

云制造环境下的演化博弈公差分配方法

李海虹¹, 孙红^{1,2}, 陈志恢³, 刘志奇¹

(1. 太原科技大学机械工程学院, 030024, 太原; 2. 山西平阳重工机械有限责任公司, 043000, 山西侯马;
3. 太原重工股份有限公司起重机分公司, 030024, 太原)

摘要: 针对云制造环境下复杂多样的制造资源对产品装配尺寸链公差分配的影响,提出了一种基于演化博弈的公差分配方法。首先以同属一个尺寸链中的各公差单元为博弈方,综合考虑公差设计方案的质量损失和资源价格两方面,将装配质量要求和成本转换为公差单元选择制造资源后的总支付,以公差单元对资源的选择为博弈策略,建立演化博弈模型;然后,构造模型的复制动力学方程,模拟不同用户的策略适应过程;最后,运用 Lyapunov 第二方法证明该模型能够收敛至演化均衡,并利用分布式迭代算法进行求解。以车身前端装配总成公差分配设计为例,验证该模型及算法的可行性与有效性,实验结果表明:质量损失系数对资源选择策略无影响,但会影响总支付;所提演化博弈方法与非合作博弈方法、线性加权方法相比,可降低公差分配方案的质量损失及总支付,平均降低了 28.3%~54.0%和 18.2%~63.6%。将该演化博弈方法应用于装配尺寸链公差分配设计,实现了云制造环境下依据公差设计进行制造资源的选择。

关键词: 公差分配;演化博弈;演化均衡;分布式迭代算法;云制造

中图分类号: TH124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202108021 **文章编号:** 0253-987X(2021)08-0175-08



OSID 码

A Tolerance Allocation Method Based on Evolutionary Game in Cloud Manufacturing

LI Haihong¹, SUN Hong^{1,2}, CHEN Zhihui³, LIU Zhiqi¹

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Shanxi Pingyang Heavy Industry Machinery Co. Ltd., Houma, Shanxi 043000, China;
3. Crane Branch of Taiyuan Heavy Industry Co. Ltd., Taiyuan 030024, China)

Abstract: A tolerance allocation method based on evolutionary game is proposed to solve the influence of complex and diverse manufacturing resources on the tolerance allocation of product assembly dimension chain in cloud manufacturing (CMfg). Firstly, all tolerance elements in the same dimension chain are taken as the game parties, and an evolutionary game model is established with the selection of manufacturing resources. The game strategy comprehensively considers the quality loss and the resource price of the tolerance design scheme, and the assembly quality requirements and cost are converted into the total payment benefit after the selection of manufacturing resources by the tolerance element. Secondly, a replication dynamics equation of the model is constructed to simulate the strategy adaptation process of different users. Finally, the Lyapunov's second method is used to prove the convergence of the model to evolutionary equilibrium, and the distributed iterative algorithm is used to find its solution. The feasibility and

effectiveness of the model and algorithm are verified by a tolerance design example of the front end assembly. Experimental results show that the quality loss coefficient has no effect on the resource selection strategy, but affects the total payment. Comparisons with the non-cooperative game method and the linear weighting method show that the proposed evolutionary game method reduces the quality loss and total payment of the tolerance allocation scheme by 28.3% to 54.0% and 18.2% to 63.6% on average, respectively. The proposed method can be applied to the tolerance allocation design of assembly dimensional chain and to realize the selection of manufacturing resources according to tolerance design in cloud manufacturing environment.

Keywords: tolerance allocation; evolutionary game theory; evolutionary equilibrium; distributed iterative algorithm; cloud manufacturing

机械制造中,合理制定公差分配方案有利于降低机械装配体的直接制造成本,确定有效的公差值可实现装配体质量与成本之间的平衡,然而制定合理的公差分配方案是一项艰巨的任务^[1-2]。随着云制造(CMfg)技术的不断成熟,制造资源的动态多样性使得云制造生产模式下的公差分配问题变得复杂。

近年来,研究工作多集中在基于多目标评价函数的公差分配模型的建立方面,并采用全局优化算法如人工群蜂算法(ABC)^[3-4]、带精英策略的非支配遗传算法(NSGA-II)^[5]、粒子群算法(PSO)^[6-7]等得到公差最优解。针对复杂装配问题,采用混合算法。Kumar等通过遗传算法(GA)、NSGA-II算法和差分进化(DE)算法来确定最佳公差^[8]。曲兴田等结合GA算法、PSO算法、退火模拟算法(SA)实现了复杂装配体序列的智能规划^[9]。Haghighi等提出了基于规格与置信度的AM工艺装配体尺寸公差分配方法,并采用循环优化方法进行求解^[10]。刘鹏等引入种群多样性指标构建自适应遗传算法(AGA),优化机床公差分配^[11]。以上智能算法可应用于复杂装配模型,但存在构造评价函数困难等问题。

郑丞等通过研究产品各指标间冲突关系,发现公差分配问题可视为多目标冲突下的博弈问题^[1]。针对多目标优化问题,博弈论能够更好地调和不同指标间的矛盾与冲突^[12-13],因而被引入公差分配模型研究中。郑丞等结合非合作博弈理论、联盟博弈理论解决了装配成本与质量之间的多目标决策问题,使得装配综合得益最大^[1]。Lu等建立了兼顾实际制造和装配过程的非合作博弈并行公差设计模型,采用遗传算法得出博弈纳什均衡^[14]。然而,针对云制造环境下的公差分配问题,上述博弈方法忽略了动态资源对公差分配的影响。

在云制造环境下,制造资源具有实时性、动态

性,制造资源能力作为约束条件之一,使得公差优化模型变得复杂^[15]。而上述多目标优化方法基于中央决策机制,不利于公差单元在制造资源选择方面维持其自主决策权。Wu等针对多资源供应商,建立双层博弈公差设计模型^[16],但未考虑多用户同时请求服务下的资源定价问题。

对此,本文提出了一种基于演化博弈(EG)理论的公差分配方法。首先将同属一个尺寸链中的各公差单元作为博弈方,建立具有分散决策机制的演化博弈公差分配模型,然后通过Lyapunov第二方法证明模型的稳定性,并采用分布式迭代算法求出模型均衡点。通过实例分析证明了本文模型及方法的正确性,且与非合作博弈方法、线性加权方法相比,本文演化博弈方法有效降低了公差分配方案的质量损失及总支付。

1 公差分配演化博弈模型

1.1 装配尺寸链公差分配模型

一个产品的装配需求可通过调整其装配尺寸链的各公差单元进行优化,因装配尺寸链的封闭性和相关性,同属一个尺寸链的公差单元相互连接,相互影响,相互制约,公差分配过程可视为博弈过程,如图1所示。在这一博弈过程中,各公差单元作为个体博弈的同时,又组成了一个尺寸链整体,因云制造资源的动态性,且制造资源的基准价格会随云制造系统运营情况实时调整,造成选择信息不完全,只能利用演化博弈论进行建模,考虑公差单元同时向云平台发出服务请求情况,采用线性定价模型确定资源价格,资源价格与质量损失的和构成博弈模型的支付函数。

演化博弈面向整个系统总体利益,当一个博弈者偏离系统平衡点,该博弈者收益会降低^[17]。将演化博弈理论引入到公差分配问题的描述如下。

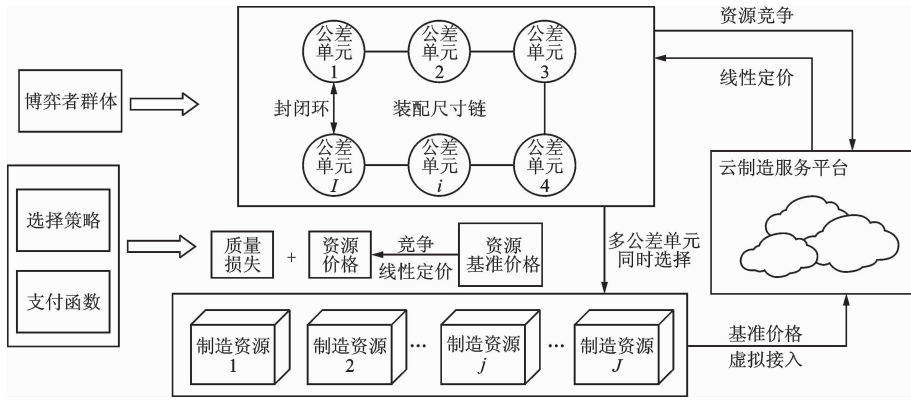


图 1 云制造资源约束下的尺寸链公差分配模型

Fig. 1 The tolerance allocation model of dimension chain under cloud manufacturing resource constraints

(1) 博弈方: 对于特定类别的制造资源服务, 可以在制造服务中选择的同属一个装配尺寸链的公差单元 $i \in I$ 。

(2) 群体: 同属一个装配尺寸链下的公差单元集合。

(3) 策略: 公差单元对制造资源的选择策略 $s_j (j = 1, 2, \dots, J)$ 。

(4) 支付: 公差单元选择制造资源的总支付, 考虑了需支付给制造资源的使用价格 P_j 及质量损失 $Q_{\text{loss}}(T_i)$ 两个部分。

用 $x(s_j)$ 表示公差设计单元选择资源 s_j 的概率, 也可理解为博弈群体中选择资源 s_j 的公差单元所占群体比例, 其中 $0 \leq x(s_j) \leq 1$ 且 $\sum_{j=1}^J x(s_j) = 1$, 公差单元选择制造资源加工完成后的零件质量越好, 其质量损失越小。由文献[18]得 T_i 的质量损失 $Q_{\text{loss}}(T_i)$ 表达式为

$$Q_{\text{loss}}(T_i) = k(T_i)^2 \quad (1)$$

式中: k 为质量损失系数; T_i 为公差单元。

当公差单元 T_i 选择资源 s_j 时, 制造资源 s_j 基准价格为 C_j 。 C_j 定义为

$$C_j = a_0 T_i^{-a_1} \quad (2)$$

式中: a_0, a_1 为模型系数。

假设云制造平台使用基于制造资源提供商基准价格的线性定价模型, 当有多个用户同时请求服务时, 会产生服务竞争, 此时请求的任务须按某种顺序排队, 云制造平台会收取更高的服务价格以更好地获利。因此, 将制造服务的价格建模设定为请求服务的用户比例的线性函数。制造资源服务 s_j 的定价模型为

$$P_j = C_j(1 + \epsilon x(s_j)) \quad (3)$$

式中: P_j 为制造资源使用价格; C_j 为制造资源 j 的

基准价格; ϵ 表示当多个公差单元选择制造资源的价格因子。

博弈模型中整个群体选择制造资源 j 的总支付 π_j 为各个公差单元选择资源 j 的支付之和, 即

$$\pi_j = \sum_{i=1}^I \pi_j(T_i) \quad (4)$$

式中: π_j 为整个尺寸链公差单元选择资源 j 的总支付; $\pi_j(T_i)$ 为 T_i 选择资源 j 的总支付。

公差优化模型中加入质量损失可以更全面地评价产品质量, 所以公差-成本模型中的成本可以表示为制造成本与质量损失之和, $\pi_j(T_i)$ 的表达式为

$$\pi_j(T_i) = Q_{\text{loss}}(T_i) + P_j(T_i) \quad (5)$$

本文公差分配模型综合考虑质量、成本两方面, 与文献[1]基于非合作博弈的优化目标一致。本文优化目标函数如下

$$\begin{aligned} \min & \begin{cases} T_0 = T_0(T_1, T_2, \dots, T_I) \\ \pi_j = \sum_{i=1}^I \pi_j(T_i) \end{cases} \\ \text{s. t.} & \begin{cases} T_{i\min} \leq T_i \leq T_{i\max} \\ \sum_{i=1}^I |\xi_i| T_i \leq T_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $T_{i\min}$ 和 $T_{i\max}$ 分别是公差设计单元 i 的公差上下限; ξ_i 为公差对最终装配需求影响的系数; T_0 表示封闭环装配需求或者称精度需求。根据式(2), 当公差单元 T_i 选择资源 j 时, 公差上下限 $T_{i\max}, T_{i\min}$ 受制造资源基准价格约束。

1.2 种群行为和复制动态

云制造系统中, 允许公差单元在可用的制造资源中进行选择, 每个单元都可以观察到其他单元的选择策略, 如果其支付效用大于整体平均效用, 它将选择另一种策略, 引起整个群体策略的改变, 即博弈的演变。策略的适应过程和种群状态演化可通过复

制动力学方程建模分析,如下所示

$$\frac{\partial x(s_j)}{\partial t} = \dot{x}(s_j) = x(s_j)(\bar{\pi} - \pi_j) \quad (7)$$

式中: $\dot{x}(s_j)$ 为公差单元选择资源 j 的概率 $x(s_j)$ 对时间 t 的偏导; $\bar{\pi}$ 为整个群体选择资源 j 的总支付,计算公式如下

$$\bar{\pi} = \sum_{j=1}^J x(s_j) \pi_j \quad (8)$$

由式(7)得, $\pi_j > \bar{\pi}_j$ 时,选择资源 j 的概率会减小,与实际情况相符。

1.3 演化均衡分析

演化均衡点被定义为复制动力学模型的稳定点。复制动力学模型的稳定点是方程极值为零的点,即复制动力学方程式(7)的求解过程中令 $\dot{x}(s_j)$ 为 0 的点,此时对应解集为稳定状态解集。

令 $\dot{x}(s_j)$ 为 0,得

$$\frac{\partial x_j}{\partial t} = \dot{x}(s_j) = x(s_j)(\bar{\pi} - \pi_j) = 0 \quad (9)$$

式(9)也可表示为

$$\pi_1, \dots, \pi_j, \dots, \pi_J = \bar{\pi} \quad (10)$$

稳定点处达到演化均衡,博弈者不会改变其策略。因此,当用户的支付效益等于平均效益时,系统达到了均衡。演化均衡状态为

$$x^* = [x^*(s_1), \dots, x^*(s_j), \dots, x^*(s_J)] \quad (11)$$

式中: $x^*(s_j)$ 为演化均衡状态下公差单元选择制造资源 s_j 的概率,或是演化均衡状态下选择制造资源 s_j 的公差单元数量所占总体数量的比率。

根据 Lyapunov 第二方法^[19],假设存在一阶连续导数的标量函数 V ,且满足以下条件:① $V(x)$ 正定;② $\dot{V}(x)$ 负定;③当 $\|x\| \rightarrow \infty$ 时, $V(x) \rightarrow \infty$ 。则系统演化均衡点是全局渐进稳定的。

定义跟踪误差

$$e_j = x^*(s_j) - x(s_j) \quad (12)$$

则 Lyapunov 函数为

$$V_j = \left(\frac{e_j}{2}\right)^2 \quad (13)$$

$V_j(x)$ 对时间 t 的一阶导数为

$$\dot{V}_j = \frac{\partial (e_j/2)^2}{\partial t} = e_j \frac{\partial (e_j)}{\partial t} = -e_j \frac{\partial (x(s_j))}{\partial t} \quad (14)$$

将式(12)、式(9)依次代入式(14),可得

$$\dot{V}_j = -x(s_j)[x^*(s_j) - x(s_j)] \left[\sum_{j=1}^J x(s_j) \pi_j - \pi_j \right] \quad (15)$$

定义制造资源 s_n 为总支付最小的制造资源,当 $x^*(s_n) > x(s_n)$ 时,有

$$\sum_{j=1}^J x(s_n) \pi_j - \pi_n = \sum_{j=1}^J x(s_j) \pi_j - \sum_{j=1}^J x(s_j) \pi_n \geq 0$$

即 $\dot{V}_j$ 负定; $V_j = \left(\frac{e_j}{2}\right)^2$ 恒为正定函数,因此,对于总支付值最小的制造资源 s_n 会演化收敛至均衡点;同理,其他资源也将收敛至均衡,所以动态系统在演化均衡点全局渐进稳定。

2 演化均衡策略求解

装配尺寸链公差分配的演化均衡可以通过公差单元对制造资源的选择策略调整来实现,所有公差单元最初都会随机选择一个策略,计算初始支付值,后与群体平均支付值进行比较,若该选择策略支付值大于群体平均支付值,则公差单元需改变其策略,在此模型中,在符合质量要求的情况下,选择支付值最小的策略,即成本优化优先于质量优化。在演化过程中,复制动态方程式(7)可表示为式(16),即复制动态更新策略如下

$$x_{s_j}(n+1) = x_{s_j}(n) + \sigma_1 x_{s_j}(n)(\bar{\pi}(n) - \pi_{s_j}(n)) \quad (16)$$

式中: n 为迭代次数; σ_1 为迭代步长;为了便于表达,将前文中 $x(s_j)$ 用 x_{s_j} 表示。迭代终止条件为

$$|\pi_j(n) - \bar{\pi}(n)| \leq \zeta_1 \quad (17)$$

式中: ζ_1 为足够小的正常量。

云制造环境下面向制造资源分配的演化博弈分布式迭代算法步骤如下:

- 步骤 1 在式(6)约束下,列出所有公差设计方案;
- 步骤 2 为其中一组公差设计单元选择一个制造资源 j 作为服务方;
- 步骤 3 随机初始化种群状态并使迭代次数 $n=1$;
- 步骤 4 获得制造资源 j 的基准价格 C_j ;
- 步骤 5 分配不同任务的优先级,根据式(3)计算每个制造资源的价格 P_j ;
- 步骤 6 由式(2)计算相应公差策略质量损失 Q_{loss} ;
- 步骤 7 由式(4)、式(5)得出资源 j 的总支付值 π_j ,然后由式(8)计算平均支付值 $\bar{\pi}$;
- 步骤 8 根据式(16)改变选择资源概率 $x_{s_j}(n)$;
- 步骤 9 令迭代次数 $n=n+1$;
- 步骤 10 重复步骤 4~步骤 9,直到式(17)所示的迭代终止条件满足。

分布式迭代算法流程如图 2 所示。利用复制动力学方程动态迭代模拟公差单元对制造资源选择策略优化过程,将每次迭代过程视为一场博弈,各博弈方不断调整自身策略以寻求自身利益最大化或支出

最小化,经博弈方之间竞争与协同,当算法收敛时,系统全局渐进稳定,得到演化均衡策略解。

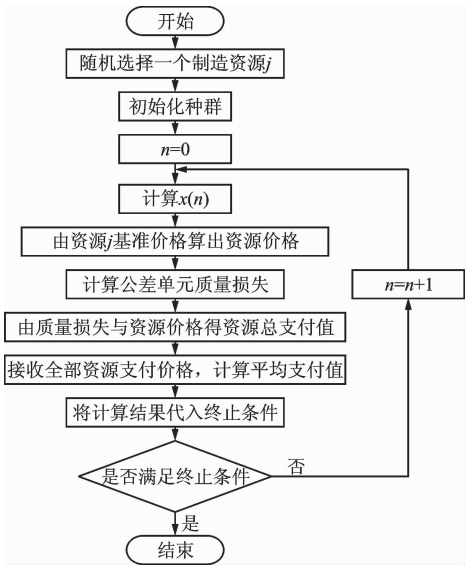


图 2 分布式迭代算法流程

Fig. 2 Flow of the distributed iterative algorithm

3 实例验证及结果分析

3.1 问题描述及参数设置

某车身前端装配结构及其尺寸链示意图如图 3^[1]所示,部件 1~4 在同一个工位上装配,左、右前大灯外板 1、2 与上、下横梁 3、4 安装孔间的基本尺寸为 $L_1=L_2=370\text{ mm}$,上横梁 3 对应安装孔间的基本尺寸 $L_3=850\text{ mm}$,各部件尺寸公差均在 $0.05\sim0.20\text{ mm}$ 内。先装配部件 1、2 和 3,需满足的约束条件为装配后部件 1、2 与 4 的安装孔横向跨距 L_0 的公差在 $0.10\sim0.30\text{ mm}$ 内,以保证下横梁 4 顺利安装。 $L_1、L_2$ 与 L_3 的夹角均为 60° ,公差为 $\pm 5'$ 。考虑云制造系统制造资源基准价格,结合装配体质量与成本要求,确定有关尺寸公差。

3.2 演化博弈求解

如图 3b 所示,装配尺寸链中组成环与封闭环基本尺寸为 $L_0、L_i(i=1,2,3)$,对应公差分别为 $T_0、T_i$,由尺寸链封闭环与组成环装配关系得

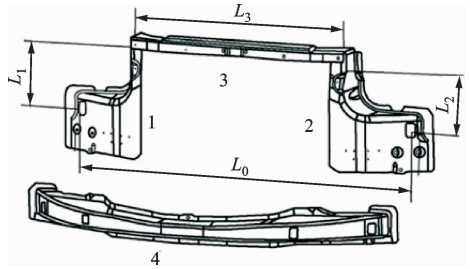
$$T_0 = \sum_{i=1}^3 |\xi_i| T_i \tag{18}$$

需满足公差约束关系为

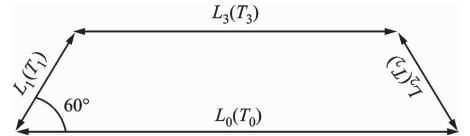
$$\begin{cases} 0.05 \leq T_i \leq 0.2, i = 1, 2, 3 \\ 0.1 \leq T_0 \leq 0.3 \end{cases} \tag{19}$$

式中: ξ_i 为传递函数; $\xi_1=\xi_2=\cos 60^\circ, \xi_3=1$ 。

假设云平台筛选后产生两个候选制造资源,为区分不同类别的制造资源实际加工情况,取两个资



1—前大灯外板(左);2—前大灯外板(右);3—上横梁;4—下横梁。
(a)装配示意图



(b)尺寸链示意图

图 3 某车身前端装配结构及尺寸链示意图

Fig. 3 A schematic diagram of the front-end assembly structure and dimensional chain of a car body

源公差-价格函数分别为 $C_1 = 0.5T^{-1.1}, C_2 = 0.19T^{-1.5}$,资源的基准价格-公差函数曲线如图 4 所示,由图可知公差为 $0.05\text{ mm}\sim0.09\text{ mm}$ 时,资源 1 成本较低, $0.09\text{ mm}\sim0.2\text{ mm}$ 区间内,资源 2 成本较低。通常情况下,公差单元质量效益越好,则制造资源加工后零件质量损失越小。质量损失函数 $Q_{\text{loss}}(T_i)$ 如式(1)所示。取价格因子 $\epsilon=I/2$,如图 3b 所示,尺寸链组成环个数为 3,因此 $\epsilon=1.5$ 。设置步长为 0.05 mm ,则每个组成环 L_i 在其公差允许范围内可分为 4 个质量等级。

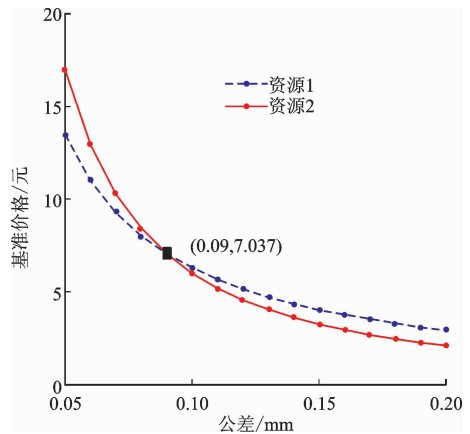


图 4 制造资源公差-价格曲线

Fig. 4 A curve of manufacturing resource tolerances vs. price

设置不同的初始公差分配值,公差分配方案共 64 种,运用分布式迭代算法模拟系统演化均衡过程,各种策略组合下均衡点处对应的支付变化曲线

如图 5 所示。由图 5 可见,随着 T_1 、 T_2 取值增大,总支付值呈下降趋势; T_1 、 T_2 保持不变, T_3 减小时,

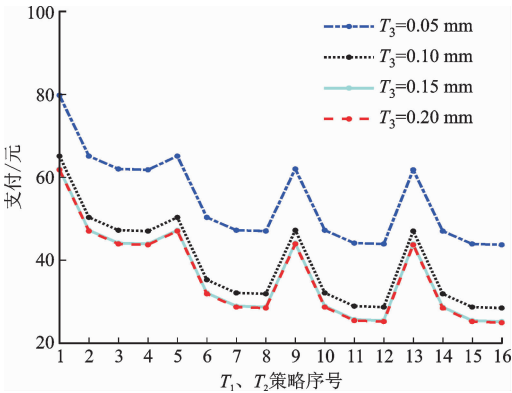


图 5 不同策略下的支付变化曲线

Fig. 5 Payment curve of different strategies

则增大,也符合图 4 中基准价格与公差负相关的规律。 T_3 为 0.05 mm 时,策略 16(T_1 、 T_2 均选取 0.2 mm)的支付值最小,与实际生产中产品质量要求越高(即较小公差),则支付较大的原则相符,进而说明了本文模型的有效性。

由式(19)装配尺寸链几何约束可知,并非所有策略均满足条件,且因 L_1 、 L_2 对封闭环 L_0 及整个装配体装配影响程度一致,因此将 L_1 及 L_2 设置为同一公差等级。

表 1 列出了符合约束条件的公差策略下的均衡点, x_{s_1} 、 x_{s_2} 为均衡点处选择资源 1 与资源 2 的概率。考虑到云制造环境下不同状态下的质量损失情况,为不失一般性,取质量损失系数 k 为 100、1 000 和 2 000 时,分析其演化博弈均衡状态。

表 1 不同公差策略下演化均衡点参数对比

Table 1 A parameter comparison of evolutionary equilibrium point under different tolerance strategies

策略 序号	公差/mm			x_{s_1}	x_{s_2}	$\pi_1 \cdot \pi_2 (\pi_1 = \pi_2) / \text{元}$		
	T_1	T_2	T_3			$k=100$	$k=1\ 000$	$k=2\ 000$
1	0.05	0.05	0.05	0.634 0	0.366 0	79.722 7	86.472 7	93.972 7
2	0.05	0.05	0.10	0.606 9	0.393 1	65.078 6	78.578 6	93.578 6
3	0.05	0.05	0.15	0.606 7	0.393 3	61.990 2	86.740 2	114.240 2
4	0.05	0.05	0.20	0.609 4	0.390 6	61.772 6	102.272 6	147.272 6
5	0.10	0.10	0.05	0.562 0	0.438 0	50.320 0	70.570 0	93.070 0
6	0.10	0.10	0.10	0.472 9	0.527 1	35.277 8	62.277 8	92.277 8
7	0.10	0.10	0.15	0.451 3	0.548 7	32.119 2	70.369 2	112.869 2
8	0.10	0.10	0.20	0.445 5	0.554 5	31.901 8	85.901 8	145.901 8
9	0.15	0.15	0.05	0.551 3	0.448 7	44.125 1	86.875 1	134.375 1
10	0.15	0.15	0.10	0.421 7	0.578 3	28.934 5	78.434 5	133.434 5
11	0.15	0.15	0.15	0.378 7	0.621 3	25.705 8	86.455 8	153.955 8
12	0.20	0.20	0.05	0.553 9	0.446 1	43.706 6	117.956 6	200.456 6
13	0.20	0.20	0.10	0.400 6	0.599 4	28.479 0	109.479 0	199.479 0

注: k 为质量损失系数;黑体数据为取相同 k 值时的最优组合。

从表 1 得, k 取 100 时,公差策略 $T=[0.15\ 0.15\ 0.15]\text{ mm}$ 对应资源 1 与资源 2 的总支付值最小,均为 25.705 8。 k 取 1 000、2 000 时,支付值最小时对应的公差策略均为 $T=[0.1\ 0.1\ 0.1]\text{ mm}$ 。 k 值大小反映公差对质量损失的影响程度,调整质量损失与资源服务价格对总支付值的影响比重,由表 1 知 k 对资源选择结果没有影响,但会影响群体总支付值。这就反映出实际生产中要根据不同产品的重要程度来决定其质量要求,选择恰当的质量损失系数,以找到合适的公差成本平衡点。

以公差策略 $T=[0.15\ 0.15\ 0.15]\text{ mm}$ 为例,模拟了 3 组不同种群初始状态下公差单元对资源选择

的演化博弈均衡过程,如图 6 所示,系统达到内部均衡状态时,不同的选择资源概率初始值 $x_{s_j}(0)$ 达到均衡点的迭代次数不一样,但不影响均衡状态,3 种初始状态下的均衡状态均为 $x_{s_1}=0.378\ 7$, $x_{s_2}=0.621\ 3$,即公差单元选择资源 2 的概率为 0.621 3,也可理解为整个公差单元群体中选择制造资源 2 的个体数量占比为 0.621 3,表明该策略下制造资源 2 比资源 1 更有优势。

3.3 公差优化方法结果分析

当质量损失系数 k 为 100 时,策略 11 的支付值最小,为 25.705 8,公差策略为 $T=[0.15\ 0.15\ 0.15]\text{ mm}$,且选择资源 1 的概率为 0.378 7,选择资

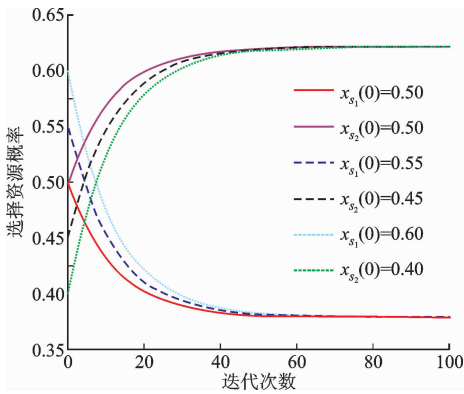


图 6 不同初始状态下的演化均衡图($x_{s_1}=0.378\ 7$)

Fig. 6 Evolutionary equilibrium diagram under different initial states ($x_{s_1}=0.378\ 7$)

源 2 的概率为 0.621 3,此时资源 2 优于资源 1; k 为 1 000、2 000 时,策略 6 的支付值最小,分别为 62.277 8、92.277 8,公差策略为 $\boldsymbol{T}=[0.1\ 0.1\ 0.1]$ mm,公差单元选择资源 1 的概率为 0.472 9,选择资源 2 的概率为 0.527 1,可知此时两个资源选择概率相差不大。

将本文提出的演化博弈方法(EGM)与非合作博弈方法(NCGM)、线性加权方法(LWM)进行对比,NCGM 策略为 $\boldsymbol{T}=[0.20\ 0.20\ 0.05]$,LWM 策略为 $\boldsymbol{T}=[0.15\ 0.15\ 0.05]$,为不失一般性,取 k 为 100、1 000、2 000,分析装配体不同状态下的公差分配情况,如表 2、表 3、表 4 所示,可知 k 为 100 时,EGM 得出的公差策略的总支付值最小,但 LWM 质

表 2 $k=100$ 时不同优化方法结果对比

Table 2 Comparison of results of different optimization methods when $k=100$

优化方法	公差/mm			T_0/mm	$\pi/\text{元}$	Q_{loss}
	T_1	T_2	T_3			
EGM	0.15	0.15	0.15	0.30	25.705 8	6.75
NCGM	0.20	0.20	0.05	0.25	43.706 6	8.25
LWM	0.15	0.15	0.05	0.20	44.125 1	4.75

表 3 $k=1\ 000$ 时不同优化方法结果对比

Table 3 Comparison of results of different optimization methods when $k=1\ 000$

优化方法	公差/mm			T_0/mm	$\pi/\text{元}$	Q_{loss}
	T_1	T_2	T_3			
EGM	0.10	0.10	0.10	0.20	62.277 8	30
NCGM	0.20	0.20	0.05	0.25	117.956 6	82.5
LWM	0.15	0.15	0.05	0.20	86.875 1	47.5

表 4 $k=2\ 000$ 时不同优化方法结果对比

Table 4 Comparison of results of different optimization methods when $k=2\ 000$

优化方法	公差/mm			T_0/mm	$\pi/\text{元}$	Q_{loss}
	T_1	T_2	T_3			
EGM	0.10	0.10	0.10	0.20	92.277 8	60
NCGM	0.20	0.20	0.05	0.25	200.456 6	165
LWM	0.15	0.15	0.05	0.20	134.375 1	95

量损失最小,此时需针对不同需求选择合理策略。 k 为 1 000、2 000 时,EGM 得出的公差策略的总支付值及质量损失较 NCGM 和 LWM 平均降低了 28.3%~54.0%和 18.2%~63.6%。

4 结 论

本文进行了云制造系统中公差分配方法与制造资源选择规律的研究,结论如下。

(1)结合云制造环境下制造资源动态性特点,考虑到制造资源对公差分配优化的约束,建立了装配尺寸链演化博弈公差分配模型。

(2)建立复制动态方程,模拟公差单元对制造资源选择的动态演化过程,证明系统收敛于均衡点,用分布式迭代算法可得到演化均衡点。

(3)通过某车身装配实例证明了模型及算法的可行性。实验结果表明:质量损失系数对资源选择策略无影响,但会影响总支付;本文公差分配方法优于线性加权方法与非合作博弈方法,为公差设计提供了一种新方法。

参考文献:

[1] 郑丞,金隼,来新民,等. 基于非合作博弈的公差分配优化[J]. 机械工程学报,2009,45(10): 159-165. ZHENG Cheng, JIN Sun, LAI Xinmin, et al. Tolerance allocation optimization based on Non-cooperative game analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 159-165.

[2] 王晓慧,郭士意,车冬冬,等. 基于集合概念的虚公差理论与应用[J]. 机械工程学报,2019,55(7): 172-177. WANG Xiaohui, GUO Shiyi, CHE Dongdong, et al. Theory and application of virtual tolerance based on set concept[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 172-177.

[3] 胡西彪,张卫,陆宝春,等. 基于离散化成本-公差模型的多目标公差优化设计[J]. 计算机集成制造系统,

- 2019, 25(1): 182-189.
- HU Xibiao, ZHANG Wei, LU Baochun, et al. Multi-objective optimization design of tolerance based on discretized cost-tolerance model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 182-189.
- [4] VIGNESH D, RAVINDRAN D. Tolerance allocation of complex assembly with nominal dimension selection using Artificial Bee Colony algorithm [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(1): 18-38.
- [5] 施祥玲, 徐小明, 苏林林, 等. 基于NSGA-II算法的航天产品装配公差多目标优化 [J]. 上海航天, 2020, 37(3): 121-125+146.
- SHI Xiangling, XU Xiaoming, SU Linlin, et al. Multi-objective optimization based on NSGA-II algorithm for assembly tolerance of aerospace products [J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37(3): 121-125+146.
- [6] 张子豪, 郭俊康, 洪军, 等. 航空发动机高压转子装配偏心预测和相位优化的智能算法应用研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2): 47-54.
- ZHANG Zihao, GUO Junkang, HONG Jun, et al. Application study of intelligent algorithms for prediction and phase optimization of assembly eccentricity of aero-engine high pressure rotor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2): 47-54.
- [7] 栾新慧, 刘惠国, 刘银华. 基于装配工艺仿真的车门公差分配优化方法研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(2): 12-15.
- LUAN Xinhui, LIU Huiguo, LIU Yinhua. Research on optimization method of car door tolerance allocation based on assembly process simulation [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018, 56(2): 12-15.
- [8] KUMAR L, PADMANABAN K, BALAMURUGAN C. Optimal tolerance allocation in a complex assembly using evolutionary algorithms [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2016, 15(1): 121-132.
- [9] 曲兴田, 张昆, 王学旭, 等. 基于混合循环算法的复杂装配体装配序列智能规划 [J]. 东北大学学报, 2019, 40(12): 1767-1772.
- QU Xingtian, ZHANG Kun, WANG Xuexu, et al. Hybrid cycle algorithm-based Intelligent assembly sequence planning of complex assembly [J]. Journal of Northeastern University, 2019, 40(12): 1767-1772.
- [10] HAGHIGHI A, LI L. Joint asymmetric tolerance design and manufacturing decision-making for additive manufacturing processes [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 16(3): 1259-1270.
- [11] 刘鹏, 洪军, 刘志刚, 等. 采用自适应遗传算法的机床公差分配研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 115-123.
- LIU Peng, HONG Jun, LIU Zhigang, et al. Research on the tolerance allocation of machine tools based on adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 115-123.
- [12] MOURA J, HUTCHISON D. Game theory for multi-access edge computing: survey, use cases, and future trends [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 21(1): 260-288.
- [13] HALLMANN M, SCHLEICH B. From tolerance allocation to tolerance-cost optimization: a comprehensive literature review [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1): 1-54.
- [14] LU C, ZHAO W H, YU S J. Concurrent tolerance design for manufacture and assembly with a game theoretic approach [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(1/2/3/4): 303-316.
- [15] 刘永奎, 王力羣, 王曦, 等. 云制造再探讨 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(18): 2226-2237.
- LIU Yongkui, WANG Lihui, WANG Xi, et al. A revisit to cloud manufacturing [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(18): 2226-2237.
- [16] WU Z, LIU T, GAO Z, et al. Tolerance design with multiple resource suppliers on cloud-manufacturing platform [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(1/2/3/4): 335-346.
- [17] WANG T, LI C, YUAN Y, et al. An evolutionary game approach for manufacturing service allocation management in cloud manufacturing [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 133(7): 231-240.
- [18] LI S, LIU X, WANG Y, et al. A cubic quality loss function and its applications [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2019, 35(4): 1161-1179.
- [19] HUANG Z, XIONG X, CHEN W, et al. Three bounded proofs for nonlinear multi-input multi-output approximate dynamic programming based on the Lyapunov stability theory [J]. Optimal Control Applications and Methods, 2018, 39(1): 35-50.

(编辑 刘杨)