

• 绿色设计 •

**栏目评述:**绿色设计是实现产品全生命周期节能、节材、减排的重要手段,同时也是促进产品科技创新和绿色高质量发展的关键路径。绿色设计要求在产品设计开发阶段系统考虑原材料选用、生产、销售、使用、回收再制造、处理等各个环节对资源、能源及环境造成的影响。本栏目有关绿色设计的文章从主动再制造设计、新型绿色评价方法、LCA 数据建设、设计特征和绿色特征关联映射、轻量化设计等不同角度展示了当前该领域的最新研究进展。宋守许等从零件综合优化设计角度提出了基于零件结构耦合关系的主动再制造设计方法,其研究思路具有重要的理论借鉴意义。彭鑫等以产品创新目标为导向,提出了基于预期目标的产品绿色度评价方法,顾复等从提高数据的质量和可靠性方面提出了透明公平的 LCA 评价方法,徐兴硕等面向结构特征设计,提出了基于 Vericut 的能耗建模和仿真技术,这些创新方法和技术对绿色设计领域的研究开展有非常好的启示。陈轶嵩等则对燃料电池的 LCA 评价进行了应用研究。绿色设计理论方法和应用技术研究已成为当前绿色制造研究领域的热点,我们期待更多的学者在此领域做出更进一步卓有成效的工作。

——李方义 教授 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室


基于零件结构耦合关系的主动再制造设计方法

宋守许 汪 伟 柯庆镛 邱 权  
合肥工业大学机械工程学院,合肥,230009

**摘要:**针对再制造设计过程中优化零件某一薄弱结构可能导致零件整体性能劣化的问题,对零件结构间的耦合关系进行了研究。提出了结构功能耦合系统概念,建立了结构功能耦合系统模型,用结构影响因子表达结构耦合程度。在此基础上,给出了主动再制造在零件层级的设计方法,实现了零件全生命周期内整体性能的提升,并以发动机曲轴为例进行了方法验证。

**关键词:**主动再制造;结构耦合关系;结构影响因子;结构功能耦合系统

**中图分类号:**TH122

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2018.21.001      开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Design Method of Predecisional Remanufacturing Based on Component Structure Coupling Relationship

SONG Shouxu WANG Wei KE Qingdi QIU Quan  
School of Machinery Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009

**Abstract:** Aiming at the problems that a weak structure of optimization parts might lead to deterioration of the overall performance for parts in the design processes of remanufacturing, the coupling relationship between the structures of parts was studied. The concepts of structure function coupling system were proposed, the model of structure function coupling system was established, the structure coupling degree was expressed with structural influence factors. Then, the design method of predecisional remanufacturing was given in the part levels, and the overall performance of parts was improved in the whole life cycle, and the engine crankshaft was taken as an example to verify the method.

**Key words:** predecisional remanufacturing; structure coupling relationship; structural influence factor; structure function coupling system

0 引言

《中国制造 2025》和“十三五”规划中均提出要

大力发展再制造产业,国内外学者对此开展了相关研究。姚巨坤等<sup>[1]</sup>针对再制造的产品材料设计、结构设计、生产设计等内容进行了研究;SUNDIN 等<sup>[2]</sup>对如何优化再制造产品设计过程进行了研究,以提高再制造的效率;LIU 等<sup>[3]</sup>针对再制造加工系

收稿日期:2018-04-27  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375133);国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB013406)

统可持续性评价的不足,提出了一种新的基于能值的再制造加工系统的评价方法。

不同于国外的“换件法”再制造策略,我国再制造策略主要采用“尺寸恢复法”,该策略的产业化瓶颈主要是再制造毛坯质量和数量的不确定性,为此提出了主动再制造的概念。主动再制造是将产品全生命周期纳入设计阶段,在最佳时间段内对产品实施再制造的过程,而主动再制造设计是实现主动再制造的有效手段。人们对主动再制造的研究尚处于起步阶段。宋守许等<sup>[4-5]</sup>分别从产品、零件和结构层面对主动再制造设计进行了研究,提出了主动再制造设计理论与设计方法,同时提出了寿命匹配的概念及其优化设计方法。

目前由于结构间存在复杂的耦合关系,对零件某一特征结构的优化易导致其他结构的劣化,进而导致零件整体性能降低。为解决上述问题,本文在对零部件结构耦合规律研究的基础上,提出了相应的主动再制造设计方法。

## 1 零件结构耦合关系

在机械设计过程中,零件结构具有机械特性,零件某一结构的特征参数变化不仅对自身性能产生作用,还可能会影响其他结构的性能,则称该影响关系为机械零部件的结构耦合关系。由于对某一特征结构或某一结构参数进行研究难以揭示结构间的耦合作用规律,故本文将零件视为一个有机整体,研究构成整体各要素间的耦合作用规律,并提出结构功能耦合系统的概念。

### 1.1 结构功能耦合系统

结构功能耦合系统是将零件视为一个有内部相互作用关系的有机整体,在分析零件结构间的机械特性和力学关系的基础上,运用方差分析和函数拟合的方法量化结构间的耦合关系,以直观地展现零件结构间耦合作用规律的逻辑框图。

结构功能耦合系统由零件结构间耦合关系、结构影响因子、结构强度关于设计参数及参数间交互作用的映射函数三部分组成。建立零件结构功能耦合系统模型的步骤如下:①根据零件机械特性判断结构间可能存在的耦合关系;②设计具有交互作用的正交试验,并对试验数据进行方差分析,得到设计参数及参数间交互作用对各结构冗余强度<sup>[6]</sup>的影响程度;③选择对结构冗余强度影响较大的设计参数和参数间的交互作用,在 MATLAB 中进行函数拟合,得到结构强度关于设计参数及参数间交互作用的映射函数;④在上述所有工作的基础上,用系统思维搭建描述零件

结构间耦合作用规律的逻辑框图(即零件结构功能耦合系统模型)。

结构功能耦合系统揭示了零件结构耦合关系,量化了耦合作用规律,可由此判断参数变化时引起的零件其他结构的性能变化。同时,为量化设计参数变化对各结构冗余强度的影响,本文提出了结构影响因子的概念。

### 1.2 结构影响因子

结构影响因子的定义及求解过程如下:通过失效统计和设计经验,可以获取零件的薄弱结构( $S_1, S_2, \dots$ ),及可能对薄弱结构  $S_1$  冗余强度有影响的设计参数  $x_p (p = 1, 2, \dots, m)$ , 可能对薄弱结构  $S_2$  冗余强度有影响的设计参数  $x_q (q = m + 1, m + 2, \dots, m + k)$ , 根据实际情况选择合适的表头,设计具有交互作用的正交试验,以获取不同设计参数及参数交互作用水平组合下的各结构冗余强度。

对试验数据进行方差分析,可分别得到关于各薄弱结构冗余强度的总离差平方和、试验因素组间平方和和组内离差平方和。其中,组间离差平方和反映了设计参数对结构冗余强度的影响程度大小<sup>[7]</sup>。为消除数据越多而造成的各项离差越大的问题,将设计参数  $x_j (j = 1, 2, \dots, J)$  的组间离差平方和除以总的离差平方和(即  $\epsilon_{ji} = SS_j^{(i)} / SS_{\text{总}}^{(i)}$ ), 定义为结构冗余强度  $r_i (i = 1, 2, \dots, I)$  对设计参数  $x_j$  的结构影响因子  $\epsilon_{ji}$ 。其中,  $SS_j^{(i)}$  为结构  $S_i$  冗余强度  $r_i$  的总离差平方和。结构影响因子  $\epsilon_{ji}$  反映了设计参数  $x_j$  对结构冗余强度  $r_i$  的影响程度,进而量化了结构间的耦合作用关系。

### 1.3 结构功能耦合系统模型建立

以发动机曲轴为例来说明结构功能耦合系统模型的建立过程。曲轴在实际应用过程中的主要损坏原因是疲劳和磨损,目前再制造技术已可实现对曲轴磨损的完全修复,故本文只考虑曲轴的疲劳强度,主轴颈、连杆轴颈、主轴颈圆角、连杆轴颈圆角、曲柄臂、油孔和平衡块等是曲轴主要的特征结构。

根据设计手册<sup>[8]</sup>可知,主轴颈的长度、直径和长径比可能对其强度产生耦合作用,连杆轴颈的直径、长径比和油孔直径可能对其强度产生耦合作用,主轴颈圆角的半径、主轴颈直径和主轴颈直径与连杆轴颈直径的比值可能对其强度产生耦合作用,连杆轴颈圆角的半径、连杆轴颈直径可能对其强度产生耦合作用,曲柄臂的宽度与厚度可能对其强度产生耦合作用,油孔的直径、连杆轴颈和主轴颈直径可能对油孔强度产生耦合作用,平

衡块的质量和到曲轴重心的距离可能对其强度有耦合作用。由此可构建曲轴结构功能耦合系统模型,见图 1。其中, $L_1$ 、 $D_1$ 、 $R_1$  分别为主轴颈长度、直径和圆角半径; $L_2$ 、 $D_2$ 、 $R_2$  分别为连杆轴颈长度、直径和圆角半径; $d_0$  为油孔直径; $B$ 、 $\delta$  分别为曲柄臂宽度和厚度; $h$ 、 $m$  分别为平衡块的重心离曲轴重心的距离和平衡块的质量;“耦”表示结构间可能存在耦合关系; $r_1=f_1$ , $r_2=f_2$ , $\cdots$ , $r_7=f_7$  分别表示各结构冗余强度关于设计参数的映射函数; $r'_1\sim r'_7$  分别为在具体设计参数组合下的各结构冗余强度的输出数值。根据结构间可能存在的耦合作用,设计具有交互作用的正交试验,运用仿真分析手段,可得到各结构在不同参数水平组合下冗余强度的数据集  $U$ 。对仿真数据集进行函数拟合,可得到映射函数  $f_1\sim f_7$  的具体表达式。对数据集进行方差分析,可得到各结构冗余强度关于各设计参数的结构影响因子。

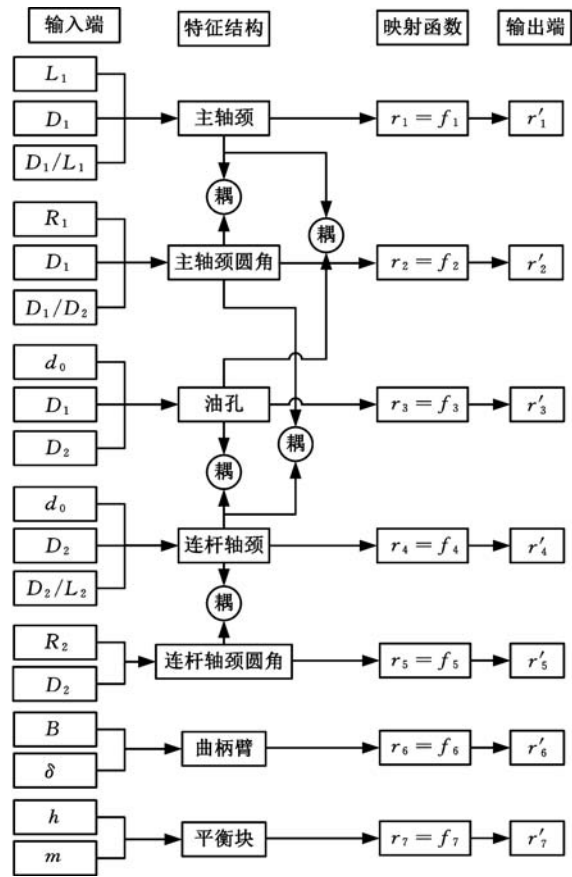


图 1 结构功能耦合系统模型

Fig.1 Function coupling system model of structure

2 基于零件结构耦合关系的设计方法

通过上述研究可建立零件结构功能耦合系统模型,揭示零件结构间的耦合关系,但优化某一结构而导致另一结构劣化的问题仍未解决,因此本文提出了基于零件结构耦合关系的主动再制造设计

方法。采用结构功能衍生系数优化法<sup>[9]</sup>进行优化设计,在确定结构冗余强度关于设计参数及设计参数间交互作用映射函数的基础上,建立衍生系数导数矩阵(derivative coefficient matrix, DCM)和单调性矩阵,进而得到结构冗余强度对设计参数的单调性关系,并由此对参数进行优化设计。整个优化流程可分为以下 3 个步骤:

(1) 结构耦合关系分析。将零件视为一个有内部相互作用关系的有机整体,分析具体零件的机械特性及其服役时各结构间的力学关系,判断零件结构间可能存在的耦合关系。

(2) 设计试验及数据处理。根据零件结构及设计参数间可能存在的耦合作用,设计具有交互作用的正交试验。对试验结果进行方差分析并计算结构影响因子,以量化设计参数对结构冗余强度的影响程度。选择结构影响因子较大的设计参数和参数间的交互作用,运用 MATLAB 进行函数拟合,得到结构冗余强度与设计参数及其交互作用的映射函数,并建立结构功能耦合系统模型。

(3) 优化设计。根据所得函数模型,将不满足冗余强度条件(冗余强度条件为  $r \geq 1.25$ )的结构作为优化对象,采用结构功能衍生系数优化法对设计参数进行优化,最终使零件满足冗余强度条件或数据处于设计范围内。

3 实例分析

以 6L240 型号柴油机曲轴为例,以曲轴易发生疲劳损坏的结构主轴颈、连杆轴颈、轴颈圆角和油孔为研究对象,并建立其结构功能耦合系统模型,见图 1。以主轴颈直径  $D_1$ 、连杆轴颈直径  $D_2$ 、主轴颈圆角半径  $R_1$ 、油孔直径  $d_0$  和连杆轴颈长度  $L_2$  为优化对象,根据设计手册,得到各结构设计参数的取值范围,见表 1。

表 1 结构设计参数的范围

Tab.1 Range of structural design parameters mm

参数名称	初始值	范围值
主轴颈直径 $D_1$	92	84 ~ 100
连杆轴颈直径 $D_2$	76	72 ~ 89
主轴颈圆角半径 $R_1$	6.0	5.0 ~ 6.4
油孔直径 $d_0$	7.0	6.6 ~ 9.4
连杆长度 $L_2$	46	46 ~ 53

采用 ABAQUS 软件对曲轴进行应力分析,并采用 Fe-safe 软件对曲轴进行疲劳分析以得到其寿命云图见图 2,用应力循环次数表征曲轴的疲劳寿命,图中的数值大小表示应力循环次数的常用对数值( $\lg n$ )。由图 2 可以看出,仿真过程中该曲轴的最小疲劳寿命值为  $n=10^{8.778}$  次(即应力



循环次数为  $10^{8.778}$ ), 出现在主轴颈圆角处, 且连杆轴颈同样为薄弱部位。

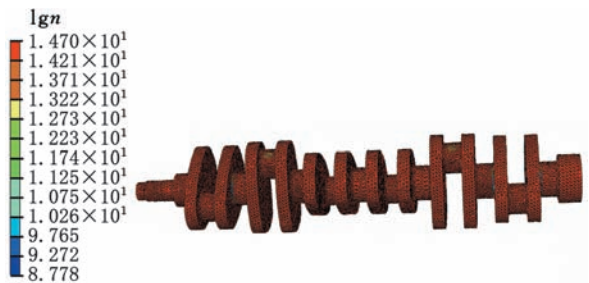


图 2 曲轴疲劳寿命仿真

Fig.2 Fatigue life simulation of crankshaft

根据该柴油机的使用工况<sup>[10]</sup>(使用寿命为 30 年, 每年工作 365 d, 每天 20 h, 曲轴 1 000 r/min), 推测其寿命周期内的应力循环次数为  $n = 6.7 \times 10^9$  (曲轴在一个寿命周期内所损耗的疲劳寿命为  $6.7 \times 10^9$  次)。

结合冗余强度的计算公式, 由于现有技术对零件疲劳损伤的恢复效果甚微, 可认为强度恢复量  $H \approx 0$ , 故曲轴的冗余强度为

$$r_i = \frac{D_i - D_i(t) + H_i(t)}{D_i(t)} = \frac{N_i - n}{n}$$
$$i = 1, 2, \dots, I$$

式中,  $D_i$  为零件结构  $S_i$  在设计阶段的最大强度允许损伤量;  $D_i(t)$  为经过  $t$  时间的服役后, 结构产生的强度损伤量;  $H_i(t)$  为结构  $S_i$  在  $t$  时刻进行再制造可恢复的强度量;  $N_i$  为结构  $S_i$  在当前载荷水平下的疲劳寿命。

本文采用具有交互作用的正交试验法进行分析, 仅考虑因素间的一级交互作用(两两交互作用) 并将试验因素分为 2 个水平, 分别见表 2 ~ 表 4。

表 2 主轴颈圆角试验因素水平

Tab.2 Test factor level of the main journal fillet

水平	$D_1$ (mm)	$D_1/D_2$	$R_1$ (mm)
1	84.00	1.10	5.00
2	100.00	1.25	6.40

表 3 连杆轴颈试验因素水平

Tab.3 Test factor level of the connecting rod journal

水平	$D_2/L_2$	$D_2$ (mm)	$d_0$ (mm)
1	1.67	72.00	6.60
2	1.43	89.00	9.40

表 4 油孔试验因素水平

Tab.4 Test factor level of oil hole

水平	$d_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)
1	6.60	84.00	72.00
2	9.40	100.00	89.00

根据图 2, 选取对主轴颈圆角、连杆轴颈和油孔有影响的设计参数作为试验因素, 按  $L_8(2^7)$  的正交试验表进行试验, 并根据试验结果计算零件各薄弱结构在不同设计参数组合下的冗余强度, 结果分别见表 5 ~ 表 7, 其中, “ $\times$ ” 表示交互作用, 1 和 2 表示交互作用的水平。

表 5 主轴颈圆角的冗余强度  $r_1$  的试验值

Tab.5 Experimental value of main journal fillet's redundant strength

编号	$D_1$ (mm)	$D_1/D_2$	$D_1 \times (D_1/D_2)$	$R_1$ (mm)	$D_1 \times R_1$	$(D_1/D_2) \times R_1$	$r_1$
1	84.00	1.10	1	5.00	1	1	-0.972
2	84.00	1.10	1	6.40	2	2	-0.510
3	84.00	1.25	2	5.00	1	2	-0.875
4	84.00	1.25	2	6.40	2	1	0.722
5	100.00	1.10	2	5.00	2	1	-0.929
6	100.00	1.10	2	6.40	1	2	-0.366
7	100.00	1.25	1	5.00	2	2	-0.858
8	100.00	1.25	1	6.40	1	1	2.515

表 6 连杆轴颈的冗余强度  $r_2$  的试验值

Tab.6 Experimental value of connecting rod journal's redundant strength

编号	$D_2/L_2$	$D_2$ (mm)	$(D_2/L_2) \times D_2$	$d_0$ (mm)	$(D_2/L_2) \times d_0$	$D_2 \times d_0$	$r_2$
1	1.67	72.00	1	6.60	1	1	-0.684
2	1.67	72.00	1	9.40	2	2	2.082
3	1.67	89.00	2	6.60	1	2	2.731
4	1.67	89.00	2	9.40	2	1	2.636
5	1.43	72.00	2	6.60	2	1	-0.828
6	1.43	72.00	2	9.40	1	2	2.802
7	1.43	89.00	1	6.60	2	2	1.822
8	1.43	89.00	1	9.40	1	1	-0.745

表 7 油孔的冗余强度  $r_3$  的试验值

Tab.7 Experimental value of oil hole's edundant strength

编号	$d_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$d_0 \times D_1$	$D_2$ (mm)	$d_0 \times D_2$	$D_1 \times D_2$	$r_3$
1	6.60	84.00	1	72.00	1	1	-0.961
2	6.60	84.00	1	89.00	2	2	7.748
3	6.60	100.00	2	72.00	1	2	-0.975
4	6.60	100.00	2	89.00	2	1	7.164
5	9.40	84.00	2	72.00	2	1	-0.998
6	9.40	84.00	2	89.00	1	2	-0.649
7	9.40	100.00	1	72.00	2	2	-0.997
8	9.40	100.00	1	89.00	1	1	-0.984

对仿真试验结果进行方差分析, 得到结构强度对设计参数的结构影响因子, 分别见表 8 ~ 表 10, 其中, E 表示组内, T 表示总体。若某一结构冗余强度对某一设计参数的结构影响因子小于 5%, 则表明该设计参数的变化对结构冗余强度的影响程度不大, 故本文只对结构影响因子大于 5% 的设计参数进行优化设计。

根据方差分析结果可知:  $D_1/D_2$ 、 $R_1$  及其交互作用  $(D_1/D_2) \times R_1$  对主轴颈圆角疲劳强度的影响程度较大,  $D_2/L_2$ 、 $D_2$ 、 $(D_2/L_2) \times D_2$ 、 $d_0$  和  $D_2 \times d_0$  对连杆轴颈疲劳强度的影响程度较大,  $d_0$ 、 $D_2$  和  $d_0 \times D_2$  对油孔疲劳强度的影响程度较大。

将试验所得数据通过 MATLAB, 采用多元线性回归与响应面相结合的方法进行函数拟合。为防止拟合阶数过高而产生振荡, 取拟合函数阶

表 8 主轴颈圆角冗余强度试验方差值  
Tab.8 Variance value of redundant strength test  
of main journal fillet

因素	离差平方和	结构影响因子ε(%)
$D_1$	0.50	4.83
$D_1/D_2$	2.29	22.13
$D_1 \times (D_1/D_2)$	0.33	3.19
$R_1$	4.49	43.38
$D_1 \times R_1$	0.44	4.25
$(D_1/D_2) \times R_1$	1.95	18.84
E	0.35	3.38
T	10.35	100.00

表 9 连杆轴颈冗余强度试验方差值  
Tab.9 Variancevalue of redundant strength test of  
connecting rod journal

因素	离差平方和	结构影响因子ε(%)
$D_2/L_2$	1.72	8.79
$D_2$	1.18	6.03
$(D_2/L_2) \times D_2$	2.96	15.13
$d_0$	1.74	8.89
$(D_2/L_2) \times d_0$	0.32	1.64
$D_2 \times d_0$	10.25	52.38
E	1.39	7.10
T	19.57	100.00

表 10 油孔冗余强度试验方差值  
Tab.10 Variancevalue of redundant strength test  
of oil holes

因素	离差平方和	结构影响因子ε(%)
$d_0$	34.47	32.62
$D_1$	0.11	0.10
$d_0 \times D_1$	0.01	0.01
$D_2$	37.02	35.03
$d_0 \times D_2$	33.97	32.14
$D_1 \times D_2$	0.10	0.09
E	0.01	0.01
T	105.68	100.00

数为 2。冗余强度  $r_1、r_2、r_3$  的拟合函数分别为

$$r_1 = A_0 + A_1(D_1/D_2) + A_2R_1 + A_3(D_1/D_2)^2 + A_4R_1^2 + A_5(D_1/D_2)R_1$$
$$r_2 = B_0 + B_1(D_2/L_2) + B_2D_2 + B_3d_0 + B_4(D_2/L_2)^2 + B_5D_2^2 + B_6d_0^2 + B_7(D_2/L_2)D_2 + B_8d_0D_2$$
$$r_3 = C_0 + C_1d_0 + C_2D_2 + C_3D_2^2 + C_4D_2^2 + C_5d_0D_2$$

其中,  $A_0 \sim A_5、B_0 \sim B_8、C_0 \sim C_5$  分别为各项系数,将其数值代入拟合函数,分别为

$$r_1 = -47.806\ 491(D_1/D_2) + 7.517\ 555\ 0R_1 + 0.702\ 235\ 29(D_1/D_2)^2 - 1.529\ 916\ 1R_1^2 + 9.354\ 047\ 6(D_1/D_2)R_1$$
$$r_2 = -0.141\ 802\ 14D_2 - 14.233\ 155(D_2/L_2)^2 + 0.000\ 149\ 391\ 44D_2^2 + 0.499\ 500\ 33d_0^2 + 0.596\ 164\ 22(D_2/L_2)D_2 - 0.095\ 139\ 706d_0D_2$$
$$r_3 = -0.134\ 382\ 12D_2 + 0.778\ 554\ 95D_2^2 + 0.011\ 010\ 905D_2^2 - 0.173\ 161\ 76d_0D_2$$

根据所得函数模型,可建立衍生系数矩阵  $M_{DCM}$ ,对其求导可得到衍生系数导数矩阵  $M'_{DCM}$ :

$$M_{DCM} = \begin{matrix} & d_0 & D_1 & D_2 & L_2 & R_1 \\ \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} & \varphi_{14} & \varphi_{15} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} & \varphi_{24} & \varphi_{25} \\ \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} & \varphi_{34} & \varphi_{35} \end{bmatrix} \end{matrix}$$
$$M'_{DCM} = \begin{matrix} & d_0 & D_1 & D_2 & L_2 & R_1 \\ \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \varphi'_{11} & \varphi'_{12} & \varphi'_{13} & \varphi'_{14} & \varphi'_{15} \\ \varphi'_{21} & \varphi'_{22} & \varphi'_{23} & \varphi'_{24} & \varphi'_{25} \\ \varphi'_{31} & \varphi'_{32} & \varphi'_{33} & \varphi'_{34} & \varphi'_{35} \end{bmatrix} \end{matrix}$$
$$\varphi_{11} = 0$$
$$\varphi_{12} = (A_1/D_2 + A_5R_1/D_2)D_1 + (A_3/D_2^2)D_1^2$$
$$\varphi_{13} = (A_1D_1 + A_5D_1R_1)/D_2 + A_3D_1^2/D_2^2$$
$$\varphi_{14} = 0 \quad \varphi_{15} = (A_2 + A_5D_1/D_2)R_1 + A_4R_1^2$$
$$\varphi_{21} = (B_3 + B_8D_2)d_0 + B_6D_2 \quad \varphi_{22} = 0$$
$$\varphi_{23} = (B_1/L_2 + B_2 + B_8d_0)D_2 + (B_4/L_2^2 + B_5 + B_7/L_2)D_2^2 \quad \varphi_{24} = (B_1D_2 + B_7D_2^2)/L_2 + B_4D_2^2/L_2^2$$
$$\varphi_{25} = 0 \quad \varphi_{31} = (C_1 + C_5D_2)d_0 + C_3D_2$$
$$\varphi_{32} = 0 \quad \varphi_{33} = (C_2 + C_5d_0)D_2 + C_4D_2^2$$
$$\varphi_{34} = 0 \quad \varphi_{35} = 0 \quad \varphi'_{11} = 0$$
$$\varphi'_{12} = A_1/D_2 + A_5R_1/D_2 + 2A_3D_1/D_2^2$$
$$\varphi'_{13} = -(A_1D_1 + A_5D_1R_1)/D_2^2 - 2A_3D_1^2/D_2^3$$
$$\varphi'_{14} = 0 \quad \varphi'_{15} = A_2 + A_5D_1/D_2 + 2A_4R_1$$
$$\varphi'_{21} = B_3 + B_8D_2 + 2B_6d_0 \quad \varphi'_{22} = 0$$
$$\varphi'_{23} = B_1/L_2 + B_2 + B_8d_0 + 2(B_4/L_2^2 + B_5 + B_7/L_2)D_2$$
$$\varphi'_{24} = -(B_1D_2 + B_7D_2^2)/L_2^2 - 2B_4D_2^2/L_2^3$$
$$\varphi'_{25} = 0 \quad \varphi'_{31} = C_1 + C_5D_2 + 2C_3d_0$$
$$\varphi'_{32} = 0 \quad \varphi'_{33} = C_2 + C_5d_0 + 2C_4D_2$$
$$\varphi'_{34} = 0 \quad \varphi'_{35} = 0$$

首先对冗余强度小于 0 的结构进行优化,再对冗余强度小于 1.25 的结构进行优化,当优化后的零件整体冗余强度  $r \geq 1.25$  时(即满足产品下一生命周期的使用)完成优化。分别取  $d_0、D_1、D_2、R_1、L_2$  的优化步长为 0.2、1、1、0.2、1。

零件的原始设计参数如下: $d_0 = 7\text{ mm}, D_1 = 92\text{ mm}, D_2 = 76\text{ mm}, L_2 = 46\text{ mm}, R_1 = 6\text{ mm}, r_1 = 1.126\ 3, r_2 = -0.047\ 3, r_3 = -0.086\ 9$ 。由于  $r_2, r_3 < 0$ ,故以  $r_2、r_3$  为优化对象,其单调性矩阵如下:

$$\begin{matrix} & d_0 & D_1 & D_2 & L_2 & R_1 \\ \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & + & - & 0 & + \\ - & 0 & + & + & 0 \\ - & 0 & + & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中,“+”表示结构冗余强度关于设计参数单调递增;“-”表示结构冗余强度关于设计参数单调递减;“0”表示无关系。在进行结构冗余强度优化时,需要选择单调性一致的设计参数进行优化,否则就会出现优化某一结构而导致另一结构劣化

的现象,故选取优化参数  $d_0$ 、 $D_2$ 、 $L_2$ 。

零件第 1 次优化的设计参数如下: $d_0 = 6.8 \text{ mm}$ ,  $D_1 = 92.0 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 77.0 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 47.0 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 6.0 \text{ mm}$ ,  $r_1 = 0.969 0$ ,  $r_2 = 0.252 1$ ,  $r_3 = 0.269 1$ 。由于  $r_1, r_2, r_3 < 1.25$ , 故以  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  为优化对象,其单调性矩阵如下:

$$\begin{matrix} & d_0 & D_1 & D_2 & L_2 & R_1 \\ \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & + & - & 0 & + \\ - & 0 & + & + & 0 \\ - & 0 & + & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

则选取优化参数  $d_0$ 、 $D_1$ 、 $L_2$ 、 $R_1$ 。

零件第 2 次优化的设计参数如下: $d_0 = 6.6 \text{ mm}$ ,  $D_1 = 93.0 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 77.0 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 48.0 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 6.2 \text{ mm}$ ,  $r_1 = 1.129 0$ ,  $r_2 = 0.387 0$ ,  $r_3 = 0.849 3$ 。由于  $r_1, r_2, r_3 < 1.25$ , 故以  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  为优化对象,其单调性矩阵如下:

$$\begin{matrix} & d_0 & D_1 & D_2 & L_2 & R_1 \\ \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & + & - & 0 & - \\ - & 0 & + & - & 0 \\ - & 0 & + & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

则选取优化参数  $d_0$ 、 $D_1$ 、 $L_2$ 、 $R_1$ 。

本文省略零件第 3 次至第 11 次的优化过程,则零件第 12 次优化的设计参数如下: $d_0 = 6.6 \text{ mm}$ ,  $D_1 = 99.0 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 80.0 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 47.0 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 6.2 \text{ mm}$ ,  $r_1 = 1.482 7$ ,  $r_2 = 1.079 4$ ,  $r_3 = 2.203 7$ 。由于  $r_2 < 1.25$ , 故以  $r_2$  为优化对象,其单调性矩阵如下:

$$\begin{matrix} & d_0 & D_1 & D_2 & L_2 & R_1 \\ \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & + & - & 0 & + \\ - & 0 & + & + & 0 \\ - & 0 & + & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

则选取优化参数  $d_0$ 、 $D_2$ 、 $L_2$ 。其优化结果如下: $d_0 = 6.6 \text{ mm}$ ,  $D_1 = 99.0 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 81.0 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 48.0 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 6.2 \text{ mm}$ ,  $r_1 = 1.300 6$ ,  $r_2 = 1.347 8$ ,  $r_3 = 2.699 2$ 。零件整体的冗余强度  $r$  为 1.300 6, 满足冗余强度条件,优化过程结束。

由上述结论可知,在原尺寸基础上, $D_1$  增大 7 mm,  $D_2$  增大 5 mm,  $R_1$  增大 0.2 mm,  $d_0$  减小 0.4 mm,  $L_2$  增长 2 mm。优化结果符合柴油机设计手册的优化经验,优化后零件整体冗余强度  $r$  为 1.300 6,与初始状态相比,有较大提升且满足冗余强度条件。

## 4 结论

(1)针对主动再制造零件结构设计过程中存在的问题,以系统思维方式研究零件各结构间的耦合关系,提出了结构功能耦合系统的概念,直观

地展现了结构间的耦合作用规律,并给出了结构功能耦合系统模型的建立方法。

(2)在结构功能耦合系统模型建立的基础上,提出了主动再制造在零件层级的设计方法,解决了再制造设计过程中优化某一结构而导致另一结构劣化的问题,以曲轴为例进行了方法验证。

(3)所提设计方法有较强的普适性,但也存在一定程度的局限性,如本文的数据收集主要是通过仿真试验来获得,而没有条件从多方面进行验证。

## 参考文献:

- [1] 姚巨坤, 朱胜, 时小军, 等. 再制造设计的创新理论与方法[J]. 中国表面工程, 2014, 27(2):1-5.  
YAO Jukun, ZHU Sheng, SHI Xiaojun, et al. New Theory and Methods of Remanufacturing Design [J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2):1-5.
- [2] SUNDIN E, LINDAHL M. Rethinking Product Design for Remanufacturing to Facilitate Integrated Product Service Offerings[C]// IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. Washington: IEEE, 2008:1-6.
- [3] LIU C, CAI W, DINOLOV O, et al. Emergy Based Sustainability Evaluation of Remanufacturing Machining Systems[J]. Energy, 2018, 150: 670-680.
- [4] 宋守许, 刘明, 刘光复, 等. 现代产品主动再制造理论与设计方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 133-141.  
SONG Shouxu, LIU Ming, LIU Guangfu, et al. Theories and Design Methods for Proactive Remanufacturing of Modern Products [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7):133-141.
- [5] 宋守许, 冯艳, 柯庆镒, 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.
- [6] 刘明. 机电产品主动再制造时机确定方法[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.  
LIU Ming. Proactive Remanufacturing Timing Determination Method of Electromechanical Products [D]. Hefei: Hefei University of Technology. 2014.
- [7] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.  
LI Yunyan, HU Chuanrong. Experiment Design and Data Processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

(下转第 2538 页)

- 程建模与参数优化[J]. 中国机械工程, 2016, 27(18):2524-2532.
- HANG Zhengtao, YANG Jie, ZHANG Chaoyong, et al. Energy-oriented CNC Milling Process Modelling and Parameter Optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(18):2524-2532.
- [2] 胡韶华. 现代数控机床多源性能耗特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- HU Shaohua. Energy Consumption Characteristics of Multiple-component of Modern CNC Machine Tools[D]. Chongqing:Chongqing University, 2012.
- [3] 孔露露. 数控机床能耗建模与面向能量的加工参数优化[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
- KONG Lulu. Research on CNC Machine Tool Energy Modeling and Analysis of Its Influential Parameters [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2014.
- [4] ZHOU Lirong, LI Jianfeng, LI Fangyi, et al. An Improved Cutting Power Model of Machine Tools in Milling Process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(4):2384-2400.
- [5] GERMANI M, MANDOLINI M, MARCONI M, et al. Usability Demonstration of the G. EN. ESI Eco-design Platform: the Cooker Hood Case Study [C]//ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Boston, 2015: V004T05A051.
- [6] 邱行. 工件加工过程切削能耗的预测方法研究及应用系统开发[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- QIU Hang. Research on Cutting Energy Consumption Prediction Methods for Workpiece Machining Process and the Development of Application System [D]. Chongqing:Chongqing University, 2016.
- [7] 刘飞, 刘霜. 机床服役过程机电主传动系统的时段能量模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21):132-140.
- LIU Fei, LIU Shuang. Multi-period Energy Model of Electro-mechanical Main Driving System during the Service Process of Machine Tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21):132-140.
- [8] BALOGUN V A, MATIVENGA P T. Modelling of Direct Energy Requirements in Mechanical Machining Processes [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 41(2):179-186.
- [9] ULUER M U, UNVER H O, AKKUS K, et al. A Model for Predicting Theoretical Process Energy Consumption of Rotational Parts Using STEP AP224 Features. Re-engineering Manufacturing for Sustain Ability [M]. Singapore: Springer, 2013: 141-146.
- [10] DIAZ N, REDELSHEIMER E, DORNFELD D. Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing [C]//Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Braunschweig, 2011: 263-267.
- [11] LI L, YAN J H, XING Z W. Energy Requirements Evaluation of Milling Machines Based on Thermal Equilibrium and Empirical Modelling[J]. J. Clean Prod., 2013, 52:113-121.
- [12] JIA S, TANG R Z, LU J X. Therblig-based Modeling Methodology for Cutting Power and Its Application in External Turning[J]. Comput. Integr. Manuf. Syst., 2013, 19(5):1015-1024.
- [13] 何彦, 李育锋, 林申龙, 等. 一种基于 NC 代码的数控车床加工工件能耗获取方法: CN103235554A [P]. 2013-08-07.
- HE Yan, LI Yufeng, LIN Shenlong, et al. A Method of Obtaining NC Lathe Process Energy Consumption Based on NC Code: CN103235554A [P]. 2013-08-07.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 徐兴硕, 男, 1991 年生, 工程师。研究方向为卫星产品工艺。发表论文 4 篇。李方义(通信作者), 男, 1969 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为产品全生命周期评估, 低碳设计和制造。发表论文 100 余篇。E-mail: lifangyi@sdu.edu.cn.

(上接第 2526 页)

- [8] 杨连生. 内燃机设计[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1980.
- YANG Liansheng. Design of Combustion Engine [M]. Beijing: China Agricultural Machinery Press, 1980.
- [9] 汪伟. 基于零件结构耦合理论的主动再制造设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- WANG Wei. Design Method of Predecisional Remanufacturing Based on Component Structure Coupling Theory [J]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [10] 陈爱军, 商治. 6L240 型柴油机曲轴材料选用分析 [J]. 铁道机车与动车, 2004(7): 10-12.
- CHENG Aijun, SHANG Zhi. Selection and Analysis of Crankshaft Material for 6L240 Diesel Engine [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2004(7): 10-12.

(编辑 胡佳慧)

作者简介: 宋争许, 男, 1964 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为机电产品绿色设计与绿色制造、再制造理论与技术、产品再资源化技术与装备。E-mail: shouxus@163.com。汪伟(通信作者), 男, 1992 年生, 硕士研究生。研究方向为绿色设计与绿色制造、再制造工程。E-mail: wangwei9192@163.com.