

基于故障树分析的航空装备体系结构贡献率评估方法*

罗承昆^{1,2}, 陈云翔², 何 桢³, 李 岩², 张洋铭¹

(1. 复杂系统仿真总体重点实验室, 北京 100101;

2. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 陕西 西安 710051; 3. 空军研究院, 北京 100085)

摘要:针对航空装备体系构成复杂的特点,将故障树分析引入航空装备体系结构贡献率评估问题,提出基于故障树分析的评估方法。从作战装备、信息支援装备和保障装备三个方面构建航空装备体系结构,建造航空装备体系结构故障树;采用底事件的关键重要度指标来计算航空装备的体系结构贡献率,建立基于关键重要度的航空装备体系结构贡献率评估模型;以某航空装备体系为例进行建模分析。分析结果表明:所提方法能够准确评估航空装备体系结构贡献率,为确定航空装备体系结构短板、优化航空装备体系结构等方法提供方法支撑。

关键词:航空装备;体系结构贡献率;故障树分析;关键重要度

中图分类号:E917 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2021)01-155-08

Evaluation method of aviation equipment's structure contribution rate to system-of-systems based on fault tree analysis

LUO Chengkun^{1,2}, CHEN Yunxiang², HE Zhen³, LI Yan², ZHANG Yangming¹

(1. National Key Laboratory of Complex System Simulation, Beijing 100101, China;

2. Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

3. Air Force Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of complex composition of aviation equipment system-of-systems, the fault tree analysis was introduced into the evaluation problem of aviation equipment's structure contribution rate to system-of-systems, and an evaluation method based on fault tree analysis was proposed. The aviation equipment system-of-systems structure was constructed from the three aspects of operation equipment, information support equipment and support equipment. Furthermore, the fault tree of aviation equipment system-of-systems structure was constructed and the criticality importance index of bottom event was used to calculate the aviation equipment's structure contribution rate to system-of-systems. And the evaluation model of aviation equipment's structure contribution rate to system-of-systems based on criticality importance was established. Taking an aviation equipment system-of-systems as an example, the results show that the proposed method can evaluate the aviation equipment's structure contribution rate to system-of-systems accurately and provide methodological support for short board determination and optimization of aviation equipment system-of-systems structure.

Keywords: aviation equipment; structure contribution rate to system-of-systems; fault tree analysis; criticality importance

航空装备体系结构是航空装备体系功能发挥的基础,其完备与否不仅关系到航空装备体系的可持续发展,更关系到航空装备体系的使命任务履行。科学准确地评估航空装备体系结构贡献率,对于确定航空装备体系结构短板、优化航空装备体系结构等具有非常重要的意义。

目前,关于装备体系结构贡献率评估方法的研究较少。文献[1]从数量结构、质量结构、信息拓扑结构、主战装备与保障装备比例结构、装备体系型谱结构等方面分析了装备对体系结构优化的

总体贡献。文献[2]将装备体系结构贡献率分解为增强体系融合度贡献率、提升一体化水平贡献率和精干型谱系列贡献率。但是文献[1-2]没有提出相应的装备体系结构贡献率评估方法。文献[3]从系列化程度、通用化程度、体系兼容度和功能多样化等方面构建了装备体系结构贡献率评估指标体系,提出了基于层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 的评估方法。文献[4]将新型智能装甲作战系统对陆军装备体系结构的贡献率分解为战斗力生成方式贡献率、一体化水

* 收稿日期:2019-07-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71601183, L1534031);中国博士后科学基金资助项目(2017M623415)

作者简介:罗承昆(1990—),男,湖南邵阳人,助理研究员,博士, E-mail:afeulck@163.com

平贡献率、通用化与系列化贡献率,并采用了基于信度规则库的证据推理方法求解装备体系结构贡献率,但是构建信度规则库时主观性较强。

在装备对作战体系结构的贡献率评估方面。文献[5]从对指挥体制扁平化的贡献、对作战编成灵活性的贡献、对部队编成小型化的贡献和对装备体系结构精干化的贡献等方面分析了装备对作战体系结构的贡献,但未提出具体评估方法。文献[6]将装备作战体系结构贡献率分解为功能结构贡献率和信息结构贡献率,其中:功能结构贡献率包括对任务编成能力的贡献率和对结构特性的贡献率,信息结构贡献率包括对信息连通质量的贡献率、对信息保障时效性的贡献率和对作战协同能力的贡献率。在文献[6]的研究基础上,文献[7]分别提出了基于复杂网络理论的功能结构贡献率评估方法和基于结构方程模型的信息结构贡献率评估方法,得到的装备作战体系结构贡献率评估结果可作为作战体系结构优化的依据,但是难以直接用于指导装备体系结构优化。

综上所述,现有的装备体系结构贡献率评估研究存在评估方法主观性强、评估结果难以应用等不足。针对航空装备体系构成复杂的特点,本文将故障树分析引入航空装备体系结构贡献率评估问题中,提出一种基于故障树分析的评估方法。从作战装备、信息支援装备和保障装备 3 个方面分析航空装备体系构成,构建航空装备体系结构;在此基础上,建造航空装备体系结构故障树;采用底事件的关键重要度指标来计算航空装备的体系结构贡献率,建立基于关键重要度的航空装备体系结构贡献率评估模型;以某航空装备体系为例进行建模分析,验证所提方法的性能。

1 故障树分析基本理论

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)最早是由美国贝尔实验室于 1961 年提出的一种定性定量相结合的可靠性分析方法。它通过分析系统设计中可能引起系统故障的硬件、软件、环境、人为等因素,建造逻辑框图(故障树),在此基础上从定性层面分析引起系统故障的各种可能因素组合,从定量层面计算系统故障概率和确定引起系统故障的关键因素,进而采取针对性的措施来提高系统的可靠性。故障树分析具有形象直观、灵活多用、逻辑性强等特点,在核工业^[8]、航空航天^[9-10]、机械制造^[11]、武器装备系统^[12-13]等领域得到了广泛的应用。

1.1 故障树的数学描述

假设某故障树由 n 个相互独立的底事件构成,并且元部件与系统只有正常与故障两种状态。若 X_i 为底事件的状态变量, T 为顶事件的状态变量,令

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{底事件 } X_i \text{ 发生(即元部件故障)} \\ 0, & \text{底事件 } X_i \text{ 不发生(即元部件正常)} \end{cases} \quad (1)$$

$$T = \begin{cases} 1, & \text{顶事件发生(即系统故障)} \\ 0, & \text{顶事件不发生(即系统正常)} \end{cases} \quad (2)$$

由于顶事件状态 T 取决于所有底事件的状态,则有

$$T = T(X) = T(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3)$$

称 $T(X)$ 为故障树的结构函数,它是描述系统状态的布尔函数,其自变量为各元部件的状态变量。

故障树中常用的逻辑门为“与门”和“或门”。其中,“与门”的结构函数为

$$T(X) = \prod_{i=1}^n X_i \quad (4)$$

“或门”的结构函数为

$$T(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i) \quad (5)$$

1.2 顶事件的概率计算

通常情况下,故障树中的底事件可能会出现重复,此时需要通过最小割集来计算顶事件的发生概率。求解最小割集的方法较多,常用的方法有下行法和上行法^[14]。

设故障树中底事件 X_i 的发生概率为 P_i ,则最小割集 K_j 的发生概率为

$$P(K_j) = P(X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_m) = \prod_{i=1}^m P_i \quad (6)$$

式中, m 为 K_j 的阶数。

若故障树有 k 个最小割集,那么顶事件 T 的发生概率为

$$P(T) = P(K_1 \cup K_2 \cup \dots \cup K_k) \quad (7)$$

$P(T)$ 需要根据最小割集之间相交和不相交两种情况分别进行计算。

1) 当最小割集之间不相交时,有

$$P(T) = \sum_{j=1}^k P(K_j) \quad (8)$$

2) 当最小割集之间相交时,有

$$P(T) = \sum_{j=1}^k P(K_j) - \sum_{j < u = 2}^k P(K_j K_u) + \sum_{j < u < v = 3}^k P(K_j K_u K_v) + \dots + (-1)^{k-1} P(K_1, K_2, \dots, K_k) \quad (9)$$

1.3 底事件的重要度计算

底事件对顶事件发生的贡献程度称为该底事件的重要度。底事件的重要度越大,说明该底事件所处的环节越薄弱,其位置越重要。底事件的重要度计算对确定系统关键部位、优化改进系统结构等具有十分重要的意义。底事件重要度分为结构重要度、概率重要度与关键重要度,它们从不同方面刻画了底事件对顶事件发生的贡献程度。

1.3.1 结构重要度

结构重要度是从故障树结构方面刻画底事件对顶事件发生的贡献程度^[14],它只与底事件在故障树中所处的位置有关,而与底事件的发生概率无关。底事件 X_i 的结构重要度为

$$I_i^s = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{(X_1, \dots, X_{i-1}, 1, X_{i+1}, \dots, X_n)} [T(X_1, \dots, X_{i-1}, 1, X_{i+1}, \dots, X_n) - T(X_1, \dots, X_{i-1}, 0, X_{i+1}, \dots, X_n)] \quad (10)$$

式中: $\sum_{(X_1, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n)}$ 为 $X_1, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n$

分别取 0 或 1 时的所有可能求和。

1.3.2 概率重要度

概率重要度刻画了底事件发生概率变化对顶事件发生概率变化的贡献程度^[14],它可以用来度量降低底事件发生概率对降低顶事件发生概率的贡献。底事件 X_i 的概率重要度为

$$I_i^p = \frac{\partial P(T)}{\partial P_i} \quad (11)$$

1.3.3 关键重要度

关键重要度刻画了底事件发生概率变化率对顶事件发生概率变化率的贡献程度^[14],它不仅能够描述底事件发生概率重要度的影响,还能够描述底事件发生概率改进的难易程度。底事件 X_i 的关键重要度为

$$I_i^c = \frac{P_i}{P(T)} \cdot \frac{\partial P(T)}{\partial P_i} = \frac{P_i}{P(T)} I_i^p \quad (12)$$

2 航空装备体系结构贡献率评估模型

2.1 航空装备体系结构的构建

航空装备是军队列编的航空器及其各种武器、设备、附件的统称,包括飞机、直升机、航空发动机、机载武器、航空电子设备及航空救生装备等^[15]。空军航空装备是空军列编的用于执行空中作战任务和实施保障的各类飞机、直升机、航空弹药等的统称,是空军装备的主要组成部分和空军实施作战的主要物质基础。由于航空装备体系构成复杂,为便于开展研究,将航空装

备限定为空军各类飞机,按照用途不同具体可分为作战装备、信息支援装备和保障装备 3 大类。其中,作战装备是作战中起火力杀伤、破坏作用的装备,主要包括歼击机、歼轰机和轰炸机;信息支援装备是以电子信息技术为主要特征,用于信息获取、传输、处理、利用或对信息流程各环节执行攻击与防护任务的装备,主要包括预警机、侦察机和干扰机;保障装备是用于实施作战保障与技术保障的装备,主要包括运输机和加油机。

航空装备体系结构是在军事战略和使命任务的牵引下,根据航空装备的作战使用方式和战技指标,所确定的关于航空装备的排列组合方式。航空装备体系结构具有整体性、配套性、多代并存性、相对稳定性等特点,这是构建航空装备体系结构的基本要求。

基于上述分析,可构建航空装备体系结构示意图,如图 1 所示。需要说明的是,图 1 仅分析到机种结构这一层次,机型结构可根据实际问题做进一步具体分析。

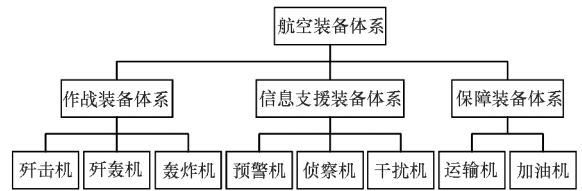


图 1 航空装备体系结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of aviation equipment system-of-systems structure

2.2 航空装备体系结构故障树的建造

为有效履行航空装备体系的使命任务,必须构建完备的航空装备体系结构,确保不出现短板弱项。因此,将航空装备体系结构缺失作为顶事件。在基于信息系统的体系作战背景下,航空装备体系建设必须统筹好作战装备、信息支援装备和保障装备之间的关系,其中任何一类装备体系结构缺失都将造成航空装备体系结构缺失,故将航空装备体系结构缺失与作战装备体系结构缺失、信息支援装备体系结构缺失、保障装备体系结构缺失之间的关系解释为“或门”的关系。然后分别将这 3 类装备体系结构缺失作为中间事件,根据各机种的功能任务逐级向下分析,直到底事件为止。

在构建航空装备体系结构示意图的基础上,即可建造航空装备体系结构故障树示意图,如图 2 所示。

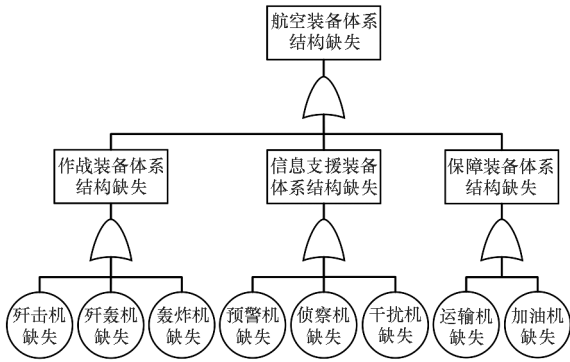


图 2 航空装备体系结构故障树示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fault tree of aviation equipment system-of-systems structure

2.3 基于关键重要度的航空装备体系结构贡献率评估模型

结构重要度主要取决于底事件在故障树中的位置,与底事件的发生概率无关,根据结构重要度仅能区分故障树中不同位置底事件之间的重要程度,难以区分相同位置底事件之间的重要程度;概率重要度不仅考虑了底事件在故障树中的位置,还考虑了底事件的发生概率,根据概率重要度能够较好地地区分底事件之间的重要程度;关键重要度从底事件的不可靠度与概率重要度两个方面刻画了其对于顶事件的影响,能够更加全面客观地度量底事件对顶事件发生的贡献程度。将航空装备体系结构贡献率定义为航空装备对航空装备体系结构完备性提升的贡献程度,采用航空装备体系结构故障树中底事件的关键重要度指标来计算航空装备的体系结构贡献率,建立基于关键重要度的航空装备体系结构贡献率评估模型。

假设航空装备体系结构故障树示意图中的各底事件相互独立,底事件 $X_i (i = 1, 2, 3, \dots, 8)$ 的发生概率为 P_i ,并且各机种与航空装备体系结构只有完备与缺失两种状态。由于航空装备体系结构故障树示意图全部由“或门”构成,因此顶事件的发生概率为

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^8 (1 - P_i) \quad (13)$$

式中, $P(T)$ 为航空装备体系结构缺失的概率。

在确定顶事件的发生概率后,即可得到底事件 X_i 的概率重要度为

$$I_i^p = \frac{\partial P(T)}{\partial P_i} = \prod_{q=1, q \neq i}^8 (1 - P_q) \quad (14)$$

式中, P_q 为底事件 X_q 的发生概率。

进而得到底事件 X_i 的关键重要度为

$$I_i^c = \frac{P_i}{P(T)} I_i^p = \frac{P_i}{1 - \prod_{q=1}^8 (1 - P_q)} \prod_{q=1, q \neq i}^8 (1 - P_q) \quad (15)$$

因此,航空装备 X_i 的体系结构贡献率为

$$CR_i^s = I_i^c \times 100\% = \left[\frac{P_i}{1 - \prod_{q=1}^8 (1 - P_q)} \prod_{q=1, q \neq i}^8 (1 - P_q) \right] \times 100\% \quad (16)$$

3 案例验证与分析

本节以某航空装备体系为例进行建模分析,验证所提方法的性能。对于某航空装备体系,假设其构成如表 1 所示,现运用所提方法评估航空装备的体系结构贡献率。

表 1 航空装备体系构成

Tab. 1 Composition of aviation equipment system-of-systems

机种	机型	
歼击机	二代机	DJ1, DJ2
	三代机	ZJ1, ZJ2, ZJ3
	四代机	GJ1
歼轰机		JH1
轰炸机		HZ1
预警机	战术预警机	XY1, XY2
	战略预警机	DY1
侦察机	战术侦察机	SZ1, SZ2
	战略侦察机	LZ1, LZ2
干扰机	随队干扰机	SG1
	远距干扰机	YG1, YG2
运输机	战术运输机	SY1, SY2
	战略运输机	LY1, LY2
加油机		JY1, JY2

3.1 航空装备体系结构构建

由于军事经费的制约,目前各国空军装备的歼击机大多处于多代并存、搭配使用的局面,即根据作战对象的不同,通常采用高、低档歼击机搭配组成作战编队。在分析歼击机的搭配模式时,仅考虑不同型号歼击机组成高、低档搭配,不考虑同一型号歼击机组成高、低档搭配,此外还考虑歼击机的降代搭配(如 ZJ1 与 ZJ2 可组成三、二代歼击

机搭配模式)。基于上述分析,构建航空装备体系结构,如图 3 所示。

3.2 航空装备体系结构故障树建造

在构建航空装备体系结构的基础上,将航空

装备中不同机种或机型之间的关系解释为“或门”或“与门”的关系,结合航空装备体系实际,即可建造航空装备体系结构故障树,如图 4 所示,其中事件标号及其名称如表 2 所示。

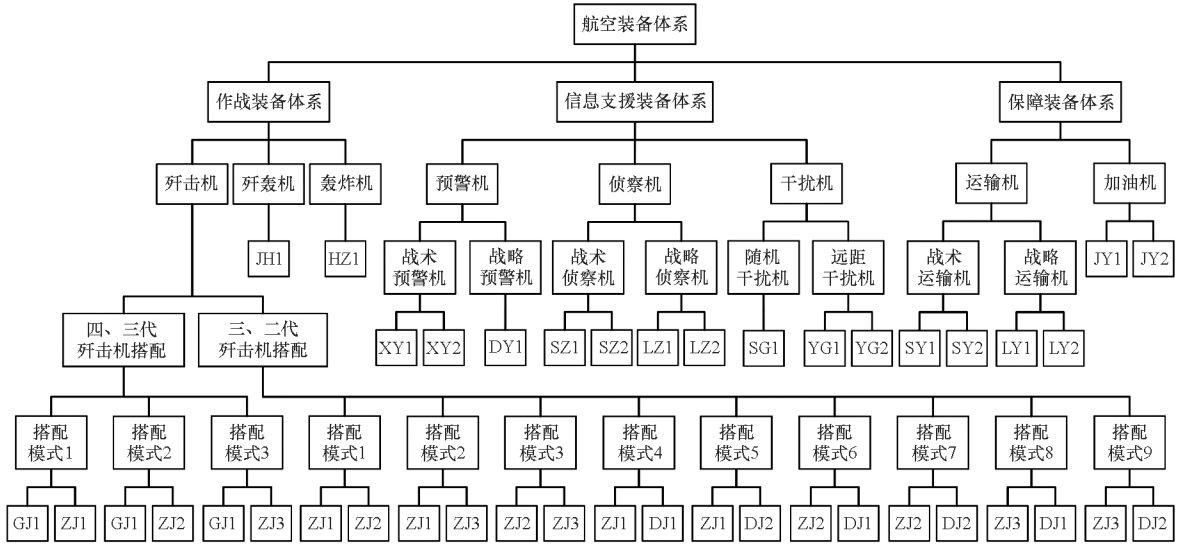


图 3 航空装备体系结构

Fig. 3 Aviation equipment system-of-systems structure

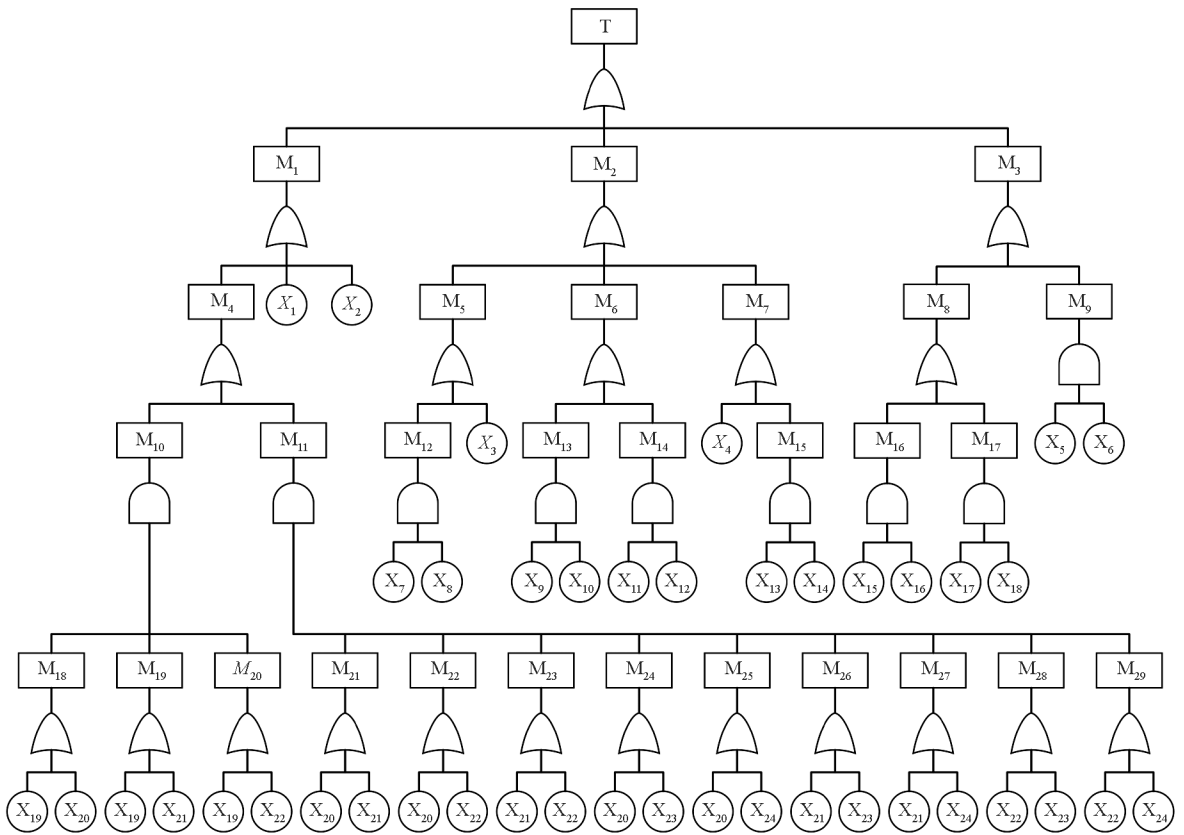


图 4 航空装备体系结构故障树

Fig. 4 Fault tree of aviation equipment system-of-systems structure

表 2 事件标号及其名称

Tab. 2 Label and name of events

事件标号	事件名称	事件标号	事件名称
T	航空装备体系结构缺失	M ₂₇	三、二代歼击机搭配模式 7 缺失
M ₁	作战装备体系结构缺失	M ₂₈	三、二代歼击机搭配模式 8 缺失
M ₂	信息支援装备体系结构缺失	M ₂₉	三、二代歼击机搭配模式 9 缺失
M ₃	保障装备体系结构缺失	X ₁	JH1 缺失
M ₄	歼击机缺失	X ₂	HZ1 缺失
M ₅	预警机缺失	X ₃	DY1 缺失
M ₆	侦察机缺失	X ₄	SG1 缺失
M ₇	干扰机缺失	X ₅	JY1 缺失
M ₈	运输机缺失	X ₆	JY2 缺失
M ₉	加油机缺失	X ₇	XY1 缺失
M ₁₀	四、三代歼击机搭配缺失	X ₈	XY2 缺失
M ₁₁	三、二代歼击机搭配缺失	X ₉	SZ1 缺失
M ₁₂	战术预警机缺失	X ₁₀	SZ2 缺失
M ₁₃	战术侦察机缺失	X ₁₁	LZ1 缺失
M ₁₄	战略侦察机缺失	X ₁₂	LZ2 缺失
M ₁₅	远距干扰机缺失	X ₁₃	YG1 缺失
M ₁₆	战术运输机缺失	X ₁₄	YG2 缺失
M ₁₇	战略运输机缺失	X ₁₅	SY1 缺失
M ₁₈	四、三代歼击机搭配模式 1 缺失	X ₁₆	SY2 缺失
M ₁₉	四、三代歼击机搭配模式 2 缺失	X ₁₇	LY1 缺失
M ₂₀	四、三代歼击机搭配模式 3 缺失	X ₁₈	LY2 缺失
M ₂₁	三、二代歼击机搭配模式 1 缺失	X ₁₉	GJ1 缺失
M ₂₂	三、二代歼击机搭配模式 2 缺失	X ₂₀	ZJ1 缺失
M ₂₃	三、二代歼击机搭配模式 3 缺失	X ₂₁	ZJ2 缺失
M ₂₄	三、二代歼击机搭配模式 4 缺失	X ₂₂	ZJ3 缺失
M ₂₅	三、二代歼击机搭配模式 5 缺失	X ₂₃	DJ1 缺失
M ₂₆	三、二代歼击机搭配模式 6 缺失	X ₂₄	DJ2 缺失

3.3 航空装备体系结构贡献率评估

假设航空装备体系结构故障树中的各底事件相互独立,并且各型航空装备与航空装备体系结构只有完备与缺失两种状态。若各底事件的发生概率(即各型航空装备的缺失概率)如表 3 所示,鉴于本文建造的航空装备体系结构故障树比较大,采用 FreeFta 软件计算各底事件的关键重要度,进而得到各型航空装备的体系结构贡献率(见表 3)。

表 3 航空装备的缺失概率及体系结构贡献率

Tab. 3 Loss probability and structure contribution rate to system-of-systems of aviation equipment

机型	缺失概率	体系结构贡献率/%	机型	缺失概率	体系结构贡献率/%
JH1	0.20	0.903 8	YG1	0.15	0.083 2
HZ1	0.45	2.957 9	YG2	0.15	0.083 2
DY1	0.50	3.615 3	SY1	0.15	0.083 2
SG1	0.45	2.957 9	SY2	0.15	0.083 2
JY1	0.40	0.688 6	LY1	0.40	0.688 6
JY2	0.40	0.688 6	LY2	0.40	0.688 6
XY1	0.30	0.357 6	GJ1	0.50	3.615 3
XY2	0.30	0.357 6	ZJ1	0.15	0.052 4
SZ1	0.15	0.083 2	ZJ2	0.25	0.055 3
SZ2	0.15	0.083 2	ZJ3	0.35	0.056 6
LZ1	0.15	0.083 2	DJ1	0.15	0.011 4
LZ2	0.15	0.083 2	DJ2	0.15	0.011 4

为便于进行直观分析,绘制各型航空装备的体系结构贡献率直方图,如图 5 所示。通过对表 3 和图 5 进行分析可以发现:

1) 第四代歼击机由于只有 GJ1 这一种机型,并且其缺失概率很高,其体系结构贡献率很高。下一步有必要采取措施降低 GJ1 的缺失概率或发展新型第四代歼击机,使其与现有四代机、三代机搭配使用,从而增加四、三代歼击机搭配模式,优化航空装备体系结构。第三代歼击机由于机型较多,其体系结构贡献率较低,暂时不考虑发展。第二代歼击机由于能够完成的作战任务越来越少,其体系结构贡献率最低,随着时间的推移将逐步被淘汰。

2) 歼轰机虽然只有 JH1 这一种机型,但是其缺失概率较低,因而其体系结构贡献率一般。此外,随着军事科技的迅速发展与作战样式的不断

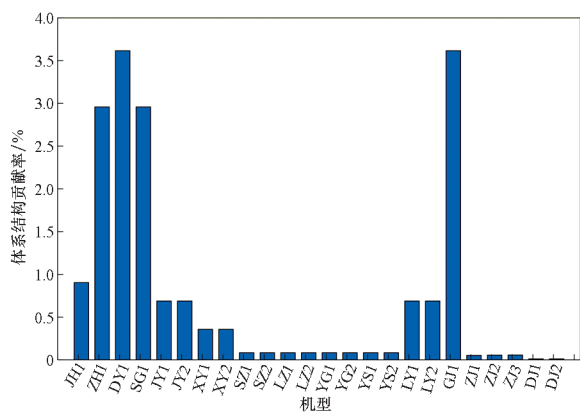


图5 航空装备的体系结构贡献率直方图

Fig.5 Histogram of aviation equipment's structure contribution rate to system-of-systems

变化,未来空战场中歼轰机将由于其作战功能单一而逐步被多用途歼击机取代。因此,歼轰机不作为航空装备体系结构优化的重点,暂时不考虑发展。

3)轰炸机由于只有 HZ1 这一种机型,并且其缺失概率较高,其体系结构贡献率较高。事实上, HZ1 由于设计生产年代久远,已远远不能满足实际作战需求。虽然后来几经改造,但都集中于武器和机载设备,制约飞机性能的气动、结构等没有变化。此外,由于速度慢、航程短、机动性能差、雷达反射截面积大等不足, HZ1 已很难再通过改造适应现代战场需要,急需发展新型轰炸机,提高精确打击能力和战略威慑能力。

4)战略预警机由于只有 DY1 这一种机型,并且其缺失概率很高,因而其体系结构贡献率很高。随队干扰机由于只有 SG1 这一种机型,并且其缺失概率较高,因而其体系结构贡献率较高。信息化条件下的体系作战,对战场信息的实时获取、传输、处理与利用能力提出了越来越高的要求,制信息权成为决定战争胜负的关键因素。下一步有必要采取措施降低 DY1 和 SG1 的缺失概率或发展新型战略预警机和随队干扰机,提高信息作战能力。

综上所述,第四代歼击机、战略预警机、轰炸机和随队干扰机为该航空装备体系结构的短板,应将其作为航空装备体系结构优化的重点。

4 结论

针对航空装备体系构成复杂的特点,提出了基于故障树分析的航空装备体系结构贡献率评估方法。本文的主要贡献及结论如下:

1)从作战装备、信息支援装备和保障装备 3

个方面构建了航空装备体系结构,建造了航空装备体系结构故障树;

2)采用航空装备体系结构故障树中底事件的关键重要度指标来计算航空装备的体系结构贡献率,建立了基于关键重要度的航空装备体系结构贡献率评估模型;

3)案例验证与分析结果表明,所提方法能够准确评估航空装备体系结构贡献率,为确定航空装备体系结构短板、优化航空装备体系结构等提供方法支撑。

参考文献 (References)

- [1] 吴朝晖,赵海江. 装备体系贡献度概念及评价方法初探[J]. 论证与研究, 2015, 31(4): 5-7.
WU Chaohui, ZHAO Haijiang. A preliminary study on the concept and evaluation method of equipment system contribution [J]. Demonstration and Research, 2015, 31(4): 5-7. (in Chinese)
- [2] 吕惠文,张炜,吕耀平,等. 基于多视角的武器装备体系贡献率评估指标体系构建[J]. 装备学院学报, 2017, 28(3): 62-66.
LYU Huiwen, ZHANG Wei, LYU Yaoping, et al. Establishment of multi-perspective assessment index system of weaponry system contribution rate[J]. Journal of Equipment Academy, 2017, 28(3): 62-66. (in Chinese)
- [3] 杨雪,董爱,赵文婷,等. 防空导弹武器系统体系贡献度研究[J]. 现代防御技术, 2018, 46(3): 1-8.
YANG Xue, DONG Ai, ZHAO Wenting, et al. System contribution rate of the anti-aircraft missile weapon [J]. Modern Defense Technology, 2018, 46(3): 1-8. (in Chinese)
- [4] 陈文英,张兵志,史力晨,等. 新型智能装甲作战系统体系贡献率评估研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(9): 1841-1849.
CHEN Wenying, ZHANG Bingzhi, SHI Lichen, et al. Research on evaluation of contribution rate of a new intelligent armoured combat system to army weapon system-of-systems[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(9): 1841-1849. (in Chinese)
- [5] 陈小卫,谢茂林,张军奇. 新型装备对作战体系的贡献机理[J]. 装备学院学报, 2016, 27(6): 26-30.
CHEN Xiaowei, XIE Maolin, ZHANG Junqi. Analysis on the contribution mechanism of new equipment system to the warfighting system [J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 27(6): 26-30. (in Chinese)
- [6] 罗小明,杨娟,何榕. 基于任务-能力-结构-演化的武器装备体系贡献度评估与示例[J]. 装备学院学报, 2016, 27(3): 7-13.
LUO Xiaoming, YANG Juan, HE Rong. Research and demonstration on contribution evaluation of weapon equipment system based on task-capability-structure-evolution [J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 27(3): 7-13. (in Chinese)

- Chinese)
- [7] 罗小明, 何榕, 朱延雷. 武器装备体系结构贡献度评估[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(4): 1-6.
LUO Xiaoming, HE Rong, ZHU Yanlei. Research on evaluation of contribution to weapon equipment system architecture [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2016, 30(4): 1-6. (in Chinese)
- [8] WANG J, WANG F, CHEN S, et al. Fault-tree-based instantaneous risk computing core in nuclear power plant risk monitor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 95: 35-41.
- [9] HE Y B, DOU S L. Mechanical failure analysis of aircraft alternator based on fault tree and case reasoning [J]. Advanced Materials Research, 2012, 548: 516-520.
- [10] CHENG C Y, LI S F, CHU S J, et al. Application of fault tree analysis to assess inventory risk: a practical case from aerospace manufacturing [J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(21): 6499-6514.
- [11] CAO Y Y, LI T, WANG J, et al. Fuzzy dynamic fault tree analysis for electro-mechanical actuator based on algebraic model with common-cause failures[J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2016, 50(2): 80-90.
- [12] CHANG J R, CHANG K H, LIAO S H, et al. The reliability of general vague fault-tree analysis on weapon systems fault diagnosis [J]. Soft Computing—A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2006, 10(7): 531-542.
- [13] 董泽委, 陈伟, 王旭东, 等. 某型武装直升机武器系统故障诊断研究 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(1): 150-153.
DONG Zewei, CHEN Wei, WANG Xudong, et al. Research of a certain armed helicopter weapon system fault diagnosis[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(1): 150-153. (in Chinese)
- [14] 陈云翔. 可靠性与维修性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
CHEN Yunxiang. Reliability and maintainability engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [15] 全军军事术语管理委员会. 中国人民解放军军语[M]. 北京: 军事科学出版社, 2011.
Military Terminology Management Committee of PLA. Chinese PLA military language[M]. Beijing: Military Science Press, 2011. (in Chinese)