DOI: 10.3901/JME.2019.03.147

基于目标级联的废旧机械装备多目标优化再设计方法研究*

王 涵¹ 江志刚¹ 张 华² 王 彦³

- (1. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室 武汉 430081;
2. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081;
3. 英国布莱顿大学计算机、工程和数学系 布莱顿 BN2 4GJ 英国)

摘要: 为解决废旧机械装备整体再设计与零部件再设计间复杂的耦合关联问题, 提出基于目标级联的废旧机械装备多目标优化再设计方法。根据废旧机械装备损伤状况、剩余使用寿命等状态信息和需求主体的产品进化需求信息, 获取废旧机械装备再制造成本、能量消耗和材料消耗的范围约束再设计目标, 然后采用目标级联方法协同考虑系统整体再设计目标与零部件再设计目标, 建立以再制造成本、能量消耗和材料消耗为目标的多目标优化模型, 提出一种自适应调整策略的教与学算法对该模型寻优求解。最后, 以废旧车床 C6140 为例, 验证了上述方法的可行性与有效性。

关键词: 再设计; 目标级联; 多目标优化; 自适应调整策略; 教与学算法

中图分类号: TG156

Research on Multi-objective Optimization Redesign Method for Used Mechanical Equipment Based on Analytical Target Cascading

WANG Han¹ JIANG Zhigang¹ ZHANG Hua² WANG Yan³

- (1. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430081;
2. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430081;
3. Department of Computing, Engineering and Mathematics, University of Brighton, Brighton, BN2 4GJ, United Kingdom)

Abstract: In order to solve complicated coupled problems between system and components, a multi-objective optimization redesign method based on analytical target cascading (ATC) are presented. On the basis of the damage condition, remaining service life information and demand information, the range of remanufacturing cost, energy consumption, and material consumption can be obtained, aiming to restrict redesign objectives. An ATC method is presented to cooperation system redesign objectives and components redesign objectives. A multi-optimization model is established including remanufacturing cost, energy consumption and material consumption. The adapt teaching-learning-based optimization (A-TLBO) method is adopted to solve this model. Finally, a used machine tool (model C6140) is taken as an example to validate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: redesign; analytical target cascading; multi-objective optimization; adaptive adjustment strategy; teaching and learning based optimization

0 前言

再设计是实施废旧产品再制造面临的关键问

题, 同新产品生产一样, 废旧产品的再设计对产品再制造的效率、质量、成本、资源利用率及环境污染控制等目标的实现起决定作用。废旧机械装备再设计是以废旧机械装备及零部件作为毛坯(设计过程的输入, 并约束设计过程)、以极大化重用其材料和附加值为目标创新性地设计出新的再制造产品功能及结构的过程^[1]。与新机械装备设计相比, 再设

* 国家自然科学基金(51675388, 51605347)和武汉科技大学研究生短期出国(境)研修专项经费(024/24000203)资助项目。20180411 收到初稿, 20180920 收到修改稿

计以废旧机械装备可再制造性为基础,同时考虑废旧零部件损伤程度和剩余寿命的差异性,以及结构和工艺的再设计对零部件再制造质量、性能和二次服役寿命的影响,寻求再制造价值的最大化。再设计是再制造的基础,已成为学术界和产业界的研究热点。

目前,国内外对于再设计方法研究较多,如 DU 等^[2]提出一种基于公理化理论和质量功能展开的废旧产品重用导向的再设计方法以规范和优化再设计过程;ZWOLINSKI 等^[3]集成再制造约束到产品早期设计过程中,开发一种基于再制造与产品组合(REPRO2)的工具以辅助设计者进行产品早期设计;宋守许等^[4]提出零部件寿命均值和倍数匹配模式和方法以实现产品配合零件的最佳利用;CAO 等^[5]提出一种基于机床功能和结构特性的重用再设计方法用于废旧机床再制造。国内外现有再设计方法以废旧资源最优化重用、尽可能延长再制造产品的使用寿命等为目标,在废旧产品结构基础上进行创新性再设计,但鲜有文献有效解决废旧机械装备整体再设计与零部件再设计间复杂的耦合关联问题,如当零部件再设计达到最优时,却无法保证系统整体再设计最优,以致于难以保证再设计方案的可行性。

目标级联法(Analytical target cascading, ATC)是一种协同考虑系统整体再设计目标与零部件再设计目标,提高方案的可行性的有效方法^[6]。尽管目标级联法可有效协同控制系统整体再设计目标与零部件再设计目标,但一方面废旧机械装备存在质量状况、再制造工艺、再制造机械装备市场竞争等方面的不确定性;另一方面废旧机械装备再设计是在已有的废旧产品基础上进行再设计,存在更多空间结构和参数方面约束。这使得废旧机械装备再设计相比传统机械装备设计需要考虑更多因素,设计过程更为复杂,为提升再设计效率,需要采用一种高效的优化算法辅助废旧机械装备再设计。目前有许多优化算法,如遗传算法、粒子群算法、人工蜂群算法等,但上述算法在大规模复杂的多目标优化问题存在求解质量、速度等方面的局限性,基于此,提出一种自适应调整策略的教与学算法,该算法在教师阶段采用自适应调整策略来动态调整教学因子以增强算法的全局搜索能力,使得该算法在收敛精度和速度方面更有优势。

综上所述,目前废旧机械装备再设计问题缺乏一种能协调整体再设计与零部件再设计的多目标优化再设计方法。基于此,提出了一种基于目标级联的废旧机械装备多目标优化再设计方法,该方法首先根据废旧机械装备状态信息和需求主体信息,获

取再制造成本、能耗和材料消耗范围以约束再设计目标,然后采用目标级联方法协同控制系统整体再设计目标与零部件再设计目标并建立多目标优化模型,最后提出一种 A-TLBO 算法对模型寻优求解。

1 基于 ATC 的再设计过程模型

废旧机械装备再设计目的在于得到最优再设计方案,首先根据废旧机械装备状态信息和需求主体信息获取再制造成本、能耗和材料消耗的范围,约束再设计目标,接着采用目标级联法协同控制系统整体再设计目标与零部件的再设计目标并建立多目标优化模型,最后采用自适应调整策略的教与学算法对模型寻优求解,该过程模型如图 1 所示。

图 1 基于 ATC 的多目标优化再设计过程模型

2 基于 ATC 的再设计方法

2.1 基于目标级联的再设计目标传递与反馈机制

废旧机械装备由众多零部件构成,由于部件及零件间存在空间结构、参数、功能等方面的干涉,这加大了部件、零件间的再设计难度,导致难以对部件、零件有效执行并控制再设计目标。基于此,采用目标级联法,将整机层优化目标逐层传递至部件层和零件层,建立层间目标传递函数分配再设计目标,接着建立层间反馈传递函数,返回部件、零件实际目标值,设定目标值与实际值的偏差容量,通过多次传递反馈的迭代方式控制再设计目标,实现废旧机械装备从整体到部件和零件的再设计,该方法如图 2 所示。

图 2 中 f 表示整机层系统整体再设计目标, f_{D1} 和 f_{Dm} 表示部件层再设计目标, f_{C1} , f_{C2} , f_{Cm1} 和 f_{Cmj} 表示零件层再设计目标; g 和 h 分别表示整机层系统整体再设计目标的不等式约束和等式约束, g_{D1} 与 g_{Dm} 表示部件层再设计目标不等式约束, h_{D1} 与 h_{Dm} 表示部件层再设计目标等式约束; g_{C1} , g_{C2} , g_{Cm1} 和 g_{Cmj} 表示零件层再设计目标不等式约束; h_{C1} , h_{C2} , h_{Cm1} 和 h_{Cmj} 表示零件层再设计目标等式

图 2 基于 ATC 的废旧机械装备再设计方法

约束; $f_{(\text{target})}$ 和 $f_{(\text{response})}$ 分别表示目标传递函数和反馈传递函数, 由各层级再设计目标函数形成, ε 表示目标传递函数与反馈传递函数的偏差容量。

2.2 基于目标级联的再设计过程约束体系

将文献[7]中的再制造重要特征作为废旧机械装备系统整体再设计目标约束, 即再制造的机械装备成本为新品的 50%, 节能 60% 和节省材料 70% 等。通过获取废旧机械装备的损伤状况和剩余使用寿命, 获取废旧零部件再制造的成本、能耗和材料消耗范围, 该范围作为废旧部件、零件再设计目标的约束。由此系统层、部件层和零件层的再设计过程的约束体系得以建立。

2.3 基于目标级联的再设计多目标优化模型

通过如图 2 所示的目标级联方法及其 2.2 小节的约束体系, 可以有效协同控制系统整体再设计目标与零部件的再设计目标。由文献[1]可知, 废旧机械装备再设计与传统的新机械装备设计不同之处在于需要获取并分析废旧机械装备的状况、需求信息和再制造工艺等, 再设计过程需要受原有机机械装备结构、材料和功能等的约束, 该过程呈现多目标性、不确定性等, 因此再设计的周期更长。为提升再设计效率, 建立多目标优化模型, 再制造企业追求经济效益和环境效益, 因此从企业角度建立如下再制造成本、能耗和材料消耗的多目标优化模型。

$$\begin{cases} \min C = \sum_{i=1}^N (C_{P1}^* + C_{T1}^*) \cdot t_{di} + \sum_{j=1}^a C_{Nj}^* + \sum_{k=1}^c C_M^* \cdot t_{rk} + \sum_{m=1}^Q (C_{P2}^* + C_{T2}^*) \cdot t_{am} \\ \min E = \sum_{k=1}^c E_k \\ \min M = \sum_{j=1}^a m_j + \sum_{k=1}^c m_k \end{cases} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^N (C_{P1}^* + C_{T1}^*) \cdot t_{di} + \sum_{m=1}^Q (C_{P2}^* + C_{T2}^*) \cdot t_{am} < C <$$

$$\sum_{i=1}^N (C_{P1}^* + C_{T1}^*) \cdot t_{di} + \sum_{j=1}^a C_{Nj}^* + \sum_{m=1}^Q (C_{P2}^* + C_{T2}^*) \cdot t_{am} \leq 50\% \cdot C_0 \quad (2)$$

$$0 \leq c < N \quad 0 \leq a < Q \quad (3)$$

$$c \cdot E_{0\min} < E < c \cdot E_{0\max} \leq 40\% \cdot E_0 \quad (4)$$

$$0 \leq m_j < M \leq 30\% \cdot M_0; 0 \leq m_k < M \leq 30\% \cdot M_0 \quad (5)$$

式中, C 表示废旧机械装备再制造总成本; N 表示废旧机械装备拆卸后的零件总数量; C_{P1}^* 和 C_{T1}^* 分别表示拆卸作业单位人工成本和单位工具成本; t_{di} 表示第 i 个零部件拆卸所需的平均时间; C_{Nj}^* 表示第 j 个新零部件的制造成本; a 和 c 分别表示再制造过程需要的新零件和需要再制造加工的零件数量; C_M^* 表示单位再制造加工成本; t_{rk} 表示第 k 个废旧零件再制造加工所需的平均时间; C_{P2}^* 和 C_{T2}^* 分别表示再装配作业单位人工成本和单位工具成本; t_{am} 表示第 m 个零件再装配所需的平均时间; Q 表示组成再制造机械装备的零件总数量; E 表示废旧机械装备再制造总能耗; E_k 表示第 k 个废旧零件再制造加工能耗; M 表示废旧机械装备再制造材料消耗; m_j 表示第 j 个新零件的质量; m_k 表示第 k 个零件的再制造加工消耗材料的质量。约束式(2)表示再制造总成本不应小于当废旧机械装备无需更换新零部件和无需再制造加工情况下拆卸和再装配的总成本, 不应大于当废旧机械装备需要使用新零件而无需再制造加工的总成本, 也不应大于新产品总成本 C_0 的 50%; 约束式(3)表示需要再制造加工的零件数量应少于废旧机械装备的零部件总数量, 废旧机械装备所需的新零部件数量应少于再装配作业时的零部件总数量; 约束式(4)表示再制造加工的能耗不应低于所有零件再制造加工中最低能耗 $E_{0\min}$ 与需要再制造加工零件总数量的乘积, 不应高于所有零件再制造加工中最高能耗 $E_{0\max}$ 与再制造加工的零件总数量的乘积, 也不应高于新品制造能耗 E_0 的 40%; 约束式(5)表示新零件的质量和再制造加工消耗材料的质量都应小于再制造材料总消耗量, 且废旧机械装备再制造材料总消耗应不超过该型号新机械装备总质量 M_0 的 30%。

3 多目标优化求解方法

目前有如遗传算法、粒子群算法,人工蜂群算法等优化算法用于多目标优化模型求解,但这些算法在求解质量、速度等方面具有局限性。基于此,提出一种自适应调整策略的教与学优化算法,该算法是一种模拟学生动态调整学习因子向教师学习的方式,解决大规模复杂的多目标优化问题的算法,该算法的流程图如图3所示。

图3 自适应调整策略的教与学优化算法流程图

3.1 教师阶段

教师阶段是模拟教师指导学生学习的过程,学员通过其适应度的平均值和教师的差异性进行学习,具体如下所述。

(1) 计算教师与学生平均值的差距

$$Diff = T_c(t) \cdot (x_T - \theta \cdot x_M) \quad (6)$$

$$\theta = \text{round}(1 + \text{rand}(0,1)) \quad (7)$$

$$T_c(t) = \frac{1}{2} \left[(T_{c\max} - T_{c\min}) \cdot \left(\frac{t_{\max} - t_i}{t_{\max}} \right)^2 + (T_{c\max} - T_{c\min}) \cdot \left(\frac{t_{\max} - t_i}{t_{\max}} \right) \right] + T_{c\min} \quad (8)$$

式中, x_M 表示 n 个学员的平均值, x_T 表示教师的数值, 即适应度最好学员的数值, $T_c(t)$ 表示自适应调整教学因子, 其中 $T_{c\max}$ 和 $T_{c\min}$ 分别表示教学因子的最大值和最小值, t_i 表示当前迭代次数, $t_{\max}$ 表示最大迭代次数。

(2) 学员通过差距进行学习

$$x_{\text{new}} = x_i + Diff \quad (9)$$

式中, x_i 表示第 i 个学员教学前的值, x_{new} 表示第 i 个学员经过教学后的值。

3.2 学生阶段

学生阶段主要通过学生间的讨论、交流等相互学习, 通过向数值更高的成员学习以提升学员自身数值, 对于学员 i , 随机抽取与之不同的学员 j 进行学习交流, 对比学员间的适应度值以调整学员的学习, 公式如下

$$x_{\text{new}} = \begin{cases} x_i + \text{rand}(0,1) \cdot (x_i - x_j) & f(x_i) > f(x_j) \\ x_i + \text{rand}(0,1) \cdot (x_j - x_i) & f(x_i) < f(x_j) \end{cases} \quad (10)$$

4 案例研究

普通车床是一种广泛应用于加工轴类、套类、盘类和其他回转体工件, 其需求量和保有量都非常大。以废旧普通车床 C6140 的再设计为例, 对废旧机械装备多目标优化再设计方法进行验证。

4.1 状态信息与需求主体信息

C6140 车床主要包括主轴箱、进给箱、溜板箱、转盘、刀架、尾架、床身、光杠、丝杠和床座。根据文献[8]中的损伤程度的表征方法和公式和文献[9]中的量化区间得到废旧零部件损伤形式的损伤量和损伤程度, 通过文献[10]中的方法得到废旧零部件的剩余使用寿命, 如表1所示。多主体需求及产品进化需求重要度矩阵分别如表2和表3所示。

表1 废旧零部件的损伤情况和剩余使用寿命

零部件	主要损伤形式	损伤量/mm ³	损伤程度	剩余使用寿命/h
主轴箱	磨损	0.52	低	6 567
进给箱	磨损	1.12	高	4 856
溜板箱	磨损	0.73	中	7 342
转盘	磨损	1.33	高	9 633
刀架	磨损/腐蚀	0.76/0.062H	中/低	5 684
尾架	磨损/变形	0.82/0.0068L	中/低	16 387
床身	腐蚀	0.079H	中	24 925
光杠	磨损/腐蚀	0.91/0.084H	中/中	3 609
丝杠	磨损/腐蚀	0.86/0.092H	中/中	2 420
床座	磨损/腐蚀	0.54/0.17H	中/高	37 640

表2 车床产品多主体需求

需求主体	需求类型	内容
企业研发部门	技术创新性需求	降低再制造成本(D1)
	产品使用需求	提高零部件的易拆解及可重用性(D2)
客户	技术创新性需求	降低使用过程能耗(D3)
	产品使用需求	提高产品使用过程稳定性(D4)
第三方机构	标准符合性需求	满足国家标准及行业内再制造产品质量要求(D5)

表 3 车床产品进化需求重要度矩阵

需求	D1	D2	D3	D4	D5	D
D1	[0,0]	[2,3]	[4,5]	[3,4]	[5,6]	[14,18]
D2	[3,5]	[0,0]	[7,9]	[8,9]	[7,8]	[25,31]
D3	[2,3]	[4,5]	[0,0]	[7,8]	[8,9]	[21,25]
D4	[1,3]	[7,8]	[8,9]	[0,0]	[7,9]	[23,29]
D5	[3,4]	[5,6]	[7,9]	[7,8]	[0,0]	[22,27]

综合以上废旧车床状态信息和需求主体的产品进化需求信息，并结合该厂废旧车床再制造的历史数据，得到该台废旧车床 C6140 部件、零件的再制造成本、能耗和材料消耗的范围，如表 4 所示，该范围作为部件层、零件层的再设计偏差容量以约束再设计目标，采用如图 4 所示目标级联方法对废旧车床 C6140 进行再设计。

表 4 废旧车床 C6140 部分部件和零件的再设计目标范围

再设计目标	再制造成本/RMB	能耗/kJ	材料消耗/kg
支承部件	[1 845, 3 075]	[4 125, 4 719]	[90.25, 270.75]
变速机构	[1 020, 1 700]	[4 000, 4 576]	[3.5, 4.5]
床身	[900, 1 500]	[1 250, 1 430]	[80, 240]
刀架	[360, 600]	[625, 715]	[0.25, 0.75]
光杆	[102, 170]	[1 625, 1 859]	[1.5, 4.5]
转盘	[1 020, 1 700]	[1 250, 1 430]	[3.5, 10.5]

图 4 基于 ATC 的废旧车床 C6140 再设计方法

图 4 中 f_1^0 , f_2^0 和 f_3^0 为整机层传递到部件层的再设计目标函数值，每个目标函数值包含再制造成本、能耗和材料消耗的数值，是经过归一化后等值加权形式的函数值， f_1^1 , f_2^1 和 f_3^1 为由部件层反馈给整机层的目标函数值， $\varepsilon_1^R, \varepsilon_2^R, \varepsilon_3^R$ 分别为支承部件、变速机构和进给机构的反应偏差容量，由再设计目标范围确定。限于篇幅，图 5 以整机层与支承部件为例展示其优化模型。

图 5 整机层与支承部件的优化模型

从整机层到支承部件层只有拆卸作业，无再制造加工，因此无材料消耗。图 5 中 f_1 为整机层对支承部件的再设计目标数值， f_{11}^0 和 f_{12}^0 分别为由整机层传递到支承部件层归一化后的拆卸成本数值与拆卸能耗数值； f_{11}^1 和 f_{12}^1 分别为由整机层传递到支承部件层归一化后的拆卸成本数值与拆卸能耗数值； w 为成本目标的权重，由设计者决定； C_D , C_{Dmax} 和 C_{Dmin} 分别为拆卸成本，拆卸成本最大值和拆卸成本最小值； E_D , E_{Dmin} 和 E_{Dmax} 分别为拆卸能耗，拆卸能耗最大值和拆卸能耗最小值。

4.2 废旧车床 C6140 多目标优化再设计

上述方法协同控制整机层、部件层和零件层的再设计目标。为了提升再设计效率，以再制造成本、能耗和材料消耗为优化目标，根据文献[11-12]得到表 5 中再制造成本相关参数数值和表 6 中部分零件的价格，结合该厂同类型废旧机床再制造过程历史数据，通过计算得到零部件拆卸、再装配和再制造加工的平均时间，获取再制造加工设备功率和再制造流程物料清单，计算得到再制造能耗和材料消耗，采用 A-TLBO 算法对模型求解，设置学生数量为 10，学生所学课程(即设计变量)为 2，遗传代数为 50。为凸显 A-TLBO 算法的优势，将 TLBO 算法作为对比算法，通过如图 6 所示的算法流程图，得到如图 7 和 8 所示的结果，图 6 中的调整是指以再设计目标数值上下 5% 进行调整。

表 5 再制造成本相关参数数值

C_1	C_2	C_{P1}^*	C_{T1}^*	C_M^*	C_{P2}^*	C_{T2}^*
/RMB	/RMB	/(RMB/h)	/(RMB/h)	/(RMB/h)	/(RMB/h)	/(RMB/h)
1.8×10^4	3×10^4	26.1	2.3	48.74	26.2	2.7

表 6 车床 C6140 部分零部件价格

零部件	主轴箱	进给箱	溜板箱	转盘	刀架	尾架	床身	光杆	丝杠
价格/RMB	6 500	4 400	3 200	3 400	1 200	1 800	3 000	340	550
质量/kg	300	85	60	35	2.5	20	800	15	15

由图 7 和 8 可知，两种算法在求解速度上都很快速，在迭代初期快速收敛，在后期缓慢趋于最优解。相比于 TLBO 算法，A-TLBO 算法的收敛速度更快并且求解过程更平稳，为清晰展示 A-TLBO 算法的优势，对上述 2 种算法重复做了 6 组试验，试验结果的平均值如表 7 所示。

本试验每组迭代次数设为 50 次，表 7 记录了 14 次迭代试验，TLBO 算法在第 13 代时收敛于 0.251，A-TLBO 算法在第 11 代时收敛于 0.245。表 8 记录了两组算法在六组试验中最佳全局最小值、最差全局最小值和平均全局最小值，三种数值反映了算法求解过程的稳定性程度和算法结果的好坏。

图 6 基于目标级联的多目标优化再设计算法流程图

图 7 TLBO 算法求解过程

图 8 A-TLBO 算法求解过程

通过比较表 8 中最佳全局最小值和最差全局最小值，两种算法都保持了结果稳定性，但 TLBO 算法的最差全局最小值明显异于其他数值，另外 TLBO 算法的平均全局最小值趋于递减，而 A-TLBO 算法始终保持稳定，且解集都优于 TLBO 算法的解

表 7 两种算法迭代过程目标函数值

算法	迭代次数						
	1	2	3	4	5	6	7
TLBO	84.367	76.139	18.440	7.098	4.948	0.425	0.272
A-TLBO	67.628	9.974	3.277	1.073	0.386	0.295	0.273

算法	迭代次数						
	8	9	10	11	12	13	14
TLBO	0.257	0.255	0.254	0.253	0.252	0.251	0.251
A-TLBO	0.259	0.252	0.249	0.245	0.245	0.245	0.245

表 8 六组试验算法结果对比

算法	TLBO			A-TLBO		
	最佳全局最小值	最差全局最小值	平均全局最小值	最佳全局最小值	最差全局最小值	平均全局最小值
试验组数						
1	0.251 2	69.725 5	4.805 6	0.245 1	0.249 1	0.245 2
2	0.251 2	69.725 5	4.704 3	0.245 1	0.249 1	0.245 2
3	0.251 2	69.725 5	4.607 5	0.245 1	0.249 1	0.245 2
4	0.251 2	69.725 5	4.514 8	0.245 1	0.249 1	0.245 2
5	0.251 2	69.725 5	4.425 9	0.245 1	0.249 1	0.245 2
6	0.251 2	69.725 5	4.511 6	0.245 1	0.249 1	0.245 2

集，这是由于自适应调整策略在学生在学习过程中动态调整学习因子以更快地达到教师水平，该策略使得算法在求解速度和稳定性方面都得到了提高。表 9 为通过两种算法得到机床再设计方案。

表 9 再设计方案及其结果对比

算法	车床 C6140 部分零件再设计方案								成本 /RMB	能耗 /kJ	材料 消耗 /kg
	溜板箱	转盘	刀架	进给箱	床身	光杠	丝杠	床座			
TLBO	U	—	R	—	R	U	R	—	7756	13530	95.13
A-TLBO	U	—	U	—	R	R	R	—	7240	12705	82.68

注：—表示更换新件；R表示进行恢复性再制造；U表示升级性再制造。

再设计成功的标准是再设计的车床能满足性能、功能等要求，同时成本低、能耗低和材料消耗少。由表 9 可知，通过两种算法得到的再设计方案都能使废旧零件性能恢复，但 A-TLBO 比 TLBO 算法能降低 6.65% 的成本，减少 6.10% 的能耗，节省 13.10% 的材料消耗。以上结果表明 A-TLBO 算法比 TLBO 能更快速得到更优解。

5 结论

(1) 考虑了废旧机械装备状态信息和产品进化需求信息，基于状态信息和需求信息获取再设计目标的范围以约束再设计目标，采用目标级联法协同控制系统整体再设计目标与零部件再设计目标。

(2) 建立多目标优化模型并采用 A-TLBO 算法对模型进行优化求解，得到废旧机械装备最优再设

计方案。

(3) 以废旧车床 C6140 为例, 对比分析结果, 证明提出的再设计方法可以提高求解速度、稳定性和解集质量, 降低废旧机械装备再制造过程成本、能耗和材料消耗。

(4) 该方法基于废旧零部件损伤状况、寿命特征状态信息, 考虑的是废旧机械装备单个寿命周期再设计, 如何进行多寿命周期再设计需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 杜彦斌. 退役机床再制造评价与再设计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
DU Yanbing. Research on remanufacturing evaluation and redesign method for retired machine tools[D]. Chongqing : Chongqing University, 2012.
- [2] DU Y, CAO H, CHEN X, et al. Reuse-oriented redesign method of used products based on axiomatic design theory and QFD[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 39(1): 79-86.
- [3] ZWOLINSKI P, LOPEZ-ONTIVEROS M A, Brissaud D. Integrated design of remanufacturable products based on product profiles[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(15): 1333-1345.
- [4] 宋守许, 冯艳, 柯庆镛, 等. 基于寿命匹配的零部件再制造优化设计方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(10): 1323-1329.
SONG Shouxu, FENG Yan, KE Qingdi, et al. Component optimization design for remanufacturing based on life matching[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(10): 1323-1329.
- [5] CAO H, CHEN X, XU L, et al. A reuse-oriented redesign method of used machine tool based on matter-element theory[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2014, 15(5): 921-928.
- [6] KIM H M. Target cascading in optimal system design[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(3): 474-480.
- [7] 张伟, 刘仲谦, 张纾, 等. 绿色制造与再制造技术研究与发展[J]. 中国表面工程, 2006, 19(z1): 76-81.
ZHANG Wei, LIU Zhongqian, ZHANG Shu, et al. Study and development of green manufacturing and remanufacturing[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(z1): 76-81.
- [8] WANG H, JIANG Zhigang, ZHANG Xugang, et al. A fault feature characterization based method for remanufacturing process planning optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 708-719.
- [9] 李聪波, 李玲玲, 曹华军, 等. 废旧零部件不确定性再制造工艺时间的模糊学习系统[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 137-146.
LI Congbo, LI Lingling, CAO Huajun, et al. Fuzzy learning system for uncertain remanufacturing process time of used components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 137-146.
- [10] 张旭刚, 张华, 江志刚, 等. 基于剩余使用寿命评估的再制造方案决策模型及应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 51-57.
ZHANG Xugang, ZHANG Hua, JIANG Zhigang, et al. Remanufacturing scheme design decision model and application based on remaining useful life estimation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 51-57.
- [11] 高一聪, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 面向寿命终结阶段的机械产品设计绿色多准则优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 144-151.
GAO Yicong, FENG Yixiong, TAN Jianrong, et al. Dynamic characteristics of multi-stage planetary gears of shield tunneling machine based on planet mesh phasing analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 144-151.
- [12] 陈友玲, 谢淑红, 李伟. 基于条件属性依赖度的配置产品装配时间估算[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(3): 236-240.
CHEN Youling, XIE Shuhong, LI Yi. Assembly time estimation technique of configuration products based on dependency of attributes[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(3): 236-240.

作者简介: 王涵, 男, 1994 年出生。主要研究方向为绿色制造与再制造。
E-mail: wh_wust@163.com
江志刚(通信作者), 男, 1978 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造与再制造。
E-mail: jiangzhigang@wust.edu.cn
张华, 女, 1964 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造与再制造。
E-mail: zhanghua403@163.com
王彦, 女, 1973 年出生, 高级讲师。主要研究方向为再制造。
E-mail: y.wang5@brighton.ac.uk