

# 多参数关联的机载系统空战业务可靠性评估方法

赵静萌<sup>1</sup>, 黄宁<sup>1,2</sup>, 朱杰<sup>1</sup>, 张欣<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学云南创新研究院, 云南昆明 650233)

**摘要:** 军用飞机机载系统承载着相互关联的多业务,如空战业务,而当前的机载系统可靠性评估方法仅由子系统可靠度简单组合得出系统可靠度,没有考虑子系统内部、子系统之间的相关关系,无法支持空战业务可靠性准确评估.为此,本文提出“机载系统空战业务可靠性”概念,设计实现多参数关联的机载系统空战业务可靠性评估方法:通过基于业务流程、基于中间件业务的分解方法分层分解业务,并提取各层参数,形成“业务可靠性参数-子业务可靠性参数-感官参数-中间件业务相关参数-具体服务步骤相关参数”的参数体系,并分析参数间关联关系,包括相关关系、依赖关系,建立多参数关联的业务可靠性评估模型,最后针对机载系统部署的空战业务,计算出空战业务可靠度.本文的评估方法有以下创新点和优势,第一,通过基于业务流程、基于中间件业务的分解方法分层分解业务,实现对业务的详细描述.第二,考虑参数间的相关关系、依赖关系,实现机载系统空战业务可靠性的精确评估.

**关键词:** 机载系统空战业务可靠性; 业务分解; 多参数关联; 可靠性评估

中图分类号: V24; TJ85

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)09-2060-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI:10.12263/DZXB.20210116

## Airborne System Air Combat Application Reliability Evaluation Method Based on Multi-Parameter Coupling

ZHAO Jing-meng<sup>1</sup>, HUANG Ning<sup>1,2</sup>, ZHU Jie<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>

(1. School of Reliability and System Engineering of Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Yunnan Innovation Institute of Beihang University, Kunming, Yunnan 650233, China)

**Abstract:** The airborne system of military aircraft carries multiple applications that are interrelated with each other, such as air combat applications. But the current airborne system reliability evaluation methods evaluate system reliability by simply combining the subsystem reliability. The methods don't consider correlation of the internal and between subsystems, which unable to support the accurate evaluation of air combat application reliability. Therefore, this paper proposed the concept of airborne system air combat application reliability and the airborne system air combat application reliability evaluation method based on multi-parameter correlation. The application was decomposed to layers by application process and middleware application decomposition, then the parameters of each layer was extracted to form parameters system including application reliability parameters, sub-application reliability parameters, sensory parameters, middleware application related parameters, and specific service process related parameters. The application reliability evaluation model based on multi-parameters correlation was proposed by analyzing relationships between parameters which includes correlation and dependency. Finally, for airborne system air combat application, the reliability of air combat application is calculated. The innovations and advantages of proposed evaluation method are as follows. Firstly, the application was decomposed to layers by regular application process and middleware application decomposition, which could realize detailed description of application. Secondly, the airborne system air combat application reliability was accurately evaluated by considering correlation and dependency between parameters.

**Key words:** airborne system air combat application reliability; application decomposition; multi-parameter correlation; reliability evaluation

## 1 引言

军用飞机机载系统具有规模大、自动化与集成化程度高、各单元关联复杂的特点,机载系统故障已成为仅次于人为因素的第二大空难原因<sup>[1]</sup>,如何评估机载系统的可靠性对飞机作战效能和发展水平具有重要影响.机载系统承载着不同的业务<sup>[2]</sup>,如航电业务、空战业务,空战业务又包括导航子业务、雷达子业务等<sup>[2]</sup>,由于多业务并行在机载系统上,业务或子业务间存在多种关联关系,因此,充分考虑业务或子业务的关联关系才能进行业务可靠性准确评估.

对于机载系统空战业务,目前鲜有业务可靠性评估方法,最为相关的是系统可靠性或任务可靠性的评估方法,主要包括可靠性框图(Reliability Block Diagram, RBD)、失效模式与影响分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)、故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)及动态故障树分析(Dynamic Fault Tree Analysis, DFTA)、GO(Goal-Oriented)法、马尔可夫分析法、Petri网分析法等<sup>[3]</sup>.文献[4]建立某型号武器系统发射过程的任务可靠性框图(RBD),通过串并联组合单元可靠度来评估任务可靠度,对系统描述不够具体,且没有考虑各单元间的相互作用关系.文献[5]通过FMEA法对电网系统的各部件故障影响的严重程度及发生概率进行归类,从而评估系统可靠性,对系统描述太抽象,不能考虑各单元的相互作用.文献[6]建立风电机组液压系统的动态故障树,通过每个底事件的可靠性参数,如故障率、可靠度等,评估顶事件的可靠性,即系统的可靠性,没有考虑底事件之间的相关关系.文献[7]通过建立某指挥与控制系统的GO图,给定系统各部件的状态概率,从而计算系统成功概率,没有考虑各部件间的关联关系.文献[8]给出某机载系统各子系统的失效率,利用Markov模型评估子系统的可靠度,假设子系统之间相互独立,再组合计算出系统可靠度,没有考虑子系统间的关联关系.文献[9]建立某航电系统的Petri网模型,根据各个设备的迁移概率和可靠度加权组合计算出系统可靠度,没有考虑设备间的相互作用关系.

综上,目前对于业务的可靠性研究存在两点不足:(1)大多针对系统可靠性或任务可靠性进行评估,缺乏业务可靠性的概念;(2)不能考虑子系统之间的关联关系,通常假设子系统间相互独立评估系统可靠度.针对以上问题,本文提出“机载系统空战业务可靠性”的概念,并设计实现了多参数关联的业务可靠性评估方法:通过基于业务流程、基于中间件业务的分解方法分层分解业务,得出“业务-子业务-中间件业务-具体服务步骤”的业务层次并提取各层参数,分析参数间关联关系,得出多参数关联的空战业务可靠性评估模型,并计算机载系统空战业务可靠度.

## 2 机载系统空战业务可靠性评估模型

机载系统空战业务可靠性是机载系统空战业务在规定时间内和规定条件下完成规定功能的能力<sup>[10]</sup>.

业务可以分层分解为子业务,子业务可以继续分解,且子业务之间存在关联关系<sup>[2]</sup>.此外,业务由于子业务按流程实现.因此,业务具有三个特征:分层、关联、流程.针对以上特征,本文从业务流程、中间件业务的角度进行业务分层分解,并考虑同层以及上下层之间的关联关系,建立机载系统空战业务可靠性评估模型.

首先,给出中间件业务、感官参数的相关概念.

中间件业务:中间件业务是介于业务和底层软硬件设备之间的一类特殊业务,能够被上层的业务共同调用,达到资源共享、功能共享的目的<sup>[11]</sup>.

感官参数:业务的感官参数是指能够直接由作业人员测试或感知到,对于业务/子业务可靠与否最直接的判断指标,是业务故障研究的出发点.

其次,将业务分层分解.基于业务流程的分解是按照业务流程顺序进行分解<sup>[2]</sup>.基于中间件业务的分解是通过业务调用的中间件业务进行分解.不同于子业务,中间件业务作为业务下一层次的应用,能够被上层的多个业务共享<sup>[12]</sup>.因此通过基于业务流程的分解将业务分解为不同子业务,对于每个子业务,通过基于中间件业务分解,得到中间件业务,对于每个中间件业务,通过基于业务流程的分解,得到具体服务步骤,形成“业务-子业务-中间件业务-具体服务步骤”的业务层次.然后,对子业务寻找其感官参数作为子业务可靠与否的考量.最后,从业务层次提取相应的参数,形成“业务可靠性参数-子业务可靠性参数-子业务可靠性指数-感官参数-中间件业务相关参数-具体服务步骤相关参数”的参数体系.

对于参数体系,首先,明确各层参数的符号及含义,如表1所示.

表1 各层参数的符号及含义

符号	含义
$R$	业务可靠性参数
$R_i$	第 <i>i</i> 个子业务可靠性参数, $i \in [1, p]$
$F_{ij}$	第 <i>i</i> 个子业务的第 <i>j</i> 个感官参数, $j \in [1, q_i]$
$F_{ijk}$	第 <i>i</i> 个子业务的第 <i>j</i> 个感官参数的第 <i>k</i> 个中间件业务相关参数, $k \in [1, m_{ij}]$
$F_{ijkl}$	第 <i>i</i> 个子业务的第 <i>j</i> 个感官参数的第 <i>k</i> 个中间件业务相关参数的第 <i>l</i> 个具体服务步骤相关参数, $l \in [1, n_{ijk}]$

再次,分析参数间两种关联关系:(1)同层参数(对应同一个上层参数)间存在相关关系,包括促进关系(相关强度  $\alpha \in (0, 1]$ )、抑制关系(相关强度  $\alpha \in [-1, 0)$ ).子业务、具体服务步骤通过基于业务流程的分解得到,同

层参数间存在时序关系,前一个参数故障单向影响后一个参数,因此相关关系为单向,中间件业务是通过基于中间件业务分解得到,前后参数存在相互影响,因此相关关系为双向.(2)上下层参数间存在依赖关系,下层参数故障只可能促进上层参数故障(依赖强度  $\beta \in (0, 1]$ ),且依赖关系为单向.此外,感官参数间不存在相关关系,由感官参数得到的子业务可靠性指数也不存在相关关系,因此只需考虑子业务可靠性指数与子业务可靠性参数的依赖关系.最后,得出多参数关联的业务可靠性评估模型,如图1所示.

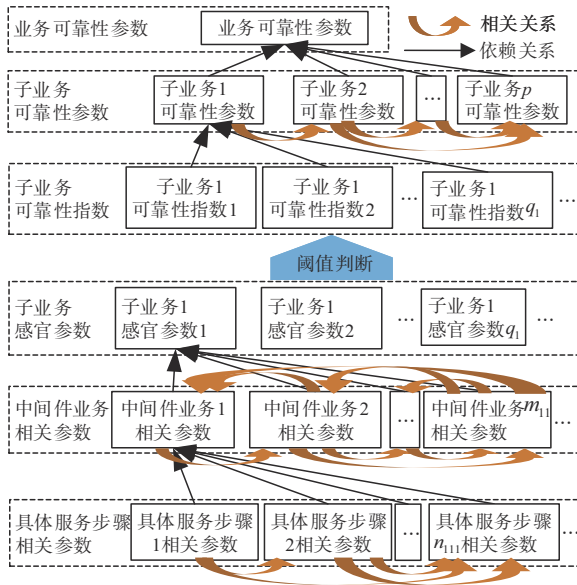


图1 多参数关联的业务可靠性评估模型

根据关联强度(相关强度、依赖强度)确定参数重要度,由下层参数和参数重要度计算上层参数,得到业务可靠性参数计算流程如图2所示.

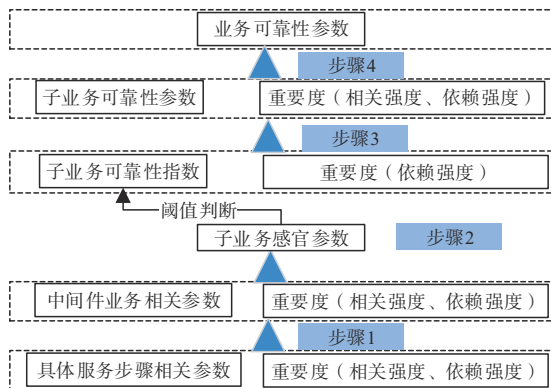


图2 业务可靠性参数计算流程

图2中步骤1、步骤2计算下层参数的误差对上层业务的参数造成的误差,而不是通过下层参数评估上层参数,因此设置下层参数对于上层参数的依赖强度

之和为1.步骤3中,下层参数间只存在依赖强度,因此设置下层参数对于上层参数的依赖强度之和为1.步骤4中,下层参数是概率值,为了保证业务可靠性参数的归一性,设置下层参数对于上层参数的重要度之和为1.具体计算步骤见下文.

步骤1:计算中间件业务相关参数  $F_{ijk}$

$$F_{ijk} = \sum_{l=1}^{n_{jk}} D(F_{ijkl}, F_{ijk}) \cdot F_{ijkl} \quad (1)$$

$$D(F_{ijkl}, F_{ijk}) = \beta(F_{ijkl}, F_{ijk}) + \sum_{l'=l+1}^{n_{jk}} \alpha(F_{ijkl}, F_{ijkl'}) \cdot \beta(F_{ijkl'}, F_{ijk}) \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^{n_{jk}} \beta(F_{ijkl}, F_{ijk}) = 1 \quad (3)$$

其中,  $F_{ijkl'}$  表示与  $F_{ijkl}$  具有相关关系的同层参数.

步骤2:计算子业务感官参数  $F_{ij}$

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^{m_{ij}} D(F_{ijk}, F_{ij}) \cdot F_{ijk} \quad (4)$$

$$D(F_{ijk}, F_{ij}) = \beta(F_{ijk}, F_{ij}) + \sum_{k' \in [1, m_{ij}], k' \neq k} \alpha(F_{ijk}, F_{ijk'}) \cdot \beta(F_{ijk'}, F_{ij}) \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{ij}} \beta(F_{ijk}, F_{ij}) = 1 \quad (6)$$

其中,  $F_{ijk}$  表示与  $F_{ij}$  具有相关关系的同层参数.

步骤3:故障判断并计算子业务可靠性参数  $R_i$

子业务感官参数  $F_{ij}$  和阈值作为子业务的故障判据,通过  $t$  时刻的参数  $F_{ij}$  是否满足阈值要求,来判断子业务是否发生故障.

$$r_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & \text{不满足阈值要求} \\ 1, & \text{满足阈值要求} \end{cases} \quad (7)$$

$$R_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{T/\Delta t} r_{ij}(t)}{T/\Delta t} \quad (8)$$

其中,  $r_{ij}(t)$  是  $t$  时刻采集的感官参数  $F_{ij}$  是否满足阈值要求的布尔计数量,  $R_{ij}$  是感官参数的可靠性指数,  $T$  是试验时长,  $\Delta t$  是参数  $F_{ijkl}$  的采集间隔. 计算子业务可靠性参数  $R_i$ .

$$R_i = \sum_{j=1}^{q_i} D(R_{ij}, R_i) \cdot R_{ij} \quad (9)$$

$$D(R_{ij}, R_i) = \beta(R_{ij}, R_i) \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{q_i} \beta(R_{ij}, R_i) = 1 \quad (11)$$

步骤4:计算业务可靠性参数  $R$

$$R = \sum_{i=1}^p D(R_i, R) \cdot R_i \quad (12)$$

$$D(R_i, R) = \beta(R_i, R) + \sum_{i'=i+1}^p \alpha(R_i, R_{i'}) \cdot \beta(R_{i'}, R) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^p D(R_i, R) = 1 \quad (14)$$

其中,  $R_{i'}$  表示与  $R_i$  具有相关关系的同层参数.

### 3 机载系统空战业务可靠性评估算法

根据机载系统空战业务可靠性评估模型可知,为了计算机载系统空战业务可靠性参数,需要确定参数的相关强度、依赖强度、感官参数的阈值、试验时长  $T$ 、测试间隔  $\Delta t$ 、底层参数  $F_{ijkl}$ , 首先建立以下集合.

(1) 建立  $t$  时刻测试的底层参数集合  $S_{ijk}(t) \{S_{ijk}(t)\}$ , 其中,  $S_{ijk}(t) \{F_{ijkl}(t)\}$ .

(2) 建立相关强度集合  $\alpha_{ijk} \{\alpha_{ijk}\}$ ,  $\alpha_{ij} \{\alpha_{ij}\}$ ,  $\alpha \{\alpha(R_i, R_{i'}), i' \in [i+1, p]\}$ , 其中,  $\alpha_{ijk} \{\alpha(F_{ijkl}, F_{ijkl'})\}$ ,  $l' \in [l+1, n_{ijk}]$ ,  $\alpha_{ij} \{\alpha(F_{ijk}, F_{ijk'})\}$ ,  $k' \in [1, m_{ij}]$ ,  $k' \neq k$ .

(3) 建立依赖强度集合  $\beta_{ijk} \{\beta_{ijk}\}$ ,  $\beta_{ij} \{\beta_{ij}\}$ ,  $\beta_i \{\beta_i\}$ ,  $\beta \{\beta(R_i, R)\}$ , 其中,  $\beta_{ijk} \{\beta(F_{ijkl}, F_{ijk})\}$ ,  $\beta_{ij} \{\beta(F_{ijk}, F_{ij})\}$ ,  $\beta_i \{\beta(R_{ij}, R_i)\}$ .

通过底层参数、相关强度以及依赖强度,进行自下而上的计算,实现对机载业务可靠性的评估.

输入:集合  $S_{ijk}$ 、 $\alpha_{ijk}$ 、 $\alpha_{ij}$ 、 $\alpha$ 、 $\beta_{ijk}$ 、 $\beta_{ij}$ 、 $\beta_i$ 、 $\beta$ .

输出:业务可靠性参数  $R$

步骤 1: 遍历集合  $S_{ijk}$ ,  $\alpha_{ijk}$ ,  $\beta_{ijk}$ , 更新集合  $S_1$  为  $S_{ijk}$ , 集合  $\alpha_1$  为  $\alpha_{ijk}$ , 集合  $\beta_1$  为  $\beta_{ijk}$ , 进入步骤 2, 得出的参数  $F_{up}$  组成集合  $S_{ij} \{S_{ij}, i \in [1, p], j \in [1, q_i]\}$ ,  $S_{ij} \{F_{ijk}, k \in [1, m_{ij}]\}$ , 转入步骤 3.

步骤 2: 遍历集合  $S_1 \{F_x, x \in [1, z]\}$ ,  $\alpha_1 \{\alpha(F_x, F_{x'})\}$ ,  $x'$

$\in [x+1, z]$  与  $\beta_1 \{\beta(F_x, F_{x'})\}$ ,  $x \in [1, z]$ ,  $F_{x'}$  是与  $F_x$  有相关关系的同层参数,  $F_{x'}$  是  $F_x$  对应的上层参数, 对于集合  $S_1$  中的参数  $F_x$ , 将相关强度  $\alpha(F_x, F_{x'})$  与参数  $F_{x'}$  的依赖强度  $\beta(F_x, F_{x'})$  求积, 并将积求和, 并与参数  $F_x$  的依赖强度  $\beta(F_x, F_{x'})$  相加, 得出参数  $F_x$  对参数  $F_{x'}$  的重要度集合  $D_1 \{D(F_x, F_{x'}), x \in [1, z]\}$ , 遍历集合  $S_1$  和  $D_1$ , 将参数  $F_x$  与  $D(F_x, F_{x'})$  相乘, 并求和得出参数  $F_{up}$ .

步骤 3: 遍历集合  $S_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$ , 更新集合  $S_1$  为  $S_{ij}$ , 集合  $\alpha_1$  为  $\alpha_{ij}$ , 集合  $\beta_1$  为  $\beta_{ij}$ , 重复步骤 2, 得出的参数  $F_{up}$  组成集合  $S_i \{S_i, i \in [1, p]\}$ ,  $S_i \{F_{ij}, j \in [1, q_i]\}$ .

步骤 4: 根据测试时间  $t$ , 依次更新  $S_{ijk}$ , 重复步骤 1~3, 得出不同时刻参数集合  $S_i(t) \{S_i(t), i \in [1, p]\}$ ,  $S_i(t) \{F_{ij}(t), j \in [1, q_i]\}$ .

步骤 5: 遍历集合  $S_i(t)$ , 对于每个子集  $S_i(t)$  中的参数  $F_{ij}(t)$ , 根据阈值求得  $r_{ij}(t)$ , 得到集合  $r_i(t) \{r_i(t), i \in [1, p]\}$ ,  $r_i(t) \{r_{ij}(t), j \in [1, q_i]\}$ .

步骤 6: 遍历集合  $r_i(t)$ , 对于每个子集  $r_i(t)$  中的每个参数  $r_{ij}(t)$  按  $t$  求和, 并除以  $T/\Delta t$ , 得到集合  $U_i \{U_i, i \in [1, p]\}$ ,  $U_i \{R_{ij}, j \in [1, q_i]\}$ .

步骤 7: 遍历集合  $U_i$ ,  $\beta_i$ , 对于每个子集  $U_i$  和  $\beta_i$ , 将参数  $R_{ij}$  与  $\beta(R_{ij}, R_i)$  相乘并求和, 得出参数集合  $S \{R_i, i \in [1, p]\}$ .

步骤 8: 更新集合  $S_1$  为  $S$ , 集合  $\alpha_1$  为  $\alpha$ , 集合  $\beta_1$  为  $\beta$ , 重复步骤 2, 得出参数  $F_{up}$  即为  $R$ .

### 4 案例分析

根据空战过程<sup>[13]</sup>, 分析并确定空战业务的子业务及中间件业务, 并调研获取具体服务步骤, 如表 2 所示.

表 2 空战业务的分层分解

子业务	中间件业务	具体服务步骤
目标探测子业务	雷达探测业务	信号发射、信号接收、信号处理、数据处理 <sup>[14]</sup>
	自动跟踪业务	数据处理、伺服控制 <sup>[15]</sup>
目标识别子业务	敌我识别业务	询问机信号发射、应答机信号接收及处理、应答机信号发射、询问机信号接收及处理 <sup>[16]</sup>
	自动跟踪业务	数据处理、伺服控制 <sup>[15]</sup>
目标攻击子业务	载机参数测量业务	信号接收、信号处理、数据分析 <sup>[17]</sup>
	投弹业务	火控解算、导弹发射 <sup>[13]</sup>

根据相关的国军标分析获取子业务感官参数及其阈值, 如表 3 所示.

根据前文分析可知, 子业务可靠性参数、具体服务步骤相关参数只存在单向、促进相关关系. 对于中间件业务相关参数, 自动跟踪业务、载机参数测量业务的相关参数出现偏差, 均会促进投弹业务相关参数的偏差增大; 载机参数测量业务相关参数出现偏差, 会促进自动跟踪业务相关参数偏差增大. 上述参数间的相关强度  $\alpha \in (0, 1]$ , 为简化考虑, 设置相关强度

表 3 子业务的感官参数及阈值

子业务	感官参数	阈值
目标探测子业务	测角精度 <sup>[18]</sup>	雷达探测 $\pm 0.5^\circ$ <sup>[19]</sup> 、自动跟踪 $\pm 0.4^\circ$ <sup>[19]</sup>
	测距精度 <sup>[20]</sup>	雷达探测 $\pm 5 \text{ m}$ <sup>[20]</sup> 、自动跟踪 $\pm 4 \text{ m}$ <sup>[20]</sup>
目标识别子业务	应答延迟 <sup>[21]</sup>	$202 \mu\text{s}$ <sup>[22]</sup>
目标攻击子业务	瞄准精确度 <sup>[23]</sup>	$\pm 0.5 \text{ mrad}$ <sup>[23]</sup>
	命中精度 <sup>[24]</sup>	$\pm 2.5 \text{ m}^2$ <sup>[25]</sup>

为  $\alpha_1$ , 并设置各参数对上层参数的依赖强度  $\beta$  比例相等. 由式(3)、式(6)、式(11)可得出各层参数的对上层参数的依赖强度; 此外, 由式(14)可知, 子业务可

靠性参数对业务可靠性参数的依赖强度  $\beta$  为  $1/(\alpha_1^2 + 2\alpha_1 + 3)$ , 进而得出各子业务的可靠性评估模型如图 3 所示.

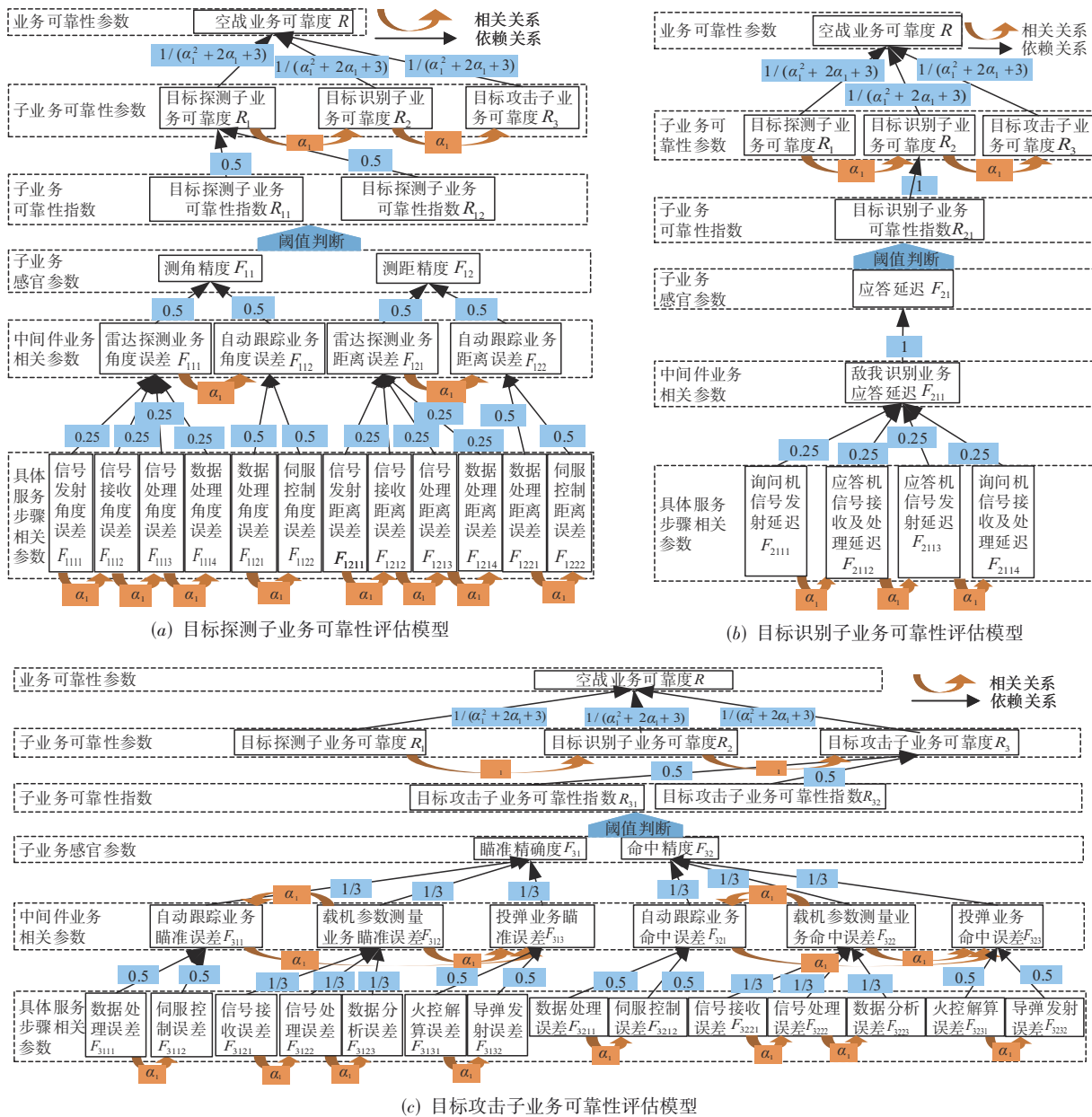


图 3 子业务的可靠性评估模型

$D$  为  $F_{ijkl}$  对应的感官参数的阈值绝对值, 作为  $F_{ijkl}$  取值的参考标准, 详见表 4.

设置仿真时长  $T$  为 1 年, 具体服务步骤相关参数  $F_{ijkl}$  的测试间隔  $\Delta t$  为 1 h, 测试值服从正态分布  $N(\mu, \sigma)$ , 设置均值  $\mu$  为  $D/2$ , 标准差  $\sigma$  为  $D/10$ . 由上文分析可知, 相关强度  $\alpha_1 \in (0, 1]$ , 为简化仿真复杂度, 设置  $\alpha_1$  为 0.2、0.4、0.6、0.8, 仿真获得空战业务可靠度  $R$  随时间变化的

结果如图 4 所示, 横轴表示测试的时刻  $t$ , 纵轴表示空战业务可靠度.

由于底层参数测试值为多次取随机数的方式, 测试时刻较短时, 参数测试取值的次数较少, 参数值具有很大的随机性, 导致计算出的业务可靠度也具有较大的随机性, 因此每次计算出的业务可靠度不断波动, 随着时间的增加, 参数测试的次数增加, 业务可靠度更加

表 4 具体服务步骤相关参数对应的 D 值

具体服务步骤相关参数 $F_{ijkl}$	D
$F_{1111}, F_{1112}, F_{1113}, F_{1114}$	$0.5^\circ$
$F_{1121}, F_{1122}$	$0.4^\circ$
$F_{3111}, F_{3112}, F_{3121}, F_{3122}, F_{3123}, F_{3131}, F_{3132}$	0.5 mrad
$F_{3211}, F_{3212}, F_{3221}, F_{3222}, F_{3223}, F_{3231}, F_{3232}$	2.5 m
$F_{2111}, F_{2112}, F_{2113}, F_{2114}$	202 $\mu$ s
$F_{1211}, F_{1212}, F_{1213}, F_{1214}$	5 m
$F_{1221}, F_{1222}$	4 m

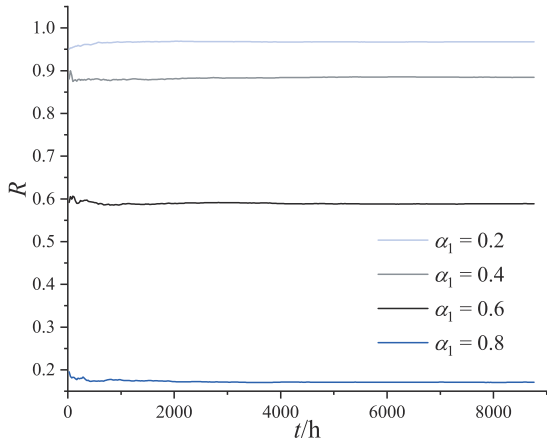


图 4 随时间变化的空战业务可靠度

接近真实值,因此曲线波动幅度较小,且随着测试时间的增加,系统老化使得业务可靠度呈下降趋势。

### 5 合理性分析

为验证本文算法的合理性,比较本文计算结果与任务可靠性评估结果。任务可靠性评估方法没有考虑子系统间的关联关系,只线性组合得出系统可靠度,因此只考虑依赖强度  $\beta$  作为线性组合的权重,  $\beta$  的设置不变,具体公式如下。

(1) 计算中间件任务相关参数  $F_{ijk}$

$$F_{ijk} = \sum_{l=1}^{n_{ik}} \beta(F_{ijkl}, F_{ijk}) \cdot F_{ijkl} \quad (15)$$

$$\sum_{l=1}^{n_{ik}} \beta(F_{ijkl}, F_{ijk}) = 1 \quad (16)$$

(2) 计算子任务感官参数  $F_{ij}$

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^{m_j} \beta(F_{ijk}, F_{ij}) \cdot F_{ijk} \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^{m_j} \beta(F_{ijk}, F_{ij}) = 1 \quad (18)$$

(3) 故障判断并计算子任务可靠性参数  $R_i$

通过  $t$  时刻的参数  $F_{ij}$  是否满足阈值要求,来判断子任务是否发生故障。

$$r_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & \text{不满足阈值要求} \\ 1, & \text{满足阈值要求} \end{cases} \quad (19)$$

$$R_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{T/\Delta t} r_{ij}(t)}{T/\Delta t} \quad (20)$$

其中,  $r_{ij}(t)$  是  $t$  时刻的感官参数  $F_{ij}$  是否满足阈值要求的布尔计数量,  $R_{ij}$  是感官参数的可靠性指数,  $T$  是试验时长,  $\Delta t$  是参数  $F_{ijkl}$  的采集间隔。计算子任务可靠性参数  $R_i$ 。

$$R_i = \sum_{j=1}^{q_i} \beta(R_{ij}, R_i) \cdot R_{ij} \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^{q_i} \beta(R_{ij}, R_i) = 1 \quad (22)$$

(4) 计算任务可靠性参数  $R$

$$R = \sum_{i=1}^p \beta(R_i, R) \cdot R_i \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^p \beta(R_i, R) = 1 \quad (24)$$

由以上计算过程,得出空战业务可靠度与任务可靠度对比结果如图 5 所示,红色曲线表示任务可靠度评估结果,其他曲线表示不同  $\alpha$  下的业务可靠度评估结果。

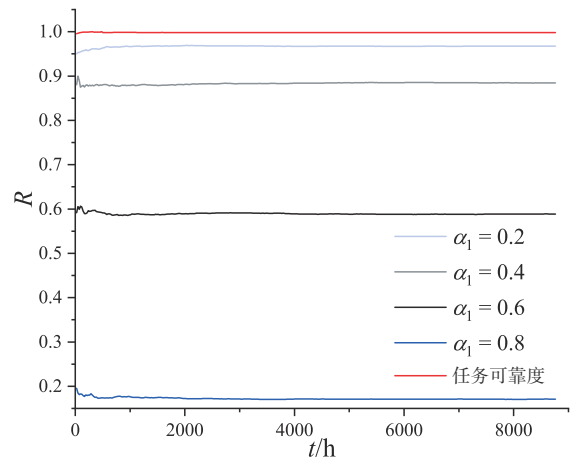


图 5 空战业务可靠度与任务可靠度对比结果

由图 5 可知,业务可靠度比任务可靠度更小,这是因为本文考虑的关联关系更全面。实际情况中,系统内部的关联程度越高,故障越容易传播,可靠度越低,由此可知本文算法合理。

### 6 结论

军用飞机机载系统承载着动态关联的空战业务,而当前的可靠性评估方法对关联关系考虑不足。本文提出“机载系统空战业务可靠性”的概念,设计实现机

载系统空战业务可靠性评估方法. 第一,用基于业务流程、基于中间件业务的分解方法,分层分解业务,支持业务可靠性评估模型的建立. 第二,考虑参数间的关联关系,包括相关关系和依赖关系,实现空战业务可靠性的准确评估.

#### 参考文献

- [1] 魏岳江. 空难事故原因透视——五花八门的罪魁祸首[J]. 航空世界, 2014, 2014(9): 66-71.
- [2] 黄宁. 网络可靠性及评估技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.  
HUANG N. Network Reliability and Its Evaluation Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [3] 刘锐. 基于AADL的综合模块化航电系统平台可靠性建模与GSPN分析方法[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.  
LIU R. Reliability Modeling of Integrated Modular Avionics System Platform Using AADL, and GSPN Analysis Method[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016. (in Chinese)
- [4] 周涛. 航空电子系统的可靠性分析[J]. 科技创新导报, 2016, 13(7): 19-22, 80.
- [5] 王枫, 祁彦鹏, 傅正财. 基于改进故障模式与后果分析法的配电网可靠性评估[J]. 低压电器, 2013, 2013(1): 37-41.  
WANG F, QI Y P, FU Z C. Reliability evaluation of distribution system based on modified failure mode and effect analysis method[J]. Low Voltage Apparatus, 2013, 2013(1): 37-41. (in Chinese)
- [6] 邢贺亮. 基于多态T-S动态故障树的风电机组液压系统可靠性分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.  
XING H L. Reliability Analysis of Wind Turbine Hydraulic System Based on Polymorphic T-S Dynamic Fault Tree [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021. (in Chinese)
- [7] LI Y F, HUANG H Z, ZHANG T Y. Reliability analysis of C4ISR systems based on goal-oriented methodology[J]. Applied Sciences, 2021, 11(14): 6335.
- [8] ZHAO C X, WANG P, YAN F. Reliability analysis of the reconfigurable integrated modular avionics using the continuous-time Markov chains[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018, 2018: 5213249.
- [9] WANG Y S, LEI H, HAN X. The stochastic Petri net based reliability analysis for software partition integrated modular avionics[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2015, 30(4): 30-37.
- [10] LI S, HUANG N, CHEN J X, et al. Analysis for application reliability parameters of communication networks [C]//2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance and Safety Engineering. Piscataway: IEEE, 2012: 206-210.
- [11] Britton Chris. IT体系结构与中间件: 建设大型集成系统的策略[M]. 刁联旺, 李彬, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [12] 工业互联网产业联盟. 5G与工业互联网融合应用发展白皮书[EB/OL]. (2019-10-1)[2021-09-04]. <https://www.chinaruimu.com/news/industry-dynamics/1840.html>.
- [13] 程江涛. 航空火力控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [14] 隋金坪, 刘振, 魏玺章, 等. 基于随机PRI压缩感知雷达的速度假目标识别方法[J]. 电子学报, 2017, 45(1): 98-103.  
SUI J P, LIU Z, WEI X Z, et al. Velocity false target identification based on random pulse repetition interval compressed sensing radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(1): 98-103. (in Chinese)
- [15] 梁韩立. 机载激光通信自动跟踪控制系统设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.  
LIANG H L. Design and Realization of Airborne Laser Communication Automatic Tracking Control System[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [16] 孙龙. 机载敌我识别系统软件测试技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.  
SUN L. Research on Airborne Identification of Friend or Foe System Software Testing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 肖莎. 基于机载武器控制系统的发展研究[J]. 决策与信息(中旬刊), 2015, 2015(7): 200-200, 203.
- [18] 中国电子技术标准化研究所. 机载雷达通用要求/战术技术要求项目格式: GJB2137.3—1994[S]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 8.
- [19] 孙晨伟, 陶海红, 郭晓双, 等. 基于非均匀子阵的双和/三差通道同时抑制主副瓣干扰[J]. 电子学报, 2019, 47(4): 907-914.  
SUN C W, TAO H H, GUO X S, et al. Mainlobe and sidelobe interferences suppression based on two sum & three difference channels for irregular subarrays[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(4): 907-914. (in Chinese)
- [20] 中国电子技术标准化研究所. 军用雷达测距机用模块规范: GJB4257—2001[S]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 5.
- [21] 中国电子技术标准化研究所. 军用雷达敌我识别器性能测试方法: GJB4203—2001[S]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 10.

- [22] 裴志诚, 单晓文, 王玉龙. 敌我识别系统及其对抗技术研究[J]. 通信对抗, 2011, (4): 52-55.  
PEI Z C, SHAN X W, WANG Y L. IFF system and its countermeasure technology[J]. Communication Countermeasures, 2011, (4): 52-55. (in Chinese)
- [23] 国防科学技术工业委员会. 飞机平视显示/武器瞄准系统通用规范: GJB189A—2003[S]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 18.
- [24] 中国人民解放军总参谋部. 航空武器装备主要作战使用性能论证要求: GJB4669—1994[S]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 5.
- [25] 刘泽坤, 宋贵宝, 罗亚民, 等. 小子样条件下命中精度 Bayes 序贯检验与递推估计[J]. 电光与控制, 2018, 25(9): 88-92.  
LIU Z K, SONG G B, LUO Y M, et al. Bayesian sequential test and recursive estimation of hitting precision under small sample condition[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(9): 88-92. (in Chinese)



张欣 女, 1994年4月2日出生于辽宁省凌源市. 博士. 主要研究方向为网络可靠性.  
E-mail: sy1614222@buaa.edu.cn

#### 作者简介



赵静萌 女, 1998年3月出生於河南省漯河市. 研究生. 主要研究方向为网络可靠性.  
E-mail: zhaojm0305@buaa.edu.cn



黄宁(通讯作者) 女, 1968年5月出生於云南省普洱市. 现为北京航空航天大学可靠性与系统工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为网络可靠性.  
E-mail: hn@buaa.edu.cn



朱杰 男, 1996年8月出生於四川省眉山市. 研究生. 主要研究方向为网络可靠性.  
E-mail: 1434189710@qq.com