

## 飞行系统中人的可靠性评估

戴光亚

(西北工业大学 604 教研室, 西安, 710072)

### HUMAN RELIABILITY ANALYSIS IN AUTOMATIC AVIATION SYSTEMS

Dai Guang-ya

(Faculty 604 of Northwestern Polytechnical University, xi'an, 710072)

**摘要** 人的可靠性是个非常活跃的研究领域。本文从航空事件的历史数据出发,论证了飞行系统中人员失误率评估的重要性和迫切性。综述了近年来国内外人的可靠性分析的方法和模型,它们是 HCR, CSE, NRC, TESEO, SLIM 和灰色模型;评述了各种模型的适用条件及优劣,特别是文中提出的灰色模型将是人员失误率评估中最为有效的方法。同时也为飞行系统的系统配置、座舱资源管理等提出了新的设计考虑因素。

**关键词** 人员失误, 概率风险评估, 可靠性分析

**Abstract** The quantification of human reliability is an active and frequently controversial research area. The increasing role that the probabilistic safety assessment is playing in the regulation of aviation systems has led to the need for the development of models that produce probabilistics for human error rates, which is obvious in historical aviation accident data listed in this paper. The present paper critically reviews the recently developed models for assessing human error rates under accidental conditions. It covers the following models and methods: the human cognitive reliability model (HCR), cognitive sub-element model (CSE), nuclear regulatory commission handbook model (NRC), the technical empirica stima errori operatori (TESEO), success likelihood index methodology (SLIM) and the grey model. Suitable conditions, advantages and disadvantages of the models and methods are briefly discussed. In particular, the grey model which can deal with various man-machine environment and human reliability is considered to be the most powerful method to assess human reliability. In the meantime, this paper puts forward the new aspects that must be considered in systems reliability assignment and supervision of cockpit equipment.

**Key words** human error, probabilistic risk assessment, reliability analysis

机载电子设备迅速走向综合化,使飞行进入全面的自动化。但在实际系统中,完成任务仍要求人的正确操作。在当代的先进飞机上,对于人在飞行自动化大系统中的位置问题还没有给予很好的研究和解决。这已经在许多事故和事故征兆中表现出来。在航空航天系统中,人要对 60%~70%<sup>[1]</sup>的故障负责;电子设备中,50%~70%<sup>[1]</sup>的故障是直接或间接地由人员失误引起;据西德汉莎航空公司研究人员对 1959 年~1989 年的 30 年间空难事故统计发现,驾驶员操纵失误占飞机失事原因的 76%。美国 NASA 报告在 1984 年发表

1991 年 1 月 29 日收到,1991 年 7 月 28 日收到修改稿

的事故统计报表, 通过对各类控制室人员 (含驾驶员) 22226 份事故统计资料系统分析, 人员失误占事故比例 80% 以上。表 1 示出了英美两国空军对飞行事故原因分析的结果。表 2 为有关严重飞行事故原因的分类统计结果。从表 1、表 2 可以看出, 人员失误 (飞行人员操纵失误和地面指挥人员指挥不当) 占事故百分比之和约占 51%~71%。从广义的角度看, 人的维修不善和失误也是“维护不良”的主要原因之一。所谓人员失误是指人在操纵、维修中使系统发生故障或机能不良的事件, 是违背设计和操作规程的错误行为; 人的可靠性指的是人在规定的时间内、在规定的条件下, 完成任务的概率。显然, 人的可靠性对于人一机系统的可靠性具有显著的影响, 必须将人的因素纳入整个系统中加以研究。因此, 自 H.L.Williams 在 1958 年首次提出人的可靠性这一概念开始, 有许多学者从事该方面的研究, 涌现出许多人员失误率评估的方法和模型。但是, 目前人员失误率的评估, 在很大程度上仍依赖于人工判断, 真正客观合理的人可靠性数学模型仍在探索之中, 这里仍就近年来的有关成果进行归纳。

表 1 英、美空军飞行事故原因统计<sup>[2]</sup>

飞行事故原因分类	各种故障所占的百分比(%)	
	美国	英国
飞行操纵错误	30	58
指挥不当	21	9
维护不良	9	4
器材缺陷	39	16
其它勤务		3
原因不明	1	10

表 2<sup>[2]</sup>

原因分类 百分比 (%) 年代	飞行操纵错误	组织指挥不当	机械责任	原因不明	其它勤务 (气象、场务等)	偶然意外 (鸟撞、战损等)
50 年代	67.52	6.93	18.4	5.41	1.3	0.43
60 年代	61.66	6.74	27.46	1.55	—	2.59
70 年代	52.21	15.88	27.53	3.12	1.3	0.26
30 年平均	60.77	10.10	23.46	3.85	1.06	0.77

## 1 人员失误的评估方法

### 1.1 HCR 模型

HCR (The Human Cognitive Reliability Model) 模型是计算在某一个理性处理类型  $j$  (规则、技巧、知识基的处理类型) 中的时间算子和操作员响应概率的参数模型。此模型假设对某一特定类型下, 操作员失误概率与时间的关系呈威布尔分布

$$P(t) = \exp \left\{ - \left[ \frac{(t / T_{v_2}) - C_{rj}}{C_{\eta j}} \right]^{p_j} \right\} \quad (1)$$

这里,  $t$  是完成动作的实际时间;  $T_{v_2}$  是性能因子  $K_j$  修正后完成动作的平均时间;  $\beta_j$  是 HCR 模型参数;  $C_r$  是时间延迟参数;  $c_{\eta}$  是刻度参数。  $\beta$ 、 $c_r$ 、 $c_{\eta}$  均与处理类型  $j$  相关。HCR 不能直接用于每步时间界限未知的测试过程。解决方法是设置公式中  $t$  为每步最大时间间隔。

HCR 参数可以通过飞行系统人员失误数据库估计得到, 而这些数据又可以从历史事件、模拟过程或其它特殊测试中获得。

HCR 模型使用方便, 但由于模型参数并非精确已知, 所以它受系数波动的影响太

大；而且处理类型之间的影响和造成事故的时间波动却未考虑。在估计参数值时采用的模拟方法与实际情况不一定相符。甚至同一个人在实际事故中的响应也异于模拟器的响应。换句话说，在模拟实验中，人员更趋于作动作，因为失误的结果并不造成严重损失。

1.2 CSE 模型

HCR 是一个整体模型，即所有的性能因素都可能影响模型，它对模拟数据要求很高，但对小概率事件（如  $10^{-4}$ ），实验模拟很难实现，因而，就必须把一个事件分解成许多子事件，这就是 CSE (Cognitive Sub-Element) 所起的作用。CSE 模型包括一个具体的逻辑表达式，利用该表达式，可以从实际模拟事件中收集数据。它允许操作员从起始不合适的事件进程中恢复。图 1 称为 CSE 图解模型。图中， $1-P_i$  为“思维”模式概率，即需要知识水平处理的认识； $P_i$  为“非思维”模式概率； $1-P_{m_x}$  为判断或动作选择正确的概率。

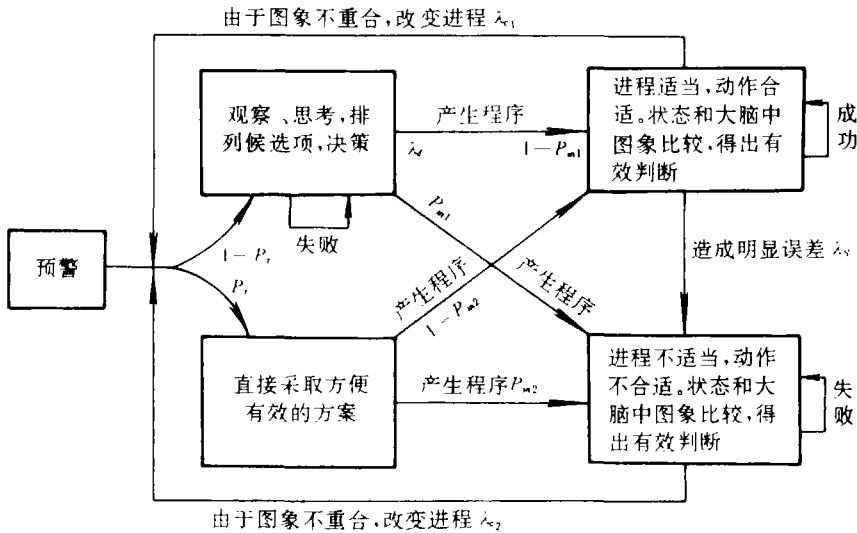


图 1 操作者状态和动作 CSE 图解表达式

首先，必须对参数调整以观察前馈或反馈概率  $P_i$  和状态转换率  $\lambda_i$  的变化效果。调整后的参数值必须与历史事件吻合。曲线与 HCR 曲线类似但带有拐点，初步量化表明 CSE 能够描述影响曲线拐点的因素。例如：如果操作人员有许多选择方案，曲线拐点可能降低，而对有限选择，曲线表明失误率升高。影响拐点的另一个因素是反馈到操作者的信息量，它也影响反馈通路特性。

CSE 模型常用作人员可靠性实验。它与 HCR 配合解决了人员失误率很小的可靠性模拟问题。

1.3 NRC 模型

设  $T_A$  为有效工作时间（千万核心部件损坏之前的时间）； $T$  为人员判断环境、正确动作所需的时间。由于  $T_A$  和  $T$  都是随机变量。则人员失误率  $r$  就可表达为  $T > T_A$  的时间部分

$$r = f_r(T > T_A) = \int_0^{\infty} f_{T_A}(t)[1 - f_T(t)]dt \tag{2}$$

这里  $f_{T_A}(t)$  是随机变量  $T_A$  的概率密度函数， $F_T(t)$  是随机变量  $T$  的总概率分布。

在 NRC(Nuclear Regulatory Commission Handbook Model)模型中， $T_A$  是已知的，

则式(2)中的密度函数 $f_{T_A}(t)$ 是个 $\delta$ 函数, 即 $f_{T_A}(t) = \delta(t - T_A)$ , 此时式(2)变成

$$r = 1 - F_T(T_A) \quad (3)$$

$F_T(T_A)$ 为在点 $T_A$ 随机变量 $T$ 的总概率分布值。NRC 是估计 $T$ 的随机分布和 $T > T_A$ 的时间数, 以手册或图表形式给出。与 $r$ 有关的知识状态的波动由一族曲线(上限、均值和下限)表示。NRC 模型依赖于作者的主观判断, 所以又称该模型为“推测”模型。

NRC 表明, 一般操作者对其完成一定动作所需要的时间估计得较乐观, 特别是这些时间是由操作人员估计得出, 其误差可达两倍。

#### 1.4 TESEO 方法

TESEO (The Technica Empirica Stima Errori Operatori) 是一个简单的参数模型。

动作失误概率由下式计算

$$P_{\text{TESEO}} = \alpha\beta\gamma\delta\eta \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  是动作类型因数;  $\beta$  是瞬态应力数, 与执行动作所需的时间有关;  $\gamma$  是操作者类型因数;  $\delta$  是动作忧虑因数, 与动作的紧急程度所带来的应力有关;  $\eta$  是人-机环境因数。对操作员完成一特定任务, 各因数的取值为确定值。详细取值方法参阅文献[6]。TESEO 方法未考虑动作之间的相关性。

TESEO 方法非常简单, 但很粗糙, 且结果依赖于对诸如人-机界面质量等抽象因素的主观判断。

#### 1.5 SLIM 模型

与被视为经典法的 THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) 方法相反, SLIM(Success Likelihood Index Methodology)不需要将一个任务分解成几个基本动作, 因此, 在 THERP 中关键数据缺乏问题就减少了。假定人工判断能够估计每个给定权 $W_i$ ( $\sum_{i=1}^N W_i = 1$ ,  $N$  是影响性能因素 PSF 个数, 按最重要的 PSF 赋最大的 $W_i$ 值)的 PSF $_i$ 的相对重要性, 给出一个比率 $r_i$ 评价被测任务的 PSF $_i$ 的优劣( $0 < r_i < 100$ , 0 对应 PSF 相关的最差条件, 100 是最好条件, 相互之间独立), 这样可得出成功性指标 SLI

$$\text{SLI} = \sum_{i=1}^N W_i r_i \quad 0 \leq r_i \leq 100 \quad (5)$$

这里, SLI 越大, 成功的概率 $P_s$ 越大;  $P_s$ 与 PSF 之间的关系应是单调递增函数 $P_s(\text{SLI})$ 。对 $\text{SLI} = 0$ ,  $P_s(0)$ 相对于最坏情况,  $P_s(100)$ 相对于最理想的情况, 通常有 $0 < P_s(\text{SLI}) < 1$ 。

为了获得 $P_s$ 的数值, 采用如下校正模型

$$\log(P_s) = a\text{SLI} + b \quad (6)$$

对渐近性分析, 校正后的对数模型为

$$\log\left(\frac{1}{P_s} - 1\right) = \log(a) + b\text{SLI} \quad (7)$$

#### 1.6 灰色模型

由于要在不同选型的方案中找出失误最小、最可信赖的目标形式十分困难, 因此, 可以借助于灰色隶属函数来表征灰色约束条件及评断结果。在人为多目标决策强调效益时,

若 $x_0 \in x$ , 则使 $\max_{\substack{x_j \in x \\ j=1 \\ j=n}} \sum_{j=1}^n \mu G_j(x_j) w_j$ , 该式表明在 $n$ 个灰目标中,  $x_0$  是单从效益出发考虑的

理想对策:  $G_j$  表示第  $j$  个灰目标;  $w_j$  为第  $j$  个灰目标的权, 若权衡可靠性优化对策时, 其算式又表为

$$Q(x_i) = \lambda \sum_{j=1}^n \mu G_j(x_i) w_j - (1 - \lambda) \sum_{i=1}^m \mu \beta_i(x_i) W_j P_j \quad (8)$$

式中,  $Q$  是综合评判的隶属函数;  $x_i$  表示单从预防失误后果方面考虑的理想策略, 其故障风险后果共有  $m$  个;  $\beta_i$  表示第  $j$  个不良后果。

为了对人的模糊性予以描述, 可假定误差、误差变化率、控制量输出 3 个领域中分别有 7 个模糊集合, 即正大、正中、正小、零、负大、负中、负小等模糊概念。根据人的生理特点, 人对事物的判断是遵循正态分布的, 所以输入量都是正态型灰色变量, 再假定人对正、负信号的判断对称, 即可得灰色变量的隶属函数、推理规则表。

由于人的状态不能用确定的方法有效地表达, 因此对于人员失误这个状态多变, 以思维活动为主的非白色系统, 笔者认为建立其灰色模型将是一种适应范围宽而又行之有效的办法。

## 2 结论

人员失误率评估模型大致可分为两类: 一是以时间为主的模型, 主要是观察给定环境下设备操作者成功或失败的概率与时间的关系, 如 HCR、NRC 和 CSE; 以失误率为主的模型是通过分析影响操作者成功或失败的各种性能形成因素, 从而导出人员失误率, 如 SLIM, TESEO 和灰色模型。

此外, 影响人的行为还与其生理周期有关, 如德国医生弗里斯著名的人体功能三节律论 (体力、情绪和智力周期), 准确地预测生物节律, 避开“危险日”, 也是提高人可靠性的重要措施。

由于人的失误引起的损失很大, 特别是对航空、航天系统中, 往往会造成机毁人亡等灾难性事故。因此, 在飞行系统的系统配置、座舱资源管理等设计中, 必须要考虑人的可靠性问题。

## 参 考 文 献

- 1 Christensen J M, Howard J M. Field Experience in Maintenance. In: Rasmussen J, Rouse W B eds. Human Detection and Diagnosis of System Failures, 1981: Plenum Press, New York, 111~133
- 2 杨一民, 盛一兴. 系统可靠性数字仿真. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990; 252~288
- 3 Hannaman G W, Spurgin A J, Lukic Y D. Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis. Draft Report NUS-4531, EPRI Project RP2170-3, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1984
- 4 Hannaman G W, Worledge D H. Some Developments in Human Reliability Analysis Approaches and Tools. Reliability Engineering and System Safety, 1988; 22: (2) 235~256
- 5 Swain A D, Guttman H E. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Applications, NUREG/CR-1278, US Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C., 1983
- 6 Bello G C, Colombari V. The human factors in Risk Analyses of Process Plants: the Control Room Operator Model TESEO. Reliability Engineering, 1980; 1:(1)3~14
- 7 Vestrucci P. The Logistic Model for Assessing Human Error Probabilities Using the SLIM Method. Reliability Engineering and System Safety, 1988; 21:(2)189~196