

零件再制造过程的不确定能耗建模与评估方法

郭燕春, 李涛*, 彭世通, 李梦云, 董萌萌

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 针对零件再制造过程能耗评估困难问题, 建立基于图形评审技术 (graphical evaluation and review technology, GERT) 的能耗模型. 首先, 分析了零件再制造过程中能耗特性及能耗不确定性的原因, 阐述再制造过程各工序能量消耗的一般规律. 其次, 基于 GERT 建立了零件再制造过程能耗模型, 给出了不同再制造处理方式的概率和期望能耗的计算方法. 最终以发动机曲轴的再制造过程为案例对所提出的模型和方法进行了验证, 并与 Arena 软件仿真结果进行了对比分析, 验证了结果的合理性.

关键词: 再制造过程; 不确定性; 能耗建模; 图形评审技术

中图分类号: TH17

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201901007

0 引言

当前, 我国机床保有量达 8×10^6 台, 工程机械 6.5×10^6 台, 汽车达 1.7×10^8 辆以上. 预计到 2020 年, 报废的工程机械、汽车总量将分别达到 1.2×10^6 台、 $1.2 \times 10^7 \sim 1.6 \times 10^7$ 辆. 数量巨大的废旧产品表明我国再制造产业发展潜力很大. 2009 年, 我国大力推进了再制造试点工作, 选取了 150 余家企业和多家产业示范基地开展再制造试点工作. 2011~2017 年工业和信息化部节能与综合利用司共公布了 7 批《再制造产品目录》, 该目录涵盖了工程机械、电动机、办公设备、石油机械、矿山机械、轨道车辆、机床、内燃机、其他专用机械设备、汽车产品及其零部件等 10 大类产品^[1]. 2017 年, 工业和信息化部发布的《高端智能再制造行动计划(2018—2020 年)》指出, 到 2020 年我国再制造产业规模要达到 2×10^{11} 元. 我国再制造产业发展迅速, 对能源的需求也不断增加. 由于资源短缺问题日益凸显, 国家对于能源使用的标准不断加强, “十三五”规划提出在“十二五”规划单位 GDP 能耗降低 18.4% 的基础上, 单位 GDP 能耗再降低 15%. 虽然再制造相较于制造可以节约资源、减少能耗, 但再制造过程作为生产过

程依然会消耗能源. 且随着我国再制造规模的增大, 再制造对能源的需求增加, 《中国制造 2025》中对于再制造提出“促进再制造产业可持续发展”的要求. 合理预测和评估再制造过程的能耗对于再制造过程节能措施、促进再制造可持续发展有重要意义.

当前, 不同学者已从不同角度对再制造产品能量消耗进行了研究. 有的学者将再制造过程与制造过程比较, 得出再制造产品能耗方面的优势. Liu 等^[2]通过 LCA 的方法分别对柴油发动机的新品与再制造件的能耗和环境影响进行了评估和比较; Boustani 等^[3]基于 LCA 框架评价了多类再制造家电产品的生命周期过程能耗和经济节约等问题; Adler 等^[4]从生命周期的角度对柴油发动机 5 大部件的再制造和原始制造进行比较, 以能量消耗和物料使用为衡量标准得出再制造更具优势. 通过比较设备再制造前后的能耗, 罗毅^[5]建立了再制造机床的能耗分析模型, 并考虑了 3 种典型再制造节能技术及应用, 比较了再制造前后机床的节能效果. 通过分析机床再制造过程, 杜彦斌等^[6]建立了面向机床生命周期的再制造过程模型, 并就资源消耗、环境影响等方面对再制造过程进行了分析.

收稿日期: 2018-06-12; 修回日期: 2018-11-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775086); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT18JC13).

作者简介: 郭燕春(1993-), 男, 硕士生, E-mail: naroguo@163.com; 李涛*(1977-), 女, 副教授, 硕士生导师, E-mail: litao@dlut.edu.cn.

由此可见,目前一般采用 LCA 的方法或从生命周期的角度评估再制造产品过程的能耗,但对于再制造过程中的不确定性不能有效地处理,且评估的样本一般为单一的研究对象.再制造过程充满不确定性,废旧零件的质量情况和再制造工艺路线等诸多因素都会对零件再制造能耗有重要影响.图形评审技术(graphical evaluation and review technology,以下简称 GERT)是分析和研究复杂的、包含多种随机因素的系统或问题的方法,是一种应用范围广泛、构模功能强大的工具^[7].谢家平等^[8]考虑了再制造回收过程的多种不确定性,使用 GERT 建立产品回收再制造零部件和可再生材料的数量、期望返回时间模型;李成川等^[9]运用 GERT 图构建了再制造工艺路线的模型,得到了不确定工艺路线下的概率与期望时间.之前文献采用 GERT 解决了模型中概率和时间不确定的问题,因此,对于再制造过程中的能耗不确定及概率不确定问题,本文利用 GERT 建立零件再制造过程的能耗模型,求解再制造过程的期望能耗及各处理方式的概率.以曲轴再制造过程为例应用模型,给出再制造成功曲轴期望能耗的范围,并采用 Arena 仿真验证本文所建立模型的合理性.

1 零件再制造过程分析

零件再制造过程能耗源众多,建立零件再制造的能耗模型需要对再制造过程的能耗源构成及特性有清晰的认知,因此,先对再制造过程及其能耗源进行分析.

1.1 零件再制造过程的能耗特性及能耗不确定分析

零件再制造是对废旧零件进行筛选分类,并对其中存在一定损伤的零件进行功能恢复性修复的过程,如图 1 所示.一批产品经拆解后,零件通常先经肉眼初步判定出损伤严重的(如可见裂纹等)部分并报废,再经历清洗检测工艺判断零件的损伤类型和损伤程度,据此对零件作区分,一般区分出直接再利用件、可再制造件和材料回收件 3 类.可再制造件根据每条工艺路线所能修复的损伤类型和损伤程度进一步被分类,经过一系列再制造工艺后修复的零件再次被检测,最后再制造成功的零件将被再装配或存入仓库.

再制造零件能耗不确定性主要由两个方面构成:一是零件本身.对于同一类零件,废旧零件损

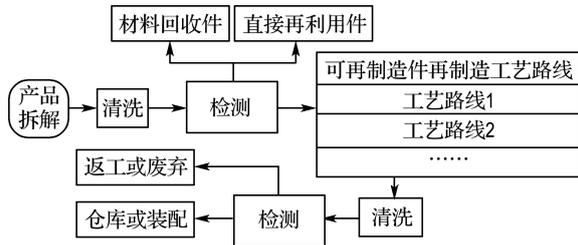


图 1 一般废旧零件再制造过程

Fig. 1 The general remanufacturing process of waste parts

伤类型和损伤程度的不确定是造成再制造过程能耗不确定性的主要因素.损伤类型的不确定是指废旧零件可能有一种或多种损伤类型同时存在,损伤程度的不确定是指即使同一损伤类别,不同废旧零件上的失效程度和损伤部位都体现出差异.修复工艺及其工艺参数由损伤类型和损伤程度确定.二是零件再制造工艺过程.多条不同的修复工艺路线以及同一工艺路线中各工序关联影响等都对零件再制造的不确定性产生重要影响.针对这两方面不确定性,本文拟在工序的层次上评估零件再制造能耗,构造出再制造过程的能耗模型.

1.2 零件再制造工序的能耗

零件的不确定性会对再制造过程的能耗产生重要影响,而零件再制造过程的能耗由各工序的能耗直接决定,因此本文主要考虑再制造工序能耗变化对再制造过程的影响.

假设从状态 i 到相邻状态 j 的过程为工序 ij ,则再制造工序能耗 E_{ij} 可以表达成此工序中各类耗能设备的功率 P_{ij} 对于时间 t_{ij} 的积分.零件的损坏程度如磨损程度、弯曲度、裂纹深度和长度等的不确定会造成再制造工艺参数的不确定,如选择喷涂或熔覆的涂层厚度、选择加工余量的大小等^[10],这些工艺参数的变化会对再制造设备的实际功率 P_{ij} 产生影响.时间 t_{ij} 为再制造工序 ij 所消耗的时间,由于废旧零件的诸多不确定性导致其再制造时间也存在着不确定.再制造工序时间一般都服从一定分布^[9],如负指数分布、常数分布、正态分布等.

$$E_{ij} = \int_0^{t_{ij}} P_{ij} dt \quad (1)$$

2 基于 GERT 的零件再制造过程能耗建模

图形评审技术是一种可反映多种随机变量及

其相互关系的技术,由于零件再制造过程中各个工序的能耗存在不确定性,本文采用图形评审技术(GERT)对再制造过程能耗进行建模.

2.1 GERT图分析

GERT图由枝线、节点和流3部分组成,枝线是一个节点到另一个节点的有向线段,节点是枝线的连接点,流代表节点间各种定量参数和制约关系.GERT图的逻辑节点包含输入端和输出端,输入端有异或型、或型与与型3种逻辑关系,输出端有确定型和概率型两种逻辑关系,共构成6种逻辑节点,见表1.

表1 GERT图节点类型^[9]

Tab.1 The node type in the GERT diagram

输出	输入		
	异或型 ∇	或型 \triangleleft	与型 \sqsubset
确定型 \triangleright	\bigcirc	\diamond	\bigcirc
概率型 \triangleright	\diamond	\diamond	\diamond

2.2 GERT模型求解过程

本文中,前一个工序完成而后一个工序未开始的状态为一节点;枝线表示从节点*i*到节点*j*的工序*ij*.在GERT图中,当节点仅为互斥型输入概率型输出节点时,适当规定其活动参数的概率特征,GERT图将成为一种典型的线性系统^[11],再通过信号流图原理求解相应节点的等价传递函数,并利用矩母函数的性质得到相应节点间的实现概率和期望能耗.

2.2.1 矩母函数和传递函数 假设工序*ij*消耗能量为*E_{ij}*,其概率密度函数为*f(E_{ij})*或*p(E_{ij})*,能量消耗的矩母函数为

$$M_{ij}(s) = E(e^{sE_{ij}}) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{sE_{ij}} f(E_{ij}) dE_{ij}; E_{ij} \text{ 为连续随机变量} \\ \sum e^{sE_{ij}} p(E_{ij}); E_{ij} \text{ 为离散随机变量} \end{cases} \quad (2)$$

其中*s*为复数变量.再制造过程中,各工序的能量消耗是随再制造设备功率和再制造时间共同决定的量,可假设再制造过程的GERT模型中所有的*E_{ij}*为连续随机变量.

传递函数是描述线性系统输入输出关系的复数表达式,节点*i*到节点*j*的传递函数*W_{ij}*为工序概率*p_{ij}*与其矩母函数*M_{ij}(s)*的乘积,即

$$W_{ij}(s) = p_{ij}M_{ij}(s) \quad (3)$$

矩母函数的性质有两个:

(1)非负不确定变量*X*的矩母函数的*n*阶导数在*s=0*处的值,就是*X*的*n*阶原点矩^[7],即

$$\left[\frac{\partial^n}{\partial s^n} M_{ij}(s) \right] \Big|_{s=0} = E[E_{ij}^n] \quad (4)$$

(2)在GERT模型中,由于*M_{ij}(0)=E(e⁰)=1*,节点*i*到节点*j*的等价传递概率等于传递函数在*s=0*时的值,即

$$p_{ij}^e = W_{ij}(0) \quad (5)$$

2.2.2 GERT图的基本形式和梅森公式 GERT图最基本的结构为串联、并联和自环3种类型,这3种基本结构可构成复杂的GERT图.

(1)串联结构及其传递关系

如图2(a)所示,串联支路上节点*i*到节点*k*的传递函数*W_{ik}*为串联枝线上各传递函数之积,即

$$W_{ik} = W_{ij}W_{jk} \quad (6)$$

(2)并联结构及其传递关系

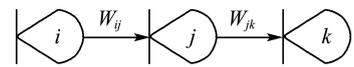
如图2(b)所示,并联支路中节点*i*到节点*j*,活动执行一次时只能选择一条路径,其传递函数为

$$W_{ij} = W_{ij1} + W_{ij2} \quad (7)$$

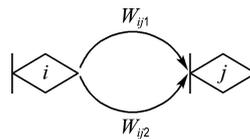
(3)自环结构及其传递关系

如图2(c)所示,自环结构由节点*i*的自环和由节点*i*引出的活动构成.在自环结构中,节点*i*的自环可能被执行*n*次(*n=0,1,2,...*),节点*i*到节点*j*的活动只能执行一次,则节点*i*到节点*j*的传递函数为

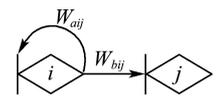
$$W_{ij} = \frac{W_{bij}}{1 - W_{aij}} \quad (8)$$



(a) 串联结构



(b) 并联结构



(c) 自环结构

图2 GERT图的3种基本结构

Fig.2 Three basic structures of the GERT diagram

在由3种基本结构构成的复杂GERT图中,任意两点*i*和*j*之间的传递函数可用梅森公式表示为

$$W_{ij}^e = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^m P_k \Delta_k \quad (9)$$

式中： W_{ij}^e 为节点 i 到节点 j 的等价传递函数； P_k 为由节点 i 到节点 j 的第 k 条前向通路的传递函数； Δ 为 GERT 图中由节点 i 到节点 j 的特征式， $\Delta = 1 - \sum_a L_a + \sum_{b,c} L_b L_c - \dots$ ， $\sum_a L_a$ 为节点 i 到节点 j 中所有不同回路 a 传递函数之和， $\sum_{b,c} L_b L_c$ 为所有两两不接触的回路 b, c 传递函数乘积之和 ($a, b, c = 0, 1, 2, \dots$)； Δ_k 为 Δ 的余子式，即与第 k 条通路相接触回路的传递函数代以零值并代入 Δ 计算，得到 Δ_k 。

2.2.3 几个重要假设 为了使所建模型更好地适用于本文所研究的对象，需要做出以下假设：

假设 1 各个节点之间的发生概率不随时间变化而改变，即各工序再制造是一个较为稳定的过程，且各个工序之间相互独立、互不影响，这保证了再制造系统的稳定性。

假设 2 在零件损伤相同情况下，同一工序进行再制造消耗的能量是相同的，且不考虑机器故障、紧急订单等调度因素对于再制造过程能耗的影响，这保证了只考虑零件的质量情况对再制造能耗的影响。

假设 3 各个工序的能量消耗是个不确定的值，再制造过程需要通过测定各个设备的实际功率与时间的曲线，再统计得出各个工序的能耗规律。在此，为简便计算求解和仿真过程，假设各个工序的能量消耗分布函数如表 2 所示。

表 2 某零件再制造中各个工序的矩母函数和传递函数

Tab. 2 The moment mother function and transfer function of each process in the remanufacture of a part

工艺序号	工艺代码	实现概率	能耗分布	矩母函数 $M_{ij}(s)$	传递函数 $W_{ij}(s)$
1	0→1	p_{01}	均值为 E_{01} 的负指数分布	$\frac{1}{1-E_{01}s}$	$\frac{p_{01}}{1-E_{01}s}$
	1→2	p_{12}	均值为 E_{12} 的负指数分布	$\frac{1}{1-E_{12}s}$	$\frac{p_{12}}{1-E_{12}s}$
2	1→10	$p_{1,10}$	均值为 $E_{1,10}$ 的负指数分布	$\frac{1}{1-E_{1,10}s}$	$\frac{p_{1,10}}{1-E_{1,10}s}$
	1→11	$p_{1,11}$	均值为 $E_{1,11}$ 的负指数分布	$\frac{1}{1-E_{1,11}s}$	$\frac{p_{1,11}}{1-E_{1,11}s}$
3	2→3	p_{23}	均值为 E_{23} ，方差为 σ_{23}^2 的正态分布	$e^{E_{23}s+0.5\sigma_{23}^2s^2}$	$p_{23}e^{E_{23}s+0.5\sigma_{23}^2s^2}$
	3→4	p_{34}	均值为 E_{34} ，方差为 σ_{34}^2 的正态分布	$e^{E_{34}s+0.5\sigma_{34}^2s^2}$	$p_{34}e^{E_{34}s+0.5\sigma_{34}^2s^2}$
4	3→6	p_{36}	均值为 E_{36} ，方差为 σ_{36}^2 的正态分布	$e^{E_{36}s+0.5\sigma_{36}^2s^2}$	$p_{36}e^{E_{36}s+0.5\sigma_{36}^2s^2}$
	4→5	p_{45}	均值为 E_{45} ，方差为 σ_{45}^2 的正态分布	$e^{E_{45}s+0.5\sigma_{45}^2s^2}$	$p_{45}e^{E_{45}s+0.5\sigma_{45}^2s^2}$
6	5→6	p_{56}	均值为 E_{56} ，方差为 σ_{56}^2 的正态分布	$e^{E_{56}s+0.5\sigma_{56}^2s^2}$	$p_{56}e^{E_{56}s+0.5\sigma_{56}^2s^2}$
	6→7	p_{67}	均值为 E_{67} 的负指数分布	$\frac{1}{1-E_{67}s}$	$\frac{p_{67}}{1-E_{67}s}$
8	7→8	p_{78}	均值为 E_{78} 的负指数分布	$\frac{1}{1-E_{78}s}$	$\frac{p_{78}}{1-E_{78}s}$
	7→9	p_{79}	均值为 E_{79} 的负指数分布	$\frac{1}{1-E_{79}s}$	$\frac{p_{79}}{1-E_{79}s}$

2.2.4 GERT 图求解 图 3 为某典型废旧零件再制造过程的 GERT 模型，废旧零件的处理方式有再制造成功(节点 0 到节点 9)、材料回收(节点 0 到节点 10)、直接再利用(节点 0 到节点 11)和再制造失败(节点 0 到节点 8)4 种。对于可再制造件，废旧零件经工艺路线 1(0-1-2-3-6-7-9)或工艺路线 2(0-1-2-3-4-5-6-7-9)

得到再制造件。

(1)再制造成功的概率与期望能耗

节点 0 到节点 9 的再制造过程中，特征式 $\Delta=1$ ，工艺路线 1 和工艺路线 2 都没有回路， Δ 的余子式分别为 $\Delta_1=1, \Delta_2=1$ 。根据梅森公式，整个再制造过程(节点 0 到节点 9)的等效传递函数为

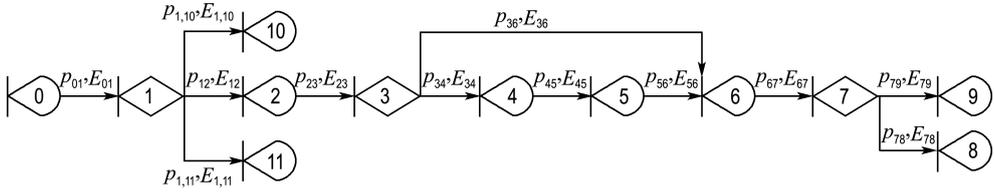


图 3 基于 GERT 的某零件再制造过程模型

Fig. 3 The remanufacturing process model of a part based on GERT

$$W_{09}^e = \sum_{k=1}^2 P_k \Delta_k / \Delta =$$

$$W_{01} W_{12} W_{23} W_{67} W_{79} (W_{36} + W_{34} W_{45} W_{56}) =$$

$$\frac{p_{01} p_{12} p_{23} p_{67} p_{79} e^{E_{23}s + 0.5\sigma_{23}^2 s^2}}{(1 - E_{01}s)(1 - E_{12}s)(1 - E_{67}s)(1 - E_{79}s)} \times$$

$$[p_{36} e^{E_{36}s + 0.5\sigma_{36}^2 s^2} +$$

$$p_{34} p_{45} p_{56} e^{(E_{34} + E_{45} + E_{56})s + 0.5(\sigma_{34}^2 + \sigma_{45}^2 + \sigma_{56}^2)s^2}] \quad (10)$$

由矩母函数性质 2, 等价传递概率为

$$p_{09}^e = \frac{W_{09}(s) |_{s=0}}{M_{09}(s) |_{s=0}} =$$

$$\frac{p_{01} p_{12} p_{23} p_{67} p_{79} (p_{36} + p_{34} p_{45} p_{56})}{(1 - E_{01})(1 - E_{12})(1 - E_{67})(1 - E_{79})} \quad (11)$$

再制造过程的期望能耗为

$$E(E_{09}) = \frac{\partial}{\partial s} [M_{09}(s)] |_{s=0} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{09}(s)}{W_{09}(0)} \right] |_{s=0} =$$

$$\frac{p_{01} p_{12} p_{23} p_{67} p_{79}}{p_{09}^e} [p_{36} (E_{01} + E_{12} +$$

$$E_{23} + E_{36} + E_{67} + E_{79}) + p_{34} p_{45} p_{56} \times$$

$$(E_{01} + E_{12} + E_{23} + E_{34} + E_{45} + E_{56} +$$

$$E_{67} + E_{79})] \quad (12)$$

(2) 材料回收的概率与期望能耗

节点 0 到节点 10 的等价传递函数为

$$W_{0,10}^e = W_{01} W_{1,10} = \frac{p_{01} p_{1,10}}{(1 - E_{01}s)(1 - E_{1,10}s)} \quad (13)$$

材料回收的概率为

$$p_{0,10}^e = W_{0,10}^e(s) |_{s=0} = p_{01} p_{1,10} \quad (14)$$

材料回收的期望能耗为

$$E(E_{0,10}) = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{0,10}(s)}{W_{0,10}(0)} \right] |_{s=0} = E_{01} + E_{1,10} \quad (15)$$

(3) 直接再利用的概率与期望能耗

节点 0 到节点 11 的等价传递函数为

$$W_{0,11}^e = W_{01} W_{1,11} = \frac{p_{01} p_{1,11}}{(1 - E_{01}s)(1 - E_{1,11}s)} \quad (16)$$

直接再利用的概率为

$$p_{0,11}^e = W_{0,11}^e(s) |_{s=0} = p_{01} p_{1,11} \quad (17)$$

直接再利用的期望能耗为

$$E(E_{0,11}) = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{0,11}(s)}{W_{0,11}(0)} \right] |_{s=0} = E_{01} + E_{1,11} \quad (18)$$

(4) 再制造失败的概率与期望能耗

节点 0 到节点 8 的等价传递函数为

$$W_{08}^e = W_{01} W_{12} W_{23} W_{67} W_{78} (W_{36} + W_{34} W_{45} W_{56}) =$$

$$\frac{p_{01} p_{12} p_{23} p_{67} p_{78} e^{E_{23}s + 0.5\sigma_{23}^2 s^2}}{(1 - E_{01}s)(1 - E_{12}s)(1 - E_{67}s)(1 - E_{78}s)} \times$$

$$[p_{36} e^{E_{36}s + 0.5\sigma_{36}^2 s^2} +$$

$$p_{34} p_{45} p_{56} e^{(E_{34} + E_{45} + E_{56})s + 0.5(\sigma_{34}^2 + \sigma_{45}^2 + \sigma_{56}^2)s^2}] \quad (19)$$

再制造失败的概率为

$$p_{08}^e = W_{08}^e(s) |_{s=0} =$$

$$\frac{p_{01} p_{12} p_{23} p_{67} p_{78} (p_{36} + p_{34} p_{45} p_{56})}{(1 - E_{01})(1 - E_{12})(1 - E_{67})(1 - E_{78})} \quad (20)$$

再制造失败的期望能耗为

$$E(E_{08}) = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{08}(s)}{W_{08}(0)} \right] |_{s=0} =$$

$$\frac{p_{01} p_{12} p_{23} p_{67} p_{78}}{p_{08}^e} [p_{36} (E_{01} + E_{12} +$$

$$E_{23} + E_{36} + E_{67} + E_{78}) + p_{34} p_{45} p_{56} \times$$

$$(E_{01} + E_{12} + E_{23} + E_{34} + E_{45} + E_{56} +$$

$$E_{67} + E_{78})] \quad (21)$$

3 模型应用与验证

3.1 废旧曲轴再制造过程

本文研究对象为六缸、水冷、直喷式车用高强度 WD615 型柴油机的曲轴, 曲轴的再制造工艺路线如图 4 所示. 本文研究重点为曲轴再制造过程的能耗问题, 因此图 4 主要包含着不同的再制

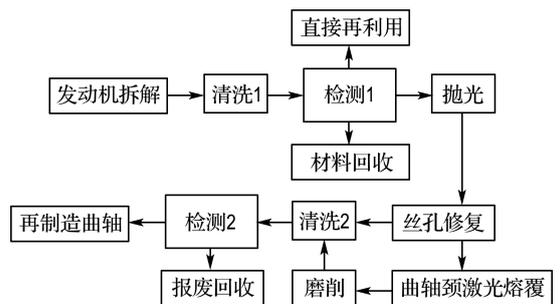


图 4 曲轴的再制造过程模型

Fig. 4 The remanufacturing process model of crankshaft

造工艺路线下曲轴的再制造成功过程,也包括曲轴直接再利用、材料回收和曲轴再制造失败等不同的处理方式。

拆解的曲轴经过清洗、检测之后,按照废旧曲轴的损伤情况将可再制造曲轴分为两类:较小损伤的曲轴和较大损伤的曲轴.根据分类结果采用两条修复工艺路线:对于损伤较小的曲轴采用抛光和丝孔修复的工艺对曲轴进行修复;对于损伤程度较严重的曲轴则先进行抛光和丝孔修复处理,之后再对曲轴颈激光熔覆和磨削,使曲轴恢复性能。

3.2 曲轴再制造过程的期望能耗及分析

发动机曲轴再制造的各工序名称及其相关参数如表3所示。

表3 曲轴再制造过程各个工序的能耗参数
Tab.3 The parameter of energy consumption in each remanufacturing process of crankshaft

工艺代码	平均能耗及相关参数	实现概率
0-1	$E_{01}=0.998 \text{ kW} \cdot \text{h}$	$p_{01}=1$
1-2	$E_{12}=0.443 \text{ kW} \cdot \text{h}$	$p_{12}=0.7$
1-10	$E_{1,10}=0.443 \text{ kW} \cdot \text{h}$	$p_{1,10}=0.2$
1-11	$E_{1,11}=0.443 \text{ kW} \cdot \text{h}$	$p_{1,11}=0.1$
2-3	$E_{23}=1.050 \text{ kW} \cdot \text{h}, \sigma_{23}^2=0.14^2$	$p_{23}=1$
3-4	$E_{34}=0.119 \text{ kW} \cdot \text{h}, \sigma_{34}^2=0.05^2$	$p_{34}=0.3$
3-6	$E_{36}=0.119 \text{ kW} \cdot \text{h}, \sigma_{36}^2=0.05^2$	$p_{36}=0.7$
4-5	$E_{45}=2.100 \text{ kW} \cdot \text{h}, \sigma_{45}^2=0.4^2$	$p_{45}=1$
5-6	$E_{56}=6.615 \text{ kW} \cdot \text{h}, \sigma_{56}^2=0.7^2$	$p_{56}=1$
6-7	$E_{67}=0.613 \text{ kW} \cdot \text{h}$	$p_{67}=1$
7-8	$E_{78}=0.443 \text{ kW} \cdot \text{h}$	$p_{78}=0.05$
7-9	$E_{79}=0.443 \text{ kW} \cdot \text{h}$	$p_{79}=0.95$

根据式(10)~(21)可得再制造成功概率 $p_{09}^c =$

0.665 ,期望能耗 $E(E_{09})=6.2805 \text{ kW} \cdot \text{h}$;材料回收概率 $p_{0,10}^c=0.2$,期望能耗 $E(E_{0,10})=1.441 \text{ kW} \cdot \text{h}$;直接再利用概率 $p_{0,11}^c=0.1$,期望能耗 $E(E_{0,11})=1.441 \text{ kW} \cdot \text{h}$;再制造失败概率 $p_{08}^c=0.035$,期望能耗 $E(E_{08})=6.2805 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

在零件再制造过程中,曲轴中可再制造件能耗最多.在节点3之后,可再制造件被分为两类,对应不同工艺路线的再制造.因此可根据式(12)得出再制造成功期望能耗的范围:当只由工艺路线1进行再制造($p_{34}=1$)时,再制造过程的期望能耗为 $3.666 \text{ kW} \cdot \text{h}$;而只采用工艺路线2进行修复($p_{36}=1$)时,再制造过程的期望能耗为 $12.381 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

3.3 仿真验证及对比分析

Arena是一款通用仿真软件,可以建立诸如生产系统、服务系统等仿真模型,并可以根据实际需要设定仿真参数进行动态系统模拟,从而对实际的复杂系统进行有效分析^[12]。

按照2.2节中的GERT模型在Arena软件中建立模型,如图5所示.废旧曲轴的处理方式有4种:再制造成功、材料回收、直接再利用、再制造失败。

仿真过程对随机进入系统的10000个废旧零件进行仿真,各个处理结果如图6所示。

将各个处理方式的仿真概率和能耗与3.2节中的计算结果比较,如表4所示。

可再制造件按照7:3划分,进入到两条工艺路线再制造时,再制造成功的平均能耗为 $6.2495 \text{ kW} \cdot \text{h}$.而当仿真时只采用工艺路线1($p_{34}=1$)进行再制造的平均能耗为 $3.6414 \text{ kW} \cdot \text{h}$;只

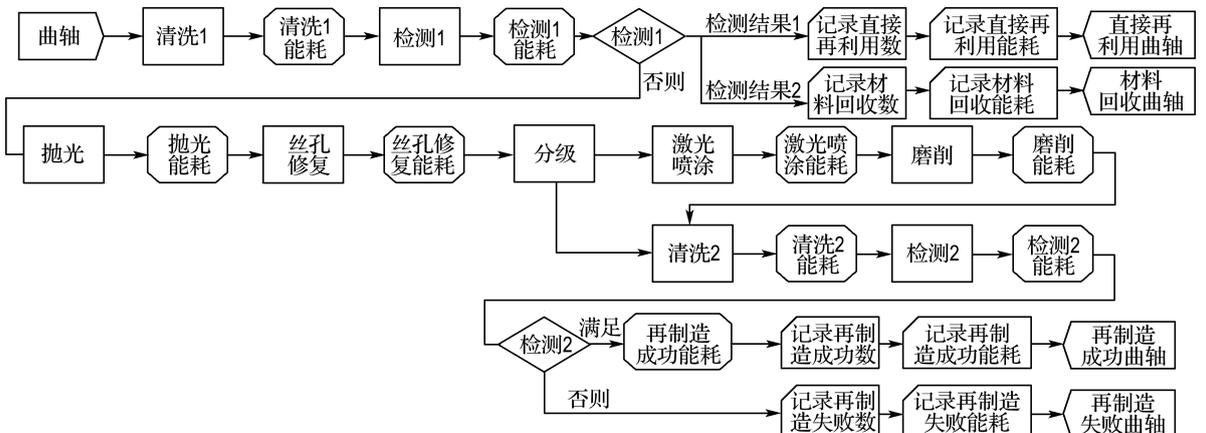


图5 曲轴再制造过程的仿真

Fig.5 Simulation of crankshaft remanufacturing process

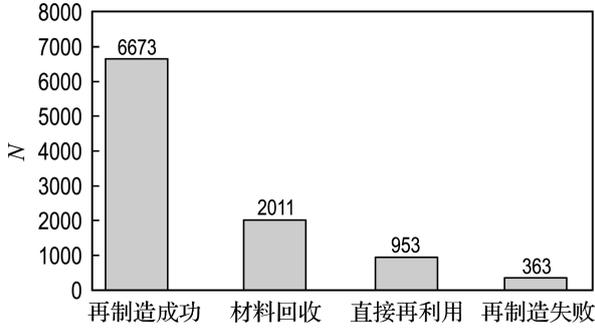


图 6 曲轴再制造过程各处理方式的数量占比

Fig. 6 The ratio of various treatments in the crankshaft remanufacturing process

表 4 各处理方式计算结果与仿真结果对比

Tab. 4 Comparison between calculation results and simulation results of different treatments

处理方式	概率			能耗		
	计算	仿真	相对误差/%	计算/(kW·h)	仿真/(kW·h)	相对误差/%
再制造成功	0.665	0.667 3	0.34	6.281	6.249 5	0.50
材料回收	0.200	0.201 1	0.55	1.441	1.423 5	1.21
直接再利用	0.100	0.095 3	0.47	1.441	1.433 2	0.54
再制造失败	0.035	0.036 3	3.71	6.281	6.263 5	0.28

表 5 各工艺路线与总路线能耗对比

Tab. 5 Comparison of energy consumption between each process route and the general route

路线	能耗		
	理论计算/ (kW·h)	仿真结果/ (kW·h)	相对误差/%
再制造成功总路线	6.281	6.249 5	0.50
工艺路线 1	3.666	3.641 4	0.67
工艺路线 2	12.381	12.205 3	1.42

4 结 语

再制造过程就是恢复废旧产品功能的过程,就是恢复废旧零件表面尺寸、疲劳寿命等各种指标的过程。废旧零件损伤类型和损伤程度的不确定是造成零件再制造过程能耗不确定性的主要原因。本文针对再制造工序的能耗不确定性,采用 GERT 图建立了零件再制造过程模型,利用矩母函数和信号流图的原理求解了再制造工艺路线的概率和期望能耗。将建立的 GERT 模型应用到废旧曲轴的再制造过程,得出了曲轴再制造过程的概率及期望能耗,并且给出了曲轴再制造成功期望能耗的范围。用 Arena 软件对该模型进行仿真,仿真结果与理论建模的差异较小,验证了这种评估能耗方法的有效性。运用该方法可以预测零

采用工艺路线 2 ($p_{36} = 1$) 再制造,平均能耗为 12.205 3 kW·h。仿真结果与计算结果对比见表 5。

与文献中采用生命周期评价方法进行再制造能耗评价不同,本文利用 GERT 构建再制造过程不确定能耗模型,该模型考虑的是各个工序的能耗不确定及各再制造工艺路线的概率不确定。研究结果表明:在各工序能耗不确定条件下,废旧曲轴再制造成功总期望能耗始终在两条不同工艺路线的期望能耗之间。Arena 软件仿真结果与理论计算结果基本一致,证明所建立模型的合理性。

件再制造过程所需要的能耗,为批量再制造能耗评估与优化运行、主动再制造政策制定与推广等提供理论依据。

参考文献:

- [1] 徐滨士,李恩重,郑汉东,等. 我国再制造产业及其发展战略 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(3):61-65. XU Binshi, LI Enzhong, ZHENG Handong, *et al.* The remanufacturing industry and its development strategy in China [J]. **Engineering Sciences**, 2017, 19(3): 61-65. (in Chinese)
- [2] LIU Zhichao, LI Tao, JIANG QiuHong, *et al.* Life cycle assessment-based comparative evaluation of originally manufactured and remanufactured diesel engines [J]. **Journal of Industrial Ecology**, 2014, 18(4):567-576.
- [3] BOUSTANI A, SAHNI S, GRAVES S C, *et al.* Appliance remanufacturing and life cycle energy and economic savings [C] // **Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, ISSST 2010**. Washington D C: IEEE Computer Society, 2010:5507713.
- [4] ADLER D P, KUMAR V, LUDEWIG P A, *et al.* Comparing energy and other measures of environmental performance in the original manufacturing and remanufacturing of engine components [C] //

- Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference 2007, MSEC 2007**. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2007:851-860.
- [5] 罗毅. 面向再制造的机床能耗分析模型及节能关键技术研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2013.
LUO Yi. Energy consumption analytical model and energy-saving technology of machine tool for remanufacturing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [6] 杜彦斌,曹华军,刘飞,等. 面向生命周期的机床再制造过程模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2010(10):2073-2077.
DU Yanbin, CAO Huajun, LIU Fei, *et al.* Process model of machine tool remanufacturing oriented to lifecycle [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2010(10):2073-2077. (in Chinese)
- [7] 杨保华,方志耕,张娜,等. 基于多种不确定性参数分布的 U-GERT 网络模型及其应用研究 [J]. 中国管理科学, 2010, 18(2):96-101.
YANG Baohua, FANG Zhigeng, ZHANG Na, *et al.* The research of U-GERT network model and its application based on multiple uncertain parameters [J]. **Chinese Journal of Management Science**, 2010, 18(2):96-101. (in Chinese)
- [8] 谢家平,赵忠. 基于 GERT 随机网络的废弃回收预测模型研究 [J]. 管理学报, 2010(2):294-300.
XIE Jiaping, ZHAO Zhong. Forecasting model for the reusing process of the discarded products based on GERT network theory [J]. **Chinese Journal of Management**, 2010(2):294-300. (in Chinese)
- [9] 李成川,李聪波,曹华军,等. 基于 GERT 图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2):298-305.
LI Chengchuan, LI Congbo, CAO Huajun, *et al.* Uncertain remanufacturing process routings model for used components based on GERT network [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2012, 18(2):298-305. (in Chinese)
- [10] 温海骏. 不确定环境下再制造生产计划与车间调度集成优化研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
WEN Haijun. Integrated optimization of remanufacturing production planning and scheduling under uncertain environment [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 张娜. 基于可信性理论的 F-GERT 网络模型及其应用研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
ZHANG Na. Research of F-GERT network model and their application based on credibility theory [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [12] 李欣. 物流系统建模与仿真:使用 Arena 软件 [M]. 上海:格致出版社, 2013:202.
LI Xin. **Modeling and Simulation of Logistics System: Using Arena Software** [M]. Shanghai: Truth and Wisdom Press, 2013:202. (in Chinese)

Uncertain energy consumption modeling and evaluation method for parts remanufacturing

GUO Yanchun, LI Tao*, PENG Shitong, LI Mengyun, DONG Mengmeng

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An energy consumption model based on graphical evaluation and review technology (GERT) is proposed with regard to the difficulty in assessing the energy consumption in parts remanufacturing. Firstly, the energy consumption characteristics in parts remanufacturing and the reasons of energy consumption uncertainty are analyzed and the general law of energy consumption in each remanufacturing process is explained. Secondly, the GERT-based energy consumption model for parts remanufacturing is established and the computational approaches for the probability and the expected energy consumption under different remanufacturing treatments are proposed. Finally, an engine crankshaft remanufacturing is taken as an illustrative case to validate the proposed model and method. A comparison with simulation results of Arena software is conducted to testify the feasibility of the results.

Key words: remanufacturing; uncertainty; energy consumption modeling; graphical evaluation and review technology