

船用板式换热器可靠寿命预计方法研究

刘隆波¹, 王首臻²

(1. 海军装备研究院, 北京 100161; 2. 第二炮兵研究院, 北京 100085)

摘要: **目的** 对于新型船用板式换热器进行可靠寿命预计, 考虑到相似产品使用期间会获得定量的信息, 提出一种利用相似产品信息进行产品可靠性预计的方法。 **方法** 相似产品的相似度由专家根据经验分析给出, 其后根据继承因子直接对相似产品的可靠度进行折合。对板式换热器与相似产品的性能数据进行对比分析, 利用模糊数学中贴近度的概念, 计算得到两产品之间的折算系数。 **结果** 结合相似产品的实际使用数据, 通过对流速、换热系数和其他相似因素的比较, 得到产品对于相似产品的折算系数为 0.286, 从而进一步确定该板式换热器折算后的试验时间, 利用无故障定时截尾寿命评估方法对该产品的可靠性进行粗略估计。 **结论** 该方法对利用相似产品进行寿命评估提供了一种新思路, 从产品的性能特征出发, 在一定程度上优化了专家评估相似度的主观因素。

关键词: 可靠寿命预计; 模糊数学; 相似产品; 船用板式换热器

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.025

中图分类号: TJ05 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)02-0139-05

Study on the Technology of Reliable Life Prediction of Ship Plate Heat Exchanger

LIU Long-bo¹, WANG Shou-zhen²

(1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China; 2. Academe of Second Artillerist, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: Objective For the reliable life prediction of a new-type plate heat exchanger of ship, this paper presented a prediction method of product reliability using similar product information, taking into account the quantitative information obtained during use of similar products. **Methods** The similarity ratio was given by the experts based on their experience, and then the reliability of similar products was directly converted using inheritance factor. The performance data of the plate heat exchanger and similar products were comparatively analyzed, and the conversion coefficient between the two products was calculated using the concept of fuzzy closeness. **Results** In combination with the actual using data of similar products, through the comparison of heat transfer coefficient, velocity change and other factors, the similar product conversion coefficient was finally determined to be 0.286. The experimental time of the plate heat exchanger after conversion was further determined, and the reliability of this product was roughly estimated using the trouble-free truncated life evaluation method. **Conclusion** This method offered a new method for life estimation using similar products, and optimized the expert assessment in part on the similarity of the subjective factor from the

收稿日期: 2015-10-13; 修订日期: 2016-11-15

Received: 2015-10-13; Revised: 2016-11-15

作者简介: 刘隆波(1982—),男,江西人,博士,工程师,主要研究方向为系统工程以及装备可靠性等。

Biography: LIU Long-bo(1982—), Male, from Jiangxi, Ph.D., Engineer, Research focus: systems engineering & equipment reliability.

view of product performance features.

KEY WORDS: reliable life prediction; fuzzy mathematic; similar product; plate heat exchanger of ship

可靠性预计是为了估计产品在给定工作条件下的可靠性而进行的工作,是可靠性分析的一种技术手段,也是装备研制可靠性大纲中要求的“六性”工作项目之一。其中相似产品法被广泛用于可靠性预计过程中,但该方法中相似比的估算需要借助专家经验和生产方对样机相似性的评估,具有一定的主观性,缺乏对产品整体情况的客观评价。因此,客观地确定两产品之间的相似比,提高可靠性预计的准确度为目前研究的重点。

文献[1]针对任务可靠性预计方法中系统各组件之间不可分,提出一种基于系统间相似产品信息任务可靠性预计方法。该方法综合考虑各个子系统间的相似比,通过权重平均系数计算得到系统间的相似比。文献[2—3]利用相似产品信息作为历史样本,采用相似系统分析确定历史样本和样本的相似程度,归纳继承因子。文献[4]提出利用非平权距离系数法确定继承因子,该方法在一定程度上克服了专家经验评估两产品相似度的主观性,但该方法没有将产品的性能特性考虑其中。文献[5]以两个局部相同组成部分的相似设备为模型,建立在相关信息情形下的可靠性评估指数模型,利用融合算法,提出一种具有相似产品信息情形下的可靠性评定方法。文献[6]利用模糊数和相似产品可靠性预计法相结合,提出了一种模糊相似产品和模糊综合评判相结合的柴油机可靠性预计方法。文献[7—10]综合考虑多个继承因子,确定系统相似比。

目前,对于两产品间相似比的确定,依旧通过专家的评估确定,该方法缺乏客观对产品的定量分析。文中在此基础上,从相似产品的性能特性出发,利用模糊数学贴近度的方法确定两产品间的折算系数,对相似产品外场试验时间进行折算。该方法对利用相似产品进行寿命评估提供了一种新思路,从产品的性能特征出发,在一定程度上优化了专家评估相似度的主观因素。

1 基于模糊贴近度相似产品信息确定折算系数

1.1 可行性分析

对于新研产品而言,其不可能与已有产品完全一致,但在现用产品中,某些产品和新研产品具有较大的

相似度。因此专家常选取最类似于新产品的已有产品的资料,根据经验引入权系数进行调整,从而估算出新产品的可靠性。该过程是模糊的,仅能定性判断产品的相似程度,不能用精确的数学语言来定量描述两产品间的相似程度,造成估算结果与实际情况误差较大。下面利用模糊数学中贴近度的概念,对新研产品和相似产品的模糊相似度进行定量分析。

对于利用相似产品信息进行可靠性预计,首先需要对相似产品进行选取^[11—12]。该相似产品需要满足如下条件:产品的工作环境和环境相似,差异程度较小;产品的失效模式相近,失效机理相同,故障模式相似;产品的一致性较好,继承性明显,即制造工艺、设计流程的一致性较好。

1.2 原则和方法

选取满足上述条件的相似产品,对于相似产品折算系数的确定中,关键问题为选取适当的敏感应力,即引起主要失效模式的应力。折算系数的计算方法如下。

1) 产品相似因素分析。通过对结构、功能、设计原理、工作原理、材料组成和工作环境等方面综合考虑产品的相似因素。

2) 从性能指标出发,研究产品的主要失效模式;通过对产品失效机理分析,确定主要敏感应力。

3) 计算单位敏感应力值。由于两产品体积、质量等多相物理条件不同,因此将敏感应力单位化,进行比较分析。

4) 对于除去敏感应力外的其他因素,无法通过定量的评估进行比较分析,此时咨询相关专家的意见,得到产品间的折算系数。

5) 综合分析产品的多个折算系数,从产品的功能和失效机理出发,利用取交集或加权的方法,计算产品的折算系数。

6) 将产品的折算系数与历史产品信息相融合,进行新产品的可靠性评估。

试验步骤如图1所示。

1.3 相似产品折算系数的计算

利用相似产品预估新产品的可靠性信息,是基于该产品与历史产品的多方面相似之处而言的。

设新产品和历史产品有多项相似之处,可以选取



图1 利用相似产品计算折算系数流程

Fig.1 Flow chart of conversion coefficient calculation based on similar products

m 个特征因素。从 m 个方面考虑,若用 a_1, a_2, \dots, a_m 分别表示特征因素,则针对这 m 个特征因素,在不确定情况下,新产品与历史产品分别具有多少程度的这些特征,以及新产品与历史产品相似程度如何,可以用模糊数学贴近度表示。

根据模糊数学中模糊集贴近度^[13-14]概念,设有两个对象 A_1 和 A_2 ,特征集为 $T=\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$,其中 t_1, t_2, \dots, t_m 为特征元素,特征向量为 $\{\mu_{A_i}(t_j) | i=1, 2; j=1, 2, \dots, m\}$,则 A_1 和 A_2 的贴近程度为:

$$k = \frac{\sum_{R=1}^m (\mu_{A_1}(\mu_R) \cup \mu_{A_2}(\mu_R))}{\sum_{R=1}^m (\mu_{A_1}(\mu_R) \cup \mu_{A_2}(\mu_R))} \quad (1)$$

通常情况下,各特征元素对于可靠性的影响作用是不同的。令其影响大小的权重为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$,则考虑不同影响因素的重要性时,两者之间的相似度量度为:

$$k = \frac{\sum_{R=1}^m (\omega_R(\mu_{A_1}(\mu_R) \cup \mu_{A_2}(\mu_R)))}{\sum_{R=1}^m (\omega_R(\mu_{A_1}(\mu_R) \cup \mu_{A_2}(\mu_R)))} \quad (2)$$

显然,当不考虑属性权重和属性重要性相同时,式(1)即为式(2)的特殊情况。

2 板式换热器可靠性寿命预计

以船用板式换热器为例,利用文中所提出的基于模糊贴近度相似产品信息方法计算两种板式换热器的折算系数。通过对板片材料、板片结构、海水流速、换热温差、密封橡胶等进行对比分析,计算得到折算因子。利用历史产品的实际使用数据,将其转化为该产品的可靠性外场试验数据,对其进行寿命评估。

2.1 相似因素分析

船用滑油冷却器^[15-16]在舰船中起着不可替代的作用,其主要功能是通过海水与滑油进行热交换,将高温滑油进行冷却。该产品与船体同寿命,这就要求其必须具有很高的可靠性。该板式换热器在XXX舰艇上首次使用,作为试验样品。在未进行可靠性试验的情况下,仅能使用相似产品实际应用数据,将相似产品作为对比样品,在进行相似性分析的基础上,对试验时间进行折算,进行可靠性预计。

1) 从原理相似性来看,两种换热器均采用板片式结构,原理几乎相同;从设计相似性分析来看,都是依据《板式热交换器》NB/T 47004—2009设计,都满足标准要求。

2) 从结构、外形相似性分析来看,对比用产品换热量较高,其质量也较大,表面积冲孔凹槽和波形有区别。

3) 从两产品性能指标对比分析来看,两者产品在滑油、海水流量、进出口温差、换热量等方面具有较大差别,该产品使用环境较对比产品更为严酷。

2.2 常见失效模式和敏感应力

板式换热器在设计制造及使用过程中经常由于密封结构设计不合理,板片安装、压紧操作不当,冷热介质操作条件(压力、温度、流速、成分)不符合要求,检查、维修、保养不及时等原因发生泄漏、结垢堵塞、应力腐蚀破裂等失效事故。板式换热器主要有变形失效和腐蚀失效两种失效模式。变形失效的主要影响因素为板片厚度和流体介质条件。板式换热器的腐蚀主要是指板片的腐蚀,大多发生在与海水接触的一侧,即冷侧。冷侧的介质(一般是海水)流速对腐蚀快慢有重大影响^[10-12]。通过对产品性能失效分析,确定板式换热器的主要敏感应力是冷侧海水的冲刷和换热量。

2.3 板式换热器折算系数的计算

2.3.1 流速比较

通过对两种参数的对比分析,其中介质流速比较接近,通过对冲刷腐蚀角度分析,确定仅考虑海水侧,即冷侧即可。对比样品滑油冷却器的冷侧流速 $V_1=0.4$ m/s,试验样品滑油冷却器的冷侧流速 $V_2=0.35$ m/s,两种产品冷侧流速都在合理的区间内,计算得到折算系数 $K_1=1.14$ 。

2.3.2 换热系数的比较

从产品的性能参数出发,换热量为产品性能的关

键指标,单位海水换热量系数为:

$$\alpha = \text{换热量} / \text{冷侧流量} \quad (3)$$

利用公式(3)计算得到相似产品的单位海水换热量系数 $\alpha_1=3.34$, 该产品的单位海水换热量系数 $\alpha_2=11.6$ 。由于两产品质量不同,计算得到质量系数 $\beta=0.97$ 。综合考虑质量和换热量的影响,利用式(1),计算得到折算系数为:

$$K_2 = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \times \beta = 0.279$$

2.3.3 其他相似因素折算

根据上述对比分析,分别对原理、结构外形、材料、环境条件等相似性因素进行比较,经咨询有关专家,综合分析后得到折算系数为: $K_3=0.9$ 。利用式(2),得该产品与对相似产品折算系数为:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 0.286。$$

最后,利用相似产品的数据进行折算,将其实际应用数据 7.8 万 h 近似认为是外场试验时间,按照上述折算系数,折算后的试验时间 $t=22\ 308$ h。

3 船用板式热交换器可靠寿命预计

考虑到两产品之间的相似性,利用折算因子对该船用板式冷却器进行外场试验时间折算。

由于船用滑油冷却器属于机械产品,加速滑油冷却器的寿命服从威布尔分布^[7],其形状参数已知。设产品工作时间为 t_1, t_2, \dots, t_n , 假设 $l_i = t_i^m, \theta = \eta^m, (i=1, 2, \dots, n)$, 则威布尔分布函数可写为: $F(l, \theta) = 1 - e^{-l/\theta}$, $\theta > 0$, 即指数分布的分布函数。也就是说,如果 t_1, t_2, \dots, t_n 服从形状参数为 m 与特征寿命为 η 的威布尔分布 $F(t, \eta) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\}$, 经过变量变换后,可用试验时间为 l_1, l_2, \dots, l_n 与平均寿命为 θ 的指数分布表示。

若 n 个产品工作了 t_1, t_2, \dots, t_n 时间没有出现故障,则按无故障情形下产品工作时间为 l_1, l_2, \dots, l_n 的指数分布来处理,可得到平均寿命 θ 在 $1-\alpha$ 置信水平下的单侧置信下限为:

$$\theta_L = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{-\ln \alpha} \quad (4)$$

由此,根据上述评估模型,外场试验时间为 22 308 h,未发生故障。将试验数据代入式(4),计算得到产品在置信度为 0.9, 0.8, 0.7 时的平均寿命置信下限分别为: 9 688, 13 861, 18 529。

4 结语

文中提出了一种利用相似产品信息进行可靠性预计的方法,从产品的性能特征出发,选取关键性能参数。利用模糊数学中的贴近度函数的概念,对折算系数的定量计算,确定两样本之间的相似程度。以某船用板式热交换器为例,通过对板片材料、板片结构、海水流速、换热温差、密封橡胶等进行对比分析,利用所提出的方法,计算产品之间的折算系数,并利用相似产品的实际应用数据,将其转化为样本的外场试验数据。应用无故障定时截尾评估方法进行寿命评估,评估结果满足产品的设计要求。

该方法为利用相似产品信息进行可靠性预计中折算系数的定量计算提供了一种新思路,从产品性能特征出发,在一定程度上优化了专家评估两产品相似比的主观因素。该评估方法可扩展到多个相似产品、相似系统间的可靠性评估方面,也依然适用。

参考文献:

- [1] 卓红艳. 基于相似产品信息的某系统任务可靠性预计方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(6): 8—15.
ZHUO Hong-yan. Method of Mission Reliability Prediction Based on Similar Product Information[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(6): 8—15.
- [2] 陈忠振, 许路铁, 俞卫博, 等. 弹载光电系统储存可靠性的相似性分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 136—139.
CHEN Zhong-zhen, XU Lu-tie, YU Wei-bo, et al. Similarity Analysis of Storage Reliability of Ammunition-borne Photo-electric System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 136—139.
- [3] 杨军, 申丽娟, 黄金, 等. 利用相似产品信息的电子产品可靠性 Bayes 综合评估[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1150—1153.
YANG Jun, SHEN Li-juan, HUANG Jin, et al. Bayes Comprehensive Assessment of Reliability for Electronic Products by Using Test Information of Similar Products[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1150—1153.
- [4] 杨军, 黄金, 申丽娟, 等. 利用相似产品信息的成败型产品 Bayes 可靠性评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2009(7): 786—788.
YANG Jun, HUANG Jin, SHEN Li-juan, et al. Bayes Comprehensive Assessment of Reliability for Binomial Products by Using Test Information of Similar Product[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009(7): 786—788.

- [5] 张立波,王宏力,陈聪,等. 基于相似电子产品信息的可靠性评估方法[J]. 航天控制,2012,30(10):84—87.
ZHANG Li-bo, WANG Hong-li, CHEN Cong, et al. The Method of Reliability Assessment for Electronic Products Based on Multiple Similar Samples[J]. Aerospace Control, 2012,30(10):84—87.
- [6] ZHANG Z, YANG Z. Fuzzy Mathematics Assessment in the Evaluation of Air Quality[C]// 2011 International Conference on Multimedia Technology. ICMT,2011:6378—6381.
- [7] GUO Z, TIAN J. Discussion about Similarity Measures in Pattern Recognition of Fuzzy Information[C]// 2007 International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops. CISW,2007:299—303.
- [8] 方明,李学京,柳京爱. 有相似产品信息情形下的可靠性评定方法[J]. 数学的实践与认识,2008,38(6):107—112.
FANG Ming, LI Xue-jing, LIU Jing-ai. An Assessment Method of the Reliability for the Similar Equipment Which has Similar Product Information[J]. Mathematics in Practice and Theory,2008,38(6):107—112.
- [9] 张会奇,陈春良,曹玉坤,等. 基于相似系统理论的装甲车辆发动机使用状态评价研究[J]. 装备环境工程,2013,10(6):37—40.
ZHANG Hui-qi, CHEN Chun-liang, CAO Yu-kun, et al. Evaluation Study on Service Status of Armored Vehicle Engine Based on the Similarity System Theory[J]. Equipment Environmental Engineering,2013,10(6):37—40.
- [10] 杜丽,张晗亮,黄洪钟,等. 模糊相似产品法与综合评判法结合的柴油机可靠性预计[J]. 电子科技大学学报,2010,39(4):629—633.
DU Li, ZHANG Han-liang, HUANG Hong-zhong, et al. Combining Fuzzy Similar Product and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Reliability Prediction of Diesel Engine[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China,2010,39(4):629—633.
- [11] 郭海宽,赵新文,段孟强,等. 基于最小割集的系统可靠性预计[J]. 四川兵工学报,2014,35(3):148—152.
GUO Hai-kuan, ZHAO Xin-wen, DUAN Meng-qiang, et al. Reliability Prediction Model Based on Minimal Cut Sets[J]. Journal of Sichuan Ordnance,2014,35(3):148—152.
- [12] XU Ying, SHAO Wen-hua. Groundwater Quality Evaluation in Yang Village by Fuzzy Mathematics Method[C]// 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation. ICDMA,2010:790—794.
- [13] 骆明珠,康锐,刘法旺. 电子产品可靠性预计方法综述[J]. 电子科技技术,2014,1(2):246—256.
LUO Ming-zhu, KANG Rui, LIU Fa-wang. A Review of Reliability Prediction Methods for Electronic Products[J]. Electronic Science & Technology,2014,1(2):246—256.
- [14] 李瑞莹,康锐,党炜. 机械产品可靠性预计方法的比较与选择[J]. 工程机械,2009,40(5):53—57.
LI Rui-ying, KANG Rui, DANG Wei. Comparison and Selection of Reliability Prediction Method for Mechanical Products[J]. Construction Machinery and Equipment,2009,40(5):53—57.
- [15] ORONEL C, AMARIS C, VALLES M, et al. Experiments on the Characteristics of Saturated Boiling Heat Transfer in a Plate Heat Exchanger for Ammoniac/Lithiumnitrate and Ammonia/(Lithium Nitrate + Water) [C]// 2010 3rd International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies Theory and Applications. THETA,2010:217—225.
- [16] YU Liang-jian, ZHANG Yan-feng, ZHOU Jian-xin. Application of Domestic super Large Scale Plate Shell Heat Exchanger in Petrochemical Units[J]. Petro Chemical Equipment,2010,39(5):69—72.
- [17] LI B, LIU J, LIU D. Reliability Analysis on Zero-failure Data of Missile Power System[C]// 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science & Electronic Commerce. AIMSEC,2011:5722—5725.

(上接第43页)

- ing,2003,20(4):1—12.
- [15] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,1985.
ZHAO Kai-hua, CHEN Xi-mou. Electromagnetics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1985.
- [16] ANGLE E E, BASTOW J G, CHARAK M T, et al. Assessment and Control of Spacecraft Magnetic Fields[R]. NASA SP-8037, 1970.
- [17] EICHHOM W L. A New Method for Determining the Magnetic Dipole Moment of a Spacecraft from Near-field Data[R]. NASA Technical Memorandum X—63765, 1969.
- [18] FRANKLIN H C, SETH W. Magnetic Shielding of Interplanetary Spacecraft Against Solar Flare Radiation[R]. NASA-CR-195539, 1993.