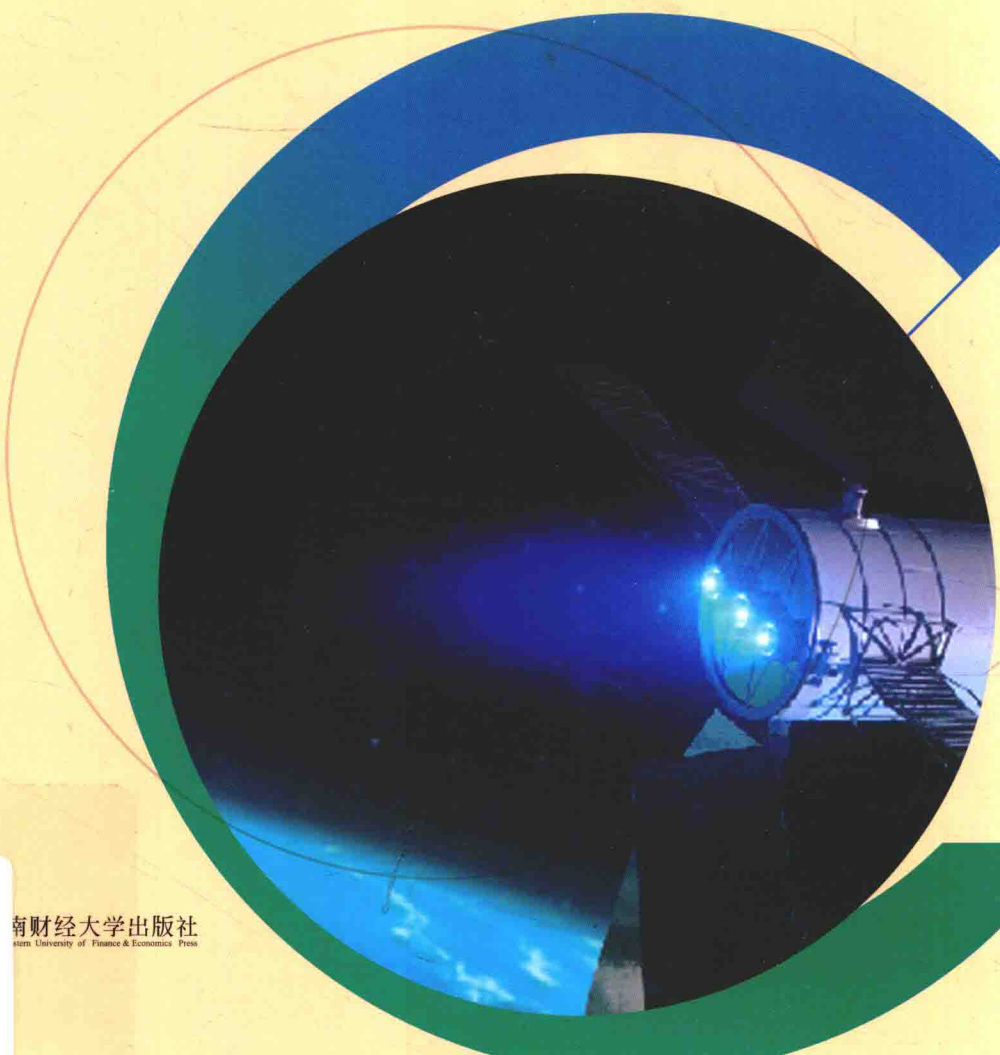


集成系统健康管理方法研究 ——以航天推进系统为例

JICHENG XITONG JIANKANG
GUANLI FANGFA YANJIU
YI HANGTIAN TUIJIN XITONG WEI LI

孟致毅 陈春梅 蓝红星◎著

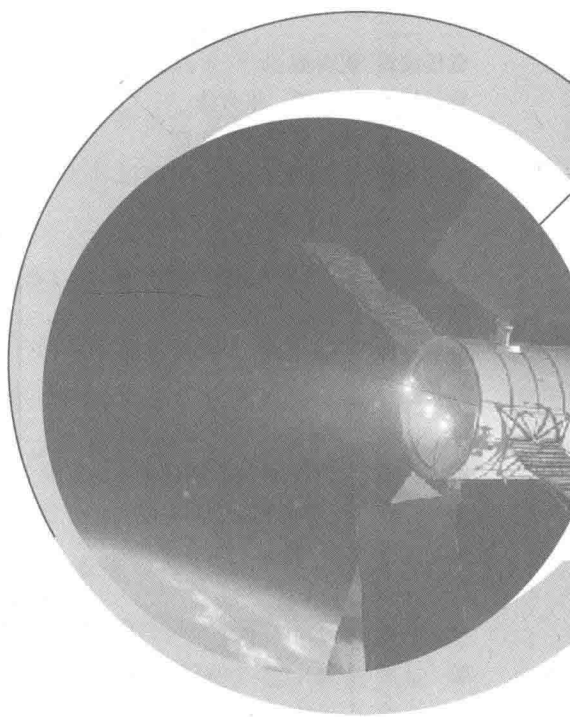


南财经大学出版社
Nan University of Finance & Economics Press

集成系统健康管理方法研究 ——以航天推进系统为例

JICHENG XITONG JIANKANG
GUANLI FANGFA YANJIU
YI HANGTIAN TUIJIN XITONG WEI LI

孟致毅 陈春梅 蓝红星◎著



西南财经大学出版社
Southwestern University of Finance & Economics Press

中国·成都

图书在版编目(CIP)数据

集成系统健康管理方法研究:以航天推进系统为例/孟致毅,陈春梅,蓝红星
著. —成都:西南财经大学出版社,2017. 12

ISBN 978 - 7 - 5504 - 3147 - 8

I. ①集… II. ①孟…②陈…③蓝… III. ①航天推进—系统安全性—研究
IV. ①V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 179200 号

集成系统健康管理方法研究:以航天推进系统为例

孟致毅 陈春梅 蓝红星 著

责任编辑:何春梅

责任校对:金欣蕾 王青清

封面设计:何东琳设计工作室

责任印制:朱曼丽

出版发行	西南财经大学出版社(四川省成都市光华村街 55 号)
网 址	http://www.bookej.com
电子邮件	bookcj@foxmail.com
邮政编码	610074
电 话	028 - 87353785 87352368
照 排	四川胜翔数码印务设计有限公司
印 刷	四川五洲彩印有限责任公司
成品尺寸	170mm × 240mm
印 张	12
字 数	220 千字
版 次	2017 年 12 月第 1 版
印 次	2017 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978 - 7 - 5504 - 3147 - 8
定 价	78.00 元

1. 版权所有,翻印必究。

2. 如有印刷、装订等差错,可向本社营销部调换。

摘 要

伴随航天技术的进步、航天器自身结构愈加复杂以及其任务难度的逐渐增加,对航天器系统安全性的要求也更高。系统安全性指系统处于可预测的、可接受的最小事故损失下正常工作的特性^[2]。对载人航天而言,系统安全包括两个方面的内容:一方面是航天器任务完成的有效性,另一方面是救生系统工作的有效性。换言之,载人航天的系统安全问题可以具体分为两类,即航天器的任务安全问题和不同使用环境下、不同训练水平和飞行阶段时的人员安全性问题。

航天器系统是由诸多子系统、零部件构成的有机统一体,各子系统的功能不相同但是又相互联系,任何一个子系统的安全与航天器系统的安全息息相关。如果某个子系统出现故障,便会影响其他子系统的信号获取和数据处理,从而导致更大范围甚至整个系统的效能或可靠性降低,威胁航天任务、航天器及人员的安全。

航天器系统结构复杂,子系统及零部件数量众多,加之故障特征多样,存在大量的不确定因素影响系统故障的监测和识别。但是由于航天任务的独特性和挑战性,对航天器飞行过程的时间成本要求严格,因此,如何能够在航天器复杂系统结构中把握影响系统安全的关键系统,快速过滤出有效的故障信息,做出科学合理的处理决策,提高航天器系统健康管理的时效性和可操作性,成为目前众多专家学者关注的重点。本书的后续部分拟从航天器推进系统进行研究,首先对航天器推进系统的概念进行介绍,就其系统结构和特征进行梳理和总结,提出电子系统的分层效能评估

问题、软件系统可靠性评估问题以及发动机系统剩余使用寿命预测问题。具体从以下六个方面展开研究：

(1) 从研究背景、研究现状、研究框架三个方面进行阐述，介绍理论和现实背景，阐明研究目的和意义。运用文献综述的方法，系统梳理以航天推进系统、系统健康管理、效能评估、可靠性评估及剩余使用寿命预测为主题的核心研究文章，为本研究提供启示。研究背景部分主要是通过对涉及航天器安全问题的迫切重大事件资料梳理发现问题、明确研究目的与研究意义，指出研究的重要性；研究现状部分通过对相关问题及方法研究的总结分析，指出其不足，为本研究指明方向；研究框架主要从研究思路、技术路线、研究内容三个方面对全文进行归类说明，其中包含研究的方法和途径。

(2) 阐述综合系统健康管理的基本框架，包括数据获取，效能评估、可靠性评估、故障诊断及寿命预测为一体的安全评判，决策支持等。阐述了信息融合模型和启发式智能算法，包括对模糊语义度量的定义、隶属度函数的构建以及模糊语义尺度的运算方法。在启发式智能算法方面，介绍了支持向量机算法、遗传算法及传统层次分析法、网络层次分析及信息熵计算的基本方法。

(3) 阐述航天器推进系统中电子系统、软件系统和发动机系统三个子系统的基本概念，及其在整体系统中的关键作用和特殊功能。阐述安全关键系统的定义，详细描述其具体特征，并根据定义和特征对航天器安全系统相关理论进行分析和梳理。

(4) 考虑了模糊环境下航天器推进系统的电子系统分层效能评估问题。根据电子系统的结构特征，按照综合系统健康管理的逻辑顺序，先后建立系统级健康状态评估模型和子系统级效能水平评估模型。然后根据评估变量和指标的特点，将模糊语义尺度应用到解决定性指标定量化的处理过程中，结合网络层次分析的优势，对子系统级的效能水平进行评估。该

模型和方法将系统级和子系统级的健康问题都进行考虑,完善了航天器推进系统的电子系统在子系统级的效能评估理论和方法。

(5) 拟解决航天器推进软件系统的可靠性预测问题。按照航天器推进系统综合系统健康管理的逻辑顺序,根据软件系统的特征,进行可靠性指标的分析和选择,围绕指标构建信息融合的可靠性评估模型,模型中将支持向量机算法和遗传算法有机结合,并对遗传算法的参数选择环节进行改进,实现自动选择参数的自适应遗传算法,通过 AGA-SVM 智能算法对数值算例进行求解和运算,通过分析验证,得到精确的可靠性评估数据,拟向决策者提供有效支持,以保障维修和养护决策的科学性。

(6) 针对航天器推进发动机系统剩余使用寿命预测问题,按照航天器综合系统健康管理的逻辑思路,根据航天器发动机的系统特征,分析其失效机理,在深入分析的基础上,筛选确定剩余寿命预测的相关指标,建立融合预测模型。在模型中引入模糊语义度量方法和信息熵的方法对模型进行求解。最后根据发动机系统特征编制的数值算例来对模型和算法进行分析和验证。

目 录

1 引言 / 1

1.1 研究背景 / 2

1.2 研究现状 / 7

1.2.1 效能评估 / 16

1.2.2 可靠性预测 / 16

1.2.3 寿命预测 / 17

1.2.4 现状评述 / 17

1.3 研究框架 / 21

1.3.1 研究思路 / 21

1.3.2 研究方法 / 23

1.3.3 研究内容 / 24

2 理论基础 / 28

2.1 概念框架 / 28

2.1.1 功能介绍 / 29

2.1.2 关键理论 / 32

2.2 技术方法 / 38

2.2.1 网络分析 / 39

2.2.2 支持向量 / 41

2.2.3 遗传算法 / 43

2.3	本章小结 /	45
3	航天器推进系统 /	46
3.1	航天器系统构成 /	47
3.1.1	整体系统 /	47
3.1.2	推进系统 /	48
3.1.3	关键系统 /	50
3.2	电子系统 /	52
3.2.1	概念描述 /	54
3.2.2	效能阐释 /	56
3.3	软件系统 /	57
3.3.1	失效特征 /	59
3.3.2	软件可靠 /	60
3.4	发动机系统 /	61
3.4.1	故障特征 /	62
3.4.2	寿命预测 /	64
3.5	本章小结 /	66
4	电子系统分层效能评估 /	67
4.1	问题介绍 /	67
4.1.1	背景回顾 /	68
4.1.2	系统描述 /	69
4.1.3	概念框架 /	72
4.2	技术范式 /	73
4.2.1	指标体系 /	73
4.2.2	评估方法 /	77
4.2.3	构建模型 /	82

4.3	应用分析 /	90
4.3.1	算例求解 /	91
4.3.2	有效验证 /	102
4.4	本章小结 /	104
5	软件系统可靠性预测 /	106
5.1	问题描述 /	106
5.1.1	背景分析 /	107
5.1.2	失效机理 /	109
5.1.3	可靠概念 /	110
5.2	技术框架 /	111
5.2.1	指标选择 /	111
5.2.2	预测流程 /	112
5.2.3	算法设计 /	115
5.2.4	建立模型 /	121
5.3	应用分析 /	125
5.3.1	预测结果 /	127
5.3.2	性能分析 /	129
5.4	本章小结 /	131
6	发动机系统剩余寿命预测 /	132
6.1	问题分析 /	132
6.1.1	背景介绍 /	134
6.1.2	系统框架 /	134
6.2	方法体系 /	137
6.2.1	预测方法 /	137
6.2.2	构建模型 /	139

6.3 应用分析 / 144

6.3.1 数据融合 / 145

6.3.2 融合预测 / 149

6.3.3 验证讨论 / 150

6.4 本章小结 / 153

7 结语 / 154

7.1 主要工作 / 154

7.2 创新之处 / 156

7.3 后续研究 / 157

参考文献 / 158

1 引言

航天技术的不断突破,推动了人类载人航天工程的快速发展。在航天事业取得骄人成绩的同时,航天安全问题也逐渐凸现出来。航天器^[40]作为人类进行太空探索、开发太空资源的主要工具,它的安全对航天器事业的快速发展和科研人员的安全具有重要的意义。随着航天任务的时空要求不断增加,航天器工作的环境更加复杂,对航天器安全也提出了更高的要求。航天器推进系统^[6,17,35]作为航天器的安全关键系统,通过其电子系统^[26,41]、软件系统^[20]和发动机系统^[29,32]三个子系统的协同合作不断为航天器提供动力和支撑^[42],其系统安全对航天器任务的完成以及人员的安全具有重要的意义。由于其三个子系统在航天器中的特殊功能,推进系统一旦出现异常或故障,将造成极其严重的危害和损失,加上其恶劣且充满不确定因素的工作环境,增加了发生异常和故障的可能性,因此对航天器推进系统的健康管理尤为迫切。本书基于航天器集成健康管理的理论框架,从电子系统效能^[24,27,33]、软件系统可靠性^[25,44]和发动机系统剩余寿命的角度对航天器推进系统这一安全关键系统进行研究,以探寻能有效解决航天器安全问题的健康管理方法,实现航天器的可持续健康工作,规避任务失败风险,减少过度维修造成的时间和资金的投入增加,保障航天器顺利达成其航天任务。

1.1 研究背景

科技进步使人类社会生产生活水平得到大幅度提高的同时还造成一系列譬如环境污染、资源匮乏等需要人类共同面对的难题。人类也已经意识到地球自身的资源远远无法满足日益增加的生产、生活所需。正是在此需求下,人类利用科技进步的成果,积极推进载人航天工程,将未来的发展方向着眼于太空,使得人类的航天梦想变成现实。一些国家和地区已积极开展载人航天活动,将探索的脚步迈向太空。空间高科技是当代发展最快的尖端技术之一,已成为衡量一个国家综合实力的重要标志。

不同国家和地区根据自身的实力均在航天工程领域各个方面取得骄人的成绩,因此对空间资源的开发和探索逐渐由近地观测向远太空扩展。2013年我国成功发射“神舟十号”飞船,在轨运行15天后顺利返回地球^[38],圆满完成成为“天宫一号”在轨运行提供人员和物资的地空往返运输服务的任务,巩固了交会对接技术,对飞行时间、航天员的工作程序等进行调整,为我国建立太空空间站打下基础。此外,我国于2016年发射“天宫二号”太空实验室^[39],并在其发射后选择时机发射“神舟十一号”飞船,完成飞船与太空实验室的二次对接,再次推进我国航天技术的飞跃,从而实现在2020年建成载人太空空间站的计划^[34,36,38,39]。而美国于2011年宣布将工作30年的航天器工程退役的同时开始实施新一代载人航天器计划来完成更具挑战性的空间探索活动。俄罗斯及日本等也都积极开展航天探测活动,力图取得太空资源开发探索的突破,其中俄罗斯还在探讨合作建造核动力飞船^[99,176]。不言而喻,航天器成为载人航天活动得以开展的基本依托^[40,45]。勘察、挖掘及使用太空资源都与航天器有着千丝万缕的联系。同时,航天器的整体安全和成本控制也因航天工程使命的逐渐

多样化、更富挑战性和不确定性而提出更高的要求^[14]：一方面要规避航天飞行的风险，提高完成任务和使命的安全指数；另一方面要保证运行维修的质量以及控制成本。

就运行中的航天器而言，其面临的工作环境极其复杂，故障后维修几乎不可能，加之其任务周期和挑战性不断增加，都加剧了航天任务失败的风险^[185]。航天器必须依靠高度可靠的部件和维修技术，以提供必要的安全保障，避免任务失败。因此，一种包括了数据获取、安全预评和决策支持及相关技术手段的集成系统健康管理（Integrated System Health Management, ISHM）^[106,122]开始出现，以满足航天器系统安全和维护需求。NASA给出集成系统健康管理的概念：在全寿命周期内对系统的故障进行预防或将故障影响降低到最低的过程、方法和技术^[188]，其目的是解决在生产和运行全过程中的安全隐患。相较于传统维护管理，集成系统健康管理的优势在于其将按预定时间进行的“计划维修”（Time based Maintenance, TBM）^[88]演进为全过程实时监测，即一旦系统发生偏差，立即进行相应的管理措施，在故障发生之前便通过有效措施进行处理，即“视情维修”（Condition based Maintenance, CBM）^[129]。

由众多部件和子系统构成的航天器是一个非常复杂的综合系统，其中每一个子系统和部件都具有独特的功能和性质，一旦其中一个子系统和部件出现异常或故障，将会引起整体系统功能的故障^[3]。作为有机整体的一部分的各子系统之间存在故障传播的可能，若一个子系统出现故障，很可能导致其他子系统的异常，进而对决策者的判断造成干扰，甚至出现错误判断的情况。故障特征与故障类型之间并不一定是一一对应的映射关系，且由于航天任务的特殊性和挑战性，所以要明确航天器安全关键系统，并且进行实时监测和管理，通过对海量数据的过滤来提取最能反映故障特征的信息^[23]。

在航天器推进系统中，电子系统、软件系统及发动机系统在保障航天

器正常运行过程中起到关键的作用。具体来讲,电子系统涵盖了航天器当中所有的电子设备^[199],实现了航天器包括通信、导航、飞行控制、数据处理和飞行器管理在内的基本功^[68],因而电子系统的健康状态与航天器的飞行安全以及航天任务的成功都有着直接的关联。无论是飞往空间站、月球、火星甚至更遥远深空的航天器,都需要高可靠性的元器件集成以及对电子系统的有效健康管理计划^[54,64,229]。软件系统是由众多命令程序和子系统构成的复杂系统,其可靠性不仅受到设计生产阶段的因素影响,还受到其复杂运行环境的影响^[123]。软件系统高度的结构复杂性和不确定的运行环境在故障因子和故障机理方面充分体现出来。高度复杂的系统特征使得软件可靠性的研究需要多种学科知识的支撑,对于集成手段的要求也较高^[170,184]。作为航天器的核心,发动机系统的状态直接影响航天器的安全性、可靠性和操作性^[223]。发动机故障预测与健康管理可以提供故障预警并估计剩余使用寿命。然而,发动机系统因为无形的和不确定的因素而具有高度复杂性,以至于难以模拟其复杂的降解过程,而且没有单一的可以有效解决这一关键和复杂问题的预测方法^[57]。

综上所述,在航天器推进系统中,电子系统、软件系统和发动机系统分别以不同形式发挥着至关重要的作用,其系统的健康和安全性是航天器任务的实现和航天器系统安全的基本保障。本书将针对推进系统这一航天器的安全关键系统,根据电子系统、软件系统和发动机系统的结构特征和故障机理,分别从效能、可靠性和剩余寿命几个角度进行系统健康管理研究。目前,众多学者和专家已经做出了大量的关于航天器系统健康管理的研究,但是关于航天器推进系统健康管理的工作还有以下问题。

第一,缺乏航天器安全关键系统的综合考虑。事实上,航天器安全关键系统是从航天器众多部件和子系统中按照其功能实现的特殊性和失效危害的严重性过滤出来的。航天器由于其任务使命的艰巨性、运行环境的严酷性及维修操作的不可能性,加之其一旦发生故障甚至失效所造成的任务

失败和人员伤亡的损失极为惨重,因此航天器的安全性和可靠性是进行空间资源探索、开发和利用的基本前提。航天器是由众多部件和子系统构成的复杂系统,其结构的复杂性导致在进行系统健康管理时不可能对所有的部件和子系统进行状态监测、寿命预测和故障诊断,因为如此操作是非常耗时且低效的,也是航天任务所不允许的。因此,需要明确航天器安全关键系统的特征,并根据其具体特点采取相应的集成系统健康管理。就航天器推进系统而言,电子系统、软件系统和发动机系统分别以不同形式发挥着其独特的关键功能。电子系统涵盖了航天器中所有的电子设备,实现了航天器包括通信、导航、飞行控制、数据处理和飞行器管理在内的基本功能。软件系统是由众多命令程序和子系统构成的复杂系统,其可靠性除了受到设计生产阶段的因素影响外,还受到其复杂运行环境的影响。发动机系统是航天器的“心脏”,其健康状态直接影响航天器的安全性、可靠性和操作性。目前,已经有大量的研究关注推进系统的这三个子系统。Kayton^[139]对载人航天器的电子系统进行了系统分析及功能定位。Celaya^[77]对电子系统进行故障诊断研究。Xu等^[227-229]采用基于信息融合的方法对推进系统电子系统进行健康状态评估。Wang^[218]从设计和测试的角度对航天飞行器软件进行研究。Wang等^[223]提出一种基于支持向量机(SVM)方法的发动机的诊断和预测研究。Leveso^[150]就软件的功能角色进行定位分析。戎翔^[30]对发动机的剩余寿命和维修决策进行研究。但是大部分研究都是着眼于单一的安全关键系统,同时关注多个安全关键系统的研究较少。事实上,一方面,航天器推进系统中的电子系统、软件系统和发动机系统既作为独立的系统存在,有完整的系统结构和要素;另一方面,各个系统之间又是相互影响、相互支撑、互为依托的关系。因此,要把相互之间的联系作为背景条件,再对某一个系统进行研究。

第二,尚无针对航天器推进系统进行的集成系统健康管理问题研究。基于集成系统健康管理方法的航天器安全关键系统研究和传统的健康管理

及安全关键系统管理有较大差别。一方面,传统的健康管理通常是针对较简单或者一般复杂的系统进行的维修、养护,而现实情况中,尤其是航天器推进系统,所面临的运行环境和系统结构都是极为复杂的,因此对健康管理的要求也是非常高的。通常需要在对系统进行模块化分级的前提下,对其采取包括健康状态监测、安全评估与诊断、决策支持等系列管理活动。另一方面,传统的健康管理的对象为生产或生活较常见的各类系统,而航天器推进系统是具有高度复杂性、任务艰巨性、成本高昂等特性的特殊系统。目前已经有一些文献^[4,7,9,12,13,21]对飞行器等进行系统健康管理讨论,尽管这些文献推动了系统健康管理理论的进步和完善,但是这些文献主要着眼于飞行器中的某一部分或整体系统的研究,尚无关于航天器推进系统这类安全关键系统的健康管理研究。

第三,未曾考虑基于集成系统健康管理的航天器推进系统的子系统级问题研究。航天器推进系统的结构复杂程度较高,系统与子系统级的关系梳理难度较大,因而目前对其子系统的研究较少。但是,子系统级问题的研究又是十分必要的。在推进集成系统健康管理的过程中,一般通过一系列科学方法对推进系统中可能出现的故障或异常的部件进行管理,以便了解其健康状态,一旦出现偏差,能够实现精准定位,采取相应对策。应该投入更多的时间对推进系统的电子系统、软件系统和发动机系统进行研究,特别是对子系统级安全问题的关注。部分研究^[15,43]讨论了电子系统故障预测与健康管理技术现状与发展情况,也有一些研究^[1,10,11,22]分别从可靠性度量和视情维修决策角度对软件系统和发动机系统进行探讨。尽管这些文献丰富和发展了航天工程的理论,并成功运用于航天项目的飞行任务中,但是目前尚无关于航天器推进系统子系统级健康管理的研究。

基于上述分析,本书将针对航天器推进系统的电子系统、软件系统、发动机系统三个子系统,结合其基本特征,运用综合系统健康管理的方法从电子系统效能评估、软件系统可靠性评估和发动机系统剩余寿命预测的

角度进行深入的理论研究、模型构建、算法设计和应用分析,丰富和完善航天器安全关键系统的集成健康管理理论,为航天探索活动的推进提供支持。

1.2 研究现状

对推进系统集成健康管理的已有文献进行梳理归纳,分析研究的热点和趋势,介绍它们的研究现状。本书运用 NodeXL^[207] (Network Overview Discovery Exploration for Excel) 的网络化可视分析的功能,对文献对象进行分析。运用 NodeXL 的网络分析方法,将推进系统集成健康管理相关文献中的关键词与发表年份进行对应联结形成二维或多维阵列,进而发现研究热点和趋势,如图 1.1 至图 1.3 所示,其研究热点聚焦于效能、可靠性和剩余寿命三个角度。

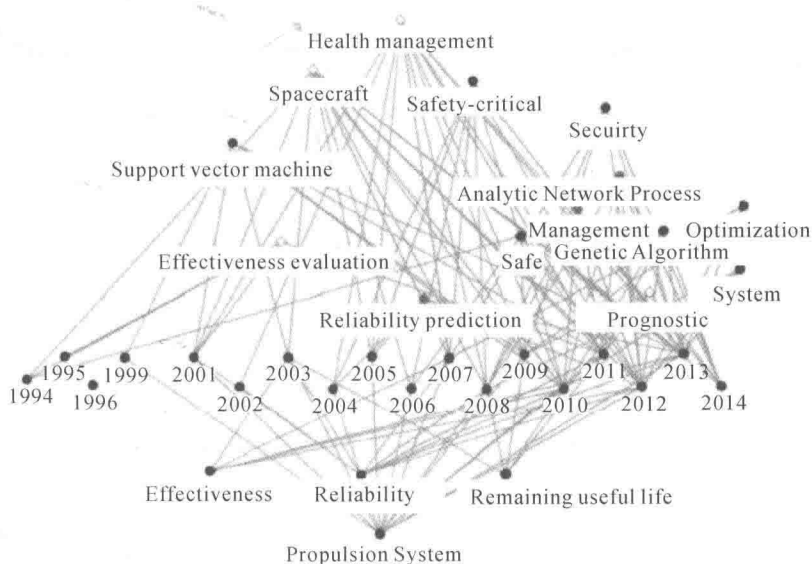


图 1.1 研究热点趋势示例