

DOI: 10.13382/j.jemi.2014.03.001

健康管理技术综述及卫星应用设想*

于功敬¹ 熊毅^{1,2} 房红征^{1,2}

(1. 北京航天测控技术有限公司 北京 100041;

2. 北京市高速交通工具智能诊断与健康重点实验室 北京 100041)

摘要: 健康管理技术是一项预先诊断系统完成其设计功能的状态,确定其剩余寿命或故障发生,并综合可用资源和使用需求,做出系统健康状态判断和维修活动决策的技术。综述了健康管理技术的发展及其关键技术,在当前国内外卫星PHM技术、应用现状的基础上,提出了一种基于星载总线的空地一体化的开放式卫星PHM系统,并阐述了系统的总体架构及功能模型。最后对健康管理技术的发展途径提出了一些应用思路和看法。

关键词: 卫星; 故障预测; 健康管理; 应用

中图分类号: TP277; TN406 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.6099

Survey of prognostics and health management technology and application idea for satellite

Yu Gongjing¹ Xiong Yi^{1,2} Fang Hongzheng^{1,2}

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Corp., Beijing 100041, China;

2. Beijing Key Laboratory of High-Speed Transport Intelligent Diagnostics and Health Management, Beijing 100041, China)

Abstract: PHM is a technology which can previously diagnose the state of system design, determine the remaining life or faults occurs, and make judgments and maintenance decisions for system health by integrating available resources and applicable requirements. This paper summarizes the advances and its key techniques of health management technology. Based on the situation of current domestic and international PHM technology application of satellite, it proposes an open integrated air-ground PHM system based on on-board bus for space satellite, then elaborates the overall system architecture and function model. Finally, we put forward some application ideas and opinions for the development of PHM technology.

Keywords: satellite; prognostics and; health management; application

1 引言

人们设计制造装备产品,都希望其坚固耐用,甚至是“永久”可靠。由于设计者的设计思想和能力水平、设计工具、制造工艺、材料、使用方法、环境条件等诸多因素的影响,设计制造出的装备是有“寿命”制约的,且必然有一定的故障概率发生。如何把诸多因素的影响测量出来?如何把故障及时有效地诊断出来?如何把真实的寿命和可用程度预测出来?已经成为一门综合学科,得到了来自决策者、使用

者、设计者、生产者和科研机构研究者的青睐。

装备是一个复杂的,充满着矛盾的统一体,这种矛盾的统一性使其互相依存、融合、联系。如设计是为了满足制造和使用,使用离不开设计的测试性、可靠性和维修性。需求牵引,技术推动,就体现了这种统一性。而矛盾的斗争性使其对立和排斥。这种矛盾的统一性和斗争性贯穿于装备发展的始终^[1-4]。

功能要求的复杂和性能的精准,决定了装备的复杂性;而复杂性与可靠性、维护性是相互矛盾斗

收稿日期: 2013-12 Received Date: 2013-12

* 基金项目: 国防基础科研、装备重点基金资助项目

争的,在可测试可度量的基础上,两方面又统一到一起。

基于复杂系统可用性、可测性、可靠性、安全性、维修性和经济性的多维度考虑,谋求解决装备发展中出现的矛盾,故障预测和健康管理(prognostics and health management, PHM)技术已经发展成为装备全寿命周期内重要的基础和应用学科。故障预测和健康管理技术是一项预先诊断系统完成其设计功能的状态,确定其剩余寿命或故障发生,并综合可用资源和使用需求,作出系统健康状态判断和维修活动决策的技术。

在调研国内外技术、应用现状基础上,参考、借鉴其中成果与经验,提出一种符合我国应用需要的,可实现装备健康状态评估、高置信度性能(寿命)预测以及健康管理措施建议生成与实施的方法体系。该体系在原有的监测数据基础上,引入健康感知手段获取更多健康指标,利用健康状态评估方法,判断当前是否可用。同时,由性能衰减机理出发建立其性能、寿命预测方法,实现未来性能、寿命预测,为航天器使用、管理人员提早制定管理措施和保障手段提供依据,有效避免异常状态与系统失效的发生。

2 PHM 技术发展的关键

我们知道,现代医学的发展经历了一个曲折的发展过程,从远古时期的巫师占卜术,一点点积累病症的特征现象,并逐渐分成两支:由神农氏尝百草发展成东方的以望闻听切为诊断手段,以中草药为治疗手段的中医学;由动物实验和尸体解剖发展成的,以人体结构分类医学(即西医)。期间既有回天乏术的无奈,也有类似青霉素发现的惊喜;既有中世纪黑死病的肆虐,必然也有牛痘的偶然发现;既有如癌症、非典型性肺炎这样的待攻克的难题,也有如 CT、B 超这样的诊断手段和基因治疗手段。

同医学的发展类似,PHM 技术的发展不是一蹴而就的,是人类认识、发现和利用自然规律过程的典型反映,经历了从故障和异常事件的被动反应,到完善测试手段进行主动诊断,再到事前的智能预测和综合规划管理。通过故障树的建立和积累,不断充实和完善知识,丰富和试验各种方法的有效性,建立起不断发展的 PHM 技术学科。PHM 系统一般应具备如下功能:故障检测、故障诊断和隔离、剩余寿命及故障预测和健康管理。PHM 技

术可以实现提高系统的可靠性、安全性、可维护性、保障性和安全性的目的。PHM 系统的监测功能和故障预测功能,能够实时诊断故障,预测并提前告警故障发生,在不影响系统固有可靠性的基础上,能够延长使用寿命,减少故障灾难的发生。PHM 的有机组成之一是视情维修(CBM),根据系统健康情况,确定维修活动,能够减少不必要的维修活动,提高维护效率,降低维护成本。

PHM 具有这样的优势,是不是所有的系统都需要 PHM 系统呢?需要什么样的 PHM 系统?怎样设计 PHM 系统?回答这些问题,是 PHM 系统和技术发展所必须面对的关键问题。

2.1 PHM 的必要性

PHM 可以降低维护成本,提高系统的设计特性,优化维修决策机制,并为产品设计和验证的优化提供数据支撑和建议决策。PHM 这么好,是不是可以不加选择地用 PHM 呢?回答当然是——不。

想象一下:一部千元的手机,根本不需要耗费数万元成本的 PHM 系统,体积和经济性的因素作出了这个决定。一部低成本经济型且非常可靠的家用车,在 PHM 技术尚不成熟的情况下,根本不可能上昂贵的 PHM 系统。首先对系统和 PHM 的经济性分析,包括成本要素、投资回报率、体积、重量、时间、维修方式等进行分析,其次从 PHM 预测方法的成熟度、鲁棒性和可行性进行分析,最后从产品的不同使用剖面进行分析,来最终决定是否需要 PHM 系统。只有本身十分稀有、昂贵的体积庞大的复杂系统,才会优先选择 PHM 系统。

2.2 PHM 的选择

前面讲过,PHM 系统一般应具备故障检测、故障诊断和隔离、剩余寿命及故障预测和健康管理功能。故障检测、诊断功能是 PHM 系统的基本功能,预测和健康管理功能可根据系统、任务执行的差别,进行差异化设计。

健康管理系统作用的对象是诸如飞行器这样的复杂大系统,包括从发生故障到恢复正常的一系列活动——诊断和预测,故障处理和预处理,维修和维护,验证和再评估^[5-11]。

- 诊断和预测:诊断是发现故障和异常,并准确度量;预测是确定故障和异常将要发生。

- 故障处理和预处理:建立在对故障影响评估

的基础上,对产品健康状态的实施诸如结构重组/重构以及任务再计划等故障处理和预处理的内容,最大可能保证平台和任务的有效性。

- 维修和维护: 更换或者是将故障部分恢复或维持到正常状态。

- 验证和再评估: 确认产品保持在正常状态或修理解决了故障问题,且没有遗留潜在的副作用。

PHM 的分类一般有 3 种: 按照产品特性或感知特性的主要学科分类,按照 PHM 诊断预测方法分类,按照 PHM 设计方法进行分类(内外)。

产品特性的主要学科包括: 机械、电子、光学、电磁、流体、热和原子物理。根据产品装备的实际状态,主要分机电型、电子型、电气型 PHM。一般整机装备的 PHM 都属机电型 PHM。典型产品如飞机、雷达等。分机 PHM 系统主要包括电子和电气型,如控制器、处理器等电子线路需装备电子型 PHM,电池、电源供配电系统需装备电气型 PHM 系统。

关于 PHM 诊断预测方法的分类,主要分基于模型(model-driven)的 PHM 技术和基于数据驱动(data-driven)的 PHM 技术。基于模型的 PHM 技术又分为基于正向过程的功能结构行为模型的 PHM 技术和基于逆向过程的失效物理模型 PHM 技术。基于模型的 PHM 技术一般要求对象系统的数学模型是已知或可建立的,通过正向的功能结构行为推理或逆向的失效物理推理,找出故障和异常,评估关键零部件的损耗程度,来进行剩余寿命和故障预测。该方法立足于模型和机理,预测精度高,但通常难以针对复杂动态系统建立精确的数学模型,其实际应用和效果受到了限制。基于测试或者传感器数据进行预测的方法称为数据驱动的 PHM 技术,又分为基于

统计可靠性的预测技术和基于机器学习的预测方法技术。典型的基于数据驱动的故障预测方法有: 人工神经网络、模糊系统和其他计算智能方法^[15]。

按照 PHM 设计方法进行分类,一般分整合型、附加型和综合型 PHM。整合型 PHM 与产品同步设计,高度融合,是未来 PHM 发展的主要形式;附加型 PHM 一般针对产品的监控需求和预测功能需求,通过在定型产品上另外布设传感装置和信息处理器,以及地面的信息处理中心,来实现 PHM 功能;综合型 PHM 则兼容两种实现方式,突出特点是综合信息处理资源,采用机上、机下综合诊断的方法,综合测试性信息、自动和人工测试信息、维修辅助手段信息、技术信息、人员和培训信息等所有信息要素,来完成产品 PHM 的方法。这种方法可以采用计算资源虚拟化的云计算的方式^[4],来实现最小成本和最准确且快捷的预测功能。

2.3 PHM 的设计

设计功能性能优异的 PHM 系统,首先要建立产品的故障树,对产品的故障进行追踪研究,并对故障现象、模式机理进行分析,开展初步的测试方法分析研究,形成分析报告。同时,结合状态综合分析、健康预测与健康状态管理方法研究需求,分析数据来源与数据接口,包括产品的实时运行数据,特别是故障数据;产品的地面测试数据及实时运行数据(含故障数据),典型单机的可靠性实验数据(环境实验数据、极限能力实验数据)等,为方法研究、系统研制与试验验证分别提供方法设计与验证数据、系统接口设计要求与验证数据。技术途径如图 1 所示。

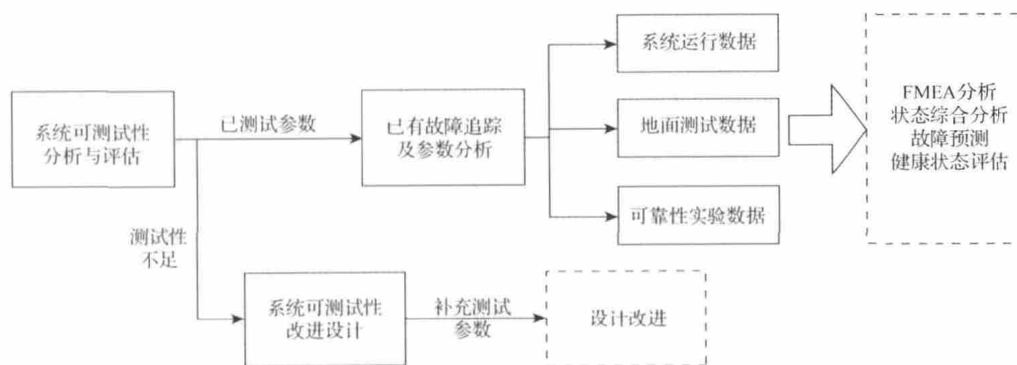


图 1 PHM 系统设计实施途径

Fig. 1 Implementation way of PHM system design

下文就卫星系统的 PHM 设计给出具体的案例说明。

3 卫星 PHM 系统设计案例

根据卫星的特点,以及型号工程组织的必然特点,采用与卫星设计同步进行的基于模型的整合型 PHM 设计,显然是不现实的。本文所构建的基于星载总线的天地一体化 PHM 系统(spacecraft prognostics and health management, S-PHM),采用基于数据驱动的综合型 PHM 设计实现,从整体上分为星、地两级,见图 2 所示。S-PHM 系统星上部分不改动星上系统结构,采取主从结构,充分利用星上资源,在数管分系统中利用原处理器资源

或增加 PHM 控制器(硬件方式或 CTU 软件方式),适当修改优化原数据管理协议,来实现 PHM 功能。PHM 控制器负责整星所有部件健康信息的收集,并且有一定的智能诊断功能,可以综合利用多部件的健康信息判断整星的健康状态;PHM 系统地面部分主要用于复杂故障的诊断及卫星预测,其中地面 PHM 开发平台提供了专家知识、模型的编辑与定制,实现了 S-PHM 系统的开放性。星上 PHM 控制器将部件健康信息通过遥测或数传通道下传至地面系统,地面系统以机群服务器或云计算方式,对下传的海量数据运用各种预测方法进行预测,并向地面监控人员提供健康预警信息。

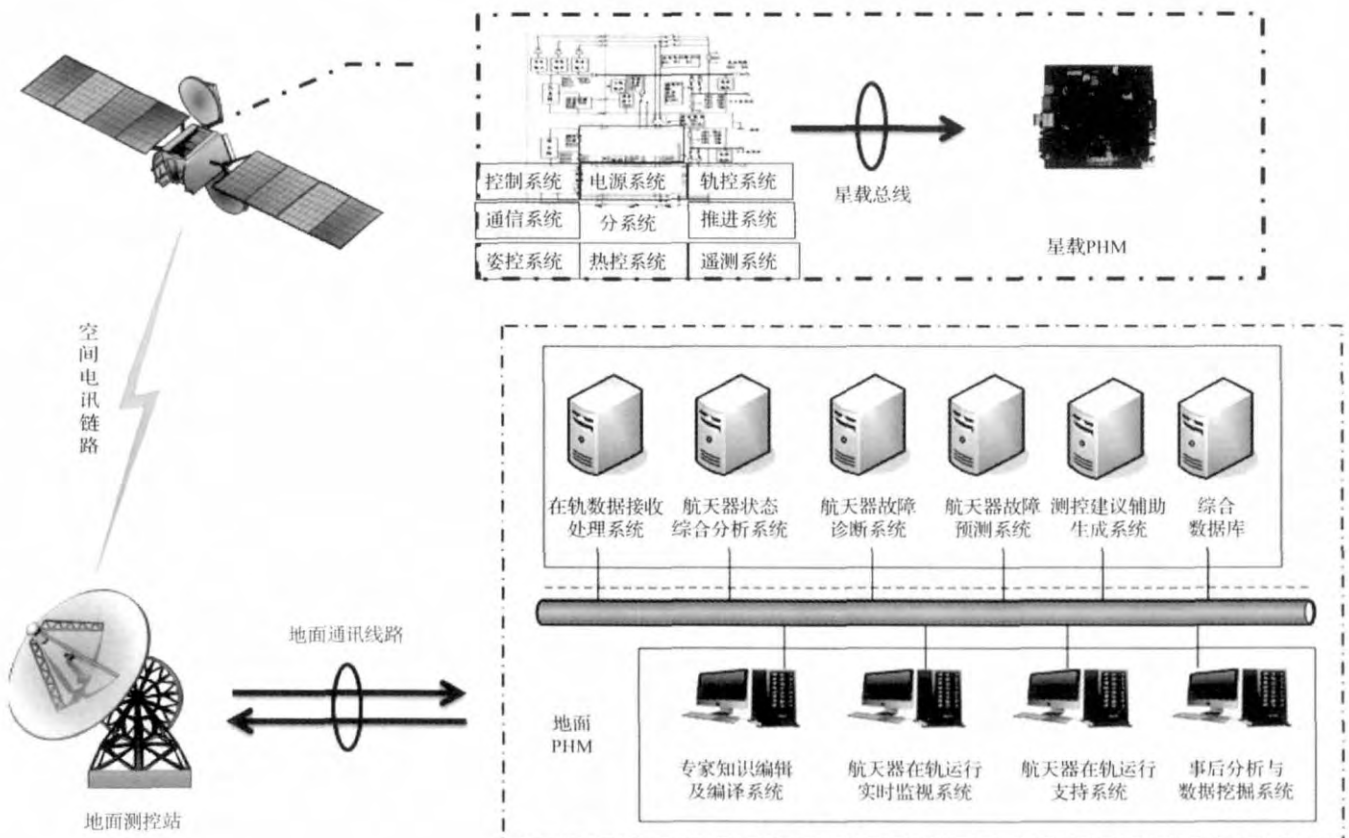


图 2 卫星 PHM 系统总体框架

Fig. 2 Overall structure of PHM system for satellite

在星上,主要功能是感知星上各分系统重要部件的健康状态,将故障隔离到可重组或可重启的单元,定位星上各部件重大故障;在地面,主要功能包括全系统的健康状态实时监视、故障诊断、健康预测、健康管理和测控管理决策;综合知识库为卫星

健康管理提供姿轨控、电源、热控等分系统的相关知识和模型。测控人员可以根据健康管理相关结果以及测控管理建议,开展卫星控制和管理活动,例如调整卫星轨道和姿态、切换主备机系统、重组相应功能单元等,以此保障卫星安全运行。

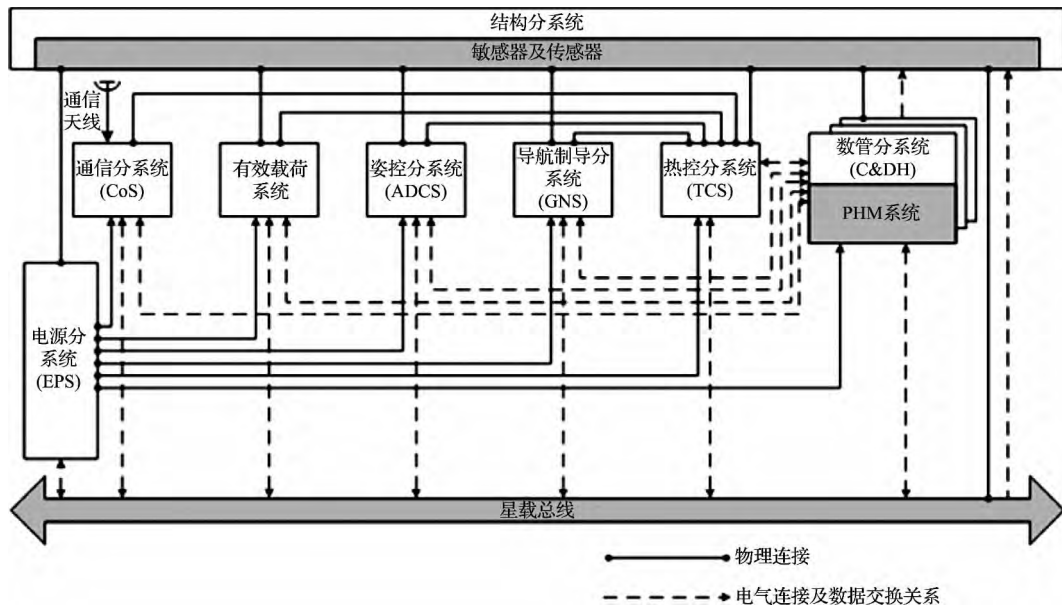


图 3 星上 PHM 与各分系统连接

Fig. 3 Interface between PHM system and other systems onboard for satellite

4 结论及发展思路

故障预测及健康管理技术是目前方兴未艾、热度很高的技术学科。如何脚踏实地，去除一蹴而就的浮躁心态，开展 PHM 数据的积累，各种方法的仿真实验，是当前 PHM 技术研究的关键。耐得住寂寞，科学的春天一定会到来。

前面讲过并不是每型装备都需要 PHM，也不是每一型 PHM 都能够获得成功。PHM 技术如何发展，作者试图从自己的理解给出一些思路和建议：

• 先学后用

故障诊断本身就是一门发展中的学科，在其基础上发展起来的 PHM 更是一门新兴学科，在目前各方面积累不足的情况下，PHM 技术应着重先学后用，立足于测试数据的积累、故障模式的积累、诊断知识的积累，在学习并掌握这些知识的基础上，才能进一步学以致用，进行预测方法的大胆研究和应用。否则，PHM 系统只具有宣传上意义，同实际应用差之千里。

• 先听后说

先听后说，也是要立足于基础，立足于产品数据的采集和监测，在积累足够的数据、模型、知识和方法的基础上，循序进行仿真和实验，用结果数据来“说”出你的成果。

• 先机后电

由于发展的基础不同，机电型 PHM 明显具有优于电子型 PHM 的基础，机理、模型、数据等各个方面都有基础，在库中发现适合产品的 PHM 方法，显然比故障机理、演变规律不清的系统具备优势。因此建议先机后电，逐步推进。

• 先数据后模型

系统的复杂性，决定了模型的复杂性，模型的精准性，决定了 PHM 目标实现的难易程度。在人类认识和发现自然规律尚有不足的情况下，目前很难对复杂大系统建立精准的数学模型，即使建立了模型，如何构建快速收敛的方法，也是一座横亘在面前的大山。基于数据的预测方法则不同，目前已经取得很多成果，无疑是供 PHM 设计实施的一条捷径。

参考文献

[1] 孙清宇. 运用矛盾论原理科学谋划武器装备发展[J]. 国防科技, 2007.
SUN Q Y. Planning in science for the development of armaments using contradiction theory [J]. National Defense Science & Technology, 2007.

[2] 胡绍林, 陈如山, 黄刘生. 航天故障检测、诊断与容错处理技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(9): 1360-1364.
HU SH L, CHEN R SH, HUANG L SH, et al. Re-

- search on FDD and fault-tolerant processing for aerospace system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(9): 1360-1364.
- [3] 姚骏, 崔伟, 满孝颖, 等. 新型卫星结构设计技术 [J]. *中国空间科学技术*, 2010(6): 74-79, 87.
YAO J, CUI W, MAN X Y. New satellite structure design technology [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2010(6): 74-79, 87.
- [4] FANG H ZH, XIONG Y, LUO K, et al. Study of the long-term performance prediction methods using the spacecraft telemetry data [C]. 2012 Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM 2012), 2012.
- [5] 李爱军, 章卫国, 谭键. 飞行器健康管理技术综述 [J]. *电光与控制*, 2007, 14(3): 79-83.
LI A J, ZHANG W G, TAN J. Survey on aircraft health management technology [J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(3): 79-83.
- [6] KELLER K, WIN B, OFSTHUN A, et al. Health management engineering environment and open integration platform [C]. IEEE Aerospace Conference 2007.
- [7] SAIT A S, SHARAF-ELDEEN Y I. A review of gearbox condition monitoring based on vibration analysis techniques diagnostics and prognostics [J]. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 8, 2011.
- [8] 陈怀艳, 王宝龙, 郝莉娜. 航天测控系统测试资源优化配置策略 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(4): 281-288.
CHEN H Y, WANG B L, HAO L N. Optimized configuration strategy of test resources for aerospace test and control system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(4): 281-288.
- [9] 李舜酩, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 35(8): 1907-1915.
LI SH M, GUO H D, LI D R, et al. Review of vibration signal processing methods [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 35(8): 1907-1915.
- [10] 郭鑫, 张继勇, 李金杰. 基于 LabVIEW 的风力发电机组远程在线监控系统研究 [J]. *电子测量技术*, 2012, 35(10): 110-114.
GUO X, ZHANG J Y, LI J J. Wind power generator based on LabVIEW remote online monitoring system [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2012, 35(10): 110-114.
- [11] 陈鹏, 韩德来, 蔡富强, 等. 电磁超声检测技术的研究进展 [J]. *国外电子测量技术*, 2012, 31(11): 18-25.
CHEN P, HAN D L, CAI F Q, et al. Research progress in electromagnetic acoustic testing [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2012(10): 18-25.
- [12] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(1): 9-17.
PENG Y, LIU D T, PENG X Y. A review: prognostics and health management [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(1): 9-17.
- [13] 于功敬. 产品综合诊断云展望 [C]. 第二十届全国测试与故障诊断技术研讨会论文集, 2011.
YU G J. Outlook on integrated diagnose cloud for products [C]. 21th Measurement and Diagnostic Conference, 2011.
- [14] 闫谦时. 航天器专家故障知识模型的建立和应用 [J]. *飞行器测控学报*, 2009(4): 44-47.
YAN Q SH. Establishment of expert knowledge models for spacecraft faults and its application [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2009(4): 44-47.
- [15] 解仑. 基于混合智能的航天器故障诊断系统 [J]. *信息与控制*, 2011(1): 106-113.
XIE L. Spacecraft fault diagnosis system based on the hybrid intelligence [J]. *Information and Control*, 2011(1): 106-113.

作者简介

于功敬, 1966 年出生, 北京航天测控技术有限公司副总经理, 研究员。目前主要研究方向为通用测试与故障诊断技术。

E-mail: yugongjing@vip.sina.com

Yu Gongjing was born in 1966, and now he is vice president, professor in Beijing Aerospace Measurement & Control Corporation now. His present research interests include general test and fault diagnosis technology and so on.