

可重组制造系统的对称优化配置方法研究

汪仕男^{1,2}, 鲁玉军^{1†}

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江理工大学龙港研究院, 浙江 温州 325802)

摘要:在当前个性化和定制化制造需求以及频繁变动的市场环境中,传统制造系统由于高昂投资、漫长规划周期和低灵活性已无法满足现代生产需求。可重构制造系统(Reconfigurable Manufacturing System, RMS)凭借独特可重构特性,能快速调整生产功能和能力,以敏捷响应市场需求变化,推出适应制造需求的产品。然而,系统设备布局规划一直是RMS研究的关键技术。本文在现有设备资源条件下采用对称配置方法,通过系统循环平衡条件筛选不合理配置。应用模糊综合评判法,在多方面要素基础上优化配置,得出可行最优系统设备布局规划。提出的优化配置方法为解决制造系统布局规划问题提供了参考方案。结果表明,所提出方法在有效利用制造资源前提下,使制造系统能快速响应需求变化。

关键词:可重构制造系统;设备布局;设备重构;模糊综合评价法

中图分类号:TP164

文献标识码:A

Research on Symmetrical Optimization Configuration Method for Reconfigurable Manufacturing Systems

WANG Shinan^{1,2}, LU Yujun^{1†}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. Longgang Research Institute of Zhejiang Sci-Tech University, Wenzhou, Zhejiang 325802, China)

Abstract: In the current context of personalized and customized manufacturing demands, along with the ever-changing market environment, traditional manufacturing systems fall short due to their high investment costs, lengthy planning cycles, and limited flexibility. Reconfigurable manufacturing systems (RMS), with their unique reconfigurable characteristics, can swiftly adjust production functions and capabilities to respond agilely to market demand changes, introducing products that meet manufacturing needs. However, the layout planning of system equipment has always been a crucial aspect of RMS research. This paper, under the condition of existing equipment resources, employs a symmetric configuration method to provide layout schemes. Through the application of the cyclic balance condition within the system, impractical configurations are filtered out. Utilizing a fuzzy comprehensive evaluation method and optimizing the layout based on various factors, a feasible and optimal plan for system equipment layout is obtained. The proposed optimized configuration method offers a reference solution for addressing issues in manufacturing systems. Research results indicate that the suggested approach, while effectively utilizing manufacturing resources, enables manufacturing systems to respond swiftly to changes in demand.

Key words: reconfigurable manufacturing system; equipment layout; equipment reconstruction; fuzzy comprehensive evaluation method

随着互联网的进步和科技的发展,产品市场日益国际化,消费者有更多选择。企业不仅要满足消费者对定制产品的需求,还要应对公司间和供应链间的激烈竞争,可持续制造和定制需求加剧了竞争和市场变化。为了应对上述问题,企业正试图通过修改生产硬件的物理、组织和 IT 特性来配置更加灵活和敏捷的制造系统,同时延长制造系统的生命周期^[1]。简而言之,这样的制造系统应具有足够的物理和逻辑的灵活性,能够根据被加工对象的特点,方便、高效、低成本地改变系统的布局、控制结构、制造过程和生产批量等^[2]。

作为一种新型的制造系统,可重组制造系统能适应市场的需求变化和个性化生产等生产环境的变化并按系统规划的要求以重排、重复利用、革新组元或子系统的方式快速调整制造过程、制造功能和制造能力^[3],设备布局重构配置方案优化程度与系统的生产效率和响应速度直接挂钩。Singh 等^[4]针对 RMS 特性,确定了五种机器布局:开放式、环形、单行、多行和以机器人中心布局,这些布局有助于提高生产效率和系统利用率。在处理新一代工厂布局设计时,Benjaafar 等^[5]提出了两大策略:一是开发稳定的布局以应对多个制造周期,二是设计灵活的布局以快速适应生产需求变化,降低转换成本并提高生产效率。设备布局是 RMS 设计中的关键步骤,Bortolini 等^[6]提出尽管可重组制造系统的概念早在 1999 年就已出现,但在可重构制造系统的布局问题与设计的集成方面,现有的研究仍然存在不足。

为了使可重构制造系统对市场需求具有快速适应性,系统重构布局是必须解决的关键问题^[7]。可重构制造系统的配置设计方法基于生产零件的产线成本、加工时间、材料运输等因素快速设计、快速调整、快速筛选,建立可重构制造系统配置设计模型,设计可重构制造系统多种配置方案之间的评价优化选择方法,实现可重构制造系统组态重构、生产率和成本的对立统一,提供企业实现设备合理重构布局与快速响应市场需求方法选项^[8],最终解决系统重构布局的问题。

本文研究了可重组制造系统的对称优化配置方法。在现有系统设备资源的条件下,利用对称配置方法提供配置方案,应用系统的循环平衡条件筛选不合理配置方案。通过模糊综合评判法综合多方面要素优化配置,得出可行最优的系统设备布局

规划。该方法有效利用制造资源,使制造系统能快速响应制造需求的变化。

1 系统的配置方案

1.1 对称配置与非对称配置

系统以及系统中的设备排列组合构型方式众多,根据系统排列的对称性,系统的排列构型可以分为对称型或非对称型。判断系统配置是否为对称型的标准如下:

(1)生产设备的布局能画出对称轴;

(2)若有分支,每条分支上的设备数量需要相同;

(3)设备与设备之间连接方式不同配置类型不同。

如图 1 所示,每一个方框代表一台加工设备,箭头的方向代表了工件的流动方向,同时纵向排列对齐的设备表示在加工环节中处于同一个阶段,整个流程图也代表着一个加工系统的配置方案。

以 4 台设备举例,共有 13 种配置方案,其中包含 8 种对称配置,5 种非对称配置,配置(j)虽然是对称的并且能画出对称轴,但是(j)中在同一加工阶段内不同分支上所包含设备数量不同。配置(d)和(e)虽然在设备配置上是相同的,但相同的范围仅限在空间上。由于设备之间的连接方式不同,(d)中为两条分支并行,(e)中在阶段 1、阶段 2 之间有交叉耦合,这表示物料处理系统不同。配置(i)为单线排列,所以和普通的流水线生产相似,也不能作为对称配置。

1.2 采用对称配置的原因

(1)工艺方案繁杂,非对称配置系统相较于对称配置系统更为复杂。如图 2(a)所示,采用不同工艺方案可能导致零件质量问题和复杂的质量检测,因此工艺设计人员通常不会为同一零件设计多个工艺方案。

(2)产线输入输出平衡困难,图 2(b)所示系统中不同设备类型执行相同任务可能导致难以平衡整条产线的生产效率。阶段 1 由于采用了不同的设备,在该阶段中设备 B 必须是设备 A 加工效率的两倍,这样才可以实现产线输入输出平衡。设备效率差异会引起资源浪费或复杂化其他加工路径的输入输出平衡,尤其在同一阶段设备数量增多时,系统设计人员需不应考虑。

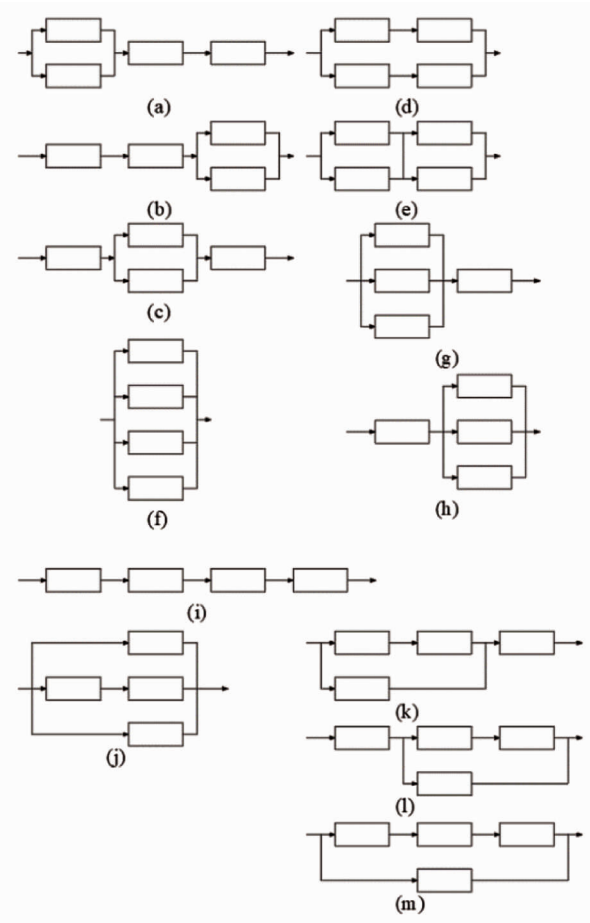


图 1 四台设备的系统配置方案

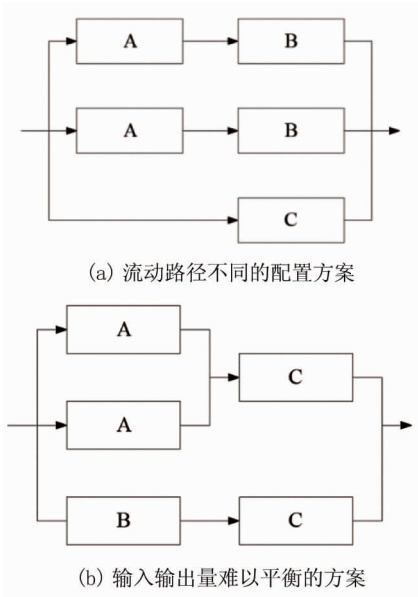


图 2 两种非对称的系统配置方案

由此可见,在实际生产中,设计人员应该优先选择考虑对称配置。对称配置可以分为多线列并联、多线列耦合并联以及前两种配置的混合型。

多线列并联是将多条串联的加工设备并联起来,如图 3(a)所示,每个单一的串联线列都是一个单元组。单元组彼此之间互不连通,若在某个单元组中有一台设备发生故障,整个单元组都将处于空载状态。

多线列耦合并联在多线列并联的基础上每个阶段后都有交叉耦合,如图 3(b)所示,即使有一台设备发生故障,整个系统仍能保证其余设备正常负载运转。任意阶段 i 中的任何机器上的代加工零件都可以转移至阶段 $(i+1)$ 中的任何机器上继续加工,每个阶段的所有机器和操作都是相同的^[6]。这种构型的方法被 KOREN 等^[9]称为 RMS 构型。混合型为前两种类型的组合,仅在部分阶段交界处有耦合,如图 3(c)所示。

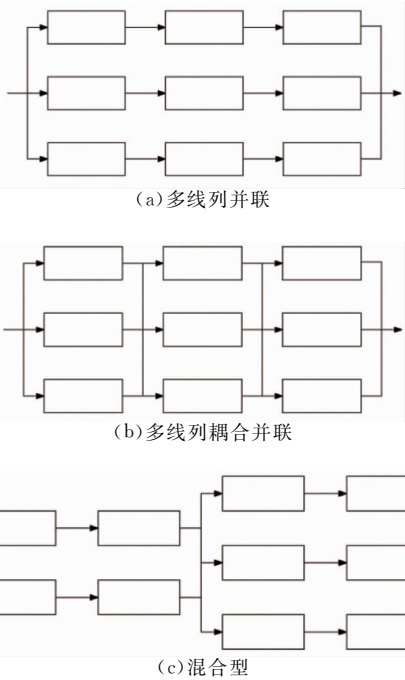


图 3 三种不同类型的对称配置

2 系统配置数量的计算

依据订单需求设计一条 RMS 产线,首先要确认当前生产方案所需要的最少加工设备数量 N 。由于按照实际生产情况下加工零件的时间会因为设备工况、设备条件有一定的差异,所以在理想条件下零件的加工时间是固定的,可根据单日产量指标 $M(\text{个}/\text{d})$,每个零件的预计总加工时间 $t(\text{min}/\text{个})$ 以及设备每天的工作时间 $T(\text{min})$ 计算,详见

式(1)。

$$N = \frac{M \times t}{T}$$

(1)

若考虑每台设备的可靠性,保证设备出现故障时产量仍能达标,可采用式(2)计算。

$$N = \frac{M \times t}{T \times R}$$

(2)

其中, $R(\%)$ 为生产设备的可靠性,式(1)、式(2)计算出的设备数量必须向上取整。

N 台设备的连接方式众多,可以排列在串行线中,亦可排列在并行线上或是在串并联线上。随着设备数量的增加,系统产线配置数量呈指数增加。

2.1 利用帕斯卡三角计算对称配置的数量

得到所需最少加工设备数量 N 后,排列组合方式产生的系统产线配置中包含了对称配置方案和非对称配置方案。由于设备对称配置在各个阶段,各个分支的设备数量的固定性,可以通过式(3)计算出对称配置的数量:

$$Y = \sum_{m=1}^N C_{m-1}^{N-1} = 2^{N-1}$$

(3)

其中, Y 是配置方案的数量, N 是设备数量, m 是加工阶段数量。

$$Y = \frac{(N-1)!}{(N-m)!(m-1)!}$$

(4)

对于任意 N 和 m ,根据上两式得出的结果用三角形形式排列,可得出设备数和阶段数相关的帕斯卡三角,见表 1。

表 1 计算系统配置数量的帕斯卡三角

		阶段数 m								
		1	2	3	4	5	6	7	8	Y
机 器 设 备 数 量 N	1	1								1
	2	1	1							2
	3	1	2	1						4
	4	1	3	3	1					8
	5	1	4	6	4	1				16
	6	1	5	10	10	5	1			32
	7	1	6	15	20	15	6	1		64
	8	1	7	21	35	35	21	7	1	128

根据表 1,可以快速查到使用 N 台设备分为 m 个阶段条件下制造系统的配置种类的数量。例如对于 $N=8$ 台机器,式(3)得出总共 $Y=128$ 个配

置,如果排列在恰好 6 个阶段,根据式(4)计算可以产生 $Y=21$ 个对称配置方案,也可以直接查表 1 得到 $Y=21$ 。

3 系统设计实例

一个毛坯件或半成品件成为成品一般会经历铣削、车削、钻孔、攻丝、刨削、磨削等多种加工方式。为了简单起见,简化示例取一个仅有 3 个加工面:FACE1、FACE2、FACE3 的工件,且仅设置加工 $F_1, F_2, \dots, F_6$ 等 6 个加工工序,其中 F_1 属于加工面 FACE1, F_2, F_3, F_4 属于加工面 FACE2, F_5, F_6 属于加工面 FACE3,每个面使用不同的夹具。加工工序可以在保证顺序的前提下拆分在不同的加工设备上进行加工。各个加工工序所需要的加工工时如表 2 所示。

表 2 加工工时表

加工面	工序	预估工时/min	总和/min
FACE1	F_1	3.7	3.7
	F_2	2.9	
FACE2	F_3	6.1	12.3
	F_4	3.3	
FACE3	F_5	2.8	9
	F_6	6.2	
			25

3.1 以系统循环时间作为约束筛选配置方案

所以当前要解决的问题就是设计一个加工系统,满足当日产量 $M=300$ (个/d),包含 6 个加工工序,每个零件的总工时最多为 $t=25$ min。机器每天的工作时间设定为 1000 min。通过式(1)可以计算出所需要的最少加工设备的数量:

$$N = \frac{300 \times 25}{1000}$$

(5)

当最少的加工设备为 8 台时,查表 1 可得有 128 种对称配置,显然一个一个地去比较 128 种配置方案是不现实的,还需要进一步的筛选。此时可以依据加工面进行整个加工系统的拆分,按照加工面的不同将总系统拆分为三个独立的子系统:S1、S2、S3。

对于子系统 S1 每个零件的总工时最多为 3.7 min,则可以根据式(1)计算出 FACE1 所需要的机器数量为 $N=2$ 。

$$N = \frac{300 \times 3.7}{1000} = 1.11 \Rightarrow 2 \text{ 台} \tag{6}$$

同理可以计算出子系统 S2,FACE2 所需要的机器数量：

$$N = \frac{300 \times 12.3}{1000} = 3.69 \Rightarrow 4 \text{ 台} \tag{7}$$

子系统 S3,FACE3 所需要的机器数量：

$$N = \frac{300 \times 9}{1000} = 2.7 \Rightarrow 3 \text{ 台} \tag{8}$$

分别查表 2 可以得知各子系统的配置可能数量分别为： $Y_1=1$ 、 $Y_2=1+3+3=7$ 、 $Y_3=1+2=3$ 。总系统的配置数量 $Y=Y_1 \times Y_2 \times Y_3=1 \times 7 \times 3=21$ ，而不是 128 种。

式(1)中计算机器数的公式是基于一个完全平衡的系统且每个工序加工所需要的时间也都是预估的最长时间，因此上述的 21 个可能的配置并不一定都是平衡的，其中几个配置方案无法满足每天 300 个零件的需求。接下来要做的是找出不能满足需求的配置方案并将之排除。

最大系统循环时间是指在当日产量指标 M 、机器每日工作总时长 T ，所需要的最大时间，要求出最大的系统循环时间 $M=1000/t_{\max}=300$ ，其中 $t_{\max}=3.33 \text{ min}$ 。最大系统循环时间将作为约束条件筛选不平衡的系统配置。

当总系统阶段数 $m=3$ 时，即三个子系统 S1、S2、S3 的阶段数都仅能为 1，在这种情况下有且只有一种配置方案。此时这种配置方案下各个子系统的工序不需要进行拆分，如图 4 所示。在阶段 1 中，有两台机器有 1.85 min 可以完成一个零件的加工；在阶段 2 中有四台机器，每 3.075 min 可以完成一个零件的加工；在阶段 3 中每 3 min 可以完成一个零件的加工，在该配置方案中瓶颈阶段为第二阶段，因此每天的零件生产数量 $N=1000/3.075=325.2$ 个，大于产量指标 $M=300$ ，所以该配置方案是可以采纳的。

3.2 依据加工面拆分子系统

当总系统有四个阶段时有 5 种配置方案，五个阶段时有 9 种配置方案，六个阶段时有 6 种配置方案。在这些配置方案的基础上还要进行工序拆分和组合，计算对比所有配置工作量巨大。但可以按照加工面拆分成三个子系统，分别进行核验，因为系统中只要有一个加工面的配置不满足系统的约束条件则剩余两个环节无论如何搭配组合都不能满足约束条件。

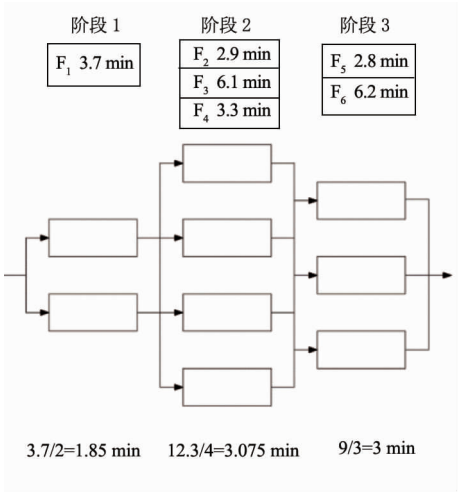


图 4 $m=3$ 时的系统配置方案

子系统 S1 只有一种配置方案，该方案如图 4 阶段 1(a)所示。

子系统 S2 有四台加工设备需要进行 3 道加工工序。在子系统 S2 中有 7 种设备配置方案，对应的加工工序有 3 种拆分方式。当子系统 S2 阶段数为 1 时，系统满足约束条件的设计方案只有一种如图 4 中阶段 2(b)所示。阶段数为 2 时加工工序的拆分方式有 2 种，加工设备的排布方式有 3 种，图 5(d)、(e)两种排布方式对于加工工序和加工设备的组合计算系统平衡无影响，所以合并为一种，总共 6 个系统设计方案，如图 5 所示。在这 6 种情况下，只有两个配置方案满足 $t_{\max} \leq t_{\max}=3.33 \text{ min}$ 的系统最大循环时间的约束条件，分别为图 5(a)、(f)，系统配置方案中深色部分表示超过 $t_{\max}$ 的系统环节。阶段数为 3 时，加工工序拆分方式有 1 种，系统配置方案有 3 种，共有 3 种系统设计方案，如图 6 所示，在这 3 种情况下，只有 1 个系统配置方案满足 $t_{\max} \leq t_{\max}=3.3 \text{ min}$ 的系统最大循环时间的约束条件，为图 6(b)。所以子系统 S2 中满足约束条件的系统设计方案总共有 4 种，分别为图 4 阶段 2(b)，图 5(a)、(f)，图 6(b)。

同理在子系统 S3 中可以得出满足约束条件的系统设计方案有 2 种分别为图 4 阶段 3(c)、图 7 (b)。

当确定了三个子系统满足系统平衡约束条件的系统设计方案后，对三个子系统所有可行方案组合可以算出最终配置方案有种，分别将这八种方案进行编号，如表 3 所示。

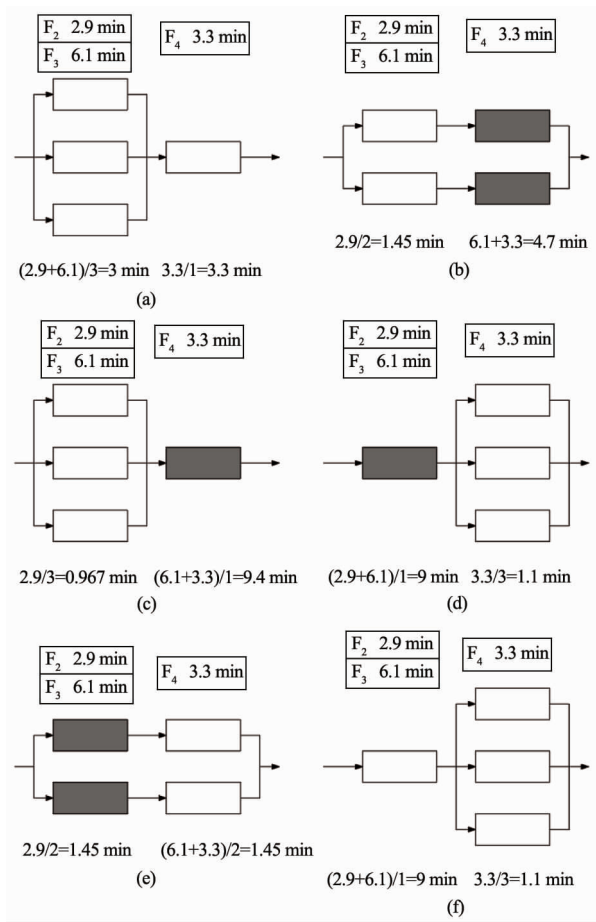


图 5 阶段数为 2 时子系统 S2 的配置方案

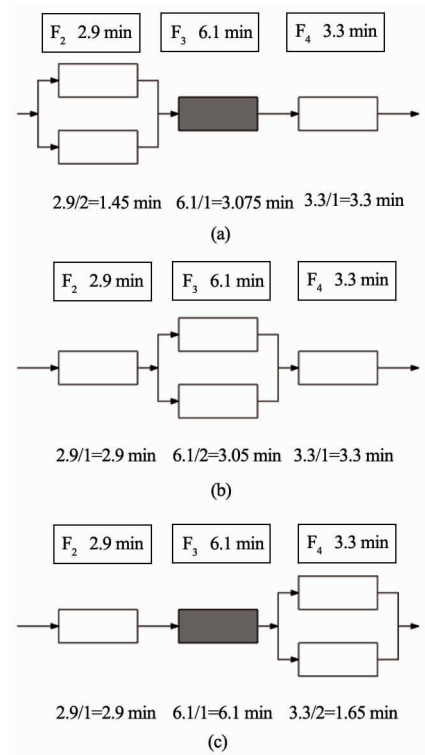


图 6 阶段数为 3 时子系统 S2 的配置方案

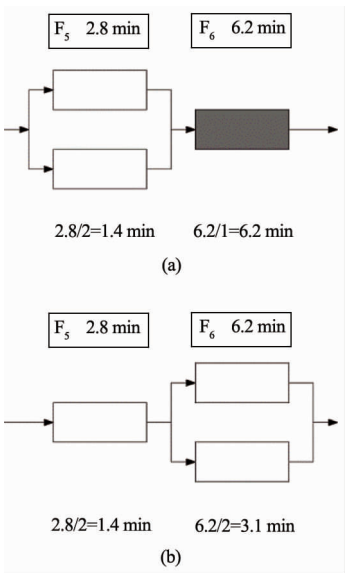


图 7 阶段数为 2 时子系统 S3 的配置方案

表 3 8 种子系统设计方案 的组合

编号	设备的组态构成
P1	图 4(a),图 4(b),图 4(c)
P2	图 4(a),图 4(b),图 7(b)
P3	图 4(a),图 5(a),图 4(c)
P4	图 4(a),图 5(a),图 7(b)
P5	图 4(a),图 5(f),图 4(c)
P6	图 4(a),图 5(f),图 7(b)
P7	图 4(a),图 6(b),图 4(c)
P8	图 4(a),图 6(b),图 7(b)

3.3 应用层次分析法确定评价指标的一致性

每个设备在零件生产过程中所花费的时间、生产成本、产品产出质量以及设备的可靠性都是不同的。要应用层次分析法构建评价矩阵,首先要将工件、工序的加工耗时 Q_1 (min)、生产成本 Q_2 (元/个)、加工质量 Q_3 (次品数/1000)、设备可靠性即故障时间 Q_4 (h/kh)、阶段数 Q_5 (个)这 5 个指标进行两两比较,并依据指标的评判的量化标准表构成的评价矩阵, $Q=(q_{ij})$, $i=1,2,3,4,5$, $j=1,2,3,4,5$ 。采用几何平均法(方根法),求出评价矩阵 Q 的特征向量 W 。

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n q_{ij}} / \left(\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n q_{ij}} \right) \tag{9}$$

其中, n 为评价指标数量, $n=5$ 。

计算结果为 $W=(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)=(0.458, 0.246, 0.160, 0.101, 0.035)$,将结果代入式(10)求出最大的特征根 $\lambda_{\max}$:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n q_{ij} \omega_j}{\omega_i} \tag{10}$$

同理,当 $n=5$ 时, $\lambda_{\max}=6.903$ 。最后将上述数据代入式(11)进行一致性检验,并用一致性比例 CR 表示。

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \times \frac{1}{RI} \tag{11}$$

通过查阅随机一致性 RI 表得到,当阶数 $n=5$ 时, $RI=1.12$,一致性比例 $CR=0.0506$ 。上述指标被接受的条件是评价矩阵 Q 的一致性比例 $CR<0.1$ 。当满足上述条件时认为评价矩阵有满意的一致性,且上述计算的相对重要度是可以被接受的。

3.4 模糊综合评价法

常用的评判方法有秩和比(RSR)综合评价法、TOPSIS 法、模糊综合评判法,三者都适用于解决多目标决策问题。但秩和比综合评价法通过秩替代原始指标值,会损失部分信息,不容易对各个指标进行恰当的编秩。当 RSR 值不满足正态分布时,分档归类的结果与实际情况会有偏差。而 TOPSIS 法对数据要求较高,需要满足一定的分布规律。

模糊综合评判法是一种多准则决策分析方法,其优势在于能够综合考虑多个因素,并处理各种不确定性和模糊性。模糊综合评判法主要有以下几个优势:

(1) 综合多因素:设备配置需全面考虑多方面因素。模糊综合评判法能同时评估定量和定性因素,更全面地评价事物的利弊。

(2) 处理不确定性和模糊性:可应对市场影响下生产数据的不确定性和评价指标的模糊性,有效处理数据不准确、信息不足等问题,提供相对合理的综合评价。

(4) 决策支持:模糊综合评判法为决策者提供科学决策依据,帮助更好地理解 and 应对复杂问题,做出明智决策。

总之,模糊综合评判法能够综合考虑多个因素,处理各种不确定性和模糊性,为决策者提供科学的决策支持,是解决复杂问题的有效方法,适用于求解可重构制造系统的最优配置方案。

3.5 基于模糊综合评判法的方案优化

运用模糊综合评判法选出 8 种配置方案之中的最优解,确定该加工零件的资源配置方案评价矩阵 R 。矩阵中的数据来源于表 4 中的统计值或经验值。

$$\text{加工时间} = \sum_{i=1}^m \frac{\sum \text{工序工时}}{\text{机床数}} \tag{12}$$

$$\text{成本} = \sum_{i=1}^m (\sum \text{工序加工成本} \times \text{机床数}) \tag{13}$$

$$\text{加工质量} = \sum_{i=1}^m (\sum \text{次品数} \times \text{机床数}) \tag{14}$$

$$\text{故障时间} = \sum_{i=1}^m \frac{\sum \text{故障时间}}{\text{机床数}} \tag{15}$$

$$\text{物流次数} = \text{阶段数 } m \tag{16}$$

这些数据导入上式后将构成零件加工配置方案的评价矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 7.9 & 150 & 40.7 & 0.9 & 3 \\ 10.8 & 119 & 34.1 & 1.4 & 4 \\ 11.2 & 119 & 28.4 & 1.4 & 4 \\ 14.1 & 88 & 21.8 & 1.8 & 5 \\ 10.9 & 101 & 32.8 & 1.6 & 4 \\ 13.8 & 70 & 26.2 & 2.0 & 5 \\ 14.1 & 88 & 24.3 & 2.0 & 5 \\ 17.0 & 57 & 17.7 & 2.5 & 6 \end{bmatrix}^T \tag{17}$$

表 4 零件的生产指标

	$Q_1 /$ min	Q_2 /(元/个)	$Q_3 /$ (次品数/1000)	$Q_4 /$ (h/kh)
F_1	3.7	4	1.6	0.3
F_2	2.9	13.5	0.8	0.7
F_3	6.1	4	2.5	1
F_4	3.3	4.5	3	0.4
F_5	2.8	13	2.5	0.6
F_6	6.2	5	1.6	0.2

对评价矩阵 R 按式(18)归一化处理得到归一化矩阵 R^* :

$$R^* = \begin{cases} (r_{ij}^*) = \frac{r_{ij}}{\sum_{z=1}^n r_{iz}} \\ \sum_{j=1}^n r_{ij}^* = 1 \end{cases} \tag{18}$$

$$R^* = \begin{bmatrix} 0.0795 & 0.1894 & 0.1801 & 0.0693 & 0.0833 \\ 0.1086 & 0.1503 & 0.1509 & 0.1012 & 0.1111 \\ 0.1118 & 0.1503 & 0.1257 & 0.1018 & 0.1111 \\ 0.1409 & 0.1111 & 0.0965 & 0.1337 & 0.1389 \\ 0.1091 & 0.1275 & 0.1451 & 0.1166 & 0.1111 \\ 0.1382 & 0.0884 & 0.1159 & 0.1485 & 0.1389 \\ 0.1414 & 0.1111 & 0.1075 & 0.1485 & 0.1389 \\ 0.1705 & 0.0720 & 0.0783 & 0.1804 & 0.1667 \end{bmatrix}^T \tag{19}$$

计算零件加工工序系统配置方案的综合评价向量 $B=W \times R^* = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8) =$

(0.12172,0.12494,0.12244,0.12566,0.12025,0.12345,0.12915,0.13237)。 B 中最小值 $b_{\min}=b_5=0.12025$,所以系统配置方案中最优的配置方案为 b_5 对应的配置方案 P5,将综合评价值按照大小顺序排列可以得到上述八种配置方案的优劣排序如表 5 所示。

表 5 系统配置方案排序		
编号	综合评价值	子系统组态构成
P5	0.120252189	图 4(a),图 4(b),图 4(c)
P1	0.121721363	图 4(a),图 4(b),图 7(b)
P3	0.122443397	图 4(a),图 5(a),图 4(c)
P6	0.123467024	图 4(a),图 5(a),图 7(b)
P2	0.124936198	图 4(a),图 5(f),图 4(c)
P4	0.125658232	图 4(a),图 5(f),图 7(b)
P7	0.129153381	图 4(a),图 6(b),图 4(c)
P8	0.132368216	图 4(a),图 6(b),图 7(b)

采用 TOPSIS 评价法计算结果综合评价值最优解为 $b_5=0.57429362$,RSR 评价计算结果得出最优解为 $b_8=0.50597182$ 。显然采用模糊综合评判法得出的结果数值最小最宜采纳。再者模糊综合评判法柔性的权重指标设置可以随着生产目标、战略重心、市场行情而进行调整,这是其他两种方法做不到的。最后由于模糊综合评价法计算相对简单,当生产指标增加,数据增加数据分析需求和需要的计算资源也相对少。

方案排序取决于制造系统设计师或制造商依据情况赋予不同指标(成本、质量、加工时间等)的权重。在深入理解和分析业务需求、生产能力、市场定位以及客户期望后,最终选择适合的资源配置方案。

4 结 论

企业为应对快速变化的市场,离不开 RMS 进行设备资源的快速配置和重构。这一过程涉及成本、时间、质量和加工工序等多方面的约束和影响。通过对称配置设备、计算配置种类数量、系统循环

平衡条件筛选并结合模糊综合评判法,可以选出满足市场需求的最优资源配置方案。实例验证表明,该方案能有效实现满足市场变化企业需求的可重组制造系统的设备资源配置。

可重组制造系统具有巨大的潜力,以其出色的时间成本效益应对不断变化且竞争激烈的市场环境已成为现代制造企业的核心竞争力。未来,技术的不断创新将为 RMS 提供更多的可能性,如智能制造、物联网、大数据等技术的应用将进一步提高其生产效率和灵活性。目前面向 RMS 配置方案研究方兴未艾,结合本文关于 RMS 配置方案研究,作者认为在以下几方面有进一步的优化空间:本文方案只对系统层面的配置布局规划方法进行了研究,可以细化至可重构机床设备层;基于设备使用率和系统生产能力的角度出发,进一步优化布局方案;利用智能算法优化布局设计,提高工作效率等。

参考文献

[1] BEHDIN V, REZA T, ZDENEK H, et al. Workforce planning and production scheduling in a reconfigurable manufacturing system facing the COVID-19 pandemic[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022;63:563—574.

[2] 祁国宁,顾新建,杨青海,等. 大批量定制原理及关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统—CIMS,2003(9):776—783.

[3] 周军,刘战强,邓建新,等. 可重组制造系统及其关键技术[J]. 山东大学学报(工学版),2003(5):477—481.

[4] SINGH P S, SHARMA K R R. A review of different approaches to the facility layout problems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30 (5—6):425—433.

[5] BENJAARAFAR S, HERAGU S S, IRANI A S. Next generation factory layouts: research challenges and recent progress [J]. Interfaces,2002,32(6):58—76.

[6] BORTOLINI M, GALIZIA G F, MORA C. Reconfigurable manufacturing systems: literature review and research trend [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018,49:93—106.

[7] 赵中敏. 可重构制造系统的优化布局配置研究[J]. 精密制造与自动化,2019(4):19—21+33.

[8] 刘文科. 可重构制造系统组态重构优化方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.

[9] KOREN Y, SHPITALNI M. Design of reconfigurable manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2011,29(4):130—141.