



(12) 发明专利申请

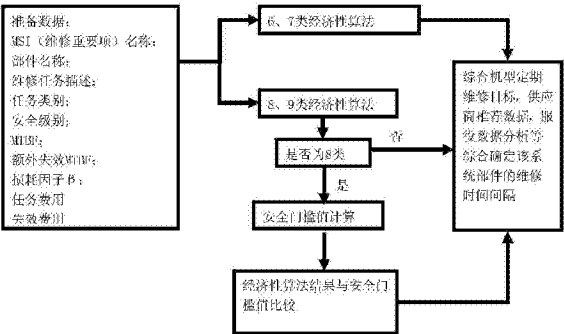
(10) 申请公布号 CN 105138850 A  
(43) 申请公布日 2015. 12. 09

(21) 申请号 201510575578. 4  
(22) 申请日 2015. 09. 09  
(71) 申请人 中航沈飞民用飞机有限责任公司  
地址 110179 辽宁省沈阳市浑南新区世纪路  
1 号  
(72) 发明人 王勇 徐志锋 蒋庆喜 王莹  
刘余  
(51) Int. Cl.  
G06F 19/00(2011. 01)

权利要求书3页 说明书14页 附图9页

(54) 发明名称  
一种民用飞机系统维修时间间隔计算方法

(57) 摘要  
一种民用飞机系统维修时间间隔计算方法，属于航空技术领域。本发明选择了经济性(费用/小时)作为优化目标。其中对于安全类任务，使用两种方法来计算相应维修任务的时间间隔，侧重安全和经济，综合考虑经济性算法推荐范围、安全门槛及产品型号定检目标值来确定任务的时间间隔。本发明以经济性为中心，安全性为限制，可靠性为输入理念，以此来推荐合理的维修时间间隔。在工作组决策时，综合地考虑供应商推荐值、工程判断值、历史维修数据、相似系统部件数据、行业经验值、本发明推荐值等，做出最佳维修时间间隔的判断。本发明解决了国内民用飞机在制定 MRBR 过程中由于缺乏大量服役数据而无法准确判断系统部件维修时间间隔的问题。



1. 一种民用飞机系统维修时间间隔计算方法,其特征在于:包括如下步骤:

第一步:准备数据

包括维修重要项名称、部件名称、维修任务描述、任务类别、安全级别、平均故障间隔时间、额外失效平均故障间隔时间、损耗因子、任务费用和失效费用;

第二步:判断任务类别,如果任务类别是显性类别第 6、7 类采用经济性算法确定维修时间间隔,所述经济性算法如下:

确定  $[0, T]$  时间内的平均失效率

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{\int_0^T \lambda(t) dt}{T} = \frac{1}{\eta} \left( \frac{T}{\eta} \right)^{\beta-1}, T > 0 \quad (1)$$

优化目标是通过求下式

$$C(T) = \frac{C_f T \bar{\lambda}(T) + C_p}{T} = C_f \bar{\lambda}(T) + \frac{C_p}{T} \quad (2)$$

的极小值确定最优维修时间间隔  $T^*$ ;其中: $C(T)$  表示费用总和, $C_f$  表示部件失效所产生的费用, $C_p$  为对该部件执行预防性维修任务的费用, $\eta$  为尺寸参数, $\beta$  为形状参数,

对上式 (2) 求导,并令  $dC(T)/dT = 0$  得

$$(\beta-1) \left( \frac{T}{\eta} \right)^{\beta} = \frac{C_p}{C_f} \quad (3)$$

若  $\beta = 1$ , 则  $T^* = \infty$ , 即:没有必要进行定时维修,让部件一直工作到故障后才做维修;  
若  $\beta > 1$ , 则存在唯一的有限最优解  $T^*$ , 它满足

$$T^* = \eta \left( \frac{C_p}{(\beta-1)C_f} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

且最小费用为  $C(T^*)$ ;

$$\text{令 } C_1(T) = \frac{C_p}{T}, \quad C_2(T) = C_f \bar{\lambda}(T), \quad \text{则 } C(T) = C_1(T) + C_2(T),$$

最低成本的 110% 处的  $T$  值分布在最低成本处的  $T$  值  $T^*$  的两边, 定义为  $T_a$  及  $T_b$ , 选择维修时间间隔范围为  $[T_a, T_b]$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的民用飞机系统维修时间间隔计算方法,其特征在于:所述的第二步判断任务类别中,如果任务类别为隐性任务第 9 类别,则其经济性算法如下:

部件在威布尔分布下的故障分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}, t > 0, \quad (5)$$

优化目标是通过求下式

$$C(T) = \frac{C_p + F(T)(C_r + \lambda_e T C_f)}{T} = \frac{C_p + F(T)C_r}{T} + F(T)\lambda_e C_f \quad (6)$$

的极小值确定最优维修时间间隔  $T^*$ ;其中: $C(T)$  表示费用总和,用  $C_f$  表示部件失效所

产生的费用,  $C_p$  对该部件执行预防性维修任务的费用,  $C_r$  表示替换或修理部件的费用;

上式中  $\lambda_e$  是指数分布下的失效率, 为常数; 指数分布下有  $\lambda_e = \frac{1}{\text{主失效MTBF}}$ , MTBF 为平均故障间隔时间;

对目标公式 (6) 求导, 并令  $dC(T)/dT = 0$  可得  $T^*$ , 令  $C_1(T) = \frac{C_p}{T}$ ,  $C_2(T) = \frac{F(T)(C_r + \lambda_e TC_f)}{T}$ , 则  $C(T) = C_1(T) + C_2(T)$ , 最低成本的 110% 处的  $T$  值分布在最低成本处的  $T$  值  $T^*$  的两边, 定义为  $T_a$  及  $T_b$ , 选择维修时间间隔范围为  $[T_a, T_b]$ 。

3. 根据权利要求 2 所述的民用飞机系统维修时间间隔计算方法, 其特征在于: 所述的第二步判断任务类别中, 如果任务类别为隐性任务第 8 类别, 采用如权利要求 2 所述的经济性算法结果和安全门槛值计算结果, 并结合产品型号定检目标值确定, 选取经济性算法推荐范围内或附近的产品型号定检目标值或者产品型号定检目标值的倍数, 该值  $\leq$  安全门槛值计算结果。

4. 根据权利要求 3 所述的民用飞机系统维修时间间隔计算方法, 其特征在于: 所述安全门槛值计算方法如下:

事件发生概率  $\theta$  满足以下条件

$$P_1(t) \times P_2 \leq \theta \quad (7)$$

式中  $P_1(t)$  表示部件故障概率,

$$P_1(t) = F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, t > 0 \quad (8)$$

$P_2$  表示额外失效的失效率,  $P_2 = \lambda_e = \frac{1}{\text{额外失效MTBF}}$ , MTBF 是平均故障间隔时间,

得到

$$t \leq \eta \left[ \ln \left( 1 - \frac{\theta}{\lambda_e} \right)^{-1} \right]^{\frac{1}{\beta}} = T_{cap} \quad (9)$$

其中:  $T_{cap}$  表示计算出的时间间隔上限。

5. 根据权利要求 1-4 任一项所述的民用飞机系统维修时间间隔计算方法, 其特征在于: 所述尺寸参数  $\eta$  按照如下步骤确定:

1) 根据平均故障间隔时间 MTBF 确定威布尔分布概率密度

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, t > 0, \quad (10)$$

分布函数

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, t > 0 \quad (5)$$

失效率

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}, t > 0 \quad (11)$$

其中：

$\eta$  ——尺寸参数,反映威布尔分布的范围,  $\beta$  ——形状参数,反映概率密度函数的形状以及失效率的增减性；

2) 由 MTBF 和  $\beta$  确定  $\eta$

$$\eta = \frac{MTBF}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)} \quad (12)$$

其中： $\Gamma$  函数： $\Gamma(s) = \int_0^{\infty} x^{s-1} e^{-x} dx$ 。

6. 根据权利要求 1 所述的民用飞机系统维修时间间隔计算方法,其特征在于:所述任务费用包括:

1) 对部件执行预防性维修任务的总费用  $C_p$

$$C_p = C_g + C_{mc} + H_m \times N_p \times R_l \quad (13)$$

$C_g$  ——地面保障设备分摊费用,  $C_{mc}$  ——材料及耗材费用,  $H_m$  ——人力工时,  $N_p$  ——工作人员数量,  $R_l$  ——工时率;当  $C_p$  小于 75\$ 时,取 75\$;

2) 部件失效所导致的总费用  $C_f$

$$C_f = C_r + C_{del} + C_{can} + C_{mc} + C_{adj} + C_{out} + C_{div} + H_m \times N_p \times R_l \quad (14)$$

$C_r$  ——部件修理费,  $C_{del}$  ——航班延迟费,  $C_{can}$  ——航班取消费,  $C_{mc}$  ——材料及耗材费用,  $C_{adj}$  ——时间间隔调整值,  $C_{out}$  ——停飞费用,  $C_{div}$  ——转飞费用,  $H_m$  ——人力工时,  $N_p$  ——工作人员数量,  $R_l$  ——工时率。

## 一种民用飞机系统维修时间间隔计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于航空技术领域,特别是涉及一种民用飞机系统维修时间间隔计算方法。

### 背景技术

[0002] 民用飞机传统的“系统分析”过程中,维修时间间隔的确定都偏保守,各工作组的选择往往基于行业惯例。行业惯例大多依据供应商推荐值、相同或相似件的服役数据、工程经验等产生,它往往只针对某个系统或部件本身,并没有完全与飞机 MSG-3(Maintenance Steering Group—3rd Task Force) 思想融合,即没有从飞机整机角度出发考虑其合理性:该系统失效会对飞机产生哪种影响;各种影响下,何时维修会使成本最低等。MSG-3 在系统一层分析中会产生五类失效影响,即显性安全(5类)、显性运行(6类)、显性经济(7类)、隐性安全(8类)、隐性非安全(9类)。与这五种类别对应的二层分析产生的维修任务,其时间间隔如果都仅按照行业惯例进行确定,则很可能会导致维修不足或过剩的情况。另一方面,在推荐出与行业惯例不符的维修时间间隔时,航空制造商、运营商及当局往往从不同角度持有不同的意见,在工作组或者 ISC 会议上造成大量长时间的辩论,缺少相应判断标准。

[0003] 下面两例说明了仅参照行业惯例进行系统维修时间间隔确定的缺陷:

[0004] 例 1:一个隐性非安全类(失效在飞机运行过程中不被发现,该失效与额外失效或事件的组合对飞机安全性无影响)维修任务,其维修对象的 MTBF 为 500000FH(飞行小时),额外系统失效的 MTBF(平均故障间隔时间)为 250000FH。完成该任务需要的时间较短,因该失效产生的费用很低,那基于经济性考虑应选择较高的维修时间间隔更为合理,如 20000-30000FH。但是该任务时间间隔的行业惯例为 1000FH,该时间间隔势必会造成维修过剩,产生较高维修成本。

[0005] 例 2:一个显性运行类(失效在运行过程中可以被发现,且它对飞机运行有影响)维修任务,其维修对象的 MTBF 为 200000FH,任务时间为 15 分钟,但如果发生失效会产生严重的后果,如昂贵的修理费用 100000\$、航班取消等。那在这种情况下,选择较低的时间间隔是较为合理的,如 300-500FH。但是该任务时间间隔的行业惯例为 800-1000FH,该时间间隔则显得维修不足,可能会给航空公司造成较高的维修成本或盈利损失。

[0006] 由上可以看出,对新机型来说,在大量缺乏服役数据支持的情况下,完全依赖行业惯例来确定系统维修时间间隔并不合理,将安全性、可靠性、经济性与 MSG-3 分析完全融合,以可靠性为输入、安全性为约束、经济性为中心,从全机角度出发来确定民用飞机系统维修时间间隔将是该领域的主导趋势。

[0007] 目前国内在该领域研究还处于起步阶段,多数公司采用基于案例推理的方法,以相似度为中心,在缺乏服役数据的支持下,使用其它在役飞机相同或相似部件的技术数据或经验数据,通过计算相似度大小来判断国内新研制机型到底使用何种相似或相同部件的在役维修时间间隔。

## 发明内容

[0008] 针对上述存在的技术问题,为摆脱仅依靠现有行业经验数据或他人维修数据来确定民用飞机系统维修时间间隔的现状,本发明提供一种民用飞机系统维修时间间隔计算方法,它依据 MSG-3 思想,从整机角度出发,结合民用飞机实际运营过程中可能产生的经济影响,综合考虑可靠性、安全性因素,来求解最佳的维修时间间隔。

[0009] 本发明的目的是通过以下技术方案来实现的:

[0010] 本发明的基本原理

[0011] 对于 MSG-3 分析产生的定期维修任务可以分为安全类与非安全类,本发明选择了经济性(费用/小时)作为优化目标。其中对于安全类任务,使用两种方法来计算相应维修任务的时间间隔:侧重安全和经济,综合考虑经济性算法推荐范围、安全门槛及产品型号定检目标值来确定任务的时间间隔。

[0012] 本发明一种民用飞机系统维修时间间隔计算方法,包括如下步骤:

[0013] 第一步:准备数据

[0014] 包括维修重要项名称、部件名称、维修任务描述、任务类别、安全级别、平均故障间隔时间、额外失效平均故障间隔时间、损耗因子、任务费用和失效费用;

[0015] 第二步:判断任务类别,如果任务类别是显性类别第 6、7 类采用经济性算法确定维修间隔时间,所述经济性算法如下:

[0016] 确定  $[0, T]$  时间内的平均失效率

$$[0017] \quad \overline{\lambda(T)} = \frac{\int_0^T \lambda(t) dt}{T} = \frac{1}{\eta} \left( \frac{T}{\eta} \right)^{\beta-1}, T > 0 \quad (1)$$

[0018] 优化目标是通过求下式

$$[0019] \quad C(T) = \frac{C_f T \overline{\lambda(T)} + C_p}{T} = C_f \overline{\lambda(T)} + \frac{C_p}{T} \quad (2)$$

[0020] 的极小值确定最优维修时间间隔  $T^*$ ;其中: $C(T)$  表示费用总和, $C_f$  表示部件失效所产生的费用, $C_p$  为对该部件执行预防性维修任务的费用, $\eta$  为尺寸参数, $\beta$  为形状参数,

[0021] 对上式 (2) 求导,并令  $dC(T)/dT = 0$  得

$$[0022] \quad (\beta-1) \left( \frac{T}{\eta} \right)^{\beta} = \frac{C_p}{C_f} \quad (3)$$

[0023] 若  $\beta = 1$ , 则  $T^* = \infty$ , 即:没有必要进行定时维修,让部件一直工作到故障后才做维修;若  $\beta > 1$ , 则存在唯一的有限最优解  $T^*$ , 它满足

$$[0024] \quad T^* = \eta \left( \frac{C_p}{(\beta-1)C_f} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

[0025] 且最小费用为  $C(T^*)$ ;

[0026] 令  $C_1(T) = \frac{C_p}{T}$ ,  $C_2(T) = C_f \overline{\lambda(T)}$ , 则  $C(T) = C_1(t) + C_2(t)$ ,

[0027] 最低成本的 110% 处的  $T$  值分布在最低成本处的  $T$  值  $T^*$  的两边, 定义为  $T_a$  及  $T_b$ ,

选择维修时间间隔范围为  $[Ta, Tb]$ 。

[0028] 所述的第二步判断任务类别中,如果任务类别为隐性任务第 9 类别,则其经济性算法如下:

[0029] 部件在威布尔分布下的故障分布函数为

$$[0030] \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, t > 0, \quad (5)$$

[0031] 优化目标是通过求下式

$$[0032] \quad C(T) = \frac{C_p + F(T)(C_r + \lambda_e TC_f)}{T} = \frac{C_p + F(T)C_r}{T} + F(T)\lambda_e C_f \quad (6)$$

[0033] 的极小值确定最优维修时间间隔  $T^*$ ;其中:  $C(T)$  表示费用总和,用  $C_p$  表示部件失效所产生的费用,  $C_p$  对该部件执行预防性维修任务的费用,  $C_r$  表示替换或修理部件的费用;

[0034] 上式中  $\lambda_e$  是指数分布下的失效率,为常数;指数分布下有  $\lambda_e = \frac{1}{\text{主失效MTBF}}$ ,

MTBF 为平均故障间隔时间;

[0035] 对目标公式 (6) 求导,并令  $dC(T)/dT = 0$  可得  $T^*$ , 令  $C_1(T) = \frac{C_p}{T}$ ,

$C_2(T) = \frac{F(T)(C_r + \lambda_e TC_f)}{T}$ , 则  $C(T) = C_1(T) + C_2(T)$ , 最低成本的 110% 处的  $T$  值分布在最低

成本处的  $T$  值  $T^*$  的两边, 定义为  $Ta$  及  $Tb$ , 选择维修时间间隔范围为  $[Ta, Tb]$

[0036] 所述的第二步判断任务类别中,如果任务类别为隐性任务第 8 类别,采用如权利要求 2 所述的经济性算法结果和安全门槛值计算结果,并结合产品型号定检目标值确定,选取经济性算法推荐范围内或附近的产品型号定检目标值或者产品型号定检目标值的倍数,该值  $\leq$  安全门槛值计算结果。

[0037] 所述安全门槛值计算方法如下:

[0038] 事件发生概率  $\theta$  满足以下条件

$$[0039] \quad P_1(t) \times P_2 \leq \theta \quad (7)$$

[0040] 式中  $P_1(t)$  表示部件故障概率,

$$[0041] \quad P_1(t) = F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, t > 0 \quad (8)$$

[0042]  $P_2$  表示额外失效的失效率,  $P_2 = \lambda_e = \frac{1}{\text{额外失效MTBF}}$ , MTBF 是平均故障间隔时

间,

[0043] 得到

$$[0044] \quad t \leq \eta \left[ \ln \left( 1 - \frac{\theta}{\lambda_e} \right)^{-1} \right]^{\frac{1}{\beta}} = T_{cap} \quad (9)$$

[0045] 其中:  $T_{cap}$  表示计算出的时间间隔上限。

[0046] 所述尺寸参数  $\eta$  按照如下步骤确定：

[0047] 1) 根据平均故障间隔时间 MTBF 确定威布尔分布

[0048] 概率密度

$$[0049] \quad f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}, t > 0, \quad (10)$$

[0050] 分布函数

$$[0051] \quad F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}, t > 0 \quad (5)$$

[0052] 失效率

$$[0053] \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}, t > 0 \quad (11)$$

[0054] 其中：

[0055]  $\eta$  ——尺寸参数,反映威布尔分布的范围,  $\beta$  ——形状参数,反映概率密度函数的形状以及失效率的增减性；

[0056] 2) 由 MTBF 和  $\beta$  确定  $\eta$

$$[0057] \quad \eta = \frac{MTBF}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)} \quad (12)$$

[0058] 其中： $\Gamma$  函数： $\Gamma(s) = \int_0^{\infty} x^{s-1} e^{-x} dx$ 。

[0059] 所述任务费用包括：

[0060] 1) 对部件执行预防性维修任务的总费用  $C_p$

$$[0061] \quad C_p = C_g + C_{mc} + H_m \times N_p \times R_1 \quad (13)$$

[0062]  $C_g$  ——地面保障设备分摊费用,  $C_{mc}$  ——材料及耗材费用,  $H_m$  ——人力工时,  $N_p$  ——工作人员数量,  $R_1$  ——工时率；当  $C_p$  小于 75\$ 时,取 75\$；

[0063] 2) 部件失效所导致的总费用  $C_f$

$$[0064] \quad C_f = C_r + C_{del} + C_{can} + C_{mc} + C_{adj} + C_{out} + C_{div} + H_m \times N_p \times R_1 \quad (14)$$

[0065]  $C_r$  ——部件修理费,  $C_{del}$  ——航班延迟费,  $C_{can}$  ——航班取消费,  $C_{mc}$  ——材料及耗材费用,  $C_{adj}$  ——时间间隔调整值,  $C_{out}$  ——停飞费用,  $C_{div}$  ——转飞费用,  $H_m$  ——人力工时,  $N_p$  ——工作人员数量,  $R_1$  ——工时率。

[0066] 本发明的有益效果：

[0067] 国内民用飞机在制定 MRBR (MRBR 为维修审查委员会报告) 过程中缺乏服役数据积累,也在一定程度上削弱了维修成本方面的竞争性。本发明的计算方法以经济性为中心,安全性为限制,可靠性为输入理念,并以此来推荐合理的维修时间间隔。这样在工作组决策时,就可以综合地考虑供应商推荐值、工程判断值、历史维修数据、相似系统部件数据、行业经验值、本方法推荐值等,来做出一个最佳维修时间间隔的判断,从而解决了国内民用飞机在制定 MRBR 过程中由于缺乏大量服役数据而无法准确判断系统部件维修时间间隔的问题。



## 附图说明

- [0068] 图 1 为本发明的流程框图。
- [0069] 图 2 为本发明中显性任务计算方法所得的曲线图表。
- [0070] 图 3 为本发明中隐性任务计算方法所得的曲线图表。
- [0071] 图 4 为实施例 1 的隐性任务第 8 类别的经济性算法图表。
- [0072] 图 5 为实施例 1 的安全门槛值计算图表。
- [0073] 图 6 为实施例 2 的隐性任务第 8 类别的经济性算法图表。
- [0074] 图 7 为实施例 2 的安全门槛值计算图表。
- [0075] 图 8 为本发明的事件发生概率  $\theta$  参照图表。
- [0076] 图 9 为实施例 3 的经济性算法图表。
- [0077] 图 10 为实施例 4 的经济性算法图表。

## 具体实施方式

- [0078] 下面结合附图和实施例具体描述本发明。
- [0079] 实施例 1 :本例对在役飞机 CRJ700 应急灯系统进行应用测试,具体步骤如下 :
- [0080] 第一步 :准备数据
- [0081] 包括维修重要项名称、部件名称、维修任务描述、任务类别、安全级别、平均故障间隔时间、额外失效平均故障间隔时间、损耗因子、——任务费用和失效费用,其中所述的任任务类别是本领域内的常识,5 类为显性安全类,6 类为显性运行类,7 类为显性经济类,8 类为隐性安全类,9 类为隐性非安全类,具体可参考 MSG-3, 2009. 1。主失效平均故障间隔时间、额外失效平均故障间隔时间、损耗因子均是依据不同的部件类型确定,均是固定值。
- [0082] MSI ( 维修重要项 ) :应急灯系统 ;
- [0083] 选择部件 :应急灯及标识 ;
- [0084] 任务描述 :应急灯系统操作性检查 ;
- [0085] 任务类别 :8 ;
- [0086] 安全级别 :伤害 (In jury) ;
- [0087] MTBF :75000FH,
- [0088] 额外失效 MTBF :100000 ;( 为可靠性专业输入值 )
- [0089] 损耗因子  $\beta$  :1.0,根据本发明  $\beta$  损耗因子列表确定 ;
- [0090] 任务费用 :包括
- [0091] 1) 对部件执行预防性维修任务的总费用  $C_p$
- [0092] 本例中 Cost of Amortized GSE 地面保障设备分摊费用  $C_g = 0$ ,材料及耗材费用  $C_{mc} = 0$ ,人力工时  $H_m = 0.3$  小时,工作人员数量  $N_p = 1$ ,工时率  $R_1 = 60\$/\text{小时}$  ( 此值由使用方自定义 ),则 ;
- [0093]  $C_p = C_g + C_{mc} + H_m \times N_p \times R_1$
- [0094]  $= 0.3 \times 1 \times 60 = 18\$$
- [0095] 当  $C_p$  小于 75\$ 时,取 75\$。 (13)
- [0096] 2) 部件失效所导致的总费用  $C_f$

[0097] 本例中：部件修理费  $C_r = 450\$$ ，航班延迟费  $C_{del} = 15000\$$ ，航班取消费  $C_{can} = 0$ ，材料及耗材费用  $C_{mc} = 0$ ，时间间隔调整值  $C_{adj} = 50000$ ，停飞费用  $C_{out} = 0$ ，转飞费用  $C_{div} = 0$ ，人力工时  $H_m = 0.25$  小时，工作人员数量  $N_p = 1$ ，工时率  $R_1 = 60\$$ （由使用方自定义），则：

$$[0098] \quad C_f = C_r + C_{del} + C_{can} + C_{mc} + C_{adj} + C_{out} + C_{div} + H_m \times N_p \times R_1$$

$$[0099] \quad = 450 + 15000 + 50000 + 0.25 \times 1 \times 60 = 65465\$ \quad (14)$$

[0100] 具体步骤如下：

[0101] 第二步：判断任务类别，本例任务类别为隐性任务第 8 类别，则采用第 9 类别所述的经济性算法结果和安全门槛值计算结果，并结合产品型号定检目标值确定，选取经济性算法推荐范围内或附近的产品型号定检目标值或者产品型号定检目标值的倍数，该值  $\leq$  安全门槛值计算结果。

[0102] 首先，由可靠性数据确定威布尔分布

[0103] 1) 平均故障间隔时间 (MTBF) —— 可靠性输入值

[0104] 可修产品可靠性的一种基本指标，平均故障间隔时间是指产品发生了故障后经修理或更换零件仍能正常工作，其在两次相邻故障间的平均工作时间。如在第一次工作  $t_1$  时间后出现故障，经修复后第二此工作  $t_2$  时间后出现故障，第  $n$  次工作  $t_n$  后出现故障；

[0105] 2) 根据平均故障间隔时间 MTBF 确定威布尔分布

[0106] 概率密度

$$[0107] \quad f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}, t > 0, \quad (10)$$

[0108] 分布函数

$$[0109] \quad F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}, t > 0 \quad (5)$$

[0110] 失效率

$$[0111] \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}, t > 0 \quad (11)$$

[0112] 其中：

[0113]  $\eta$  —— 尺寸参数，反映威布尔分布的范围； $\beta$  —— 形状参数，反映概率密度函数的形状以及失效率的增减性；

[0114] 2) 由 MTBF 和  $\beta$  确定  $\eta$ ，本例中  $MTBF = 75000FH$ ， $\beta = 1.0$

$$[0115] \quad \eta = \frac{MTBF}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)} \quad (12)$$

[0116] 其中： $\Gamma$  函数： $\Gamma(s) = \int_0^{\infty} x^{s-1} e^{-x} dx$ ；

[0117] 本发明中  $\beta$  反应了部件的失效特征，综合国内及国际专家经验，考虑部件使用（受载情况，使用率情况等）和预期失效模式等，共列出了 110 种模式供用户选择，如表 1。例如：当部件退化不可预测、失效呈随机性、部件不经常使用（月使用或年使用）时  $\beta$  选择 1，如灭火器、手电筒、灯、氧气罩、烟雾探测器等；当部件中度磨损、在受重载时或恶劣环境

下频繁使用时  $\beta$  选择 2, 如排气管、液压活塞作动器、丝杠作动器等。

[0118] 然后, 进行所述经济性算法, 具体步骤如下:

[0119] 部件在威布尔分布下的故障分布函数为

$$[0120] \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, t > 0, \quad (5)$$

[0121] 优化目标是通过求下式 (6)

$$[0122] \quad C(T) = \frac{C_p + F(T)(C_r + \lambda_e TC_f)}{T} = \frac{C_p + F(T)C_r}{T} + F(T)\lambda_e C_f \quad (6)$$

[0123] 的极小值确定最优维修时间间隔  $T^*$ ; 其中:  $C(T)$  表示费用总和, 用  $C_r$  表示部件失效所产生的费用,  $C_p$  对该部件执行预防性维修任务的费用,  $C_f$  表示替换或修理部件的费用;

[0124] 上式中  $\lambda_e$  是指数分布下的失效率为常数, 且指数分布下有  $\lambda_e = \frac{1}{MTBF}$ , 其中 MTBF 为平均故障间隔时间;

[0125] 对目标公式 (6) 求导, 并令  $dC(T)/dT = 0$  可得  $T^*$ , 通过图解法确定, 令

$$C_1(T) = \frac{C_p}{T}, \quad C_2(T) = \frac{F(T)(C_r + \lambda_e TC_f)}{T}, \text{ 则 } C(T) = C_1(t) + C_2(t), \text{ 其中 } t \text{ 是变量, } T \text{ 是结果;}$$

如图 4 所示, 最低成本的 110% 处的  $T$  值分布在最低成本处的  $T$  值  $T^*$  的两边, 定义为  $T_a$  及  $T_b$ , 选择维修时间间隔范围为  $[T_a, T_b]$ ,

[0126] 所述安全门槛值计算方法如下:

[0127] 事件发生概率  $\theta$  满足以下条件

$$[0128] \quad P_1(t) \times P_2 \leq \theta \quad (7)$$

[0129] 式中  $P_1(t)$  表示部件故障概率, 其中  $\theta$  参照图 8 所示;

$$[0130] \quad P_1(t) = F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, t > 0 \quad (8)$$

[0131]  $P_2$  表示产生额外损伤的失效率  $P_2 = \lambda_e = \frac{1}{\text{额外失效 MTBF}}$ , 得到

$$[0132] \quad t \leq \eta \left[ \ln \left( 1 - \frac{\theta}{\lambda_e} \right)^{-1} \right]^{\frac{1}{\beta}} = T_{cap} \quad (9)$$

[0133] 如图 5 所示,  $T_{cap}$  表示计算出的时间间隔上限, 即最终选择的维修时间间隔不可以超出该值。比较时结合产品型号定检目标值、经济性算法推荐范围以及  $T_{cap}$ , 例如: 定检目标  $C$  检为 6000FH, 经济性算法得出的范围是 4000FH 至 8000FH,  $T_{cap}$  为 10000FH, 那么最终的时间间隔我们可以选择 6000FH。

[0134] 本发明中事件发生概率  $\theta$  的设定参照图 10 (图 10 为咨询通告 AC25.1309 中的内容)。

[0135] 将两种算法得到的结果进行比较, 分析结论:

[0136] 时间间隔推荐范围: 2150FH—5500FH;

[0137] 安全性考虑值: 7900FH;

[0138] CRJ700 实际服役时间间隔 600FH；

[0139] CRJ700 目前 A 检为 600FH，依据本方法理论，可推荐 2150FH 至 5500FH 范围中 600FH 的倍数作为初始维修时间间隔。目前使用的维修时间间隔 600FH 使该应急灯系统维修过剩。

[0140] 表 1：

[0141]

$\beta$	部件
1	喷气锁组件
	断路器
	止回阀
	按钮控制面板
	旋转开关控制面板
	控制组件（非可动件）
	减压口盖
	导管
	电传装置
	电线束
	风扇

[0142]

	着火探测器（发动机回路）
	灭火器
	闪光灯
	护罩，排气
	内部装饰结构
	插孔麦克风
	救生衣
	灯
	装载挡块
	氧气面罩
	扩音器
	麦克风
	氧气发生器
	遮板
	烟雾探测器
	烟雾警报器
	扬声器
	开关（不在密封面板上）
	软管
1.1	抗干扰机构
	接触器（高压转换）
	按钮开关控制面板
	液压保险丝
	隔离层
	集气管
	氧气面罩
	机械把手
	细管
	枢轴销（RAT）
	压力/转换开关（移动件）
	压力调整器
	继电器
	蓄水池
	弹簧
	待命罗盘
	转矩管
	软管
1.2	接近口盖密封
	天线
	阻尼器
	止回阀（舌型阀）
	风扇
	流体过滤器
	FMU

[0143]


	IDG
	门机构
	机械链接
	电动机械阀门
	杆装配
	滚轴（低载荷，门）
	方向舵踏板装配
	开关（不在密封面板上）
1.3	蓄水池
	空气过滤器
	空气涡轮启动器
	离合器（摩擦）
	电容器
	门配平装配
	门密封
	排水装配
	电传装置
	电动机械阀门（舌型阀）
	风扇
	水泵
	销，铰链
	压力调节器
	继电器传感器
	传感器（不可移动件），PSS, 温度，RVDT, LVDT
1.4	轴承
	热交换器
	枢轴销（齿轮）
	滚轴（高载荷-襟翼）
1.5	压缩机定子
	电流接触器（高电压）
	旋转开关控制面板
	门电缆
	飞行电缆（未暴露在外面的）
	液压活塞致动器
	门机构
	扇形齿轮
	静电放电器
1.8	安全带卷轴
	空速管
	轮
	约束带
2	滚珠螺旋致动器
	带扣


[0144]


	排气喷口
	飞行电缆（暴露在外的）
	液压活塞致动器
	启动马达
	平移整流罩轨道尼龙滑块
2.1	刹车片
2.2	弹性驱动器
	变速箱
	锁装配（钩状）
	空气循环机
2.5	轴承
	压气机转子
	风扇叶片
2.75	货舱隔网


[0145] 实施例2：本例是将本发明应用于庞巴迪新研制飞机 CSeries 应急灯系统，使用了 CSeries 直接维修成本分析，可维修性分析，可靠性分析等数据作为输入。其计算方法与实施例1相同，区别在于具体参数设置不同。

[0146]  MSI（维修重要项）：应急灯系统；


[0147]  选择部件：应急灯及标识；


[0148]  任务描述：应急灯系统操作性检查；


[0149]  任务类别：8；

[0150]  安全级别：伤害（Injury）；

[0151]  MTBF：103018FH，

[0152]  额外失效：1.0E+5；

[0153]  损耗因子  $\beta$ ：1.0；

[0154]  任务费用：

[0155] ● GSE：0；

[0156] ● 人力工时：0.15 小时

[0157] ● 材料 / 耗材：0

[0158] ● 执行人数：1

[0159]  失效费用

[0160] ● 修理费用：460

[0161] ● 工时：0.3 小时

[0162] ● 航班延误：是，造成损失 15000\$；

[0163] ● 航班取消：否；

[0164] ● 转飞：否；

[0165] ● 时间间隔调整值：50000

[0166] ● 材料 / 耗材：0；

[0167] ● 停飞天数：0。

[0168] ●  $C_p = 75\$$ ,  $C_f = 65478\$$ . 本例计算结果如图 6、图 7 所示。

[0169] 分析结论

[0170] ●时间间隔推荐范围 :2200FH—5500FH ;

[0171] ●安全性考虑值 :10500FH ;

[0172] ●由于应急系统不是常规使用项目,所以使用日历年作为定检单位较为合适。

[0173] ●供应商推荐值 :C&D Zodiac 推荐 2 年检查电池单元,Goodrich 推荐 8500FH 检查应急灯。

[0174] ●C 系列通过其他计算及判断最终选择 2 年作为该任务的时间间隔。


[0175] 按照 C Series 直接维修成本计算中的假设,一年平均近似为 2500FH,2 年即 5000FH,该值在本发明推荐的时间间隔范围内。


[0176] 通过实施例 1、2 对比分析可以看出,完全基于行业经验或者工程判断得出的系统维修任务时间间隔经常存在不合理现象。例如早期研制的 CRJ 与新研制的 C Series 相比,在部件 MTBF、修理价格、人力工时、失效后对飞机产生的经济影响等各方面相差不多的情况下,相同任务的维修时间间隔就显得过于保守,造成维修过剩。


[0177] 实施例 3 :本例与实施例 1 的不同之处在于 :任务类别是显性类别第 6 类


[0178] 例如 :

[0179]  MSI ( 维修重要项 ) :CRJ 升降舵 ;


[0180]  选择部件 :升降舵操纵钢索 ;


[0181]  任务描述 :升降舵操纵钢索功能性检查 ;

[0182]  任务类别 :6 ;

[0183]  安全级别 :其他 ;

[0184]  MTBF :30000 ;

[0185]  额外失效 :不适用 ;

[0186]  损耗因子  $\beta$  :2.2 ;

[0187]  任务费用 :

[0188] ●GSE:0 ;

[0189] ●人力工时 :4 小时

[0190] ●材料 / 耗材 :0

[0191] ●执行人数 :1

[0192]  失效费用

[0193] ●修理费用 :500\$

[0194] ●工时 :3 小时

[0195] ●航班延误 :否 ;

[0196] ●航班取消 :是损失 30000\$ ;

[0197] ●转飞 :否 ;

[0198] ●时间间隔调整值 :5000

[0199] ●材料 / 耗材 :0 ;

[0200] ●停飞天数 :0。

[0201] ●确定任务总费用  $C_p = 240\$$  :失效总费用  $C_f = 35680\$$

[0202] 采用经济性算法确定维修间隔时间,所述经济性算法如下 :



[0203] 确定  $[0, T]$  时间内的平均失效率

$$[0204] \quad \overline{\lambda(T)} = \frac{\int_0^T \lambda(t) dt}{T} = \frac{1}{\eta} \left( \frac{T}{\eta} \right)^{\beta-1}, T > 0 \quad (1)$$

[0205] 优化目标是通过求下式

$$[0206] \quad C(T) = \frac{C_f T \overline{\lambda(T)} + C_p}{T} = C_f \overline{\lambda(T)} + \frac{C_p}{T} \quad (2)$$

[0207] 的极小值确定最优维修时间间隔  $T^*$ ; 其中:  $C(T)$  表示费用总和,  $C_f$  表示部件失效所产生的费用,  $C_p$  为对该部件执行预防性维修任务的费用,  $\eta$  为尺寸参数,  $\beta$  为形状参数,

[0208] 对上式 (2) 求导, 并令  $dC(T)/dT = 0$  得

$$[0209] \quad (\beta-1) \left( \frac{T}{\eta} \right)^{\beta} = \frac{C_p}{C_f} \quad (3)$$

[0210] 若  $\beta = 1$ , 则  $T^* = \infty$ , 即: 没有必要进行定时维修, 让部件一直工作到故障后才做维修; 若  $\beta > 1$ , 则存在唯一的有限最优解  $T^*$ , 它满足


$$[0211] \quad T^* = \eta \left( \frac{C_p}{(\beta-1)C_f} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$


[0212] 且最小费用为  $C(T^*)$ ;


[0213] 通过图解法, 令  $C_1(T) = \frac{C_p}{T}$ ,  $C_2(T) = C_f \overline{\lambda(T)}$ , 则  $C(T) = C_1(t) + C_2(t)$ , 最低成本的 110% 处的  $T$  值分布在最低成本处的  $T$  值  $T^*$  的两边, 定义为  $T_a$  及  $T_b$ , 选择维修时间间隔范围为  $[T_a, T_b]$ , 如图 9 所示。


[0214] 通过计算推荐的时间间隔范围为: 2300FH—4800FH, 实际服役中 CRJ 飞机该任务的时间间隔为 4000FH, 该值落在本发明推荐的时间间隔范围内。


[0215] 实施例 4: 本例与实施例 1 的不同之处在于: 任务类别是显性类别第 9 类, 不需要利用安全门槛对其约束。

[0216]  MSI (维修重要项): C 系列飞机静电放电系统;


[0217]  选择部件: 静电放电器;


[0218]  任务描述: 静电放电器功能性检查;

[0219]  任务类别: 9;

[0220]  安全级别: 其他;


[0221]  MTBF: 100000;


[0222]  额外失效: 100000;

[0223]  损耗因子  $\beta$ : 1.5;

[0224]  任务费用:

[0225]  GSE: 0;

[0226]  人力工时: 2 小时

[0227]  材料 / 耗材: 0

[0228] ●执行人数 :1

[0229] ●失效费用

[0230] ●修理费用 :500\$

[0231] ●工时 :1 小时

[0232] ●航班延误 :是 ;损失 15000\$

[0233] ●航班取消 :否 ;

[0234] ●转飞 :否 ;

[0235] ●时间间隔调整值 :5000

[0236] ●材料 / 耗材 :0 ;

[0237] ●停飞天数 :0。

[0238] ●确定任务总费用  $C_p = 120\$$  :失效总费用  $C_f = 20560\$$

[0239] 如图 10 所示,通过计算推荐的时间间隔范围为 :7000FH—13000FH, C 系列飞机该任务的维修时间间隔最终确定在 8500FH,该值落在本发明推荐的时间间隔范围内。

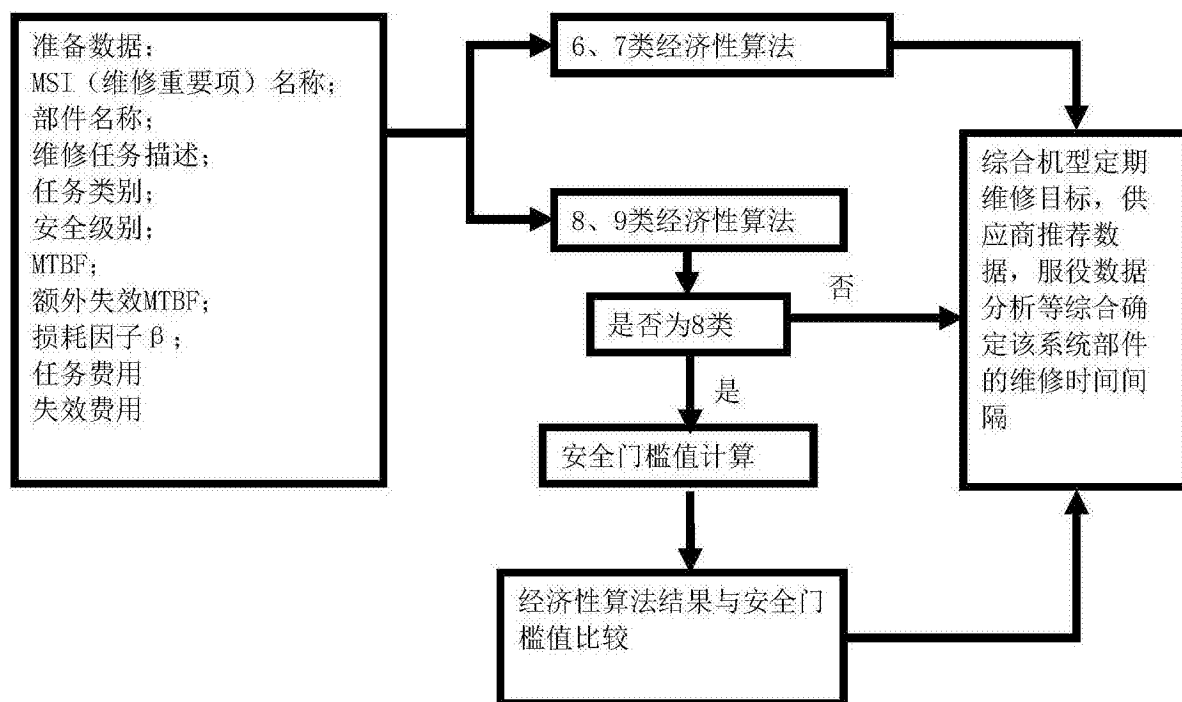


图 1

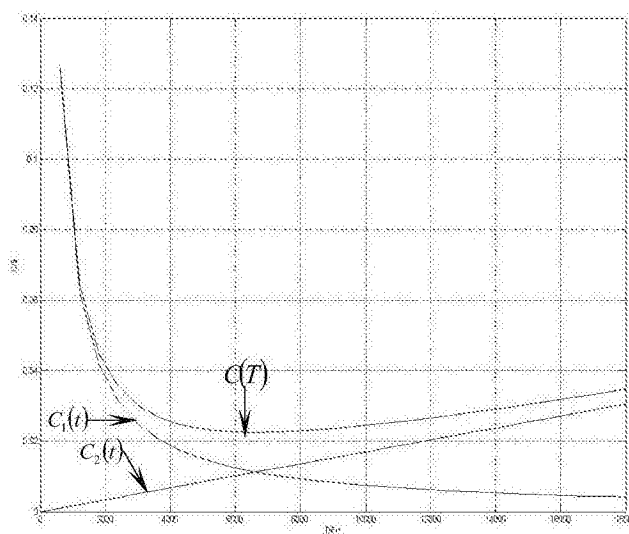


图 2

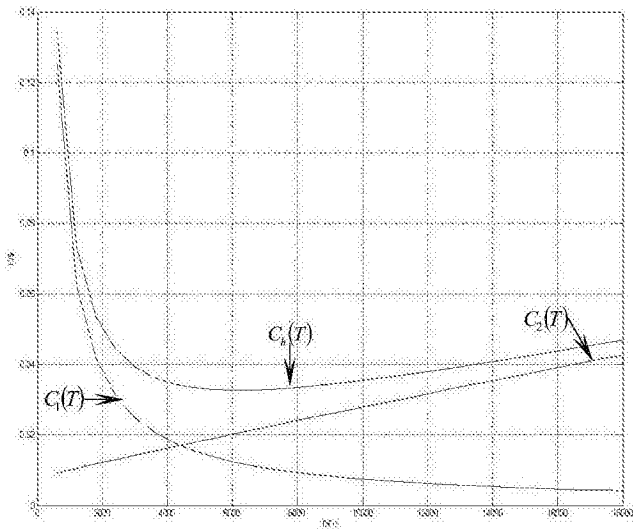


图 3

第8、9类									
5	146	500	0.20664	0.160	0.204	0.15	0.15	0.15	0.15
5	200	1000	0.31324	0.260	0.308	0.275	0.275	0.275	0.275
5	306	1500	0.41960	0.368	0.413	0.383	0.383	0.383	0.383
5	408	2000	0.52521	0.461	0.517	0.475	0.475	0.475	0.475
5	508	2500	0.63276	0.557	0.621	0.573	0.573	0.573	0.573
5	606	3000	0.73821	0.657	0.728	0.675	0.675	0.675	0.675
5	700	3500	0.84559	0.757	0.836	0.782	0.782	0.782	0.782
5	806	4000	0.95194	0.859	0.934	0.887	0.887	0.887	0.887
5	908	4500	0.95824	0.961	0.938	0.928	0.928	0.928	0.928
5	1006	5000	0.96448	0.963	0.942	0.932	0.932	0.932	0.932
5	1100	5500	0.97071	0.968	0.948	0.938	0.938	0.938	0.938
5	1200	6000	0.97688	0.969	0.950	0.940	0.940	0.940	0.940
5	1300	6500	0.98302	0.972	0.954	0.944	0.944	0.944	0.944
5	1406	7000	0.98911	0.975	0.958	0.947	0.947	0.947	0.947
5	1500	7500	0.99516	0.978	0.962	0.951	0.951	0.951	0.951

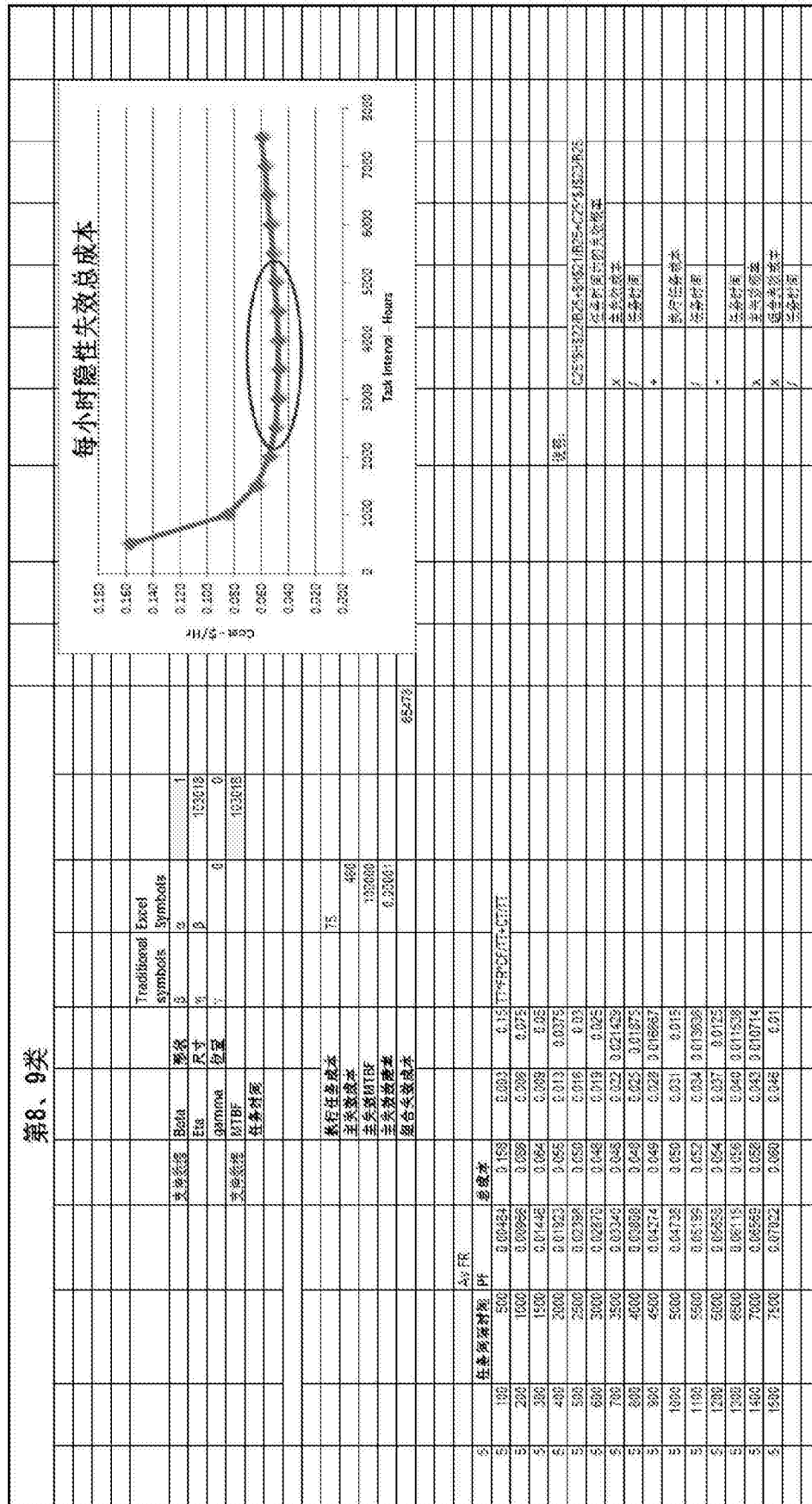
每小时隐性失效总成本

Task Interval - Hours

Task Interval - Hours	Cost - Y/Hr
0	0.160
1000	0.204
2000	0.308
3000	0.413
4000	0.517
5000	0.621
6000	0.728
7000	0.836
8000	0.934
9000	0.938
10000	0.942
11000	0.948
12000	0.954
13000	0.958
14000	0.962
15000	0.968

图 4





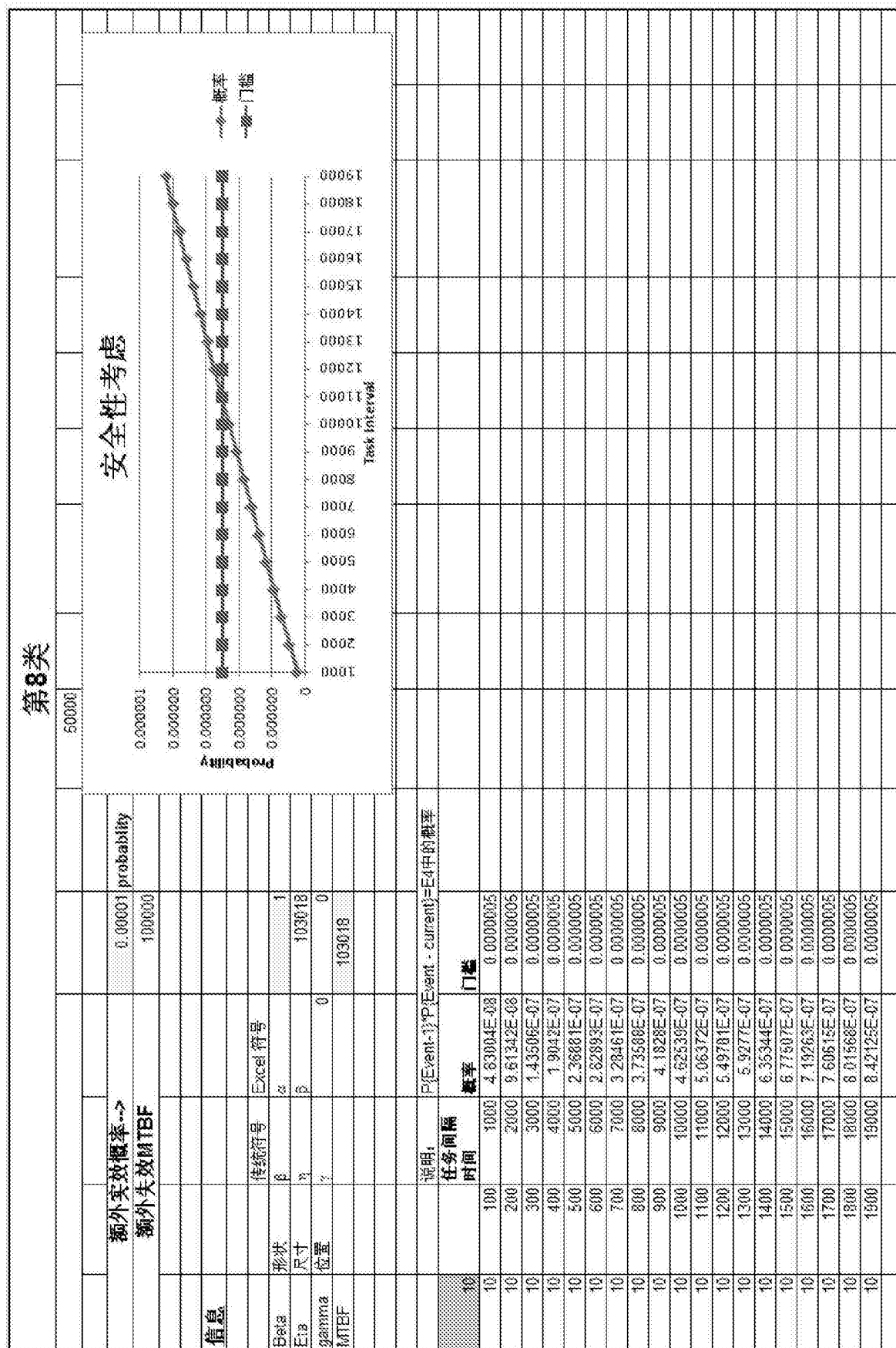


图 7



失效状态严重性分类		没有安全性影响 No Safety Effect	较小的Minor	重大的Major	危险的/及重大的 Hazardous	灾难性的 Catastrophic
失效状态 影响	飞机	无安全影响	轻微降低安全余度和功能	明显降低安全余度和功能	大幅降低安全余度和功能	机体受到损害
	机组人员	无影响	轻微增加工作量，例如日常飞行计划变更	明显增加工作量，或严重影响机组人员的工作效率	轻微增加工作量，例如日常飞行计划变更	致命
	乘客或客舱乘务人员	无影响	身体不适	身体痛苦，甚至受伤	相对少部分人产生严重或致命的伤害	大多数致命
概率要求		无要求	可能Probable	不可能Improbable		
				较小可能的 Remote	极小可能的 Extremely Remote	极不可能的 Extremely Improbable
定性概率描述		无要求	在每架飞机是安全寿命期内会发生一次或几次	很多飞机的安全寿命期内发生几次	在单架飞机的全寿命期内预计不会发生，但是对于同类型所有飞机的全寿命期而言会发生数次	在某种类型所有飞机的总运行寿命期内预计都不会发生
定量概率		无要求	$<10E-3$	$<10E-5$	$<10E-7$	$<10E-9$

图 8

Task Duration - Hours	Cost - \$/hr
1000	0.15
2000	0.16
3000	0.17
4000	0.18
5000	0.19
6000	0.20
7000	0.21
8000	0.24

图 9

[illegible]

图 10