

引用格式: 吕刚德, 王海峰, 邓伟. 基于模型的装备维修性设计控制技术[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 523453. LYU G D, WANG H F, DENG W. Design and regulation of aircraft maintainability based on technique model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 523453 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2019.23453

# 基于模型的装备维修性设计控制技术

吕刚德\*, 王海峰, 邓伟

中国航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610091

**摘要:** 伴随数字化设计方法日趋成熟, 飞机装备维修性设计面临如何与三维数字化设计环境下功能性能设计同步的难题。对比分析了数字化环境维修性设计与传统维修性设计的主要差别, 提出了基于飞机装备数字化设计环境维修性设计流程, 研究了维修性设计参数的表达模型以及维修性参数信息在三维设计数字环境中的转化、集成与利用方式。基于图论和网络节点框图, 提出了一种以节点网络图、单节点维修时间模型、维修过程时间模型为表征的飞机装备维修性设计与控制方法。经实例验证, 提出的这套基于数字模型的维修性设计技术, 对装备在数字化设计环境下同步开展维修性设计具有一定的工程指导价值。

**关键词:** 维修性; 设计方法; 评估; 信息模型; 平均维修时间 (MTTRDF)

**中图分类号:** V221; V267; TJ8; G312

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6893(2020)06-523453-09

装备维修性设计的优劣, 历来是影响其使用维修保障效率和用户体验的重要方面。

传统的飞机装备维修性设计是利用基于文本的设计方法, 按照装备大纲规划和技术指南, 借助于辅助性手段, 从定性定量 2 个方面, 通过建模、分配、分析、预计与评价等方法来实现的<sup>[1-2]</sup>。定性设计要求一般通过制定维修性设计准则、设计指南等规范性文件进行约束, 由工程设计人员按要求进行设计落实并确认。在可能的场合, 利用电子样机或实物样机进行演示验证及核查, 确认是否满足定性要求。定量要求的设计, 通常是按相应的故障率分配模型把指标分配到系统和设备, 通过反复的维修性指标分配、分析及预计, 对明显不能满足要求的设计进行改进完善, 然后评估并预计设备和系统的维修时间能否达到指标要求。

按传统方法开展维修性设计时, 由于在飞机装备设计的早期一般不能完全得到维修性设计所

需要的数据, 对改动大的设计和全新设计甚至缺乏数据, 导致不能及时对设计方案的维修性进行评价、计算和迭代改进设计, 只能等到飞机装备各级产品完成设计后的试制、试飞阶段, 通过收集飞机实物试验和外场使用的信息来分析评估其维修性水平, 这时如果达不到定量指标要求, 而要改进维修性使之达到定量要求, 便存在牵涉面广、成本高、周期长等问题, 甚至根本无法更改。这种状况直接导致用户对飞机产品的满意度不高, 且不同程度地影响飞机整体效能的发挥。另外, 现有维修性设计中, 比如对平均维修时间 (MTTR) 指标的分解, 先分到系统再到设备, 设备成了实现要求与否的核心载体, 而实际上在飞机装备的维修性设计过程中, 设备维修性设计过程只是影响其 MTTR 的一部分原因, 飞机总体布局设计的因素才是影响设备 MTTR 的重要原因。

没有将总体布局以及系统设计对维修性的影响很好地考虑进去, 也没有较适用的技术方法来

保证充分的维修性设计,是现有飞机维修性难以达到高水平的重要原因。目前问题的核心是把维修性设计参数作为了设计中独立的设计量,而在飞机完成制造之前的设计过程中,缺乏有效的并行维修性设计的方法和手段,这造成了维修性设计滞后于飞机系统、设备的设计,不能在设计中随着设计方案的变化以及系统、设备安装位置的变化而动态同步地进行维修性管控、计算、评价和优化。

目前飞行器设计的整个过程都实现了数字化,是基于三维实体模型来设计、调整和优化的。现有看似系统化的维修性理论和方法,实际上与飞机装备数字化设计环境是脱节的。为解决这一脱节问题并适应数字化设计需求,就需要将维修性定量指标(比如 MTTR)要求转化为与飞机设计一致的对其设计参数的要求,需要相应的同步设计理论和技术方法。也就是将现有的维修性要求参数转化为设计过程可以设计和控制的物理参数,并研究如何通过对这些物理参数的设计和数值的控制,达到同步实现维修性要求的目的。为此,本文提出了适应数字化需求的基于模型的装备维修性设计方法。

## 1 维修性设计技术过程

装备维修性设计,经历了基于文本方法的维修性设计和基于虚拟维修技术辅助的维修性设计<sup>[3]</sup>2阶段,已经发展到本文涉及的基于装备数字化设计环境的维修性设计阶段。在三维实体设计环境成熟之前,传统的维修性设计、分析、预计方法以及设计过程,是围绕工程设计的多项人工维修性设计与计算活动,与数字化环境设计过程有着明显差别。

传统的维修性设计过程,首先是制定顶层大纲以便对装备研制过程各阶段的维修性设计分析进行规划,提出工作项目和相应要求,然后针对每一个工作项目制定设计准则和指南,给出设计分析的方法以及编制报告的模版。系统和设备设计人员依据这些大纲、指南等顶层文档,各自开展系统和设备的维修性设计。

飞机装备数字化设计环境下的维修性设计过程,是在工程设计环节上的并行维修性设计、分析、预计与评价的过程<sup>[4]</sup>。这种情况下,在装备总

体、系统和设备的设计人员进行功能性能设计的同时,就进行着相应维修性设计和评价,及时动态地完成对各层级维修性设计达标与否的评价,或在装备方案迭代优化以及功能性能参数设计调整时,同时获得对维修性的影响分析,动态地更新装备各层级维修性设计和评价的结果,获得更改设计方案后维修性是否还能达到要求的结论,进而达到并行控制维修性设计的目的。

基于数字化设计环境的维修性设计与传统的维修性设计分析相比,在产品层次划分、参数定义、指标要求转化和设计实现等方面存在显著差异,如表1所示。

表1 数字化设计环境的维修性设计与传统的维修性设计  
Table 1 Comparison of traditional maintainability design and maintainability design in digital design environment

主要差别	维修性设计	
	数字化设计环境	传统的
产品层次划分	物理层次和虚拟层次结合	按整机及系统、设备等物理层级层次
产品定义	按维修过程的划分,可以是虚拟产品 不限于产品物理参数,包含产品及其相关的可靠性、维修性、保障性等参数,以及与维修相关的计算数据参数	按物理层级的上下包含关系定义
产品参数定义	从顶层将维修性指标要求转化为设计参数	仅限于产品物理参数(重量、大小、功能、性能参数)
指标要求转化	融于产品设计过程,可实现维修性动态评价	不转化,只做指标分配 靠装备各设计层级的设计人员按要求设计和分析,对维修性只能使用和统计评价

在数字化设计环境下飞机装备维修性设计实施前,需要对装备维修性要求和使用需求进行论证和确认,以便获得装备整体的指标要求和设计需求。这一论证确认可以采用有关维修性要求论证的方法和数据模型<sup>[5-6]</sup>。本文在分析数字化设计环境的维修性设计与传统的维修性设计分析的差别的基础上,通过对装备维修性设计本质特征的研究,提出基于装备数字化设计环境的维修性设计技术流程,如图1所示。

在论证确认顶层维修性要求后,维修性设计主要过程包括:①利用参数分析与转化的方法,

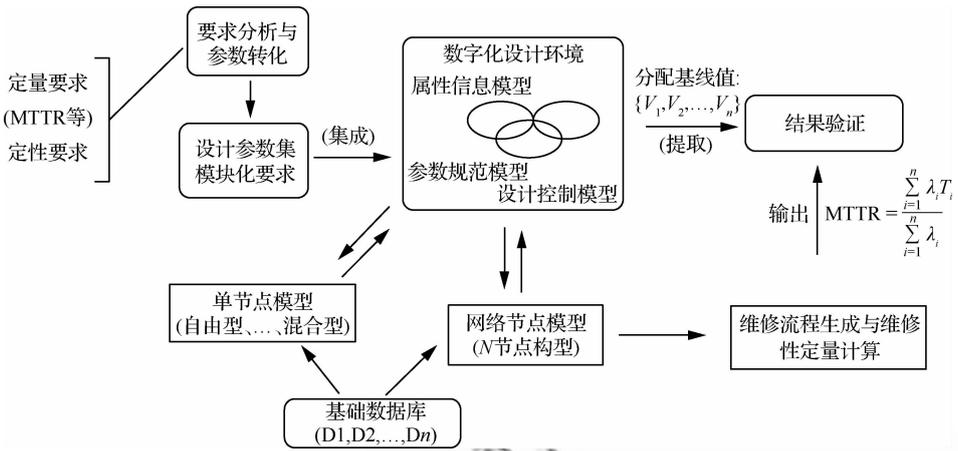


图1 基于三维数字化设计环境的飞机装备维修性设计过程

Fig. 1 Process of aircraft maintainability design based on 3-D digital design environment

将适应新设计条件的、分层模型化的设计参数和维修性参数转化成可利用的参数；② 把相关模型与相应参数集成到飞机数字化设计环境中；③ 研究所有与设备维修过程有关的要素，利用图论理论，将维修过程涉及的设备、口盖、电缆、管线以及连接件等要素，定义成统一的节点模型；④ 研究表达机载设备的维修拆卸、安装过程关系以及人力、工具、保障关系的网络节点模型；⑤ 在基础数据库数据的支撑下，分别利用节点模型和网络节点模型，按维修流程和维修序列，生成维修性定量计算结果；⑥ 对比参数要求转化形成的设计要求基线，验证设计要求的实现情况并进行模型的优化。

## 2 参数转化与信息集成

### 2.1 维修性信息模型

根据模型的性质和形式，装备系统维修性模型分为定性模型和定量模型。定性模型可分为描述性模型、流程图和图解式模型；定量模型可分为计算模型和仿真模型<sup>[7]</sup>。维修性信息模型是指产品在整个寿命周期内维修性相关信息的数字化描述与表达，其完整表达了维修性信息的逻辑结构，使各维修性工程活动能方便地存取和共享信息<sup>[8]</sup>。

本文中维修性信息模型是一组可相对完整表达产品某方面维修性特性的维修性信息集。按维修性信息层级，模型分为舱位信息模型、口盖信息模型、机载产品信息模型、飞机结构信息模型、管

路线缆信息模型等。对模型进行信息融合或信息扩充后，构成系统信息模型、整机信息模型及维修作业数据模型等。系统层级和整机的维修性信息模型是将飞机各产品信息模型按一定规则逻辑组合形成。在飞机装备三维数字化设计环境下，舱位维修性信息模型和系统维修性信息模型是最重要的。舱位维修性信息模型以信息单元的形式分别表示舱位、设备、拆卸关系，包括一系列设备(节点)信息单元、设备拆卸关系单元以及舱位信息单元。系统维修性信息模型也以信息单元的形式表示系统、设备、设备构成、系统层次关系，包括一系列节点(设备)信息单元、系统设备构成单元以及系统层次结构信息单元。实例化后的信息模型表征了产品在飞机设计中实际的维修性设计情况。

飞机装备的维修性信息模型，作为维修性设计实现与飞机功能性能设计同步有效的信息载体，是在飞机装备三维设计环境下开展维修性设计分析的信息组织形式。

### 2.2 维修性参数转化

为了能够在数字化设计环境下实现维修性的设计和定量控制，需要将定量指标要求分解到装备总体布局设计和系统安装设计的设计单元上。对于定性指标要求，转化成结构化条款项，集成到飞机装备舱位和内部设备模型上，并在系统和设备功能性能设计过程中关联推送。其中：推荐性条款项由设备人员通过权衡各设计方案实现，否决性条款项由设计环境直接控制实现。对于定量

指标要求,则按引入的参数转化模型转化到设计环境中与设计参数关联,这是三维数字化环境下实施维修性定量设计和控制的基础。采用基于模型的装备 MTTR 转化方法<sup>[4]</sup>,MTTR 指标要求可以转化到舱位级和舱位内设备级。

假定全机的 MTTR 为  $\bar{M}_{ct}$ ,舱位  $i$  的虚拟故障率为  $\lambda_i$ ,舱位总数为  $n$ ,对于任意一个空间舱位  $i$  的 MTTR,有

$$\bar{M}_{cti} = \frac{\bar{M}_{ct} \sum_{i=1}^n \lambda_i}{n\lambda_i} = \frac{\bar{M}_{ct}}{nW_i} \quad (1)$$

式中:  $W_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$ 。

对从 1 到  $i$  每个舱位的虚拟 MTTR 进行分析确认,并验算全机的 MTTR  $\bar{M}_{ct}$ ,满足:  $\bar{M}_{ct} \leq \bar{M}_{ct}^*$ ,  $\bar{M}_{ct}^*$  为全机 MTTR 指标要求值。

对于  $n$  个舱位,形成要求基线集合  $D = \{\bar{M}_{ct1}, \bar{M}_{ct2}, \dots, \bar{M}_{cti}, \dots, \bar{M}_{ctn}\}$ 。

对特定的舱位要求,  $\bar{M}_{cti}$  是由安装在内部的设备所有维修活动形成的。假定舱内设备  $j$  的故障率为  $\lambda_j$ ,舱内设备数为  $m$ ,则设备  $j$  的 MTTR 设计要求为

$$\bar{M}_{etj} = \frac{\bar{M}_{cti}}{m\lambda_j} \sum_{j=1}^m \lambda_j \quad (2)$$

对舱内  $m$  个设备,形成设备要求的基线集合  $E = \{\bar{M}_{et1}, \bar{M}_{et2}, \dots, \bar{M}_{etj}, \dots, \bar{M}_{etm}\}$ 。

### 2.3 节点与参数信息集成

为便于研究,本文利用图论理论将飞机装备维修过程有关的要素以及维修过程涉及的设备、口盖、电缆、管线以及连接件等,统一定义成“节点”,并赋予节点“属性”。将飞机装备中与维修性相关的产品特征要素和维修性设计特征信息,按维修性信息模型加以组织和规范描述,并分散成属性集成到数字化设计环境中。

另外,定性要求作为设计属性集成到设计环境,以控制性要求和推荐性要求、指南性知识方式引导系统和设备设计;经转化后的定量要求,以量化要求值方式,作为设计属性集成到设计环境,这是维修性评估和设计控制的基准属性。

在定义三维设计数字化环境下的维修性信息模型后,可以采用信息模型的形式组织参数数据,分别按设计控制、计算分析以及基础知识 3 类信息,集成到飞机装备的舱位层次节点和设备节点上,如图 2 所示。

集成的设计控制信息,主要包括设计要求、空间、时间、装拆过程、连接关系、安装关系、阻挡关系等设计要素。这些设计要素是以属性形式嵌入到工程设计环境的,包括形状、接口、空间位置,口盖类别等。涵盖了设计指标、设计要求、设计准则、设计约束参数、安装形式、舱位划分、口盖类别参数、口盖大小参数、空间位置参数、连接方式参

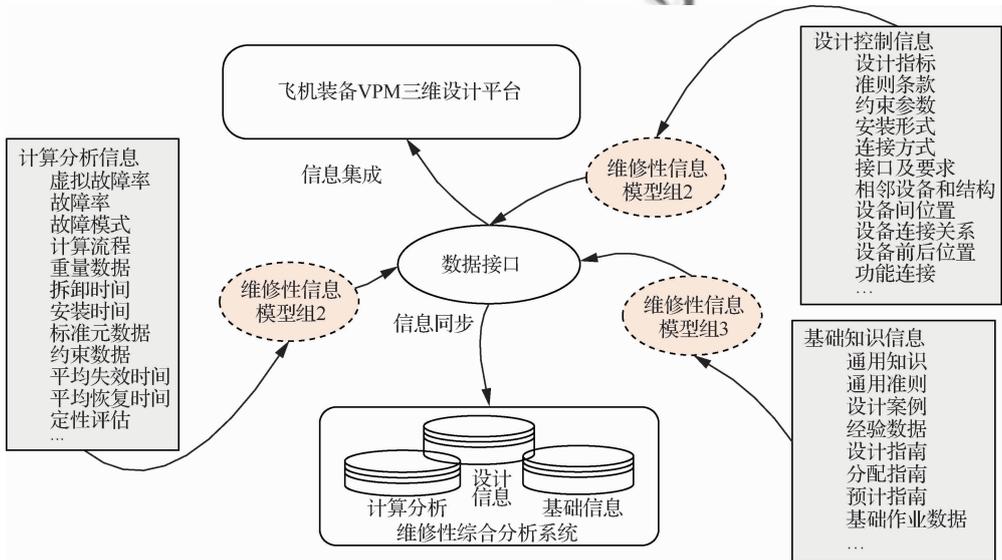


图 2 维修性设计参数信息集成

Fig. 2 Design parameters and maintainability information integration

数、接口形式及要求、相邻设备和结构、设备间位置、设备连接关系、设备前后位置关系、功能连接、紧固连接等参数类别的实例化信息数据。

集成的计算分析信息,主要包括在整个飞机装备系统的研制过程中,各层次节点上维修性量化计算的相关数据信息。这些数据信息以属性形式嵌入工程设计环境,涵盖了舱位虚拟故障率、部件故障率、设备故障率、故障模式、计算流程、单元件和设备重量、单元拆装时间、安装架与连接件拆装时间、标准元数据、约束数据、平均失效时间(MTBF)、MTTR等参数的实例化信息数据。

集成的基础知识信息,包括所有与当前层次产品相关的支撑其维修性设计的知识信息。涵盖了设计通用知识、相关案例、历史经验数据、设计指南、分配指南、预计指南等方面的结构化条目数据以及文本。

## 2.4 数据利用

按上述方法建立维修性信息模型,并完成参数信息到飞机装备虚拟产品管理(VPM)设计平台节点的集成后,装备维修性设计时的数据利用问题,本质上就是飞机装备设计平台与维修性综合分析系统之间的同步数据交换问题(如本文2.3节图2所示)。在相应的技术和算法支撑下,以数据交换为基础,飞机装备的功能性能设计与维修性设计,可以在同一设计视图下实现。

## 3 维修性评估与控制

### 3.1 节点图与节点网络图

通过研究拆卸目标产品与其他产品在拆装上存在的先后关系,将这些产品及其关系抽离出来,以“图论”的原理表达,用于反映产品、产品所属舱位以及飞机的维修性设计情况。这种关系的建模,称为节点图与节点网络图。按图论的有关理论<sup>[9]</sup>,本文定义采用的节点图中的节点有6类:目标节点、自由节点、孤立节点、末端节点、一次阻挡节点、余次阻挡节点,如图3所示。

按照图论,将飞机舱位中设备拆装的阻挡关系转化为图方式表达。转化后设备简化为节点,阻挡关系则转化为图中的有向边,由此构成节点网络图,如图4所示。节点网络图是飞机上产品

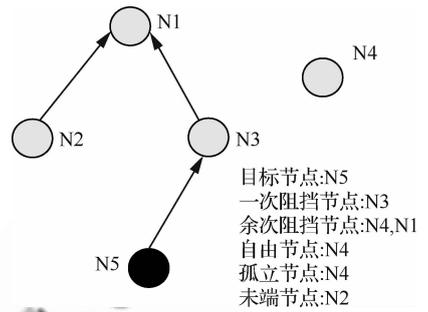


图3 节点图术语定义

Fig. 3 Definition of node-drawing

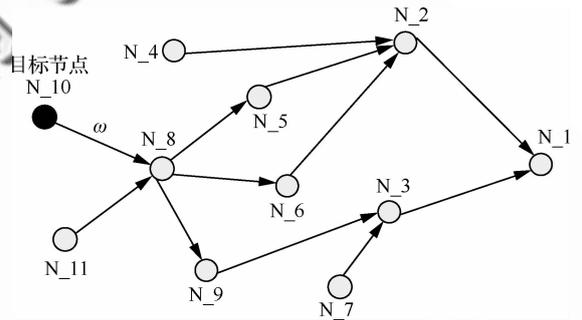


图4 节点网络图定义

Fig. 4 Definition of node-net-drawing

间拆装先后阻挡关系的图形化表达,由“节点”及“有向弧”组成,图中:节点代表飞机上的设备或实体部件;有向弧代表2个同级设备间拆卸时的阻挡约束关系; $\omega$ 代表对应的人员和保障工具/设备约束。

本文将维修性有关的设备、口盖、电缆、管线以及连接件等要素定义成节点图模型,同时将维修机载设备部件时的拆卸、安装过程关系,以及人力、工具、保障资源关系,定义为一系列节点图联接形成的节点网络图模型。

### 3.2 单节点时间与维修过程时间模型

一般地,飞机装备使用中的设备诊断、调整、检验的时间相对于设备拆装时间是小量。为此,机载设备维修时间主要是由需要维修的目标设备拆装时间和阻挡设备的拆装时间构成。把单设备拆卸中的逐项过程定义为过程时间元,则单节点维修时间是过程时间元的函数<sup>[10]</sup>。

假定紧固件时间元为 $t_{fa}$ ,功能接口时间元为 $t_{fu}$ ,电气接口时间元为 $t_{el}$ ,更换设备时间元为 $t_{re}$ ,则单节点时间模型为

$$T_{nd} = f(t_{fa}, t_{fu}, t_{el}, t_{re}) \quad (3)$$

取环境影响因素为  $\mathbf{P}_e$ , 则

$$T_{nd} = f(\mathbf{P}_e, t_{fa}, t_{fu}, t_{el}, t_{re}) \quad (4)$$

假定对单个节点设备, 总共有  $k$  类紧固件, 可得到

$$t_{fa} = \sum_{i=1}^k n_i (l_{ri} t_{ri} + l_{fi} t_{fi}) \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_e = [p_{efa}, p_{efu}, p_{eel}, p_{ere}]^T \quad (6)$$

式中:  $n_i$  为第  $i$  类紧固件的数量;  $t_{ri}$  为标准拆卸元时间;  $t_{fi}$  为标准安装元时间;  $l_{ri}$  和  $l_{fi}$  为保障(工具与人力)影响系数;  $p_{efa}$ 、 $p_{efu}$ 、 $p_{eel}$ 、 $p_{ere}$  分别为环境对紧固件、功能接口、电气接口、更换设备的时间元影响系数, 采用专家评分等方法给出, 值越高表示维修环境越恶劣。

于是, 实例化的单节点时间模型为

$$T_{nd} = [t_{fa}, t_{fu}, t_{el}, t_{re}] \cdot [p_{efa}, p_{efu}, p_{eel}, p_{ere}]^T \quad (7)$$

基于节点网络图模型的维修时间建模, 采用  $t_i$  代表拆装单节点  $i$  所需时间, 由单节点时间模型确定。  $t_1$  和  $t_k$  定义为维修过程目标设备对应口盖的开启、关闭所需时间,  $t_1 + t_k$  为口盖拆装时间。

当有唯一拆卸路径且简单串行情况下, 目标设备维修时间为

$$T_{mo} = \sum_{i=1}^k t_i \quad (8)$$

如果其中有并行部分, 假定第  $l$  至  $m$  单元并行, 则并行部分  $T_{lm}$  为

$$T_{lm} = \max\{t_l, t_{l+1}, t_{l+2}, \dots, t_m\} \quad (9)$$

$$T_{mo} = t_1 + t_2 + \dots + \max\{t_l, t_{l+1}, t_{l+2}, \dots, t_m\} + \dots + t_k \quad (10)$$

对于复杂节点网络模型, 其拆卸路径的求解, 实质上就是对产品拆装序列的规划问题。这方面的求解可利用成熟的拆装序列规划算法, 主要有遗传算法和蚁群算法等求解算法<sup>[11-15]</sup>。

假定目标节点为  $N_{mo}$  节点, 采用路径搜索法和网络计划法得到用有序节点组表示的维修拆卸路径。用  $s_{ij}$  表示第  $i$  路径的第  $j$  节点。则拆卸路径矩阵为

$$\mathbf{S} = [s_{ij}]_{P \times K} \quad (11)$$

式中:  $P$  为关键路径数;  $K$  为拆卸节点数。

同样, 假定序列  $s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iK}$  中第  $l$  至  $m$  单元并行, 令

$$T_{lm} = \max\{tt_l, tt_{l+1}, \dots, tt_m\} \quad (12)$$

$$F_{lm} = \max\{tf_l, tf_{l+1}, \dots, tf_m\} \quad (13)$$

则按第  $i$  路径维修的时间为

$$T_i = \sum_{n=1}^{K+l-m-1} tt_n + \sum_{n=1}^{K+l-m-1} tf_n + T_{lm} + F_{lm} \quad (14)$$

式中:  $tt_n$ 、 $tf_n$  分别为节点  $n$  的拆卸时间和安装时间。

于是目标设备维修时间为

$$T_{mo} = \min\{T_1, T_2, \dots, T_P\} \quad (15)$$

### 3.3 维修性实时评估与设计控制

在利用信息模型和数据接口集成信息后, 数字化设计环境下维修性设计就是设计人员在系统和产品设计同样的设计视图中, 在有关维修性约束和设计知识引导下的同步设计过程。初步完成设计后, 可进行维修性实时评估和按评估结果的控制, 以保证维修性设计要求的实现。

评估和控制采用 3 个方面的管控技术加以实施。分别是: 推荐性设计控制, 否决性设计控制、优选性设计控制。推荐性设计控制就是通过维修性工程专业人员的顶层设计, 把结果以节点属性的方式关联, 在飞机装备各级设计人员设计产品时, 自主推荐到设计平台环境中纳入设计的综合权衡。否决性设计控制是指在飞机装备维修性设计中, 涉及到实现维修性的关键性项目要求和维修安全项目要求, 采用本文方法构成在虚拟产品管理(VPM)设计系统中的硬性约束, 相关设计在他的设计视图环境下是必须满足的, 否则产品布局安装设计不能完成。优选性设计控制, 就是按照定量指标要求方式, 按本文提出的单节点与维修过程时间模型方法, 调整维修性设计方案, 进行定量的优化和控制设计, 以达到指标或最优控制接近指标。

对于机载设备层级, 假定第  $i$  个设备的要求值为  $\bar{M}_{eti}$ , 设备的 MTTR 为  $T_{moi} (M_{eti})$ , 需要满足优选性控制式:

$$M_{eti} \leq \bar{M}_{eti} \quad (16)$$

对于系统层级, 由  $k$  个设备构成的系统  $j$  的要求值为  $\bar{M}_{stj}$ , 系统  $j$  的 MTTR 为

$$M_{stj} = \left( \sum_{i=1}^k T_{moi} \lambda_i \right) / \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad (17)$$

需要满足优选性控制式:

$$M_{stj} \leq \bar{M}_{stj} \quad (18)$$

对于系统层级,由  $m$  个设备构成的舱位  $n$  的要求值为  $\bar{M}_{stj}$ ,舱位  $n$  的虚拟 MTTR 为

$$M_{ctm} = \left( \sum_{i=1}^m T_{m0i} \lambda_i \right) / \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (19)$$

需要满足优选性控制式:

$$M_{ctm} \leq \bar{M}_{ctm} \quad (20)$$

按本文描述的基于模型的维修性设计控制方法,可以在调整飞机装备各层级设计方案时,实时评估给定维修性要求的实现情况,保证装备按照预期的目标实现维修性指标要求。

### 3.4 应用实例

以某飞机的某研制阶段一个电子设备舱为例,对维修性评估与控制进行应用分析。该舱内设备安装布局如图 5 所示。舱位分为上下 2 层布置,舱内布置了 5 个电子设备,分别为控制盒 A、计算机 A、导航设备 1、导航设备 2、控制盒 B,舱位对应机表的维护口盖为口盖 A(图中未列出)。

按照 3.1 节描述的节点图设想,梳理舱内设备拆装阻挡关系,将其转化为图方式表达,建模结果如图 6 所示。

以导航设备 1 为例,按 3.2 节描述的单节点模型计算其单个产品的拆装时间及完成整个维修过程的拆装时间。导航设备 1 是采用 4 颗螺栓配合托板螺母固定在飞机的底板上,受空间和口盖布局位置影响,其拆装时需要提前拆除上方控制盒 A。

经对标准拆卸元、安装元时间以及环境影响因

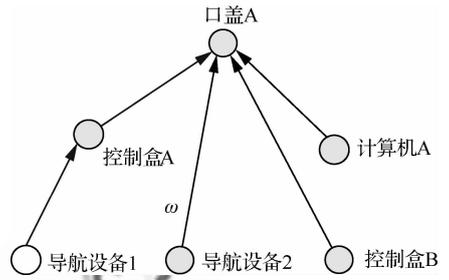


图 6 某飞机电子设备舱节点图  
Fig. 6 Node-net-drawing of the electronic equipment cabin

素的假设和推理求得(过程略):紧固件时间元  $t_{fa}$ 、功能接口时间元  $t_{fu}$ 、电气接口时间元  $t_{el}$ 、更换设备时间元  $t_{re}$  分别为 6 min、1.5 min、1.5 min 和 9 min。紧固件、功能接口、电气接口、更换设备的时间元影响系数  $p_{efa}$ 、 $p_{efu}$ 、 $p_{eel}$ 、 $p_{ere}$  分别为 1.15、1、1、1.02,则按式(7)求得导航设备 1 的拆装时间为 19 min。同理,采用上述方法求得舱内其他产品控制盒 A、计算机 A、导航设备 2、控制盒 B、口盖 A 单节点时间分别为 4.6 min、4.6 min、16.8 min、8.8 min 和 6 min。

由图 6 可知,导航设备 1 属于唯一拆卸路径且简单串行的情况,则按式(8)推得导航设备 1 维修时间计算公式为式(21),计算结果为 29.4 min。

$$T_{\text{导航设备1}} = t_{\text{导航设备1}} + t_{\text{控制盒1}} + t_{\text{口盖A}} \quad (21)$$

以 3.3 节中提出的否决性设计控制为例开展维修性实时评估和控制,推荐性和优选性设计控制措施按本文第 2 和第 3 节设想和借助维修性设计相关的一体化平台同样也能发挥起维修性设计过程中的实时评估和控制作用。

经查询,导航设备 1 的 MTTR 要求值为 30 min,  $29.4 \text{ min} < 30 \text{ min}$ ,满足式(16)所列的优选性控制式设计要求。

按式(17)以及其他舱位设备的维修时间预计值,求得导航设备 1 所属系统的 MTTR 预计值为 26.7 min,经查询其要求值为不大于 30 min,  $26.7 \text{ min} < 30 \text{ min}$ ,满足式(18)所列的优选性控制式设计要求。

同理,按式(19)求得该设备舱虚拟 MTTR 预计值为 18.4 min,经查询其要求值为不大于 20 min,  $18.4 \text{ min} < 20 \text{ min}$ ,满足式(20)所列的优选性控制式设计要求。

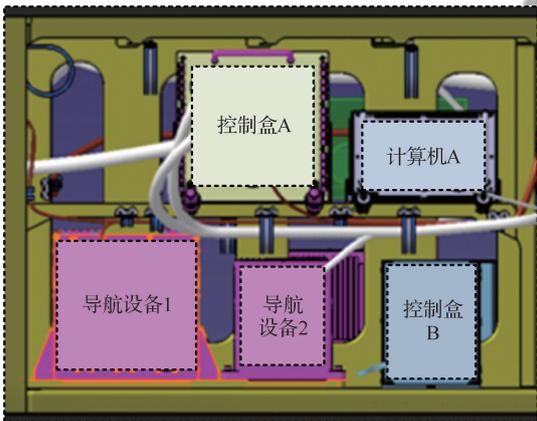


图 5 某飞机电子设备舱示例

Fig. 5 Schematic of electronic equipment cabin

## 4 结论

针对装备数字化设计条件下的维修性同步设计需求,完成了基于数字模型的维修性设计技术流程、维修性设计控制方法的探索与研究,得到以下几点结论:

1) 在装备数字化设计大背景下,基于文本的传统维修性设计方法已不再适宜,迫切需要将维修性设计参数纳入到装备数字化设计模型与环境一并设计,才能从根本上解决维修性与装备功能性能的同步设计问题。

2) 在分析传统维修性设计和数字化设计环境下的维修性设计差异的基础上,针对数字化设计环境提出的装备维修性设计技术过程和主要技术原理,均具有通用性。

3) 提出的一种维修性信息模型、参数转化方法、参数与信息集成方法、节点网络图、维修时间模型以及维修性实时评估方法,通过典型参数 MTTR 的实实验证,证明具有装备数字化设计环境条件下的工程实用性。

## 参 考 文 献

- [1] 吕川. 维修性设计分析与验证[M]. 北京:国防工业出版社,2012年.  
LYU C. Design, analysis and verification of maintainability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012 (in Chinese).
- [2] REN X X, YANG B X, LIU Y X, et al. The analysis and improvement for iec706-6-94 maintainability allocation method[C]// The Proceedings of the First International Conference on Maintenance Engineering, 2006: 980-985.
- [3] 马麟, 吕川. 虚拟维修技术的探讨[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(12): 2729-2733.  
MA L, LYU C. Study on virtual maintenance technology [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(12): 2729-2733 (in Chinese).
- [4] LYU G D. The transform principle and model for aircraft mtr in three-dimensional digital design condition[C]// The 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2014.
- [5] 王自力. 可靠性维修性保障性要求论证[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.  
WANG Z L. Demonstration reliability maintainability supportability requirements[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011 (in Chinese).

- [6] 袁劲涛, 孙宇峰. 装备系统 RMS 要求论证数据模型研究[M]// 航空可靠性工程技术与应用. 北京:国防工业出版社, 2008: 369-374.  
YUAN J T, SUN Y F. Data model research for requirement demonstration of the RMS of equipment systems[M]// Aviation reliability progress & application. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 369-374 (in Chinese).
- [7] 朱伟亭. 反水雷装备系统维修性建模分析探讨[J]. 船舶科学技术, 2012, 34(9): 134-137.  
ZHU W T. The maintainability modeling of MCM weapons system analysis to explore[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(9): 134-137(in Chinese).
- [8] 刘安清, 郝建平, 于永利, 等. 支持并行设计的维修性模型及其实现[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(7): 769-774.  
LIU A Q, HAO J P, YU Y L. Maintainability model supporting concurrent product design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(7): 769-774 (in Chinese).
- [9] 张清华, 陈六新. 图论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社 2013.  
ZHANG Q H, CHEN L X. Graph theory and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013 (in Chinese).
- [10] LYU G D, WU T X. The technique and modelling-forequipment maintainability quantification in 3d digital aircraft design condition[C]// The 31th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2018.
- [11] 吴昊, 左洪福. 基于遗传算法的产品拆卸序列规划研究[J]. 飞机设计, 2009, 29(6): 71-75.  
WU H, ZUO H F. Product disassembly sequence planning based on genetic algorithm [J]. Aircraft Design, 2009, 29(6): 71-75 (in Chinese).
- [12] 陆中, 孙有朝. 面向维修性设计的民机产品拆卸序列规划方法[J]. 航空学报, 2010, 31(1): 143-149.  
LU Z, SUN Y C. Disassembly sequence planning of civil aircraft products for maintainability design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 143-149 (in Chinese).
- [13] 孔令函, 陈军. 基于维修性的产品拆卸序列方法研究[J]. 后勤工程学院学报, 2011, 27(2): 53-56.  
KONG L H, CHEN J. Research on disassemble sequence of product based on maintainability[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2011, 27(2): 53-56 (in Chinese).
- [14] 章小红, 李世其. 基于蚁群算法的单目标选择性拆卸序列规划研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(6): 1109-1114.  
ZHANG X H, LI S Q. Single object selective disassembly

sequence planning based on ant colony algorithm [J].  
Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13  
(6): 1109-1114(in Chinese).

[15] 黄保群. 基于遗传算法的飞机维修拆卸/装配序列规划研

究[J]. 飞机设计, 2007, 27(3): 18-22.

HUANG B Q. Disassembly /assembly sequence planning  
for aircraft maintenance based on GA[J]. Aircraft De-  
sign, 2007, 27(3): 18-22 (in Chinese).

(责任编辑: 张晗, 苏磊)

## Design and regulation of aircraft maintainability based on technique model

LYU Gangde<sup>\*</sup>, WANG Haifeng, DENG Wei

Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China

**Abstract:** With the development of digital design methods, the design of the maintainability of the aircraft systems is facing the problem of how to synchronize the function-performance design under the 3D digital design environment. This paper compares the main differences between the digital maintainability design and the traditional maintainability design, presents the maintainability design process in the digital design environment of aircraft, and studies the expression model of maintainability design parameters and the way of transformation, integration, and utilization of maintainability design information in the 3D design digital environment. Based on the graph theory and the network diagram, this paper proposes a design and control method of aircraft maintainability that is featured by the single task node maintenance time model and the maintenance process time model. It is proved by examples that the maintainability design technology based on digital model obtained in this study has certain engineering value for dynchronous maintainability design of equipment in the digital design environment.

**Keywords:** maintainability; design method; assessment; information model; Mean Time to Repair (MTTR)

**Received:** 2019-09-10; **Revised:** 2019-11-11; **Accepted:** 2019-12-02; **Published online:** 2019-12-23 11:07

**URL:** <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200620.html>

**\* Corresponding author.** E-mail: lvgangde@sina.com