DOI: 10.3901/JME.2013.07.051

基于剩余使用寿命评估的再制造方案 决策模型及应用*

张旭刚 张 华 江志刚
(武汉科技大学机械自动化学院 武汉 430081)

摘要: 为了实现废旧零部件资源的最优化利用,从剩余使用寿命的角度建立废旧零部件再制造方案决策模型。以零部件失效数据和历史服役工况数据为基础,联合威布尔分布和人工神经网络模型来评估废旧零部件的剩余使用寿命。对于具有剩余使用寿命的废旧零部件,以定量的方式分析其第一次寿命末期和剩余寿命末期的可靠性,并结合企业制定的零部件可靠性阈值,确定废旧零部件的再制造方案,即再利用、再制造或再循环。以发动机叶片为例,验证了上述模型的可行性。

关键词: 再制造 剩余使用寿命 决策模型

中图分类号: TH122

Remanufacturing Scheme Decision Model and Application Based on Remaining Useful Life Estimation

ZHANG Xugang ZHANG Hua JIANG Zhigang
(College of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract: To realize the optimum utilization of used parts resources, remanufacturing decision model of used parts is established from the viewpoint of remaining useful life estimation. Based on the failure data and history floor data of used parts, Weibull distribution and artificial neural network are integrated to assess the remaining useful life. For the used parts with remaining useful life, reliability is analyzed at the end of its first life and residual life in a quantitative way respectively, combined with the parts' reliability threshold, the remanufacturing scheme of used parts is determined, namely reuse, remanufacturing or recycle. An engine blade is taken as an example to illustrate the feasibility of the decision model.

Key words: Remanufacturing Remaining useful life Decision model

0 前言

目前我国已进入机电产品报废的高峰期,全国役龄10年以上的传统机床超过200万台,80%的在役工程机械超过保质期;年报废电脑、电冰箱1600万台^[1],这些废旧机电产品的资源化处理已成为制造企业面临的一大难题。

再制造作为循环经济的重要组成部分,以废旧零部件为毛坯进行加工,是有利于环境保护的产品寿命终结后的处理方法之一^[2]。然而,由于废旧产品服役工况的差异性,即使是相同类型的产品,所得到零部件的寿命特征也不一样,其是否具有剩余

使用寿命,其剩余使用寿命能否维持下一个寿命周期直接影响着再制造产品的质量和可靠性。为了使废旧零部件的利用价值最大化,不同寿命特征的废旧零部件需采取不同的再制造方案。因此,有必要对废旧零部件的再制造方案进行综合决策。

目前,针对废旧产品或零部件再制造决策问题,国内外学者展开了广泛的研究,并取得了一定的成果。文献[3-5]建立了基于不同优化算法的废旧零部件再制造方案决策模型,如递归算法、案例式推理法及遗传算法等,从技术和经济的角度来分析废旧零部件的最优再制造方案。文献[6-7]针对废旧机电产品的资源化处理问题,建立了包括经济性、技术性、资源性和环境性的再制造决策综合评价模型,定量和定性相结合的对不同再制造方案进行评

* 国家科技支撑计划(2012BAF02B03)和国家自然科学基金(51205295)资助项目。20120918收到初稿,20121225收到修改稿

价。文献[8]指出,废旧零部件剩余使用寿命评估是决定其再制造方案的基础。而以上研究主要从技术、经济、环境、资源等方面展开,未涉及到对废旧零部件剩余使用寿命的评估。

在基于剩余使用寿命评估的废旧零部件再制造决策方面,文献[9]探讨了金属磁记忆无损检测技术预测再制造毛坯的剩余寿命。文献[10]利用加速寿命试验对产品设备进行了剩余寿命评估。文献[11-12]以家电产品为例,通过评估零部件的剩余使用寿命来判断其是否具有再利用的价值,在此基础上,从经济性和环境性来进行再制造方案决策。该方法虽然考虑了寿命的因素,但在再制造方案决策时忽视了零部件寿命特征对再制造方案的影响。文献[13]建立了零部件可重用性评估模型,通过零部件的使用时间来判断其是否可以直接重用,具有一定的局限性。

基于此,本文在以上研究的基础上,从剩余使用寿命的角度系统的研究废旧零部件再制造方案的决策。

1 废旧零部件再制造方案决策模型

1.1 决策框架

废旧产品一般都是经历过一次或多次服役周期,使得其零部件剩余使用寿命具有不确定性,直接影响着零部件再制造方案的选择。因此,准确判断废旧零部件的寿命特征是进行再制造方案决策的前提。废旧零部件的再制造方案决策框架如图 1 所示。

图 1 废旧零部件再制造方案决策框架

剩余使用寿命评估是判断废旧零部件是否具有再制造潜力的前提,是再制造方案决策的基础。对于具有剩余使用寿命的废旧零部件,分析其寿命周期内的可靠性,结合企业制定的零部件可靠性阈值,确定废旧零部件的再制造方案。

1.2 废旧零部件剩余使用寿命评估

废旧零部件剩余使用寿命评估方法主要有两类^[14]:物理试验和非物理试验。物理试验的成本高,且给零部件带来新的损伤;而非物理试验是以零部件失效数据和历史服役工况数据为基础,运用信息新技术建立它们与剩余使用寿命之间的关系,成本低且数据信息反映了零部件的真实运行环境。因此,采用后者来实现废旧零部件剩余使用寿命评估,其评估过程可用式(1)进行描述^[15]

$$L_R = L_M - L_A \quad (1)$$

式中, L_R 代表零部件的剩余使用寿命, L_M 代表零部件的平均使用寿命, L_A 代表零部件的实际使用寿命。

(1) 平均使用寿命 L_M 。 L_M 反映了零部件在稳定工况下的正常运行时间,可以通过零部件的失效数据建立其威布尔分布模型计算得出。

威布尔分布是一种连续的概率分布模型,广泛应用于机电产品可靠性工程领域,预测产品和零部件的寿命分布和可靠性分布^[16]。由于两参数的威布尔分布具有较广泛的应用和很好的灵活性,因此,采用两参数的威布尔分布模型,利用零部件的失效数据来评估其平均使用寿命和可靠度,计算公式如下所示。

平均使用寿命

$$L_M = \eta \Gamma \left[\frac{\beta + 1}{\beta} \right] \quad (2)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} u^{x-1} \exp(-u) du$$

可靠度

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (3)$$

式中, η 表示尺度参数; β 表示形状参数。

在式(2)、(3)中,威布尔模型参数 η 和 β 的估计是关键。目前常用的参数估计法主要有图估计法、极大似然估计法和最小二乘估计法^[17]。其中,由于最小二乘估计法计算量小、计算简单直观以及能有效实现数据的线性化处理等特点,是一种较理想的威布尔分布参数估计方法。在运用最小二乘法进行

参数估计时, 参数估计的精度取决于经验分布函数的精度, 传统的经验分布函数是通过近似中位秩公式计算得出, 误差较大, 而平均秩次法通过数据样本估算出所有可能的秩次, 求出平均秩次, 从而得到经验分布函数, 有效提高了参数估计的精度^[18]。

数据样本是参数估计的基础, 失效数据有效地反映了零部件在运行过程中的寿命变化, 是较理想的参数估计数据样本。失效数据的主要来源有试验数据和现场数据^[19]。与试验数据相比, 现场数据更能真实反映零部件的运行环境。现场数据通常是截尾的, 取决于数据收集的时间窗口, 有可能在数据收集期内零部件还没有发生失效, 这一部分数据在失效数据统计表中也需要体现出来, 以某型号零部件失效数据表为例, 如表 1 所示。

表 1 某型号零部件失效数据表

序号	运行时间/h	零部件状况
1	7 433	F
2	7 561	S
⋮	⋮	⋮

注: F 代表失效数据, 即该零部件在数据收集期内发生失效的数据; S 代表删失数据, 即该零部件在数据收集期内正常工作, 未发生失效的数据。

因此, 根据失效数据样本, 联合最小二乘法和平均秩次法来实现参数 η 和 β 的估计, 其具体计算过程可参考文献[20]。

(2) 实际使用寿命 L_A 。 L_A 反映了零部件在动态工况下的实际运行时间。对于同一零部件来说, 服役的工况不一样, L_A 的值也不一样。因此, L_A 是一个随着零部件服役环境而变化的动态值。针对该问题, 利用人工神经网络的自学习和自适应的特点, 以废旧零部件历史运行工况数据为输入, 该工况条件下的实际使用寿命为输出, 建立零部件的运行工况数据和实际使用寿命之间的关系, 从而预测在特定工况条件下, 废旧零部件的实际使用寿命。其预测模型如图 2 所示。

图 2 废旧零部件实际使用寿命预测模型

1.3 废旧零部件再制造方案决策

废旧零部件是否具有剩余使用寿命是再制造方案决策的前提, 对于具有剩余使用寿命的废旧零部件, 由于寿命特征的差异性, 其在寿命周期内的可靠性水平具有不确定性, 直接影响着再制造方案的决策。通过分析废旧零部件寿命周期内的可靠性, 并结合企业制定的零部件可靠性阈值, 提出三种不同的再制造方案。

零部件可靠性是指零部件在规定时间内和规定条件下完成设计功能的能力^[21]。零部件在使用过程中, 其可靠性会随着时间逐渐降低。反映零部件可靠性的指标主要有可靠度 $R(t)$ 和累积失效率 $\lambda(t)$, 它们之间的转化关系: $\lambda(t) = 1 - R(t)$ 。在此, 以可靠度 $R(t)$ 为指标来反映零部件的可靠性, 其计算如式(3)所示。

根据第 1.2 节中评估的废旧零部件剩余使用寿命, 通过式(3)可以计算出废旧零部件在第一次寿命末期 t_1 时的可靠度 $R(t_1)$ 和剩余寿命末期 t_2 时的可靠度 $R(t_1 + t_2)$ 。对于制造企业来说, 零部件在生产时会根据企业的市场策略和目标客户等因素制定可靠性阈值 R^* 。通过分析 $R(t_1)$ 、 $R(t_1 + t_2)$ 和 R^* 之间的关系, 提出三种不同的废旧零部件再制造方案^[22-23], 如图 3~5 所示。

(1) 当废旧零部件第一次寿命末期的可靠度 $R(t_1)$ 的值大于 R^* , 且剩余寿命末期的可靠度 $R(t_1 + t_2)$ 的值也大于 R^* 时, 即

$$R(t_1) > R^* \quad R(t_1 + t_2) > R^*$$

式中, t_1 指的是零部件的第一次寿命周期, t_2 指的是零部件的剩余寿命周期。

该情况下, 废旧零部件可以不经再制造或额外的加工处理就可以直接利用, 称之为再利用, 如图 3 所示。

图 3 再利用

(2) 当废旧零部件在第一次寿命末期的可靠度 $R(t_1)$ 的值大于 R^* , 而在剩余寿命末期的可靠度 $R(t_1 + t_2)$ 的值小于 R^* 时, 即

$$R(t_1) > R^* \quad R(t_1 + t_2) < R^*$$

该情况可用图4进行描述。从图4可以看出,在零部件的剩余寿命周期 t_2 内,在 t_1 到 T^* 这段区间,零部件的可靠度高于 R^* ,称之为安全区间;在 T^* 到 t_2 这段区间,零部件的可靠度低于 R^* ,表明零部件在这段时间内发生失效的概率较大。因此,总的来说,可以对零部件进行再制造来提高其可靠性,称之为再制造。

图4 再制造

(3) 当废旧零部件在第一次寿命末期的可靠度 $R(t_1)$ 的值小于 R^* ,且在剩余寿命末期的可靠度 $R(t_1 + t_2)$ 的值也小于 R^* 时,即

$$R(t_1) < R^* \quad R(t_1 + t_2) < R^*$$

该情况下,考虑到加工成本和技术可行性,不推荐对该零部件进行再制造,最佳的处理方式是进行再循环,回收可用材料,以达到节省资源的效果。如图5所示。

图5 再循环

2 案例分析

发动机是一种常用的机械设备,而叶片是发动机易发生故障的关键零部件,制约着发动机的使用寿命。叶片蕴含了很高的附加值,对节能和节材有很好的效果,而叶片再制造方案的选择直接影响着叶片附加值的有效利用。在此,以发动机叶片再制造方案的决策为研究案例对以上模型进行验证。

2.1 叶片剩余使用寿命评估

(1) 叶片平均使用寿命 L_M 。叶片的失效数据来

源于现场数据,如表2所示。

表2 叶片失效数据表

序号	运行时间/h	状况	序号	运行时间/h	状况
1	7 433	F	16	9 662	F
2	7 561	S	17	9 754	S
3	7 680	S	18	9 814	F
4	7 865	F	19	9 937	S
5	8 207	S	20	10 920	F
6	8 686	F	21	11 097	S
7	8 713	S	22	11 454	S
8	8 751	S	23	11 563	F
9	8 809	S	24	11 736	S
10	8 820	F	25	12 024	F
11	9 052	F	26	12 519	S
12	9 358	S	27	12 866	F
13	9 413	F	28	12 975	S
14	9 592	S	29	13 077	S
15	9 601	S	30	13 286	F

表2中的数据包括失效数据和删失数据。去掉删失数据,将发生失效的叶片按照失效时间顺序重新排序,建立威布尔分布模型,并联合最小二乘法和平均秩次法对威布尔分布进行参数估计。

通过对以上数据进行计算,得到威布尔分布模型参数 $\beta=6.289$, $\eta=12\,237.798$ 。将 β 和 η 代入式(2)可得叶片平均使用寿命

$$L_M = 12\,237.798 \Gamma \left[1 + \frac{1}{6.289} \right] = 11\,382.599 \text{ h}$$

(2) 叶片实际使用寿命 L_A 。影响发动机叶片的主要工况数据有转速、温度及相关参数^[24]。基于此,选取低压转子转速、高压转子转速、排气温度和压力比作为神经网络的输入,叶片在此工况条件下的实际使用寿命作为输出。神经网络预测模型如图6所示。

图6 叶片实际使用寿命预测模型

以上模型为 $4 \times 5 \times 1$ 的三层网络模型,设定学习率为0.01,网络训练误差限制在0.000 01。数据样本是神经网络预测模型的基础,数据样本的可靠性

直接决定了神经网络预测模型的准确性，由于发动机叶片这类零件个性化非常显著，历史数据的获得比较困难，为了保证数据的可靠性，引用文献[25]的数据作为样本数据，如表 3 所示。

表 3 数据样本

序号	输入				输出
	低压转子转速/ (r/min)	高压转子转速/ (r/min)	排气温度/ °C	压力比	叶片使用 寿命/h
1	7 343	11 503	501	1.931	9 665
2	7 537	11 614	521	1.942	7 995
3	7 514	11 447	496	1.950	9 827
4	7 434	11 470	498	1.932	9 734
5	7 490	11 511	504	1.950	9 657
6	7 469	11 560	504	1.934	9 531
7	7 378	11 412	508	1.949	9 552
8	7 462	11 506	513	1.946	9 190
9	7 456	11 579	501	1.937	9 705
10	7 529	11 470	508	1.938	9 340
11	7 435	11 531	513	1.928	9 642
12	7 485	11 483	500	1.954	8 705
13	7 443	11 728	517	1.937	8 517
14	7 383	11 666	522	1.942	7 998
15	7 377	11 536	506	1.946	9 404
16	7 434	11 470	498	1.932	9 734
17	7 352	11 458	502	1.932	9 790
18	7 382	11 536	510	1.939	9 589
19	7 406	11 592	513	1.941	9 091
20	7 480	11 496	504	1.930	9 758

在以上 20 组数据中，前 16 组用于训练学习样本，后 4 组用于验证。神经网络训练曲线如图 7 所示，实际误差为 0.000 009 981 3，目标误差为 0.000 01。

图 7 神经网络训练曲线

利用训练好的神经网络预测模型，用后 4 组数据对该网络预测模型的有效性进行验证。预测值和实际值比较结果如表 4 所示。从表 4 可以看出，预测值非常接近实际值。因此，训练后的神经网络预

测模型已达到预期效果。基于以上预测模型，通过输入发动机叶片的运行工况数据，可以实时预测叶片的实际使用寿命，预测结果如下。输入工况参数：低压转子转速为 7 383 r/min，高压转子转速为 11 666 r/min，排气温度为 522 °C，压力比为 1.941，输出：实际使用寿命为 7 996.800 h。

表 4 预测值和实际值比较结果

序号	输入				输出		相对误差(%)
	低压转 子转速/ (r/min)	高压转 子转速/ (r/min)	排气 温度/ ℃	压力 比	叶片使用寿命/h		
					实际值	预测值	
17	7 352	11 458	502	1.932	9 790	9 791.5	0.015
18	7 382	11 536	510	1.939	9 589	9 592.3	0.034
19	7 406	11 592	513	1.941	9 091	9 096.0	0.055
20	7 480	11 496	504	1.930	9 758	9 760.7	0.028

将以上预测结果与文献[25]中 LS-SVM 回归模型预测结果 $L_A=7\ 997.000$ 相比可得，在相同的数据输入条件下，两种不同预测方法所得到的结果基本一致。因此，进一步验证了神经网络预测结果的准确性。

综合 L_M 和 L_A ，由式(1)可得叶片的剩余使用寿命 $L_R=11\ 382.599-7\ 996.800=3\ 385.799$ h。

由于 $L_R=3\ 385.799>0$ ，因此，该工况条件下的叶片具有再利用的潜力。

2.2 叶片再制造方案选择

将 $\beta=6.289$ ， $\eta=12\ 237.798$ ，代入式(3)，可得叶片的可靠度函数

$$R(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{12\ 237.798}\right)^{6.289}\right] \quad (4)$$

由式(4)可知，叶片在第一次寿命末期的可靠度

$$R(t_1)=\exp\left[-\left(\frac{7\ 996.800}{12\ 237.798}\right)^{6.289}\right]=0.933$$

叶片在剩余寿命末期的可靠度

$$R(t_1+t_2)=\exp\left[-\left(\frac{7\ 996.800+3\ 385.799}{12\ 237.798}\right)^{6.289}\right]=0.530$$

选定 $R^*=0.92$ 和 $R^*=0.52$ 两种不同可靠性阈值，结合 $R(t_1)$ 和 $R(t_1+t_2)$ 来判断叶片的再制造方案，决策结果如下：当企业制定的叶片可靠性阈值为 0.92 时，叶片的决策方案为再制造；而当可靠性阈值降为 0.52 时，该叶片可以直接进行再利用。

3 结论

(1) 再制造方案的决策对于改善废旧零部件资源重用率具有重要的作用, 而废旧零部件剩余寿命特征的差异性使得再制造方案存在较大的不确定性。针对该问题, 提出了一种基于零部件失效数据和历史服役工况数据的剩余使用寿命评估方法。基于该方法, 结合零部件的可靠性分析, 从系统的角度建立了废旧零部件再制造方案决策模型。

(2) 将该模型应用于发动机叶片的再制造方案决策, 结果表明该模型能较好地表达出发动机叶片的剩余寿命特征与再制造方案之间的关系, 研究成果可为废旧零部件再制造方案决策的研究和应用提供一种基础支持。

除了寿命的不确定性因素外, 影响废旧零部件再制造方案决策的还有技术、经济和环境等因素, 未来的研究将综合考虑废旧零部件再制造的技术、经济以及环境等方面的可行性, 实现废旧零部件再制造价值的最大化。

参 考 文 献

- [1] 徐滨士. 再制造工程的现状与前沿[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(1): 10-14.
XU Binshi. State of the art and future development in remanufacturing engineering[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(1): 10-14.
- [2] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.
XU Binshi. Remanufacture engineering and its development in China[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 1-6.
- [3] GONZALEZ-TORRE B, ADENSO-DIAZ B. Optimizing decision making at the end of life of a product [J]. Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003, 5262(1): 40-50.
- [4] GHAZALLI Z, MURATA A. Development of an AHP-CBR evaluation system for remanufacturing: End-of-life selection strategy[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2011, 4(1): 2-15.
- [5] GHAZALLI Z, MURATA A. An integrated TSP-GA with EOL cost model for selecting the best EOL option[J]. International Journal of Industrial Engineering Computations, 2011, 2(4): 775-792.
- [6] 曾寿金, 江吉彬, 许明三. 机电产品再制造特性评价模型研究[J]. 福建工程学院学报, 2009, 7(3): 271-274.
ZENG Shoujin, JIANG Jibin, XU Mingsan. Research on assessment model of electromechanical products remanufacturability[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2009, 7(3): 271-274.
- [7] 杜彦斌, 曹华军, 刘飞, 等. 基于熵权与层次分析法的机床再制造方案综合评价[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(1): 84-88.
DU Yanbin, CAO Huajun, LIU Fei, et al. Evaluation of machine tool remanufacturing scheme based on entropy weight and AHP[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(1): 84-88.
- [8] 董世运, 徐滨士, 董丽虹, 等. 金属磁记忆检测技术用于再制造毛坯寿命预测的试验研究[J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 71-75.
DONG Shiyun, XU Binshi, DONG Lihong, et al. Experiment research on metal magnetic memory methods for life prediction of remanufacturing old parts[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(5): 71-75.
- [9] 董丽虹, 徐滨士, 董世运, 等. 金属磁记忆技术用于再制造毛坯寿命评估初探[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 106-111.
DONG Lihong, XU Binshi, DONG Shiyun, et al. Progress in life prediction of remanufacturing blanks by using metal magnetic memory testing[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 106-111.
- [10] 谭源源, 张春华, 陈循, 等. 基于加速寿命试验的剩余寿命评估方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 150-154.
TAN Yuanyuan, ZHANG Chunhua, CHEN Xun, et al. Remaining life evaluation based on accelerated life testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 150-154.
- [11] MAZHAR M I, KARA S, KAEBERNICK H. Reuse potential of used parts in consumer products: Assessment with Weibull analysis[J]. Production Engineering and Computers, 2004, 6(7): 113-118.
- [12] PARK P J, TAHARA K, JEONG I T, et al. Comparison of four methods for integrating environmental and economic aspects in the end-of-life stage of a washing machine[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006, 48(1): 71-85.
- [13] MURAYAMA T, YAMAMOTO S, OBA F. Mathematical model of reusability[C]// Proceedings of the 12th IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, Scottsdale, May 10-13, A.Z. USA: IEEE, 2004: 183-188.
- [14] KARA S, MAZHAR M I, KAEBERNICK H. Lifetime

- prediction of components for reuse: An overview [J]. International Journal of Environmental Technology and Management, 2004, 4(4): 323-348.
- [15] MAZHAR M I, KARA S, KAEBERNICK H. Remaining life estimation of used components in consumer products: Life cycle data analysis by Weibull and artificial neural networks[J]. Journal of Operations Management, 2007, 25(6): 1184-1193.
- [16] 胡昊磊, 左洪福, 任淑红. 基于随机过程的航空发动机性能可靠性预测[J]. 科技信息, 2009(29): 409-410.
HU Haolei, ZUO Hongfu, REN Shuhong. Performance reliability evaluation for aviation engines based on stochastic process[J]. Science & Technology Information, 2009(29): 409-410.
- [17] 毛昭勇, 宋保维, 李正, 等. 基于遗传算法的最大似然参数优化估计[J]. 机械强度, 2006, 28(1): 79-82.
MAO Zhaoyong, SONG Baowei, LI Zheng, et al. Optimization method of maximum likelihood estimation parameter estimation based on genetic algorithms[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(1): 79-82.
- [18] 方华元, 胡昌华, 黄莹, 等. 提高可靠性数据分析精度的一种有效方法[J]. 电光与控制, 2006, 13(1): 78-80.
FANG Huayuan, HU Changhua, HUANG Ying, et al. An effective method for improving precision of reliability data analysis[J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(1): 78-80.
- [19] 邹瑶, 符萌, 左飞. 基于竞争失效模式的发送器和接收器的故障分析[J]. 铁路计算机应用, 2011, 20(6): 15-18.
ZOU Yao, FU Meng, ZUO Fei. Fault analysis for transmitter and receiver based on competing failure mode [J]. Railway Computer Application, 2011, 20(6): 15-18.
- [20] 于晓红, 张来斌, 王朝晖, 等. 基于新的威布尔分布参数估计法的设备寿命可靠性分析[J]. 机械强度, 2007, 29(6): 932-936.
YU Xiaohong, ZHANG Laibin, WANG Zhaohui, et al. Reliability life analysis of the equipment based on new Weibull distribution parameter estimation method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(6): 932-936.
- [21] 简学琴. 马尔可夫链在产品可靠性预测中的应用[J]. 山西电子技术, 2006(4): 3-4.
JIAN Xueqin. Application of markov chain in reliability forecast of product[J]. Shanxi Electronic Technology, 2006(4): 3-4.
- [22] ANITYASARI M, KAEBERNICK H. A Generic methodology to assess quality and reliability in the reuse strategy[C]// 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE), Sydney. N.S.W.: CIRP, 2008: 173-178.
- [23] ANITYASARI M, KAEBERNICK H. A concept of reliability evaluation for reuse and remanufacturing [J]. International Journal of Sustainable Manufacturing, 2008, 1(1): 3-17.
- [24] 马利, 解江, 续斌, 等. 工作环境下的叶片振动可靠性研究[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(1): 40-42.
MA Li, XIE Jiang, XU Bin, et al. Study on blade vibration reliability under working environment[J]. Turbine Technology, 2007, 49(1): 40-42.
- [25] 郝英. 基于智能技术的民航发动机故障诊断和寿命预测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
HAO Ying. Fault diagnosis and life prediction research of civil aviation engine based on intelligent technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.

作者简介: 张旭刚, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为绿色制造与再制造。

E-mail: whkjdxxzg@126.com

张华, 女, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造、制造系统工程和制造业信息化。

E-mail: zhanghua403@163.com

江志刚, 男, 1978 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为绿色制造与再制造、制造系统工程。

E-mail: jzg100@163.com