

指控网络 PHM 系统及其关键技术研究

许卫强¹, 陈国顺², 牛刚²

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 军械技术研究所, 石家庄 050003)

摘要: 针对指控网络设备种类繁多、网络管理复杂、故障诊断难度高的特点, 提出将故障预测和健康管理 (PHM) 技术与网络管理技术结合, 应用于指控网络保障。实现对指控网络的健康评估与故障预测, 增强指控系统的可靠性。重点讨论了指控网络 PHM 系统的构建及其管理模式, 对各模块功能进行了设计说明, 详细介绍网络健康评估流程和实现方法。然后通过对某指控子网性能指标进行仿真获取和统计分析, 验证了健康评估与故障预测技术在网络测试诊断中的有效性。最后总结了 PHM 对网络系统健康运行、保证战场通信的作用及意义。

关键词: 指控网络; 故障预测; 健康评估; PHM 体系结构

中图分类号: TP277 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)04-0046-05

Research on C² Network PHM System and Its Key Technologies

XU Wei-qiang¹, CHEN Guo-shun², NIU Gang²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Institute of Ordnance Technology, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The command and control (C²) system network has varieties of equipment and complex network management, and fault diagnosis becomes difficult. Therefore, it is proposed to combine the Prognostics and Health Management (PHM) technology with network management technology and apply it in C² system for network security. The realization of the health assessment and fault prediction in the network can enhance the reliability of the system. This paper focuses on the construction of the PHM system and its management mode. The function of each module is described and the process of network health assessment is introduced. Then, through the acquisition and statistical analysis of the performance index of a certain network, the validity of the health assessment and fault prediction technology in network test is verified. Finally, the function and significance of PHM in the healthy operation of the system network to ensure the communication of the battlefield is summarized.

Key words: C² network; fault prediction; health assessment; network PHM architecture

0 引言

随着高新技术在军事上广泛应用, 未来战场将向全方位、联合化、深层次和快节奏的方向发展, 因此在实时性、安全性与可靠性方面对作战信息的传输提出了更高的要求。指挥控制系统作为现代战争中的“军力倍增器”, 是提高整体作战效能的关键。网络是指控系统的关键与核心, 是连接信息化战场的纽带, 在指

挥控制、战场协调、火力攻击等各方面至关重要^[1], 所以保持指控系统网络的健康运行非常重要。指控网络组成和结构日趋复杂化, 因此发生故障和功能失效的几率日益增大, 网络的维护和保障成本也越来越高。网络设备的测试及故障诊断技术越来越成熟, 测试手段也更加多样化^[2]。在指控系统中引入以预测技术为核心的故障预测和健康管理 (Prognostics and Health Management, PHM) 技术, 可以提高网络保障的能力, 规避网络故障带来的风险, 降低维修保障成本。

1 指控系统网络 PHM 体系结构

以某指控系统为例, 该指控系统是一个多网合一

收稿日期: 2016-04-25

修回日期: 2016-06-14

基金项目: 军内科研项目 (JN[2012]DZ02)

作者简介: 许卫强 (1991—), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 研究方向为装备保障、指挥信息系统测试诊断。

的综合通信系统,其核心是地域通信网。在地域通信网中,无论是情报传输与信息处理,或是作战指挥信息的下达与上传,以及自动化武器系统的控制,都是建立在计算机网络平台上的。根据 PHM 构建标准框架体系,如图 1 所示。

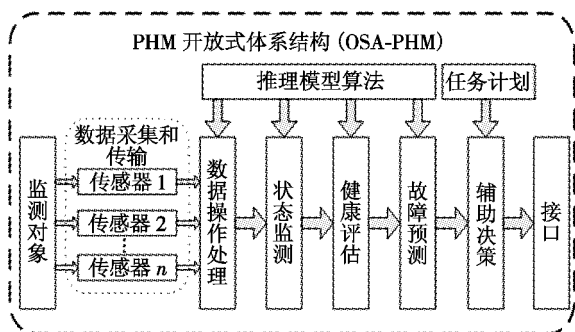


图 1 PHM 系统构建标准框架

Fig.1 Standard framework PHM system

结合网络实际特点,网络 PHM 系统主要模块及其功能描述如下。

1) 数据采集和传输模块。其主要功能是采集相应系统、网络设备、节点等工作数据信息。对大部分网络设备来说,主要依托于网络管理系统,从管理信息库 (Management Information Base, MIB) 获取数据信息。MIB 是网络管理中由信息组成的虚拟数据库,可提供被管对象的基本信息。网络管理者直接通过控制被管对象的信息区对网络设备进行控制、配置或监控。该模块作为 PHM 系统的起点,为后续故障预测和健康管理等工作的进行提供数据支撑。

2) 数据操作处理模块。该模块主要对前一模块获取的数据进行处理,把获取的数据转换成下步所需的数据形式^[3]。通过某些算法,进行数据特征提取。网络系统或部分关键网络设备的健康状态一定程度上可由这些数据特征描述。处理数据通常采用的算法主要有数据平均值,数据标准偏差等统计的方法,以及数据挖掘、卡尔曼滤波、小波变换和快速傅里叶变换等其他方法,根据不同数据的处理需求选择适合的方法。

3) 状态监控模块。状态监控模块的作用是接收数据获取模块、数据操作处理模块以及其他子系统当前状态信息。运用数据挖掘、统计等数据处理手段,近似得到系统各参数的阈值或极限值以及最优指标等信息。通过某些检测及故障诊断方法,将处理得到的数据与系统正常工作历史数据、故障历史数据进行分析比较,计算和评估出系统当前工作状态^[3]。通过与最优指标或阈值之间的比较分析,判断当前参数信息是否处于合理区间,工作状态是否正常,若不正常,则进行报警。

4) 健康评估模块。健康评估模块的主要功能是采用灰度、信息熵、云模型等相关的健康评估算法,依

据故障监控模块中输出的信息,结合系统历史数据对应健康状态的表现,对被监测的网络系统以及关键网络节点的健康状态进行健康状态评估。确定被监测系统或节点当前的健康状态等级,为下一步预测故障及制定保障计划提供指导。

5) 故障预测模块。故障预测模块的功能是综合以上各个模块的数据信息和评价结果,进行信息融合。运用支持向量机 (SVM)、人工神经网络 (ANN) 等各种预测方法,对网络系统以及监测节点未来的健康状态进行评估和预测。结合历史健康状态信息估计剩余使用寿命,对关键性能指标进行趋势预测。

6) 辅助决策模块。辅助决策模块接收来自故障监控、健康评估以及故障预测模块的数据信息。分析前面各模块的输出结果,给出可供参考的决策,为网络系统规划、数据管理、设备维修以及其他健康管理工作提供理论依据。

7) 用户管理模块。通过制定各种策略,采用相应的算法和测试设备,完成软硬件系统的设计,实现用户与系统的友好交互,为管理、决策、维修等人员提供良好的易操作管理界面,提供便捷、有效的数据获取和处理方式^[4]。显示被监测对象的健康状态,实现故障报警以及提供相应的维修保障策略。

2 关键技术说明

2.1 管理结构

在构建指控网络 PHM 系统时,必须最大程度上减轻对网络传输的影响,同时考虑其管理上的集中与地理上的分布特性。利用移动代理 (Mobile Agent, MA) 技术构造分层分布式网络 PHM 体系结构^[5],可解决网络 PHM 中的信息交互问题,其结构如图 2 所示。

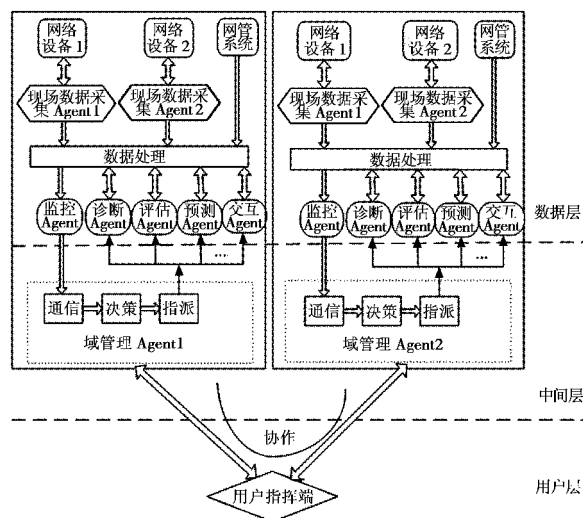


图 2 指控网络 PHM 管理体系

Fig.2 Allegations of network PHM management system

该体系结构分为 3 个管理层次:数据层操作对象一般为被管网络设备,通过网络管理协议或单体测试设备,获取监测数据信息,执行交互、评估与预测等操作;中间层为域管理 Agent,介于用户层与数据层之间的管理层次,对应部署于网络各自自治域的管理节点,负责管理属于该域对象信息的采集、资料库的维护以及 MA 的指派和回收等,完成故障信息的上报以及域间的咨询协作;处于用户层的用户指挥端负责整个网络的管理信息调度、域管理代理的加入和退出以及跨域的故障诊断。在此结构中,各管理域负责完成网络数据的处理计算,由此管理信息的传输得到了有效的简化。这种紧内聚、松耦合、弱中心控制的优点,能够适应指控网络的管理特点,并且易于扩充和调整。

2.2 评估指标的选取

普通互联网和现代指控通信网络有许多相似之处,所以其多数性能指标也适合于指控网络。网络性能研究面向未来数字化部队作战任务,在此主要关心其通信性能。通信网络的基本业务指标,大致可以分为 3 类:1) 响应能力,即从系统得到输入到给出输出之间的时间;2) 处理能力,如系统在单位时间内能处理正常作业的个数;3) 有效性,即在给定的时间内,硬件设备和软件系统等各种部件被使用的时间比例^[6]。通信网响应能力是由响应时间、延迟和延迟抖动 3 个指标组成,反映网络的时效性。处理能力由吞吐量、丢包率和呼损率 3 个指标组成。

理论上考虑的因素越多评估效果越全面,但在实际应用中,指标的选择并非如此。各因素之间常常存在复杂的相关性,考虑因素过多,很难抓住因素间的主要关系,因此需提取出数据的主要信息,对数据进行处理,使高维数据降维,从而提高模型评估的准确率。本文从网络系统响应能力和处理能力出发,简化研究模型,采用主成分分析(PCA)对样本数据进行降维降噪处理,选择贡献率为 90% 以上的主成分分量,作为最终参与系统健康评估的指标参量^[7]。

2.3 健康评估流程

网络的健康状态描述的是当前网络状态与理论上正常状态相比,性能下降或偏差的程度。在 PHM 中它可给后续的网络故障管理和维护工作提供一定的指导。网络健康状况的评估流程如图 3 所示。

通常的思想是通过反映网络性能状态的各个参数分别进行评估,将各个评估结果加权融合得到最终的评估结果。在评估结果的基础上实现向评语的不确定转换。研究的难点之一是如何确定各个参数在网络性能评估中的权重。在此利用熵值法^[8],消除人为因素

对评价结果的主观影响,确定指标权重基本步骤如下所述。

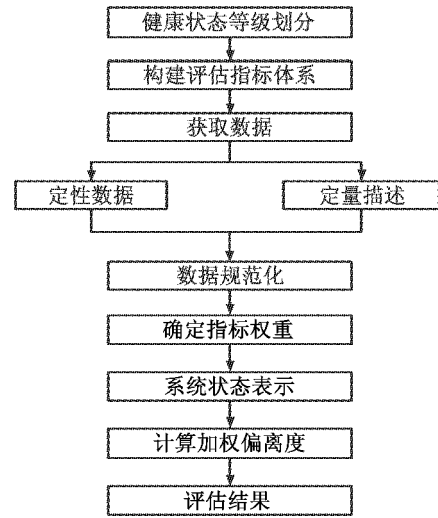


图 3 网络健康状况的评估流程

Fig. 3 Process of network health assessment

1) 标准化。

$$A_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

式中: A 为标准化结果; a 为观测值。

2) 求指标信息熵 e 和效用值 d 。

第 j 项指标信息熵为

$$e_j = - \frac{1}{\ln \eta} \sum_{i=1}^{\eta} A_{ij} \ln A_{ij} \quad (2)$$

信息效用值为

$$d_j = 1 - e_j \quad (3)$$

3) 确定权重。

$$\omega_j = d_j / \sum_{j=1}^n d_j \quad (4)$$

信息效用值越高,表明该项指标越重要,对评估结果影响越大。定量信息不能够直观表示系统的运行状态,因此将健康状态进行等级划分,构建评语集,用以描述网络运行状态,即 $V = \{ \text{健康, 亚健康, 退化, 严重退化, 故障} \}$ 。健康评估通常要实现定量属性评估向定性描述的转化,可采用云重心模型实现这种定量信息与定性信息的不确定转换。其基本步骤如下所述。

1) 计算评估指标 x_i 的统计特征量,包括样本均值、一阶中心距、样本方差等,计算方法详见文献^[7],在此不再赘述。

2) 系统状态的表示。用云模型来刻画指标参量 (K 个),系统状态则用一个 K 维云来表示。 K 维综合云重心的位置 L 表示系统状态, L 是一个 K 维向量,即 $L = (L_1, L_2, \dots, L_K)$ 。

理想状态下, K 维云的重心位置为 L^0 , 其位置由向量 a^0 (云重心位置) 和 b (云重心高度) 共同决定, $L^0 = a^0 \times b$, 其中, $a^0 = (Ex_1^0, Ex_2^0, \dots, Ex_K^0)$, $b = (b_1, b_2, \dots, b_K)$ 。当网络系统的状态发生改变, 其重心位置 L 也会发生变化。

3) 加权偏离度的计算。网络系统的状态发生变化时, 相应云重心的位置向量发生改变, 此时的变化用加权偏离度 θ 来表示, 云重心位置向量变为: $a^1 = (Ex_1^1, Ex_2^1, \dots, Ex_K^1)$ 。则云重心位置变为 $L^1, L^1 = a^1 \times b$ 。通过 L^0 和 L^1 的比较, 把差异值做归一化处理, 得到向量 $L^c = (L_1^c, L_2^c, \dots, L_K^c)$ 。其中

$$L_i^c = \begin{cases} \frac{L_i - L_i^0}{L_i^0} & L_i \leq L_i^0 \\ \frac{L_i - L_i^0}{L_i} & L_i > L_i^0 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, K \quad (5)$$

由此可得到加权偏离度 $\theta = \sum_{i=1}^k \omega_i \cdot L_i^c$ 。

4) 定量信息到定性信息的不确定转化。将评语集 V 中的评价元素分别置于连续的语言标尺上, 每个评语值均用对应的云模型来表示。由此构成一个定性评测的云发生器, 将加权偏离度输入评测云发生器, 如图 4 所示, 横坐标的量化值表示网络系统健康状态, 纵坐标则表示状态等级相对应的隶属度。

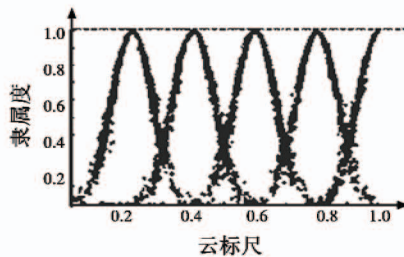


图4 健康评估云发生器

Fig. 4 Health assessment cloud generator

2.4 故障预测流程

故障预测是 PHM 系统显著的特征之一。故障预测是指综合利用如监测的参数、系统工作状态、历史实验数据和经验等各种数据信息, 借助各种推理技术和预测模型, 预测系统可能发生的故障, 评估部件或系统的剩余使用寿命^[9], 实现流程如图 5 所示。

本系统综合运用基于模型和基于数据驱动相结合的方法。侧重于物理过程以及系统中组件之间的相互关系, 采用机器学习和统计模式识别的方法来检测参数变化。综合运用信息融合、数据挖掘以及神经网络等技术对各种可用的数据信息进行预测操作。更加精确地进行性能趋势预测, 准确地进行故障征兆识别, 为制定有效的维修保障计划提供可靠依据。

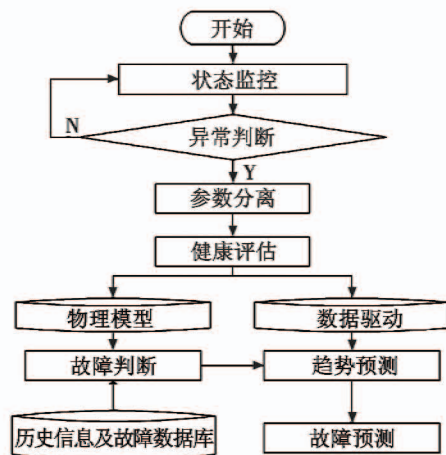


图5 网络故障预测的流程

Fig. 5 Process chart of network fault prediction

3 实例分析

群指挥所子网中的数字通信网由计算机、不同频段的高速电台以及光纤接口等有线和无线传输方式, 通过通信控制机和分线盒等, 实现指挥车之间的互联与数据传输。数字通信网又可细分为有线话传、有线数传、无线话传和无线数传 4 部分, 不同的网络通信方式所依赖的网络设备各不相同^[10-11]。本文选取某典型数据通信链路进行模拟仿真, 通过对参数指标的统计分析, 进行网络健康评估, 最终实现故障预测。

借助新型指控系统网络监控管理服务软件, 可以实现对各型通信网络控制设备(简称通控器)、综合接口设备等通信设备的配置与管理, 同时可对网络及通信设备运行状态进行监控和工作参数的获取。如图 6 所示为综合指挥车网络连接节点图, 绿色表示已连接, 且连接正常, 灰色表示未连接或者连接不正常。通过网络监控可获得丢包数、差错率、时延等指标统计量。

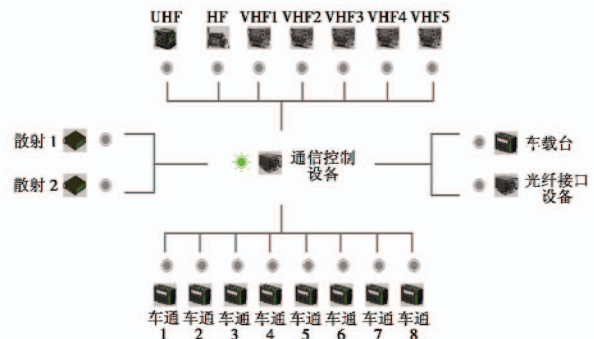


图6 综合指挥车网络节点图

Fig. 6 Node graph of integrated command vehicle network

在网络中加载多种类型的业务流量, 包括 FTP, data, telnet 等。网络中各项服务的负载情况改变时, 记录各个时刻的参数指标值, 如时延、吞吐量、数据差错

率、时延抖动、丢包数等。获取一段时间样本数据如表 1 所示。加大链路的数据传输量,使其吞吐量远超正常工作量,直至发生网络拥塞,系统性能出现异常,记录此种情况下网络性能指标各参数值;改变其中一个传输节点工作条件,使其偏离正常工作状态,统计其他参数变化情况。以网络正常运行的参数值为正常样本,网络拥堵、节点异常等条件下的参数值作为故障样本,统计结果如表 1 所示。

表 1 样本统计结果

Table 1 Result of sample statistic

指标	延时/s	吞吐量/ (Mbit·s ⁻¹)	延时抖动/ ms	数据差错率/ %	丢包率/ %
正常 样本	0.005	0.2	0.4	0	0
	0.014	1.78	1.5	0	0
	0.025	5.82	3.6	0	0
	0.036	8.34	4.2	0	0
故障 样本	0.007	0.84	0.7	3.2	2.1
	0.172	5.65	13.5	7.3	6.4
	0.023	12.56	2.1	14.1	10.2
	4.325	26.73	196.4	26.8	20.4

本文将指控网络系统的健康状态评语集 V 量化为 $(1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2)$, 用 Matlab 进行编程, 将这 5 个等级参量置于连续的语言值标尺上, 用云模型实现各状态等级的不确定语言描述^[12]。对得到的样本进行归一化和 PCA 处理, 根据熵值法确定各指标权重。然后根据健康评估流程, 计算指标参数的数字特征量, 求解加权偏离度 θ , 即偏离理想状态的距离。将得到结果输入评测云发生器, 可得到相应的状态描述。评估结果如表 2 所示。

表 2 网络评估结果

Table 2 Results of network assessment

场 景	延时/ s	吞吐量/ (Mbit·s ⁻¹)	延时抖 动/ms	数据差 错率/%	丢包 率/%	加权偏 离度 θ	评估 结果	可信 度/%
1	0.021	1.21	1.2	0	0	-0.082	健康	100
2	0.016	0.24	0.3	0	0	-0.117	健康	100
3	0.072	9.63	5.6	0	0	-0.162	亚健康	86
4	3.245	37.60	176.7	31.4	24.5	-0.902	故障	100
5	0.110	14.16	27	2.1	0.8	-0.427	退化	90
6	1.084	18.7	86	3.4	1.2	-0.712	严重退化	100
7	4.532	43.4	126	27.5	14.5	-0.853	故障	100

如场景 3 根据偏离度计算公式得出的 $\theta = -0.162$, 即距离最佳状态的距离为 0.162, 在云标尺上用刻度表示为: $1 - 0.162 = 0.838$, 是距离理想状态即完全健康状态的距离, 对应图 4 “健康” 和 “亚健康” 两个云对象。通过做差比较不难发现, 该状态信息隶属于 “健康” 云对象的程度, 小于隶属于 “亚健康” 云对象的程度。因此, 该网络系统的健康状态评估结果更偏向 “亚健康”, 所以评定结果为 “亚健康”, 即网络总体性能有所下降, 但主要性能指标仍在允许的范围内, 仍能满足使用需

求, 但已经有性能下降的趋势。

表 2 中, 场景 1, 2 为网络系统健康状态下的正常样本; 场景 3 为传输控制设备主板温度过高, 系统的工作状态受到了一定影响时的样本数据; 场景 4 为突然增大网络负载, 造成网络拥塞, 丢包率和差错率急剧升高, 网络性能已经不能满足正常工作需求时采集的数据。从评估的结果来看, 较为准确地反映了网络的健康状态, 符合实际情况。通过对健康状态的关注, 可以有效地进行故障预测, 为后期辅助决策提供支持。

4 结束语

指控网络组成和结构的复杂性日益提高, 因此有关指控网络的故障预测及健康管理是一项复杂而系统的工程。本文结合 CBM/PHM 应用标准, 根据指控网络结构特点, 建立了基于 MA 的分层分布式网络 PHM 体系结构。利用云重心评估法将网络系统状态的定性指标和定量指标进行了有效转化, 将网络健康状态量化为 5 个等级, 更加符合实际情况, 可以有效地处理网络健康评估状态主观性和模糊性。经过计算和实验验证, 使用该方法得到的评估结果与实际经验判断基本吻合。

网络 PHM 技术的应用不仅可以提高网络的安全性和可靠性, 提升网络故障预警能力, 而且能够延长网络持续服务时间, 减少网络故障带来的风险, 对保证战场通信、增强指控系统的保障能力、更好地发挥网络作战效能具有重要意义。

参考文献

- [1] 景博, 汤巍, 黄以锋, 等. 故障预测与健康管理系统相关标准综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1301-1307.
- [2] 曹文斌, 陈国顺, 牛刚, 等. 网络设备测试技术综述[J]. 电光与控制, 2014, 21(6): 13-18.
- [3] 孙盛坤, 叶文. 新一代航空武器装备的故障预测与健康健康管理技术[J]. 科技信息, 2011(31): 22-23.
- [4] 杨敏. 液体火箭发动机试验台健康状态评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [5] 温祥西, 孟相如, 李明迅. 网络故障预测与健康健康管理关键技术综述[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(1): 146-154.
- [6] 温祥西, 孟相如. 基于支持向量机和云模型的网络健康状态评估[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(1): 175-176.
- [7] 张仕新, 管翔, 李浩. 基于云重心评估法和熵值法的装备技术状态评估[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12): 4015-4018.

够体现飞行员的意图是今后研究的方向之一;而且,空战是动态的,获取的信息也存在模糊性,为了在模型基础上自适应地对飞行员的行为、目的进行推理,可以考虑引入模糊理论、强化学习等方法。

参 考 文 献

[1] 吴文海,张源原,刘锦涛,等. 新一代智能座舱总体结构设计[J]. 航空学报,2016,37(1):290-299.

[2] 杨治琰. 战斗机飞行员操作程序的设计和评估[J]. 电光与控制,2000,16(1):9-19.

[3] 王黎静,郭奋飞,何雪丽,等. 大型客机飞行员操作程序综合评价[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(11):1266-1270.

[4] SANDERS W H, MEYER J F. Reduced base model construction methods for stochastic activity networks[J]. Selected Areas in Communications, 1991, 9(1):25-36.

[5] BOOCH G, DOUGLASS B, CERNOSEK G. Unified modeling language for real-time systems design[M]. Califor-

nia; Ratical Software Corporation, 1996:1-10.

[6] VAN DER AALST W M P. Formalization and verification of event-driven process chains[J]. Information and Software Technology, 1999, 41(10):639-650.

[7] PETERSON J L. Petri net theory and the modeling of systems[M]. London: Prentice-Hall 1981:1-21.

[8] 熊国平. 容错系统中故障检测与同步功能的建模[D]. 武汉:湖北大学,2011.

[9] 曲长征,杨军,徐英,等. 基于 ExSpect 的维修保障联邦成员开发[J]. 系统仿真技术,2010,6(3):253-257.

[10] 贾积身,刘思峰,党耀国. 基于 ExSpect 语言的维修过程建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(1):143-145.

[11] 崔悦. 基于看板的复杂制造过程拉式控制方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2013.

[12] 江式伟,吕卫民,冯浩源. 基于时间 Petri 网的装备体系可靠性建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(4):895-899.

(上接第 26 页)

[4] XU G H, KAILATH T. Fast subspace decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(3):539-551.

[5] PAULRAJ A, ROY R, KAILATH T. A subspace rotation approach to signal parameter estimation[J]. Proceedings of IEEE, 1986, 74(6):1044-1046.

[6] 陈超. 传播算子算法 DOA 估计研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.

[7] AKKAR S, HARABI F, GHARSALLAH A. Improved reactance domain unitary propagator algorithms for electronically steerable parasitic array radiator antennas[J]. IET

Microwaves, Antennas & Propagation, 2013, 7(1):15-23.

[8] 刘剑,王廷伟,黄知涛,等. 共轭传播算子测向算法[J]. 通信学报,2008,29(5):13-18.

[9] 刘剑,李堰,宋爱民. 基于实值传播算子的非圆信号 DOA 估计求根算法[J]. 信号处理,2011,27(10):1605-1609.

[10] 刘剑,黄知涛,周一宇. 基于扩展传播算子的非圆信号测向方法[J]. 信号处理,2008,24(4):556-560.

[11] 闫锋刚,刘帅,金铭,等. 基于 MUSIC 对称压缩谱的快速 DOA 估计[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(11):2198-2202.

(上接第 50 页)

[8] 田丰,邢清华,刘侃. 航空兵后勤保障组织指挥效能评估[J]. 计算机工程与应用,2011,47(12):217-219.

[9] CAO J, LIU Y, DAI Y. Network traffic prediction based on error advanced DGM (1,1) model [C]//International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, IEEE, 2007:6353-6356.

[10] 司光亚,王艳正,李仁见,等. 指挥控制体系网络化建

模研究与实践[J]. 指挥与控制学报,2015,1(1):19-24.

[11] 吕朋亮,陈国顺. 指控装备多 Agent 远程监测与诊断系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2015,23(5):1599-1601.

[12] 齐伟伟,夏良华,李敏,等. 基于云重心评估法的装备健康状态评估[J]. 火力与指挥控制,2012,37(4):79-82.

