

装备维修系统 动力学分析

■ 尹晓虎 著

The Dynamical Analysis
of Equipment
Maintenance Systems



國防工業出版社

National Defense Industry Press

装备维修系统动力学分析

The Dynamical Analysis of
Equipment Maintenance Systems

尹晓虎 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

装备维修系统动力学分析/尹晓虎著. —北京:国防工业出版社,2014. 11

ISBN 978-7-118-09700-9

I. ①装... II. ①尹... III. ①武器装备—维修—动力学分析 IV. ①E92②O655.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 244888 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 10 字数 163 千字

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

打技术、打装备、打保障,是信息化战争的显著特征;使装备始终保持良好的技术状态和充足的作战储备,是打赢信息化战争的物质基础。装备维修保障,通常简称为装备维修,就是为了这一物质基础而采取的管理控制活动和技术工艺措施。

20世纪80年代以来的几场高技术局部战争已经证明,装备维修是部队战斗力的倍增器。因此,搞好装备维修,乃是一支“能打仗、打胜仗”的军队必备的基本能力。从战斗力生成的角度看,部队装备管理实质上是以装备维修为中心的管理。不断提高部队装备的战备完好率、维修科学性和保障经济性,是装备维修工作始终不变的主题。

习近平主席深刻指出,研究作战问题,核心是把现代战争的特点规律和制胜机理搞清楚。搞好装备维修亦然,必须充分理解、掌握并熟练运用维修系统的基本规律和运作机理来指导和开展维修工作。对此,从事维修理论和技术研究的国内外学者、一线维修技术人员,开展了大量研究。从20世纪六七十年代兴起的以可靠性为中心的维修,到近年来提出的基于状态的维修、寿命预测和健康管理,均遵循了这一要求。但就实际应用情况看,装备维修依然迷雾重重。造成这一结果的原因至少有以下两点:

就装备维修这一概念本身而言,其包含的管理控制活动,在于科学规划装备使用、维修及所需资源的时机、次数、数量等,使装备质量梯次和数量分布优化;而技术工艺措施,则包括维护保养、故障诊断和修理,以及采用新技术、新工艺和新材料提升装备性能。因此,装备维修涉及管理策略、控制方法和技术手段,是一个复杂体系,其构成中既有完成装备维修所需的物质资源、人力资源、信息资源等硬要素,也有管理策略、规划控制方法以及技术工艺手段等软成分。在实践中,搞好装备维修,就必须采用系统的观点,从整体上把握和调节好这些构成要素之间的关系,进而使用和运用好这些要素。

就装备维修所处的环境而言,尽管其直接工作对象是一个个具体的装备,但这些装备的运用和维修必须放在军事作战和训练这个大背景下来考虑。伴随着作战理念和作战样式的演变以及装备技术的发展,不仅构成装备维修系统

的上述要素会发生变化,其相互关系也会发生深刻变化。按照系统论的术语,就是装备维修系统的组成结构和运行模式是动态变化的。特别是,现代战争的一个显著特点是平台作战、体系支撑,战术行动、战略保障,这种情况下装备维修系统构成结构和运行模式的动态变化十分复杂。要想始终保持较高的装备战备完好率,就必须不断提高装备维修的针对性和经济性,必须把科学维修和精确保障作为指导装备维修工作和评价装备维修系统效能的根本要求。贯彻和落实这一根本要求的关键和前提,在于从动力学的角度,深刻理解和掌握隐藏在装备维修系统组成结构和运行模式动态变化之下的内在机理与基本规律。

上述两点,正是本书的基本出发点。本质上,装备维修系统是一个多尺度系统,至少可以区分为装备部件、单部装备、装备群、装备体系等四个不同的层次,还可以分为装备使用退化过程和装备维修(修理)过程等尺度。在不同的系统层次和尺度上,其行为都受到所在环境的影响和制约,同时又影响和制约着其他层次和尺度上的系统行为。因此装备维修系统具有随机性、动态性、相关性和演化性,这给装备维修系统的分析、设计、集成和控制带来巨大挑战。

信息是控制的基本手段。理解和掌握装备维修系统的动力学信息,也即装备维修系统的运行规律,是对其进行分析、设计、集成和控制的基础。从动力学的角度考察装备维修系统,就是分析装备维修系统的行为,探讨其基本特点,掌握其运行规律,进而根据这些特点和利用所掌握的规律来指导和实施维修,动力学分析方法为此提供了合适的研究框架和工具。

围绕这一主题,全书共分为6章。

第1章,绪论。通过综述当前装备维修系统的研究现状及进展,引出装备维修系统动力学分析的必要性,提出了装备维修系统动力学分析的主要研究内容、具体研究目标和可行的研究思路。

第2章,装备退化失效过程的动力学分析。装备退化失效是驱动维修系统运转的底层动力,而维修则是对退化施加反作用的控制活动,因此这一章和第3章实际上是在微观尺度上分析装备维修系统。从动力学角度看,装备及其部件的退化失效是使用过程中环境作用的结果。这一问题可归结为动力学辨识问题,提出了一个基于不完整状态监控参数辨识装备退化失效动力学过程的一般框架,实现了基于状态监控参数来反演装备退化失效的动力学过程,包括退化失效过程的状态演化及其寿命分布。

第3章,装备使用与维修的耦合动力学分析。装备列装直到退役报废的过程实际上是使用与维修相交替的过程,同时也是使用导致的退化效应累积与维修对退化效应的减轻相耦合作用的过程。本章建立了这一过程的描述方法,分单一故障和复杂多故障两种情况,探讨了过程的动力学性质,以及如何利用过程动力学来优化维修策略。

第4章,装备维修系统的动力学行为分析。这是在中观尺度上分析装备维修系统,目的是深刻理解由于维修系统内不同因素相互作用而导致的复杂动力学行为。本章从装备使用与维修的耦合过程出发分析维修系统中装备、维修策略、维修资源之间相互影响的因果关系及其形成的约束结构,并以发动机维修系统为例,展示和验证运用系统动力学方法分析维修系统过程,探讨维修系统的动力学行为模式,同时寻求在系统尺度上控制装备维修过程和资源保障的有效策略。

第5章,装备维修系统的拓扑动力学分析。本章从体系角度分析装备维修系统的宏观动力学行为。装备维修系统的运行过程可以看成是在具有一定拓扑特性的维修要素网络上,产生、传输、处理和利用维修信息并驱使维修要素流动和重新分布以实施维修活动的过程。维修要素的流动和重新分布必然导致维修要素网络拓扑的变化,从而装备维修系统的运行和演化过程可以用其拓扑的变化和演化来刻画。有鉴于此,本章从分析装备维修系统构成要素及其作用关系出发,定义维修系统的最小拓扑和效能测度,探讨了典型维修策略下维修系统的元模型及其效能测度,分析可能的维修系统集成策略及其导致的维修系统体系效能差异,寻求维修系统集成的最佳模式和可能的控制策略。

第6章,总结和展望。总结全书,并指出装备维修系统研究应重点注意和需要加以解决的几个关键问题。

本书是在博士论文基础上,结合在基层部队装备保障一线工作经历和有关思考,经过反复修改而成的。书中提供的方程、算例、模型都经过作者的计算与验证,力求准确无误。

本书得以出版,要感谢许多人的关心和帮助。首先要感谢我的博士生导师国防科技大学温熙森教授,正是在他的启蒙和指导下,我才有幸进入装备维修保障领域。感谢在部队任职以来的领导、专家和同事,如国防科技大学杨拥民教授、钱彦岭副教授、71375 部队张忠良高级工程师、72465 部队刘福军高级工程师等,他们的装备维修保障实践经验和建议,更加坚定了我从事装备维修系统动力学分析的信心。

装备维修系统是一个复杂系统,涉及多个学科的专业知识,而且正处于不断发展之中。由于水平有限,错误和疏漏之处在所难免,恳请专家和读者不吝批评指正。

尹晓虎
2014年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 装备维修系统的研究综述	3
1.3 动力学分析方法在装备维修领域中的应用综述	7
1.4 装备维修系统动力学分析的主要研究内容与意义	11
1.4.1 装备维修系统动力学分析的主要研究内容	11
1.4.2 装备维修系统动力学分析的意义	14
1.5 本书的主要内容与篇章结构	15
1.6 本章小结	18
第 2 章 装备退化失效过程的动力学分析	20
2.1 引言	20
2.2 装备退化失效过程的动力学模型	22
2.3 装备退化失效过程的动力学性质	25
2.4 装备退化失效过程的动力学辨识	27
2.5 装备退化失效过程的状态演化与寿命分布逼近	30
2.5.1 装备退化失效过程的状态估计	30
2.5.2 装备退化失效过程的状态演化与寿命分布估计	31
2.6 动力学分析方法在发动机磨损分析中的应用	32
2.6.1 润滑油光谱数据的一致性检验	33
2.6.2 发动机磨损粒子的增长动力学	38
2.6.3 发动机磨损退化的状态演化与寿命分布逼近	47
2.7 本章小结	50
第 3 章 装备使用与维修的耦合动力学分析	51
3.1 引言	51

3.2	装备使用与维修的耦合动力学分析	52
3.2.1	装备使用过程描述	52
3.2.2	维修活动刻画	54
3.2.3	维修级别描述	57
3.2.4	装备使用与维修的耦合过程	57
3.3	单一故障模式下装备使用与维修耦合的密度演化分析	58
3.3.1	密度演化分析基础	59
3.3.2	单一故障模式下装备使用与维修耦合的密度演化模型	60
3.3.3	密度演化方法在发动机维修次数优化中的应用	69
3.4	复杂故障模式下装备使用与维修耦合的矩阵解析分析	70
3.4.1	矩阵解析分析基础	71
3.4.2	复杂故障模式下装备使用与维修耦合的矩阵解析模型	71
3.4.3	矩阵解析方法在发动机预防性维修优化中的应用	80
3.5	本章小结	84
第4章	装备维修系统的动力学行为分析	86
4.1	引言	86
4.2	系统动力学分析基础	87
4.3	装备维修系统的因果关系与基本结构分析	88
4.4	发动机维修系统的系统动力学模型	91
4.5	发动机维修系统的动力学行为分析	94
4.5.1	发动机维修系统的动力学行为模式	94
4.5.2	非完美维修对发动机维修系统动力学行为的影响	96
4.5.3	状态监控对发动机维修系统动力学行为的影响	98
4.5.4	预防性维修周期对发动机维修系统动力学行为的影响	99
4.6	本章小结	101
第5章	装备维修系统的拓扑动力学分析	103
5.1	引言	103
5.2	装备维修系统的构成要素与最小拓扑分析	104
5.2.1	装备维修系统的构成要素分析	104
5.2.2	装备维修系统的最小拓扑分析	110

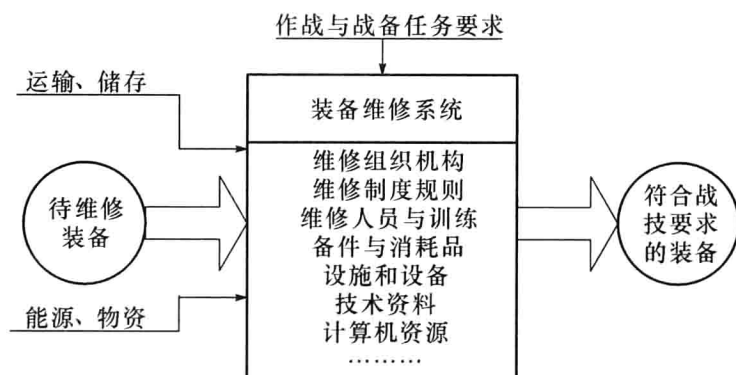
5.3	典型维修策略的装备维修系统的元模型	111
5.4	装备维修系统的拓扑动力学分析	115
5.4.1	装备维修系统的拓扑结构效应测度	115
5.4.2	装备维修系统演化的拓扑分析	117
5.5	装备维修系统集成的效能评估初探	119
5.5.1	装备维修系统体系拓扑的仿真算法	120
5.5.2	装备维修系统体系的拓扑效能测度	121
5.5.3	装备维修系统的集成模式及其集成效能评估	122
5.6	本章小结	129
第 6 章	总结和展望	131
6.1	结论	131
6.2	展望	132
参考文献	135

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

武器装备是军队战斗力的重要组成部分,及时可靠的装备维修保障是保持、恢复乃至提高部队战斗力的重要手段。近年来,伴随着作战理念和作战样式的演变以及装备技术的发展,装备维修保障的地位和作用越来越突出,装备维修也日益复杂。

完成装备维修任务需要有完善的维修保障系统。所谓维修保障系统,是由经过综合和优化的维修保障要素构成的总体,其功能与组成可以用如图 1.1 所示的输入输出框图来简单示意。由于维修对于部队来说属于保障工作,一般地,维修与维修保障并无严格区分,因而以下将装备维修保障系统简称为装备维修系统。



装备维修系统是复杂系统,其复杂性具体体现在如下两个方面:一方面,作为作战体系的重要组成部分,装备维修系统是复杂的系统体系,不仅包括装备,而且还包括维修资源,此外还受到人的因素和诸如维修组织、体制、编制等社会性因素的影响,装备维修系统的效能是上述诸要素共同作用的结果。另一方面,随着装备技术集成和复杂程度的提高,特别是信息技术广泛应用到维修领

域后,维修资源的时空分散驱使维修从集中实施到分散实施,向集中决策分布执行转变^[1,2],装备维修系统的运行呈现出综合化、集成化、协作化的趋势^[3,4]。

在这样的背景下,科学维修、精确保障成为指导装备维修工作和评价装备维修系统效能的根本要求,根据装备维修系统运行的过程信息对装备维修系统及其运行过程进行调节和控制成为实现上述要求的基本手段。然而,装备维修系统本质上是复杂的动态系统,装备维修系统构成的复杂性以及上述维修模式的转变,给装备维修系统的调节和控制带来了巨大的挑战。

首先,从装备角度看,装备维修系统具有随机性。这种随机性集中体现在维修活动产生的不确定性。维修活动的产生是装备执行作战或战备任务过程中装备性能退化随时间累积的结果,而装备性能退化则与装备动用和使用过程有关。装备故障就是由这种内部累积退化和外部随机环境作用的累积效应共同造成的,这是逐渐累加的变化过程。科学维修意味着预防和减少故障发生从而只执行确有必要的维修,这就需要细致分析装备动用和使用过程,准确把握装备退化失效的基本规律,根据装备退化状态确定是否维修。传统的以结构化定性逻辑决断为基础的以可靠性为中心的维理论和分析方法^[5]对此缺乏有效支撑。

其次,从过程角度看,装备维修系统具有动态性。装备维修系统的运行过程就是装备使用、退化、维修、再使用、再退化、再维修相交替的循环过程,是装备退化效应的累加与维修效果的逐渐释放相互作用的动态过程。在此过程中,不同故障模式、维修策略触发机制和维修效果的相互耦合形成具有不同策略结构的装备维修系统。理解这些耦合机制是优化维修时机和次数的基础,这需要深入分析装备退化的累积效应和维修效果的耦合过程,以预防性维修周期为主要内容的传统维修策略分析方法需要进一步深化和细化。

再次,从系统角度看,装备维修系统具有相关性。装备维修系统是由完成装备维修所需的要素构成的有机整体,这些要素相互作用以确保维修顺利实施。但装备维修系统的服务对象是作战单元中的装备总体,维修实施必须服从和服务于作战单元的作战使命和战备任务要求,并受到其他维修要素的限制和约束。这意味着,装备维修系统不仅要考察单个装备的可靠性、维修性等设计特性,更重要的是要评估装备总体能够遂行作战和战备任务的能力,以单一装备的可靠性、维修性分析为主的传统维修工程分析方法^[6]客观上面临拓展的需要。

最后,从拓扑角度看,装备维修系统具有演化性。装备维修的实施过程同

时也是维修资源的消耗与补充过程,这一过程必然导致维修系统中维修要素的再部署与重新分布,并由此导致装备维修系统在要素构成和组织拓扑^[7,8]方面发生变化,从而使得维修系统本身在整体上也是不断变化和发展的。基于这种拓扑演化规律,控制装备维修系统的演化模式进而影响维修的产生、响应和实施成为在全局和宏观上控制装备维修系统的重要手段。理解装备维修系统的拓扑结构对维修系统体系效能的影响、拓扑结构的演化模式等是对其进行控制的基础,与此相关的维修系统评价标准亟待扩充,相应的效能评估框架也有待完善。

上述挑战表明,必须采用跨学科的观点^[9],从不同角度在不同层次,重新审视和认识维修系统的基本内涵和运行规律。从控制系统理论来看,对装备维修系统施加控制的目的是要使装备维修系统展现出人们所期望的行为,理解和掌握装备维修系统的动力学行为,也即装备维修系统的运行规律,是对其进行控制的基础。装备维修系统所具有的随机性、动态性、相关性和演化性表明装备维修系统是动力学系统,动力学分析方法作为跨学科的一般系统分析方法,为研究装备维修系统提供了天然的方法论和工具。

1.2 装备维修系统的研究综述

总体来看,装备维修系统的研究是随着人们对装备维修问题本质认识的不断深入而逐渐深化和发展的。随着人们对装备维修系统本质认识的逐渐深入,各种不同的维修理念或维修方式被先后提出,相应的装备维修系统研究所关注的内容在时间历程上可以划分为如下四个阶段,如图 1.2 所示。

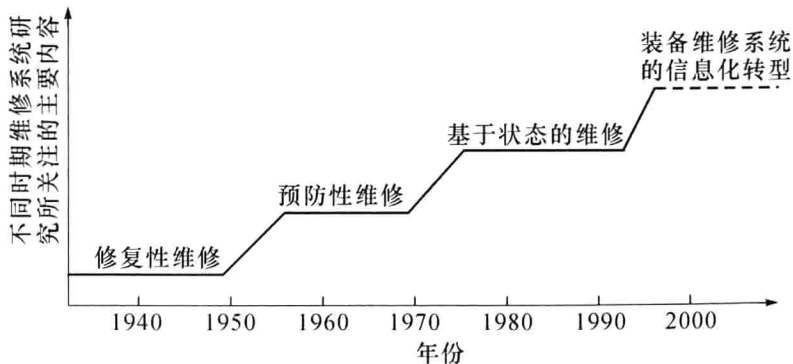


图 1.2 装备维修系统研究所关注内容的演变

1. 第一阶段,修复性维修

最初,装备失效或故障被认为是无法避免的,只能被动等待装备失效或发

生故障后对其进行修理或更换,维修只是作为部队日常战备活动中一个不可避免的环节而存在。此时,事后修理或修复性维修(Corrective Maintenance, CM)是最主要的维修模式。因为维修模式比较单一且相对简单,此时尚未形成维修系统的概念,维修被当成后勤保障中的子问题,装备维修问题主要表现为资源保障问题。

2. 第二阶段,预防性维修

第二次世界大战后期,随着飞机、潜艇和航空母舰等大型现代装备的出现,装备本身的可靠性和安全性问题日益突出。这些复杂装备一旦发生失效或故障,其后果往往无法承受,因此常定期对可能发生故障的部件预先进行修理和更换,以预防和减少故障发生,即预防性维修(Preventive Maintenance, PM)。由于许多装备并未失效即予以更换造成大量浪费,PM的资源保障任务大为加重。庞大的维修经费需求与有限的财政支出之间的矛盾日益尖锐,同时装备频繁拆卸也可能带来其他故障隐患,因此装备PM的优化十分关键而必要。此时人们意识到,装备维修不仅是工艺问题,也是技术问题,不但要优化装备维修本身的技术问题,同时也要优化与维修工作有关的组织和协调问题。装备维修的相关功能日渐健全,并逐渐与传统后勤保障相分离,形成相对独立和专业化的维修系统。

在此期间,装备维修系统的研究主要集中于预防性维修计划的制定,包括确定维修周期和维修内容等,最重要的突破是以可靠性为中心的维修(Reliability Centered Maintenance, RCM)理论的提出。RCM分析方法强调以图表的形式、结构化的逻辑关系和层次化的组织形式对装备的各种可能事件及其后果加以分析^[10],从而对装备预防性维修计划或方案进行逻辑决断^[9]。孕育RCM理念的年代也是各种维修观点和思想蓬勃发展的年代,1966年Jorgenson等指出,随机性是维修问题的本质属性,维修问题应该放在经济学和管理学这两个更大的背景和学科框架下加以研究^[11]。这标志着,维修已经从纯粹的技术问题演变成更复杂的策略管理问题^[9],与维修时机、维修次数等有关策略分析、建模和优化开始成为装备维修系统研究的主流。

维修策略分析研究的模型主要是关于维修费用和收益的数学模型,其目的在于获得费用和收益的最佳平衡^[12],以实现最佳维修时机^[13],主要包括四个方面^[12]:①装备的一般描述,包括功能和重要性;②装备性能退化或失效模型以及可能后果;③维修决策目标函数及其优化技术;④给定策略下维修过程的限制和约束。

此后,从20世纪80年代至今,基于对装备退化和失效机制的不同理解,以RCM理论为基础、关注PM检测间隔和维修触发时机的各类维修模型如雨后春笋般涌现。这些模型的考察对象主要是简单装备或部件,基本思路是通过分析装备退化失效和维修过程,根据设定的决策目标或优化准则(主要是费用和可靠性),对维修策略中诸如间隔周期、行驶里程、修理次数等参数进行优化,从而使得给定维修策略下的维修系统效能最佳^[14]。从维修触发机制类型来看,这些维修策略主要是基于时间的PM策略和修理/换件策略。典型的基于时间的PM策略包括各类役龄维修策略^[15-22]、周期维修策略^[15, 23-26]、序贯维修策略^[15, 27]等;典型的修理/换件策略包括失效修理/换件策略^[15, 28-32]、修理极限策略^[15, 33-35]、修理计数策略^[14, 15, 36]等。

伴随这些模型的提出,维修效果的概念逐渐受到关注。所谓维修效果就是维修活动对装备退化累积效应的改善或恢复程度^[37],它直接影响装备使用与维修交替作用过程的耦合机制。为表征维修效果,最小维修/修理^[29]、部分/非完美/完美维修^[17, 38-43]、一般修理^[31, 40, 44, 45]等概念相继提出,维修策略与维修效果的结合,使得维修系统的分析模型更为复杂。

3. 第三阶段,基于状态的维修

然而,维修效果的定量刻画并不简单,它需要深刻理解装备退化累积效应与维修效果释放作用之间的耦合机制。在这一时期,随着可靠性强化试验、加速寿命/退化试验理论和方法的提出与完善,装备失效机理问题逐渐得到人们重视,复杂装备中不同部件在应力/应变下的退化失效过程和原理逐渐为人们所了解。

目前,对装备退化失效机制主要有两种认识:一种认为,装备退化失效是由装备自身老化引起的,由此产生的故障称为老化故障^[16-19];另一种认为,装备退化失效是由于外部环境的随机冲击作用引起的,这种随机冲击给装备造成损伤,损伤效应的时间累积导致装备发生故障或失效^[32, 46-49]。

在这两种认识的基础上,对装备退化作用与维修活动耦合机制的认识和研究进一步深入。一方面,根据退化程度可以定义和划分装备使用中的技术状态,从而可以使维修活动更具针对性;另一方面,退化累积效应可以与装备可靠性特征对应起来,维修活动前后累积退化程度的变化或可靠性特征的变化为定义和定量刻画维修效果提供了可能。因此,维修也被认为是对装备技术状态的控制^[50]。

基于这一认识,有效管理和控制装备退化,以及根据装备技术状态确定最

佳维修方案以延长装备有效工作寿命并降低失效概率开始被人们关注,装备维修被认为是部队战斗力的“倍增器”^[51]。基于状态的维修(Condition Based Maintenance, CBM)理念逐渐兴起,装备维修系统的研究开始从关注 PM 策略向 CBM 策略转变,CBM 建模、分析和优化成为时下的研究热点,其典型建模过程和分析框架可参考文献[52-61]。

在装备维修系统研究向探讨维修起源与微观机理深入的同时,在系统角度对各类宏观的维修现象及其产生规律的研究也进一步深化,这是技术发展和维修需求改变共同作用的必然。一方面,装备构成越来越复杂,决定了在研究复杂装备的维修时必须结合其退化失效机制考察构成部件之间的联系^[62],主要是结构关联、经济关联和失效关联^[9, 14, 63-65],由此形成各种成组维修策略^[11, 14, 15, 66-68]和机会维修策略^[9, 11, 14, 47, 68-71]。另一方面,装备维修系统是面向一批或一类装备服务的,这导致在规划维修活动和谋划资源部署时必须在全局上分析系统中装备退化与维修活动之间的交互与反馈、维修资源约束以及装备动用过程与退化作用的反馈。

RCM 与 CBM 等维修理念的兴起以及上述维修系统研究向微观和宏观两极深化的趋势,实际上与装备维修所面临的日趋激烈和动态的战场环境、降低维修成本和提高维修效率、确保维修的科学性以及保障的精确性等客观要求有关^[72]。如何在不影响部队战备能力的情况下以最少的费用、最少的备件资源消耗、最快的响应速度实施确有必要的维修,已经成为部队各级装备部门尤其是维修部门面临的最大挑战。

4. 第四阶段,装备维修系统的信息化转型

为应对上述挑战,美国防部先后发布转型指南“联合 2010”和“联合 2020”,明确了信息优势作为聚焦保障能力关键使能器的重要地位^[73],利用信息和信息流来牵引维修资源的合理有序流动从而实现精确、高效的保障主导着当前及今后一段时期美军的维修保障转型工作^[74]。

早在 20 世纪 90 年代初,美陆军便着手维修保障的现代化转型,试图利用准确可靠的信息将以分级、大量库存为主的传统保障模式替换成更有效的快速响应的分布式保障系统^[75]。此后,美军其他军兵种和业务部门相继开展了各种维修保障转型尝试,提出了不少新颖观点和思想。美空军就提出,维修保障是具有重要技术成分的复杂工程系统问题^[76],具有规模大、集成度高和开放性的特征^[77],装备维修系统的要素关系复杂、多维和不可预测^[1],必须紧紧围绕装备维修系统行为的随机性、要素的相关性和系统的动态性来开展研究^[78]。

与此同时,美海军提出“网络中心战”的作战理念^[79-81],“以网络为中心的维修保障”等理念随即开始盛行^[82]。近年来美海军陆战队倡导的“感知响应型保障”(Sense and Respond Logistics, S&RL)理念反响较大^[83-85],不仅已为美国防部所接受^[74, 86],甚至影响了美军盟军的维修保障力量建设^[87]。此外,国防部预研局(DARPA)针对信息化条件下维修保障系统的灵活性和生存能力自1996年始编列两个5年计划开展研究,即“先进保障计划”(Advanced Logistics Project, ALP)和“超级保障计划”(Ultra Logistics Project, ULP)^[88]。而国防部信息系统局(DISA)则关注美三军维修保障信息系统的综合集成,提出建立“全球战斗保障系统”(Global Combat Support System, GCSS)^[89, 90],将三军的维修保障要素进行一体化集成,从而实现聚焦保障所需的全资可视能力,并为高效、快速、精确的维修保障提供决策支持。

伴随上述理念的提出和项目的实施,“科学预知维修需求、精益维修、按需保障”等逐渐成为装备维修领域的热点词汇,维修和保障的联系日益紧密,以至于必须把维修保障当作综合的密不可分的整体加以阐述和研究,装备维修系统正从相对简单的孤立系统向综合集成的“系统的系统”演变。相应地,装备维修系统的研究也从单纯的维修策略研究向关注维修系统的动态性、灵活性、响应能力、生存能力等共性特征和一般运行规律的分析 and 认识转变。围绕维修环境、过程变化从系统和体系角度研究装备维修系统的复杂性、动态性、灵活性等动力学性质已经蔚然成风^[74, 82, 91],动力学分析方法是维修系统本身发展的必然选择。

1.3 动力学分析方法在装备维修领域中的应用综述

动力学分析方法的理论基础是一般系统理论和动力系统理论,它要求从整体的观点出发研究系统要素之间的作用和联系^[92],以及系统的长期演化行为^[93]。尽管系统是复杂多变的,但通过对系统的动力学分析和研究,能够理解系统的一般规律和现象,可以得到系统最一般的原理^[94]。

动力学分析的基本思想是对所考察现象或系统轨迹建立模型,并加以理解和解释,其主要工作包括^[95]:

- (1) 定义系统边界,描述和定义现象或系统轨迹的限制条件。
- (2) 定义状态空间的元素并将其划分为子系统。