

引文格式:王张浩,李东升,翟雨农.弱刚性薄壁件夹具布局优化方法研究概述[J].航空制造技术,2023,66(14):118-135.

WANG Zhanghao, LI Dongsheng, ZHAI Yunong. A review of fixture layout optimization method for weakly-rigid thin-walled workpieces[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 118-135.

弱刚性薄壁件夹具布局优化方法研究概述

王张浩,李东升,翟雨农

(北京航空航天大学,北京 100191)

[摘要] 弱刚性薄壁件因其重量轻、强度高等特点被大量应用于航空航天、汽车等工业领域,但是同时也存在厚度小、刚性弱,在制造过程中极易发生变形的缺点。而夹具布局设计是减少薄壁件制造变形、保证其制造质量的一个非常重要的因素。传统的薄壁件夹具布局设计依赖于工程师的直观判断和经验积累,速度慢、成本高、设计随意性大。随着计算机技术的不断提高,国内外学者先后应用有限元仿真、数学规划、智能优化算法以及代理模型等理论和方法对薄壁件夹具元件的布局进行优化设计,取得了大量研究成果。根据目标函数的建模方法以及所使用的优化算法对相关研究进行了系统的分类讨论,并详细分析了各个建模方法和优化算法的优缺点。最后对弱刚性薄壁件夹具布局优化方法的相关研究进行总结,并提出了相应的研究建议。

关键词: 弱刚性薄壁件; 夹具布局优化; 有限元方法; 代理模型; 优化算法

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.118



王张浩

博士研究生,主要研究方向为飞机复合材料结构装配形性控制。

薄壁件通常是指厚度与长度尺寸之比小于 1/10 的工件^[1]。由于具有强度高、重量轻、几何造型流畅等优点,薄壁件广泛应用于航空航天、

汽车、船舶等工业领域(图 1)^[2]。薄壁件种类繁多,按结构用途可分为框类、梁类、接头类、壁板类、肋类等类型。但由于其尺寸大、刚性弱,在加工、装配、测量等阶段受自身重力和切削力、夹紧力等外部载荷作用,极易产生不可忽视的变形,严重影响薄壁件的尺寸和形状准确度,造成最终产品难以达到质量要求。分析表明,在“3-2-1”定位布局下,一个尺寸为 400 mm × 400 mm × 1 mm 的钢板在自重下的平均挠度可达到 1~3 mm^[3]。因此,为了确保薄壁件按照规定的尺寸和公差制造,生产过程中必须使用夹具来抑制其过度变形。

夹具是用于在三维工作空间中定位、约束和支撑工件的装置,是制造过程中至关重要的工具。一般来说,一个夹具系统由 3 种基本元件组成^[4]。

(1) 定位器。没有驱动能力的

静态定位元件,用于将工件定位到所需的位置和方向,一个典型的夹具至少有 6 个定位器。

(2) 夹紧元件。具有驱动能力的静态定位元件,用于施加力以安全地将工件固定在指定位置,一个典型的夹具至少有两个夹紧元件。

(3) 支撑元件。无驱动能力的静态定位元件,用于减少制造过程中载荷引起的工件局部弹性变形,提高夹具-工件系统的稳定性,夹具中支撑元件的存在不是强制性的,其数量没有限制。

而薄壁件夹具(图 2)除了需要具有停止刚体运动的基本功能外,还应能够抑制薄壁件因外载或重力产生的过度变形。制造过程中,夹具元件数量、位置等参数选择不当会导致薄壁件变形超差,从而影响其尺寸和形状精度,严重的情况下甚至导致产品报废。因此,夹具布局设计是保证

薄壁件制造质量的一个非常重要的因素。在夹具布局设计中,需要考虑的夹具布局参数主要有夹具元件的数量、位置、装夹顺序及夹紧力值等,需要控制的目标主要有工件变形、尺寸偏差及工件内部应力水平,常见的薄壁件材料以及不同工艺阶段中薄壁件面临的工艺载荷如表 1 所示。制造过程中,需要根据所面临的研究对象、目标函数及需要考虑的夹具布局参数,确定合适的夹具布局优化设计方法。

传统的薄壁件夹具布局设计依赖于工程师的直观判断和经验积累,速度慢、成本高、设计随意性大,难以满足越来越高的生产精度要求。随着计算机技术的不断提高,国内外学



图 1 薄壁件在各领域的应用^[2]

Fig.1 Application of thin-walled workpieces in various fields^[2]



图 2 典型薄壁件夹具系统

Fig.2 Typical fixture system of thin-walled workpieces

表 1 弱刚性薄壁件夹具布局设计参数

Table 1 Fixture layout design parameters of weakly-rigid thin-walled workpieces

材料	工艺阶段	工艺载荷	夹具布局参数	控制目标
金属、 复合材料	加工	重力、夹紧力、切削力	夹具元件数量、 位置、装夹顺序 及夹紧力值等	工件变形、尺寸 偏差、工件内部 应力水平
	装配	重力、夹紧力,焊接、铆接等连接载荷		
	测量	重力		

者先后应用有限元仿真、数学规划、智能优化算法以及代理模型等理论和方法对薄壁件夹具元件的布局进行优化,取得了大量的研究成果。

本文对弱刚性薄壁件夹具布局优化的相关研究进行了详细的综述,并分析了各个夹具布局优化算法的优缺点,讨论了当前弱刚性薄壁件夹具布局优化算法的发展趋势,旨在为后续研究提供理论指导。本文按照目标函数的建模方法以及所使用的优化算法对当前薄壁件夹具布局优化方法进行了分类讨论,具体组织结构如下:首先,简要说明了弱刚性薄壁件夹具布局优化方法的研究背景及意义,然后讨论了基于有限元方法的夹具布局优化方法;为解决基于有限元方法的夹具布局优化方法计算成本高、优化效率低的问题,随后介绍了基于代理模型的夹具布局优化方法;最后对弱刚性薄壁件夹具布局优化方法的研究进展进行总结,并指出将来的研究方向。

1 基于有限元模型的夹具布局优化方法

薄壁件夹具布局优化是非常复杂的工程问题,其中涉及较多的设计变量和约束条件,目标函数与设计变量之间往往是非线性关系,而且并不总是存在解析表达式。有限元方法(Finite element method, FEM)利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟,其实质是将复杂的连续体划分为有限多个简单的单元体,化无限自由度问题为有限自由度问题,是一种离散的数值求解方法。作为一种

公认和可靠的建模方法,有限元方法广泛应用于薄壁件的夹具布局优化中,以计算薄壁件在不同夹具布局下的变形量,并结合优化算法,从而实现薄壁件的夹具布局优化设计。目前,将有限元分析和优化算法相结合的方法已成为薄壁件夹具布局优化设计的主流方法,具体流程如图 3 所示。按照各算法所基于的数学理论来分类,目前常用的优化算法主要有数学规划方法、元启发式方法和拓扑优化方法等。

1.1 采用数学规划方法的夹具布局优化方法

数学规划方法是一种确定性的优化方法,也被称为梯度方法,需要可靠的灵敏度计算。根据构成类型的不同,主要分为线性规划、线性 & 二次整数规划、序列二次规划、内点法、拟牛顿法和共轭梯度法等。这些算法会从一个初始解开始,并基于梯度,不断寻找改进解,直到达到局部最优的库恩-塔克条件,或者直到不能大幅度改进解。将其与有限元分析相结合的方法是发展最早的薄壁件夹具布局优化方法,具体流程如图 4 所示。

Rearick^[5]采用有限元分析和非线性规划相结合的方法来确定可变形钣金件夹具元件的最佳位置,发现了优化过程中有限元网格重构会导致数值优化困难的问题,但没有给出相应的解决方法。Cai 等^[3]首次提出了适用于柔性钣金件定位的“N-2-1”定位原理(图 5),并从理论上和数值上验证了“N-2-1”原理对钣金件定位的有效性。在此基础上,

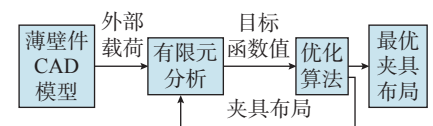


图 3 基于有限元方法的夹具布局优化流程图

Fig.3 Fixture layout optimization flowchart based on finite element method

以工件有限元模型中关键节点法向挠度的平方和最小为目标函数,基于有限差分法计算目标函数梯度,利用有限元分析软件和序列二次规划算法,对主基准面上“N”个定位器的布局进行优化。在算法实现过程中,利用MSC/NASTRAN中的多点约束特征,成功解决了网格重构引起的数值优化困难的问题。Ceglarek等^[6]为减小柔性钣金件在搬运过程中的变形,采用有限元方法和序列二次规划算法确定夹持末端执行器的最优位置。优化过程中,考虑了运动加速度引起的惯性力和空气阻力,并对柔性钣金件的变形行为进行了动态分析。王运巧等^[7]利用ANSYS的设计优化模块对航空薄壁弧形件(图6)的铣削加工夹具布局进行优化,以减小由切削力引起的工件最大弹性变形。Wang等^[8]提出一种基于有限元分

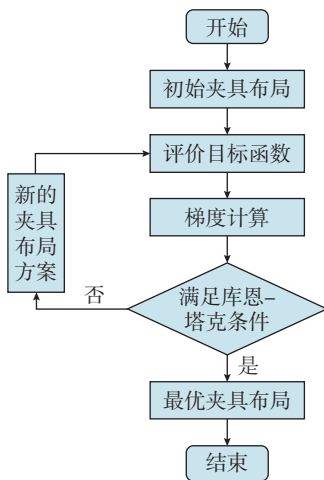


图4 采用数学规划算法的夹具布局优化方法流程图

Fig.4 Flowchart of fixture layout optimization method using mathematical programming algorithm

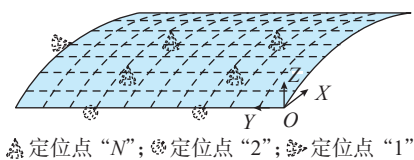


图5 “N-2-1”定位原理^[3]

Fig.5 “N-2-1” locating principle^[3]

析的飞机钣金件装配夹具布局优化方法,以重力作用下钣金件关键测量点法向变形的平方和最小为目标,利用ABAQUS软件和非线性规划算法寻找定位器的最优数量及位置。但是,该方法没有把定位器的数量和位置耦合在一起考虑,本质上是一种异步优化。王少锋等^[9]针对大型薄壁件加工过程中多点支承/定位这一基础理论问题,提出了一种跟随加工区域布置定位点的“X-2-1”定位原理与定位方法(图7),实现对工件不同加工区域定位误差有针对性的重点防控,并且在试验中验证了该方法的正确性与合理性。在此基础上,提出了一种新颖的多点支承/定位布局优化方法,利用有限差分方法计算加工变形敏感度,建立了工件加工变形对于支承/定位点布局的解析敏感度表达式,并沿减小加工变形最敏感的方向调整支承/定位点分布,以最小化工件的最大加工变形。此外,还通过模态进一步对相应支承/定位点布局下工件固有频率以及振型等进行了测试,并以此提出了修正支承/定位点布局或添加辅助支承/定

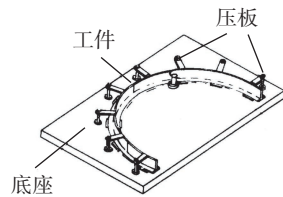


图6 薄壁弧形件加工装夹示意图^[7]

Fig.6 Schematic diagram of thin-walled arc workpieces fixturing^[7]

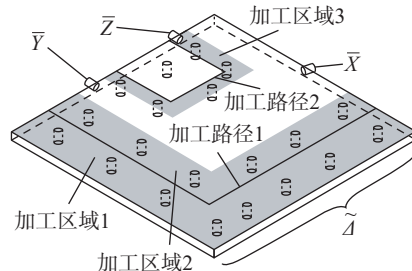


图7 “X-2-1”跟随定位原理^[9]

Fig.7 “X-2-1” following locating principle^[9]

位点抑制振动变形的方 法^[10]。

Camelio等^[11]提出一种考虑零件偏差、工装偏差和装配回弹的钣金件装配夹具布局优化方法,采用非线性规划算法寻找定位器的最优位置,以最小化装配偏差。Cai等^[12]在考虑了焊接偏差的情况下,利用商业有限元分析软件MSC/NASTRAN和非线性规划算法对定位器的位置进行优化,以最小化板材装配过程中的尺寸偏差,在算法实现过程中,将焊枪载荷建模为一个遵循标准正态分布的随机力,并建立了用于连续变量优化的夹具元件模型。

数学规划方法是最早应用于薄壁件夹具布局设计的优化算法。该方法具有技术成熟、鲁棒性好等优点,但同时也存在如下缺点。

(1) 由于夹具布局设计问题的组合复杂性,数学规划算法只能给出一个改进解,无法给出全局或近全局的最优解。

(2) 优化程序必须从初始解开始,且最终结果对优化过程的初值异常敏感。

(3) 采用数学规划算法的夹具布局优化方法需要目标函数的梯度信息。由于目标函数不是设计变量的显式函数,优化过程中通常基于有限元计算结果,采用有限差分法逼近目标函数梯度向量,但基于有限元计算的梯度往往是有噪声和不可靠的。

1.2 采用元启发式算法的夹具布局优化方法

元启发式算法是一种基于直观或经验构造的算法,是随机算法与局部搜索算法相结合的产物。与数学规划方法不同,元启发式算法只需要设计变量和目标函数值,不需要梯度或其他辅助信息,而且其随机性有助于摆脱局部最优。因此,元启发式算法特别适合于夹具布局优化这种目标函数和设计变量之间不存在明确定义的数学关系的问题。此外,元启发式算法还能够产生备选的优化

布局,这使设计者能够在多种选择中对夹具布局优化的多模态特性进行决策。所以,一些学者开始采用元启发式方法来解决夹具布局优化问题。常用的元启发式算法有遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、社会辐射算法、花授粉算法、萤火虫算法、布谷鸟搜索算法等。

1.2.1 采用遗传算法的夹具布局优化方法

遗传算法(Genetic algorithm, GA)是一种基于自然选择和自然遗传机制的鲁棒、随机和启发式优化方法^[13-14],由3种基本遗传算子组成,即选择、交叉和变异,并将其与适者生存的概念相结合。遗传算法因其快速随机搜索和全局收敛性而被应用于许多复杂的优化和搜索问题,是夹具布局设计中应用最为广泛的优化算法。结合有限元方法和遗传算法的夹具布局优化方法具体流程如图8所示。

Krishnakumar等^[15]使用有限元节点编号来表示夹具元件的位置,利用离散遗传算法对夹具布局进行优化,使整个切削过程中夹紧力和动态加工载荷造成的被加工表面的最大弹性变形最小,并讨论了基于遗传算法的夹具布局优化方法比以往报道的非线性规划方法的优点。在此基础上,Vallapuzha等^[16]提出了一种利用空间坐标表示夹具元件位置并结合实数编码的新的基于遗传算法的优化方法。此外,新方法还使用了共享和增加变异等高级操作符。测试结果表明,相比于Krishnakumar等^[15]的方法,新方法用更少的代数提供了更高质量的解决方案,而且增加变异和共享操作符的使用,显著提高了新方法的性能。在使用空间坐标表示夹具元件位置时,Vallapuzha等^[17]还比较了连续插值与离散插值方法对夹具布局优化结果的影响。结果表明,使用连续插值的优化方法具有较好的综合性能。

Liao^[18]提出了一种基于遗传算法的优化方法,自动选择钣金装配夹具中定位器的位置和夹紧元件的数量及其位置,以同时最小化重力效应产生的工件变形和零件尺寸偏差导致的装配偏差,优化过程中,通过在夹紧元件候选池中加入虚拟成员,实现了对夹紧元件数量的优化。Lai^[19]以柔性钣金件焊接变形作为适应度函数,利用改进遗传算法对焊接夹具中定位器和夹紧元件的位置进行优化。Wang^[20]结合有限元方法和基于知识的遗传算法(KBGA)对钣金件测量夹具定位点布局进行了全局优化。陈蔚芳等^[21]针对薄壁件在切削加工过程中的装夹变形问题,利用有限元

方法和遗传算法对夹具布局和夹紧力进行了优化,以减小切削力和夹紧力引起的工件弹性变形。姜潮等^[22]综合考虑了加工中普遍存在的多工位状况,采用全局收敛性强的隔代映射遗传算法(IP-GA)来寻找柔性薄板件电阻点焊焊装夹具定位点的最优布局,并通过算例将隔代映射遗传算法与小种群遗传算法(μ GA)的收敛效果进行比较,验证了该方法的有效性。陆俊百等^[23]以工件加工变形最小为目标函数,通过有限元分析与遗传算法相结合的自寻优途径,实现大型薄壁件智能柔性工装系统中定位/支承阵列(图9)的全局优化。针对柔性薄板冲压件定位位置的优



图8 采用遗传算法的夹具布局优化方法流程图

Fig.8 Flowchart of fixture layout optimization method using genetic algorithm

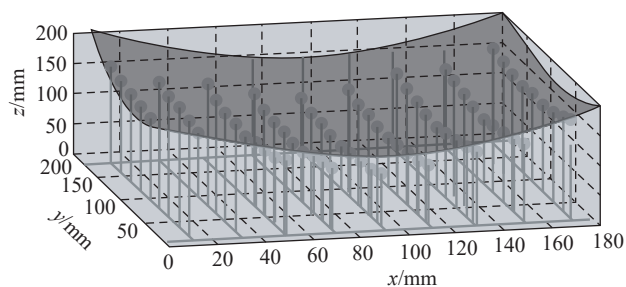


图9 薄壁件智能柔性工装系统定位/支承阵列示意图^[23]

Fig.9 Schematic diagram of positioning/supporting array of thin-walled intelligent flexible fixture system^[23]

化设计问题,石志云等^[24]在考虑了工件制造误差及定位元件误差的基础上,基于“N-2-1”定位原理,利用ANSYS软件和遗传算法对定位方案中第一基准面“N”个定位点的数量和位置进行优化,但并没有将定位点的数量和位置耦合在一起进行同步优化,而是采用了预设“N”值,迭代搜索,逐次递加的异步优化方式,计算量大,优化效率低。梁建光^[25]使用有限元分析软件HyperWorks和自适应遗传算法对蒙皮切边的多支承柔性夹具布局和夹紧力进行同步优化,以减少蒙皮的铣削切边加工变形,但将加工过程简化为在加工点施加加工静力,不足以完全反映现实波动铣削力的情况。Xiong等^[26]针对大型航空薄壁件制造过程中的夹持需求,开发一种自重构的智能群夹具系统(图10),并提出了一种新的定位准则——“N-2-1-1”定位准则(图11)。基于该准则,并结合有限元分析和采用了动态突变率的遗传算法对第一基准面上“N”个支承元件的布局进行优化,以最小化工件的加工

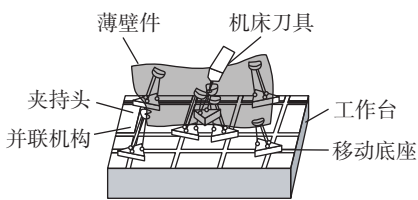


图10 自重构的智能群夹具系统结构示意图^[26]
Fig.10 Schematic diagram of self-reconfigurable swarm intelligent fixture system^[26]

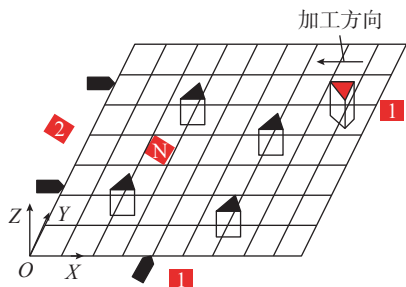


图11 “N-2-1-1”定位原理^[26]
Fig.11 “N-2-1-1” locating principle^[26]

变形。Yu等^[27]利用有限元分析软件ABAQUS模拟了不同装夹方案下航空接头类薄壁件在夹具夹紧力和刀具切削力作用下的变形情况,并以切削路径上各节点的平均变形量最小为目标,利用遗传算法对夹具夹紧位置进行优化。针对大型壁板自动钻铆定位变形问题,齐振超等^[28]同时考虑刚性定位误差和柔性定位误差的影响,采用Monte-Carlo法模拟刚性定位误差的分布,通过齐次坐标变换分析刚性误差的传递过程,利用有限元分析软件ABAQUS计算柔性变形误差。然后综合定位变形误差预测模型,以壁板最大变形及关键特征点的变形为目标函数,采用带精英策略的非支配解排序遗传算法(NSGA-II)对定位点布局进行多目标优化。Ahmad等^[29]以工件的应变能作为目标函数,结合有限元分析和遗传算法对汽车钣金件的夹具布局进行优化,以提高其在焊接过程中的刚度。Chen等^[30]提出了一种基于N-M原理的汽车仪表盘柔性夹具,并以汽车仪表盘最大变形为优化目标,提出了一种遗传算法与有限元分析相结合的柔性夹具布局优化方法。在此基础上,Liu等^[31]以汽车仪表盘最大变形和平均变形的加权和作为目标函数,利用有限元分析和遗传算法确定夹具元素的最优位置。为减小飞机弱刚性薄壁件在自重等外载作用下的最大变形,李西宁等^[32]结合有限元分析和遗传算法对

其夹持布局和夹紧顺序进行了同步优化。

上述研究均是面向金属弱刚性薄壁件,张秋月等^[33]针对飞机复合材料结构装配时出现间隙的问题,提出了基于遗传算法的压紧力大小和布局的优化算法,以复合材料翼盒(图12(a))为研究对象,建立了基于内聚力单元的有限元模型;然后,以复合材料分层损伤发生为约束条件,利用遗传算法对复合材料壁板上的压紧力大小和布局(图12(b))进行优化,以提高复材壁板的装配间隙消除率。在此基础上,为了更好地控制复材翼盒的装配应力,保证产品性能,Zhang等^[34]在压紧力大小和布局优化过程中考虑了复材零件变形和成型缺陷的影响,并同时以间隙消除率和总压紧力值作为优化的目标函数,采用有限元分析和改进的遗传算法对该问题进行了求解。

遗传算法的优点是搜索空间大、容易处理大规模优化问题;优化过程中只使用设计变量和目标函数值,不需要梯度或其他辅助信息,实现相对简单,特别适合夹具布局优化设计这种非线性、非凸性、不连续性的优化问题;而且使用概率转移规则来寻找新的设计点进行探索,可以有效避免局部极小值,易于发现全局最优解。但遗传算法需要进行大量的函数评估,有限元分析计算量过大,而且容易出现早熟;遗传算法的性能很大程度上取决于交叉概率、变异概率、种

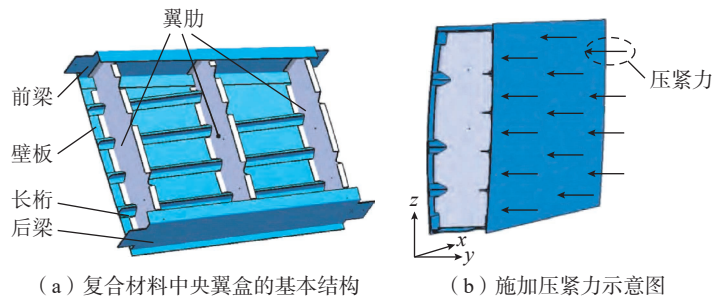


图12 通过施加压紧力消除复合材料壁板装配间隙^[33]
Fig.12 Eliminating composite panel assembly gap by applying clamping force^[33]

群大小和最大迭代次数等参数的选择,但目前这些参数主要是通过试错法来确定,还缺乏相应的理论依据。

1.2.2 采用粒子群算法的夹具布局优化方法

粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)是一种模拟鸟群或鱼群社会行为的群智能和元启发式算法^[35]。相比于遗传算法,粒子群算法保留了基于种群的全局搜索策略,采用简单的速度-位移模型代替复杂的遗传操作,同时其特有的记忆功能使得算法可动态跟踪当前搜索情况来调整搜索策略,对复杂的工程问题表现出较好的寻优能力^[36-37],因此逐渐被应用于解决夹具布局优化设计问题,具体流程如图13所示。

Dou等^[38]利用有限元分析软件ANSYS建模分析了工件在时变加工力作用下的动态响应,并以加工区域内工件的最大弹性变形为目标,分别采用粒子群算法和遗传算法对动态条件下夹具元件(定位器和夹紧元件)的布局进行优化;为了提高遗传算法和粒子群算法的性能,提出了一种在基本遗传算法中引入共享和自适应突变得到的改进遗传算法(IGA)和一种将基本粒子群算法与自适应变异相结合得到的改进粒子群算法(IPSO);最后,通过3个布局优化案例,对GA、IGA、PSO、IPSO的性能进行测试和比较,结果表明,综合全局寻优能力和算法收敛速度,IPSO要优于GA、IGA和PSO(图14)。王鹏等^[39]以汽车车门零件的测量夹具为研究对象,以有限元分析软件NX Nastran计算的零件最大变形量作为目标函数,通过粒子群算法对夹具的定位点进行优化。钱彦懿^[40]以结构整体应变能代替节点法向变形作为优化目标,结合基于ABAQUS的参数化有限元分析和粒子群算法,实现对超大薄壁曲面结构

装夹布局方案的快速精准寻优。

相比于遗传算法,粒子群算法的优势在于收敛速度快,夹具布局优化

过程中需要的函数评估次数少,有限元分析计算量小,而且参数数目少,操作简单。但粒子群算法缺少突变

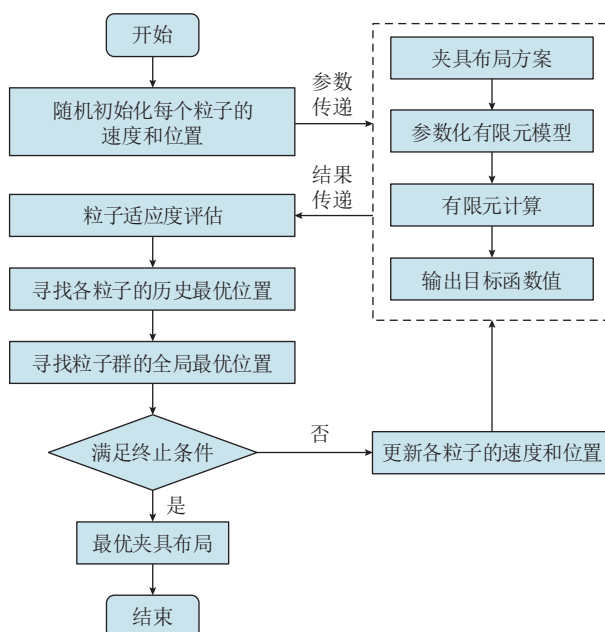
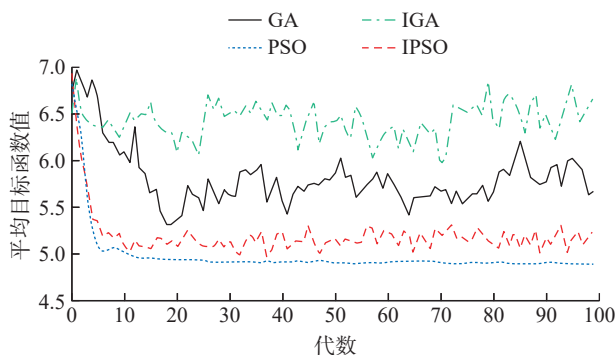
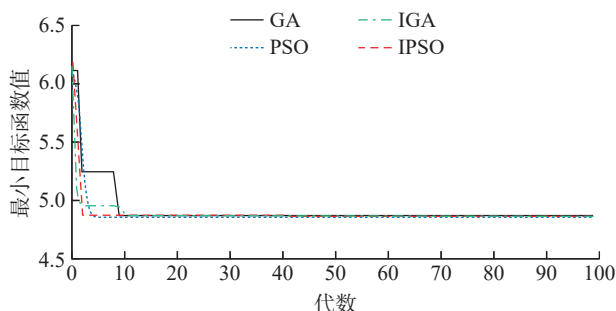


图13 采用粒子群算法的夹具布局优化方法流程图

Fig.13 Flowchart of fixture layout optimization method using particle swarm optimization algorithm



(a) 优化过程中平均目标函数值变化图



(b) 收敛曲线图

图14 GA、IGA、PSO、IPSO 夹具布局优化算法对比^[38]

Fig.14 Comparison of GA, IGA, PSO and IPSO fixture layout optimization algorithms^[38]

等可以跳出局部最优的算子,优化过程中容易出现早熟收敛的问题^[36-37]。

1.2.3 采用蚁群算法的夹具布局优化方法

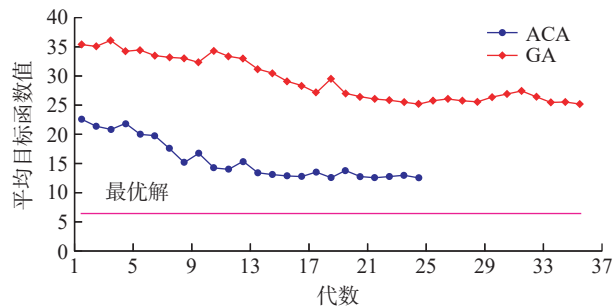
蚁群算法(Ant colony algorithm, ACA)是一种模拟蚂蚁觅食行为的群智能和启发式全局优化算法^[41]。蚁群算法最早用来求解TSP问题, McMullen^[42]和 Jeyaraman^[43]等证明了该算法可以用于解决工程优化问题。随后,该算法被一些学者用于优化薄壁件的夹具布局。

Prabhakaran等^[44]采用有限元法对加工过程中的工件变形进行建模分析,并分别使用蚁群算法和遗传算法优化夹具布局,以最小化工件的弹性变形。此外,该研究在同一工件几何形状上定义了3个不同节点数的系统,对遗传算法和蚁群算法的性能进行测试和比较。Padmanaban等^[45]首先利用MATLAB开发了一个内建有限元求解器以求解加工过程中夹紧力和动态加工力引起的工件弹性变形(工件沿平面的振动),然后以定位器和夹紧元件的位置为设计变量,以工件动态响应为目标函数,采用蚁群算法和遗传算法对其夹具布局进行优化,并通过两个例子中不同的节点系统对蚁群算法和遗传算法的性能进行了测试。Prabhakaran^[44]和 Padmanaban^[45]等的研究均发现,蚁群算法总能比遗传算法以更快的速度得到更好的解(图15)。在此基础上,Padmanaban等^[46]还比较了连续插值与离散插值方法对优化结果的影响,分析表明,基于蚁群算法的连续夹具布局优化方法能得到更优的解,但其收敛速度要慢于基于蚁群算法的离散夹具布局优化方法(图16)。周涛等^[47]提出了一种基于改进蚁群算法的薄壁件柔性工装布局优化方法。该方法采用有限元分析预测工装夹紧力作为静态载荷引起的工件弹性接触变形,并将遗传算法集成到蚁群算法中,采用

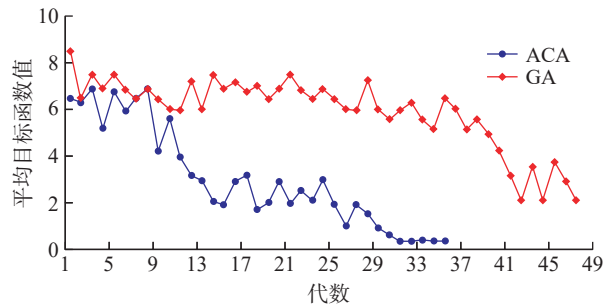
蚁群算法求解初始种群,采用遗传算法对工装定位/支承阵列的布局进行优化。Cheng等^[48]在考虑了航空薄壁结构自动铆接过程中定位误差和铆接偏差的情况下,提出了一种有效的分层夹具布局方法,该方法将夹具布局问题简化为基点和定位点优化问题,并用一种新的分层矩阵来表示;然后结合遗传算法和蚂蚁算法的优点,利用遗传蚁群算法(Genetic algorithm and ants algorithm, GAAA)求解最优夹具布局,以减小关键特征

点处的装配偏差;最后,以机翼壁板为例验证了该方法的有效性和鲁棒性。Khodabandeh等^[49]提出了一种基于多目标蚁群算法和有限元方法相结合的夹具布局优化方法,同时最大限度地减少板材的装配偏差和夹具的数量。

上述文献研究结果表明,采用蚁群算法的夹具布局优化方法具有鲁棒性强、收敛速度快等优点。而且在优化过程中,蚁群算法还容易与遗传算法等其他优化算法相结合,在一定



(a) Prabhakaran等研究结果^[44]



(b) Padmanaban等研究结果^[45]

图15 GA、ACA收敛曲线对比

Fig.15 Comparison of GA and ACA convergence curves

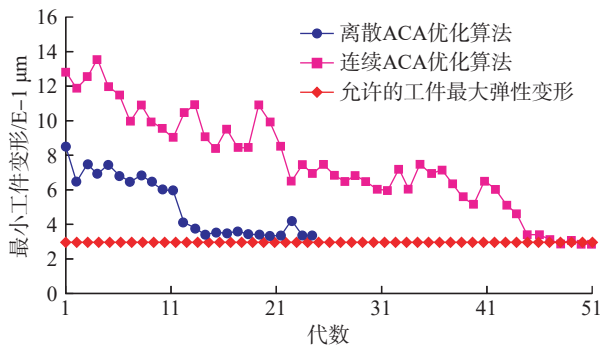


图16 离散ACA、连续ACA收敛曲线对比^[46]

Fig.16 Comparison of discrete ACA and continuous ACA convergence curves^[46]

程度上可以提高最终解的质量。

1.2.4 采用其他元启发式算法的 夹具布局优化方法

除了传统的遗传算法、蚁群算法、粒子群算法,一些学者逐渐将社会辐射算法、萤火虫算法、花授粉算法、布谷鸟搜索算法、鲸鱼优化算法等近年发展起来的新型元启发式算法应用于薄壁件夹具布局优化设计。

社会辐射算法(Social radiation algorithm, SRA)是一种模拟社会中人类竞争的群体智能和元启发式算法^[50]。为了减小复杂钣金件在焊接装配过程中的变形,Xing等^[50]提出了一种基于社会辐射算法的夹具布局优化方法,首先利用工程经验剔除不可行节点,然后利用SRA生成最优可行区域,最后通过在全局区域中选择可行节点,得到最优夹具布局。该研究的优化结果表明,SRA比GA具有更高的效率和精度。随后,Xing等^[51]又以关键测量点处的装配公差为目标函数,利用SRA和GA对夹具定位点的位置进行优化,以减少复杂钣金件在焊接装配过程中的尺寸偏差。在该研究中,基于GA的夹具布局优化方法得到了更优的解。在此基础上,为了同时减小复杂钣金件的装配公差和重力变形,Xing等^[52]以关键测量点处的变形和装配公差为双重目标,将非支配排序算法与SRA算法相结合,提出了一种新的非支配排序社会辐射算法(Non-domination sorting social radiation algorithm, NSSRA)来优化夹具定位点布局。在该研究中,相比于NSGA-II,NSSRA表现出更高的效率和精度。

为了减小铝合金薄板件在外周铣削过程中的最大变形,Liu等^[53]提出一种基于有限元方法和启发式规则的夹具布局优化方法,该方法包括两个阶段:在第1阶段中,通过在最大变形位置添加定位器来确定定位器的初始数量及位置;第2阶段在

初始布局的基础上,采用开发的启发式规则优化定位器的数量和位置(图17)。

萤火虫算法(Firefly algorithm, FA)是一种基于自然界萤火虫发光的生物学特性发展而来的新型仿生群智能优化算法^[54],具有参数较少、模型简单、收敛速度快且稳定性较好等特点^[55]。王仲奇等^[56]以工件在自重下的最大变形量为目标函数,结合有限元分析软件ABAQUS和萤火虫算法实现了飞机曲面结构件装配定位布局的迭代优化。

花授粉算法(Flower pollination algorithm, FPA)是一种模拟自然界中花朵授粉现象的元启发式群智能优化算法^[57],具有调节参数少、寻优能力强、实现简单等优点^[58]。王仲奇等^[59]结合花授粉算法和参数化有

限元分析有效地求解了自重作用下曲面薄壁件的夹具布局优化问题,在优化过程中,通过整体应变能来衡量工件所有方向上的变形,并以此作为目标函数;优化结果表明,相比于GA,FPA可提供更精确和更稳定的结果,而且收敛速度也快于GA(图18)。

布谷鸟搜索算法(Cuckoo search algorithm, CS)是一种基于布谷鸟的幼雏寄生并结合一些鸟类和果蝇的Lévy飞行行为发展而来的元启发式算法^[60]。与GA和PSO相比,CS只有一个控制参数需要微调,而且一些特定问题的优化收敛速度对该参数并不敏感^[61]。因此,与其他进化算法相比,CS具有更强的鲁棒性和通用性。Yang等^[62]通过将布谷鸟搜索算法与有限元分析软件ABAQUS相结合,获得了最优的钣金件夹具定位布局,从而有效减小了钣金件在自重作用下的整体变形;同时,该研究还比较了布谷鸟搜索算法、粒子群算

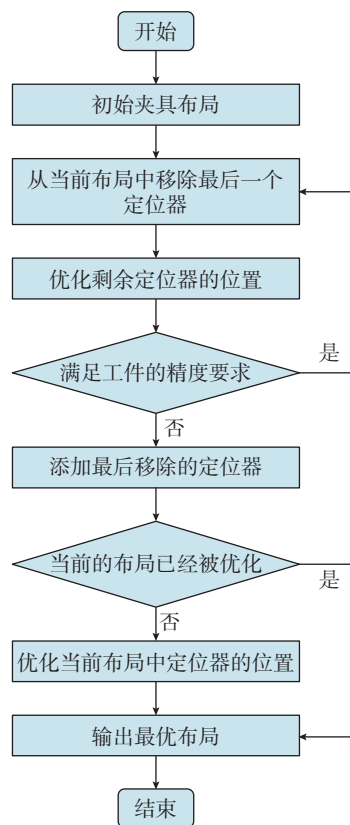
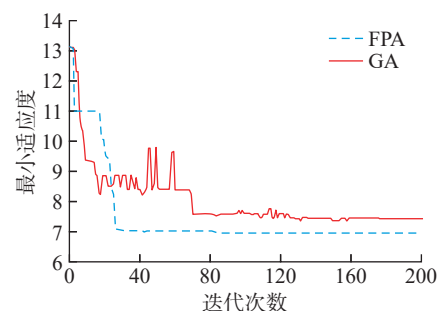
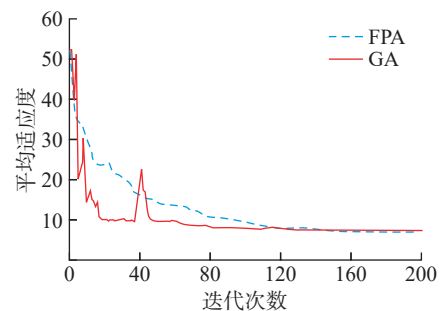


图17 基于启发式规则的夹具布局优化流程图^[53]

Fig.17 Flowchart of fixture layout optimization based on heuristic rules^[53]



(a) 最小适应度收敛曲线



(b) 平均适应度收敛曲线

图18 FPA、GA收敛曲线对比^[59]

Fig.18 Comparison of FPA and GA convergence curves^[59]

法和遗传算法对钣金件夹具定位布局优化问题的求解效果(图 19),结果表明,在解的质量、优化过程的鲁棒性及通用性上,布谷鸟搜索算法优于粒子群算法和遗传算法。

鲸鱼优化算法(Whale optimization algorithm, WOA)是一种模拟自然界中座头鲸捕猎机制的新型元启发式群体智能优化算法^[63],具有调整参数少、寻优能力强、实现简单等优点^[64]。Li等^[65]以曲面薄壁件的应变能为目标函数,结合有限元分析和鲸鱼优化算法对其夹具定位器的数量和位置进行了优化。

上述研究尝试性地利用社会辐射算法等新型元启发式算法对薄壁

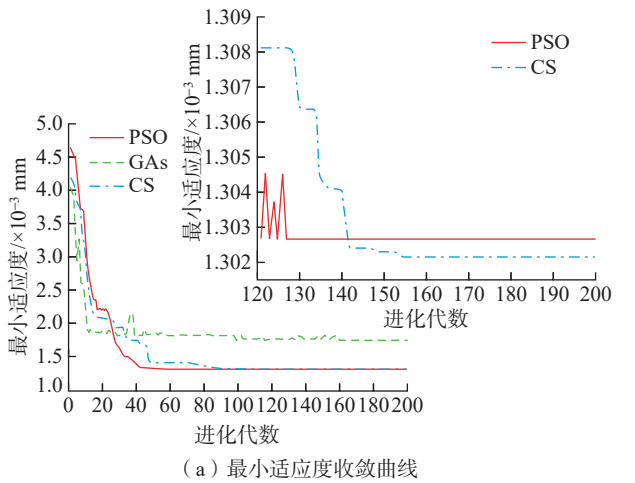
件的夹具布局进行优化,并将其与传统的元启发式优化算法进行了比较。但总体来说,这些优化算法在夹具布局优化问题中应用较少,其优化效率、适用性,特别是在面对高维复杂设计变量的夹具布局优化问题时的适用性还有待进一步的研究。

1.3 采用其他类型优化算法的夹具布局优化方法

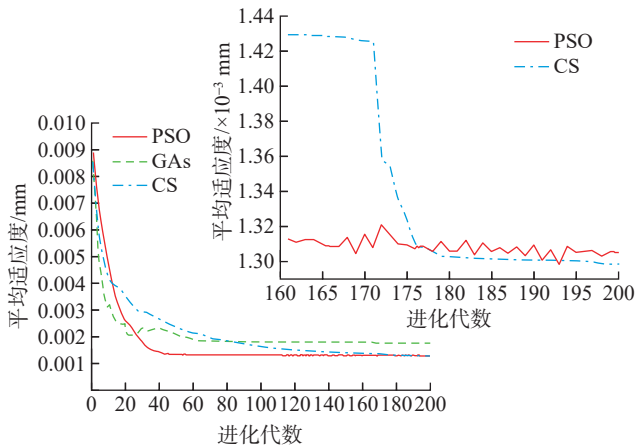
拓扑优化(Topology optimization, TO)是一种根据给定的负载情况、约束条件和性能指标,在给定的区域内对材料分布进行优化的数学方法,是结构优化的一种。其最终思想是将寻求结构布局最优拓扑问题转化为设计域内寻求结构材料分布或传

力路线最优的问题^[66-67],与数学规划算法及元启发式算法相比,更容易实现夹具元件数量与位置的同步优化。周泽斌^[68]结合有限元方法和拓扑优化技术,对薄壁件切削加工过程中定位点和夹紧点的位置进行优化,以达到减小加工变形的目的,基本流程如图 20 所示。Yang等^[69]提出一种航空薄壁件夹具定位布局的拓扑优化方法,以确定其装配过程中主基准面上定位器的数量和位置,从而使其变形最小化。该方法首先建立了以航空薄壁件刚度为目标函数,以定位结构体积为约束的拓扑优化模型;其次,将航空薄壁件与定位结构视为一个整体,利用 ABAQUS 拓扑优化模块(ATOM),采用基于变密度法的拓扑优化方法对定位结构进行优化;然后,根据所得到的拓扑结构进行后续模型重构,实现最优夹具定位布局;最后,以铝合金机身蒙皮为例,验证了该方法的有效性。

模式追踪采样方法(Mode-pursuing sampling method, MPS)是一种基于抽样技术的优化算法,利用 Fu等^[70]的样本方法来搜索全局最优解,且优化过程中只使用目标函数值搜索设计空间。当设计变量较少



(a) 最小适应度收敛曲线



(b) 平均适应度收敛曲线

图 19 CS、GA、PSO 收敛曲线对比^[62]

Fig.19 Comparison of CS, GA and PSO convergence curves^[62]

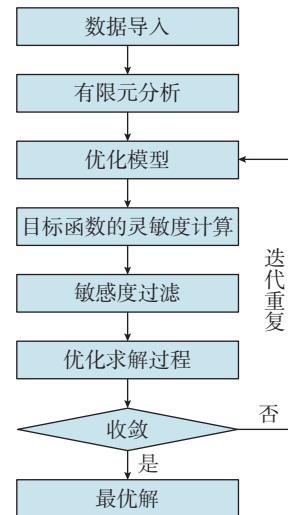


图 20 拓扑优化的基本流程图^[68]

Fig.20 Flowchart of topology optimization^[68]

时, MPS 所需目标函数的评价次数要少于 GA, 更适合与计算代价昂贵的有限元分析相结合, 从而对薄壁件的夹具布局进行优化。Liao 等^[71] 在考虑了零件制造偏差和夹具定位偏差的情况下, 将模式追踪采样算法与有限元分析相结合, 同时搜索最优夹具布局 and 连接位置, 以最小化钣金件的装配变形。与数学规划算法和遗传算法等其他算法相比, 该方法大大减少了有限元分析的计算量。

1.4 基于有限元模型的夹具布局优化方法特点分析

有限元方法是薄壁件夹具布局优化设计中应用最为广泛的目标函数建模方法, 基于该方法的夹具布局优化研究具有如下特点。

(1) 大多数研究直接使用 ANSYS、ABAQUS 或 MSC/NASTRAN 等商业有限元分析软件来计算目标函数值。有限元分析软件的优点是建模简单, 缺点是只能给出近似值, 值的精度很大程度上依赖于所选择的有限元软件。

(2) 内置有限元求解器的计算精度明显高于有限元分析软件。但是只有少数学者研究有限元方程, 并开发相应的内置有限元求解器来计算目标函数值。

(3) 不管是用商业有限元分析软件还是内置有限元求解器, 基于有限元方法的夹具布局优化方法往往需要大量调用有限元求解器, 导致计算成本高、优化效率低, 严重影响产品的制造周期与成本。

(4) 夹具布局优化过程中, 在完成目标函数的建模之后, 需要结合使用优化算法对夹具布局进行优化。各优化算法的特点如表 2 所示。上述研究大多采用元启发式算法对薄壁件夹具布局进行优化。其中, 遗传算法是应用最为广泛的优化算法, 可作为其他优化算法性能的评价基准。

(5) 优化算法产生的解空间为连续的有理数空间, 而在有限元模型

表 2 各优化算法的特点

Table 2 Characteristics of each optimization algorithm

优化算法		特点
数学规划方法		技术成熟; 鲁棒性好; 只能给出一个改进解, 容易陷入局部最优; 需要初值及目标函数的梯度信息
元启发式算法	遗传算法	搜索空间大; 不需要梯度或其他辅助信息; 可以有效避免局部极小值; 目标函数评估次数多; 容易出现早熟; 调节参数多
	粒子群算法	收敛速度快; 目标函数评估次数少; 调节参数少; 操作简单; 缺少可以跳出局部最优的算子; 容易早熟收敛
	蚁群算法	收敛速度快; 鲁棒性好; 易于和其他算法结合使用
	社会辐射算法	优化效率高
	萤火虫算法	调节参数较少; 模型简单; 收敛速度快; 稳定性较好
	花授粉算法	调节参数少; 寻优能力强; 实现简单
	布谷鸟搜索算法	鲁棒性和通用性好; 调节参数少, 且部分问题对该参数不敏感
	鲸鱼优化算法	调节参数少; 寻优能力强; 实现简单
拓扑优化算法		更容易实现夹具元件数量与位置的同步优化
模式追踪采样方法		优化过程中只使用目标函数值搜索设计空间; 目标函数评估次数相对要少

中夹具元件和工件之间的接触点被限制在模型节点, 其位置为离散域, 节点映射时需进行一定的近似处理。因此, 模型网格划分粗细直接影响优化问题的求解精度。

目前, 对薄壁件夹具布局优化问题的研究可分为离散夹具布局优化方法和连续夹具布局优化方法。相比于离散夹具布局优化方法, 连续夹具布局优化方法能给出更好的解, 但其收敛速度慢于离散夹具布局优化方法。

2 基于代理模型的夹具布局优化方法

针对有限元方法成本高、效率低的问题, 结合代理模型与优化算法的薄壁件夹具布局优化方法成为了新的研究关注点。代理模型(Surrogate model, SM) 是基于统计理论, 并根据输入数据和输出响应数据构造的数学近似模型, 用于代替计算复杂度高且时间长的原模型^[72]。该方法的基本思想在于使用少量的样本数据构建计算代价较小的代理模型, 随后

在优化迭代中应用代理模型代替成本高昂的原模型, 近似计算目标函数值, 从而达到减少计算成本, 提高优化效率的目的^[73]。基于代理模型的夹具布局优化方法基本流程如图 21 所示。目前较为常用的代理模型有响应面模型、人工神经网络模型、Kriging 模型和支持向量回归模型及上述模型的改进或组合等。

2.1 采用响应面模型的夹具布局优化方法

响应面模型(Response surface methodology, RSM) 是一种利用多项式函数拟合设计空间的经验统计模型^[74-76], 也是发展最早、最常用的代理模型。

邢彦锋^[77] 和 Xing^[78] 等基于均匀采样和有限元分析生成的有限样本集, 建立了金属薄板件装配夹具定位方案与零件节点变形之间的响应面模型。在建模过程中, 采用径向基函数(Radial basis function, RBF) 作为响应面模型的基函数, 提高了拟合的精度。Bi 等^[79] 为提高装配过程中大型机身壁板的刚度, 减少重力等

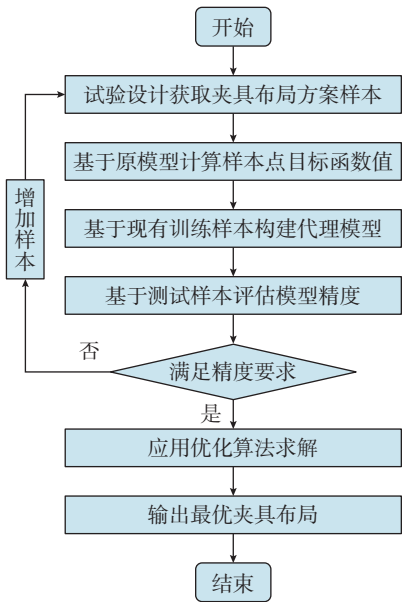


图 21 基于代理模型的夹具布局优化方法流程图

Fig.21 Flowchart of fixture layout optimization method based on surrogate model

因素引起的装配变形,提出了一种基于多工艺接头的机身壁板离散支撑布局优化方法,根据混合均匀试验设计原则,通过建立壁板与工艺接头的有限元模型,得到了不同工艺接头支撑布局下的壁板应变能。然后利用偏最小二乘回归分析法,建立了工艺接头支撑参数与壁板应变能之间的多元回归模型,进而得到了最优工艺接头支撑布局。于金等^[80]以航空薄壁件多点柔性工装系统的支撑单元布局为设计变量,运用多元非线性回归方法建立以薄壁件的最大变形和平均变形为指标的铣削加工变形预测模型。为简化计算,采用加权求和的方法将多目标预测模型转化为单目标预测模型,并采用遗传算法进行优化计算,从而得到理论最优的支撑单元布局。为保证高速列车车体侧壁的焊接质量, Yu 等^[81]建立了夹具定位参数与其焊接变形之间的二阶多项式响应面模型,并基于该模型对其夹具布局进行了优化。

响应面模型的优势在于数学理论基础充分扎实,系统性、实用性强,

适用广泛,简单直观且易于构建,只需要较少的样本就能在局部范围内比较精确地逼近函数关系,适合设计变量简单的低维夹具布局优化问题。但是对于设计变量复杂的高维夹具布局优化问题,其建模拟合效果不如神经网络等方法。

2.2 采用人工神经网络的夹具布局优化方法

神经网络(Artificial neural network, ANN)是模拟人脑神经系统对复杂信息处理机制的一种数学模型^[82],具有通用逼近、并行分布式处理、自学习、自组织、自适应、多变量系统等特点,并拥有良好的鲁棒性和全局性,被广泛用于模拟复杂的工程建模问题。目前为止,采用误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络(Back propagation neural network, BPNN)是夹具布局优化设计中应用最为广泛的一种神经网络类型(图 22)。

刘玉梅等^[83]耦合 BP 神经网络和遗传算法对铝合金薄板件装夹夹紧点位置进行优化,以减小其铣削过程中的装夹变形。Vasundara 等^[84]构建了 BP 神经网络来预测不同夹具布局下工件的最大弹性变形。Selvakumar 等^[85]采用有限元法计算矩形框工件在不同夹具布局下的加工变形,并将计算结果作为训练样本,构建 BP 神经网络预测模型,最后结合设计对定位器和夹紧元件的位置进行优化,以最小化夹紧力和加工力引起的工件最大弹性变形。秦国华^[86]和 Qin^[87]等针对框类薄壁件的多重装夹过程(图 23)建立三维有限元模型,并利用有限元法获取训练样本;然后借助 BP 神经网络的非线性映射能力,建立了给定夹紧力条件下装夹顺序、定位元件位置与装夹变形之间的非线性映射模型;最后,以薄壁件的最大装夹变形为目标函数,利用遗传算法对其装夹布局进行优化。Lu 等^[88]在有限元分析的基础上,建立 BP 神

经网络模型,预测不同夹具布局 and 不同定位器误差下的钣金件变形,并利用遗传算法求解定位器的最优位置。为了减小大型复材机身壁板(图 24)在装配定位过程中的变形及应力、控制装配工装成本, Wang 等^[89]提出一种结合 BP 神经网络和 NSGA-II 算法的离散夹持布局多目标优化方法。该方法首先采用一种二进制整数型变量来表征夹持布局,实现了夹持点数量和位置耦合表征;然后构建 BP 神经网络模型来描述复材机身壁板夹持布局与最大重力变形/最大 Mises 应力之间的非线性映射关系;最后以复材机身壁板的许用变形量

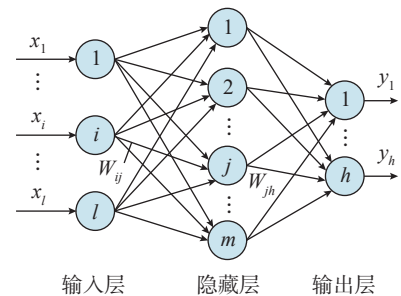
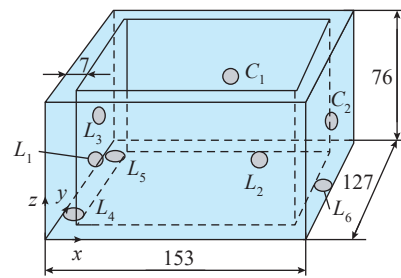


图 22 3层 BP 神经网络结构示意图
Fig.22 Schematic diagram of 3-layer BP neural network



注: L 为定位器; C 为夹紧元件。

图 23 框类薄壁件的装夹布局示意图(mm)^[86]
Fig.23 Fixture layout diagram of frame-type thin-walled workpieces(mm)^[86]

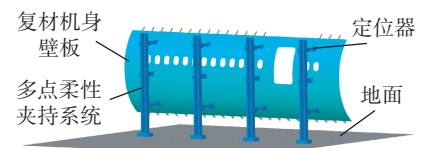


图 24 大型复材机身壁板夹持布局示意图^[89]
Fig.24 Fixturing layout diagram of large composite fuselage panel^[89]

为约束条件,以应力最小和夹持点数目最少作为优化目标,采用 NSGA-II 算法寻找夹持布局的 Pareto 最优解集。

BP 神经网络的优点是具有较强的逼近、泛化能力及较好的容错性。理论上可以证明,一个 3 层 BP 神经网络能够以任意精度逼近任何一个多变量函数^[90]。因此, BP 神经网络特别适合对设计变量复杂的高维夹具布局优化问题进行建模。但 BP 神经网络同时也存在结构设置参数多、收敛速度慢、容易陷入局部最优且过拟合的缺点。

径向基函数神经网络(Radial basis function neural network, RBFNN)是一种单隐层、以函数逼近为基础的前馈神经网络(图 25)^[91]。其结构简单、训练简洁、学习收敛速度快,函数逼近、模式识别和分类能力都优于 BP 神经网络,而且还能克服局部极小值问题。Wang 等^[92]分别构建了 BP 神经网络和 RBF 神经网络来预测不同夹具定位布局下钣金件的法向变形,首先采用均匀采样法生成样本点,并借助有限元分析构造样本数据集;然后,基于样本集分别构建了 BP 神经网络预测模型和 RBF 神经网络预测模型;实例研究表明,与使用同样样本集训练和测试的 BP 神经网络相比,基于 RBF 神经网络的预测模型精度更高,更稳定(图 26)。在此基础上,将 RBF 神经网络预测模型与蝙蝠算法结合,利用蝙蝠算法求解主基准面上“N”个夹具定位器的最优位置,从而最小化钣金件的弹性变形^[93]。Ma 等^[94]构建了 RBF 神经网络来预测汽车车身钣金件在不同夹具定位布局下的重力变形,并利用遗传算法对其夹具定位布局进行了优化。王鹏等^[95]提出了一种基于 NSGA-II 与 RBF 神经网络的车身薄板件定位布局优化方法,该方法首先以薄板定位时的偏差传递路径最小和稳定性最高为优化目

标,应用 NSGA-II 算法优化前 3 个定位点的布局;然后在有限元样本的支持下,构建 RBF 神经网络预测模型,并结合粒子群算法对第 4 个定位点的位置进行优化,以减小其最大装夹变形。

2.3 采用其他代理模型的夹具布局优化方法

除了常用的响应面模型、人工神经网络模型, Kriging 模型、支持向量回归等机器学习模型也广泛应用在薄壁件的夹具布局优化中。

Kriging 模型是一种源于地质统计学的无偏估计模型,将确定性计算模型的输出建模为随机过程的实现,是一种半参数模型,由代表整体趋势的回归项和代表偏离的随机过程项构成^[96]。与其他代理模型相比, Kriging 模型不仅能够给出未知点处的预测值,还能同时给出度量预测值

可信程度的预测方差。此外,对于非线性程度较高的复杂问题, Kriging 模型往往也能取得比较好的拟合效果。Yang 等^[97]基于拉丁超立方抽样和有限元分析生成的有限样本集,分别建立了 Kriging 模型和 BP 神经网络模型来近似夹具定位布局与自重作用下钣金件整体变形之间的隐式函数关系;通过对比,基于相同训练数据集的 Kriging 模型预测精度更高,稳定性更好(图 27);随后,结合布谷鸟搜索算法,对钣金件夹具定位布局进行了优化。李诚等^[98]以薄壁件在自重作用下的应变能为优化目标,提出一种基于 Kriging 模型和花授粉算法的夹具定位布局优化方法。

支持向量机(Support vector machine, SVM)是一种基于小样本统计学习理论的机器学习方法^[99]。SVM 按照其功能的不同分为支持

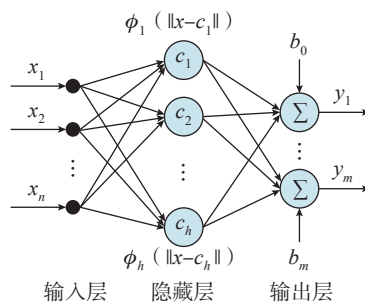


图 25 RBF 神经网络结构示意图^[91]
Fig.25 Schematic diagram of RBF neural network^[91]

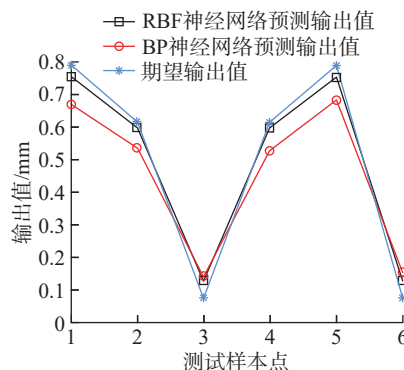
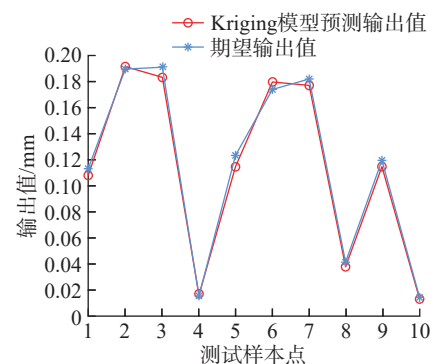
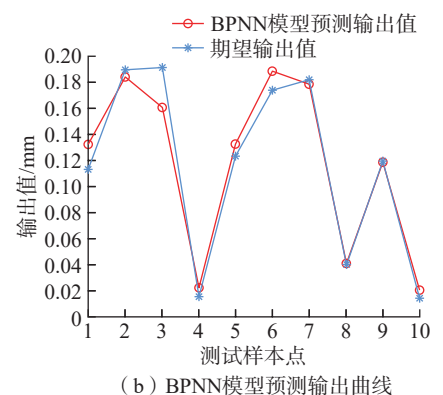


图 26 BP 和 RBF 神经网络预测精度对比^[92]
Fig.26 Comparison of prediction accuracy between BP and RBF neural network^[92]



(a) Kriging 模型预测输出曲线



(b) BPNN 模型预测输出曲线

图 27 Kriging 和 BPNN 模型预测精度对比^[97]
Fig.27 Comparison of prediction accuracy between Kriging and BPNN^[97]

向量回归机(Support vector machine for regression, SVR)与支持向量分类机(Support vector machine for classification, SVC)两大模型。其中,SVR模型主要用于回归预测建模。该模型最终决策函数只由少数的支持向量所确定,计算的复杂性取决于支持向量的数目,而不是样本空间的维数,这在某种意义上避免了“维数灾难”^[100]。因此,SVR模型在解决设计变量复杂的高维夹具布局优化问题时非常有效,特别是在设计变量维度大于样本数时依然有很好的效果。Yu^[101]利用SVR建立了柔性钣金件夹具定位布局与装配偏差之间的预测模型。杨元等^[102]以航空薄壁件夹具定位点位置为设计变量,以整体应变能为目标函数,基于拉丁超立方抽样和有限元分析生成的有限样本集构建了基于SVR的夹具定位布局优化预测模型。与相同训练样本和测试样本下的RBF神经网络预测模型相比,基于SVR的预测模型精度更高(图28)^[6]。在此基础上,又分别建立了薄壁件整体变形和最大变形的SVR预测模型,并以此作为评价函数,采用NSGA-II算法对夹具定位布局进行了多目标优化,并得到了帕累托最优解集^[103]。

为了有效控制复材机身在装配过程中的形状偏差,Du等^[104]提出了一种基于稀疏学习模型的夹持器布局优化方法。该方法首先建立了夹持器布局及夹紧力与复材机身形状偏差之间的稀疏学习模型;然后开发了一种结合二分搜索法和交替方向乘子法的模型参数估计算法,以确定夹持器的最优位置;最后采用内点法对夹紧力进行了优化。

2.4 基于代理模型的夹具布局优化方法特点分析

由第2.1~2.3节中综述的文献可知,在薄壁件的夹具布局优化设计过程中,代理模型作为一种目标函数的建模方法逐渐得到了越来越广泛的

应用。基于代理模型的夹具布局优化方法具有如下特点。

(1)与有限元分析耦合优化算法的夹具布局优化方法相比,基于代理模型的夹具布局优化方法确实能够在很大程度上降低计算成本,有效提高优化设计的效率。

(2)现有的应用到薄壁件夹具布局优化设计的各代理模型特点如表3所示。其中,响应面模型和人工神经网络模型是应用较为广泛的代理模型。

上述研究中,用于训练代理模型的样本大部分是采用有限元分析计算得到的。因此,基于代理模型的夹具布局优化方法求出的最优解与有限元分析相比存在偏差,其精度不如基于有限元方法的夹具布局优化方法。

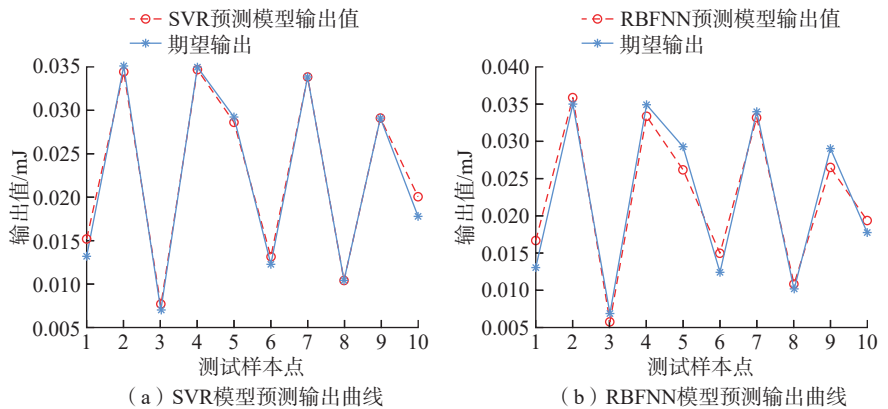


图28 SVR和RBFNN模型预测精度对比^[6]
Fig.28 Comparison of prediction accuracy between SVR and RBFNN^[6]

表3 各代理模型的特点
Table 3 Characteristics of each surrogate model

代理模型	特点	
响应面模型	数学理论基础充分扎实;系统性、实用性强;适用广泛;简单直观且易于构建;所需样本少;适合设计变量简单的低维夹具布局优化问题;对设计变量复杂的高维夹具布局优化问题,其建模拟合效果较差	
人工神经网络	BPNN	逼近、泛化能力强;容错性好;适合设计变量复杂的高维夹具布局优化问题;结构设置参数多;收敛速度慢;容易陷入局部最优且过拟合
	RBFNN	结构简单;训练简洁、学习收敛速度快;函数逼近、模式识别和分类能力都优于BPNN;可以克服局部极小值问题
Kriging模型	可以给出度量预测值可信程度的预测方差;对于非线性程度较高的复杂问题,具有比较好的拟合效果	
SVR模型	所需样本少;适合设计变量复杂的高维夹具布局优化问题	

将薄壁件的动态特性转换成静态特性来考虑,比如通过减小工件变形、提高工件夹具系统的刚度来抑制工件的振动。

(3) 现有的文献主要是在夹具元件数目一定的情况下优化夹具元件的位置,并没有把夹具元件的数量和位置耦合在一起进行考虑,而且也缺乏对装夹顺序的研究。

(4) 现有研究大多将薄壁件方向的总体变形或最大变形作为优化目标,忽略了其他方向的变形情况。此外,很少有研究在优化过程中考虑薄壁件的应力水平。

(5) 相比于装配阶段和测量阶段,加工过程中薄壁件所受的工艺载荷较为复杂。所以,基于有限元模型的夹具布局优化方法因其计算精度高的优势被广泛应用于薄壁件的加工夹具布局优化设计中。基于代理模型的夹具布局优化方法计算成本低、优化效率高,在薄壁件的装配和测量阶段应用较多。

(6) 有限元分析耦合元启发式优化算法是目前薄壁件夹具布局优化的主流方法,基于代理模型的夹具布局优化方法近年来逐渐成为一种趋势。

基于以上特点,今后在弱刚性薄壁件的夹具布局优化研究方面还需要开展的工作如下。

(1) 复杂动态载荷作用下弱刚性薄壁件的夹具布局优化设计。在实际制造过程中,薄壁件经常承受一些复杂动态载荷。特别是在加工过程中,大多数加工操作涉及动态负载。因此,在设计薄壁件夹具布局时应充分考虑工件-夹具系统的动态特性,以提高制造精度。

(2) 弱刚性薄壁件夹具元件数量、位置及装夹顺序的同步优化。在工程应用中,为控制工装成本,夹具布局优化过程中还需同时考虑夹具元件的数量。此外,装夹顺序也会极大地影响制造过程中薄壁件的变形。因此,为实现薄壁件夹具成本和制造

精度的协同控制,需要对夹具元件数量、位置及装夹顺序进行同步优化。而如何实现夹具元件数量、位置及装夹顺序的耦合表征是其中一个重要的研究点。

(3) 以工件变形最小、内部应力水平最低为目标的复材薄壁件夹具布局多目标优化。由于具有高比强度和比刚度、优异的耐疲劳和耐介质腐蚀性,以及独特的力学性能可设计性,复合材料薄壁件得到了越来越广泛的应用。和金属薄壁件相比,其脆性强、受力易损伤,且损伤扩展机理复杂。因此,针对复材薄壁件的夹具布局优化,不能只考虑工件变形,还需考虑其内部应力水平,以防止复材薄壁件在制造过程中损伤失效。

(4) 基于物理的有限元模型校正技术。在薄壁件的夹具布局优化过程中,无论是采用基于有限元模型的夹具布局优化方法,抑或是通过有限元分析获取代理模型的训练样本,有限元模型计算精度直接影响最终的优化结果。因此,基于实际物理数据,对材料属性参数、约束条件、制造载荷等有限元模型参数进行校正将是未来的一个研究难点。

(5) 基于小样本学习理论的代理模型建模方法。随着薄壁件尺寸越来越大、结构越来越复杂,当采用基于代理模型的夹具布局优化方法来设计薄壁件的夹具布局时,训练样本的获取代价也随之增大。因此,适用于薄壁件夹具布局优化的基于小样本学习理论的代理模型建模方法是未来的一个重要研究方向。

参考文献

- [1] FITZGERALD R W. Mechanics of materials[M]. MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1982: 32-33.
- [2] 杨元. 基于先验约束的航空薄壁件定位布局规划[D]. 西安:西北工业大学, 2018: 15-16.

YANG Yuan. Research on locating layout

planning for aeronautical sheet metal part based on prior constraint[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018: 15-16.

[3] CAI W, HU S J, YUAN J X. Deformable sheet metal fixturing: Principles, algorithms, and simulations[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118(3): 318-324.

[4] BAKKER O J, PAPASTATHIS T N, POPOV A A, et al. Active fixturing: Literature review and future research directions[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(11): 3171-3190.

[5] REARICK M R. Optimal fixture design for deformable sheet metal workpieces[J]. Trans. NAMRI/SME, 1993, 11: 407.

[6] CEGLAREK D, LI H F, TANG Y. Modeling and optimization of end effector layout for handling compliant sheet metal parts[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(3): 473-480.

[7] 王运巧, 梅中义, 范玉青. 薄壁弧形零件装夹布局有限元优化[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 214-217, 223.

WANG Yunqiao, MEI Zhongyi, FAN Yuqing. Finite element optimization of machining fixture layout of thin-walled arc workpiece[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 214-217, 223.

[8] WANG Z Q, YANG Y A, KANG Y G, et al. A location optimization method for aircraft weakly-rigid structures[J]. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, 2014, 5: A18.

[9] 王少锋, 洪军, 王建国, 等. 大型薄壁件多点定位的初始布局优化算法研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 38-44.

WANG Shaofeng, HONG Jun, WANG Jianguo, et al. Initial distribution optimization for multi-point location of large thin-walled components[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5): 38-44.

[10] 王少锋, 洪军, 王建国, 等. 大型薄壁件的多点支承/定位方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 122-129.

WANG Shaofeng, HONG Jun, WANG Jianguo, et al. Multi-point location method of large-scale thin-wall component[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 122-129.

[11] CAMELIO J A, HU S J, CEGLAREK D J. Impact of fixture design sheet metal assembly variation[C]//Volume 3: 7th Design for Manufacturing Conference. Canada. ASME/DC,

2002, 36231: 133–140.

[12] CAI W. Fixture optimization for sheet panel assembly considering welding Gun variations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(2): 235–246.

[13] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975: 46–53.

[14] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1989: 21–24.

[15] KRISHNAKUMAR K, MELKOTE S N. Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(4): 579–598.

[16] VALLAPUZHA S, DE METER E C, CHOUDHURI S, et al. An investigation into the use of spatial coordinates for the genetic algorithm based solution of the fixture layout optimization problem[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(2): 265–275.

[17] VALLAPUZHA S, DE METER E C, CHOUDHURI S, et al. An investigation of the effectiveness of fixture layout optimization methods[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(2): 251–263.

[18] LIAO Y G. A genetic algorithm-based fixture locating positions and clamping schemes optimization[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217(8): 1075–1083.

[19] LAI X M. Flexible assembly fixturing layout modeling and optimization based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2004, 17(1): 89–92.

[20] WANG J A. Locators optimization for measuring fixture design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2004, 17(3): 332–335.

[21] 陈蔚芳, 倪丽君, 王宁生. 夹具布局和夹紧力的优化方法研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(12): 1413–1417.

CHEN Weifang, NI Lijun, WANG Ningsheng. Investigation on optimization method for fixture layout and clamping forces[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(12): 1413–1417.

[22] 姜潮, 韩旭, 钟志华. 电阻点焊焊装夹具定位点的优化设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 192–196.

JIANG Chao, HAN Xu, ZHONG Zhihua. Locator optimization for resistance-spot-welding fixtures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 192–196.

[23] 陆俊百, 周凯, 张伯鹏. 飞行器薄壁件柔性工装定位 / 支承阵列优化自生成研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(19): 2369–2374, 2378.

LU Junbai, ZHOU Kai, ZHANG Bopeng. Research on optimization of location/support array of flexible tooling system for aircraft large-scale thin-wall workpiece[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(19): 2369–2374, 2378.

[24] 石志云, 刘渝, 余时建. 基于遗传算法的柔性薄板冲压件定位位置优化设计[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(7): 1145–1149.

SHI Zhiyun, LIU Yu, YU Shijian. The locators' layout optimization for flexible sheet metal workpiece using the genetic algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(7): 1145–1149.

[25] 梁建光. 飞机蒙皮切边柔性夹具夹持方案的优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 41–50.

LIANG Jianguang. Study on clamping optimization of flexible fixture for aircraft skin trimming process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 41–50.

[26] XIONG L, MOLFINO R, ZOPPI M. Fixture layout optimization for flexible aerospace parts based on self-reconfigurable swarm intelligent fixture system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9): 1305–1313.

[27] YU J, ZHU X F, GAO Y L. The analysis of optimal clamping scheme based on genetic algorithm[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1055: 218–223.

[28] 齐振超, 张开富, 李原, 等. 大型壁板自动钻铆定位误差分析与优化[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3439–3449.

QI Zhenchao, ZHANG Kaifu, LI Yuan, et al. Analysis and optimization for locating errors of large wing panel during automatic drilling and riveting[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3439–3449.

[29] AHMAD Z, SULTAN T, ASAD M, et al. Fixture layout optimization for multi point respot welding of sheet metals[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018,

32(4): 1749–1760.

[30] CHEN C, SUN Y, NI J. Optimization of flexible fixture layout using $N-M$ principle[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9): 4303–4311.

[31] LIU Z, SUN Y. Fixture layout optimization for car dashboard based on $N-X$ locating principle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2022, 236(9): 1282–1292.

[32] 李西宁, 王悦舜, 李玉华, 等. 基于遗传算法的飞机弱刚性件夹持方案优化设计[J]. 航空制造技术, 2019, 62(1/2): 82–86, 94.

LI Xining, WANG Yueshun, LI Yuhua, et al. Optimization design of aircraft weak rigid parts clamping scheme based on genetic algorithm[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(1/2): 82–86, 94.

[33] 张秋月, 安鲁陵, 岳烜德, 等. 基于遗传算法的飞机复合材料结构装配压紧力大小与布局的优化[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1546–1557.

ZHANG Qiuyue, AN Luling, YUE Xuande, et al. Optimization of size and layout of pressing force for composite airframe structure assembly based on genetic algorithm[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1546–1557.

[34] ZHANG W, AN L L, CHEN Y A, et al. Optimisation for clamping force of aircraft composite structure assembly considering form defects and part deformations[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(4): 168781402199570.

[35] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. IEEE, 1995, 4: 1942–1948.

[36] KENNEDY J F, EBERHART R C, SHI Y H. Swarm intelligence[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

[37] POLI R. An analysis of publications on particle swarm optimization applications[D]. Essex: University of Essex, 2007: 32–24.

[38] DOU J P, WANG X S, WANG L. Machining fixture layout optimisation under dynamic conditions based on evolutionary techniques[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(15): 4294–4315.

[39] 王鹏, 姜坤, 周雄辉. 基于粒子群算法的测量夹具定位点的优化设计[J]. 模具工业, 2013, 39(4): 10–15.

WANG Peng, JIANG Kun, ZHOU

- Xionghui. Optimization of locator for measurement fixture based on PSO[J]. Die & Mould Industry, 2013, 39(4): 10–15.
- [40] 钱彦懿. 基于绝对节点坐标法的超大薄壁曲面结构装配偏差分析及装夹优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- QIAN Yanyi. Assembly deviation modeling via ANCF and optimization of fixture scheme for large scale curved thin-walled structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [41] DORIGO M, GAMBARDILLA L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53–66.
- [42] MCMULLEN P R. An ant colony optimization approach to addressing a JIT sequencing problem with multiple objectives[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2001, 15(3): 309–317.
- [43] JAYARAMAN V K, KULKARNI B D, KARALE S, et al. Ant colony framework for optimal design and scheduling of batch plants[J]. Computers & Chemical Engineering, 2000, 24(8): 1901–1912.
- [44] P R A B H A H A R A N G, PADMANABAN K P, KRISHNAKUMAR R. Machining fixture layout optimization using FEM and evolutionary techniques[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(11): 1090–1103.
- [45] P A D M A N A B A N K P, PRABHAHARAN G. Dynamic analysis on optimal placement of fixturing elements using evolutionary techniques[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(15): 4177–4214.
- [46] PADMANABAN K P, ARULSHRI K P, PRABHAKARAN G. Machining fixture layout design using ant colony algorithm based continuous optimization method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9): 922–934.
- [47] 周涛, 熊珍琦, 姚为, 等. 基于改进蚁群算法的薄壁件柔性工装布局优化[J]. 推进技术, 2016, 37(6): 1165–1174.
- ZHOU Tao, XIONG Zhenqi, YAO Wei, et al. Flexible tooling layout optimization for thin-walled workpieces based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(6): 1165–1174.
- [48] CHENG H, LI Y A, ZHANG K F, et al. Deformation analysis method for aeronautical thin walled structures with automated riveting[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 271–272: 1526–1530.
- [49] KHODABANDEH M, SARYAZDI M G, OHADI A. Multi-objective optimization of auto-body fixture layout based on an ant colony algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(6): 1137–1145.
- [50] XING Y F, NI J, LAN S H. Fixture layout optimization based on social radiation algorithm[C]//International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2014, 45813: V002T02A044.
- [51] XING Y F. Fixture layout design of sheet metal parts based on global optimization algorithms[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(10): 101004.
- [52] XING Y F, HU M, ZENG H, et al. Fixture layout optimisation based on a non-domination sorting social radiation algorithm for auto-body parts[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(11): 3475–3490.
- [53] LIU S G, ZHENG L, ZHANG Z H, et al. Optimization of the number and positions of fixture locators in the peripheral milling of a low-rigidity workpiece[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(7): 668–676.
- [54] YANG X S. Nature-inspired metaheuristic algorithms[M]. Cambridge: Luniver Press, 2008: 55–63.
- [55] 曾冰. 基于离散萤火虫算法的装配序列规划方法研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- ZENG Bing. Research on assembly sequence planning based on discrete firefly algorithm[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [56] 王仲奇, 黄杰, 康永刚, 等. 基于萤火虫算法的飞机弱刚性件装配定位策略优化[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(4): 626–629.
- WANG Zhongqi, HUANG Jie, KANG Yonggang, et al. Locating strategy optimization of aircraft weakly rigid parts assembly based on firefly algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(4): 626–629.
- [57] YANG X S. Flower pollination algorithm for global optimization[C]//DURAND–LOSE J, JONOSKA N. International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 240–249.
- [58] JAGATHEESAN K, ANAND B, SAMANTA S, et al. Application of flower pollination algorithm in load frequency control of multi-area interconnected power system with nonlinearity[J]. Neural Computing and Applications, 2017, 28(1): 475–488.
- [59] 王仲奇, 李诚, 杨勃, 等. 基于花粉算法的曲面薄壁件定位布局优化[J]. 中国机械工程, 2017, 28(18): 2231–2236.
- WANG Zhongqi, LI Cheng, YANG Bo, et al. Fixture locating layout optimization of curved thin-walled parts based on FDA[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(18): 2231–2236.
- [60] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via lévy flights[C]//2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC). IEEE, 2009: 210–214.
- [61] YANG X S, DEB S. Engineering optimisation by cuckoo search[J]. International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, 2010, 1(4): 330–343.
- [62] YANG B, WANG Z Q, YANG Y A, et al. Optimization of fixture locating layout for sheet metal part by cuckoo search algorithm combined with finite element analysis[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(6): 168781401770483.
- [63] KAVEH A. Applications of metaheuristic optimization algorithms in civil engineering[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [64] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51–67.
- [65] LI C, WANG Z Q, TONG H A, et al. Optimization of the number and positions of fixture locators for curved thin-walled parts by whale optimization algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2174(1): 012013.
- [66] ESCHENAUER H A, OLHOFF N. Topology optimization of continuum structures: A review[J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54(4): 331–390.
- [67] BENDSØE M P, SIGMUND O. Topology, optimization: theory, methods, and applications[M]. Berlin: Springer, 2003.
- [68] 周泽斌. 薄壁结构件加工变形机理及夹具优化设计方法研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- ZHOU Zebin. Deformation prediction

and fixture layout optimization of thin walled workpiece[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.

[69] YANG Y, WANG Z Q, YANG B, et al. Topological optimization method for aeronautical thin-walled component fixture locating layout[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(4): 405–412.

[70] FU J C, WANG L Q. A random-discretization based Monte Carlo sampling method and its applications[J]. Methodology and Computing in Applied Probability, 2002, 4(1): 5–25.

[71] LIAO X Y, WANG G G. Simultaneous optimization of fixture and joint positions for non-rigid sheet metal assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(3): 386–394.

[72] WANG G G, SHAN S. Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization[J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(4): 370–380.

[73] KEANE A, FORRESTER A, SOBESTER A. Engineering design via surrogate modelling: A practical guide[M]. Washington, DC: AIAA, Inc., 2008.

[74] BOX G E P, DRAPER N R. Response surfaces, mixtures, and ridge analyses[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

[75] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 95–107.

SUI Yunkang, YU Huiping. Improvement of response surface method and its application to engineering optimization[M]. Beijing: Science Press, 2011: 95–107.

[76] 邢彦锋, 金隼, 来新民, 等. 基于径向函数的响应面法在薄板装配夹具设计中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(1): 101–106.

XING Yanfeng, JIN Sun, LAI Xinmin, et al. Application of response surface methodology based on radial basis function in fixture design[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(1): 101–106.

[77] 邢彦锋, 王岩松. 应用 Two-Stage 方法的薄板零件定位策略优化设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(5): 677–682.

XING Yanfeng, WANG Yansong. Fixture locating scheme design based on two-stage

method for sheet metal components[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(5): 677–682.

[78] XING Y F, WANG Y S. Fixture layout design based on two-stage method for sheet metal components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(1): 162–172.

[79] BI Y B, YAN W M, KE Y L. Multi load-transmitting device based support layout optimization for large fuselage panels in digital assembly[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(10): 1792–1804.

[80] 于金, 高彦梁. 多点柔性工装夹具布局优化研究[J]. 制造技术与机床, 2016(2): 124–129.

YU Jin, GAO Yanliang. Research on clamping distribution optimization of multi-point flexible tooling system[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(2): 124–129.

[81] YU K G, WANG X J. Modeling and optimization of welding fixtures for a high-speed train aluminum alloy sidewall based on the response surface method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(1–2): 315–327.

[82] 蒋宗礼. 人工神经网络导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 43–76.

JIANG Zongli. Introduction to artificial neural networks[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 43–76.

[83] 刘玉梅, 姜兆亮, 刘文平, 等. 基于薄板件夹具变形控制的夹紧点位置优化方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(7): 23–25.

LIU Yumei, JIANG Zhaoliang, LIU Wenping, et al. Research on clamping-point optimization based on control of the deformation in fixing thin-walled workpiece[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(7): 23–25.

[84] VASUNDARA M, PADMANABAN K P, SABAREESWARAN M, et al. Machining fixture layout design for milling operation using FEA, ANN and RSM[J]. Procedia Engineering, 2012, 38: 1693–1703.

[85] SELVAKUMAR S, ARULSHRI K P, PADMANABAN K P, et al. Design and optimization of machining fixture layout using ANN and DOE[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013,

65(9): 1573–1586.

[86] 秦国华, 赵旭亮, 吴竹溪. 基于神经网络与遗传算法的薄壁件多重夹具布局优化[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 203–212.

QIN Guohua, ZHAO Xuliang, WU Zhuxi. Optimization of multi-fixturing layout for thin-walled workpiece based on neural network and genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 203–212.

[87] QIN G H, WANG Z K, RONG Y M, et al. A unified approach to multi-fixturing layout planning for thin-walled workpiece[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(3): 454–469.

[88] LU C, ZHAO H W. Fixture layout optimization for deformable sheet metal workpiece[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1–4): 85–98.

[89] WANG Z H, LI D S, SHEN L H, et al. Multi-objective optimisation of assembly fixturing layout for large composite fuselage panel reinforced by frames and stringers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(3–4): 1403–1418.

[90] HORNIK K, STINCHCOMBE M, WHITE H. Multilayer feedforward networks are universal approximators[J]. Neural Networks, 1989, 2(5): 359–366.

[91] HAYKIN S S. Neural networks and learning machines[M]. 3rd ed. NJ: Pearson Education, 2010: 63–82.

[92] WANG Z Q, YANG B, KANG Y G, et al. Development of a prediction model based on RBF neural network for sheet metal fixture locating layout design and optimization[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2016, 2016: 1–6.

[93] WANG Z Q, YANG Y A, YANG B, et al. Optimal sheet metal fixture locating layout by combining radial basis function neural network and bat algorithm[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(12): 168781401668190.

[94] MA Z H, XING Y F, HU M. Fixture layout optimization based on hybrid algorithm of gaot and RBF-NN for sheet metal parts[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing. New York: ACM, 2019: 1–6.

[95] 王鹏, 徐家川, 曹凡, 等. 基于

NSGA-II 与 RBF 神经网络的车身薄板定位布局研究 [J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(3): 189-198.

WANG Peng, XU Jiachuan, CAO Fan, et al. Research on location and layout of auto-body sheet metal based on NSGA-II and RBF neural network[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(3): 189-198.

[96] SACKS J, WELCH W J, MITCHELL T J, et al. Design and analysis of computer experiments: Rejoinder[J]. Statistical Science, 1989, 4(4): 409-423.

[97] YANG B, WANG Z Q, YANG Y, et al. Optimum fixture locating layout for sheet metal part by integrating kriging with cuckoo search algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 327-340.

[98] 李诚, 王仲奇, 童话, 等. 基于 Kriging 与 FPA 的薄壁件夹具布局设计 [J]. 航空制造技术, 2020, 63(18): 95-101.

LI Cheng, WANG Zhongqi, TONG Hua, et al. Design of fixture locating layout for thin-walled part based on kriging and FPA[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(18): 95-101.

[99] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法: 支持向量机 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 21-35.

DENG Naiyang, TIAN Yingjie. A new method in data mining: Support vector machine[M]. Beijing: Science Press, 2004: 21-35.

[100] VAPNIK V N. Statistical learning theory[M]. New York: Wiley, 1998.

[101] YU K G. Robust fixture design of compliant assembly process based on a support vector regression model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1-4): 111-126.

[102] 杨元, 王仲奇, 杨勃, 等. 基于 SVR 的航空薄壁件夹具布局优化预测模型

[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1302-1309.

YANG Yuan, WANG Zhongqi, YANG Bo, et al. Prediction model for aeronautical thin-walled part fixture layout optimization based on SVR[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1302-1309.

[103] YANG Y A, WANG Z Q, YANG B, et al. Multiobjective optimization for fixture locating layout of sheet metal part using SVR and NSGA-II[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-10.

[104] DU J A, YUE X W, HUNT J H, et al. Optimal placement of actuators via sparse learning for composite fuselage shape control[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(10): 101004.

通讯作者: 翟雨农, 助理教授, 博士, 主要研究方向为低应力装配协调、装配性能与服役可靠性、机器人智能装配和人机协同装配。

A Review of Fixture Layout Optimization Method for Weakly-Rigid Thin-Walled Workpieces

WANG Zhanghao, LI Dongsheng, ZHAI Yunong
(Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Due to the characteristics of light weight and high strength, weakly-rigid thin-walled workpieces are widely used in aerospace, automobile and other industrial fields, but they also have the disadvantages of small thickness, low rigidity and easily deformation during the manufacturing process. The fixture layout design is a very important factor to reduce the deformation and ensure the quality of thin-walled workpieces. Traditional fixture layout design of thin-walled workpieces depends on the intuitive judgment and experience accumulation of engineers, which is slow, high cost and large randomness of design. With the continuous improvement of computer technology, many scholars applied finite element simulation, mathematical programming method, intelligent optimization algorithm, surrogate model and so on to optimize the layout of thin-walled workpieces fixture components, and have obtained a lot of research results. According to the modeling method of objective function and the optimization algorithm, the related researches are systematically classified and discussed, and the merit and demerit of each modeling method and optimization algorithm are analyzed in detail. Finally, the related researches on the fixture layout optimization method of weakly-rigid thin-walled workpieces are summarized, and the corresponding research advice are put forward.

Keywords: Weakly-rigid thin-walled workpieces; Fixture layout optimization; Finite element method; Surrogate model; Optimization algorithm

(责编 古系)