



「十二五」国家重点图书出版规划项目
当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

可靠性预测与 最优维护技术

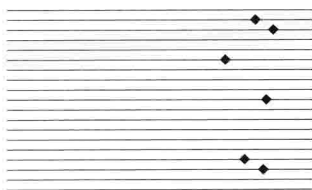
周东华 陈茂银 徐正国

◆ 著

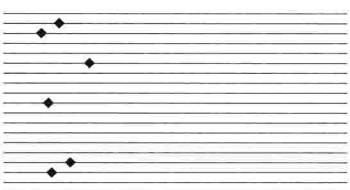


中国科学技术大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书



可靠性预测与 最优维护技术



周东华 陈茂银 徐正国



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是可靠性预测与最优维护技术方面的专著,第2章至第12章汇集了作者近十年来在可靠性预测、剩余使用寿命预测以及最优维护方面的最新研究成果。第1章概述了预测与健康管理系统3个重要组成部分(可靠性预测、剩余使用寿命预测以及最优维护)的研究现状。第2章至第5章主要介绍了动态系统的可靠性实时预测技术。第6章至第8章主要介绍了设备级系统的剩余使用寿命预测技术。第9章至第12章主要讨论了设备级系统的最优维护技术。

本书内容体现了学科发展的一些新思想,不仅有理论描述和方法介绍,还有仿真实验,可读性强。本书列选“十二五”国家重点图书出版规划项目,并获得自然科学基金和重点基础研究发展计划项目的支持。

本书可作为自动控制专业研究生的教学参考书,同时对从事自动化系统研究、设计、开发和应用的广大工程技术人员也具有指导和参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性预测与最优维护技术/周东华,陈茂银,徐正国著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2013.12

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03366-7

I. 可… II. ①周… ②陈… ③徐… III. 可靠性工程—研究 IV. TB114.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第303092号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路96号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

印刷 合肥晓星印刷有限责任公司

经销 全国新华书店

开本 710 mm×1000 mm 1/16

印张 22.75

字数 373 千

版次 2013年12月第1版

印次 2013年12月第1次印刷

定价 69.00 元

前 言

随着高新技术的发展和人们对自然界探索的拓展,现代化大生产中的工业设备变得越来越复杂。由于磨损、外部冲击以及运行环境的变化,这些设备的性能及健康状态将不可避免地发生退化,进而造成设备最终的失效;一旦发生由于失效引起的事故,所造成的人员和财产损失往往不可估量。目前世界上大部分设备的维护多以定期检查、事后维护为主,不仅耗费大量的人力和物力,而且效率低下。预测与健康管理系统(Prognostics and Health Management, PHM)系统是综合利用现代信息技术、人工智能技术的最新研究成果而提出的一种全新的管理设备健康状态的解决方案。PHM作为一种新兴技术已被工程实践验证,可以减少维护保障费用,提高设备的可靠性和安全性,降低失效事件发生的风险,在对安全性和可靠性要求较高的领域有着至关重要的作用。可靠性预测、剩余使用寿命预测以及最优维护一直是PHM系统的重要组成部分。

可靠性预测是指根据设备的在线监测信息,实时地评估和预测设备运行的可靠性指标。对于刚投入使用的设备而言,其可靠性是一定的。但随着运行时间的增加,设备将不可避免地发生老化、磨损,从而设备的可靠性也将逐渐下降。因此,实时变化的可靠性指标很自然地成为表征设备或系统健康状态的特征量。与传统的可靠性研究有着明显的区别,可靠性实时评估与预测能够将实时健康状态监测同可靠性有机地结合起来。传统可靠性研究通常以一类产品为对象,通过对产品样本作统计

分析来推断产品总体的可靠性;可靠性实时评估与预测考虑的是单个特定的设备或系统。传统可靠性研究产品在其整个生命周期内的可靠性;可靠性实时评估与预测考虑的是设备或系统使用过程中,在其剩余生命周期内的可靠性。

可靠性指标往往只是表征设备运行的短期指标,而剩余使用寿命预测(设备从当前状态到发生失效的预计持续正常工作时间)则是有效表征设备运行的长期指标。目前数据驱动的剩余使用寿命预测一直是PHM系统研究中的热点问题。根据状态监测数据的类型,数据驱动的剩余使用寿命预测方法分为直接可观测数据法和间接测量数据法。直接数据主要指可以直接反映设备性能或健康状态的监测数据,如磨损、疲劳裂纹等退化数据。因此前一类方法主要是预测监测数据首达失效阈值的时间。间接数据主要指只能间接或部分反映设备性能或健康状态的监测数据,如振动分析、油液分析等数据。因此后一类方法需要将失效时间数据同状态监测数据及剩余寿命联系起来。

当设备失效或具有失效的高风险(例如较低的实时可靠性和较短的剩余使用寿命)后,管理者必须对设备进行有针对性的维护。维护是指为保持、恢复产品功能或保证产品处于能执行规定功能的状态所进行的所有技术和管理方面的活动。在工业生产中,对设备实施维护能够使设备安全运行,降低突发事故发生的可能性,避免人员伤亡和设备损失。在现代化大生产中,维护计划已经成为企业运行计划的重要组成部分。由于设备集成度提高、复杂性增加、功能增强,设备维护的成本也相应提高。目前维护费用在企业运营成本中的比重也越来越高,制造业中的维护费用通常占总生产成本的15%以上,钢铁行业中的维护费用有的高达40%;大约30%的维护成本是由低效率的维护方式(维护不足和过度维护)引起的,因此需要制定合理的维护策略,既减少过度维护造成的浪费,又保证设备受到足够的维护进而处于良好的工作状态。

本书作者长期从事工业PHM系统中可靠性预测、剩余使用寿命预测与最优维护的理论与应用研究工作,取得了一系列的创新性研究成果。例如,首次提出了一种动态系统的可靠性实时评估与预测方法;系统性提出了传感器数据驱动的设备级系统的剩余使用寿命预测技术;系

统性提出了设备级系统的最优预防维护与预测维护技术。本书主体部分包含了作者在上述 3 个方面的最新研究成果。

本书第 1 章概述了 PHM 系统的 3 个重要组成部分(可靠性预测、剩余使用寿命预测以及维护决策)的研究现状。第 2 章至第 5 章主要介绍了动态系统的可靠性实时预测技术,该部分分别提出了基于隐含性能退化过程监测的可靠性预测技术、基于在线故障预测的可靠性预测技术、具有退化及不可靠元件的可靠性预测技术、具有耦合输入的可靠性预测以及调度技术。第 6 章至第 8 章主要介绍了设备级系统的剩余使用寿命预测技术。该部分分别提出了基于 Wiener 退化模型的预测技术、传感器具有测量误差的预测技术以及多传感器数据驱动的预测技术。第 9 章至第 12 章主要讨论了设备级系统的维护技术。该部分分别提出了修正的扩展周期性不完全预防维护技术、时变环境下的最优周期性不完全预防维护技术、相依失效模式下的最优不完全预防维护技术以及相依失效模式下的合作预测维护技术。

本书涉及的研究成果得到了众多科研机构的支持。其中特别感谢国家自然科学基金委员会和国家重点基础研究发展计划的支持。在本书正式出版之际,谨向作者所在课题组的所有成员表示衷心的感谢。

由于作者理论水平有限,以及所做研究工作的局限性,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2013 年 5 月于北京

目 录

前言	(i)
第 1 章 预测与健康管理概述	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 可靠性预测技术概述	(2)
1.2.1 基于性能退化分析的方法	(3)
1.2.2 基于传统可靠性指标实时化的方法	(6)
1.3 剩余使用寿命预测技术概述	(7)
1.3.1 直接监测数据驱动的剩余使用寿命预测	(7)
1.3.2 间接监测数据驱动的剩余使用寿命预测	(9)
1.4 预防维护技术概述	(12)
1.4.1 计划性维护	(13)
1.4.2 视情维护	(14)
1.4.3 预测维护	(16)
1.5 全书概况	(17)
参考文献	(20)
第 2 章 基于隐含性能退化过程监测的可靠性实时预测技术	(29)
2.1 引言	(29)
2.2 隐含性能退化过程辨识及系统可靠性实时预测	(30)
2.2.1 系统模型及问题描述	(30)
2.2.2 基于粒子滤波器的参数估计方法	(31)
2.2.3 隐含性能退化过程辨识方法及理论分析	(34)

2.2.4 可靠性实时预测	(43)
2.2.5 仿真	(45)
2.3 隐含性能退化过程检测、辨识及可靠性实时预测	(51)
2.3.1 系统模型及问题描述	(51)
2.3.2 基于粒子滤波和自组织滤波的性能退化检测	(53)
2.3.3 基于隐含性能退化过程检测和辨识的系统可靠性实时预测	(66)
2.3.4 仿真	(71)
2.4 结束语	(75)
参考文献	(76)
第 3 章 基于在线故障预测的可靠性实时预测技术	(78)
3.1 引言	(78)
3.2 具有加性故障过程的非线性动态系统可靠性实时预测	(79)
3.2.1 系统模型及问题描述	(79)
3.2.2 基于改进粒子滤波算法的在线故障估计与预测	(80)
3.2.3 系统可靠性实时预测	(95)
3.2.4 仿真	(97)
3.3 具有乘性故障过程的非线性动态系统可靠性实时预测	(101)
3.3.1 系统模型及问题描述	(102)
3.3.2 在线故障估计与预测	(103)
3.3.3 系统可靠性实时预测	(110)
3.3.4 仿真	(111)
3.4 结束语	(116)
参考文献	(117)
第 4 章 具有退化和不可靠元件的可靠性实时预测技术	(118)
4.1 引言	(118)
4.2 系统模型及问题描述	(119)
4.3 状态估计及初步故障估计	(120)
4.3.1 交互式多模型粒子滤波器	(121)
4.3.2 改进的交互式多模型粒子滤波器	(121)
4.3.3 初步故障估计的理论分析	(125)

4.4 平滑故障估计及故障预测	(131)
4.4.1 基于 Holt 方法的平滑故障估计及故障预测算法	(131)
4.4.2 平滑故障估计的理论分析	(132)
4.5 可靠性实时预测	(134)
4.6 仿真	(136)
4.6.1 正交影响情况	(136)
4.6.2 非正交影响情况	(139)
4.7 结束语	(141)
参考文献	(142)
第 5 章 具有耦合输入的可靠性实时预测及调度技术	(143)
5.1 引言	(143)
5.2 系统模型及问题描述	(144)
5.3 子系统的状态估计及故障预测	(146)
5.3.1 状态估计及初步故障估计	(146)
5.3.2 平滑故障估计及故障预测	(149)
5.4 子系统的可靠性预测	(150)
5.5 可靠性调度	(158)
5.6 仿真	(160)
5.7 结束语	(166)
参考文献	(166)
第 6 章 基于 Wiener 退化模型的剩余使用寿命预测技术	(167)
6.1 引言	(167)
6.2 Wiener 退化模型	(169)
6.3 基于 Wiener 退化模型的剩余使用寿命预测	(174)
6.3.1 剩余使用寿命分布的在线更新	(174)
6.3.2 参数估计	(176)
6.4 仿真	(181)
6.4.1 问题描述	(181)
6.4.2 惯性平台的剩余使用寿命预测	(183)
6.4.3 与已有方法的比较	(186)
6.5 结束语	(189)

参考文献	(189)
第7章 具有测量误差的剩余使用寿命预测技术	(192)
7.1 引言	(192)
7.2 测量误差对剩余使用寿命的影响	(193)
7.3 期望预测性能下的可允许测量误差	(198)
7.3.1 预测性能	(198)
7.3.2 基于变异系数相对增加比的可允许测量误差	(199)
7.3.3 基于方差相对增加比的可允许测量误差	(201)
7.4 测量误差对维护决策的影响	(202)
7.5 仿真	(205)
7.5.1 数值例子	(205)
7.5.2 实例研究	(207)
7.6 结束语	(211)
参考文献	(211)
第8章 多传感器数据驱动的剩余使用寿命预测技术	(214)
8.1 引言	(214)
8.2 多传感器数据驱动的剩余使用寿命预测	(215)
8.2.1 问题描述	(215)
8.2.2 退化状态估计	(218)
8.2.3 参数估计	(219)
8.2.4 剩余使用寿命预测	(224)
8.3 预测性能分析	(227)
8.3.1 不确定分析	(228)
8.3.2 期望预测性能下的传感器选择方法	(230)
8.4 仿真	(234)
8.4.1 数值例子	(234)
8.4.2 实际例子	(238)
8.5 结束语	(244)
参考文献	(244)
第9章 扩展周期性不完全预防维护技术	(248)
9.1 引言	(248)

9.2	EIPM 模型	(249)
9.3	修正 EIPM 模型	(251)
9.4	期望费用率计算	(254)
9.5	最优维护	(257)
9.6	仿真	(266)
9.7	结束语	(270)
	参考文献	(271)
第 10 章	时变环境下的最优周期性不完全预防维护技术	(273)
10.1	引言	(273)
10.2	时变环境下的维护模型	(274)
10.3	时变环境下设备失效率函数的不连续性	(277)
10.4	设备失效特性	(279)
10.4.1	起始环境为正常环境	(279)
10.4.2	起始环境为恶劣环境	(283)
10.5	期望费用率	(284)
10.6	最优维护	(289)
10.7	仿真	(294)
10.8	结束语	(298)
	参考文献	(299)
第 11 章	相依失效模式下的最优不完全预防维护技术	(303)
11.1	引言	(303)
11.2	相依失效模式下的维护模型	(304)
11.2.1	经典维护模型	(304)
11.2.2	混合维护模型	(305)
11.3	最优维护	(308)
11.3.1	费用率	(308)
11.3.2	最优维护	(309)
11.4	仿真	(316)
11.5	结束语	(322)
	参考文献	(323)
第 12 章	相依失效模式下的合作预测维护技术	(326)

12.1	引言	(326)
12.2	问题描述	(327)
12.3	合作预测维护模型	(329)
12.3.1	维护模型	(329)
12.3.2	费用率	(332)
12.4	最优维护	(333)
12.5	仿真	(344)
12.6	结束语	(348)
	参考文献	(348)

第 1 章 预测与健康概述

1.1 引言

随着高新技术的发展和人们对自然界探索的拓展,许多工程/工业设备变得越来越复杂。由于磨损、外部冲击以及运行环境的变化,这些设备的性能及健康状态将不可避免地发生退化,进而造成设备最终失效。然而,一旦发生由于失效引起的事故,造成的人员和财产损失往往是不可估量的。目前世界上大部分设备的维护多以定期检查、事后维护为主,不仅耗费大量的人力和物力,而且效率低下。预测与健康(PHM)系统就是综合利用现代信息技术、人工智能技术的最新研究成果而提出的一种全新的管理健康状态的解决方案。20 世纪末,随着美国、英国等国家的军方合作开发的联合攻击机(Joint Strike Fighter, JSF)F-35 项目的启动,正式提出了 PHM 的概念^[1]。

近几年,国外 PHM 技术在应用方面已经取得了一系列进展。JSF 系统都不同程度地通过监测能够反映产品故障或健康状态的性能(特征)参数评估电子产品的健康状态^[2];美国航空航天局(NASA)高级科学家 Goebel 领导的 PHM 中心,对航天系统中电池系统的 PHM 方法开展了大量的研究和验证工作,主要采用贝叶斯方法实现电池健康状态的预测;美国马里兰大学 Pecht 教授创建的先进生命周期工程中心,以失效机理方法为基础,对电子产品的 PHM 技术进行了深入研究^[3]。特别是装备有 PHM 系统、具备隐形性能的联合攻击机 F-35 在 2006 年的首飞成功,标志着 PHM 技术向工程

应用方向前进了一大步。

PHM 作为新兴的技术已被工程实践验证,可以减少维护保障费用、提高设备可靠性和安全性、降低失效事件发生的风险,在对安全性和可靠性要求较高的领域有着至关重要的作用。本章主要介绍 PHM 系统的 3 个重要组成部分(可靠性预测、剩余使用寿命预测以及维护决策)的研究现状。

1.2 可靠性预测技术概述

可靠性实时评估与预测是指针对特定的设备,根据在线监测信息,实时地评估和预测可靠性指标。对于刚投入使用的设备而言,可靠性能够得到保证。但是,随着运行时间的增加,设备不可避免地发生老化、磨损,从而可靠性也将随时间逐渐下降。因此,实时变化的可靠性指标很自然地成为表征设备或系统健康状态的特征量。通过实时评估和预测可靠性指标,就能够实现剩余使用寿命的预测。

可靠性实时评估与预测,能够将实时健康状态监测同可靠性有机地结合起来,与传统的可靠性研究有着明显的区别。首先,传统可靠性研究通常以一类产品为对象,通过对产品样本作统计分析推断产品总体的可靠性;可靠性实时评估与预测考虑的是单个特定的设备或系统。其次,传统可靠性研究考虑产品在其整个生命周期内的可靠性;可靠性实时评估与预测考虑的是设备或系统使用过程中,在其剩余生命期内的可靠性。当然,可靠性实时评估与预测借鉴了传统可靠性研究领域中的相关概念和模型,与传统的可靠性研究存在着密切的联系。

可靠性实时评估与预测的研究历史比较短,最早的工作是 Kim 和 Kolarik 在 1992 年发表的一篇文章^[4],他们提出了实时条件可靠性的概念,并针对单个工件进行了可靠性实时预测的研究。在近十多年来的研究过程中,形成了两类研究方法:基于性能退化分析的方法和基于传统可靠性指标实时化的方法。

1.2.1 基于性能退化分析的方法

基于性能退化分析的实时可靠性评估与预测方法是目前该领域的主流研究方法。这种方法认为设备可靠性的下降是由内在的性能退化过程引起的,并通过对性能退化过程进行建模与分析来评估和预测可靠性。

基于性能退化分析的方法,借鉴了传统可靠性研究领域性能退化可靠性分析的部分概念和模型。传统的性能退化可靠性分析主要考虑在缺少样本失效数据但可以测量性能退化过程的情况下产品总体可靠性分析问题。同基于失效数据的可靠性分析不同,性能退化可靠性分析提出了“软失效”的概念,即产品的性能退化路径超过所定义的性能退化临界水平这样的事件^[5]。同时,性能退化可靠性分析提出了各种性能退化模型,例如失效物理退化模型^[6]、统计回归退化模型^[7,8]、随机过程退化模型^[9-11]和动态退化模型^[12]等。基于性能退化分析的实时可靠性评估与预测方法,也采用了软失效概念,并且借鉴了上述性能退化模型。

根据所使用的性能退化模型,基于性能退化分析的实时可靠性评估与预测方法分为四类:回归分析方法、时间序列分析方法、马尔可夫过程分析方法和其他方法。

1. 回归分析方法

回归分析方法采用回归模型对性能退化过程进行建模,能够利用实时测量信息辨识相应的模型,并通过模型外推进行实时可靠性评估和预测。

在有关使用状况的实时数据以及期望的性能变化模型的基础上, Kim 和 Kolarik 预测了单个工件的实时条件可靠性^[4]。该文献假设工件性能变量变化的中心趋势满足回归模型,性能变量的离散度可以是常数,也可以随时间变化。当离散度发生变化时,需要利用辅助变量描述离散度随时间变化的趋势。在分析时,首先根据历史信息进行性能变量变化模型选择,然后确定性能变量的分布并进行统计检验。对于新的实时数据,检验其同已确定分布的相符性,如果不符合,那么就需要重新确定分布。最后,根据性能变量的分布就可以计算条件可靠度。

文献[13]根据退化信号利用多项式回归模型分析单个元件的可靠性。假设性能变量能够由多项式回归模型描述,且模型残差之间没有明显的自

相关性,或自相关性能够由一阶自回归模型充分描述,利用最小二乘法或加权最小二乘法,估计多项式回归模型参数及误差方差。如果残差之间具有自相关性,那么首先对响应变量和时间变量进行变换,然后针对变换后的多项式回归模型,利用最小二乘法估计参数及一阶自回归模型误差方差。利用性能退化路径函数的估计,能够进一步计算可靠度的点估计以及置信区间。

针对指数型的设备退化过程,文献[14]根据实时状态监测信息,利用贝叶斯方法估计模型中的随机参数。文献[15]考虑了随机参数的先验分布为二维联合正态分布的情况。文献[16]综合了同类设备的历史性能退化数据和现场设备的实时数据,利用神经网络和贝叶斯方法,对现场单个设备的剩余使用寿命分布进行估计。文献[17]将文献[14]的贝叶斯方法推广到满足一般非线性性能退化路径模型的情况。首先根据同类产品的历史数据,利用非线性最小二乘法离线推断未知随机参数的先验分布,然后基于退化路径模型推导似然函数,并根据预测时间区间长度和失效阈值,确定当前时刻的预测可靠度函数表达式。文献[18]进一步考虑了一般非线性性能退化路径模型中误差项方差未知的情况,提出了实时可靠性预测方法。

回归分析方法将设备性能退化过程的先验知识同在线测量信息相结合,通过回归退化路径模型,能够对设备可靠性进行预测。但回归分析方法的精度过度依赖于回归退化路径模型与设备真实退化过程之间的匹配程度,这就要求在进行可靠性分析前必须对相应设备的退化过程有足够多的了解。

2. 时间序列分析方法

根据性能退化信号,文献[19]利用指数平滑方法对单个设备条件可靠性进行预测。假设性能变量观测值是一组时间序列数据,而且是性能退化随机过程的一个实现,在任何一个时刻,性能变量的取值满足正态分布。利用有限持续冲击响应多层感知器和自组织映射,文献[20]分析了单个设备的退化信号并进行可靠性估计。文献[21]进一步考虑了频域退化信号的处理,首先利用小波变换对性能退化信号进行预处理,然后利用神经网络进行信号预测及可靠性分析。文献[22]考虑了不确定失效阈值,提出基于神经网络和模糊逻辑的可靠性实时评估方法。在存在多个性能变量、多个失效模式的情况下,文献[23]考虑了单个设备的实时可靠性预测问题。首先通

过状态空间模型为多变量性能退化数据进行建模,然后利用 Kalman 滤波预测性能变量的均值和协方差矩阵,最后利用均值和协方差矩阵的预测值计算性能可靠度的预测值。

时间序列分析方法不需要事先知道设备的性能退化路径,而是根据性能退化数据本身包含的信息进行建模与分析,因而对于尚不知其退化规律的新设备的实时可靠性分析具有重要的意义。基于时间序列分析的设备实时可靠性评估与预测研究,一般是通过性能变量预测值计算可靠度。由于时间序列分析一般建立在等间隔采样数据的基础上,往往只能得到采样时刻点上的性能变量预测值,因此可靠度预测值带有一定程度的近似性。此外,时间序列数据只能刻画性能退化过程的局部特性,因此时间序列分析方法更加适合于对设备可靠性进行较短时间的预测。

3. 马尔可夫过程分析方法

由于一些性能退化过程满足马尔可夫性,因此马尔可夫过程分析方法在实时可靠性评估与预测领域得到了很多应用。

文献[24]利用随机滤波方法进行设备的健康状态监测及剩余使用寿命估计。假设非减的性能退化过程能够由有限状态马尔可夫过程描述,而性能退化过程在离散时刻被观测,并且观测值是一个随机变量,那么其分布由基于性能变量真实值的条件概率决定。针对连续状态隐马尔可夫磨损过程,文献[25]提出了基于随机滤波的可靠性预测算法。首先利用连续状态马尔可夫过程对磨损过程进行建模,磨损量定义为马尔可夫过程的状态量,并定义“0”为健康状态,“1”为失效状态,中间值为退化状态,磨损过程观测值和实际磨损量之间满足一定的分布。然后,利用两阶段极大似然方法估计马尔可夫过程模型及观测模型中的参数,并分别利用近似网格方法和粒子滤波实时估计磨损状态,得到磨损状态的后验概率密度函数的估计,从而估计失效概率。

针对隐马尔可夫模型的不足,文献[26]进一步提出了基于隐半马尔可夫模型的诊断与预测框架和方法。首先将健康状态分成有限个离散状态,根据训练数据估计状态转移概率及各状态驻留时间的概率密度函数;然后通过分类估计元件在当前时刻的健康状态;最后利用反向迭代方程估计剩余使用寿命,计算其均值和方差。在此框架下,文献[27]进一步考虑了基于多传感器数据融合利用的实时可靠性分析方法。