

考虑损伤程度的设备运行可靠性研究

丁锋^{1,2}, 何正嘉¹, 陈雪峰¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安工业大学机电工程学院, 710032, 西安)

摘要: 为了充分利用运行状态中特征参数的变化信息对设备的使用进行可靠性分析,采用设备运行状态主动监测的方法,提出了集成设备失效的先验分布,以及与设备状态的振动信号特征提取相结合的可靠性模型.通过监测设备运行过程中的动态性能退化信号,引入特征评估技术对设备退化信号进行分析,提取具有准确定义和明显趋势性变化的退化指标,将退化指标引入比例故障率模型,实现了不同损伤程度振动信号的设备运行可靠度的有效评估.通过滚动轴承实验装置的运行数据,运用比例故障率模型可靠性参数的极大似然估计方法,分析了在不同的运行状态和损伤程度时可靠度的大小及变化趋势,保障了设备在服役寿命周期内的可靠性和安全性.

关键词: 可靠性;损伤程度;主动监测;振动信号

中图分类号: TH17;TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)01-0036-05

Operational Reliability Evaluation of Machinery Considering Component Damaged Severity

DING Feng^{1,2}, HE Zhengjia¹, CHEN Xuefeng¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: To fully use changing information from characteristic parameters in operation for analyzing individual equipment service reliability, the method of proactive monitoring operating equipment is utilized, a novel reliability model is proposed by integrating prior distribution of failure with vibration signal feature extraction based on equipment condition, and the feature evaluation is introduced to analyze the dynamic degradation signals. The degradation index with accurate definition and apparent trend variation is extracted, and introduced to proportional hazards model. An effective operational reliability assessment is realized by vibration signal considering damaged severity. A practical example of rolling bearing test device is given to provide operational data, maximum likelihood is chosen to estimate the reliability parameters in proportional hazards model, and the reliability size and changing trend are analyzed in detail under different operational conditions and damaged severity.

Keywords: reliability; damaged severity; proactive monitoring; vibration signal

可靠性是评价机械零件和设备质量的重要指标之一,对于具体结构,特别是机械设备的重大功能部件,必须考虑部件的损伤程度或性能退化对系统可靠性和安全性的影响.传统的零件可靠性模型是在强度和载荷概率分布已知的前提下,直接运用应力-

强度干涉理论进行积分运算,或通过计算可靠性指标求得零件的可靠度.这种可靠性研究方法大多基于概率和统计学理论,得到的是设备的整体可靠性,而对于正在运行的单台设备来说,则需要考虑设备运行可靠性的工程实际,分析当前所用设备的寿

命裕度和可靠性^[1]. 因此,根据智能化的主动监测、预测机制,及时发现并定位系统中的故障隐患,在系统失效之前进行有计划的主动可靠性维护,将可靠性理论与设备的监测诊断相结合进行研究^[2-4]具有现实意义.

本文从设备状态监测信息的角度出发,通过监测设备运行过程中的动态性能退化数据并考虑损伤强度的影响,引入特征评估技术对设备退化信号进行分析,提取具有准确定义和明显的趋势性变化的退化指标,将退化指标引入比例故障率模型,建立了设备主动监测的可靠性模型,实现了基于损伤程度振动信号的设备运行可靠性的有效评估.

1 设备主动监测可靠性模型

1.1 可靠性建模框架

如图 1 所示,设备的总体可靠性通过离线的利用状态自动监测记录装置提供的数据,以时间为坐标轴,对每台设备在一定时期内工作、待机、维修保养的累积时间和次数,以及平均故障间隔时间等参数进行估计,得出先验分布的可靠性特征值. 设备的个体运行可靠性通过在线的主动监测,利用振动、力(力矩)、声发射等物理量,经过一些特征提取的方法进行处理,得到能够反映设备的运行可靠度状态特征的实时退化信息. 通过比例故障率模型,将设备关键零部件总体的和正在运行的可靠性相结合,从而既考虑了反映总体平均特性的可靠性,又体现了反映个体特性的运行可靠性.

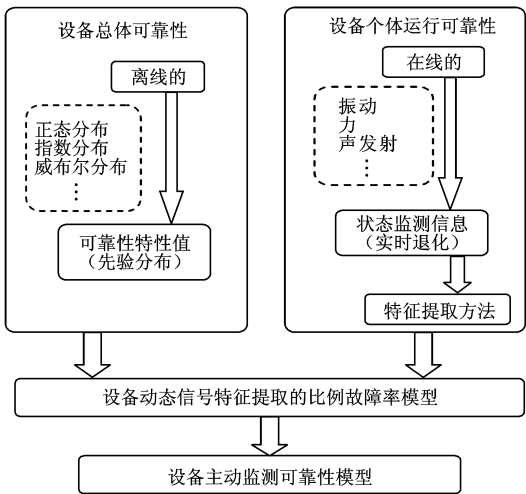


图 1 设备主动监测可靠性建模技术示意图

1.2 基于运行状态信号监测的比例故障率模型

比例故障率模型是由比例风险模型得到的,比

例风险模型最早由英国统计学家 Cox^[5] 提出,主要运用于生物、医学的药因和病因分析,在可靠性和维修工程领域被称为比例故障率模型. 比例故障率模型能够根据设备的运行状态,有效地将状态信息用于失效和可靠性评估^[6-8].

比例故障率模型具有不同个体的故障率函数成比例的特点,可以建立设备运行性能状态参数与故障率之间的联系. 故障率模型为

$$h(t,z) = h_0(t)e^z \tag{1}$$

式中: $h_0(t)$ 表示仅与时间有关的基本故障率; z 为协变量,反映设备运行的状态; γ 表示回归参数,反映 z 对设备故障率的影响.

若采用基准分布为威布尔分布的比例故障率模型^[9],则可以得到威布尔比例可靠度函数

$$R(t,z) = e^{-\int_0^t h(t,z)dt} = e^{-\int_0^t \beta/\eta(t/\eta)^{\beta-1} e^z dt} \tag{2}$$

式中: β 表示威布尔分布的形状参数; η 表示威布尔分布的尺度参数; t 表示系统的工作时间. 通过可靠性参数的极大似然估计,得到 β 、 η 和 γ ,就可以根据 t 和反映工作状态的 z 求得系统当前的故障率,并可得到可靠度等指标.

2 不同损伤程度下可靠性参数的估计

轴承作为机械设备中的关键部件之一,其失效分布呈威布尔分布^[10],轴承的统计指标如峭度 k 、方均根、峰值因子 C_F 等,在振动状态监测中得到很多应用^[11-12]. 轴承在运行过程中出现的故障,按其振动信号的特征不同可分为磨损类故障和表面损伤类故障. 磨损类故障利用指标中的有效值和峰值来判别,如果有效值和峰值的大小明显高于正常轴承,即判定为磨损. 损伤类故障利用归一化指标中的峭度和峰值来判别,若有损伤故障发生时,指标均会比正常状态时大. 本文模型中,主要针对的是轴承不同的损伤程度,因此选择峭度和峰值指标作为诊断特征. 将轴承的峭度、峰值指标作为反映设备运行状态的协变量 z_{1K} 、 z_{2CF} ,并用于威布尔比例故障率模型中,则式(2)可表示为

$$R(t,z) = e^{-\int_0^t \beta/\eta(t/\eta)^{\beta-1} e^{(\gamma_1 z_{1K} + \gamma_2 z_{2CF})} dt} \tag{3}$$

应用比例故障率模型可靠性参数的极大似然估计方法^[9],根据轴承的不同损伤程度给优化函数 $fminsearch$ 一定的优化搜索初始值,可求解得到 β 、 η 和 γ ,最终得到轴承在不同状态下的极大似然参数估计结果.

3 可靠性评估实验研究

3.1 实验系统

研究采用的实验数据来源于美国 Case Western Reserve University 电气工程实验室^[13],实验装置如图 2 所示,它包括 1.5 kW 的电机、扭矩传感器、风机和电子控制器,图中测点 1 和测点 2 的箭头处分别是轴承的外壳和基座,电机负载的大小由图 2 中的风机来控制,将振动加速度传感器垂直固定在感应电机驱动端支撑轴承上方的机壳上,并进行数据采集。

实验中测试的轴承是由 SKF 公司生产的深沟球轴承,轴承规格和实验参数如表 1 所示。

表 1 轴承振动监测的实验参数

轴承型号	6205-2RS (SKF)
载荷功率/ kW	1.5
外圈直径/ mm	52
内圈直径/ mm	25
节圆直径/ mm	39
滚动体直径/mm	8
接触角/(°)	0
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	1 800
采样频率/kHz	12

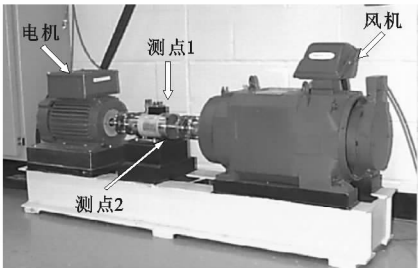


图 2 滚动轴承的实验装置

实验按照滚动轴承的正常状态、滚动体故障和内圈故障状态运行,如图 3~图 5 所示,对于不同的故障,模拟了 3 种不同的损伤程度 δ (0.18 mm、0.36 mm 和 0.53 mm)。

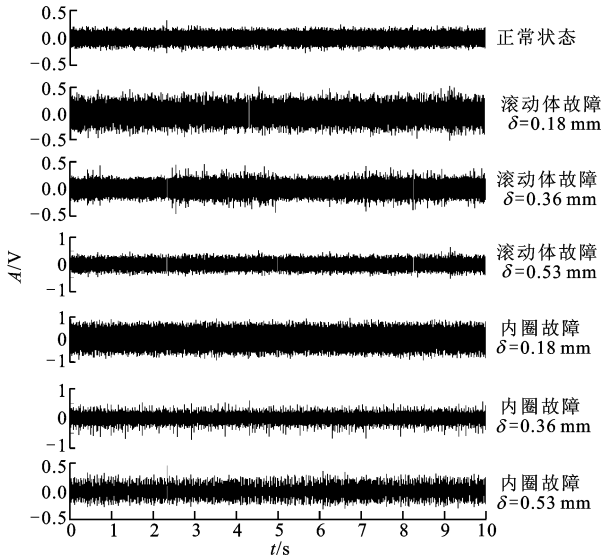


图 3 滚动轴承的振动信号时域波形

3.2 不同损伤程度时的可靠性评估结果

为了验证提出的可靠性模型的效果,从轴承实验系统数据集中选择了 2 个数据集,并进行了可靠性评价。这 2 个数据集分别涵盖了轴承滚动体和轴承内圈在不同运行状态、相同载荷下的样本,每一种故障状态都包含了 3 种不同的损伤程度。滚动轴承在不同运行状态(滚动体故障、内圈故障)和不同损伤程度下,其可靠性参数极大似然估计的结果如表 2 所示。

在图 4 中,对原始采集数据进行了截取,取其中

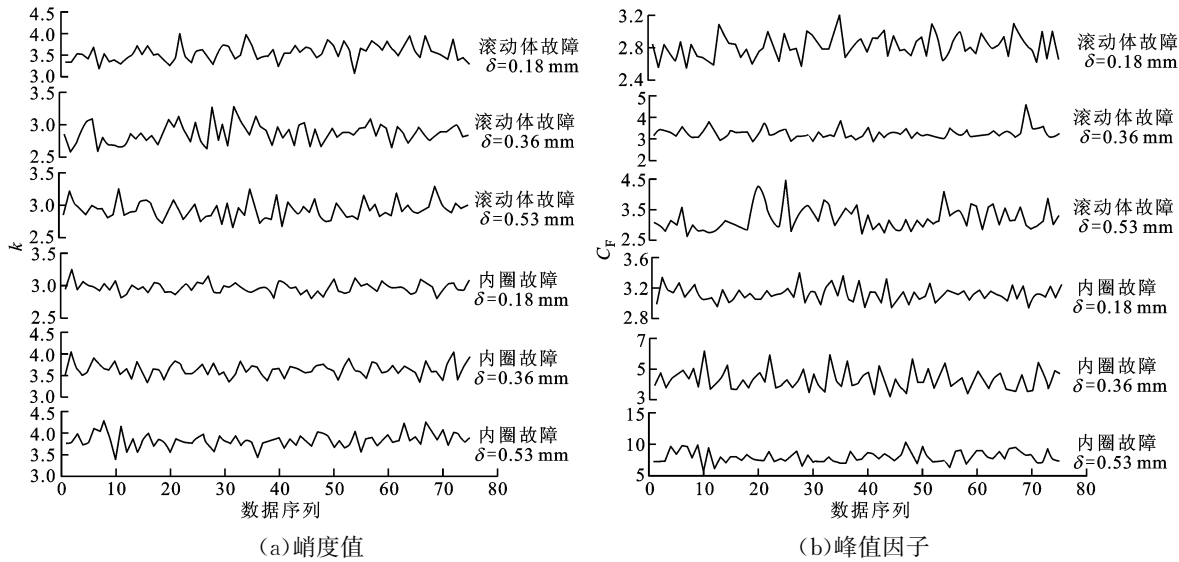


图 4 滚动轴承不同状态时的振动特征

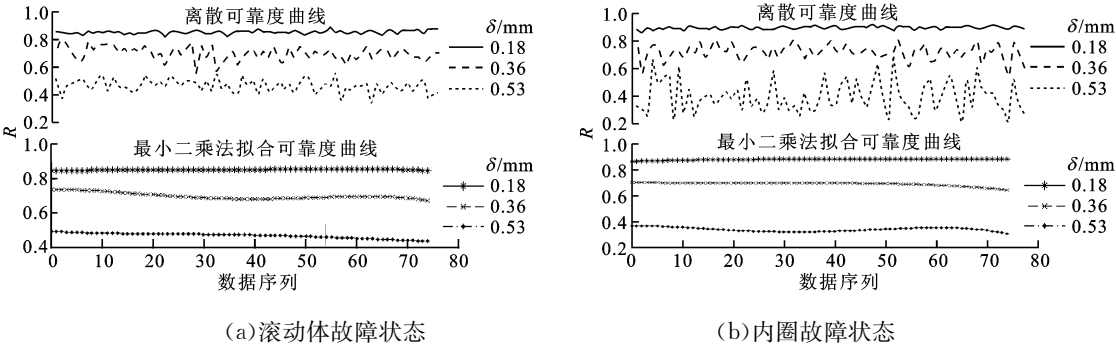


图 5 轴承不同状态和损伤程度时的可靠度曲线

的 120 000 个数据点,对截取的原始数据按每 1 600 个数据点计算一次时域指标值,得到了 75 个时间序列值.图 5 表示滚动轴承在 2 种状态不同损伤程度时可靠度 R 的评估曲线,可以看出,轴承损伤的严重程度对可靠度的影响较大.

表 2 滚动轴承的参数估计结果

运行状态	δ/mm	β	η	γ_1	γ_2
滚动体故障	0.18	0.64	98.03	-0.18	1.10
	0.36	1.92	48.00	-0.12	1.37
	0.53	1.87	16.02	-0.45	1.26
内圈故障	0.18	0.77	120.01	-0.48	1.33
	0.36	1.77	98.12	-0.05	1.56
	0.53	1.56	8.76	-0.45	1.39

4 结 论

(1)本文从设备状态监测信息角度出发,考虑设备失效的先验分布和运行时的状态协变量对可靠性的影响,建立了设备可靠性模型框架,进而得到了设备主动监测的比例故障率可靠性模型.

(2)考虑机械部件的不同运行状态和不同损伤程度,使用基于振动状态的监测信号,对实际运行的滚动轴承振动监测数据的特征指标进行有选择性的提取,通过实验研究证实了比例故障率模型可靠性评估的有效性.

(3)本文基于设备运行状态的主动监测和特征提取,对系统当前状态进行可靠性在线评估,为缺少失效数据的设备可靠性分析提供了一种新的、有效的评估途径.通过推断可靠性的变动情况,合理进行设备的维修决策,对于保障设备在服役寿命周期的可靠性和安全性具有积极的指导作用.

参考文献:

[1] 王正,谢里阳,李兵. 随机载荷作用下的零件动态可靠性模型[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 20-25.
WANG Zheng, XIE Liyang, LI Bing. Time-dependent reliability model of component under random load[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (12): 20-25.

[2] GEBRAEEL N Z, LAWLEY M A. A neural network degradation model for computing and updating residual life distributions[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2008, 5 (1): 154-163.

[3] GEBRAEEL N Z, LAWLEY M A, LIU R, et al. Residual life predictions from vibration-based degradation signals: a neural network approach[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004, 51(3): 694-700.

[4] 刘宝友,方攸同,魏金祥,等. 状态维修机械设备的可靠性和检测更换策略[J]. 机械工程学报, 2006, 42 (3):30-35.
LIU Baoyou, FANG Youtong, WEI Jinxiang, et al. Reliability and check replacement policy of mechanical equipment under predictive maintenance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 30-35.

[5] COX D R. Regression models and life-tables(with discussion)[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological), 1972, 34(2): 187-220.

[6] GASMI S, LOVE C E, KAHLE W. A general repair, proportional-hazards, framework to model complex repairable systems[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2003, 52(1): 26-32.

[7] SAMROUT M, CHATELET E, KOUTA R, et al. Optimization of maintenance policy using proportional hazard model[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94 (1):44-52.

[8] CARR M J, WANG W. A case comparison of a proportional hazards model and a stochastic filter for con-

- dition-based maintenance applications using oil-based condition monitoring information [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal Risk and reliability, 2008, 222 (1): 47-55.
- [9] 丁锋, 何正嘉, 訾艳阳, 等. 基于设备状态振动特征的比例故障率模型可靠性评估 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 89-94.
- DING Feng, HE Zhengjia, ZI Yanyang, et al. Reliability assessment based on equipment condition vibration feature using proportional hazards model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (12): 89-94.
- [10] 蒯诗松, 汤银才, 王玲玲. 可靠性统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 129-162.
- [11] KIRAL Z, KARAQULLE H. Vibration analysis of rolling element bearings with various defects under the action of an unbalanced force [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(8): 1967-1991.
- [12] SHAO Y, NEZU K. Prognosis of remaining bearing life using neural networks [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2000, 214(3): 217-230.
- [13] LOPARO K A. Bearings vibration data set, case western reserve university [DB/OL]. [2008-12-05]. <http://www.eecs.cwru.edu/laboratory/bearing/download.htm>.

(编辑 管咏梅)

我校王锡凡教授当选中国科学院院士

2009年12月4日中国科学院院士增选结果公布, 35名中国科学家当选为中国科学院院士, 6名外国科学家当选为中国科学院外籍院士. 其中, 我校王锡凡教授当选为中国科学院院士.

王锡凡为我校电气工程学院教授、博士生导师、电力系统研究所所长, 1957年7月从我校毕业后留校任教, 1986年晋升教授, 1981年9月至1983年9月应邀到美国康奈尔大学作访问科学家2年, 1991年10月至1993年10月应邀任日本九州工业大学客员教授, 2008年当选为IEEE Fellow.

王锡凡院士的主要研究领域为电力系统规划、电力系统可靠性、电力系统分析和新型输电方式等. 他先后完成了我国电力市场的电价理论、交易机制及其模拟研究, 电力市场对电力系统运行可靠性的影响研究, 分频输电及在可再生能源发电并网中的应用等国家级课题, 并且完成了三峡系统动能经济论证、20余个大型水电站和抽水蓄能电站的主系统可靠性论证等重大电力建设项目的研究工作.

他长期从事电力系统及其自动化教学及科研工作, 创立了复杂故障的综合阻抗矩阵理论, 发展了电力网络线性方程的稀疏矩阵算法, 建立了大型电力系统暂态稳定分析模型, 为计算机在我国电力系统中的应用和推广做出了奠基性贡献. 在电力系统规划和可靠性评估研究中, 他提出了等效电量函数理论和状态空间分析中的“增量频率”概念, 以及可靠性分析中元件串并联递归卷积公式, 开发了多个电力系统规划与可靠性评估软件.

他作为第一获奖者获省部级以上奖励10项, 主要有: 2008年教育部自然科学一等奖, 2007年陕西省科技进步一等奖, 2002年教育部科技进步二等奖, 1999年国家自然科学四等奖, 1999年教育部科技进步一等奖, 1987年国家教委科技进步一等奖. 他先后出版著作10部(其中英文著作4本), 包括《电力系统计算》、《电力系统优化规划》、《电力系统规划基础》、《Modern Power System Planning》、《电力工程基础》、《Power System Restructuring and Deregulation》、《现代电力系统分析》、《Operation of Market-oriented Power Systems》、《电力市场基础》、《Modern Power System Analysis》, 很多著作在国内外影响很大, 如《电力系统计算》是本领域的经典之作, 历久弥新, 《电力系统优化规划》填补了国内空白, 《现代电力系统分析》被教育部遴选为全国研究生教材, 出版5年已4次印刷, 广受读者好评, 1994年出版的《Modern Power System Planning》一书被12所国外大学指定为研究生教材. 在国内外发表论文300余篇, 其中第一作者的70余篇, 著述被国内外期刊论文引用3500多次.

(来源: 交大新闻网 <http://xjtunews.xjtu.edu.cn/>)