和预估的, 这是因为人员的主观性以及重复任务的工作经验都会对工时产生影响。本文将基于学习曲线 (learning curve, LC) 拟合历史加工时间记录, 从而预估人员的工时。

LC 模型是 YEN M H 等^[6]通过观察随着飞机组装任务重复次数的增加和成本对应减少的规律总结出来的经验法则。学者们基于人员先验知识、人员疲劳或者遗忘模型以及机械设备参与等因素的考虑, 提出了如表 1 所示的 LC 模

型, 主要为对数线性模型、指数模型以及双曲线模型。

表1 LC模型对比

模型	数学表达式	参数个数	遗忘模型	先验知识	机械参与
两参数双曲模型	$y = k \left(\frac{x}{x+r} \right)$	2	✓	—	—
三参数双曲模型	$y = k \left(\frac{x+p}{x+p+r} \right)$	3	✓	✓	—
三参数指数模型	$y = k(1 - e^{-(x+p)/\tau})$	3	—	✓	—
恒定时间模型	$y = y_c + y_f(1 - e^{-t/\tau})$	3	—	✓	—
Wright	$y = C_1 x^b$	2	—	—	—
Plateau	$y = C + C_1 x^b$	3	—	—	—
Stanford-B	$y = C_1 (x+B)^b$	3	—	✓	—
DeJong	$y = C_1 [M + (1-M)x^b]$	3	✓	—	✓
S-Curve	$y = C_1 [M + (1-M)(x+B)^b]$	4	✓	—	✓

在实际的物联制造车间中, 同一父技能下的子技能具有相似性, 例如气动夹具更换, 如果在此前有过更换液动夹具的先验知识, 夹具的共性特征能提高该人员的工作效率。因此, 通过对比 LC 模型, 本文采用三参数双曲模型的方式, 对员工的生产效率进行拟合, 进而预估任务的工时。

不同于线性化处理求解两参数双曲模型的参数, 三参数双曲模型会造成超定问题, 故不能通过线性化手段求解参数。因此, 本文将基于遗传算法完成参数模型的求解。

遗传算法的运算流程主要分为初始化种群、双亲选

择、染色体交叉、染色体变异和终止条件判断 5 个步骤。

1) 初始化种群:为了加速迭代和出现局部最优,需要选择合适的初始化种群。通过分析参数和实际任务的完成情况,选择以秒为时间单位,因此对于 k 参数而言,表示的是最大效率,故 k 参数的取值范围为 $0 < k \leq 1.0$; p 表示人员的先验知识,该值不能为负,故限制 p 取值为 $0 \leq p \leq 10\ 000$; r 表示员工学习率,由于要考虑人员疲劳或遗忘出现的负值情况,故 r 取值为 $-10\ 000 \leq r \leq 10\ 000$ 。在定义完参数的边界后,需要对初始种群规模划分成若干个区间,针对三基因,还需通过随机排列的组合方式随机地初始化种群。

2) 双亲选择:设置一个适用度函数,并对种群中的个体进行函数值计算,同时将所有个体的适应度值求和。接着,算出每个个体的占比情况,即遗传概率 $g(X_j)$ 。生成一个随机数 r , r 的取值为 $[0, 1]$, 若满足下式的约束,则选取 X_k 为父本,重复上述操作,确定母本。

$$g(X_{k-1}) < r \leq g(X_k) \quad (4)$$

3) 染色体交叉:通过交换双亲染色体基因的部分序列而生成个体的过程。本文生产环境的染色体,主要有 3 条基因片段,交叉的操作仅局限于同种基因片段之间的交叉。定义交叉概率 P_c , 生成一个随机数 r , r 的取值为 $[0, 1]$, 若 $r < P_c$ 则发生染色体交叉。

4) 染色体变异:直接改变个体染色体基因的部分序列而产生新基因性状的过程。对于遗传算法而言,染色体变异可以避免遗传算法出现局部最优解跳出的情况,便于搜索出全局的最优解。定义变异概率 P_m , 生成一个随机数 r , r 的取值为 $[0, 1]$, 若 $r < P_m$ 则发生染色体变异。

5) 终止条件判断:受限于实际环境中的时间和资源等约束条件,需要提前设定遗传算法的终止条件,规定遗传进化到满足最优个体或者最大迭代次数后,便终止进化。

3 实验论证

3.1 人工曲线的验证实验

本文选取实际物联网制造车间中更换车床刀具和车床对刀两项人机任务,检验上述学习曲线的正确性。具体做法是对同一个人随机分派任务,记录每次人员执行任务的时间,基于遗传算法拟合出三参数双曲模型的参数,最后通过决定系数 R^2 来验证拟合结果的有效性。

本验证实验分别执行两项任务各 30 次,并随机产生任务的下放顺序,如图 2 所示,图中数字代表任务的序号,沿横向坐标递增,黑块代表更换刀具,灰色代表车床对刀。由一名人员完成这 60 次任务的执行,记录下每次任务的执行时间,并做出对应的任务耗时和任务序号的数据图,最后通过遗传算法完成参数求解。

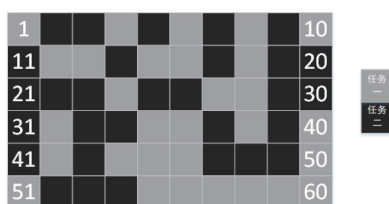


图 2 随机任务序列

本验证实验的种群规模为 100, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.16, 最大迭代数为 500。分别为任务一和任务二进行遗传算法求解, 最终得到图 3 的模型参数拟合情况。

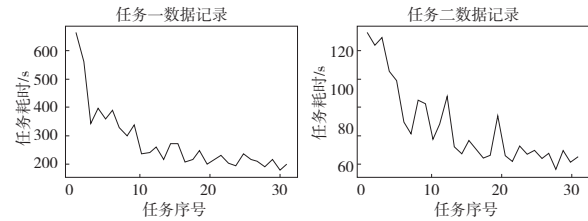


图 3 数据记录

根据数据分析,任务一和任务二都会在 400 次左右的迭代后趋于稳定。可以通过下式算出决定系数 R^2 , 结果如表 2 所示。 R^2 显示人员在执行任务时的时间消耗遵循学习曲线的特性, 因此三参数双曲模型可以为预测工时提供理论支撑。

$$R^2 = 1 - \frac{S_{SE}}{S_{ST}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

式中: y_i 表示待拟合的数据; $\bar{y}$ 表示平均值; $\hat{y}_i$ 表示拟合值。

表 2 拟合结果的决定系数

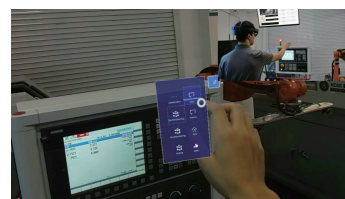
任务	决定系数
任务一	0.714 56
任务二	0.671 74

3.2 人员动态调度的验证实验

本文以物联网技术为基础搭建了人机协作的自组织自适应的物联网制造车间, 车间布局如图 4(a) 所示; 并在实际物联网制造车间中为人员佩戴了 AR 眼镜, 对人员进行指导性操作, 如图 4(b) 所示。本文为每一个工作人员建立 HST, 并结合反馈积分实时对 HST 进行权值更新, 同时通过三参数双曲线学习模型对人员的完成时间进行预测, 作为人员动态调度的依据。



(a) 物联网制造车间环境



(b) AR辅助人员

图 4 物联网制造车间部署

根据图9和图10可知,随着预紧力的不断增大,金属橡胶的静态损耗因子在逐渐减小,而耗能和割线刚度则逐渐增大。主要是因为,当预紧力不断增大时,金属橡胶内部的金属线匝的接触状态中,挤压接触状态的百分比越来越大,非接触状态和滑移接触状态的百分比越来越少,在其他影响因素相同的条件下,单次加卸载试验所需要的耗能和最大弹性势能也更大,导致刚度不断增大,同时耗能增速低于金属橡胶的最大弹性势能增速,试件的损耗因子呈现出减小的趋势。

3 结语

本文提出了一种基于金属橡胶的电梯曳引机减振器结构,克服了橡胶减振器存在的易老化、难拆装等缺点。通过金属橡胶工艺流程制备出3种不同密度的阻尼元件,考虑成型密度、压缩变形量、预紧力等因素对于阻尼元件静力学性能参数的影响而开展试验研究,得出不同的影响变化规律。后期可以根据实际电梯曳引机的减振需求,制备不同几何参数和力学性能的金属橡胶阻尼元件,从而达到更好的减振效果。

参考文献:

- [1] 张大义,夏颖,张启成,等. 金属橡胶力学性能研究进展与展望[J]. 航空动力学报,2018,33(6):1432-1445.
- [2] 曹志娟. 金属橡胶制备工艺参数对其力学性能影响研究[D]. 太原:中北大学,2021.
- [3] 白鸿柏,路纯红,曹凤利. 金属橡胶材料及工程应用[M]. 北京:科学出版社,2014:3-321.
- [4] 瞿宝,丁哲宇,吴乙万,等.金属橡胶包覆阻尼结构高温力学建模与试验[J/OL].中国机械工程;1-10.(2021-11-02)[2021-11-18]. <https://read.cnki.net/web/Journal/Article/ZGJX20211021002.html>.
- [5] 苏海洋. 金属橡胶隔振器疲劳特性试验及仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [6] 吴乙万,白鸿柏,薛新,等. 基于金属橡胶的减振基座:中国,CN208069991U[P]. 2018-11-09.
- [7] 吴乙万,白鸿柏,薛新,等. 基于金属橡胶的减振基座及工作方法:中国,CN108313252A[P]. 2018-07-24.
- [8] HU J L, DU Q, GAO J H, et al. Compressive mechanical behavior of multiple wire metal rubber[J]. Materials & Design, 2018, 140:231-240.
- [9] 高笛,马艳红,洪杰. 压缩比对金属橡胶结构和压缩力学性能影响[J]. 航空动力学报,2016,31(3):575-580.

收稿日期:2021-10-20

(上接第6页)

通过下达相同的订单,对基于层次技能模型和学习曲线的人员动态调度和普通随机的人员动态调度进行了对比实验。本次共进行了50组对比实验,如图5所示。实验表明,在考虑了多技能模型和学习曲线要素的动态调度模型后,整体的订单完成时间平均减少了25.59%,提高了物联制造车间的效率。上述实验证明了多技能模型和学习曲线模型可以作为描述人员要素的关键技术理论。

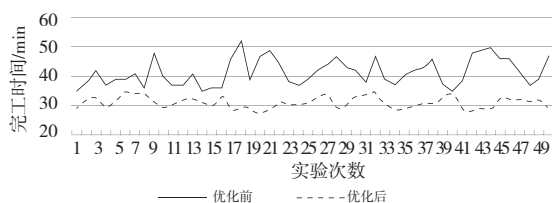


图5 实验结果数据图

4 结语

在物联制造环境下,单一机器和人员的智能都无法解决制造车间的高复杂度的事件,人机协作将成为未来物联制造的发展趋势,但人员要素难以通过数字来客观描述,进而影响整个车间的调度。

针对这些问题,本文从基于人员层次技能树模型的任务匹配度、基于学习曲线的工时预估两个方面进行了分析研究,为车间人员动态调度参数模型的客观描述提供了思路。最后,通过实验验证了本文基于层次技能模型和学习曲线对人员动态调度的有效性。

参考文献:

- [1] BOUSDEKIS A, APOSTOLOU D, MENTZAS G. A human cyber physical system framework for operator 4.0 - artificial intelligence symbiosis[J]. Manufacturing Letters, 2020, 25:10-15.
- [2] ROMERO D, BERNUS P, NORAN O, et al. The operator 4.0: human cyber-physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems[M]//IFIP Advances in Information and Communication Technology, Cham: Springer International Publishing, 2016:677-686.
- [3] ROMERO D, STAHRE J, WUEST T, et al. Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies[C]. Proceedings of the international conference on computers and industrial engineering (CIE46), Tianjin:[s.n.], 2016.
- [4] GUERIN C, RAUFFET P, CHAUVIN C, et al. Toward production operator 4.0: modelling human-machine cooperation in industry 4.0 with cognitive work analysis[J]. IFAC - Papers On Line, 2019, 52(19):73-78.
- [5] ROBINSON S, ALIFANTIS T, EDWARDS J S, et al. Knowledge-based improvement: simulation and artificial intelligence for identifying and improving human decision-making in an operations system[J]. Journal of the Operational Research Society, 2005, 56(8):912-921.
- [6] YEN M H, KIU K T, CHANG T C. Learning curve of stapled hemorrhoidopexy[J]. Asian Journal of Surgery, 2021, 44(5):786-787.

收稿日期:2021-11-10