

复杂可修装备维修策略优化研究综述

徐宗昌, 郭建, 张文俊, 申莹

(陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系, 北京 100072)

摘要: 高新技术的应用使武器装备系统日趋复杂, 武器装备系统的故障规律也是越来越复杂, 装备维修是保持武器装备作战效能的重要工作, 制定科学合理的维修策略是完成装备维修工作的前期; 针对复杂可修装备维修策略制定问题, 分析和总结了国内外维修策略的发展现状, 总结了装备维修问题研究的分类, 重点从维修阈值、检测间隔期和决策目标优化 3 个方面对维修决策近年来的研究成果进行了综述, 并结合已有的研究基础, 对维修策略优化的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 维修策略; 维修阈值; 检测间隔期; 决策目标

An Overview of Complex Repairable Equipment Maintenance Decision Optimization Research

Xu Zongchang, Guo Jian, Zhang Wenjun, Shen Ying

(Equipment Support and Remanufacturing Department, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: The application of high and new technology complicates the weapon equipment system, the fault rule of weapon equipment system is also increasingly complicated, equipment maintenance is an important task to maintain the combat effectiveness of weapon equipment, and the establishment of scientific and reasonable maintenance strategy is the early stage of equipment maintenance. In view of complex repairable equipment maintenance strategy, analyzes and summarizes the current development of maintenance strategy at home and abroad, the classification of research on equipment maintenance is summarized, focus from threshold and inspection intervals and maintenance decision objective optimization, the research achievements were reviewed in recent years, and connecting with the basis of existing research, the trend of future development of maintenance strategy optimization is discussed.

Keywords: maintenance strategy; maintenance threshold; inspection interval; decision objective

0 引言

装备维修保障是保持装备完好性, 形成战斗力不可缺少的重要一环。能否制定合理的维修策略, 直接影响装备的效能。随着监测技术和信号处理技术的不断发展, 获取装备健康状态技术逐渐提高, 加之对复杂装备和重要装备可靠性、安全性和经济性的要求不断提高。视情维修 (condition-based maintenance, CBM)、以可靠性为中心的维修 (reliability centered maintenance, RCM) 等更加高级的维修形式已经逐渐成为可能, 其在装备维修领域的成功应用发挥了重要的作用。根据近年来数据统计显示, 部分装备的维修费用已超过装备研制费和采购费的总和, 美军近 40 年的装备维修费用高达国防费用的 14.2%, 通过制定合理维修策略, 不仅提高了装备的可靠性, 减少意外停机时间, 而且大大的减少了维修所需要的费用, 节省不必要的经费开支, 提高装备的利用率^[1-2]。

1 装备维修分类及国内外研究现状

根据装备维修方式的不同, 可将装备分为可修装备与不可修装备两类, 本文主要以可修装备作为研究对象。装备维修一直是多个行业关注的难题, 每年有数以百篇的学术论文在国内外发表, 文献 [3-7] 为近年国内外发表的内容较全面的装备维修综述文献, 对在装备维修取得的丰硕的研究成果总结的比较全面。根据研究内容的不同, 对装备维修的分类也是多种多样, 图 1 中归纳总结了较为常见的分类方法。

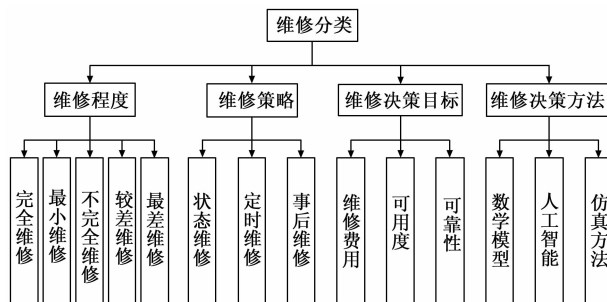


图 1 装备维修的分类方法

收稿日期:2018-05-09; 修回日期:2018-05-25。

基金项目:原总装备部装备预研基金项目(9140A27020115JB-35001)。

作者简介:徐宗昌(1941-),男,教授,主要从事装备保障特性与综合保障技术方向的研究。

依据维修程度的不同, 可以将维修分为完全维修、最小维修、不完全维修、较差维修与最差维修 5 种类型^[8]。完全维修是指装备在维修之后, 恢复到全新的状态; 最小维

修是指装备在维修后恢复到发生故障前的状态；不完全维修是指装备在维修后恢复到介于完全维修和最小维修之间的状态；较差维修是指装备在维修后恢复到比发生故障前略差的状态，但是其状态仍在可靠及安全的范围内；最差维修是指装备在维修后恢复到比发生故障前更差的状态，而且不可再安全运行。国外对维修程度及不完全维修的研究开始较早，并且随着研究的深入，在近二十年内，不完全维修在多种装备维修问题研究中得到了应用，并且对维修目标的优化起到了关键作用，国内在维修相关的研究中也涉及到维修程度，综述文献 [6] 与文献 [7] 中引用的文献有多篇涉及到此问题。在实际进行维修时，根据对装备的需要不同，并非每次维修都需要将设备恢复到全新的状态，其他的维修方式虽然不能将装备恢复如新，但是可以节省一定的维修费用、维修时间和维修人员等维修资源，文献 [9] 以装备长期运行平均维修费用最低作为维修决策目标，比较了采用不同维修程度的维修策略，并分别对不同的策略进行了优化，实例的对比结果显示，混合采用多种维修程度的维修策略，维修费用的最低的。由此可见，在维修资源充足的条件下，也并非采用“恢复如新”的维修策略都是最优的，也可能是介于“恢复如新”与“恢复如旧”之间的“恢复非新”的维修策略是最优的，所以研究不同的维修程度，对于优化维修策略是有意义的。

在装备维修的初期，事后维修一直作为主要的维修方式而存在，随着装备的日益复杂化，仅仅采用事后维修的方式很难满足需求，意外停机不仅带来了经济损失，有时甚至带来难以预料的灾难的事故，人们经过长期的探索研究发现，定期维修不仅能够有效的防止意外停机的发生，而且能够增加装备的使用寿命，带来一定的经济效益。监测技术的发展增强了人们获取装备状态的能力，视情维修^[10-13]作为预防性维修的高级形式，其成功应用改变了以往仅仅依靠以事件为主导的修复性维修和以时间为主导的定时维修的方式，使依据装备状态实施准确的维修活动成为可能。视情维修^[10-13]是在装备状态监测的基础上，对装备进行故障预测或健康评估并依据结果制定合理的维修决策来确定维修时机和安排维修项目，并主动实施的维修。维修决策是维修活动的最后阶段，也是安装多个传感器，监测装备状态的最终目的，结合不同的决策目标，可以最大化的减少装备维修的费用、增加装备可用度、提高装备的可靠性。

2 可修装备维修策略分析

在故障预测的基础上进行视情维修策略优化，就是在一定的优化目标下，考虑维修时间、维修费用等相关约束条件，以系统或部件健康状态为变量建立优化模型，并据此确定预防性维修对应的性能退化阈值。阈值对应预防性维修的临界状态点，当到达规定的维修时间点时，如果发现系统状态未达到临界点，可以考虑推迟维修；而对未达到规定维修时间，但状态超过临界点的情况，可以考虑提

前维修。在离线检测条件下，如果停机检测的费用较高，还可以根据获得的系统状态来动态的决策检测间隔期，对于处在较好状态的系统，可以适当延长下次停机检测的时间，对于临近故障阈值的系统，可以通过适当缩短下次检测时间来减少系统发生故障而导致意外停机的风险。根据需求的不同，可以制定不同的维修决策，常见的决策目标有平均维修费用最低、可用度最高、风险最低等，依据决策目标数量的不同，通常可以将维修决策优化研究分为单目标维修决策优化和多目标维修决策优化两种。下面将从维修阈值决策研究、维修检测间隔期和维修决策优化目标3个方面对近年的文献进行综述。

2.1 维修阈值决策分析

维修阈值决策是指确定装备的维修或更换阈值，在基于装备的健康状态预测制定相应的视情维修时，通常要对不断退化的状态参数设定相应的阈值来防止意外停机的发生，如果通过状态监控设备采集到的参数已经到达或邻近这一阈值，则需要进行相应的维修或更换。维修阈值是决定维修时机的重要变量，同时也是研究维修策略问题中不可避免的重要问题之一，如何通过有效的方法找到合理的维修阈值是解决这一问题的关键。对于不同类型的装备，在制定维修策略时，维修阈值可以设定为多种不同的变量，例如系统运行时间、装备系统退化程度、系统可靠性等。

近年来，国内外研究机构对于如何合理的选择维修阈值作了大量的研究。文献 [14] 研究了连续监测下的状态退化系统，同时考虑随机退化和使用时间对系统故障的影响，为了使系统具有最大可用度或最小的维修费用，计算得到了需要设定的维修阈值，并使用可靠性测试中的真实寿命数据对计算方法的有效性进行了验证。文献 [15] 将基于状态的机会维修策略应用到近海风力涡轮叶片维修中，导致叶片发生故障的主要原因是裂纹腐蚀和环境冲击，将裂纹的长度作为维修阈值，并以单位时间维修费用最少作为优化目标，对维修策略进行优化，得到了最优维修阈值。文献 [16] 在视情维修策略下同时考虑了系统退化和突发故障，并假设系统退化服从非均匀泊松过程和伽马过程，突发故障服从双重随机泊松过程，在固定的检测时间，通过检测系统退化状态是否超过设定阈值来决定采取的维修措施。

以上所列举的文献均是在视情维修的条件下，对不同的研究对象进行维修阈值的优化，通过寻找最优的维修阈值来制定最科学的维修策略。通过对比不难发现，虽然在众多相关文献中，研究对象和维修决策的目标多种多样，但是不同的研究均考虑了维修阈值的影响，由此可见，维修阈值在维修策略的优化中是一个相当重要的因素。

2.2 维修检测间隔期决策分析

制定维修策略中如何决策合适的检测间隔期是一个需要解决的难题，也是决定维修策略是否有效的关键。在维修策略研究中，维修检测间隔期是较难解决的问题，也是科学合理的解决维修策略问题的关键。在总结归纳了国内外近几年发表的相关文献后，本文将维修检测间隔期的研

究分为三类, 固定检测间隔期、多阶段检测间隔期和动态检测间隔期, 下面分别对三类不同方法说明。

固定检测间隔期是根据特定的维修决策目标, 例如平均周期费用最低、可用度最大等, 选择最优的检测间隔期, 在固定的检测时间点对状态进行检测, 根据检测结果与设定阈值的关系采取相应的维修措施。文献 [17] 研究了退化系统不完全维修模型优化, 通过优化状态监测间隔来减少监测需要的费用, 进而在保证系统故障风险的情况下, 减少维修需要的费用。文献 [18] 根据风险累积函数和平均故障时间估算了故障时间, 并制定了检测间隔期, 通过设定费用最小的目标对检测间隔期进行了优化, 最后通过故障时间服从威布尔分布的例子说明了方法的合理性。文献 [19] 研究了带有环境协变量的非单调退化系统基于状态的检测策略, 文献中提出了类似于比例风险模型的带有协变量影响的退化模型, 在平均维修费用最小的优化目标下给出了合适的检测策略, 并且在仿真实验中对不同维修策略的费用进行了对比。

多阶段检测间隔期是基于延时模型, 将装备状态退化的过程分为多个阶段, 在不同的阶段采用不同的检测策略。文献 [20] 将延时模型应用到多组件多故障模式系统中, 针对多组件系统在发生故障后, 重新计划组件的检测时间困难的问题, 提出了一种递归算法来解决这个难题, 并且将实验和计算得到的不同检测间隔期的单位时间费用期望值进行了对比, 验证了方法的准确性。文献 [21] 提出了基于三阶故障过程的单组件系统的维修策略, 将系统的故障过程分为良好、轻微缺陷和严重缺陷 3 个阶段, 对处于不同阶段的系统采取不同的检测策略, 对轻微缺陷阶段的系统缩短检测间隔期, 对处于严重缺陷阶段的系统, 如果临近预防性维修阈值, 则延后维修时间到预防性维修, 否则立即进行维修。文献 [22] 将延时模型应用于基于任务的单组件系统维修检测中, 将系统分为正常和缺陷两种状态, 对于正常状态下的系统采取固定检测间隔期的检测, 对于处于缺陷状态的系统, 如果到达下次预防性维修时间小于设定的阈值, 则延期维修, 否则立即进行维修。

动态检测间隔期是随着系统状态的不断退化, 动态的决定检测间隔期来保证将故障风险控制在一定的概率的条件下尽可能的减少检测次数, 进而减少需要的费用。文献 [23] 提出了一种基于多目标遗传算法的多组件系统动态检测间隔期的优化方法, 通过调整检测间隔期的长短可以减少不必要的检测费用, 应用提出的动态间隔模型, 可以找到合适的非周期性检测策略使系统的可用度达到较高的水平并且减少需要的平均费用。文献 [24] 提出了基于状态的非周期性维修策略并应用于退化的复杂系统, 提出了 3 种不同的基于可靠性的维修模型并评估了需要的维修费用, 结果证明优化的可靠性阈值和检测间隔期不仅能够提高系统的可用度而且有效的延长系统的寿命时间。

通过比较可以发现, 3 种维修检测间隔期是各有优劣的, 固定检测间隔期虽然参数较少, 维修策略优化比较简

单, 很容易得到最优值, 但是对于大多数装备来说, 在使用的过程中存在一个明显的劣化过程, 应该在出现劣化状态后安排更加频繁的状态检测, 而并非是整个装备寿命过程中都是固定检测间隔的, 这种方法比较实用于全寿命过程中, 系统状态退化速度比较均匀的装备。这个问题可以采用动态检测间隔维修决策来很好的避免, 但是这种方法也存在着参数过多, 很难求解最优值的问题, 并非适用于所有的维修模型。多阶段检测间隔期在一定程度上弥补了以上两种方法的不足, 将装备系统的全寿命分为若干阶段分别展开研究, 并制定不同的维修策略。

2.3 维修决策目标优化分析

不同的维修决策目标对维修决策优化的结果产生很大的影响, 通常的决策目标有可用度、费用和风险等。可用度是对装备可用性的概率度量, 是指装备在任意随机时刻处于可用或可工作状态的概率。费用主要来自于进行维修所需要的费用, 故障造成的损失费用和维修时的停机费用等, 故障越严重, 维修所需要的材料、备件、人工及停机费用也就越多。风险是指将故障的发生概率控制在一定的范围内, 提高系统的可靠性。为了使维修决策更加符合实际, 通常选取多个变量共同作为优化目标, 做出更加科学合理的维修策略。作为维修决策要解决的关键问题, 在这一领域很多单位已经开展了大量研究, 文献 [25] 中综述了多目标多状态的装备维修和可靠性相关研究, 统计表明, 在近年发表的学术论文中以费用作为优化目标的文章占到总数的 68.3%, 以可靠性作为优化目标的文章占到总数的 37.6%, 以可用度作为优化目标的文章占到总数的 17.2%, 以上 3 种是维修策略文献中采用最多的优化目标, 其他比较多的还有关于优化维修时间、安全性和系统风险等因素的相关研究。本文所引用的多数维修策略文献都是以平均维修费用最小作为决策优化目标。文献 [26] 将可靠性作为优化目标, 根据组件的剩余寿命预测结果, 提出合理的维修策略。文献 [27] 以平均使用可用度作为优化目标, 使用扩展比例风险模型, 制定了两组件系统的维修策略。文献 [28] 和文献 [29] 在保证系统可靠性的前提下, 尽量减少平均维修费用。大部分文献是以一个变量作为维修决策目标, 但是也有部分文献以多个变量作为决策目标, 或者将某个变量作为约束条件的前提下, 优化其他变量。考虑到装备在实际中的应用情况, 以及高新技术的发展, 获取装备状态能力的提高, 对装备系统可靠性要求的提高, 多个决策变量必将成为维修策略目标优化开展研究的重点。

3 前景分析与展望

通过总结分析以上文献可知, 在维修决策领域很多机构已经开展了大量研究并取得了丰硕的研究成果, 并且很多研究成果已经应用到了实际维修保障中。随着研究的深入, 未来维修决策研究可能从以下几个方面深入开展:

3.1 结合装备故障预测, 实施精确维修

近年来, 装备故障预测技术已经在越来越多的复杂装备上得到了应用^[30-37], 随着研究的深入, 故障预测的可信

度也越来越高, 装备的剩余寿命预测结果可以作为制定维修策略的依据, 如果能够实时掌握装备的状态, 就可以随之改变维修间隔期与维修阈值, 不仅能够有效的防止意外停机, 还可以大量减少需要的维修资源。

3.2 考虑备件库存对维修策略的影响

维修策略通常是假设备件库存充足的, 通常不考虑备件成本、备件运输、备件储存以及备件在储存过程中出现的性能衰退等情况^[38-39], 实际上这些情况在现实的维修过程中, 对维修成本的影响还是很大的, 现在已经有学者提出备件与维修策略联合优化问题。

3.3 考虑维修程度和装备任务目标

在制定维修策略的过程中, 虽然部分研究中考虑了不完全维修^[40-43], 但是大部分文献忽略了维修程度对维修策略造成的影响, 假设维修活动后是修复如新的, 实际上对于多数可修装备来说, 维修带来的影响是不可忽略的。另外对于使用频次低、对可用度要求不高、以及临近退役的老旧装备来说, 在不影响执行任务的情况下^[6, 44-45], 考虑到费用等因素, 并不需要进行过程度的维修, 不影响使用即可, 不同的维修程度需要的维修费用与维修时间也不同, 这样可以更加科学合理的制定维修策略。

3.4 考虑装备相关性

随着装备复杂性的提高和装备之间相关性的增强, 维修策略的研究对象已经从单一的装备发展为装备系统, Thomas^[46]认为系统内部部件之间的相关性可以归纳为三类: 经济相关性、故障相关性和结构相关性。在复杂装备中应用成组维修以及在多组装备之间实施机会维修可以大大的提高装备维修的效率并可以减少维修所需要的费用, 未来装备越复杂, 装备之间相关性越强, 这一问题也将成为未来维修策略研究的热点。

3.5 虚警和维修延迟

装备的复杂度越高, 出现虚警的概率就越大, 当发生虚警时, 虽然装备并没有发生故障, 但是仍需要调动维修资源, 需要消耗人力物力^[47-48], 同样在备件库存不足, 突发故障过多导致维修人员不足等情况下, 也会造成维修延迟, 虚警和维修延迟的情况虽然属于意外情况, 但是在制定和优化维修策略的过程中也是应该考虑的, 这样才能使维修策略更加符合实际情况。

4 结语

本文综述了维修策略的相关文献, 总结归纳了维修的分类并对装备维修国内外研究现状进行了分析, 重点从维修阈值、维修检测间隔期以及维修决策目标 3 个方面综述了维修策略的研究现状, 并对所综述的文献进行了分析总结, 最后对维修策略未来发展方向进行了展望。高新技术在装备上的广泛应用在带动装备发展的同时也增加了维修保障的难度, 装备“买得起, 用不起”的难题也日益突出, 亟待提出合理的维修决策来充分利用维修资源的情况下, 尽量发挥装备的最大效能。

参考文献:

- [1] 徐宗昌. 保障性工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [2] 左洪福, 蔡景, 王华伟. 维修决策理论与方法 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.
- [3] Bram de Jongea, Teuntera R, Tingab T. The influence of practical factors on the benefits of condition-based maintenance over time-based maintenance [J]. Reliability Engineering and System Safety. 2017, 158: 21-30.
- [4] Alaswad S, Xiang Y. A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system [J]. Reliability Engineering and System Safety. 2017, 157: 54-63.
- [5] Keizer M C A O, Flapper S D P, Teunter R H. Condition-based maintenance policies for systems with multiple dependent components: A review [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 261: 405-420.
- [6] 张耀辉, 韩小孩, 王少华, 等. 装备任务成功性评估研究现状与展望 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28 (5): 1-6.
- [7] 王凌, 郑恩辉, 李运堂, 等. 维修决策建模和优化技术综述 [J]. 机械科学技术, 2010, 29 (1): 133-140.
- [8] 邵延君. 基于故障预测的武器装备预防性维修策略研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [9] 郭建, 徐宗昌, 孙寒冰. 基于比例风险模型的装备机会维修阈值优化研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (12): 2622-2629.
- [10] Li Y, Ma X B, Zhao Y. A condition-based maintenance model for a three-state system subject to degradation and environmental shocks [J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 105: 210-226.
- [11] Liu B, Wu S M, Xie M, et al. A condition-based maintenance policy for degrading systems with age- and state-dependent operating cost [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 261: 1-9.
- [12] Fitouhia M C, Nourelfathb M, Gershwin S B. Performance evaluation of a two-machine line with a finite buffer and condition-based maintenance [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 166: 61-72.
- [13] Liu B, Liang Z L, Ajith K P, et al. Condition-based maintenance for systems with aging and cumulative damage based on proportional hazards model [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 168: 200-209.
- [14] Liu X, Li J, Khalifa N, et al. Condition-based maintenance for continuously monitored degrading systems with multiple failure modes [J]. IIE Transactions, 2013, 45: 422-435.
- [15] Mahmood S, Maxim F, Christophe B. An opportunistic condition-based maintenance policy for offshore wind turbine blades subjected to degradation and environmental shocks [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 142: 463-471.
- [16] Caballe N C, Castro I T, Perez C J, et al. A condition-based maintenance of a dependent degradation-threshold-shock model in a system with multiple degradation processes [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 134: 98-109.
- [17] Wu F, Niknam S A, Kobza J E. A cost effective degradation-based maintenance strategy under imperfect repair [J]. Relia-

- bility Engineering and System Safety, 2015, 144: 234 - 243.
- [18] Zhao X F, Al-Khalifa K N, Toshio N. Approximate methods for optimal replacement, maintenance, and inspection policies [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 144: 68 - 73.
- [19] Zhao X J, Mitra F, Christophe B, et al. Condition-based inspection/replacement policies for non-monotone deteriorating systems with environmental covariates [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95: 921 - 934.
- [20] Wang W B, Dragan B, Michael P. A multi-component and multi-failure mode inspection model based on the delay time concept [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95: 912 - 920.
- [21] Wang W B, Zhao F, Peng R. A preventive maintenance model with a two-level inspection policy based on a three-stage failure process [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014, 121: 207 - 220.
- [22] Yang L, Ma X B, Zhai Q Q, et al. A delay time model for a mission-based system subject to periodic and random inspection and postponed replacement [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 150: 96 - 104.
- [23] Gao Y C, Feng Y X, Zhang Z X, et al. An optimal dynamic interval preventive maintenance scheduling for series systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 142: 19 - 30.
- [24] Lin Z L, Huang Y S, Fang C C. Non-periodic preventive maintenance with reliability thresholds for complex repairable systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 136: 145 - 156.
- [25] Adiel T A, Rodrigo J P F, Cristiano A V C. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability [J]. IMA Journal of Management Mathematics, 2015, 3 (16): 1 - 23.
- [26] Jiang X H, Duan F H, Tian H, et al. Optimization of reliability centered predictive maintenance scheme for inertial navigation system [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 140: 208 - 217.
- [27] You M Y, Li H G, Meng G. Control-limit preventive maintenance policies for components subject to imperfect preventive maintenance and variable operational conditions [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96: 590 - 598.
- [28] Shi H, Zeng J C. Real-time prediction of remaining useful life and preventive opportunistic maintenance strategy for multi-component systems considering stochastic dependence [J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 93: 192 - 204.
- [29] Azadeh A, Asadzadeh S M, Salehi N, et al. Condition-based maintenance effectiveness for series - parallel power generation system—A combined Markovian simulation model [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 142: 357 - 368.
- [30] VanHorenbeek A, Pintelon L. A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 120: 39 - 50.
- [31] Ferreira R J P, Almeida A T, Cavalcante C A V. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94: 905 - 912.
- [32] Liu Q M, Dong M, Lv W Y, et al. A novel method using adaptive hidden semi-Markov model for multi-sensor monitoring equipment health prognosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 64 - 65: 217 - 232.
- [33] Hu Y, Baraldi P, DiMaio F. A particle filtering and kernel smoothing-based approach for new design component prognostics [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 134: 19 - 31.
- [34] Si X S, Wang W B, Hu C H. A Wiener-process-based degradation model with a recursive filter algorithm for remaining useful life estimation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35: 219 - 237.
- [35] Yu J B. Machine health prognostics using the Bayesian-inference-based probabilistic indication and high-order particle filtering framework [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 358: 97 - 110.
- [36] Corbetta M, Sbarufatti C, Manes A, et al. Real-time prognosis of random loaded structures via Bayesian filtering: A preliminary discussion [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 145: 143 - 160.
- [37] Sameer Al-Dahidi, FrancescoDiMaio, PieroBaraldi. Remaining useful life estimation in heterogeneous fleets working under variable operating conditions [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 156: 109 - 124.
- [38] 徐宗昌, 张永强, 呼凯凯, 等. 备件携行量研究方法综述 [J]. 航空学报, 2016, 37 (9): 2623 - 2633.
- [39] 张永强. 舰船装备维修时机与备件携行量联合优化方法研究 [D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2016.
- [40] 葛恩顺, 李庆民, 张光宇, 等. 考虑不完全维修的劣化系统最优视情维修策略 [J]. 航空学报, 2013, 34 (2): 316 - 324.
- [41] 石 慧, 曾建潮. 考虑非完美维修的实时剩余寿命预测及维修决策模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20 (9): 2259 - 2266.
- [42] 狄 鹏, 黎 放, 陈 童. N 型更换策略下多状态可修系统可靠性规律研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (3): 603 - 607.
- [43] 葛恩顺, 李庆民, 黄傲林, 等. 不完全维修下的单部件系统视情维修及更换策略 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34 (12): 2509 - 2513.
- [44] 韩小孩. 基于任务成功性的装备维修决策方法研究 [D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2016.
- [45] 沈 军, 张耀辉, 王少华. 任务成功性优先的多属性维修决策研究 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25 (5): 10 - 14.
- [46] Thomas L. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems [J]. Reliability Engineering, 1986, 16 (4): 297 - 309.
- [47] 卞浩辉, 郭霖瀚, 康 锐. 虚警影响下的备件库存优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40 (3): 413 - 416.
- [48] Li Q, Clifford G D. Signal quality and data fusion for false alarm reduction in the intensive care unit [J]. Journal of Electrocardiology, 2012, 45 (6): 596 - 603.