



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111290283 B

(45) 授权公告日 2021.07.27

(21) 申请号 202010258305.8

CN 1735846 A, 2006.02.15

(22) 申请日 2020.04.03

CN 110052713 A, 2019.07.26

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 107187022 A, 2017.09.22

申请公布号 CN 111290283 A

CN 104260341 A, 2015.01.07

(43) 申请公布日 2020.06.16

CN 110869188 A, 2020.03.06

(73) 专利权人 福州大学

EP 3416008 A1, 2018.12.19

地址 350108 福建省福州市闽侯县福州大学城乌龙江北大道2号福州大学

CN 109848410 A, 2019.06.07

WO 2019062346 A1, 2019.04.04

EP 3376412 A1, 2018.09.19

(72) 发明人 黄彬 肖彦楷

WO 2009102200 A1, 2009.08.20

US 2019126352 A1, 2019.05.02

(74) 专利代理机构 福州元创专利商标代理有限公司 35100

US 2016221262 A1, 2016.08.04

代理人 陈明鑫 蔡学俊

陈世翔. 机床零件加工车间调度系统的建模仿真及优化.《中国优秀硕士学位论文全文数据库工程科技I辑》.2020,(第(2020年)3期), (续)

(51) Int. Cl.

审查员 潘英

G05B 13/04 (2006.01)

(续)

(56) 对比文件

CN 106611379 A, 2017.05.03

CN 108480821 A, 2018.09.04

CN 104406997 A, 2015.03.11

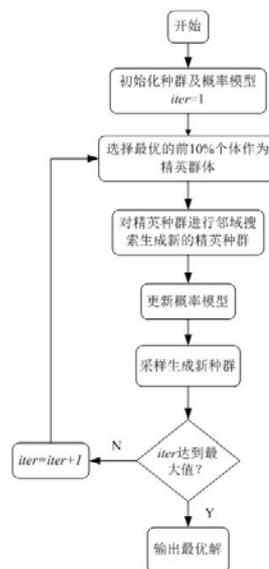
权利要求书3页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

一种面向选择性激光熔融工艺的增材制造单机调度方法

(57) 摘要

本发明涉及一种面向选择性激光熔融工艺的增材制造单机调度方法。该方法提出了以极小化零件的单位体积生产成本为优化目标的单目标数学模型,在此基础上基于分布估计算法在生产调度等组合优化问题中表现出的优异性能,结合邻域搜索策略用于求解考虑零件构建方向的增材制造单机调度问题,在算法中,提出了一种包含零件排序、作业分配以及零件构建方向的实数编码方式,并在此编码基础上,通过概率随机抽样生成种群,在此基础上通过对精英种群进行采样更新概率模型,为了保证种群多样性,避免局部最优,在每一代精英种群生成后,通过邻域搜索对精英种群中的个体进行局部的调整,使算法跳出局部极值,寻找更好的解。



CN 111290283 B

[接上页]

(51) Int.Cl.

B33Y 10/00 (2015.01)

(56) 对比文件

Ziping Yu,等.The Strategy for
Fabricating Wire-Structure Parts Using

Robotic Skeleton Arc Additive
Manufacturing.《Proceedings of 9th IEEE
International Conference on CYBER
Technology in Automation, Control, and
Intelligent Systems》.2018,

1. 一种面向选择性激光熔融工艺的增材制造单机调度方法,其特征在于,首先,构建了以极小化所有零件的单位体积生产成本为优化目标的考虑零件构建方向的增材制造单机调度数学模型;而后,通过结合邻域搜索策略改进的分布估计算法求解该模型;在改进的分布估计算法中,采用包含零件排序、作业分配以及零件构建方向的自然数编码方式,通过概率随机抽样生成种群,并通过对精英种群进行采样更新概率模型,在每一代精英种群生成后,通过邻域搜索对精英种群中的个体进行局部的调整,使算法跳出局部极值,寻找最优的考虑零件构建方向的增材制造单机调度问题的解;

所述以极小化所有零件单位体积生产成本为优化目标的单目标数学模型如下:

$$\min C = \sum_{j=1}^n C_j / \sum_{i=1}^m v_i \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$x_{ij} \sum_{k=1}^M y_{ik} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n z_j = n \quad (4)$$

$$z_j - z_{j+1} \geq 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m (a_{ik} x_{ij}) \leq A \quad (6)$$

$$t_j - D_j \leq 0 \quad (7)$$

其中:式(1)表示极小化所有零件单位体积生产成本的目标函数;式(2)表示一个零件最多只能安排在一个作业中;式(3)表示每个零件生产时只能选择一个备选构建方向;式(4)表示每个作业只能生产一次,不能重复生产,且所有作业都需要完成;式(5)表示作业按照先后顺序加工;式(6)表示每个作业内零件的总投影面积要小于机器总生产面积;式(7)表示保证作业的交货期;

式(1) - (7)中: C_j 表示作业j零件的生产成本: $C_j = (t_g(j) + t_p(j)) C_T + (t_s + t_g(j) + t_p(j)) C_H$; v_i 表示第i个零件的体积; $x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{零件} i \text{ 放入作业} j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$; $y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{零件} i \text{ 选择构建方向} k \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$;
 $z_j = \begin{cases} 1, & \text{作业} j \text{ 被安排生产} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$; a_{ik} 表示第i个零件在第k个备选构建方向的情况下在生产区域的投影面积;A表示机器的生产区域面积; t_j 表示作业j的完工时间: $t_j = t_{j-1} + t_p(j) + t_g(j) + t_s$, $t_0 = 0$; D_j 表示第j个作业的交货期,等于作业内所有零件交货期的最小值; $t_g(j)$ 表示作业j生产时加工材料的时间,即激光头的运动时间: $t_g(j) = t_v \sum_{i=1}^m (x_{ij} v_i)$; $t_p(j)$ 表示作业j生产时的分层时间: $t_p(j) = t_h \cdot h_{\max}(j)$; C_T 表示单位时间机器的运行成本; t_s 表示机器的准备时间; C_H 表示单位时间的人工成本; t_h 表示单位高度的分层时间; t_v 表示单位体积材料的加工时间; $h_{\max}(j)$ 表示第j个作业内零件的最大高度;

所述结合邻域搜索策略改进的分布估计算法的编码方式及实现步骤如下:

算法采用自然数编码方式,即令: $J_j=[I_1, I_2, \dots, I_i]$ 、 $K_j=[K_{1k}, K_{2k}, \dots, K_{ik}]$,其中, I_i 表示第*i*个零件, J_j 表示第*j*个作业, K_j 表示作业*j*内各零件构建方向的组合, K_{ik} 表示第*i*个零件的第*k*个备选构建方向, $1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq M$;一个生产流程中包括多个作业称为作业组,可表示为 $J=[J_1 J_2 \dots J_j]^T$,作业组的构建方向矩阵可表示为 $K=[K_1 K_2 \dots K_j]^T$;

步骤1:生成初始种群和概率模型,令迭代代数 $iter=1$,根据式(8)计算各作业组的适应度值;

$$Fitness=C+F(x) \quad (8)$$

式(8)右边第一项为目标函数,第二项为惩罚函数,当作业满足式(2)-(7)的所有约束时, $F(x)$ 等于0;否则, $F(x)$ 为足够大的正值;

步骤2:选择适应度值最优的前10%的个体作为精英群体;

步骤3:对精英群体进行邻域搜索;

步骤4:根据式(9)更新概率模型(10);

$$\rho_{ik}(g+1)=(1-\beta)\rho_{ik}(g)+\beta/(10\%Q) \cdot \sum_{N=1}^{10\%Q} y_{ik}^N(g) \quad (9)$$

$$\forall i,k, 1 \leq N \leq Q$$

$$\rho(g)=\begin{bmatrix} \rho_{11}(g) & \rho_{12}(g) & \dots & \rho_{1M}(g) \\ \rho_{21}(g) & \rho_{22}(g) & \dots & \rho_{2M}(g) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1}(g) & \rho_{m2}(g) & \dots & \rho_{mM}(g) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $\beta \in (0, 1)$ 为学习速率, Q 为种群数量, $y_{ik}^N(g)$ 是第*g*次迭代中第*N*个精英解的取值:

$$y_{ik}^N(g)=\begin{cases} 1, \text{零件}i\text{选择构建方向}k \\ 0, \text{其他} \end{cases}; \rho_{ik}(g) \text{为第}g\text{次迭代中零件}i\text{选择第}k\text{个备选构建方向的}$$

概率;

步骤5:根据概率模型对精英种群采样生成新种群;

步骤6:如果 $iter$ 已经达到最大值,转至步骤7;否则令 $iter \leftarrow iter+1$,转至步骤2;

步骤7:输出最优解;

所述步骤3的实现步骤如下:

步骤31:判断作业*j*中最高的零件,记为 I_{max} ;如果 I_{max} 当前的构建方向是其所有备选构建方向中高度最小的构建方向,则转至步骤35;如果 I_{max} 存在其它高度更小,且投影面积位于作业剩余生产区域面积内的备选构建方向可供选择时,则进行步骤32;否则,如果 I_{max} 由于作业剩余生产区域面积不足而无法选择其它高度更小的备选构建方向时转至步骤33;

步骤32:选取 I_{max} 可供选择的备选构建方向中高度最小的构建方向,返回步骤31;

步骤33:判断除 I_{max} 外的其他零件是否存在投影面积比其当前构建方向的投影面积小,且高度不高于 I_{max} 的备选构建方向,如果存在则进行步骤34;如果不存在转至步骤35;

步骤34:随机选取步骤33中可选零件中的一个零件,改变其构建方向,选取一个投影面积小于它当前投影面积,且高度不高于 I_{max} 高度的备选构建方向;返回步骤31;

步骤35:如果*j*达到最大值,转至步骤36;否则 $j \leftarrow j+1$,转至步骤31;

步骤36:根据式(8)计算并对比经过局部搜索后的各作业组的适应度值,将适应度值最

优的作业组取代精英种群中的原作业组。

一种面向选择性激光熔融工艺的增材制造单机调度方法

技术领域

[0001] 本发明属于生产制造技术领域,具体涉及一种面向选择性激光熔融工艺的增材制造单机调度方法。

背景技术

[0002] 增材制造(additive manufacturing,AM)技术是指利用计算机辅助设计通过逐层添加材料的方式制造实体零件的技术,在其发展过程中也被称为快速原型技术、3D打印技术。常用的增材制造技术可大致分为:熔融沉积成形(fused deposition modeling,FDM)、光固化成形(stereo lithography apparatus,SLA)、选择性激光熔融(selective laser melting,SLM)等。其中,SLM工艺因为其具备制造可直接使用的金属零部件的能力,是目前发展最快、应用前景最好的技术之一,在航天航空、生物医药及工业模具领域都有广泛的应用。随着增材制造技术不断的发展与成熟,越来越多的被用于工业生产当中,出现了一系列诸如Quickparts、3D Hubs以及Shapeways等大型的提供增材制造生产服务的供应商,随着客户订单的增多,对于相关调度的需求也越来越迫切。近年来,增材制造生产调度的研究引起了国内外学者的重视。

[0003] 增材制造调度问题类似于传统的装箱问题,在生产过程中,通常一个AM机器可以加工多个零件,且机器的容量有限,不同之处在于,AM调度还需要考虑零件的交货期,生产时间,零件构建(打印)方向等约束,并且在要求精度较高的零件生产加工时零件一般是一层放置,因此在约束中更多考虑的是零部件占有的生产面积而不是零件的体积,不同零件的组合将会影响生产的时间以及成本。

[0004] 目前关于增材制造调度的研究只考虑了零件的体积以及机器的容积,交货期等因素,且假设零件只有单一的构建方向,很少考虑零件不同的构建方向对调度的影响。然而,许多文献表明,零件在满足工艺以及客户的需求时,通常有多种构建方向可供选择,而不同构建方向零件的组合对于加工时间会有很大的影响,这是由于增材制造的加工时间受到加工平台上零件高度的影响,特别对于SLM工艺而言这点尤为显著。因此,有必要研究考虑到零件构建方向的面向SLM工艺的增材制造调度问题。这类调度问题更加符合工业实际生产的情况,具有重要的研究意义。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种面向选择性激光熔融工艺的增材制造单机调度方法,为解决分布估计算法容易陷入局部极值的问题,提出了邻域搜索策略,设计了一种改进的分布估计算法进行模型求解,在保证零件交货期的情况下,得出零部件在增材制造设备上的加工组合以及加工顺序。

[0006] 为实现上述目的,本发明的技术方案是:一种面向选择性激光熔融工艺的增材制造单机调度方法,首先,构建以极小化所有零件的单位体积生产成本为优化目标的单目标数学模型;而后,通过结合邻域搜索策略改进的分布估计算法求解考虑零件构建方向的增

材制造单机调度问题;在改进的分布估计算法中,采用包含零件排序、作业分配以及零件构建方向的实数编码方式,通过概率随机抽样生成种群,并通过精英种群进行采样更新概率模型,在每一代精英种群生成后,通过邻域搜索对精英种群中的个体进行局部的调整,使算法跳出局部极值,寻找最优的考虑零件构建方向的增材制造单机调度问题的解。

[0007] 在本发明一实施例中,所述以极小化所有零件单位体积生产成本为优化目标的单目标数学模型如下:

$$[0008] \quad \min C = \sum_{j=1}^n C_j / \sum_{i=1}^m v_i \quad (1)$$

$$[0009] \quad \text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$[0010] \quad x_{ij} \sum_{k=1}^M y_{ik} = 1 \quad (3)$$

$$[0011] \quad \sum_{j=1}^n z_j = n \quad (4)$$

$$[0012] \quad z_j - z_{j+1} \geq 0 \quad (5)$$

$$[0013] \quad \sum_{i=1}^m (a_{ik} x_{ij}) \leq A \quad (6)$$

$$[0014] \quad t_j - D_j \leq 0 \quad (7)$$

[0015] 其中:式(1)表示极小化所有零件单位体积生产成本的目标函数;式(2)表示一个零件最多只能安排在一个作业中;式(3)表示每个零件生产时只能选择一个备选构建方向;式(4)表示每个作业只能生产一次,不能重复生产,且所有作业都需要完成;式(5)表示作业按照先后顺序加工;式(6)表示每个作业内零件的总投影面积要小于机器总生产面积;式(7)表示保证作业的交货期;

[0016] 式(1) - (7)中: C_j 表示作业j零件的生产成本: $C_j = (t_g(j) + t_p(j))C_T + (t_s + t_g(j) + t_p(j))C_H$; v_i 表示第i个零件的体积; $x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{零件}i\text{放入作业}j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$; $y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{零件}i\text{选择构建方向}k \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$;

$z_j = \begin{cases} 1, & \text{作业}j\text{被安排生产} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$; a_{ik} 表示第i个零件在第k个备选构建方向的情况下在生产区域的投影面积;

A表示机器的生产区域面积; t_j 表示作业j的完工时间: $t_j = t_{j-1} + t_p(j) + t_g(j) + t_s$, $t_0 = 0$; D_j 表示第j个作业的交货期,等于作业内所有零件交货期的最小值; $t_g(j)$ 表示作业j生产时加工材料的时间,即激光头的运动时间;

$t_g(j) = t_v \sum_{i=1}^m (x_{ij} v_i)$; $t_p(j)$ 表示作业j生产时的分层时间;

$t_p(j) = t_h \cdot h_{\max}(j)$; C_T 表示单位时间机器的运行成本; t_s 表示机器的准备时间; C_H 表示单位时间的人工成本; t_h 表示单位高度的分层时间; t_v 表示单位体积材料的加工时间; $h_{\max}(j)$ 表示第j个作业内零件的最大高度。

[0017] 在本发明一实施例中,所述结合邻域搜索策略改进的分布估计算法的编码方式及实现步骤如下:

[0018] 算法采用自然数编码方式,即令: $J_j = [I_1, I_2, \dots, I_i]$ 、 $K_j = [K_{1k}, K_{2k}, \dots, K_{ik}]$,其中,

I_i 表示第*i*个零件, J_j 表示第*j*个作业, K_j 表示作业*j*内各零件构建方向的组合, K_{ik} 表示第*i*个零件的第*k*个备选构建方向, $1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq M$;一个生产流程中包括多个作业称为作业组,可表示为 $J = [J_1 \ J_2 \ \cdots \ J_j]^T$,作业组的构建方向矩阵可表示为 $K = [K_1 \ K_2 \ \cdots \ K_j]^T$;

[0019] 步骤1:生成初始种群和概率模型,令迭代代数 $iter = 1$,根据式(8)计算各作业组的适应度值;

$$[0020] \quad \text{Fitness} = C + F(x) \quad (8)$$

[0021] 式(8)右边第一项为目标函数,第二项为惩罚函数,当作业满足式(2) - (7)的所有约束时, $F(x)$ 等于0;否则, $F(x)$ 为足够大的正值;

[0022] 步骤2:选择适应度值最优的前10%的个体作为精英群体;

[0023] 步骤3:对精英群体进行邻域搜索;

[0024] 步骤4:根据式(9)更新概率模型(10);

$$[0025] \quad \rho_{ik}(g+1) = (1-\beta)\rho_{ik}(g) + \beta/(10\%Q) \cdot \sum_{N=1}^{10\%Q} y_{ik}^N(g) \quad (9)$$

$$\forall i, k, 1 \leq N \leq Q$$

$$[0026] \quad \rho(g) = \begin{bmatrix} \rho_{11}(g) & \rho_{12}(g) & \cdots & \rho_{1M}(g) \\ \rho_{21}(g) & \rho_{22}(g) & \cdots & \rho_{2M}(g) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1}(g) & \rho_{m2}(g) & \cdots & \rho_{mM}(g) \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0027] 其中, $\beta \in (0, 1)$ 为学习速率, Q 为种群数量, $y_{ik}^N(g)$ 是第*g*次迭代中第*N*个精英解的取值;

$y_{ik}^N(g) = \begin{cases} 1, \text{零件}i\text{选择构建方向}k \\ 0, \text{其他} \end{cases}$; $\rho_{ik}(g)$ 为第*g*次迭代中零件*i*选择第*k*个备选构建方向的概率;

的概率;

[0028] 步骤5:根据概率模型对精英种群采样生成新种群;

[0029] 步骤6:如果 $iter$ 已经达到最大值,转至步骤7;否则令 $iter \leftarrow iter + 1$,转至步骤2;

[0030] 步骤7:输出最优解。

[0031] 在本发明一实施例中,所述步骤3的实现步骤如下:

[0032] 步骤31:判断作业*j*中最高的零件,记为 I_{\max} 。如果 I_{\max} 当前的构建方向是其所有备选构建方向中高度最小的构建方向,则转至步骤35;如果 I_{\max} 存在其它高度更小,且投影面积位于作业剩余生产区域面积内的备选构建方向可供选择时,则进行步骤32;否则,如果 I_{\max} 由于作业剩余生产区域面积不足而无法选择其它高度更小的备选构建方向时转至步骤33;

[0033] 步骤32:选取 I_{\max} 可供选择的备选构建方向中高度最小的构建方向,返回步骤31;

[0034] 步骤33:判断除 I_{\max} 外的其他零件是否存在投影面积比其当前构建方向的投影面积小,且高度不高于 I_{\max} 的备选构建方向,如果存在则进行步骤34;如果不存在转至步骤35;

[0035] 步骤34:随机选取步骤33中可选零件中的一个零件,改变其构建方向,选取一个投影面积小于它当前投影面积,且高度不高于 I_{\max} 高度的备选构建方向;返回步骤31;

[0036] 步骤35:如果*j*达到最大值,转至步骤36;否则 $j \leftarrow j + 1$,转至步骤31;

[0037] 步骤36:根据式(8)计算并对比经过局部搜索后的各作业组的适应度值,将适应度

值最优的作业组取代精英种群中的原作业组。

[0038] 相较于现有技术,本发明具有以下有益效果:本发明面向选择性激光熔融工艺,建立了以极小化所有零件单位体积生产成本为优化目标的考虑零件构建方向的增材制造单机调度模型,以解决考虑零件构建方向的增材制造生产调度问题,并引入邻域搜索策略对标准分布估计算法进行改进,设计了一种改进分布估计算法求解本发明的调度问题;算例分析表明了该方法可行、有效,为增材制造生产调度的研究提供了一种新的方法和途径。

附图说明

[0039] 图1是考虑零件构建方向的增材制造调度流程示意图;

[0040] 图2是标准分布估计算法流程图;

[0041] 图3是改进分布估计算法流程图;

[0042] 图4是改进分布估计算法与标准分布估计算法运行300次的平均搜索进程对比图。

具体实施方式

[0043] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用于解释本发明,并不用于限定本发明。

[0044] 本发明提供了一种面向选择性激光熔融工艺的增材制造单机调度方法,首先,构建以极小化所有零件单位体积生产成本为优化目标的单目标数学模型;而后,通过结合邻域搜索策略改进的分布估计算法求解考虑零件构建方向的增材制造单机调度问题;在改进的分布估计算法中,采用包含零件排序、作业分配以及零件构建方向的实数编码方式,通过概率随机抽样生成种群,并通过对精英种群进行采样更新概率模型,在每一代精英种群生成后,通过邻域搜索对精英种群中的个体进行局部的调整,使算法跳出局部极值,寻找最优的考虑零件构建方向的增材制造单机调度问题的解。

[0045] 以下为本发明的具体实现过程。

[0046] 针对目前的增材制造产业,本发明提出了一种面向选择性激光熔融(selective laser melting,SLM)工艺的增材制造单机调度的方法。本发明在综合考虑零件的构建方向、交货期的前提下,研究面向SLM工艺的AM机器的单机调度问题,提出了以极小化零件的单位体积生产成本为优化目标的单目标数学模型,在此基础上基于分布估计算法(estimation of distribution algorithm,EDA)在生产调度等组合优化问题中表现出的优异性能,结合邻域搜索策略(neighborhood search strategy,NSS)用于求解考虑零件构建方向的增材制造单机调度问题,在算法中,提出了一种包含零件排序、作业分配以及零件构建方向的实数编码方式,并在此编码基础上,通过概率随机抽样生成种群,在此基础上通过对精英种群进行采样更新概率模型,为了保证种群多样性,避免局部最优,在每一代精英种群生成后,通过邻域搜索对精英种群中的个体进行局部的调整,使算法跳出局部极值,寻找更好的解。

[0047] 1考虑零件构建方向的增材制造单机调度问题

[0048] 1.1问题描述

[0049] 图1给出了AM单机调度流程的示意图,与传统车间生产调度不同,根据增材制造的

加工特点,来源于不同订单的、不同形状、尺寸和交货期的零件可以同时在一台AM机器上加工。本发明将同时在同一AM机器上加工的零件定义为一个作业,在满足一定的条件下(足够的有效生产面积,交货期等),一个作业可能包含多个不同的零件;一般每个零件都至少有一种备选构建方向(如图1所示, I_5K_1 、 I_5K_2 表示零件5有2种备选构建方向),由于不同的零件构建方向将导致加工时的最大高度不同、在AM机器上的最大投影面积不同,进而影响到作业内零件的数目,导致加工时间和成本不同,因此,零件分配前要明确零件的备选构建方向。如图1所示,5个零件共分成3个作业进行加工,零件1(采用构建方向2)和4(采用构建方向1)分配给作业1,零件2(采用构建方向1)和3(采用构建方向1)分配给作业2,而零件5(采用构建方向2)单独作为作业3。显然,当采用不同的零件分配方式时,作业的数目有可能改变。面向SLM工艺的增材制造单机调度问题,有以下假设:

- [0050] (1) 加工过程中只考虑一种制造材料;
- [0051] (2) 作业的零件之间不会相互接触,且不考虑零件之间的嵌套问题(嵌套指在一定条件下,小零件可放在大零件的孔隙中或斜面下);
- [0052] (3) 为了保证零件质量,零件在加工平台上仅放置一层;
- [0053] (4) 所有零件的备选构建方向均能满足质量要求,并且都可放置于AM机器的生产区域内;
- [0054] (5) 生产过程中,机器具有固定的加工速度、层厚度参数以及单位人工成本、作业生产准备时间。

[0055] 1.2数学模型

[0056] (1) 参数

[0057] I_i : 第*i*个零件 ($i=1, \dots, J_j$);

[0058] J_j : 第*j*个作业 ($j=1, \dots, K_{ik}$);

[0059] K_{ik} : 第*i*个零件的第*k*个备选构建方向 ($k=1, \dots, h_{ik}$);

[0060] h_{ik} : 第*i*零件在第*k*个备选构建方向的情况下的高度;

[0061] a_{ik} : 第*i*个零件在第*k*个备选构建方向的情况下在生产区域的投影面积(包含了一定的裕度,以避免零件接触);

[0062] v_i : 第*i*个零件的体积;

[0063] A : 机器的生产区域面积;

[0064] t_s : 机器的准备时间;

[0065] t_h : 单位高度的分层时间;

[0066] t_v : 单位体积材料的加工时间;

[0067] C_T : 单位时间机器的运行成本;

[0068] C_H : 单位时间的人工成本;

$$x_{ij} = \begin{pmatrix} 1, \text{零件 } i \text{ 放入作业 } j \\ 0, \text{其他} \end{pmatrix};$$

$$[0069] \quad y_{ik} = \begin{pmatrix} 1, \text{零件 } i \text{ 选择构建方向 } k \\ 0, \text{其他} \end{pmatrix};$$

$$z_j = \begin{pmatrix} 1, \text{作业 } j \text{ 被安排生产} \\ 0, \text{其他} \end{pmatrix};$$

[0070] D_j : 第 j 个作业的交货期, 等于作业内所有零件交货期的最小值;

[0071] $h_{\max}(j)$: 第 j 个作业内零件的最大高度;

[0072] C : 所有零件的单位体积生产成本。

[0073] 由上可得, 作业 j 零件的生产成本 C_j 为:

$$[0074] \quad C_j = (t_g(j) + t_p(j)) C_T + (t_s + t_g(j) + t_p(j)) C_H \quad (1)$$

[0075] 作业 j 的完工时间 t_j 为:

$$[0076] \quad t_j = t_{j-1} + t_p(j) + t_g(j) + t_s, t_0 = 0 \quad (2)$$

[0077] 式 (1) - (2) 中 $t_g(j)$ 为作业 j 生产时加工材料的时间 (激光头的运动时间):

$$[0078] \quad t_g(j) = t_v \sum_{i=1}^m (x_{ij} v_i) \quad (3)$$

[0079] $t_p(j)$ 为作业 j 生产时的分层时间:

$$[0080] \quad t_p(j) = t_h \cdot h_{\max}(j) \quad (4)$$

[0081] (2) 数学模型

[0082] 以极小化所有零件单位体积生产成本为优化目标的增材制造单机调度问题可以描述为如下模型:

$$[0083] \quad \min C = \sum_{j=1}^n C_j / \sum_{i=1}^m v_i \quad (5)$$

$$[0084] \quad \text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (6)$$

$$[0085] \quad x_{ij} \sum_{k=1}^M y_{ik} = 1 \quad (7)$$

$$[0086] \quad \sum_{j=1}^n z_j = n \quad (8)$$

$$[0087] \quad z_j - z_{j+1} \geq 0 \quad (9)$$

$$[0088] \quad \sum_{i=1}^m (a_{ik} x_{ij}) \leq A \quad (10)$$

$$[0089] \quad t_j - D_j \leq 0 \quad (11)$$

[0090] 式 (5) 表示极小化所有零件单位体积生产成本的目标函数; 式 (6) 表示一个零件最多只能安排在一个作业中; 式 (7) 表示每个零件生产时只能选择一个备选构建方向; 式 (8) 表示每个作业只能生产一次, 不能重复生产, 且所有作业都需要完成; 式 (9) 表示作业按照先后顺序加工; 式 (10) 表示每个作业内零件的总投影面积要小于机器总生产面积; 式 (11) 保证作业的交货期。

[0091] 2优化算法

[0092] 2.1分布估计算法

[0093] 分布估计算法(estimation of distribution algorithm,EDA)是一种以统计学原理为基础的随机群体优化算法,该算法具有较强的全局收敛能力和较快的收敛速度。以二进制编码优化问题为例,算法中,解空间分布的概率模型可以使用一个概率向量表示:

$$[0094] \quad \rho(g) = (\rho_1(g), \rho_2(g), \dots, \rho_n(g))^T \quad (12)$$

[0095] 式(12)中, $\rho_i(g)$ 为在第g次迭代中个体的第i个基因位置上取值为1的概率。在本发明模型中基因位置i代表采用某个构建方向的零件i。

[0096] 每一代种群都由概率向量 $\rho(g)$ 随机产生Q个个体。计算这些个体的适应度值,从中选取最优的q($q < Q$)个个体,并用这q个个体更新概率向量 $\rho(g)$, $x_i^1(g), x_i^2(g), \dots, x_i^q(g)$ 表示第g代最优的q个个体在第i个基因位置的取值。采用机器学习中的Heb规则作为更新向量的规则,更新概率向量的过程为:

$$[0097] \quad \rho_i(g+1) = (1-\alpha)\rho_i(g) + (\alpha/q) \sum_{k=1}^q (x_i^k(g)) \quad (13)$$

[0098] 图2是标准分布估计算法的流程图。

[0099] 3改进分布估计算法求解考虑零件构建方向的增材制造单机调度问题

[0100] 3.1编码方式

[0101] 算法中作业以及其对应的构建方向都采用自然数编码方式,即 $J_j = [I_1, I_2, \dots, I_i]$, $K_j = [K_{1k}, K_{2k}, \dots, K_{ik}]$, $1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq M$ 。 K_j 表示作业j内各零件构建方向的组合。

[0102] 一个生产流程中通常包括多个作业称为作业组,可表示为 $J = [J_1 J_2 \dots J_j]^T$ 。

[0103] 由于一个作业能容纳多少零件是由零件所占的生产面积决定的,因此每个作业的零件数不一定相同。每个作业内的零件具有固定的构建方向,作业组的构建方向矩阵可表示为 $K = [K_1 K_2 \dots K_j]^T$ 。

[0104] 3.2概率模型及其更新

[0105] 概率模型及其更新机制是设计分布估计算法的关键,零件不同的构建方向的选择会影响零件生产的时间,进而影响生产成本。本发明采用 $m \times M$ 的 $\rho(g)$ 作为概率模型,表征各零件选取各备选构建方向的概率,如式(14)所示:

$$[0106] \quad \rho(g) = \begin{bmatrix} \rho_{11}(g) & \rho_{12}(g) & \dots & \rho_{1M}(g) \\ \rho_{21}(g) & \rho_{22}(g) & \dots & \rho_{2M}(g) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1}(g) & \rho_{m2}(g) & \dots & \rho_{mM}(g) \end{bmatrix} \quad (14)$$

[0107] 其中, $\rho_{ik}(g)$ 为第g次迭代中零件i选择第k个备选构建方向的概率。

[0108] 为了保证算法初始阶段对于解空间的均匀采样,初始概率分布取均匀分布,同时,为了使概率模型更加适合群体的进化趋势,在每次迭代中选取适应度值最优的前10%个体作为更新概率模型的依据,使用Heb规则更新概率矩阵如式(15):

$$[0109] \quad \rho_{ik}(g+1) = (1-\beta)\rho_{ik}(g) + \beta/(10\%Q) \cdot \sum_{N=1}^{10\%Q} y_{ik}^N(g) \quad (15)$$

$$\forall i, k, 1 \leq N \leq Q$$

[0110] 其中 $\beta \in (0, 1)$ 为学习速率, Q 为种群数量, $y_{ik}^N(g)$ 是第 g 次迭代中第 N 个精英解的取值:

$$[0111] \quad y_{ik}^N(g) = \begin{cases} 1, & \text{零件}i\text{选择构建方向}k \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

[0112] 3.3适应度函数

[0113] 本发明构造适应度函数如下所示:

$$[0114] \quad \text{Fitness} = C + F(x) \quad (16)$$

[0115] 式(16)右边第一项为目标函数,第二项为惩罚函数。当作业满足式(6) - (11)的所有约束时, $F(x)$ 等于0;否则, $F(x)$ 为足够大的正值。

[0116] 3.4改进的分布估计算法

[0117] 图3是改进的分布估计算法流程图,由于EDA局部搜索能力较差,因此本发明引入一种邻域搜索机制,设计一种改进的分布估计算法(IEDA)来求解上述调度模型。通过对每个作业进行搜索,降低零件的最大高度,较好地弥补了EDA算法的不足,提高了收敛效率。算法流程如下:

[0118] 步骤1:生成初始种群和概率模型,令迭代代数 $\text{iter} = 1$,根据式(16)计算各作业组的适应度值;

[0119] 步骤2:选择适应度值最优的前10%的个体作为精英群体;

[0120] 步骤3:对精英群体进行邻域搜索;

[0121] 步骤4:根据式(15)更新概率模型(14);

[0122] 步骤5:根据概率模型对精英种群采样生成新种群;

[0123] 步骤6:如果 iter 已经达到最大值,转至步骤7;否则令 $\text{iter} \leftarrow \text{iter} + 1$,转至步骤2;

[0124] 步骤7:输出最优解。

[0125] 3.5邻域搜索策略

[0126] 由于EDA局部搜索能力较差,本发明引入一种邻域搜索机制,设计一种IEDA来求解上述调度问题。在已知零件作业分组的情况下,对原精英种群内每个作业内零件的构建方向进行搜索,降低作业内零件的最大高度,较好地弥补了EDA算法的不足,提高了收敛效率。具体流程如下:

[0127] 步骤1:判断作业 j 中最高的零件,记为 I_{\max} 。如果 I_{\max} 当前的构建方向是其所有备选构建方向中高度最小的构建方向,则转至步骤5;如果 I_{\max} 存在其它高度更小,且投影面积位于作业剩余生产区域面积内的备选构建方向可供选择时,则进行步骤2;否则,如果 I_{\max} 由于作业剩余生产区域面积不足而无法选择其它高度更小的备选构建方向时转至步骤3。

[0128] 步骤2:选取 I_{\max} 可供选择的备选构建方向中高度最小的构建方向,返回步骤1。

[0129] 步骤3:判断除 I_{\max} 外的其他零件是否存在投影面积比其当前构建方向的投影面积小,且高度不高于 I_{\max} 的备选构建方向,如果存在则进行步骤4;如果不存在转至步骤5。

[0130] 步骤4:随机选取步骤3中可选零件中的一个零件,改变其构建方向,选取一个投影面积小于它当前投影面积,且高度不高于 I_{\max} 高度的备选构建方向。返回步骤1。

[0131] 步骤5:如果 j 达到最大值,转至步骤6;否则 $j \leftarrow j + 1$,转至步骤1。

[0132] 步骤6:根据式(16)计算并对比经过局部搜索后的各作业组的适应度值,将适应度

值最优的作业组取代精英种群中的原作业组。

[0133] 以下为本发明一具体实例。

[0134] 某企业需用一台AM机器加工一批零件,每个零件的体积、交货期、备选构建方向及相应的投影面积及最大高度如表1所示,AM机器参数如表2所示。

[0135] 表1零件的尺寸及其交货期

零件	体积/cm ³	交货期/h	构建方向	投影面积/cm ²	最大高度/mm
1	654.21	80	1	220.11	15.1
			2	260.25	12.3
			3	311.2	11.2
			4	350.21	10.4
			5	420.89	7.5
2	855.38	112	1	311.56	20.15
			2	484.84	17.14
			3	510.78	12.68
3	350.23	123	1	280.64	12.64
			2	315.73	10.89
4	756.33	201	1	221.77	20.54
			2	255.63	18.07
			3	284.82	15.55
			4	310.92	13.24
			5	415.21	8.69
5	1060.21	240	1	604.53	13.56
6	535.23	240	1	312.54	15.44
			2	348.67	14.67
			3	412.2	10.69
			4	433.2	7.67
7	450.52	268	1	157.1	13.68
			2	218.2	11.4
			3	310.1	7.83
8	210.11	268	1	382.08	16.21
			2	408.64	13.89
			3	430.1	12.23
			4	462.2	8.72
9	345.72	271	1	210.5	11.54
			2	312.6	9.87
			3	353.29	6.43
10	421.56	300	1	215.54	14.55
			2	287.19	10.54
			3	354.63	8.43

[0137] 表2 AM机器的参数

	单位体积加工时间 t_v /(h/cm ³)	0.031			
	单位分层时间 t_h /(h/cm)	1.5			
[0138]	机器准备时间 t_s /(h)	1			
	运行成本 C_r /(RMB/h)	500			
	人工成本 C_H /(RMB/h)	30			
	机器作业面积 A /(cm ²)	1600			
	表 3 EDA 与 IEDA 优化结果对比				
[0139]	算法	运行次数	最佳适应度值	最差适应度值	收敛率
	EDA	300	21.3743	21.6399	58.67%
	IEDA	300	21.3743	21.6023	94.67%

[0140] 在同一台式机上,分别运行EDA和IEDA算法各300次求解本发明调度问题,算法的最大迭代次数为50,种群大小为50。两者的平均搜索进程对比如图4所示,优化结果对比如表3所示。由图4和表3可以看出,IEDA的收敛稳定性比EDA更好,收敛率更高。求得最优作业分配为[1,2,3,0;4,5,6,7;8,9,10,0],相对应的构建方向为[3,3,1,0;4,1,3,2;4,3,3,0]。即1、2、3为第一个作业,4、5、6、7为第二个作业,8、9、10为第三个作业;零件1选择其编号3的构建方向,零件2选择其编号3的构建方向,……,零件10选择其编号为3的构建方向。本调度方案的每立方厘米材料的加工成本为21.3743RMB,各作业的完成时间分别为77.6744h、108.2110h和44.3791h。

[0141] 综上,本发明面向选择性激光熔融工艺,建立了以极小化所有零件单位体积生产成本为优化目标的单机调度模型,以解决考虑零件构建方向的增材制造生产调度问题,并引入邻域搜索策略对标准分布估计算法进行改进,设计了一种改进分布估计算法求解本发明的调度问题。算例分析表明了该方法可行、有效,为增材制造生产调度的研究提供了一种新的方法和途径。

[0142] 以上是本发明的较佳实施例,凡依本发明技术方案所作的改变,所产生的功能作用未超出本发明技术方案的范围时,均属于本发明的保护范围。

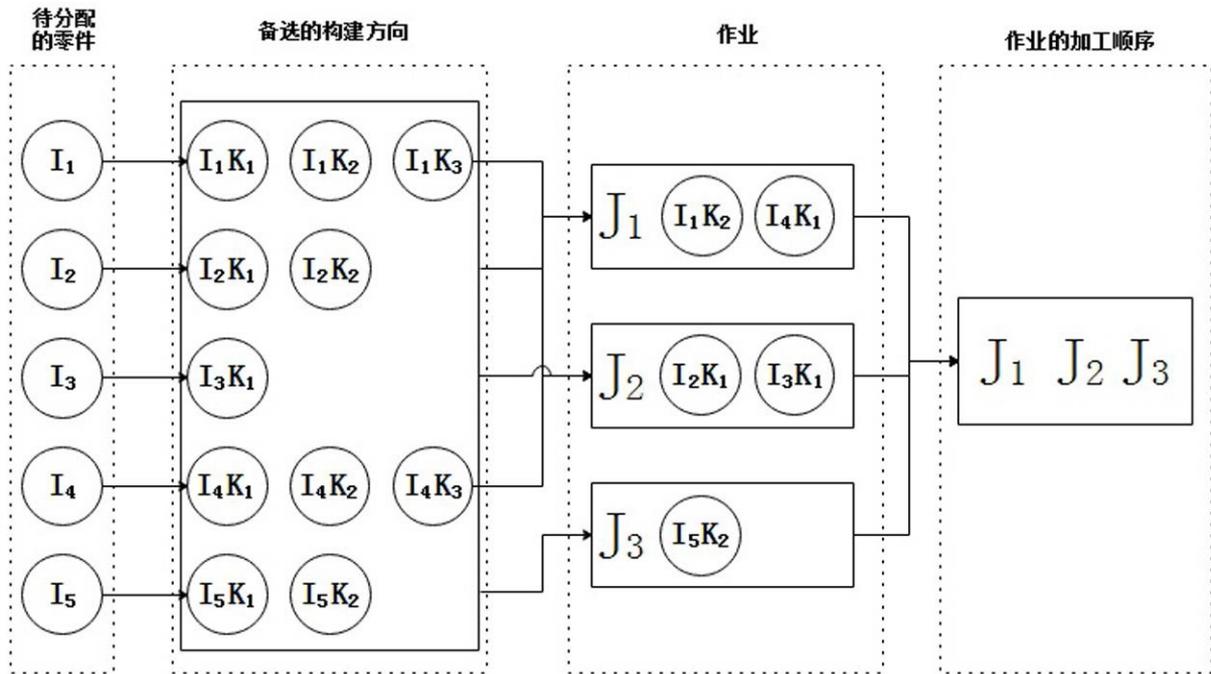


图1

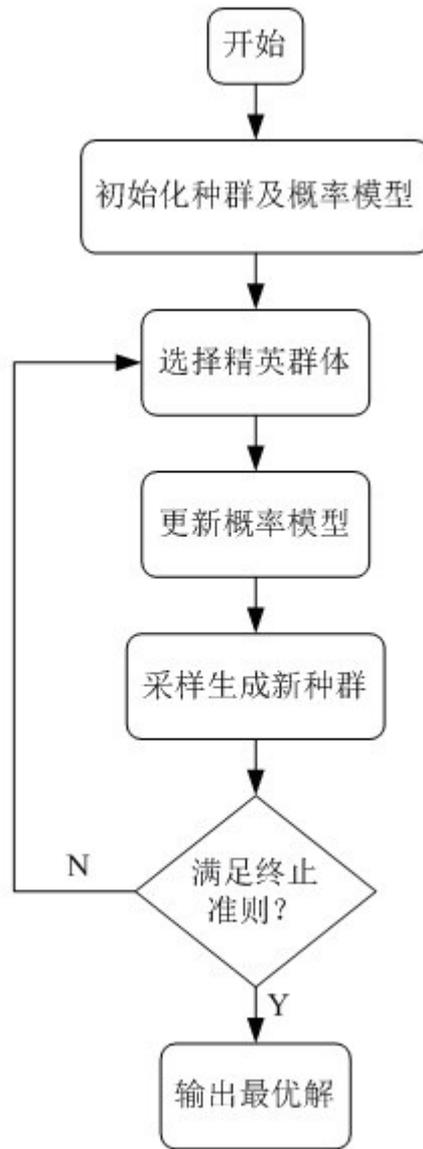


图2

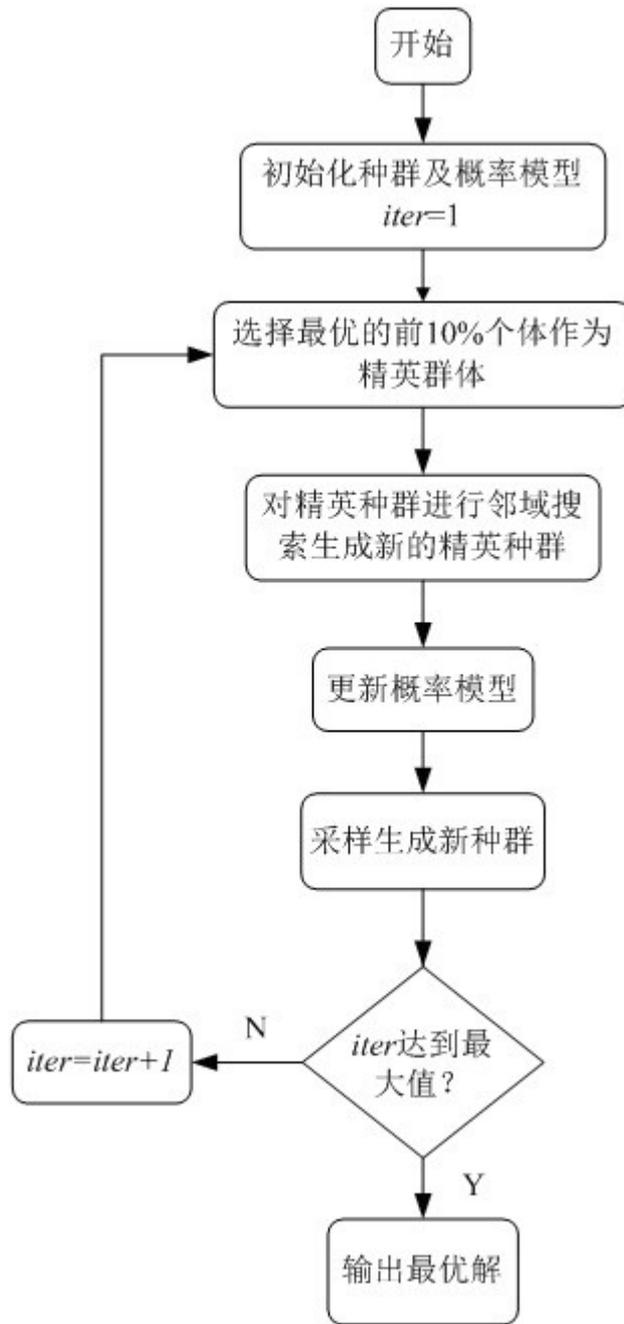


图3

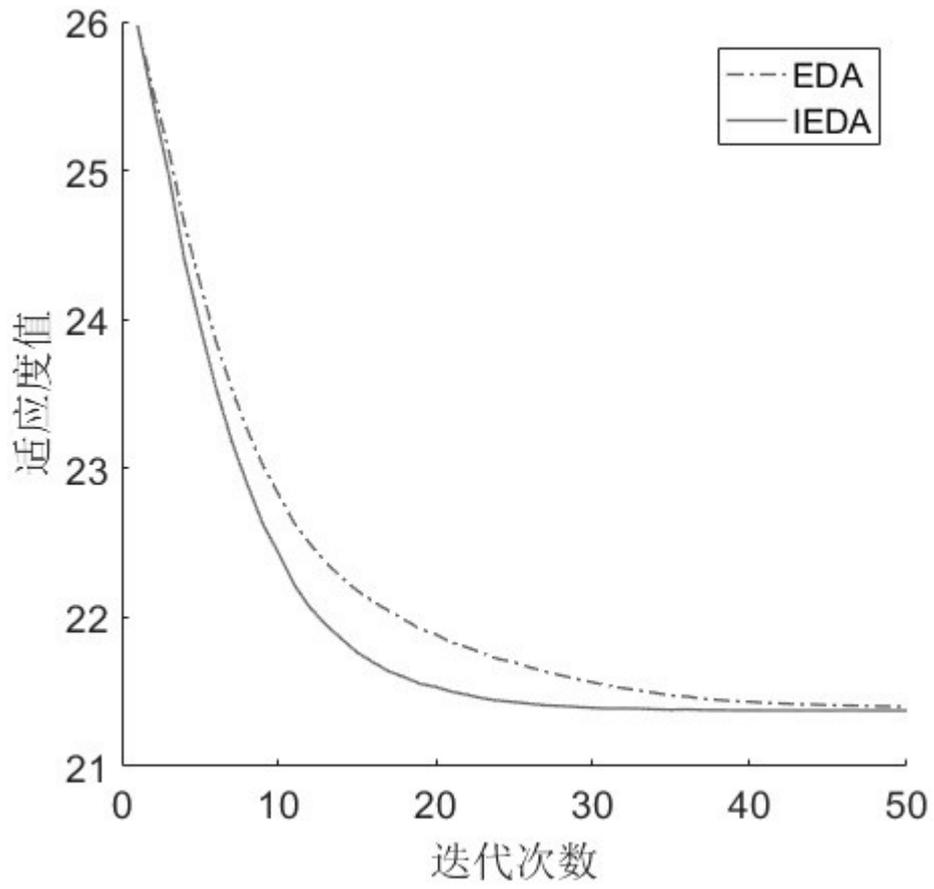


图4