

全修复策略下 FADEC 系统 多故障 TLD 仿真分析

蔡 景¹, 胡 维¹, 陈 曦²

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016;
2. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机客户服务有限公司, 上海 200241)

摘 要: 由于航空发动机全权限电子控制(FADEC)系统的时间限制派遣(TLD)分析是航空发动机型号合格审定的一项必要工作, 针对目前 FADEC 系统的多故障 TLD 仿真分析方法中没有考虑短时限制派遣(ST)值可变以及维修策略对 TLD 分析影响的不足, 提出了全修复策略下 FADEC 系统的多故障 TLD 仿真分析方法。分析和比较了现有的 FADEC 系统维修策略, 按照机会维修或成组维修原理, 提出了全修复策略。按照全修复策略, 开展了仿真建模分析, 设计和研究了多故障 TLD 的仿真流程和方法。通过实例仿真与分析, 验证了所提仿真方法不受 FADEC 系统中零部件数量的影响, 而且相对于单故障 Markov 模型, 增加了占总故障数量 8.84% 的组合故障, 提高了分析精度。

关 键 词: 航空发动机控制系统; 时间限制派遣; 多故障; 蒙特卡洛仿真; 全修复策略

中图分类号: V37 **文献标志码:** A

TLD simulation analysis with multiple faults for FADEC system under full repair policy

CAI Jing¹, HU Wei¹, CHEN Xi²

(1. College of Civil Aviation,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Shanghai Aircraft Customer Service Company Limited,
Commercial Aircraft Corporation of China Limited, Shanghai 200241, China)

Abstract: The time-limited dispatch (TLD) analysis of the full authority digital control (FADEC) system is an important part of type certification of aero-engine. In order to make up for the existing TLD simulation analysis without taking into account the effect of the repair policy on TLD, and the short time as a variable, a TLD simulation analysis with multiple faults for FADEC system under full repair policy was proposed. The existing maintenance policies for FADEC system were compared, and according to the principle of opportunity maintenance or group maintenance, the full repair policy was presented. On the basis of the full repair policy, the analysis of simulation modeling was carried out, and the simulation process and method were designed and studied. The applicability and rationality of the proposed simulation analysis were verified through specific FADEC system. Results showed that the proposed simulation analysis was not affected by the number of parts in FADEC sys-

收稿日期:2019-08-24

基金项目:国家自然科学基金(51705242)

作者简介:蔡景(1976—),男,副教授、硕士生导师,博士,主要从事持续适航与仿真技术。

引用格式:蔡景,胡维,陈曦. 全修复策略下 FADEC 系统多故障 TLD 仿真分析[J]. 航空动力学报,2020,35(4):823-831. CAI Jing, HU Wei, CHEN Xi. TLD simulation analysis with multiple faults for FADEC system under full repair policy[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(4): 823-831.

tem, and in relation to single fault Markov model, the combined faults accounting for 8.84% of the total faults were analyzed, helping to improve the analysis accuracy.

Key words: aero-engine control system; time-limited dispatch; multiple faults; Monte Carlo simulation; full repair policy

为了提高航空发动机全权限电子控制(full authority digital engine control, FADEC)系统的安全性和签派可靠度,FADEC 系统中除机械/液压装置外,其他零部件都采用冗余方式,允许冗余单元发生故障时,可以保留故障继续使用一段时间,这段时间被称为限制派遣时间^[1-2]。FAA(美国联邦航空管理局)为此颁发了规范性文件 ANE-1993-33.28TLD-R1 用于确定限制派遣时间的时长,这个方法被称为时间限制派遣(time limited dispatch, TLD)分析方法,是航空发动机型号合格审定的一项必要工作。

根据零部件失效导致 FADEC 系统发生推力控制丧失(loss of thrust control, LOTC)的概率大小,将 TLD 主要分为两类:短时限制派遣(short time, ST)与长时限制派遣(long time, LT),对应的限制时间分别为 T_{st} 和 T_{lt} 。在 ANE-1993-33.28TLD-R1 中,对于刚服役的 FADEC 系统,考虑到制造缺陷、安装等随机因素的影响,对 T_{st} 与 T_{lt} 推荐了固定的时间,分别是 125 h(本文指飞行小时)和 250 h;而对于服役已经超过 25 000 h 的 FADEC 系统,没有给出推荐派遣限制时间。究其原因是根据 TLD 分析原理可知,LOTC 率是 T_{st} 和 T_{lt} 的函数,即只要满足适航局方 LOTC 率的要求, T_{st} 和 T_{lt} 有多种不同的取值组合。但在目前的 TLD 分析中都假定 T_{st} 是一个固定值,在此假设上研究 LOTC 率与 T_{lt} 之间的关系,进而确定 T_{lt} 的值^[3]。

目前国内外工业界使用的 TLD 分析方法主要包括时间加权平均(time weighted average, TWA)法与马尔可夫模型(Markov model, MM)法。TWA 法是将 LOTC 率表示为几类故障的失效率之和,是一种单故障分析方法,没有考虑多个故障之间的不同组合,因此是一种近似的计算方法,精度较低^[4-9]。MM 法理论上可以处理 FADEC 系统的所有状态,包括单故障、两故障、三故障等等。但以两故障 MM 为例,一个由两个 ST 故障和 73 个 LT 故障组成的 MM,会有 5 000 多种故障组合,需要建立 5 000 多个方程用于求解 LOTC 率。如果再考虑三故障状态,那么不仅方

程难以建立,而且所要建立的方程数将以指数级增加而难以求解,因此目前对于较复杂的系统,只建立了单故障 MM^[10-12]。

为了解决多故障下 FADEC 的 TLD 分析问题,目前国内外提出了采用蒙特卡罗仿真的方法^[13-16],但仍然存在两个方面的不足:①没有研究不同维修策略对 TLD 分析的影响;②没有考虑 ST 值可变。除此之外,目前多故障 TLD 仿真分析方法在应用研究中都将 FADEC 系统进行了简化,零部件数量比实际 FADEC 系统少很多。为此,本研究提出了一种全修复策略下 FADEC 系统的多故障 TLD 仿真分析方法,以解决 FADEC 系统实际中存在的多故障 TLD 分析问题,弥补现有方法的不足。

1 维修策略分析

FADEC 系统的多故障维修策略主要有两种,分别是基于 MEL(minimum equipment list)的多故障维修和基于 PIR(periodic inspection report)的多故障维修^[17]。其中基于 MEL 的多故障维修的前提条件是 FADEC 系统中各零部件的故障能通过“在飞机控制面板上显示出故障状态警告,或者在航后报告中读取”的方式被及时发现;而基于 PIR 的多故障维修是通过定期检查和维护的方式发现故障。随着 FADEC 系统技术的发展,几乎所有的故障都不需要通过定期检查和维护的方式就可以被及时发现。即使某些 FADEC 系统中存在需要定期检查和维护才能发现的故障,也是一些不影响派遣的故障。因此,本研究将基于 MEL 的多故障维修策略开展研究。

1.1 基于 MEL 的传统多故障维修

假定 FADEC 系统中同时存在 LT 类型故障 A 和故障 B 的情况,故障 A 在 t_1 时刻发生, t_4 时刻是放行终止时间;故障 B 在 t_2 时刻发生,放行的终止时间到 t_5 时刻,如图 1 所示。

如果同时存在的两个故障之间没有影响,在 t_4 时刻前必须排除故障 A,在 t_5 时刻前故障 B 仍能存在于系统中。另一种可选的方法就是在 t_4 时刻把故障 A 和故障 B 都排除。

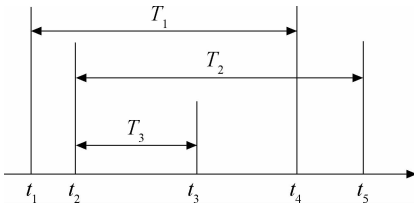


图 1 基于 MEL 的多故障维修

Fig. 1 Multiple fault maintenance based on MEL

如果同时存在的两个故障之间有相互影响,故障 A 和故障 B 同时出现在系统中使得系统的放行级别有可能降为 ST 类型故障,降级后的 ST 放行从 t_2 开始,到 t_3 结束。那么在 t_3 时刻前能够采取的维修策略有以下三种:

- 1) 在 t_3 时刻前排除两个故障,系统就处于无故障运行期;
- 2) 在 t_3 时刻前仅排除故障 A,那么放行间隔可以持续到 t_5 时刻;
- 3) 在 t_3 时刻前仅排除故障 B,那么放行间隔就到 t_4 时刻。

1.2 基于 MEL 的改进多故障维修

在基于 MEL 的传统多故障维修中,提出考虑故障 A 和故障 B 的相互影响,但没有给出判断相互影响的标准和方法。事实上,所谓“故障 A 和故障 B 相互影响”是指两个故障同时发生后改变原有的放行级别,其判断的依据是故障 A 和故障 B 发生后 FADEC 系统在单位时间内进入 LOTC 状态的概率。

另外,传统的维修策略仅仅局限于两个 LT 故障构成的多故障,放行类型有可能降为 ST。但在实际中可能存在不止两个故障同时发生的情况,故障类型也应该包含 ST、LT 和自定义的派遣故障等,而且放行类型有可能降为 ST,也有可能降为不准派遣(ND)。

在航空公司的实际维修中,通常采用机会维修或成组维修策略^[18],将多个故障一起维修以分摊维修的固定成本(停机、工具、人力等),从而降低总体维修费用。所以,本研究的策略是一旦对 FADEC 系统实施维修,就对所有已发生的故障进行修复,即全修复策略。全修复的时间点可根据多故障下的 LOTC 率确定,以故障 A 和故障 B 为例,其对应的 LOTC 率记为 $\lambda_{AB-lotc}$ 。

- 1) 如 $\lambda_{AB-lotc} \in [1 \times 10^{-4}, +\infty) \text{ h}^{-1}$,则故障 A 和故障 B 组成的多故障可看作为 ND 的情况,因此,立即对故障 A 和故障 B 修复。
- 2) 如 $\lambda_{AB-lotc} \in [1 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-4}) \text{ h}^{-1}$,则故

障 A 和故障 B 组成的多故障可看作为 LT 或 ST 的情况,因此需在 t_{AB} 时刻前对故障 A 和故障 B 修复。如 t_3 在 t_{AB} 之前,则在 t_3 时刻前对故障 A 和故障 B 修复。

- 3) 其他,表示故障 A 和故障 B 组成的多故障不影响派遣,所以不用立即修复,等出现影响签派的故障时再一起修复。

如果在处理故障 A 和故障 B 之前又出现了第三个故障 C,那么采用同样的方法,确定这种情况下 FADEC 系统在单位时间内进入 LOTC 状态的概率,即 $\lambda_{ABC-lotc}$ 。再根据 $\lambda_{ABC-lotc}$ 的大小,采用上述相同的原则,确定全修复的时间点。

2 多故障 TLD 分析的仿真建模

2.1 仿真建模分析

全修复策略下 FADEC 系统多故障 TLD 仿真分析的关键环节有两个:①如何判断系统进入了 LOTC 状态;②多个故障同时发生是否改变了原有的放行级别。在文献[3]中通过建立 FADEC 系统可靠度函数,确定故障发生后的 LOTC 率。该方法的优点是计算精确,不足之处是只适合于零部件数少、简化的 FADEC 系统,而实际的 FADEC 系统中零部件近百个,零部件之间的连接关系不只是简单的串并联,因此要建立系统的可靠度函数是非常困难的,甚至是不可能的;其次各零部件的失效率即使服从指数分布,但整个系统不可能服从指数分布,因此如何将计算得到的系统可靠度值转化为对应的 LOTC 率是一个需要深入分析的问题。

为此,本研究提出了一个更切实可行的方法,其中

- 1) 针对第一个关键环节,即“如何判断系统进入了 LOTC 状态”。本研究以 LOTC 事件为顶事件,建立 FADEC 系统的故障树,得到 LOTC 事件的最小割集。如果在仿真中如同时出现的几个故障所构成的集合,包含任何一个最小割集时,即可判断系统进入了 LOTC 状态。

- 2) 针对第二个关键环节,即“多个故障同时发生是否改变了原有的放行级别”。本研究在仿真中将多故障分成两种情况,分别是两故障、三故障及以上。

针对两故障情况,以故障 A 和故障 B 为例,同样以 LOTC 事件为顶事件,建立 FADEC 系统的故障树;将故障树中故障 A 和故障 B 对应的底层零部件的失效率改为 1,计算得到修改失效率

后的顶事件发生概率,即为系统在单位时间内进入 LOTC 状态的概率,记为 $\lambda_{AB-lotc}$ 。因此,为了提高仿真效率,可以在仿真前,利用故障树计算得到任何两故障发生后的系统 LOTC 率。

针对三故障及以上情况,即在两故障的情况下又有其他故障发生,此时如果再用类似于两故障情况的方法,采用故障树计算 LOTC 率,那么就需要在仿真前预设各种可能性。以系统包括 80 个零部件为例,如果考虑三故障的情况,就要计算 $C_{80}^3=82\,160$ 种可能的 LOTC 率,如果再考虑四故障,那么可能的情况就会更多,显然这种做法是不切实际的。为此,参考 SAE(Society of Automotive Engineers) ARP5107B 可知,故障后的 LOTC 率可以看作故障零部件的冗余部件的故障率加上单通道零部件(液压机械组件)故障率和未覆盖故障的故障率。因此,以发生故障 A 和故障 B 后,又发生故障 C 为例,三故障发生后的系统 LOTC 率为

$$\lambda_{ABC-lotc} = \lambda_{AB-lotc} + \lambda_C \tag{1}$$

其中 λ_C 为零部件 C 的冗余部件 C' 的故障率。

2.2 仿真流程与步骤

全修复策略下 FADEC 系统多故障 TLD 的仿真流程如图 2 所示,详细步骤如下:

步骤 1 以 LOTC 事件为顶事件,建立 FADEC 系统的故障树,得到 LOTC 事件的最小割集,以及单故障和两故障下的系统 LOTC 率等。

步骤 2 一般来说,电子类零部件寿命服从指数分布,因此,假定 FADEC 系统的零部件服从指数分布,按式(2)随机生成一组服从零部件失效率的寿命数据作为零部件寿命。

$$T_i = \text{randexp} \lambda_i \quad (i = 1, 2, \dots) \tag{2}$$

其中下标 i 代表零部件的编号。

步骤 3 构建集合 $T = \{(T_1, R_1), (T_2, R_2), \dots\}$, 其中 R_i 用于标记对应零部件 i 的时间 T_i 是故障发生时间还是放行终止时间。 $R_i=0$ 表示 T_i 是故障时间, $R_i=1$ 表示 T_i 是放行终止时间。

步骤 4 根据大数定律,当仿真的时间足够长的时候,计算出来的 LOTC 率会慢慢趋于稳定并逼近真实值。如 LOTC 率已收敛,则输出 LOTC 率,否则进入步骤 5。

有两种收敛准则:一种是平均故障时长波动小于某个较小值(比如 0.1);另外一种则是将仿真时长设置的足够长。在实际分析中发现,将仿

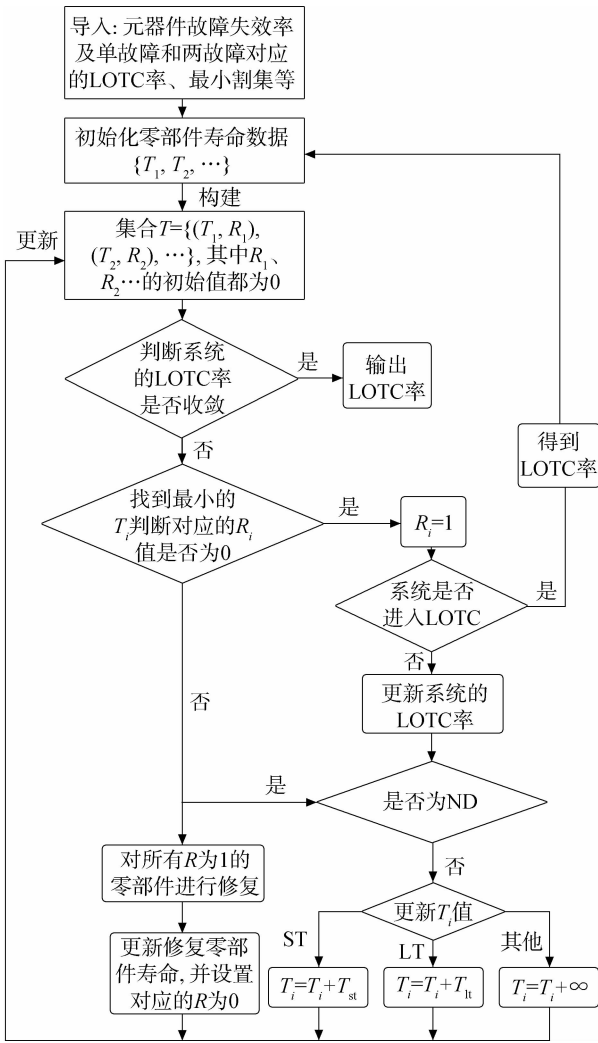


图 2 FADEC 系统多故障 TLD 的仿真流程
Fig. 2 Simulation flow of multiple fault TLD in
FADEC system

真时长设置为 1×10^9 h, 统计在 1×10^9 h 内 LOTC 发生次数, 得出来的数据较为稳定, 但还是需要多次仿真同组数据取平均值来减小误差。第一种收敛准则随机性较大, 因为只要下一次 LOTC 平均时长接近总的平均值则立马结束仿真; 第二种收敛准则的仿真时间较长, 但是从大数定律理论角度来说, 只要仿真时间足够长, 那么 LOTC 率一定会收敛到接近真实值。

步骤 5 从集合 T 中找到最小的 T_i 值, 判断对应的 R_i 值是否为 0。如 R_i 为 1, 则需要对零部件进行修复, 进入步骤 9; 如 R_i 为 0, 则首先将 R_i 设置为 1, 其次判断系统是否进入了 LOTC。判断系统是否进入了 LOTC 的方法是: 将 R 值为 1 的所有零部件构成一个集合, 如该集合包含任何一个 LOTC 的最小割集, 表示系统进入了 LOTC 状态, 计算 LOTC 率。

LOTC 率被定义为单位仿真时长内 LOTC 事件发生的次数。即

$$\lambda_{lotc} = N/T_{ms}$$

(3)

其中 N 为已仿真时间 T_{ms} 内的 LOTC 累计次数。

步骤 6 如果此时系统中只有一个或两个故障,那么直接可以从步骤 1 中导入的数据中得到 LOTC 率;如果故障数超过两个,可按照文中第 2.1 节中描述的“针对三故障及以上情况”的方法,得到 LOTC 率。

步骤 7 步骤 6 中得到的 LOTC 率如大于 $1\times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$,则立即进行修复,进入步骤 9;否则进入步骤 7,更新零部件 i 的时间 T_i 。

步骤 8 LOTC 率如在 $[7.5\times 10^{-5}, 1\times 10^{-4})$ 之间,则按照短时派遣处理,所以 $T_i = T_i + T_{st}$;如在 $[1\times 10^{-5}, 7.5\times 10^{-5})$ 之间,则按照长时派遣处理,所以 $T_i = T_i + T_{lt}$;如小于 1×10^{-5} ,表

示目前的故障不影响派遣,所以不用立即修复,等出现影响签派的故障时再一起修复,因此取 $T_i = T_i + \infty$ 。

步骤 9 按照全修复策略,对所有 R 为 1 的零部件进行修复,并更新修复零部件寿命,并设置对应的 R 为 0。以某修复零部件 j 为例,其寿命的更新方法是

$$T_j = T_i + \text{randexp } \lambda_j$$

(4)

3 实例分析

以某一在役 FADEC 系统为例,该系统一共有 85 类故障。其中有 10 个 ND 类故障,2 个 ST 类故障,73 个 LT 类故障。

3.1 故障树建立及分析

其故障树部分模型如图 3 所示(图中 Q 为失效率),表 1 给出了部分零部件失效率数据。

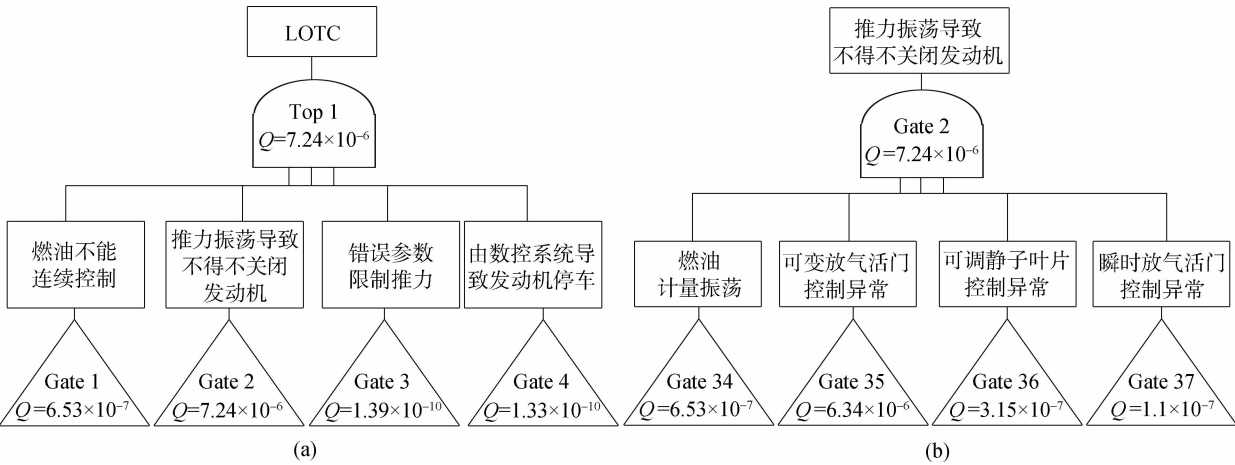


图 3 FADEC 系统部分故障树

Fig. 3 Partial fault tree of FADEC system

表 1 部分零部件失效率数据

Table 1 Failure rate data of some components

编号	描述	失效率	对应 LOTC 率
EV1	计量活门组件失效	4.28×10^{-7}	6.321×10^{-1}
EV2	燃油控制电液伺服阀故障	1.00×10^{-7}	6.321×10^{-1}
EV3	压差异常	6.50×10^{-8}	6.321×10^{-1}
EV4	油门杆角度传感器在控制通道异常	1.00×10^{-6}	1.137×10^{-5}
EV5	控制通道油门杆角度处理异常	1.68×10^{-6}	1.137×10^{-5}
EV6	PLA 传感器备份通道异常	1.00×10^{-5}	8.931×10^{-6}
...	...	...	...
EV85	备份通道停车指令错误有效	1.00×10^{-5}	1.356×10^{-5}

表 2 给出了部分两故障状态组成及故障后系统 LOTC 率。

表 2 部分两故障组合及故障后 LOTC 率
Table 2 Partial two-fault combination and LOTC rate after failure

No.	编号		两故障下的 LOTC 率/ 10^{-5} h^{-1}
	故障 A	故障 B	
1	EV1	EV2	1.289
2	EV1	EV3	1.537
3	EV1	EV4	1.623
4	EV1	EV5	1.782
...	...	...	...
3570	EV84	EV85	2.151

基于故障树,共得到了 112 个最小割集,比如: $\{\text{EV1}\}$, $\{\text{EV4},\text{EV9}\}$, $\{\text{EV57},\text{EV64},\text{EV65}\}$, $\{\text{EV77},\text{EV78},\text{EV79},\text{EV80},\text{EV82}\}$ 等。

3.2 仿真与比较

3.2.1 仿真的收敛性分析

图 4 给出了全修复策略下, $T_{\text{st}}=125 \text{ h}$ 和 $T_{\text{lt}}=250 \text{ h}$ 时,经过 $1 \times 10^9 \text{ h}$ 仿真后的 LOTC 率变化图。横坐标是随着仿真时间的累计 LOTC 次数,纵坐标是 LOTC 率。很显然,在仿真中期后的 LOTC 率已经基本平稳。

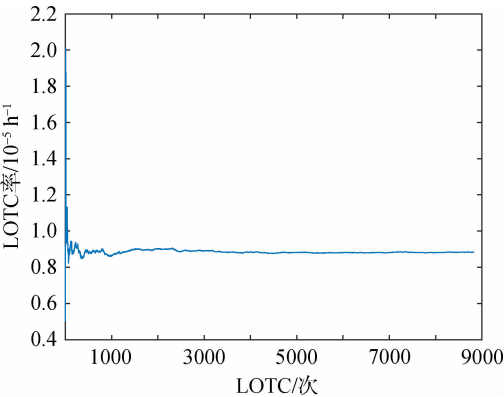


图 4 LOTC 率的仿真收敛图

Fig. 4 Simulated convergence diagram of LOTC rate

为了消除仿真中的干扰因素,共进行了 200 次仿真,以取 LOTC 率的平均值,200 次的仿真结果如图 5 所示。

对 200 次仿真结果进行了分析,LOTC 率的平均值为 $8.8553 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$,标准方差是 3.1751×10^{-7} ,变异系数为 3.59%。因此可以看出,LOTC

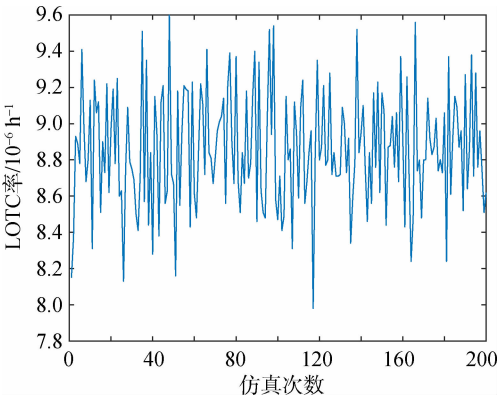


图 5 200 次仿真下的 LOTC 率

Fig. 5 LOTC rate under 200 simulations

率的仿真结果是非常稳定的。

3.2.2 不同方法的比较分析

为了进一步说明蒙特卡洛仿真方法的合理性,将单故障 MM、两故障 MM 和仿真等三种方法进行了比较,表 3 给出了在 T_{st} 在 125 h 下,三种方法在不同 T_{lt} 下的 TLD 分析结果。

表 3 三种方法的 TLD 分析结果

Table 3 TLD analysis results of three methods

T_{lt}/h	LOTC 率/ 10^{-6} h^{-1}		
	单故障 MM	两故障 MM	蒙特卡罗仿真
250	8.81	8.81	8.86
550	9.05	9.07	9.08
850	9.27	9.30	9.34
1150	9.45	9.52	9.56
1450	9.61	9.71	9.93
1750	9.76	9.90	9.96
2050	9.88	10.1	10.2

三种方法下 LOTC 率随 T_{lt} 的变化如图 6 所示。

对蒙特卡罗的仿真结果分别用线性回归、二次多项式、三次多项式进行了拟合,拟合结果如表 4 所示。其中残差与残差均方根越小说明拟合值以及实际值之间的差越小;调整 R 方(拟合优点)的 R 值则越接近 1,说明拟合得越好。从表 4 中可以看出,二次多项式已经很好地满足了精度要求,因此可得 $T_{\text{st}}=125 \text{ h}$ 下的 LOTC 率与 T_{lt} 的函数关系式

$$F_{\text{lotc}} = -4.63 \times 10^{-14} \times T_{\text{lt}}^2 + 8.27 \times 10^{-10} \times T_{\text{lt}} + 8.65 \times 10^{-6}$$

(5)

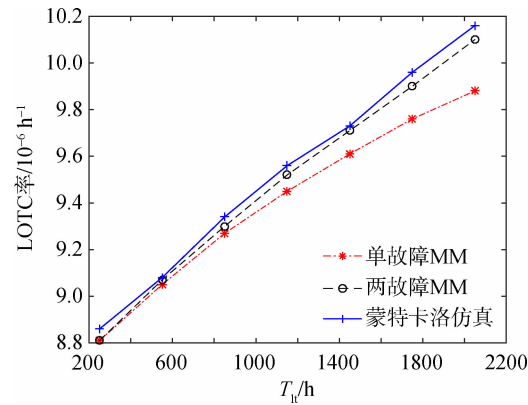


图 6 三种方法下的 LOTC 率变化

Fig. 6 LOTC rate varying with three methods

表 4 不同方法下的拟合结果

Table 4 Fitting results with different methods

参数	线性回归	二次多项式	三次多项式
残差/ 10^{-15}	9.01	5.54	3.14
R 方	0.9905	0.9942	0.9967
调整 R 方	0.9886	0.9913	0.9934
残差方均根/ 10^{-8}	4.25	3.72	3.24

式(4)对应的拟合图如图 7 所示,当 LOTC 率等于 $1.0\times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ 时,计算得到 $T_{\text{lt}}=1811 \text{ h}$ 。所以针对这个 FADEC 系统,采用全修复策略时,如 T_{st} 为 125 h, T_{lt} 最大取值为 1811 h。

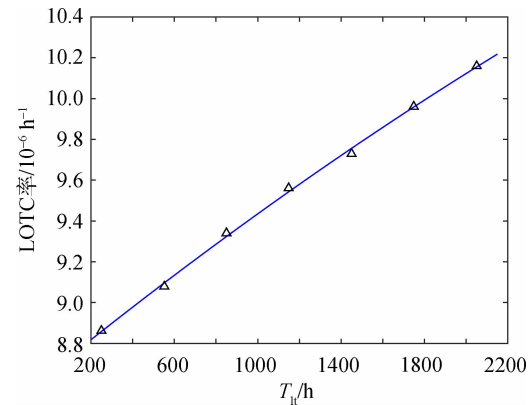


图 7 仿真方法下 LOTC 率随 T_{lt} 的拟合图

Fig. 7 Fitting diagram of LOTC rate with T_{lt} under simulation

同样的方法,可以得到采用单故障 MM 和两故障 MM 的 LOTC 率与 LT 的函数关系,图 8 给出了三种方法下的 LOTC 率随 LT 的比较图。

从图 8 中可以看出,蒙特卡洛仿真结果与两故障 MM 的结果更加接近,其主要原因是由于单故障 MM 方法忽略了 FADEC 系统实际使用中

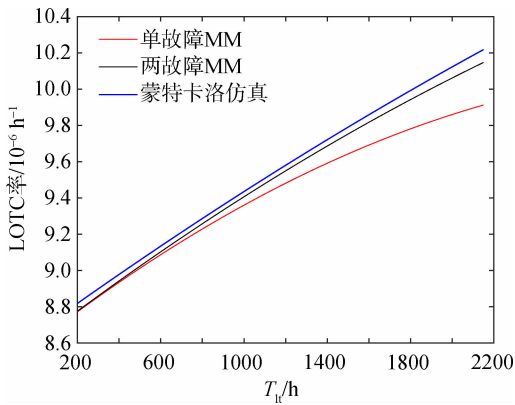


图 8 三种方法下的 LOTC 率拟合值变化

Fig. 8 Fitting LOTC rate varying with three methods

的两故障状态,通过对仿真过程的分析可知,两故障状态占据的故障比例较大,以 $T_{\text{st}}=125 \text{ h}$ 为例,如表 5 所示。

表 5 三种方法的 TLD 分析结果

Table 5 TLD analysis results of three methods

故障状态	故障数量	故障数量占比/%
单故障	8068	91.16
两故障	754	8.52
三故障	27	0.31
四故障	1	0.01
五故障	0	0
六故障	0	0

从表 5 中可以看出,两故障状态占据的故障比例达到了 8.52%,不能忽略;而三故障状态占据的故障比例只有 0.31%。因此,蒙特卡洛仿真结果与两故障 MM 的结果更加接近,并且由于仿真中考虑三故障以上的状态,所以仿真得到的 LOTC 率略高于两故障 MM 的结果。因此,说明了蒙特卡洛仿真因考虑了多故障状态而具有更高的精度。

3.2.3 T_{st} 取值的影响分析

当 $T_{\text{st}}=250 \text{ h}$ 时,仿真得到的 LOTC 率随 LT 的拟合曲线如图 9 中的绿虚线所示。

从图 9 中可以看出,当 $T_{\text{st}}=250 \text{ h}$ 时,为了保证 LOTC 率小于等于 $1.0\times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$, T_{lt} 最大取值为 1626 h;当 $T_{\text{st}}=125 \text{ h}$ 时, T_{lt} 取值 1811 h,这一结果符合实际中 T_{st} 和 T_{lt} 的取值情况。

3.2.4 不同修复策略下的 TLD 分析比较

本研究采用的是全修复策略,即一旦对 FA-

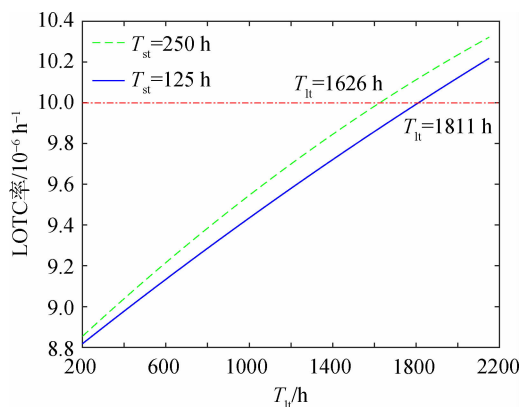


图 9 不同 T_{st} 取值下 LOTC 率随 T_{lt} 的比较图

Fig. 9 Comprition of LOTC rate with T_{lt} under different T_{st}

DEC 系统实施维修,就对所有已发生的故障进行修复。如果采用的是半修复策略,即每次只修复当前达到放行终止时间的零部件,那么只要对仿真步骤作适当的调整,就可以进行相应的 TLD 分析。同样取 $T_{st} = 125$ h,分析结果如图 10 所示。

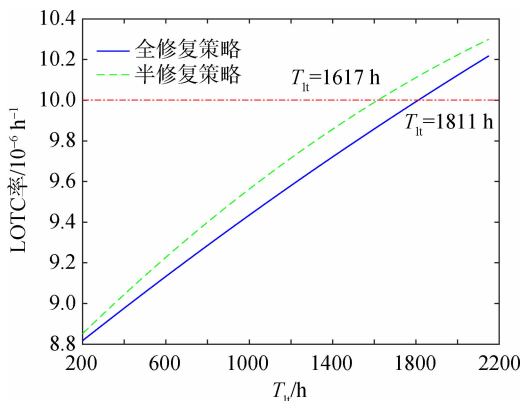


图 10 不同修复策略下的 TLD 分析比较

Fig. 10 TLD analysis and comparison under different repair policies

从图 10 中可以看出,采用半修复策略时,当 $T_{st} = 250$ h 时, T_{lt} 最大取值为 1617 h,远小于全修复策略时的 1811 h。这主要是因为采用全修复策略时,提前对故障零部件进行了修复,所以降低了整个系统进入 LOTC 状态的概率。因此,在 T_{st} 取值相同的情况下,为了满足 LOTC 率小于等于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ 的要求,可以增加 LT 的取值。

基于实例,本研究从仿真的收敛性、与其他方法的比较、 T_{st} 的取值影响和不同修复策略的影响等 4 个方面,对提出来的全修复策略下 FADEC 系统的多故障 TLD 仿真分析方法进行了深入分

析,验证了方法的适用性和合理性。

4 结 论

本研究提出了一种全修复策略下 FADEC 系统的多故障 TLD 仿真分析方法,用于解决 FADEC 系统实际中存在的多故障 TLD 分析问题,弥补目前多故障 TLD 仿真分析方法中没有考虑 T_{st} 值可变以及维修策略对 TLD 分析影响的不足,为后续优化 T_{st} 的取值提供基础。

通过以上的实例仿真与分析,结果表明:本研究提出的多故障 TLD 仿真分析方法,具有很好的收敛性,仿真结果稳定;仿真方法不受 FADEC 系统中零部件数量的影响,因此具有更强的适用性;通过与单故障 MM 和两故障 MM 方法的比较分析,看出仿真方法因考虑了多故障状态,具有更高的精度;同时为了提高 FADEC 系统的安全性,研究了不同维修策略对 TLD 分析结果的影响,指导维修策略的选择。

参考文献:

- [1] Society of Automotive Engineers(SAE) International Group. Guidelines for time-limited dispatch (TLD) analysis foe e-lectronic engine control systems; ARP5107B[S]. Washington DC; Society of Automotive Engineers, 2006: 8-9.
- [2] United States Department of Transportation. Policy for time-limited dispatch (TLD) of engines fitted with full authority digital engine control systems; ANE-1993-33. 28 TLD-R1[S]. Washington DC; Federal Aviation Administration, 1993: 7-8.
- [3] 陆中,戎翔,周伽,等. 基于蒙特卡罗仿真的 FADEC 系统多故障 TLD 分析方法[J]. 航空学报, 2015, 36(12): 217-226.
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): 217-226. (in Chinese)
- [4] HJELMGREN K, SVENSSON S, HANNIUS O. Reliability analysis of a single-engine aircraft FADEC[C]// Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. Piscataway, NJ, US: IEEE Press, 1998: 401-407.
- [5] 姚华,王国祥. 航空发动机全权限数控系统研究和试飞验证[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2): 247-253.
YAO Hua, WANG Guoxiang. A study and flight evaluation of full authority digital engine control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2): 247-253. (in Chinese)
- [6] BINEID M, FIELDING J P. Development of a civil aircraft dispatch reliability prediction methodology [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2003, 75(6): 588-594.

[7] CHEN B,LI C,LI Y,et al. Reliability analysis method of an aircraft engine FADEC system[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Piscataway, NJ, US: IEEE Press, 2009: 289-292.

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

[9] PRESCOTT D R. Safety modelling for the time limited dispatch of aircraft [D]. Loughborough, UK: Loughborough University,2007.

[10] PRESCOTT D R,ANDREWS J D. Aircraft safety modeling for time-limited dispatch[C]//Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. Piscataway, NJ, US:IEEE Press,2005:139-145.

[11] 刘冬冬,张天宏,陈建. 开放式 FADEC 系统的数据总线研究[J]. 航空动力学报,2012,27(4):920-929.
LIU Dongdong,ZHANG Tianhong,CHEN Jian. Study on data bus of open FADEC system[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(4):920-929. (in Chinese)

[12] 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. 1-021004. 10.

[13] LU Z,ZHOU J,LI X. Monte Carlo simulation based time limited dispatch analysis with the constraint of dispatch reliability for electronic engine control systems[J]. Aerospace Science and Technology,2018,72(1):397-408.

[14] CAO C,SHEN J,LUO M C,et al. FWorks:an integrated digital simulation platform for FADEC systems[C]//Proceedings of the 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian,China:IEEE Press,2017:10316-10321.

[15] PRESCOTT D R,ANDREWS J D. A comparison of modelling approaches for the time-limited dispatch (TLD) of aircraft[J]. Journal of Risk and Reliability,2006,220(1):9-20.

[16] 闫锋. 民用航空发动机控制系统时间限制派遣方法[J]. 科学技术与工程,2014,14(28):148-152.
YAN Feng. A method on time-limited dispatch for the control system of civil aero-engine[J]. Science Technology and Engineering,2014,14(28):148-152. (in Chinese)

[17] 白杰,赵平,王伟. FADEC 系统 TLD 的维修策略[J]. 航空维修与工程,2012(6):35-37.
BAI Jie,ZHAO Ping,WANG Wei. TLD maintenance strategies of FADEC system[J]. Aviation Maintenance and Engineering,2012(6):35-37. (in Chinese)

[18] DEKKER R,WILDEMAN R E,van der DUYN SCHOUTEN F A. A review of multi-component maintenance models with economic dependence[J]. Mathematical Methods of Operations Research,1997,45(1):411-435.

(编辑:陈 越)