

基于 FTA 的 B757 发动机排气系统排故分析

李闽江*

中国东方航空技术有限公司, 上海 200335

摘要: 发动机排气系统作为民用飞机的重要系统之一, 在整个航行过程中发挥至关重要的作用。本文收集某航空公司 B757 机队发动机排气系统历年故障数据, 基于故障树分析 (FTA) 理论, 建立故障树并进行简化分析。通过定性分析得出最小割集, 通过定量分析得到故障发生的概率重要度以及结构重要度, 并根据分析结果对 B757 发动机排气系统原本复杂的排故过程进行优化, 进而提高维修效率, 降低维修成本。

关键词: 故障树分析; B757; 发动机排气系统; 故障隔离手册; 故障分析

中图分类号: V 288.7 文献标志码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 10-0041-05

随着全球民航业的快速发展, 航线网络的不断扩展, 各航空公司机队规模的不断扩大, 对于航空安全管理水平的要求也不断提高。其中, 提高维修效率、降低维修成本尤为重要。发动机直接影响了飞机的性能、可靠性及经济性, 因此, 发动机日常有效的排故及维修至关重要。其中, 排气系统作为产生力量的“源泉”, 对于起飞、航行到降落 (作为反推装置系统) 起到了关键性作用。

故障树分析 (FTA) 是当今常用的故障诊断理论, 在国内外各行业均有广泛的应用研究。该技术可迅速、准确地进行故障诊断与定位, 用于设备的故障预测和诊断, 帮助维修人员快速准确地查找故障^[1,2]。本文基于 FTA 理论, 收集有关航空公司机队 B757 发动机排气系统的历年故障数据并进行归纳整理, 基于故障隔离手册的排故流程, 建立故障树并进行简化分析。通过定性分析得出最小割集, 通过定量分析得到故障发生的概率重要度以及结构重要度, 并根据分析结果对 B757 发动机排气系统原本复杂的排故过程进行优化, 对 B757 飞机排气系统在维修过程中的注意事项给出建议, 进而提高维修效率, 降低维修成本。

1 FTA 分析方法

目前, FTA 可借助于电子计算机进行辅助建树, 有效地

提高了复杂系统故障树分析的效率, 它既可定量分析, 又可定性分析, 在民航维修排故中得到广泛运用。FTA 的过程是一个对系统认识深入的过程, 在建树之前, 需广泛收集有关系统的设计、运行、设备技术文件和资料, 并进行分析和研究, 把握系统的内在联系、弄清不同因素对故障的影响程度, 找出系统、零件、部件之间的逻辑关系, 进而明确系统的薄弱环节。FTA 建树的步骤如图 1 所示。



图 1 建立故障树的步骤

Fig. 1 Steps to build a fault tree

一般来说, FTA 分析方法有定性分析和定量分析。定性分析用来确定割集和最小割集。而定量分析, 则是用来确定系统的平均故障时间间隔或最小割集的概率重要度等。

1.1 定性分析

故障树通过“或”、“与”等逻辑关系将低事件、中间事件等连接形成。为对故障树进行定性和定量分析, 需要借助结构函数, 对故障树建立其相应的表达式。

故障树定性分析旨在寻找顶事件发生的原因和原因组合, 通过识别导致顶事件发生的所有故障模式, 确定故障树

投稿日期: 2016-08-01; 退修日期: 2016-08-08; 录用日期: 2016-08-25

* 通讯作者. Tel.: 010-84936341 E-mail: 1398149060@qq.com

引用格式: Li Minjiang. Fault isolation of B757 engine exhaust system based on FTA [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (10): 41-45. 李闽江. 基于 FTA 的 B757 发动机排气系统排故分析 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (10): 41-45.

的最小割集。其意义在于判明潜在的故障,以便改进设计,或者指导故障诊断,改进运行和维修方案。割集即故障树中一些底事件的集合,当这些底事件发生时,顶事件必然发生。最小割集是指若将割集中所含的底事件任意去掉一个即不再是割集。路集指故障树中一些底事件的集合,当这些底事件同时不发生,顶事件必然不发生。若路集中任意去掉一个底事件即不再是路集,这种路集就是最小路集。

目前,常用的求最小割集的方法有上行法和下行法,这两种方法都是基于严格演绎逻辑方式求得的系统故障模式,有助于发现潜在的故障,避免遗漏重要的系统故障模式。

1.2 定量分析

故障树定量分析的目的在于底事件互相独立和已知其发生概率的条件下,得到顶事件发生概率和底事件重要度等定量指标。常用的指标有顶事件发生的概率、底事件重要度等。而其定量分析包括两方面的任务:求顶事件发生概率(即以顶事件为判据的系统失效概率)和计算底事件(部件)重要度(概率重要度和结构重要度)。

2 B757 发动机排气系统故障分析

2.1 数据处理

中国东方航空技术有限公司 B757 历年 ATA78 发动机排气系统故障的数据统计结果如表 1 所示。故障数据共 70 条,其中发动机排气系统故障数据 5 条,发动机反推系统故障数据 62 条,其余故障数据 3 条。可以看出,在 B757 的发动机排气系统中,反推系统的故障尤为突出,本文将基于该反推系统的故障进行分析。根据表中故障数据,就较为突出的两个故障部件进行举例说明底事件失效率求法:

如发动机反推系统中,底事件 X (隔离活门失效),在 62 例故障数据中出现了 26 例,因此,通过计算得出该底事件的失效率为:

$$62 \div 70 = 0.886, \quad \lambda = 0.886 \div 62 \times 26 = 3.71 \times 10^{-1}, \text{取 } t=1$$

$$P(X_i) = 1 - e^{-3.71 \times 10^{-1}} = 3.10 \times 10^{-1}$$

在发动机反推系统中,例如底事件 X (作动筒失效) 在 62 例故障数据中出现了 5 例,同样计算出其失效率为:

$$62 \div 70 = 0.886, \quad \lambda = 0.886 \div 62 \times 5 = 7.15 \times 10^{-2}, \text{取 } t=1$$

$$P(X_i) = 1 - e^{-7.15 \times 10^{-2}} = 6.89 \times 10^{-2}$$

同理可以得出发动机反推系统中其余各底事件的失效率,如表 2 所示。

2.2 故障树建模

如图 2 所示为 B757 发动机反推系统的故障树,该图

顶事件为反推系统失效,各中间事件分别描述了导致反推释放失效的可能原因,根据中间事件的描述,列举出各底事件,从而对故障树进行定量、定性的分析,得出相应的结论。

根据表 2 故障失效率计算结果,可初步统计出反推液压隔离阀及反推锁开关失效在反推系统部件中发生故障的概率相对较高,根据故障树分析对上述故障进行进一步的定量、定性分析,分析其高失效率部件是否会对反推系统故障概率起到关键性作用,以及是否还有其他部件对反推系统失效有潜在的安全影响。

定性分析:根据表 2 得出其最小割集为: {X1}, {X2}, {X3, X4}, {X3, X5}, {X6}, {X7}, {X8}, {X9}, {X10}, {X13, X14}, {X13, X15}, {X16}, {X18}, {X19}, {X20}, {X21}, {X22}, {X23, X24}。‘X’为‘底事件’。

定量分析:当底事件发生的概率 q_i ($i=1, 2, \dots, n$) 处于 0.01 量级时,顶事件发生概率为:

$$P(T) = \sum_{i=1}^n P(S_i) = 0.4034$$

利用最小割集求出基本事件的概率重要度为:

$$I_c(i) = \frac{\partial}{\partial q_i} Q(q_1, q_2, \dots, q_n)$$

其中 $i=1, 2, \dots, n$, 计算底事件结构重要度,如计算底事件 (E6) 的概率重要度:

$$I_p(6) = \frac{\partial P(T)}{\partial P(X_6)} = \prod_{i=1}^{i=5} (1 - P(X_i)) + \prod_{i=7}^{i=21} (1 - P(X_i)) = 6.02 \times 10^{-1} \quad (1)$$

根据式 (1),其余底事件的概率重要度如表 3 所示。

可见,基本事件 E9 (反推锁开关失效), E7 (内侧液压作动筒失效), E8 (外侧液压作动筒失效), E22 (液压隔离阀失效) 对顶事件发生故障影响最大。

利用式 (2) 求基本事件的结构重要度:

$$I_{(\varphi)} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \frac{1}{n_j} (j = k_j) \quad (2)$$

式中: K 为最小割集总数, k_j 为第 j 个最小割集, n_j 为 k_j 最小割集的基本事件数。计算结果如表 4 所示。

对上述数据进行分析,首先,进行结果排列。由于是近似计算,需再通过相应法则进行结构重要度排序,当最小割集中只含一个基本事件,则该基本事件的结构重要度最大;当最小割集重复出现次数越多的基本事件,其结构重要度越大。结果排列如下:

表 1 B757 发动机排气系统故障数据
Table 1 Failure datas of B757 engine exhaust system

飞机号	机型	发生日期	故障描述
B2809	B757	2014.11.10	接 0008092A
B2809	B757	2014.11.10	起飞 91.5m 右发出现 REV 警告两次
B2808	B757	2014.10.14	发动机启动后出现 r eng rev cont 信息
B2857	B757	2014.09.02	拆下反推液压作动筒
B2809	B757	2014.08.10	测量线路 D5020, 电压 28V, 据 wdm 78-34-11, 更换 k26 继电器
B2809	B757	2014.07.12	地面检查发现 "L REV ISLN VAL" 维护级信息, CHK FOUND "L REV ISLN VAL" MESSAGE
B2843	B757	2014.07.11	R REV ISLN VAL 落地后出信息
B2857	B757	2014.05.30	右发外涵道有白色异物
B2880	B757	2014.04.01	REV ISLN VAL 左反推隔离活门
B2809	B757	2013.10.22	左发右侧反推折流门 5 点位置不能齐平 L ENG R/H T/R VENT DOOR 5 CLOCK CANT CLOSE
B2842	B757	2013.10.12	航后检查左发右侧下处反推作动筒一堵头漏液压油
B2880	B757	2013.07.11	落地后出现: "L REV ISLN VAL" 左反推 "REV" 灯亮
B2880	B757	2013.07.27	落地后出现 (L REV ISLN VAL) 信息, 左反推绿灯亮
B2880	B757	2013.07.19	航后发现右发反推隔离活门漏油
B2880	B757	2013.07.19	空中出现状态信息 L ENG REV CONT
B2880	B757	2013.07.13	按 FIM78-32TASK812 判断为左发同步锁延时继电器 R478 故障
B2880	B757	2013.07.11	L REV ISLN VAL
B2880	B757	2013.06.07	机组落地反映有 "L ENG REV CONT" 信息, 左发反推放不出
B2809	B757	2013.05.09	下降过程 STATUS 页面显示状态信息 "L REV ISLN VAL" STATUS MSG "L REV ISLN VAL"
B2850	B757	2013.04.08	故障信息: "L ENG REV CONT" "L ENG SEC CONT"
B2850	B757	2013.04.08	空中出现 L ENG REV CONT, L ENG SEC CONT 信息
B2808	B757	2013.04.08	检查发现右发反推接近门锁扣弹簧损坏 CHK FOUND R/H ENG'S T/R ACCESS DOOR SPRING OF LOCK BROKEN
B2808	B757	2013.04.03	发动机反推勤务板被打坏
B2850	B757	2013.03.14	L ENG SEC CONT L ENG REV CONT
B2808	B757	2013.01.25	工卡 nrc-2013-2808-005-0001 发左外侧上方反推内锁不工作 作动筒漏油 task nrc-2013-2808-005-0001 l eng outbd top non-locking alt leak
B2857	B757	2012.12.23	落地后出现 R REV ISLN VAL
B2857	B757	2012.12.22	判断 2833 右发反推故障
B2833	B757	2012.12.19	落地后出现 R REV ISLN VAL 信息
B2808	B757	2012.12.18	巡航时 "R REV ISLN VLV" DURING CRUISE "R REV ISLN VLV"
B2834	B757	2012.12.16	依据 FIM78-31TASK815 及 FIM78-31TASK818 排故, 判断为同步锁继电器 R477 故障
B2834	B757	2012.11.12	有 R REC ISLN VAL 状态信息
B2834	B757	2012.11.07	维护状态级信息 "R REV ISLN VAL"
B2808	B757	2012.11.06	L REV ISLN VAL 左侧反推隔离活门
B2834	B757	2012.11.04	右反推空中显示过度状态 (琥珀色)
B2809	B757	2012.10.23	左发反推失效 L ENG T/R FAULT
B2834	B757	2012.10.08	飞行中出现 L REV ISLN VAL 信息 L REV ISLN VAL MSG COME ON IN FLIGHT
B2808	B757	2012.09.22	飞机启动后出现 WHEEL N/W STRG FAULT 警告, 重置 CB 无效
B2834	B757	2012.9.11	判断故障为左侧反推同步锁失效
B2808	B757	2012.08.20	起飞时 200FT 出现左发 REV DURING TAKE OF 200FT APPEARED THE "REV" INDICATION OF THE LEFT ENG
B2834	B757	2012.07.23	状态信息 R REV ISLN VAL
B2834	B757	2012.07.15	曾反映空中右发反推 REV 信息
B2834	B757	2012.07.15	空中右发反推 REV 信息, 下降时信息无
B2809	B757	2012.07.14	GND CHK FND ENG 1 THRUST REV SYNC LOCK LEAK HYD FLUID 地飞行中, 右反推 REV 信息闪烁
B2808	B757	2012.07.11	RH ENG I/B C DUCT OPEN ACTUATOR LEAK 右发内侧 C 包皮打开作动筒漏油
B2808	B757	2012.06.25	RH ENG O/B OPEN ACTOATOR LEAK 右发外侧打开包皮作动筒漏油
B2842	B757	2012.05.09	航后发现右发反推泵接头漏油
B2843	B757	2012.05.01	NRC-2012-2843-048-0001 左发外侧反推第二块折流门有裂纹, 第三块有凹坑
B2809	B757	2012.03.15	状态页面 "L ENG REV CONT" STATE MSG "L ENG REV CONT"
B2808	B757	2012.02.10	航后按 AMM78-34TASK801 判断为左发反推液压组件故障
B2833	B757	2012.01.01	右发 443AL 内发现液压油迹
B2857	B757	2011.11.26	"L REV ISLN VAL" 信息
B2857	B757	2011.11.25	下午重新启动后 继续出现 L REV ISLN VAL
B2857	B757	2011.11.21	判断为右发反推左侧反推同步锁失效
B2809	B757	2011.11.18	L REV ISLN VAL 左反推隔离活门
B2833	B757	2011.11.15	按 WDM78-32-51 更换继电器
B2833	B757	2011.11.15	右发反推放向活门漏油
B2880	B757	2011.07.06	落地后, 状态页面出现左反推隔离活门信息 (L REV ISLN VAL)
B2876	B757	2011.02.01	飞机在落地后右发油门杆有卡阻现象, 2 分钟后油门杆卡阻
B2834	B757	2011.01.28	左发反推收放作动器漏油 (外侧下方)
B2843	B757	2010.10.15	右发反推隔离活门信息
B2833	B757	2010.07.25	右发尾喷管靠外侧有一个凹坑
B2834	B757	2010.07.20	判断为左发反推液压组件故障
B2880	B757	2010.07.15	左发反推收不上
B2834	B757	2010.07.03	R REV ISLN VAL
B2843	B757	2010.06.11	落地后出现 "R REV ISLN VAL"
B2843	B757	2010.06.09	飞机落地时 EICAS 出现 "REV ISLN VAL" "R REV STOW SIG" 状态信息, 右反推的右半部收不上。
B2880	B757	2010.05.26	前后出现状态信息右反推隔离活门
B2808	B757	2010.05.03	"L REV ISLN VAL" 信息

3 结论及建议

本文根据中国东方航空技术有限公司 B757 历年 ATA78 发动机排气系统故障的数据统计结果,选用 FTA 方法对发动机排气系统进行排故分析。通过上文的定性与定量分析后发现,发动机排气系统反推系统故障率较高,在所收集的航空公司数据中占比 88.5%,其中,液压隔离阀、作动筒以及反推锁开关的概率重要度最高,分别为 $6.48\text{e-}1$, $6.34\text{e-}1$, $6.27\text{e-}1$,其结构重要度亦最高,为 $5.56\text{e-}2$,表明这些故障的安全隐患最大。因此,进行发动机排气系统排故时,应首先关注以上 3 个部件。但在无法有效检测故障点的情况下,还需对其他部件进行排故检测,因为其他部件的故障、失效也同样会对发动机排气系统产生影响。

同时,根据所得结论给出以下两点建议:(1) 液压隔离阀、作动筒以及反推锁开关就顶事件而言失效概率较高,维护及排故时需予以关注;(2) 对发动机排气系统中各重要部件进行定期检测及维护。



参考文献

- [1] 邵延峰,薛红军. 故障树分析法在系统故障诊断中的应用[M]. 中国制造业信息化, 2007, 36 (1) .
SHAO Yanfeng, XUE Hongjun. Application of fault tree analysis in fault diagnosis[M]. Manufacturing Information Engineering of China, 2007, 36 (1) . (in Chinese)
- [2] 滕飞,李国璋,林树飞. 基于排放和故障树分析法的柴油机故障诊断[J]. 四川兵工学报, 2009, 30 (12) .
TENG Fei, LI Guozhang, LIN Shufei. Fault diagnosis of diesel engine based on emission and fault tree analysis method [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2009, 30 (12) . (in Chinese)

作者简介

李闽江(1981—) 男,学士,助理工程师。主要研究方向:飞机维修。

Tel: 010-84936341

E-mail : 1398149060@qq.com

Fault Isolation of B757 Engine Exhaust System Based on FTA

LI Minjiang*

Eastern Airlines Technic Co., Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: As one of the most important systems of civil aircraft, the engine exhaust system plays an important role in the whole process of navigation. In this paper, collected one airline's B757 engine exhaust system failure datas over the years, and simplified analyzed the datas based on FTA theory. Through qualitative analysis, the minimum cut sets were given, and probability importance and structural importance were obtained. At last, according to the analysis of B757 engine exhaust system, originally complex fault isolation process was optimized, that improve the maintenance efficiency and reduce maintenance cost.

Key Words: FTA; B757; engine exhaust system; FIM; fault analysis

Received: 2016-08-01; Revised: 2016-08-08; Accepted: 2016-08-25

*Corresponding author. Tel. : 010-84936341 E-mail: 1398149060@qq.com