

新型防化发烟车 RMST 一体化设计与关键技术分析

李勇¹, 高晓辉², 潘恩超², 韩朝帅²

(1. 军事科学院科研部, 北京 100091; 2. 军事科学院防化研究院, 北京 100091)

摘要: 针对我军装备可靠性维修性保障性测试性 (RMST) 设计中存在的问题, 着眼防化发烟车任务特点和使用保障需求, 提出将能执行任务率指标引入到新型发烟车 RMST 设计研制中, 创建适用于防化发烟车的 RMST 设计流程、一体化设计定量指标体系和顶层参数数学模型, 并对涉及到的系统工程设计、综合权衡优化、指标调整分配等关键技术进行分析; 文章可为提高新型防化发烟车 RMST 设计水平提供一定的研究基础。

关键词: 防化发烟车; RMST 一体化设计; 能执行任务率; 权衡优化

RMST Integrated design and Key Technical Analysis of New Type Smoke Vehicle

Li Yong¹, Gao Xiaohui², Pan Enchao², Han Chaoshuai²

(1. Academy of Military Science, Department of Scientific Research, Beijing 100091, China;

2. Academy of Military Science, Chemical Defense Research Institute, Beijing 100091, China)

Abstract: in view of the equipment reliability, maintainability, supportability, and testability (RMST) problems existing in design, focus on the characteristics of smoke vehicle tasks and use of security requirements, a task rate index is introduced into the new type smoke vehicle RMST design, creating suitable RMST design process, integrated design quantitative index system and level parameter mathematical model, and analyzing the involved systems engineering design, comprehensive balance optimization, the index key technology such as adjust the allocation. This topic can provide a certain research foundation for improving RMST design level of new type smoke vehicle.

Keywords: smoke vehicle; RMST integrated design; mission capable rate; balancing optimization

0 引言

防化发烟车主要用于对重要目标实施烟幕遮蔽, 干扰敌激光、红外、毫米波观瞄、侦察器材及精确制导武器、雷达等, 目前已配发数字化机步旅、高机步合成旅、化工旅、防化团和防化营(连)等各类部队使用。通过前期对各型防化发烟车配发到部队的使用保障情况调研分析, 发现很多故障的发生和维修保障案例都将问题根源指向装备的质量设计环节。如何在设计研制阶段重视并提出切实可行的防化发烟装备质量特性设计方法, 是当前急需装备设计人员和装备质量特性研究者联合解决的问题。

世界主要国家在发烟车研制设计中非常重视 RMST 的一体化设计, 认为发烟车的 RMST 之间有着非常紧密的作用关系, 各特性设计之间需进行综合权衡, 保障策略的优化与维修性设计可以直接影响可靠性设计。法国采用 MT 公司生产的 TRS18 航空发动机作为发烟车主发烟机, 特点

是 ORU 设计和机内检测设计考虑非常完备, 具有良好的维修性和测试性, 但价格较为昂贵^[1]; 美国早在上世纪 90 年代就已将 THUNDER、LCOM、LORA、CALM 等多种先进的仿真模型应用到 M56、M1059、XM49 等型发烟车的研发中, 成功对多种质量特性参数及后勤保障系统所需的各种维修保障资源进行优化^[2]。

考虑到我军当前防化发烟车环境适应性和安全性设计与其它四性关联性不强且设计验证方法较为完善, 后期相关质量问题反馈较少, 因此本文重点研究其可靠性、维修性、保障性、测试性 (Reliability、Maintainability、Supportability、Testability, 简称 RMST) 指标之间的作用关系, 在已有国军标和相关研究基础上, 构建防化发烟车 RMST 设计总体流程和一体化设计定量指标体系, 并对设计过程中涉及的关键技术进行分析说明。

1 新型防化发烟车 RMST 一体化设计基础

1.1 RMST 设计工作思路

目前我国关于 RMST 设计的军标有近 30 项^[3], 其中规范的可靠性相关设计项目有 13 个、维修性相关设计项目有 6 个、保障性相关设计项目有 15 项、测试性相关设计项目有 8 项, RMST 设计工作项目多、层级多, 且各特性之间

收稿日期:2018-09-10; 修回日期:2019-01-21。

作者简介: 李勇(1977-), 男, 山东潍坊人, 副研究员, 主要从事防化烟火装备与保障论证方向的研究。

通讯作者: 潘恩超(1977-), 男, 山东潍坊人, 工程师, 主要从事防化装备论证方向的研究。

互相作用关系明显。当前在防化发烟车可靠性、维修性、保障性、测试性工程设计领域中, 通常见到的是任务可靠度或平均故障间隔时间 (MTBF)、平均修复时间 (MTTR), 以及故障检测率 (FDR)、故障隔离率 (FIR) 等指标, 没有像性能指标那样有全面完整的战术、技术指标体系和系统级参数指标, 以实现工程设计中各特性的统筹权衡^[4]。

因此, 在防化发烟车 RMST 设计工作中, 急需关注一下两个问题: 一是必须结合发烟车任务剖面特点, 合理规划各层次各分系统关键工作项目, 尽可能提高质量设计效率, 以确保足够多的人力财力用于性能的设计; 二是构建适用于发烟车的 RMST 一体化设计准则和机制, 综合权衡和优化各特性指标, 实现装备质量的整体最优。要解决这两个问题, 就必须明确 RMST 各指标间的作用关系, 分析各指标设计工作之间的关系, 进而科学制定防化发烟车 RMST 设计流程; 必须结合防化发烟车作战任务剖面特点, 选取适用的顶层设计指标, 构建其设计指标体系和顶层参数模型, 进而实现 RMST 综合权衡和优化。

1.2 防化发烟车 RMST 一体化设计流程

1.2.1 RMST 各参数作用关系描述

RMST 各参数作用关系是分析 RMST 各特性设计工作的基础, 也是构建发烟车 RMST 总体设计流程的重要组成部分^[5]。通过对各质量特性参数的内涵及影响机理进行研究, 可总结归纳为以下 4 个方面: ①功能结构、材料特质固定的基础上, 冗余设计是提高平均故障间隔时间等可靠性设计参数值的有效措施, 但同时也会导致平均故障修复时间的提高、内测装置空间不足、故障检测率下降等, 进而降低维修性测试性设计水平。②保障性设计参数包括装备保障性的设计参数和保障系统的使用参数, 其中装备保障性设计参数主要指与装备战备完好性、保障资源相关的可靠性、维修性、测试性、运输性等设计参数, 保障系统的使用参数主要指平均备件延误时间、备件利用率等^[6]。③故障隔离率和故障检测率对确定平均故障修复时间参数值至关重要, 但过多的机内测试装置会导致虚警率的提高、平均故障间隔时间的缩短和电控元件保障要求的提高^[7]。④RMST 各参数之间具有互联互换的关系, 选取具有代表性和适用性的参数即可。

1.2.2 RMST 设计工作关系描述

由 RMST 各参数间作用关系描述可知, 单纯追求任务可靠性可能导致基本可靠性的降低, 进而造成维修保障负荷增加; 保障性在内涵上与可靠性、维修性、测试性相对独立, 但可靠性设计、维修性设计和测试性设计是保障性设计的重要基础, 保障性总体上协调和指导可靠性、维修性、测试性的设计; 测试性是维修性发展的延伸, 合理分配机内外测试性设计对提高装备的维修性保障性具有非常重要的作用。本文在对 RMST 各参数间作用关系描述的基础上, 构建 RMST 各特性设计工作关系模型, 如图 1 所示。

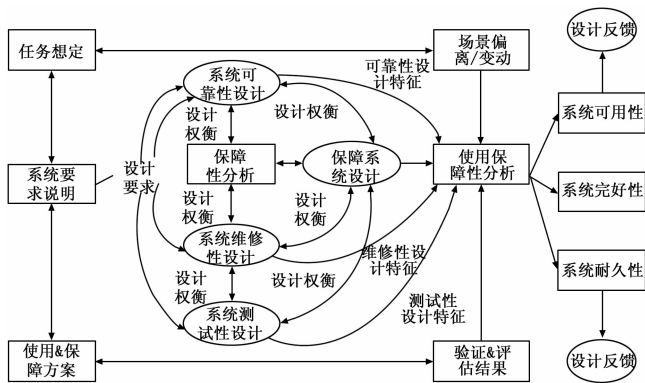


图 1 防化发烟车 RMST 设计工作间关系模型

由图 1 可知, 装备的 RMST 设计工作应同步开展、相互支撑、充分融合; 保障系统应建立在可靠性、维修性、测试性设计的基础上, 有针对地开展分析和设计; 装备 RMST 设计最终由装备的完好性、可用性、耐久性等使用保障需求指标考核; 装备 RMST 设计分析的成果应包括设计分析报告和维修保障方案两个部分。

1.2.3 防化发烟车 RMST 设计流程

在对 RMST 各参数关系描述和设计工作关系分析的基础上, 结合防化发烟车主要任务剖面和使用保障需求, 提出在装备结构方案设计的同时自下而上开展部件级—子系统级—系统级 RMST 分析, 自上而下开展系统级—子系统级—部件级 RMST 权衡优化设计, 图 2 为防化发烟车 RMST 设计总体流程。

如图 2 所示, 首先, 在防化发烟车研制方案设计过程中并行开展 RMST 系统设计和工程设计, 确保装备具有一定的质量水平; 其次, 对发烟车各部件 RMST 进行详细分析, 采取定性定量相结合的方式分析各个指标参数, 进而推导出子系统级和系统级的指标情况; 再者, 在对装备 RMST 分析的基础上, 根据防化发烟车使用保障需求、一体化设计指标体系和顶层设计指标模型, 通过仿真优化实现对各个特性的耦合分析和综合权衡; 最后, 在综合权衡的基础上, 依次从系统级至部件级进行可靠性维修性保障性测试性的调整和分配, 得出装备的布局调整方案和部件结构更改方案, 并最终生成 RMST 设计分析报告和维修保障方案。另外, 从 RMST 工作间的关系模型和 RMST 设计总体流程可以看出, 防化发烟车 RMST 设计工作项目繁多, 必须有重点的进行筛选, 区分重点对象和重点环节。如在 RMST 系统设计和工程设计阶段, 应以装备系统层面的 RMST 分配和预计为重点; 在 RMST 调整分配阶段, 应以各冗余结构的高可靠详细设计、难点维修项目的维修性保障性详细设计、重点部位的测试点设计为重点。

1.3 防化发烟车 RMST 一体化设计定量指标体系

RMST 一体化设计定量指标体系是指为实现装备系统质量特性整体最优, 对 RMST 各种组合参数与单项参数之间的主从层次和相互关系进行的系列描述。当前常用的

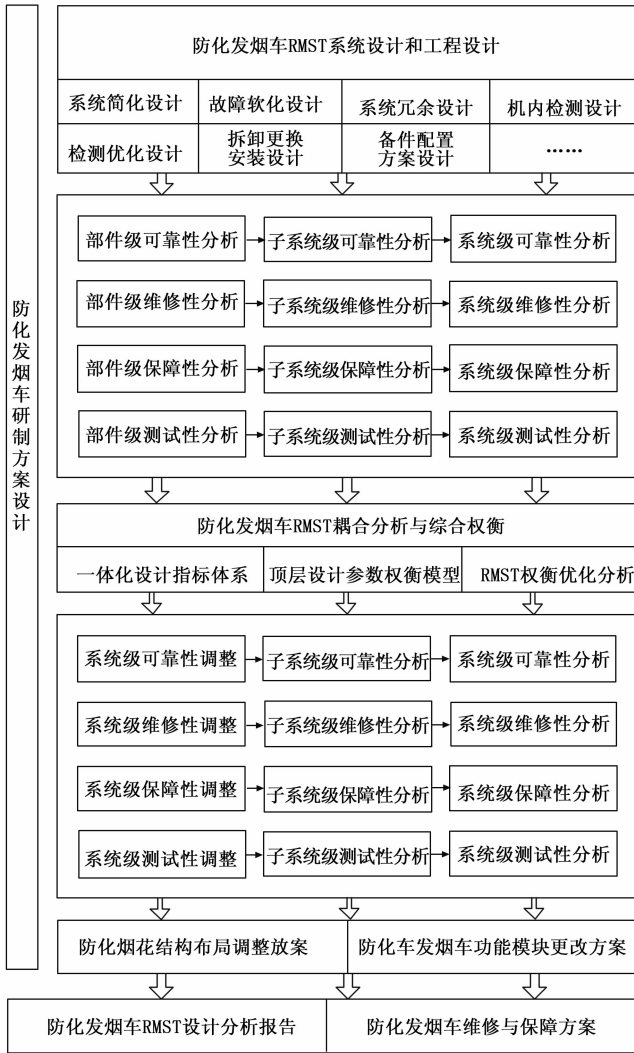


图 2 防化发烟车 RMST 设计总体流程

RMST 单项参数^[8]包括平均 MTBF、MTTR、MTTPF、RST、MLDT、FDR、FIR 等。组合参数主要包括基本可靠度、任务可靠度、维修度、保障度等单项能力指标参数和 P_{OR} 、 A_0 、 P_{MS} 、 MCR 等综合能力指标参数。本文通过分析发烟车系统任务剖面特点，选取 RMST 指标体系的顶层参数，并结合各参数之间的关系构建其 RMST 一体化设计定量指标体系。

1.3.1 防化发烟车任务剖面分析

防化发烟车属于间断工作型装备系统^[9]，其在寿命周期内处于工作、停机相间交替工作状态，典型任务剖面如图 3 所示。

根据图 3 可知，防化发烟车关注的核心是执行任务的成功或失败概率，且防化发烟车辆装备一般都是成建制执行作战保障任务，一台装备的损伤并不会直接导致任务失败，故发生故障前工作时间为有效工作时间，应选取能执行任务率参数作为 RMST 顶层参数来表达装备系统的整体质量水平。能执行任务率与使用可用度相当，都是能执行

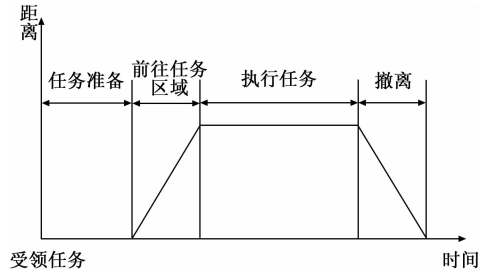


图 3 防化发烟车典型任务剖面

任务时间与任务规定时间之比，区别是使用可用度采用的日历时间，能执行任务率须在日历时间中减去所有停机时间，其描述的是系统故障前的工作时间与整个任务持续时间之比，主要适用于车载通信装置、车辆整机系统等发生丧失规定功能故障前任务时间有效、故障后任务时间无效的装备系统。任务成功率参数适用于一旦发生故障则标志任务失败的系统，战备完好率参数适用于一次性消耗使用、不考虑使用保障的系统，因此任务成功率和战备完好率同样不能作为防化发烟车的 RMST 顶层设计参数。

1.3.2 防化发烟车 RMST 一体化设计定量指标体系

根据防化发烟车 RMST 顶层参数的选择，构建 RMST 一体化设计定量指标体系，架构如图 4 所示。

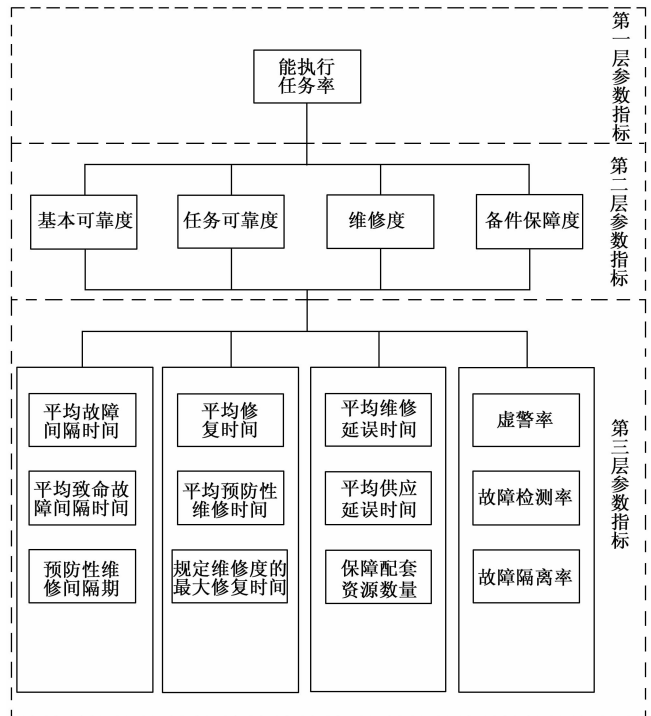


图 4 防化发烟车 RMST 一体化设计定量指标体系架构

由图 4 可知，防化发烟车 RMST 一体化设计定量指标体系第一层是由可靠性、维修性、保障性、测试性参数有机组合而成，是装备系统在整个寿命周期内持续保持成功使用的概率表达；第二层是可靠性、维修性、保障性、测试性参数的技术指标，是装备系统各单项能力特性的体现；

第三层是可靠性、维修性、保障性、测试性参数的工程设计指标, 是在装备研制设计中直接实现的。

2 关键技术

2.1 RMST 系统设计与工程设计

根据装备研制和设计规律, 防化发烟车 RMST 系统设计和工程设计中, 首先进行可靠性维修性测试性的系统设计, 再开展可靠性维修性测试性保障性的工程设计工作^[10]。

防化发烟车可靠性系统设计主要包括系统可靠性方案的权衡和择优、可靠性指标的预计和分配、系统简化设计、故障软化设计和系统冗余设计 5 部分内容。其中, 可靠性方案的权衡应采用性能与可靠性兼容体制, 系统简化应尽可能实现一种电路多种功能、一种电路多次使用, 系统冗余设计主要包括整体冗余与单元冗余设计、工作冗余与旁待冗余设计、停机检修与联机检修设计。防化发烟车可靠性工程设计主要包括元器件的正确选型、热电应力设计、应力负荷降额设计、热设计核查分析、电磁兼容设计、参数容差设计、电路接口匹配性设计、失效模式分析与故障安全设计、抗暂态效应设计、潜在通路分析 10 部分内容。

防化发烟车维修性系统设计主要包括维修性指标优化分配、安装场所和设备外部可达性设计、预防维修对象鉴别和预防维修项目内容编制 4 部分内容。防化发烟车维修性工程设计主要包括拆卸更换安装时间设计和参数调整校核时间设计 2 部分内容。防化发烟车测试性系统设计主要包括机内检测设计、检测点优化设计 2 部分内容。测试性工程设计主要指故障检测定位时间的设计。防化发烟车保障性工程设计主要包括各更换模块备件保障的优化设计、平均备件延误时间分析、消耗性备件的配置方案设计、可修复备件的配置方案设计、寿命周期备件保障的优化设计 5 部分内容。

2.2 能执行任务率基础数学模型

构建科学正确、操作性强的能执行任务率参数模型是实现系统整体最优的关键因素。因此, 以一般表决复杂结构(图 5 所示)为基础, 结合我军现行装备维修与供应体制, 构建能执行任务率基础数学模型, 实际工程中可结合装备结构拓展使用。

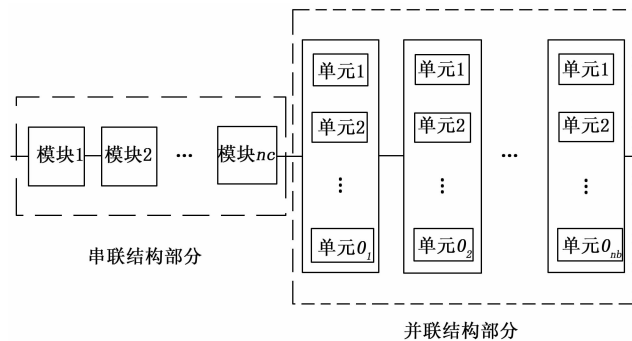


图 5 表决复杂结构一般模型

一般表决复杂结构能执行任务成功率数学模型如下:

$$MCR_f = \frac{\int_0^{t_d} \left[e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} \prod_{j=1}^{n_c} \sum_{g=1}^{o-k} C_{o_g}^k (1 - e^{-\lambda_j t})^g e^{-(o_g - g)\lambda_j t} \right] dt}{t_d} \quad (1)$$

$$t_d + \sum_{i=1}^{n+n_c} \left[1 - \prod_{i=1}^{o_i} [1 - f_i(t_s)] \right]$$

$$\frac{\ln \left(\frac{1}{1 - f_i(t_s)} \right)}{\sum_{i=1}^{o_i} \ln \left(\frac{1}{1 - f_i(t_s)} \right)} [t_{pi} + t_{mi}] + E(\bar{t}_f)$$

式中, c 为串联结构的标识, b 为并联结构的标识, y 为预防性维修的标识; t_d 为系统规定停机时间, 可用两次任务间隔时间表示; t_s 为系统每次任务平均工作时间; n_c 、 n_b 为串、并联结构模块数量; o_i 为模块 i 中单元数量; k_i 为并联结构 i 中表决单元数量; λ_i 为并联结构 i 的单元故障率; $f_i(t_s)$ 为系统故障概率; $f_i(t_s)$ 为模块 i 故障概率, t_{pi} 为结构 i 备件延误时间因子, t_{mi} 为结构 i 维修延误时间因子, $E(\bar{t}_f)$ 为预防性维修延误时间, 模型如下。

$$f_{ci}(t_s) = 1 - e^{-\lambda_i t_s}; f_{bi}(t_s) = \sum_{j=1}^{o-k+1} C_{o_j}^j (1 - e^{-\lambda_i t_s})^j e^{-(o_j - j)\lambda_i t_s}; t_{mci} = \frac{\mu_i e^{-\varphi_{ki} t_{hi}}}{\mu_i T_{kci} + 1}$$

$$t_{pi} = \left\{ \begin{aligned} & \left[t_{p1} \left[1 - \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} e^{-\lambda_i t} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(\lambda_i t)^j}{j!} dt \right] \left[\frac{1}{t_x} \int_0^{t_x} e^{-n_p \lambda_i t} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(n_p \lambda_i t)^j}{j!} dt \right] + \right. \\ & \left. t_{p2}(i) \left[1 - \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} e^{-n_p \lambda_i t} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(n_p \lambda_i t)^j}{j!} dt \right] \right\}; \end{aligned} \right.$$

$$E(\bar{t}_f) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_c} \frac{t_s(t_{fi} - t_d)}{T_{Fi}} & t_{fi} > t_d \\ 0 & t_{fi} \leq t_d \end{cases}$$

$$t_{pi} = \left\{ \begin{aligned} & \left[t_{p1} \left[1 - \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} e^{-\lambda_i t} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(\lambda_i t)^j}{j!} dt \right] \left[\frac{1}{t_x} \int_0^{t_x} e^{-n_p \lambda_i t} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(n_p \lambda_i t)^j}{j!} dt \right] + \right. \\ & \left. t_{p2} \left[1 - \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} e^{-n_p \lambda_i t} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(n_p \lambda_i t)^j}{j!} dt \right] \right\}; \end{aligned} \right.$$

$$t_{mbi} = \frac{\sum_{j=1}^{o-k+1} C_{o_j}^j (1 - e^{-\lambda_i t_s})^j e^{-(o_j - j)\lambda_i t_s} t_m(j, l, \mu_i, \varphi_{ki}, t_d)}{\sum_{j=1}^{o-k+1} C_{o_j}^j (1 - e^{-\lambda_i t_s})^j e^{-(o_j - j)\lambda_i t_s}}$$

其中: n_p 为待修系统数; m_{1i} 、 m_{2i} 、 m_{3i} 分别为本级机构、战役级仓库、战略级仓库对模块 i 备件的定期配发或储存数量; t_{p1} 、 $t_{p2}(i)$ 分别为器材备件从本级库房和战略级仓库到达维修现场的周转时间; t_0 为备件供应周期内的装备系统平均累计工作时间; t_x 为供应周期内平均无备件时间; λ_i 为模块 i 的故障率; μ_i 为模块 i 的修复率; $T_{kci} = \varphi_{ki} t_{hi} + (1 - \varphi_{ki}) t_{wi}$, 为模块 i 的平均故障隔离时间, φ_{ki} 为模块 i 的故障隔离率, t_{hi} 为模块 i 的平均机内测试故障隔离时间, t_{wi} 为模块 i 的平均人工故障隔离时间; n_y 为系统预防性维修项目数; T_{Fi} 为模块 i 的预防性维修周期; t_{fi} 为模块 i 的平均预防性维修时间; $t_m(j, l,$

μ_i, φ_{ki}, t_d) 为维修延误时间因子; 其他参数同上。

2.3 RMST 权衡优化方法

针对不同的装备系统, 采取适当的权衡优化方法对提高设计效率、节省设计周期十分重要。防化发烟车 RMST 设计中, 常用的权衡优化方法有比较分析法、灵敏度分析法和仿真优化方法。

2.3.1 比较分析法

在发烟机分系统 RMST 设计中, 往往存在与国外同类型同水平装备比较分析的情况, 或若干设计分析优劣的需要, 此类情况通过比较分析选取能执行任务率最高者较为适合。但是, 在实际设计中, 经常出现若干方案能执行任务率值相当, 则需进行灵敏度分析, 选取稳健性高者较为合适。

2.3.2 灵敏度分析法

由于技术条件、工艺水平、使用环境等各种因素, 装备 RMST 方案很难达到预想设计指标, 或预想指标的实现需要较高代价、可能导致一些附带的影响。灵敏度分析可以很好地观测这些指标、因素和影响, 以确保选取方案的低风险性。

假设某个 RMST 配置方案为 x^* , 设计指标个数为 n ($n=14$), 给定一个区间 $[x^* - \Delta x, x^* + \Delta x]$, 令:

$$MOR^* = \frac{\partial MOR^*}{\partial x_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

则可给出灵敏度 (稳健性) 的检验函数^[11]为:

$$g(x) = \Delta MOR^* = [MOR_1^*, MOR_2^*, \dots, MOR_i^*, \dots, MOR_n^*] \cdot [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_i, \dots, \Delta x_n]^T = \sum_{i=1}^n MOR_i^* \cdot \Delta x_i \quad (3)$$

利用:

$$g(x) = \begin{cases} \max g(x) \\ x \in [x^* - \Delta x, x^* + \Delta x] \end{cases} \quad (4)$$

可以得到在该区间内 ΔMOR^* 变化的最大值, 若此最大值小于事先规定的可接受值, 即可以确定该方案是稳健的。同时, 几个相邻能执行任务率方案中, ΔMOR^* 最大值中的最小者就是稳健性最好的配置方案。

2.3.3 仿真优化方法

基于仿真的权衡分析方法^[12]是指根据所构建的能执行任务率数学模型, 采用系统动力学仿真原理, 分析能执行任务率与 RMST 指标之间的关系, 权衡获取最佳能执行任务率下的 RMST 指标方案, 也可将现有方案与最优方案进行对比分析, 从而为装备 RMST 指标设计提供决策依据。仿真权衡优化方法的优势在于可以在无数方案中获取最优配置, 但通过仿真权衡优化时必须提供尽可能多的边界条件, 以尽可能确保方案的技术可行性和经济可承受性。由于当前市场上可用于系统动力学仿真的应用软件有很多, 使用方法也较为简单, 这里就不过多介绍。

2.4 RMST 指标调整分配

防化发烟车及其子系统基本由机电系统组成, 采取定期维修和视情维修相结合的修理模式, 可假设寿命周期内各部件服从指数分布。因此, 在系统级 RMST 指标得到调整后,

应基于前期 RMST 分析结果, 通过分配方法合理分配每个子系统的 RMST 指标值; 基于每个子系统具体的维修保障策略和供应保障策略, 得到各部件的 RMST 分配指标值。

防化发烟车的 RMST 分配一般以重要度、技术水平、复杂度和环境条件等 4 个方面为依据, 通过定量的方式进行分配, 分配方法可参考文献 [13]。另外, 对于提高可靠性指标代价较高的子系统, 可考虑从改善维修性和测试性的角度去弥补不足。

3 结束语

针对当前防化发烟车质量设计方法技术欠缺的实际需求, 分析了并行开展防化发烟车 RMST 设计工作的思路, 构建了 RMST 的总体设计流程和一体化设计指标体系, 并探讨了 RMST 系统设计与工程设计、顶层设计参数模型、RMST 调整分配等方面的关键技术, 旨在进一步促进装备 RMST 设计工作的落地见效, 实现防化发烟车性能和 RMST 特性的最优配置。

参考文献:

- [1] Ranjan Kumar, Kazuhiro Lzui, Shinji Nishiwaki. Multi-objective hierarchical genetic algorithms for multilevel redundancy allocation optimization [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94 (4): 891-904.
- [2] Kaveh K D, Abtahi A R, Madjid T. A new multi-objective particle swarm optimization method for solving reliability redundancy allocation problems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 111: 58-75.
- [3] 装备可靠性维修性保障性测试性设计系列标准 (26 部) [S]. GJB1909.1-1994、GJB 1901A2009、GJB368.16、GJB 2547A2012 等.
- [4] 江秀红. 多态复杂系统的可靠性分析及维修策略研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [5] 王 静, 洪东跑, 林树茂, 等. 装备保障性定量参数基本集合研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2016, 345 (3): 55-58.
- [6] 杨拥民, 吴志强. 空间站环控生保分系统 RMS 设计思路和若干关键技术分析 [J]. 载人航天, 2013, 19 (4): 38-44.
- [7] 丁定浩, 陆 军. 维修时间新参数和维修性设计技术新进展 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5 (4): 381-384, 388.
- [8] 丁定浩, 陆 军. 装备寿命周期使用保障的理论模型和设计技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [9] 韩 坤, 何成铭, 刘维维, 等. 以系统效能为目标的装甲车辆可靠性、维修性、保障性和测试性权衡分析 [J]. 兵工学报, 2014, 35 (2): 268-272.
- [10] 杜海东, 吴 纬, 曹军海, 等. 基于系统效能的装甲装备 RMS 指标权衡仿真方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25 (8): 1947-1951.
- [11] 马珍杰. 基于可靠性的舰船全寿命周期费用优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程学, 2015.
- [12] 赵燕伟, 黄凤立, 张国贤. 基于模糊机会约束规划的可靠性优化设计 [J]. 机械工程学报, 2005, 41 (5): 89-93.
- [13] 张永进, 孙有朝, 刘小弟. 基于线性松弛规划的系统可靠性分配决策分析 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (18): 204-212.