

时间限制性派遣中短时派遣时长的优化方法研究^{*}

胡 维, 蔡 景

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106)

摘 要: 航空发动机全权限电子控制系统 (FADEC) 的时间限制性派遣 (TLD) 分析是飞机系统安全性分析的重要内容之一。针对目前 TLD 分析中都假定短时故障派遣时长 (ST) 为固定值 (125h 或 250h) 的问题, 开展了短时派遣时长的优化方法研究。采用故障树和马尔科夫方法, 以推力控制丧失率 (R) 要求为约束, 分析和建立了 ST 和长时故障派遣时长 (LT) 的函数关系; 在此基础上, 构建了以短 (长) 时故障派遣时长为变量, 系统平均维修时长和带故障运行时长期望值为目标的多目标优化模型, 使 TLD 分析中故障派遣时长的选取更灵活、更合理。通过实例表明: 与 ST 取固定值 250h 相比, 优化后 ST 取 25h 时, 带故障运行时长期望增大 4.2%, 系统平均维修时长增大 8.6%, 验证了方法的有效性。

关键词: 时间限制性派遣; 短时派遣; 定检; 维修; 优化; 全权限电子控制系统

中图分类号: V231; TB114.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 03-0509-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190153

Study on Optimization Method of Short-Term Dispatch Time in Time-Limited Dispatch

HU Wei, CAI Jing

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

Abstract: Time-limited dispatch (TLD) analysis of full authority digital engine control (FADEC) is one of the important contents of aircraft system safety analysis. Aiming at the problem that the short-term fault dispatch time is assumed to be a fixed value (125h or 250h) in TLD analysis, the optimization method of short-term fault dispatch time is studied. Firstly, by using fault tree and Markov method, and taking the loss of thrust control rate (R) requirement as constraint, the functional relationship between short-term fault dispatch time and long-term fault dispatch time is analyzed and established. On this basis, a multi-objective optimization model with short (long) fault dispatch time as variable, average maintenance time of the system and long-term expectation of running with fault as objective is constructed, which makes the selection of fault dispatch time in TLD analysis more flexible and reasonable. Finally, an example shows that compared with the fixed value of ST for 250h, the long-term expectation increases by 4.2% and the average maintenance time of the system increases by 8.6% when ST is optimized for 25h, which verifies the effectiveness of the method.

Key words: Time-limited dispatch; Short-term dispatch; Inspection; Maintenance; Optimization; Full authority digital engine control

^{*} 收稿日期: 2019-03-12; 修订日期: 2019-05-28。

基金项目: 国家自然科学基金 (51705242)。

通讯作者: 胡 维, 硕士生, 研究领域为航空发动机可靠性、适航。E-mail: luanwu@nuaa.edu.cn

引用格式: 胡 维, 蔡 景. 时间限制性派遣中短时派遣时长的优化方法研究[J]. 推进技术, 2020, 41(3):509-515. (HU Wei, CAI Jing. Study on Optimization Method of Short-Term Dispatch Time in Time-Limited Dispatch[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(3):509-515.)

1 引言

航空发动机全权限电子控制系统(FADEC)的时间限制性派遣(TLD)分析是飞机系统安全性分析的重要内容,是商用飞机及航空发动机型号合格审定的一项必要工作^[1]。在FAA发布的TLD分析规范性文件^[2]中,规定了以FADEC系统的推力控制丧失率(R)为安全标准,并规定 R 不高于10次/百万飞行小时的要求。根据 R 的计算方法可知, R 的大小与故障派遣时间长短有关,故障派遣时间越长, R 越高。在文献^[2]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,对短时故障 F_{ST} 与长时故障 F_{LT} 都推荐了固定的派遣时长,分别是125h或250h;而对于服役已经超过25000FH的FADEC系统,因各部件的失效率已经达到了稳定的状态,所以FAA只要求 R 不高于10次/百万飞行小时,没有给出推荐派遣时长。根据TLD分析原理可知, R 是短时故障派遣时长(ST)和长时故障派遣时长(LT)的函数,在满足局方 R 要求的情况下, ST 和 LT 有多种不同的取值组合。但在目前的TLD分析中都假定 ST 是一个固定值,在此假设上研究 R 与 LT 之间的关系,进而确定 LT 的值。

目前,国内外对于FADEC系统的TLD开展了不少研究,主要注重在TLD分析方法本身,目的是使得TLD分析方法更加精确与便于操作。拉夫堡大学Prescott等^[3-7]分别研究了现有TLD分析方法中的时间加权平均法以及马尔科夫模型方法的优缺点,并提出了利用蒙特卡罗方法解决TLD分析问题,最后用三种方法分别对一个由四部件组成的简单系统进行分析,得出蒙特卡罗仿真方法更高效且更精确。国内陆中等^[8-11]对TLD研究较多,将平均安全水平与派遣可靠度引入TLD分析方法中,并分析了平均安全水平与派遣可靠度对TLD分析的影响。以上研究,都是假定短时故障派遣时长为固定值,以此来分析长时故障派遣时长对冗余系统的影响等。

因此,在满足局方 R 要求的前提下,如何选出(ST, LT)的最优组合,是目前FADEC系统TLD分析中的一个新问题。 ST 和 LT 的取值不仅仅会影响 R ,而且会影响到FADEC系统的平均维修时长和带故障运行时间等^[12-13]。

本文建立了FADEC系统的马尔科夫模型,得出满足局方 R 要求的不同的(ST, LT)组合;分析和建立 ST 和 LT 的函数关系,在此基础上,研究 ST 和 LT 对平均维修时长($MTBR$)和带故障运行时间的影响;以

$MTBR$ 和带故障运行时间为目标, R 为约束,优化(ST, LT)的取值,并通过实例进行验证分析。

2 $ST-LT$ 关系研究

2.1 马尔科夫建模

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法(TWA)与马尔可夫模型法(MM)^[14]。TWA方法是将 R 表示为几类故障的失效率时间加权之和,是一种近似的计算方法,精度较低。MM方法理论上可以处理FADEC系统的所有状态,包括单故障、两故障、三故障等。但以两故障MM为例,一个由2个 F_{ST} 和73个 F_{LT} 组成的MM模型,会有5000多种两故障组合,需要建立5000多个方程用于求解 R 。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^[15]。但是,由于FADEC系统具有低失效率、高修复率的特点,因此系统在带故障派遣期间发生新故障的概率非常低,所以多故障同时出现的概率非常小,因此在实践中FAA允许使用单故障马尔科夫模型进行TLD分析。

单故障马尔科夫模型只考虑系统发生单个故障状态,其对应的马尔科夫模型如图1所示。

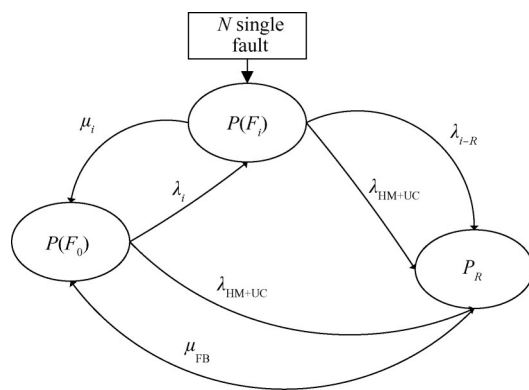


Fig. 1 Single fault Markov model

图1中, $P(F_0)$ 为完好状态,即系统中所有部件处于无故障状态; $P(F_i)$ 为某一部件 i 处于故障状态; λ_i 为该部件 i 的失效率; λ_{i-R} 为部件 i 失效后系统的 R ; λ_{HM+UC} 为机械/液压故障与未覆盖故障失效率之和; μ_i 为部件 i 的修复率,是派遣时长的倒数。 μ_{FB} 为系统从推力控制丧失(LOTCT)状态修复到全勤状态修复率。

对于 n 状态系统,以1状态为完好状态,1~ $n-1$ 为中间故障状态, n 状态为LOTCT状态。在TLD分析指导性文件ARP5107B^[16]中,FADEC系统 R 定义为系统进入LOTCT状态的概率除以系统处在LOTCT状态的

概率,可表示为

$$\lambda_R = \frac{P_{in-R}}{1 - P_R} \quad (1)$$

系统进入推力控制丧失状态概率 P_{in-R} 可以表示为

$$P_{in-R} = P_1 \lambda_{HM+UC} + \sum_{i=2}^{n-1} (\lambda_{i-R} + \lambda_{HM+UC}) P_i \quad (2)$$

系统处在各状态的概率 P_i 满足

$$dP_i/dt = P_{in-R}(F_i) - P_{out-R}(F_i) \quad (3)$$

在系统达到稳定状态时,即可认为进入与离开某个状态概率相等,即 $dP_i/dt = 0$ 。且系统处在各状态概率之和为1,因此可得

$$\begin{aligned} \sum P_i &= 1 \\ 0 &= \lambda_i P_1 - (\lambda_{i-R} + \lambda_{HM+UC} + \mu_i) P_i \\ 0 &= \lambda_{HM+UC} P_1 + \sum_{i=2}^{n-1} (\lambda_{i-R} + \lambda_{HM+UC}) P_i - \mu_F P_n \end{aligned} \quad (4)$$

通过求解式(4),得到单故障马尔科夫模型系统处在各状态的概率

$$\pi = [P_1, P_2, \dots, P_n] \quad (5)$$

根据式(2)与式(5),可得出单故障马尔科夫模型 R 表达式

$$\lambda_R = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i \times \pi_i}{1 - P_n} \quad (6)$$

另外,根据式(2)和式(4),式(1)可转化为

$$\lambda_R = \frac{\lambda_{HM+UC} P_1 + \sum_{i=2}^{n-1} (\lambda_{i-R} + \lambda_{HM+UC}) P_i}{\sum_{i=1}^{n-1} P_i} \quad (7)$$

根据式(4)可得

$$P_i = \frac{\lambda_i P_1}{\lambda_{i-R} + \lambda_{HM+UC} + \mu_i} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得到

$$\lambda_R = \frac{\lambda_{HM+UC} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\lambda_i \times (\lambda_{i-R} + \lambda_{HM+UC})}{\mu_i + \lambda_{i-R} + \lambda_{HM+UC}}}{1.0 + \sum_{i=2}^{n-1} \lambda_i / (\mu_i + \lambda_{i-R} + \lambda_{HM+UC})} \quad (9)$$

2.2 建立FADEC系统模型

为了获得部件失效后FADEC系统的 R ,即 λ_{i-R} ,以某一在役FADEC系统为例。该系统一共有85个部件,其中13个为无备份执行机械/液压部件。剩下72个为典型FADEC系统双通道全备份部件。首先,以FADEC系统失效导致发动机进入LOTC状态为顶事件,并通过对系统进行功能性分析,找出所有会导致系统进入LOTC状态的情况;然后,根据FADEC系统工作原理,进一步分析导致系统进入LOTC状态的各种可能性,建立该FADEC系统失效故障树模型^[17]。通过设置底层部件失效,得到部件失效后系统 R ,并依据ARP5107B中故障分类标准,判断部件故障类别。

通过故障树分析,发现该系统中有10个不可派遣(ND)类故障,2个 F_{ST} ,73个 F_{LT} ,其故障树部分模型如图2所示,表1给出了部分部件失效率数据。

根据式(9),结合故障树得到的失效率数据,可以求得不同 ST 取值下,系统 R 随 LT 的变化趋势图,如图3所示。从图3中可以看出, ST 的不同取值下,系统 R 随 LT 的变化趋势相似。在本FADEC案例中,增大 ST 对 R 影响较小。

2.3 ST - LT 关系确定方法

研究短时派遣时长 ST 对飞机系统平均维修时长和带故障运行时长期望的前提条件是必须保证 λ_R 满足局方要求。从式(9)可以看出, R 可以表示为修复率 μ_i 的函数。修复率 μ_i 为派遣时长的倒数,分为 ST 与 LT 。由于FADEC系统包含了几十个部件,无法通过解析法来确定 ST 与 LT 关系式,因此本研究采用拟合的方法来确定 ST 与 LT 的关系。

为了避免 ST 与 LT 取值过于密集导致的过拟合,本

Table 1 Partial failure rate data

ID	Description	Failure rate
1	Metering valve assembly failure	4.280×10^{-7}
2	Fuel control electro-hydraulic servo valve failure	1.000×10^{-7}
3	Abnormal pressure difference	6.500×10^{-8}
...		
83	Backup channel AC power processing failure	1.997×10^{-6}
84	The control channel parking instruction error is valid	1.000×10^{-5}
85	Backup channel parking instruction error is valid	1.000×10^{-5}

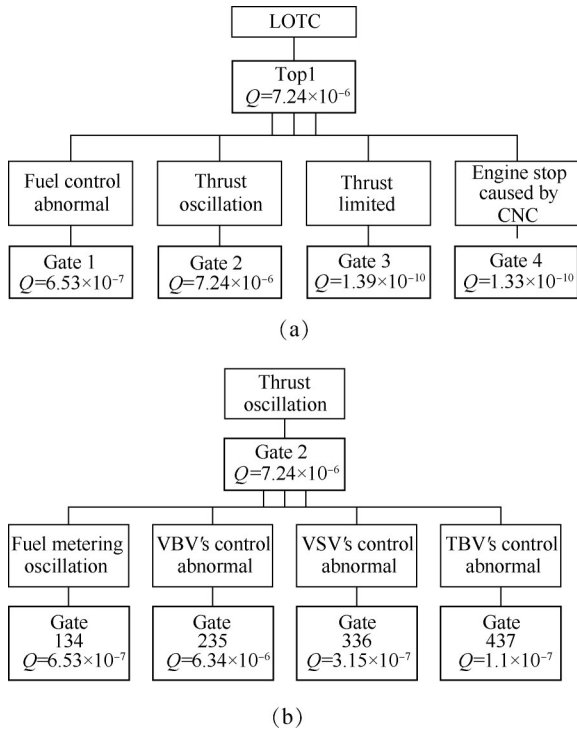


Fig. 2 Partial fault tree diagram

研究设计了 ST 与 LT 取值方法。 $ST = [125, 125 + \Delta_{ST}, 125 + 2\Delta_{ST}, \dots, 125 + m\Delta_{ST}]$, $LT = [250, 250 + \Delta_{LT}, 250 + 2\Delta_{LT}, \dots, 250 + n\Delta_{LT}]$, 式中 Δ_{ST}, Δ_{LT} 表示派遣时长取值步长。由于 R 不能高于 10 次/百万飞行小时, 因此若想获得任意不高于 10 次/百万飞行小时的 R 下的 $ST-LT$ 值, m, n 需满足

$$\lambda_R = f(\forall ST, LT = 250 + n\Delta_{LT}) > 10^{-5} \quad (10)$$

为了使派遣时长的步长更为合理, 以缩小计算时间, 提高精度, 令 $K = \Delta_{ST}/\Delta_{LT}$, K 为长时故障类与短时故障类对 R 的贡献的比值的倒数, 表示为

$$1/K = \sum_{k=2}^i \pi_k \lambda_{k-R} / \sum_{k=i+1}^j \pi_k \lambda_{k-R} \quad (11)$$

为了提高精度, 取较小 Δ_{ST} 值, 譬如 $\Delta_{ST}=1$ 。从而可得到不同 ST 和 LT 下的 R 值 $\lambda_{ST-LT-R}$, 相互之间的关系可用图 4 所示, 图中黑色截面为 $R=1.0 \times 10^{-5}$ 的截面图。

由于获得的 $ST-LT-R$ 取值为离散值, 所以不可能获得 R 刚好为 1.0×10^{-5} 的 $ST-LT$ 取值。因此, 通过寻找不同 ST 下, 最接近且 R 不大于 1.0×10^{-5} 情况下的 LT 值。

$$\begin{cases} \min(1.0 \times 10^{-5} - \lambda_{ST-LT-R}) \\ \text{s.t.} \quad \lambda_{ST-LT-R} \leq 10^{-5} \end{cases} \quad (12)$$

2.4 拟合结果

根据式(9)可知, ST 与 LT 分别与 R 成单调递增关系, 所以 R 不变时, ST 与 LT 之间满足单调递减关系。为了建立 ST 与 LT 的函数关系, 分别采用一到四阶多项式拟合 $ST-LT$ 关系。假设:

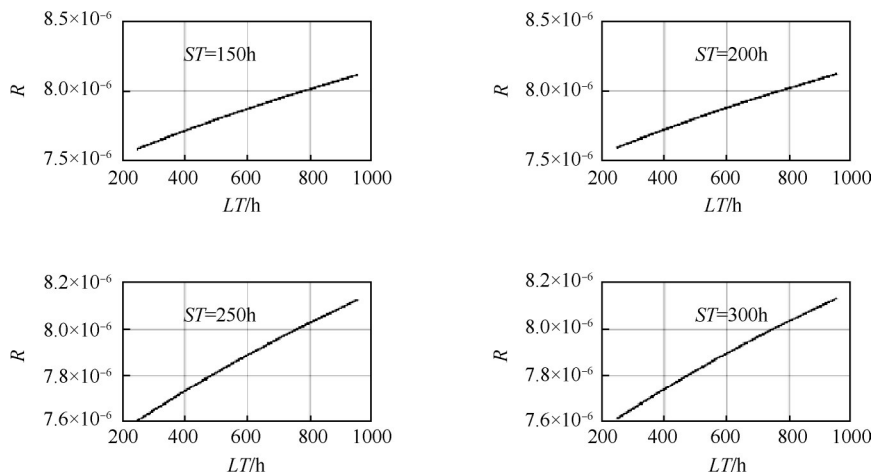
$$LT = \sum_{i=0}^4 X_i ST^i \quad (13)$$

通过拟合可以得到各阶多项式的系数, 如表 2 所示。为了说明各阶多项式的拟合优劣度, 采用可决系数 R -square、均方根误差 $RMSE$, 或和方差 SSE 值进行评价不同阶数下拟合效果指标, 如表 3 所示。

R -square 越接近 1, 或 $RMSE, SSE$ 值越小, 拟合程

Table 2 Result of fit

Order	One	Two	Three	Four
X_0	1434	1455	1468	1474
X_1	-0.241	-0.262	-0.288	-0.291
X_2	0	1.29×10^{-5}	4.35×10^{-5}	1.21×10^{-5}
X_3	0	0	-6.72×10^{-9}	9.98×10^{-9}
X_4	0	0	0	-3.25×10^{-12}

Fig. 3 $LT-R$ under different ST diagram

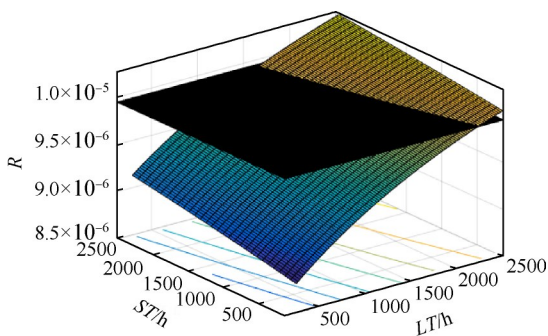


Fig. 4 ST-LT-R diagram

Table 3 Goodness of fit

Order	R-square	RMSE	SSE
One	0.9983	29.67	24650
Two	0.9995	15.18	6113
Three	0.9995	15.15	5967
Four	0.9995	15.14	5732

度越高。从表 3 中可以看出,当多项式阶数大于二阶时,增加多项式阶数已很难提高拟合精确度,且考虑到增加阶数导致的多项式复杂性,因此本研究采用二阶多项式拟合 $ST-LT$ 关系,对应的 ST 和 LT 的函数关系为

$$LT = 1.29 \times 10^{-5} ST^2 - 0.2623ST + 1455 \quad (14)$$

ST 和 LT 的函数关系可以用图 5 表示,图中双虚线表示 99% 置信区间 CI。

将式 (14) 代入式 (9), 可得到 R 随 ST 的变化情况,如图 6 所示。从图 6 可以看出, R 始终在小于 9.99×10^{-6} 附近波动,波动最大值与最小值相对误差为 2.6×10^{-5} , 可以认为 R 保持不变,说明了拟合方法准确性。

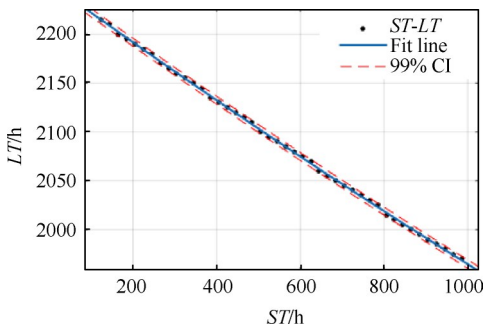


Fig. 5 ST-LT fitting line

3 优化建模

时间限制性派遣的主要目的是在保证安全的前提下,提高飞机的利用率和减少维修成本。在实际中,飞机的利用率的高低可以体现为飞机带故障运

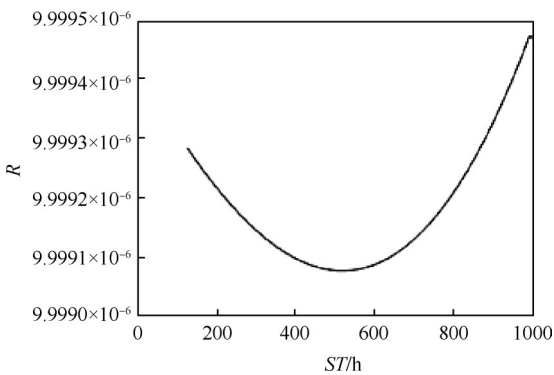


Fig. 6 ST-R under formula (14)

行的时长;因为每次维修的固定费用基本不变,所以在 FADEC 系统构型和各部件失效率一定的情况下,FADEC 系统的维修成本主要体现为系统平均维修间隔 $MTBR$ 。因此,本研究以飞机带故障运行的时长和 $MTBR$ 为优化目标。

3.1 带故障运行时长期望

FADEC 系统开展 TLD 分析的主要目的是保证安全的前提下,提高派遣率,其本质就是能带故障运行,因此,FADEC 系统在保证安全前提下,带故障运行时长是 TLD 追求的目标。部件 i 带故障运行时长 H_i 可以表示为出现故障的概率 P_i 乘以故障可保留的时间。其中出现故障的概率可以通过式 (5) 获得,故障可保留的时间即为派遣时长,可用 $1/\mu_i$ 表示。因此部件 i 的带故障运行时长为

$$H_i = P_i / \mu_i \quad (15)$$

整个 FADEC 系统的各部件带故障运行时长的总和为

$$H = \sum_i P_i / \mu_i \quad (16)$$

从图 7 看出,随着 ST 越来越大,带故障运行时长越来越短。带故障派遣时长越短,飞机的利用率越低。

3.2 系统 MTBR

假定某部件 i 的失效率为 λ_i , 其派遣时长为 ST 或 LT , 记为 I , 如图 8 所示, 因此, 部件 i 的 $MTBR$ 为

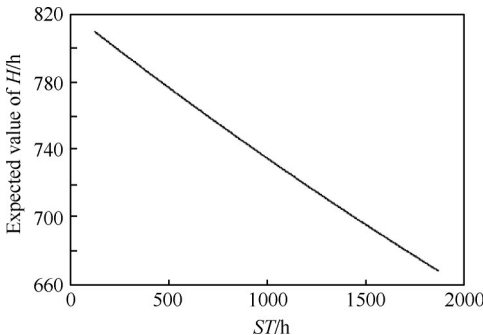


Fig. 7 Expectation with faulty running time

$$M_{\text{component}} = 1/\lambda_i + I \quad (17)$$

对于由多个部件构成的系统而言,如忽略多个故障同时出现的情况,那么单位时间内系统的维修次数等于单位时间内各部件维修次数之和。对于 FADEC 系统,故障存在暴露时间,在暴露时间内可能会发生新的故障,但是由于每次维修只处理到达派遣时限的故障,所以维修次数依旧等于故障发生次数。因此系统 $MTBR$ 与各部件 $MTBR$ 满足以下关系

$$M_{\text{system}} = 1/\sum_i \frac{1}{1/\lambda_i + I} \quad (18)$$

R 不变时, LT 可以表示为 ST 的函数。因此系统 $MTBR$ 可以表示为 ST 的函数。利用式(14)和式(18),通过改变 ST 的取值,可以得到系统 $MTBR$ 随 ST 变化的趋势,如图 9 所示。从图 9 可以看出,随着 ST 的增大,系统 $MTBR$ 越来越小,平均维修间隔时间越来越短。

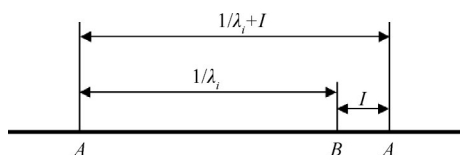


Fig. 8 Component $MTBR$

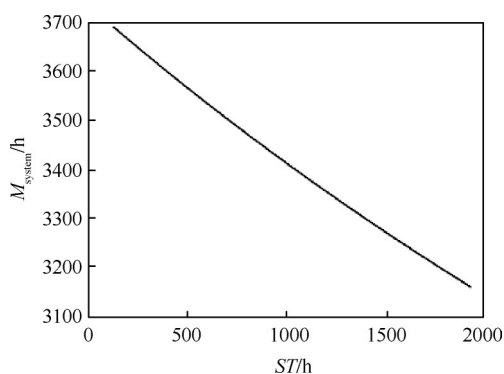


Fig. 9 System $MTBR$

3.3 分析对比

因为在实际的维修中,大多数维修工作是预先计划好的, ST 和 LT 等非计划维修工作很容易打乱维修工作安排,进而影响飞机的正常运营。因此,非计划维修工作尽量要有一个较长的故障保留期限,以便在计划维修工作较少的情况下执行。因此,在时间限制性派遣中,一般不推荐比 25h 更小的维修间隔。因此,选取 $ST=25h$,与 ST 取固定值进行对比,表 4 为 ST 取三组代表值时,相应优化目标的取值。

从图 8,9 以及表 4 可以看出,随着 ST 的增大,系统 $MTBR$ 不断减小,带故障运行时期望也不断减

Table 4 M_{system} and H in given ST

ST/h	M_{system}/h	H/h
25	3893	819
125	3693	801
250	3582	786

小。与 ST 取固定值 250h 相比, ST 取 25h 时, M_{system} 增大了 8.6%; H 增大了 4.2%。因此从实例中两个目标变化趋势得到结论是, ST 取值较小时,系统 $MTBR$ 较大,带故障运行时长的期望更长。

3.4 结果讨论

在本例中,得到优化后 ST 结论为: ST 越小越好。部分原因可能为在此 FADEC 系统中,短时派遣类故障数量过少。与长时派遣类故障 73 个相比,短时派遣类故障只有 2 个。因此通过修改短时-长时故障分类标准,得到短时故障类分别为 2, 4, 6, 8 时,得到优化后 ST 分布,结果见图 10。

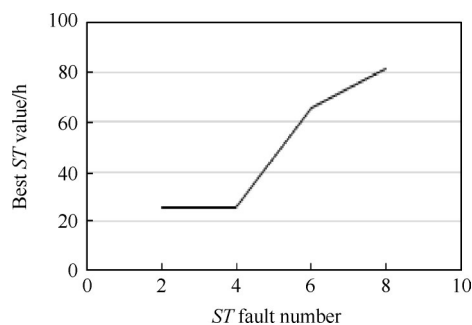


Fig. 10 Best ST value

研究发现,在短时派遣故障数量达到 6 个时, ST 取值出现最优解。在短时派遣故障分别为 6 和 8 时, ST 最优值依旧比推荐固定值 125h 小。根据失效安全理论,失效后对系统安全冗余影响较大的短时派遣类故障应尽量少,所以 8 个短时故障以上情况不做讨论。

4 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1) 在保证 R 不变的情况下,提出了基于多项式的 $ST-LT$ 关系拟合方法,实例表明:拟合得到的 $ST-LT$ 关系式,在求解 R 时,引起的波动仅为 2.6×10^{-5} ,拟合效果良好。

(2) 建立了短时派遣间隔 ST 与系统带故障运行时期望和系统平均维修时长之间关系式,分析 ST 对它们的影响,结果表明:与取固定值相比, $ST=25h$ 时,带故障运行时期望增大 4.2%,系统平均维修时长增大 8.6%。

(3)通过增加短时故障数量,分析不同短时故障数量下 ST 最优值,结果表明,目前 ST 固定值125h偏大,存在优化空间。

因此,本文提出的以 R 为约束,以 ST 为变量,系统带故障运行时长期望和系统平均维修时长为目标的优化模型,可以弥补原先 ST 只取固定值的不足,为FADEC系统开展更合理的TLD分析提供了技术手段。

致 谢:感谢国家自然科学基金资助。

参考文献

- [1] United States Department of Transportation. AC33.28-3 Guidance Material for 14 CFR33.28 Engine Control Systems[M]. Washington D C: Federal Aviation Administration, 2014.
- [2] United States Department of Transportation. ANE-1993-33. 28TLD-R1 Policy for Time-Limited Dispatch (TLD) of Engine Control Systems[M]. Washington D C: Federal Aviation Administration, 1993.
- [3] Prescott D R, Andrews J D. Monte Carlo Simulation Modelling of Aircraft Dispatch with Known Faults[C]. Chengdu: 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 2009.
- [4] 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).
- [5] Prescott D R, Andrews J D. Aircraft Safety Modeling for Time-Limited Dispatch[C]. Virginia: Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2005.
- [6] Prescott D R, Andrews J D. The Safe Dispatch of Aircraft with Known Faults [J]. *International Journal of Perform Ability Engineering*, 2008, 4(3).
- [7] 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.
- [8] 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): 3970-3979.
- [9] Lu Zhong, Liang Xihui, Zuo Ming J, et al. Markov Process Based Time Limited Dispatch Analysis with Constraints of Both Dispatch Reliability and Average Safety Levels [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 167: 84-94.
- [10] 陆 中,李乃鑫,周 伽,等. 发动机控制系统时间限制派遣分析的若干可靠性理论问题[J]. 推进技术, 2018, 39(3): 667-675. (LU Zhong, LI Nai-xin, ZHOU Jia, et al. On Reliability Theory of Time Limited Dispatch Analysis in Engine Control Systems [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(3): 667-675.)
- [11] Lu Zhong, Zhou Jia, Li Xianan. 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: 397-408.
- [12] 赵皓岑,王 彬,叶志锋. 数控燃油计量装置联合建模方法研究[J]. 推进技术, 2016, 37(9): 1752-1758. (ZHAO Hao-cen, WANG Bin, YE Zhi-feng. Study on Co-Modeling Method for Digital Control Fuel Metering Unit [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(9): 1752-1758.)
- [13] 李睿超,郭迎清,李 岩,等. 基于数据集中器的超燃冲压发动机分布式控制系统通信方案设计[J]. 推进技术, 2016, 37(9): 1766-1773. (LI Rui-chao, GUO Ying-qing, LI Yan, et al. Communication Scheme Design of Distributed Control System for Scramjet Engine Based on Data Concentrators [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(9): 1766-1773.)
- [14] Mansour B, Fielding J P. Development of a Civil Aircraft Dispatch Reliability Prediction Methodology[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2003, 75(6): 588-594.
- [15] Hjelmgren K, Svensson S, Hannius O. Reliability Analysis of a Single Engine Aircraft FADEC [C]. Anaheim: International Symposium on Product Quality and Integrity, 1998.
- [16] SAE International Group. ARP5107B Guidelines for Time Limited Dispatch (TLD) Analysis for Electronic Engine Control Systems [M]. Washington D C: Society of Automotive Engineers, 2006.
- [17] Chen B S, Li C P, Li Y I, et al. Reliability Analysis Method of an Aircraft Engine FADEC System[C]. Chengdu: 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 2009.

(编辑:朱立影)