

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.04.011

分离式飞行数据记录与跟踪系统 可靠性分析

Reliability Analysis of Separate Flight Data Recording and Tracking System

郭 星 孙建红 张延泰 侯 斌 / GUO Xing SUN Jianhong ZHANG Yantai HOU Bin
(南京航空航天大学航空宇航学院, 飞行器环境控制与生命保障工业和
信息化部重点实验室, 南京 210016)
(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Key Laboratory of Aircraft Environment
Control and Life Support, MIIT Nanjing 210016, China)

摘 要:

采用故障树分析方法分析了新型分离式飞行数据记录与跟踪系统的可靠性。通过搭建以系统失效为顶事件的故障树, 获得了最小割集、顶事件的发生概率以及各分系统的失效概率排序。通过对比各分系统的关键重要度, 找出了分离式飞行数据记录与跟踪系统中最薄弱的部分, 并进行了改进。结果表明, 缓降分系统对总系统可靠性的影响最大, 通过多充气模块可以显著提高缓降系统的可靠性。但当充气模块多于2套时, 增加充气模块并不能进一步明显提高系统的可靠性。

关键词: 飞行数据记录器; 飞行记录系统; 飞行跟踪系统; 分离式; 故障树分析; 可靠性分析

中图分类号: V240.2

文献标识码: A

OSID:



[Abstract] The fault tree analysis was utilized to analyze the reliability of a new separate flight data recording and tracking system. The fault tree with system failure as the top event was built, and the probability of minimal cut set, the occurrence probability of top event and the sequence of fault probability of each subsystem were obtained. By comparing the criticality importance of each subsystem, the most vulnerable part of the separate flight data recording and tracking system was located, and then the system was optimized. The results show that the soft-landing system has the greatest impact on the system reliability. The reliability of soft-landing system can be significantly improved with the multi-inflation module, but the reliability of soft-landing system is not significantly improved when the number of inflatable module are more than two sets.

[Keywords] flight data recorder; flight recording system; flight tracking system; separate; fault tree analysis; reliability analysis

0 引言

飞行数据记录器 (Flight Data Recorder, 以下简称 FDR) 对于航空安全和事故调查有着重要的意义, 并为保障飞行安全以及进行日常监控提供科学

的依据^[1-3]。从法航 447 和马航 370 等空难事故中可看出, 在飞机坠海后, 传统 FDR 会随飞机残骸一起沉入大洋。由于海底地形复杂以及洋流的作用, 设备定位困难, 给及时搜救和后续事故调查造成了巨大困难。为了提升 FDR 搜寻概率, 加快其打捞速

[基金项目] 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

度,南京航空航天大学孙建红教授所带领的团队与中国商飞美国公司完成了分离式飞行数据记录与跟踪系统的研发与试验工作,该系统又称为报信者(Harbinger, HBG)系统^[4]。该系统不仅可以应急弹射飞行数据记录仪,还可在空中捕捉飞机状态,提供动态追踪功能。虽然美国于1983年测试过功能单一的军用飞机可弹射型FDR^[5],但受限于当时的数据信息技术,以及军机本身飞行员弹射救生系统具有相近功能而且日益成熟,因此弹射型FDR没有得到应用。另一方面,尽管在技术发达的今天,在民用航空领域也有不同声音。如波音称,弹射型FDR“需要受到更多研究,尤其是就减少意外后果而言”^[6]。因此,在适航要求方面,分离式飞行数据记录与跟踪系统的可靠性问题也日益受到大家关注。

传统的可靠性分析方法主要包括故障模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis,以下简称FMEA)、失效物理分析法(Physics of Failure,以下简称PoF)、故障树分析(Fault Tree Analysis,以下简称FTA)等,其中FTA具有结构简便、逻辑明确等优点。1961年,美国贝尔电话实验室H. A. Watson首先提出故障树分析法,并成功将其应用在民兵导弹发射控制系统的可靠性研究中。随后,波音公司的Hassl、Sohroder和Jackson^[7-8]于1965年成功编写了FTA的相关软件,使飞机的设计有了重大改进。近年来,随着FTA的不断发展与完善,其在航空航天领域已被广泛应用。汤旭^[9]在某民用飞机氧气系统结构的基础上,通过对氧气系统危险事件进行故障树分析,从而验证了该系统的可靠性符合

相关适航规定。E Chung和JS Hamks^[10]通过故障树模型来确定飞行构架是否满足系统需要的可靠性和安全性。和麟^[11]等以机载气象雷达系统的典型故障为对象,应用FTA,解算出了故障树最小割集,计算了顶事件的概率,同时通过底事件相对概率重要度确定了对各部件进行检查时的优先顺序。李冰月^[12]等针对飞机空调系统各主要部件进行了故障模式与影响分析,并结合FTA,对飞机空调系统故障进行了诊断实验,证明了涡轮故障对座舱温度影响最大。但国内外对飞行数据记录系统可靠性研究较少,并且还缺少与跟踪系统一体的综合系统可靠性研究。

因此,为了分析分离式飞行数据记录与跟踪系统的可靠性,寻找系统设计的薄弱环节。在明确HBG系统的组成结构和逻辑功能关系后,基于FTA,搭建了以系统失效为顶事件的故障树。通过定量分析,发现缓降系统为HBG系统可靠性的薄弱环节,进而针对缓降系统进行改进,降低了系统失效的发生概率。

1 报信者系统工作原理

HBG系统是一款集智能判断、快速分离、缓降漂浮和跟踪拍摄等功能于一体的应急飞行数据记录系统。其主要由四个分系统组成,分别是智能弹射与分离系统、拖曳式跟踪系统、缓降与应急漂浮系统以及数据传输系统。从可靠性分析与功能实现角度,可将HBG系统划分为触发系统(S1)、弹射系统(S2)、缓降系统(S3)和拖曳系统(S4),其系统工作原理如图1所示。

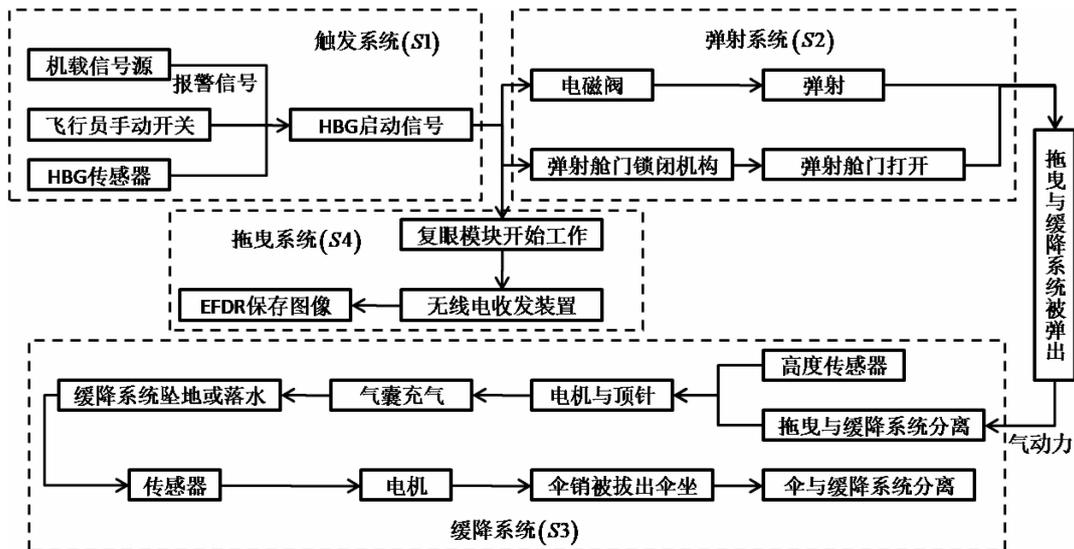


图1 HBG系统原理图

触发系统可通过机载信号源、飞行员手动开关以及 HBG 传感器判断飞机是否处于紧急状态,进而决定是否启动报信者系统。弹射系统在接收到触发系统的信号后,舱盖分离装置开始工作。在舱盖打开后,电磁阀被打开,随后气瓶中的气体进入气缸并推动活塞,最终将缓降与拖曳系统弹射出机身。缓降系统主要由弹簧牵引伞和气囊组成,用于辅助弹射分离,降低坠水冲击从而保护核心设备。在弹簧牵引伞的作用下,应急飞行数据记录器(Emergency Flight Data Recorder,以下简称 EFDR)从空中缓降入水。入水后,弹簧牵引伞自动脱离,气囊包裹 EFDR 漂浮在水面上,EFDR 发射救援和定位信号,从而引导搜救人员对其进行回收。其中 EFDR 数据接收装置在缓降系统当中,但其功能的实现在拖曳系统中,用于接收和储存所拍摄到的视频数据。拖曳系统则用于记录飞行姿态和外部破损情况。拖曳跟踪复眼模块在拖曳绳索的牵引下对飞机进行跟踪拍摄,并把拍摄

的数据传输给应急飞行数据记录器。

2 HBG 系统的 FTA 分析

故障树分析方法是系统可靠性分析中的一种重要方法,FTA 以一个不希望出现的故障事件作为顶事件,通过由上而下的严格按层次的故障因果逻辑分析,逐层找出故障事件的必要而充分的直接原因,最终找出导致顶事件发生的原因和原因组合,并通过底事件的重要度,揭露系统的薄弱环节^[13-14]。根据 HBG 系统的工作原理,结合部件失效的相关资料,采用 FTA 方法对 HBG 系统进行可靠性分析,HBG 系统故障树见图 2。

在建立故障树过程中,不考虑人为操纵的失误,即人的可靠度为 1。故障树分为 5 层,其中顶事件为 HBG 系统失效,根据 HBG 系统的工作过程将失效分为触发系统失效、弹射系统失效、缓降系统失效和拖曳系统失效。表 1 为故障树事件编号及意义,编号中含有字母 X 的事件为底事件。

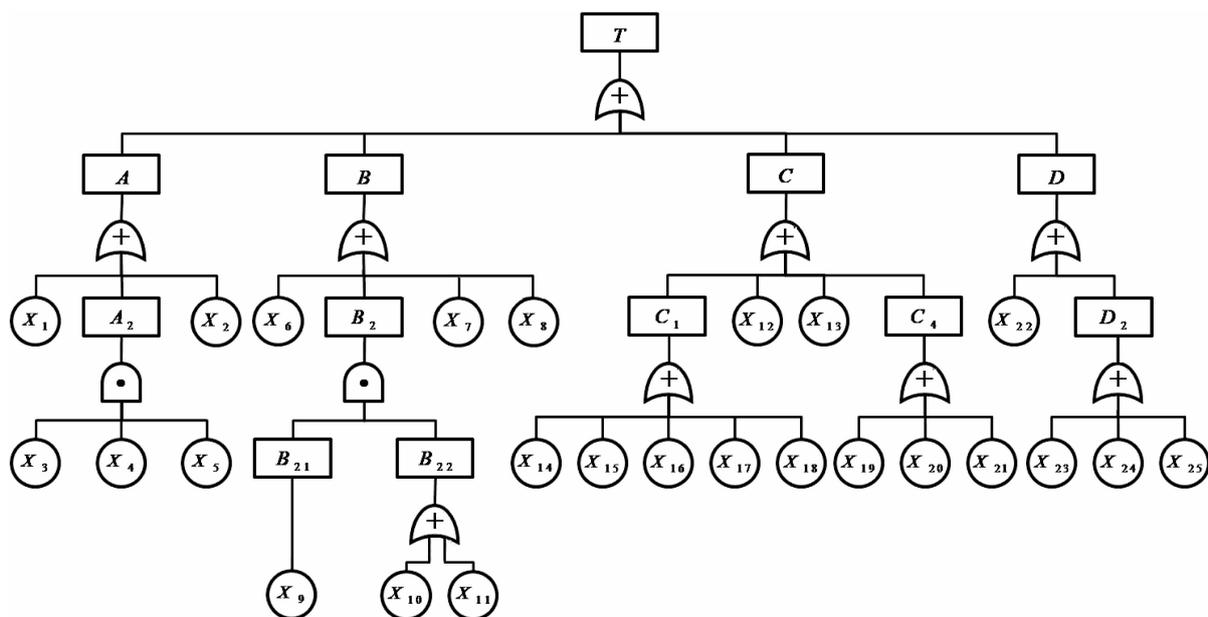


图 2 HBG 系统故障树

通过下行法求得故障树的所有最小割集: $\{X_1\}, \{X_2\}, \{X_3, X_4, X_5\}, \{X_6\}, \{X_7\}, \{X_8\}, \{X_9, X_{10}\}, \{X_9, X_{11}\}, \{X_{12}\}, \{X_{13}\}, \{X_{14}\}, \{X_{15}\}, \{X_{16}\}, \{X_{17}\}, \{X_{18}\}, \{X_{19}\}, \{X_{20}\}, \{X_{21}\}, \{X_{22}\}, \{X_{23}\}, \{X_{24}\}, \{X_{25}\}$ 。该故障树共有最小割集 22 个,其中最小割集最大容量为 3 个底事件。

根据 Boole 代数运算法则,可得顶事件的发生概率为:

$$P(T) = P(X_1 + X_2 + X_3X_4X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9X_{10} + X_9X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25}) \quad (1)$$

依据相关资料^[15-16],各零部件失效率见表 2,由于底事件发生的概率很小,那么最小割集之间可以视为相斥,于是顶事件的发生概率可以近似如下:

$$\begin{aligned}
 P(T) &= P(A) + P(B) + P(C) + P(D) \\
 &= P(X_1) + P(X_2) + P(X_3X_4X_5) + P(X_6) + \\
 &\quad P(X_7) + P(X_8) + P(X_9X_{10}) + \\
 &\quad P(X_9X_{11}) + \sum_{i=12}^{25} P(X_i) \quad (2)
 \end{aligned}$$

根据有关文献^[16], HBG 系统的任务时间 $t_0 = 2000$ 小时, 利用式(2)计算出顶事件的发生概率是 0.209 3。并计算各分系统的失效概率、概率重要度及关键重要度, 从而分析各分系统失效对顶事件的影响情况。计算结果见表 3。

从计算结果可看出, 在 t_0 时刻, 各分系统的失效概率排序见式(3):

$$S3 > S4 > S2 > S1 \quad (3)$$

分系统关键重要度值越大, 其在系统中越薄弱, 降低该分系统失效的发生概率对于降低顶事件的发生概率有显著效果。表 3 确定了当顶事件发生时, 进行安全控制所应采取措施的优先顺序。

表 1 HBG 系统故障树编号及意义

编号	意义	编号	意义
T	HBG 系统失效	X ₈	舱门故障
A	触发系统失效	X ₉	电机 1 故障
B	弹射系统失效	X ₁₀	电磁阀失效
C	缓降系统失效	X ₁₁	气瓶气压过低
D	拖曳系统失效	X ₁₂	独立电源 3 失效
A ₂	信号传递失败	X ₁₃	弹簧伞破损
B ₂	弹出失败	X ₁₄	传感器 2 失效
C ₁	气囊充气失败	X ₁₅	电路 2 失效
C ₄	弹簧伞分离失败	X ₁₆	电机 2 故障
D ₂	图像传输与储存失败	X ₁₇	连杆顶针传动失效
B ₂₁	弹出方法 1 失败	X ₁₈	气囊破损
B ₂₂	弹出方法 2 失败	X ₁₉	传感器 3 失效
X ₁	独立电源 1 失效	X ₂₀	电路 3 失效
X ₂	数据传输电缆损坏	X ₂₁	电机 3 故障
X ₃	手动开关故障	X ₂₂	独立电源 4 失效
X ₄	传感器 1 失效	X ₂₃	拍摄装置故障
X ₅	ESDP 失效	X ₂₄	数据接收故障
X ₆	独立电源 2 失效	X ₂₅	图像发送装置故障
X ₇	电路 1 失效		

表 2 HBG 系统部件失效率

系统	部件	$\lambda/10^{-6}$
S1	传感器 1	0.48
	独立电源 1	1.50
	数据传输电缆	0.792
	飞行员手动开关	0.088
	紧急情况诊断处理器	9
S2	舱门	6.73
	气瓶	6.65
	电机 1	24.0
	电路 1	0.06
	电磁阀	6.73
	独立电源 2	1.50
S3	气囊	11.17
	电路 2	0.06
	电路 3	0.06
	电机 2	24.0
	电机 3	24.0
	弹簧伞	3.83
	传感器 2	0.48
传感器 3	0.48	
S4	独立电源 3	1.50
	连杆和顶针	6.65
	EFDR 数据接收装置	7.98
	拍摄装置	5.32
	独立电源 4	1.50
	图像发送装置	7.98

表 3 各分系统失效概率、概率重要度及关键重要度

系统	失效概率	概率重要度	关键重要度
触发系统(S1)	0.004 6	0.804 9	0.018 62
弹射系统(S2)	0.017 7	0.815 6	0.072 62
缓降系统(S3)	0.141 8	0.933 6	0.665 92
拖曳系统(S4)	0.045 2	0.839 1	0.190 79

由表 3 知, 缓降系统的关键重要度最大, 其值大约为触发系统的 36 倍, 因此它是 HBG 系统最薄弱的环节, 缓降系统失效对顶事件发生的概率贡献

最大。因此,可以通过改进缓降系统来快速提高 HBG 系统的可靠性。

3 HBG 系统改进

通过对 HBG 系统进行可靠性分析,可以得到缓降系统为分系统中最为薄弱的环节,为提高总系统的可靠性,针对缓降系统进行改进。根据系统工作原理,缓降功能主要由充气模块和降落伞分离模块实现,其中充气模块由电机、连杆顶针和气囊组成,降落伞分离模块由传感器、电机和电路构成。为了提高系统可靠性,在组成系统时,可以增补一些工作组件,即使其中之一发生故障,整个系统依旧可以完成任务,这类系统称为储备系统。

依据充气模块特点,可设置多个气囊腔室及相关充气部件,本文仅给出缓降系统采用双充气模块时的故障树(见图 3)及事件 C 发生概率的计算公式,通过图 4 可以看出,只要其中一套充气模块正常工作,气囊充气过程便可成功完成。

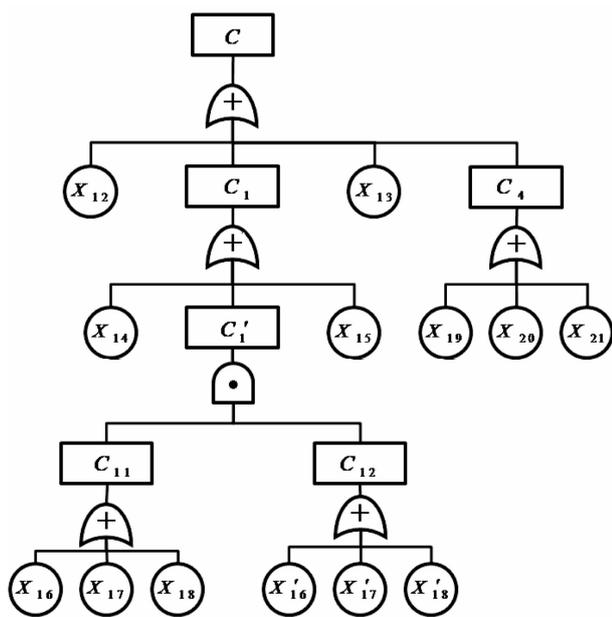


图 3 缓降系统双充气模块故障树

$$\begin{aligned}
 P(C) = & \sum_{i=12}^{15} P(X_i) + \sum_{i=19}^{21} P(X_i) + P(X_{16}X'_{16}) + \\
 & P(X_{16}X'_{17}) + P(X_{16}X'_{18}) + P(X_{17}X'_{16}) + \\
 & P(X_{17}X'_{17}) + P(X_{17}X'_{18}) + P(X_{18}X'_{16}) + \\
 & P(X_{18}X'_{17}) + P(X_{18}X'_{18}) \quad (4)
 \end{aligned}$$

为探究最佳的充气模块数目,分别计算了 n (充气模块数目)从 2 到 5 时的事件 C 发生概率,其

结果如图 4 所示。当 n=2 时,缓降系统失效的发生概率相对降低了 53.17%,当 n=3 时,失效概率相对于 n=2 只相对降低了 9.34%,同理,依次为 0.83%、0.17%,可以看出,随着充气模块数目的增加,失效概率的相对降低幅度逐渐变小。综合考虑失效概率降低幅度、部件成本以及设备体积,采用双充气模块较为合理。

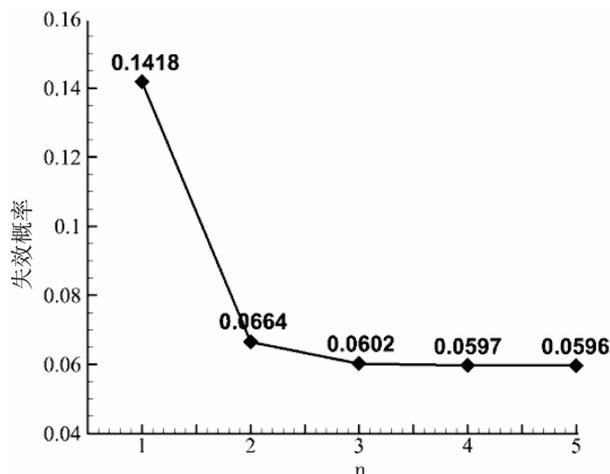


图 4 不同充气模块数目下缓降系统的失效概率

在采用双充气模块的前提下,针对降落伞分离模块,在原有的传感器-电机降落伞分离基础上,增加水溶线-弹簧机构作为冗余组件。所增加部件失效率见表 4。

表 4 增加部件失效率

系统元件	$\lambda/10^{-6}$
水溶线	11.4
弹簧	2.28

表 5 给出了系统改进前后的失效概率,可以看出,在系统改进后,缓降系统的失效概率相对降低了 86.04%,总系统的失效概率相对降低了 58.29%,从而实现了对整个系统的改进。

表 5 系统失效概率

系统状态	失效概率
缓降系统改进前	0.1418
缓降系统改进后	0.0198
总系统改进前	0.2093
总系统改进后	0.0873

4 结论

本文借助故障树分析技术,在分析分离式飞行数

据记录与跟踪系统的组成结构和逻辑功能关系的基础上,搭建了以系统失效为顶事件的故障树,得到了最小割集、顶事件的发生概率及各分系统的失效概率排序($S3 > S4 > S2 > S1$);并通过对比各分系统的关键重要度,找出了缓降系统为 HBG 系统的薄弱环节。从而在原有结构的基础上对缓降系统进行改进,通过计算发现,当充气模块多于 2 套时,缓降系统的失效概率并不随着充气模块的递增有显著降低,进而采用水溶性-弹簧与传感器-电机降落伞分离模块、双充气模块,将 HBG 系统失效的发生概率降低了 58.29%。对整个 HBG 系统的改进具有指导作用。

参考文献:

- [1] 程道来,仪垂杰,姚红宇. 飞机黑匣子舱音分析与安全诊断[M]. 北京:国防工业出版社,2013:1-10.
- [2] 李映颖,张德全,朱立贵,等. 飞参数据的应用与发展前景[J]. 计测技术,2009,36(1):10-12.
- [3] 曲建岭,唐昌盛,李万泉. 飞参数据的应用研究现状及发展趋势[J]. 计测技术,2007,27(6):1-8.
- [4] YE Wei, SUN Jianhong. Emergency mechanical and communication systems and methods for aircraft. WO:US017029128 [P]. 2017-02-02.
- [5] WATTERS D M. Crash Position indicator/crash survivable flight data recorder ejectable versus nonejectable[R]. Naval Air Test Center Patuxent River Md, 1983.
- [6] 惠晓霜. 空客飞机拟装可弹射漂浮式黑匣子[EB/OL]. (2015-01-04)[2018-09-05] http://www.xinhuanet.com/world/2015-01/14/c_127383363.html.
- [7] 孙红梅,高齐圣,朴营国. 关于故障树分析中几种典型重要度的研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2007,25(2):39-42.
- [8] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究[D]. 成都:电子科技大学,2010:1-203.
- [9] 汤旭. 民用飞机氧气系统故障树分析[J]. 民用飞机设计与研究,2012,S1:174-177.
- [10] CHUNG E, HANKS J. S. . Fault tree analyses as a tool for flight control system architecture D-sign[C]. // Reliability & Maintainability Symposium. IEEE. 2016:1-6.
- [11] 和麟,黄潇瑶,马存宝,等. 基于故障树的机载气象雷达系统安全性分析[J]. 机械与电子,2011(10):11-14.
- [12] 李冰月,孙建红,刘海港,等. 基于 FMEA 的飞机空调系统故障诊断与仿真[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(3):588-595.
- [13] SHALEV D M., TIRAN Joseph . Condition-based fault tree analysis (CBFTA): A new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations[J]. Reliability Engineering and System Safety . 2007,92:1234-1241.
- [14] CONTINI S., COJAZZI G. G. M., RENDAG. . On the use of non-coherent fault trees in safety and security studies [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93: 1886-1895.
- [15] 中国人民解放军总装备部. 中华人民共和国国家军用标准:电子设备可靠性预计手册:GJB/Z 299C-2006 [S]. 北京:中国人民解放军总装备部军标出版社发行部,2007.
- [16] 高坤奇. 报信者系统的可靠性分配与评估问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017:1-67.

作者简介

郭星 男,研究生。主要研究方向:飞行器环境控制,可靠性工程。E-mail:403716470@qq.com

孙建红(通讯作者) 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:人机与环境工程、流体力学。E-mail: jhsun@nuaa.edu.cn