

基于运行成本优化的 FADEC 系统 TLD 分析

韩冰^{1,2}, 陆中², 杨琪²

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241; 2. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

摘要: 为了降低飞机限时派遣(TLD)的运行成本, 提出了全权限数字式电子控制(FADEC)系统 TLD 分析的运行成本优化方法。构建了 TLD 分析的典型马尔可夫模型, 推导了该模型各状态稳态频度公式, 从而建立了系统单位时间运行成本与派遣时间间隔的函数关系, 并以此作为运行成本优化的目标函数; 推导了发动机控制系统平均安全性水平表达式, 建立了平均安全性水平对派遣时间间隔的约束。针对 FADEC 系统建立了 3 种不同的形式的系统单位时间运行成本函数模型, 并提出了相应的派遣间隔决策建议。结果表明: 应用基于成本优化的 FADEC 系统 TLD 分析方法进行带故障派遣决策, 能够在满足安全性要求的情况下, 降低飞机运行成本。

关键词: 系统安全性; 限时派遣; 运行成本优化; 马尔可夫过程; 全权限数字式电子控制系统

中图分类号: V37

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.06.011

TLD Analysis of FADEC Systems Based on Operational Cost Optimization

HAN Bing^{1,2}, LU Zhong², YANG Qi²

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: An optimization method of operation cost for TLD analysis of FADEC system was proposed for cost reduction of aircraft operating under TLD. A typical Markov model of TLD analysis was established, the formulas for calculating the frequency of each stable state were derived; and the relationship between the unit time operating cost and the dispatch intervals, which will be applied as the objective function for operating cost optimization, was determined. The expression of average safety level of engine control system was derived, and the constraint of the average safety level on the dispatch interval was established. Three different forms of system unit time cost function were established for the FADEC system, and the decision suggestions for dispatch intervals were proposed. The results show that the application of the cost-optimized FADEC system TLD analysis method for decision-making of dispatch with faults can reduce the operating cost of aircraft while meeting the safety requirements.

Key words: system safety; time-limited dispatch; operating cost optimization; Markov processes; FADEC system

0 引言

限时派遣(Time-limited Dispatch, TLD)是指全权限数字式电子控制(Full Authority Digital Electronic Control, FADEC)的冗余单元发生故障时, 不需要立即维修, 允许飞机带故障运行一段时间, 将故障安排在计划的维修周期进行维修, 不需要在下一次起飞前完成所有故障的修复, 避免了由于非计划维修导致的航班延误或取消, 提高了飞机的签派可靠度^[1]。TLD分

析是商用飞机及航空发动机系统安全性分析的重要组成部分, 是针对 25.1309“设备、系统及安装”、33.28“发动机控制系统”以及 CS-E1030“限时派遣”等适航条款进行符合性验证的重要内容, 已经成为安装 FADEC 系统的商用航空发动机以及配装的商用飞机开展型号合格审定、获取型号合格证必须进行的一项符合性验证工作^[2-4]。

目前工业界较为普遍使用的 TLD 分析方法是国际机动车协会(Society of Automotive Engineers, SAE)

收稿日期: 2020-09-13 基金项目: 国家自然科学基金(U1733124)、航空科学基金(20180252002)、民用飞机专项科研项目(MJZ-2015-Y-010)资助

作者简介: 韩冰(1995), 女, 工程师。

引用格式: 韩冰, 陆中, 杨琪. 基于运行成本优化的 FADEC 系统 TLD 分析[J]. 航空发动机, 2023, 49(6): 69-73. HAN Bing, LU Zhong, YANG Qi. TLD analysis of FADEC systems based on operational cost optimization[J]. Aeroengine, 2023, 49(6): 69-73.

提出的时间加权平均法与马尔可夫模型法。时间加权平均法是一种基于故障树分析的近似方法,而马尔可夫模型法的精度更高,应用也更为广泛。闫峰^[5]、张同号等^[6]利用马尔可夫模型建立了系统单故障派遣的时间间隔与平均安全性水平的函数关系;孙杨慧等^[7]对文献[5-6]中的方法进行了改进,建立了系统带多重故障派遣的时间间隔与平均安全性水平的函数关系;Prescott等^[8-10]应用蒙特卡罗仿真方法进行TLD分析,避免了马尔可夫模型在复杂系统建模时面临的状态空间爆炸问题;陆中等^[11]提出了冗余系统带多重故障派遣的派遣类别决策方法,并针对FADEC系统提出了系统带多重故障派遣的TLD分析方法;Lu等^[12-13]将系统安全性水平与签派可靠度要求均作为约束条件,从而保证了飞机按规定时间间隔进行限时派遣时,既能够满足安全性要求也能将延误率和取消率控制在可接受的范围内。

从上述研究可知,目前开展TLD分析、进行派遣间隔决策的主要约束是系统的平均安全性水平,未考虑飞机运行成本,无法降低带故障派遣时的运行成本。本文构建了以系统单位时间运行成本为优化目标,以平均安全性水平为约束条件的TLD分析优化模型,为飞机TLD运行时的成本优化提供建议。

1 TLD分析的基本概念

TLD分析是FADEC系统在能够满足平均安全性要求的条件下,确定FADEC系统带故障运行的时间,并且保证相应故障状态下系统的瞬时安全性也能满足规定的要求。FADEC系统的平均安全性水平用“机队平均推力控制丧失率 $\bar{\lambda}_{\text{LOTC}}$ ”来表示,“机队平均”是指对控制系统所有运行模式下的LOTC率进行平均,包括所有可派遣构型下的LOTC率。运输类飞机发动机FADEC系统的平均安全性必须好于或等于每十万小时发生一次LOTC事件,即系统的机队平均LOTC率 $\bar{\lambda}_{\text{LOTC}}$ 应当 $\leq 1 \times 10^{-5}$ (1/h)。在故障状态下的瞬时安全性水平由“瞬时LOTC率 $\lambda_{\text{LOTC}}(t)$ ”表示,其定义为在给定的故障构型下派遣时得到的LOTC率。

当某一故障发生后,根据系统的瞬时LOTC率的值,可将系统带故障的派遣状态分为不允许派遣(ND)、短时派遣(ST)和长时派遣(LT)3类:

(1)不允许派遣(ND)状态:若瞬时LOTC率大于 1×10^{-4} (1/h)时,则不允许带故障运行,故障必须立

即修复;

(2)短时派遣(ST)状态:如果瞬时LOTC率在区间 $[7.5 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-4}]$ (1/h)内,或者余度严重丧失时,可带故障运行较短的时间间隔 T_{ST} ,即故障必须在时间区间 $[0, T_{\text{ST}}]$ 内修复;

(3)长时派遣(LT)状态:当瞬时LOTC率在区间 $[1 \times 10^{-5}, 7.5 \times 10^{-5}]$ (1/h)内时,可带故障派遣较长的时间间隔 T_{LT} ($T_{\text{LT}} > T_{\text{ST}}$),故障必须在时间区间 $[0, T_{\text{LT}}]$ 内修复。

TLD分析的目的是在FADEC系统满足平均安全性要求小于 1×10^{-5} (1/h)的条件下,确定短时派遣间隔 T_{ST} 及长时派遣间隔 T_{LT} 。

2 面向TLD分析的运行成本优化建模

2.1 系统TLD分析的典型马尔可夫模型

用于TLD分析的马尔可夫模型中通常包含4种状态:完好(FU)状态、短时派遣(ST)状态、长时派遣(LT)状态以及LOTC状态(含ND状态)。

在限时派遣中,系统带故障派遣状态的3个状态(ND、ST和LT)均为FADEC系统功能退化的状态,此时虽然发生了故障,但是系统的推力控制功能并未丧失。利用马尔可夫模型进行TLD分析时,模型中除了包含上述3种状态之外,还包括无任何故障发生的完好(FU)状态以及推力控制功能丧失的LOTC状态。

通常导致系统发生LOTC事件的故障原因分为3类:液压机械组件(HMU)故障、未覆盖的电子电气部件(UC)故障、双余度的电子电气部件均发生故障(ST状态或LT状态下发生继发故障)。系统TLD分析的典型马尔可夫模型如图1所示。

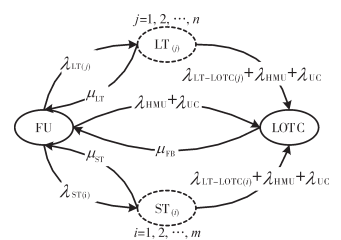


图1 系统TLD分析的典型马尔可夫模型

图中, $LT_{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots, n$) 表示第 j 个 LT 状态; $ST_{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 表示第 i 个 ST 状态; μ_{LT} 、 μ_{ST} 与 μ_{FB} 分别为系统处于 $LT_{(j)}$ 、 $ST_{(i)}$ 与 LOTC 状态时的修复率, 其中 $\mu_{\text{LT}} = 1/T_{\text{LT}}$, $\mu_{\text{ST}} = 1/T_{\text{ST}}$, 由于 LOTC 状态时需要立即修复, μ_{FB} 实际计算中取一个较大的数值; $\lambda_{\text{LT}_{(j)}}$ 为从完好状态进入第 j 个 LT 状态的故障率; $\lambda_{\text{ST}_{(i)}}$ 为从完好状态进入第 i 个 ST 状态的故障率; $\lambda_{\text{LT-LOTC}_{(j)}}$ 为第 j 个

LT状态进入LOTC状态的故障率; $\lambda_{ST-LOTC(i)}$ 为第*i*个ST状态进入LOTC状态的故障率; λ_{HMU} 表示导致LOTC事件的所有液压机械组件故障的故障率之和; λ_{UC} 表示导致LOTC事件的所有电子电气部件的未覆盖故障的故障率之和。

2.2 运行成本建模

FADEC系统带故障派遣时的运行成本包括3部分,分别是长时派遣时的故障维修费用、短时派遣时的故障维修费用以及系统发生LOTC事件的延误损失费用。

(1)LT状态下故障的单位时间维修费用可表示为

$$C_{LT} = \sum_{j=1}^n C_{LT(j)} M_{LT(j)} P_{LT(j)} \quad (1)$$

式中: $C_{LT(j)}$ 为系统处于第*j*个LT状态时对应的故障维修费用; $M_{LT(j)}$ 为系统稳态时第*j*个LT状态的频度; $P_{LT(j)}$ 为系统处于第*j*个LT状态时相应故障得到维修的概率。

(2)ST状态下故障的单位时间维修费用可表示为

$$C_{ST} = \sum_{i=1}^m C_{ST(i)} M_{ST(i)} P_{ST(i)} \quad (2)$$

式中: $C_{ST(i)}$ 为系统处于第*i*个ST状态时相应的故障维修费用; $M_{ST(i)}$ 为系统稳态时第*i*个ST状态的频度; $P_{ST(i)}$ 为系统处于第*i*个ST状态时相应故障得到维修的概率。

(3)LOTC事件发生时的单位时间延误损失费用可表示为

$$C_{LOTC} = C_{Delay} M_{LOTC} \quad (3)$$

式中: C_{Delay} 为发生LOTC事件的延误损失费用; M_{LOTC} 为系统稳态时LOTC状态的频度。

综上所述,系统单位时间内的运行总成本可以表示为

$$C_{average} = \sum_{j=1}^n C_{LT(j)} M_{LT(j)} P_{LT(j)} + \sum_{i=1}^m C_{ST(i)} M_{ST(i)} P_{ST(i)} + C_{Delay} M_{LOTC} \quad (4)$$

式中:状态频度 $M_{LT(j)}$ 、 $M_{ST(i)}$ 、 M_{LOTC} 均为未知参数,将在下文进行推导。

2.3 马尔可夫模型的稳态频度计算

在基于马尔可夫过程的可靠性模型中,系统稳态故障频度^[14]可表示为

$$f_{up-down} = \sum_{k \in W} \pi_k \left(\sum_{j \in F} q_{kj} \right) \quad (5)$$

式中: W 为所有工作状态的集合; F 为所有故障状态的集合; π_k 为第*k*个状态的极限概率; q_{kj} 为状态*k*到状态*j*的转移率。

在TLD分析的马尔可夫模型中LOTC状态是系统的唯一故障状态,则由式(5)得到系统稳态时LOTC状态的频度为

$$M_{LOTC} = \sum_{k \neq LOTC} \pi_k q_{k-LOTC} \quad (6)$$

式中: q_{k-LOTC} 为状态*k*到LOTC状态的转移率。

若将第*i*个ST状态视为系统的唯一故障状态,其他状态均视为工作状态,由式(5)得到系统稳态时第*i*个ST状态的频度为

$$M_{ST(i)} = \sum_{k \neq ST(i)} \pi_k q_{k-ST(i)} \quad (7)$$

式中: $q_{k-ST(i)}$ 为状态*k*到第*i*个ST状态的转移率。

若将第*j*个LT状态视为系统唯一故障状态,其他状态均视为工作状态,由式(5)得到系统稳态时第*j*个LT状态的频度为

$$M_{LT(j)} = \sum_{k \neq LT(j)} \pi_k q_{k-LT(j)} \quad (8)$$

式中: $q_{k-LT(j)}$ 为状态*k*到第*j*个LT状态的转移率。

在马尔可夫过程中,状态极限概率与转移率矩阵的关系^[15]为

$$\bar{\pi} Q = \bar{0} \quad (9)$$

式中: $\bar{\pi} = [\pi_1 \ \pi_2 \ \cdots \ \pi_n]$ 为各状态极限概率组成的向量; Q 为马尔可夫过程转移率矩阵; $\bar{0}$ 为所有元素均0的向量。

2.4 小结

由式(9)可知极限概率是转移率的函数,而表示故障修复的转移率是派遣间隔 T_{ST} 和 T_{LT} 的倒数。因此,极限概率也是派遣间隔 T_{ST} 和 T_{LT} 的函数。由式(6)、(7)和(8)可知各状态稳态频度是极限概率和转移率的函数,由式(4)可知系统的单位时间运行成本是状态稳态频度的函数,因而,系统单位时间运行成本也是派遣间隔 T_{ST} 和 T_{LT} 的函数,故式(4)可表示为

$$C_{average} = f(T_{ST}, T_{LT}) \quad (10)$$

3 系统平均安全性水平的约束定义

FADEC系统满足平均安全性水平不大于 1×10^{-5} ,是开展TLD分析的基本约束,也是针对TLD分析开展运行成本优化必须满足的基本约束。本章将给出系统平均安全性水平的计算公式,从而建立平均安全

性水平与派遣间隔 T_{ST} 和 T_{LT} 的函数关系。

基于马尔可夫模型的FADEC系统的平均安全性水平 $\bar{\lambda}_{LOTC}$ 定义如下^[1]

$$\bar{\lambda}_{LOTC} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{P_{\text{into-LOTC}}(t)}{1 - P_{LOTC}(t)} \quad (11)$$

式中: $P_{LOTC}(t)$ 为FADEC系统在 t 时刻处于LOTC状态的概率; $P_{\text{into-LOTC}}(t)$ 为 t 时刻流入LOTC状态的概率。

根据系统TLD分析的典型马尔可夫模型得到系统处于稳态时流入LOTC状态的概率为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{into-LOTC}}(t) = \sum_{j=1}^n \pi_{LT(j)} q_{LT(j)-LOTC} + \sum_{j=1}^n \pi_{ST(i)} q_{ST(i)-LOTC} + \pi_{FU} q_{FU-LOTC} \quad (12)$$

式中: $\pi_{LT(j)}$ 、 $\pi_{ST(i)}$ 及 π_{FU} 分别为系统处于第 j 个LT状态、第 i 个ST状态及FU状态的极限概率; $q_{LT(j)-LOTC}$ 、 $q_{ST(i)-LOTC}$ 及 $q_{FU-LOTC}$ 分别为第 j 个LT状态、第 i 个ST状态及FU状态到LOTC状态的转移率。

式(12)也可表示为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{into-LOTC}}(t) = \sum_{k \neq LOTC} \pi_k q_{k-LOTC} \quad (13)$$

式中: π_k 为除LOTC状态外的第 k 个状态的极限概率; q_{k-LOTC} 为状态 k 到LOTC状态的转移率。

在TLD分析的马尔可夫模型中,LOTC状态是唯一的故障状态,因此系统稳态可用度可表示为

$$A = 1 - \lim_{t \rightarrow \infty} P_{LOTC}(t) \quad (14)$$

即

$$A = \sum_{k \neq LOTC} \pi_k \quad (15)$$

因此,平均安全性水平 $\bar{\lambda}_{LOTC}$ 可表示为

$$\bar{\lambda}_{LOTC} = \frac{\sum_{k \neq LOTC} \pi_k q_{k-LOTC}}{\sum_{k \neq LOTC} \pi_k} \quad (16)$$

由于平均安全性水平是极限概率及转移率的函数,同样可将 $\bar{\lambda}_{LOTC}$ 表示成派遣间隔 T_{ST} 和 T_{LT} 的函数

$$\bar{\lambda}_{LOTC} = f(T_{ST}, T_{LT}) \quad (17)$$

式(17)建立了系统平均安全性水平要求对派遣时间间隔 T_{ST} 和 T_{LT} 的约束。

4 实例分析

FADEC系统由发动机控制组件(ECU)、液压机械组件(HMU)、发电机(PMA)、交叉数据链路(CCDL)和传感器(VBV、PS、LVDT、TLA、FMV、T2、

P3)等部件组成。FADEC系统各部件的维修费用见表1。

表1 FADEC系统各部件维修费用

序号	部件	维修费用/百元	序号	部件	维修费用/百元
1	ECU	1700	7	LVDT1	600
2	PMA	1400	8	LVDT2	600
3	VBV	1000	9	FMV	800
4	PS	950	10	T2	700
5	CCDL	700	11	P3	760
6	TLA	800			

由于ECU与PMA中任一故障都将极大的影响飞机的安全裕度,所以将ECU故障及PMA故障视为ST状态,其他所有冗余电子电气部件的单故障均归为LT状态,FADEC系统马尔可夫模型如图2所示。图2中所有故障率的单位均为 $1/10^6$ h。

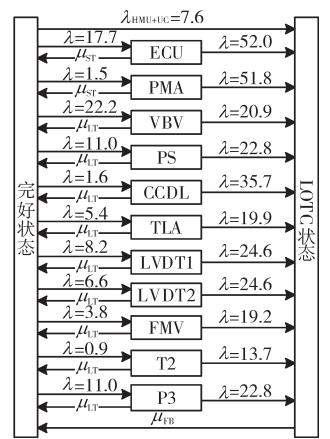


图2 FADEC系统马尔可夫模型

建立如式(17)的函数关系,根据适航要求短时派遣间隔 T_{ST} 通常取 $250 \text{ h}^{[2]}$, 得到随长时派遣间隔 T_{LT} 变化的平均安全性水平曲线如图3所示。在满足 $\bar{\lambda}_{LOTC} \leq 10^{-5}$ (1/h) 的条件下,求得最大长时派遣间隔 T_{LT} 为 2678 h , 即在 T_{LT}

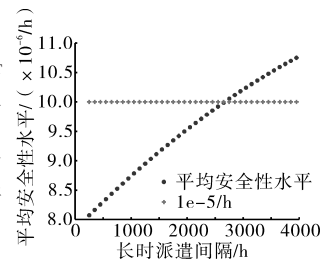


图3 平均安全性水平曲线

小于 2678 h 的条件下,系统能够满足平均安全性水平的要求。因此,在进行运行成本优化时应保证长时派遣间隔不超过 2678 h 。

建立如式(10)所示的运行成本函数,当LOTC事件造成的延误损失费用不同时,将会有不同的最优派遣策略。

(1)当LOTC事件延误损失费用小于7495百元时,单位时间运行成本随 T_{LT} 的增加而减少,在 T_{LT} 最大值处运行成本达到最小, T_{LT} 最优值是 2678 h 。以延误损失费用为7400百元为例,单位时间运行成本的函数曲线如图4(a)所示,为单调减函数。

(2)当LOTC事件延误损失费用在区间 $[7495, 7510]$

百元时,单位时间运行成本随着 T_{LT} 的增加先增加后减小,在长时派遣时间范围内的某一点处达到极大值。此时,确定 T_{LT} 值时应当避开该极值点及其临近区域。以延误损失费用为7500百元为例,单位时间运行成本的函数曲线如图4(b)所示,为先增后减函数。

(3)当LOTC事件延误损失费用大于7510百元时,单位时间运行成本随 T_{LT} 的增加而增加,此时为了达到经济效益最优化,最佳 T_{LT} 值取250 h,这种情况下应当在250 h临近的区域内完成LT故障的修复。以延误损失费用为8000百元为例,单位时间运行成本的函数曲线如图4(c)所示,为单调递增函数。

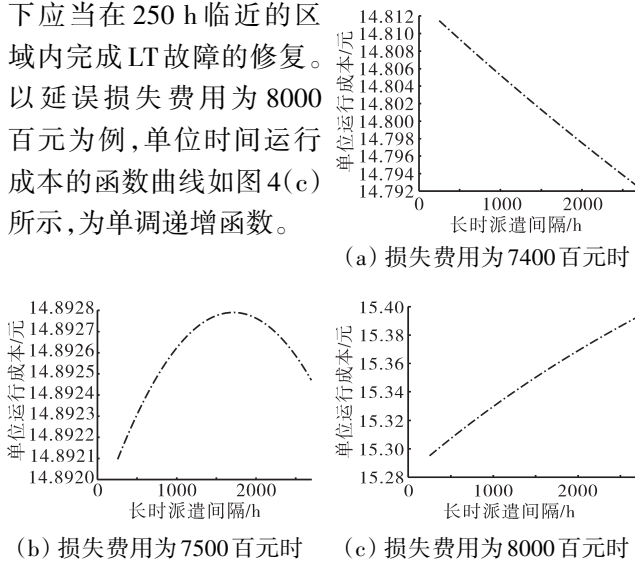


图4 不同损失费用时的单位时间运行成本函数

5 结论

(1)构建了FADEC系统TLD分析的典型马尔可夫模型,推导了TLD运行成本公式与马尔可夫模型的稳态频度计算公式,从而建立了系统单位时间运行成本与派遣间隔 T_{ST} 和 T_{LT} 的函数关系;

(2)基于FADEC系统TLD分析的典型马尔可夫模型,推导了FADEC系统平均安全性水平表达式,建立了平均安全性水平与派遣间隔 T_{ST} 和 T_{LT} 的函数关系,从而建立了系统平均安全性要求对TLD运行成本优化的约束;

(3)以FADEC系统为例,根据LOTC事件导致的延误损失费用的不同,建立了3种不同的形式的系统单位时间运行成本函数模型,并提出了相应的派遣间隔决策建议。

参考文献:

[1] SAE International Group. Guidelines for time-limited-dispatch (TLD) analysis for electronic engine control systems: ARP5107C[S]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2018: 8-58.

[2] United States Department of Transportation. Code of federal regulation part 25 (amendment 25-144) airworthiness standards: transport cate-

gory airplanes: FAR-25[S]. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2007: 339-340.

[3] European Aviation Safety Agency. (Amendment 3) certification specifications for engines: CS-E [S]. Koln: European Aviation Safety Agency, 2010: 1-D-1~1-D-2.

[4] United States Department of Transportation. Guidance material for 14 CFR33.28 engine control systems: AC33.28[S]. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2014: 13.

[5] 闫峰.民用航空发动机控制系统限时派遣方法[J].科学技术与工程, 2014, 14(28): 148-154.
YAN Feng. A method on time-limited dispatch for the control system of civil aeroengine[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(28): 148-154. (in Chinese)

[6] 张同号,陆中,周伽,等.双冗余系统带故障运行周期决策方法[J].航空计算技术, 2015, 45(5): 33-37.
ZHANG Tonghao, LU Zhong, ZHOU Jia, et al. Operation interval decision method for dual redundant systems operating with faults[J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(5): 33-37. (in Chinese)

[7] 孙杨慧,杨坤,候乃先,等.FADEC系统限时派遣及维修性分析[J].系统工程, 2017, 35(6): 152-159.
SUN Yanghui, YANG Kun, HOU Naixian, et al. TLD and maintainability analysis of FADEC system[J]. Systems Engineering, 2017, 35(6): 152-159. (in Chinese)

[8] Prescott D R, Andrews J D. A comparison of modelling approaches for the time-limited dispatch (TLD) of aircraft[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2006, 220(1): 9-20.

[9] Prescott D R, Andrews J D. Modeling and specification of time-limited dispatch categories for commercial aircraft[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2008, 130(2): 021004.1-10.

[10] Prescott D R, Andrews J D. Monte Carlo simulation modelling of aircraft dispatch with known faults[C]//8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 532-535.

[11] 陆中,戎翔,周伽,等.基于蒙特卡罗仿真的FADEC系统多重故障TLD分析方法[J].航空学报, 2015, 36(12): 3970-3979.
LU Zhong, RONG Xiang, ZHOU Jia, et al. TLD analysis method of dispatch with multiple faults based on Monte Carlo simulation for FADEC system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(12): 3970-3979. (in Chinese)

[12] Lu Z, Liang X, Zuo M J, et al. Markov process based time limited dispatch analysis with constraints of both dispatch reliability and average safety levels[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 167(11): 84-94.

[13] Lu Z, Zhou J, Li X N. Monte Carlo simulation based time limited dispatch of FADEC systems with consideration of dispatch reliability[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 72(2018): 397-408.

[14] Birolini A. Reliability engineering: theory and practice, seventh edition [M]. Berlin: Springer, 2007: 498-500.

[15] Elsayed E. 可靠性工程[M].北京:电子工业出版社, 2013: 182-183.
Elsayed E. Reliability engineering[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 182-183. (in Chinese)

(编辑:程海)