

飞行事故的一种自适应模糊神经网络 预测方法研究^{*}

甘旭升 张洪才 程咏梅 熊先哲

(西北工业大学自动化学院, 西安 710072)

摘要 飞行事故预测对于预防飞行事故具有十分重要的意义. 首先系统分析了空军飞行事故的主要影响因素, 对其中的定性因素进行了量化; 然后利用系统分析的成果和历史统计数据建立了空军飞行事故的自适应模糊神经网络预测模型. 整个预测过程突破了纯数学模型预测的局限性, 实现了预测的定性和定量的结合; 由于预测中使用了一种基于高木-关野模糊模型的自适应模糊神经网络, 从而使预测模型具有很强的自适应能力, 预测结果也比较令人满意.

关键词 飞行事故, 模糊系统, 神经网络, 层次分析法.

MR(2000) 主题分类号 90B10, 90C70, 90C90

1 引言

飞行事故预测是预防飞行事故的有效途径之一. 对飞行事故进行准确、可靠的预测, 定量描述出安全形势今后的演变情况, 为空军首长和机关做出正确决策提供可靠的分析基础, 并直接为空军飞行安全管理服务, 具有十分重要的意义.

目前关于飞行事故预测方面的文献资料非常少, 具有代表性的有: 美国前航空航天安全处主任 Morgen R W 发表了《美国空军 1986 年严重飞行事故预测》的文章, 采用的是指数平滑预测法; 空军指挥学院的徐邦年教授于 1987 年用灰色模型来预测空军的严重飞行事故的时间序列, 开创了我国飞行事故定量预测的先河. 另外, 空军工程大学在飞行事故时间序列的灰色组合预测方面也做了大量有益的尝试和探索^[1].

通过对空军飞行事故的历史资料和数据研究和分析发现: 人、装备、环境和管理、费用投入和飞行时间等是影响飞行事故的最主要因素, 以往采用较多的时间序列预测方法, 对飞行事故预测的能力非常有限. 原因是: 1) 人、装备、环境和管理等定性因素难以在模型中体现出来; 2) 对飞行事故历史数据的突变点和转折点难以拟合; 3) 不能将数据分析中总结出来的经验以及专家对将来的预见加入模型中^[2].

本文从相关分析法的思想出发, 利用一种自适应能力较强的模糊神经网络, 建立了空军飞行事故的预测模型. 该预测模型克服了常规模糊预测模型比较粗糙、建模过程复杂、人为

* 空军资助项目.

收稿日期: 2005-11-22, 收到修改稿日期: 2006-06-21.

因素过多等缺点,不但能修正模糊子集的隶属函数,而且能实现模糊规则的自动更新,使模型更具合理性.建模的基本步骤:首先进行系统分析确定预测模型的输入量;然后根据输入和输出的历史数据(其中包含有人的经验总结)确定系统的特性;最后在系统特性作用下,做出一定输入条件下(对未来情况有若干设定)的预测.

2 空军飞行事故影响因素的系统分析

通过对有关资料的分析,结合所掌握的空军飞行安全历史统计数据,并进行广泛的部队调研和征询专家意见,确定了空军飞行事故的影响因素^[3-5].

1)发生的空军飞行事故中,影响因素多种多样,从系统角度来说,大致可以分为人、装备、环境和管理因素四大类,其中人的因素占大部分,装备因素次之,环境和管理因素所占比例较小.实际上大部分飞行事故可能既有人因素,又有装备因素,可能也有环境和管理因素.

2)每年费用的投入对于飞行事故的影响是潜移默化的,它的效果主要通过人、机、环境和管理延期表现出来,但与它们又不是一个层面,以往的有关研究中并没有将其考虑进去,显然是不严谨的.

3)空军每年总的飞行训练时间对飞行事故起数的影响也是显而易见的.

3 自适应模糊神经网络

3.1 高木 - 关野模糊系统

设系统的模糊模型由高木 - 关野模型来描述,即由以下形式的模糊隐含规则组成^[6-7]

$$R^i: \text{if } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_n \text{ is } A_n^i, \text{ then } y^i = q_0^i + q_1^i x_1 + \dots + q_n^i x_n, \quad (1)$$

式(1)中 A_j^i 为模糊集, q_j^i 为真值参数, y^i 为系统根据 R^i 所得的输出, $i=1,2,\dots,m$.模型中“if”(前件)部分是模糊的,但其“then”(后件)部分是确定的,即输出为各输入变量的线性组合.对于一个真值输入向量 $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$,该模糊系统的输出 Y 等于 y^i 的加权平均

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^m w^i y^i}{\sum_{i=1}^m w^i} = \frac{\sum_{i=1}^m [(\mu_{A_1^i}(x_1) \cdot \mu_{A_2^i}(x_2) \cdot \dots \cdot \mu_{A_n^i}(x_n))(q_0^i + q_1^i x_1 + \dots + q_n^i x_n)]}{\sum_{i=1}^m [\mu_{A_1^i}(x_1) \cdot \mu_{A_2^i}(x_2) \cdot \dots \cdot \mu_{A_n^i}(x_n)]}, \quad (2)$$

式中加权系数 w^i 包括了规则 R^i 作用于输入所取得的所有真值, w^i 的计算公式如下

$$W^i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j). \quad (3)$$

3.2 pi-sigma 神经网络

模糊神经网络预测是近些年来基于模糊集理论发展起来的一种新的预测方法,它是研究仿真预测的一种新技术.本文引入一种高木 - 关野模糊系统和 pi-sigma 神经网络的混合型

网络模型^[8-11], 如图 1 所示. 这种模型不但实现了模糊预测模型的自动更新, 而且能不断修正各模糊子集的隶属函数, 从而克服了模糊预测过分依赖隶属函数精确性的缺点.

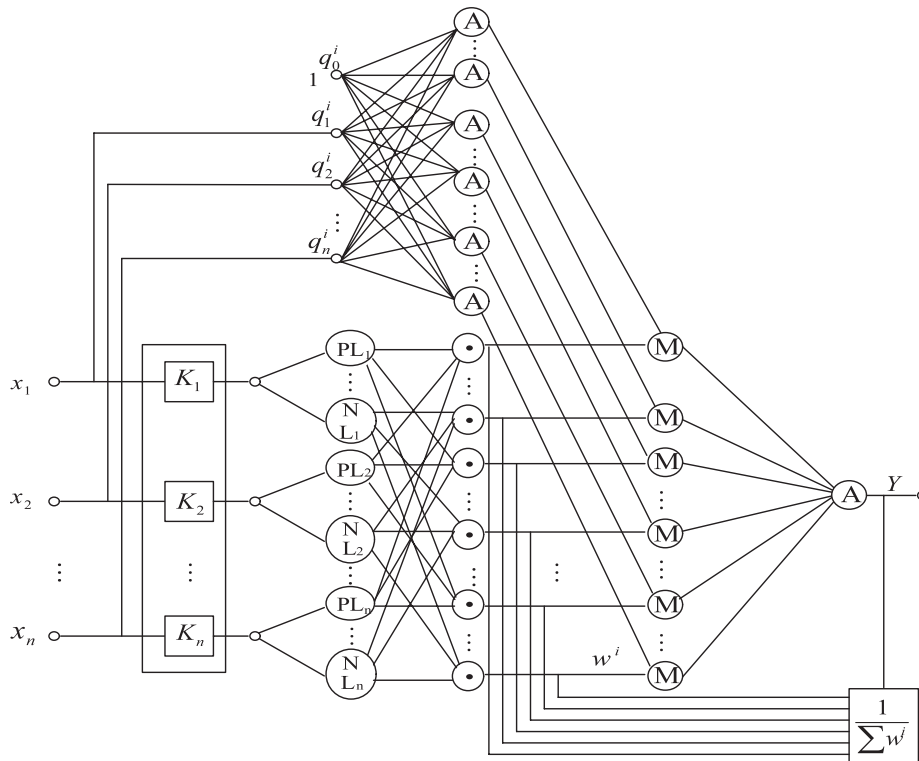


图 1 混合型模糊神经网络

网络中, A, M 和 \cdot 分别表示相加、相乘和相乘运算. 由网络的结构可知网络的输出为式 (2) 所示. 很明显, 用这种网络实现的模糊型辨识, 可方便地在线修正前件参数 (隶属函数) 和后件参数 (模糊规则), 使模糊建模更具合理性, 很适合于复杂系统的模糊预测. 为了方便神经网络的学习, 各模糊子集的隶属函数均取高斯型, 即

$$\mu_{A_j^i} = \exp[-(x_j - c_j^i)^2 / d_j^i]. \quad (4)$$

3.3 学习算法

本算法采用 BP 算法, 设期望输出为 Yd , 定义目标函数

$$J = \frac{1}{2}(Yd - Y)^2 = \frac{1}{2}\delta^2, \quad (5)$$

$$\frac{\partial J}{\partial Y} = -(Yd - Y) = -\delta. \quad (6)$$

1) 前件参数 (c_j^i 和 d_j^i) 修正采用梯度法, 则有

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial c_j^i} &= \frac{\partial J}{\partial Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial c_j^i} = \frac{\partial J}{\partial Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial w_j^i} \cdot \frac{\partial w^i}{\partial c_j^i} \\ &= -\delta \cdot \frac{y^i \sum_{i=1}^m w^i - \sum_{i=1}^m (w^i y^i)}{\left(\sum_{i=1}^m w^i\right)^2} \cdot 2(x_j - c_j^i) \frac{w^i}{d_j^i},\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial d_j^i} &= \frac{\partial J}{\partial Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial d_j^i} = \frac{\partial J}{\partial Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial w_j^i} \cdot \frac{\partial w^i}{\partial d_j^i} \\ &= -\delta \cdot \frac{y^i \sum_{i=1}^m w^i - \sum_{i=1}^m (w^i y^i)}{\left(\sum_{i=1}^m w^i\right)^2} \cdot (x_j - c_j^i)^2 \frac{w^i}{(d_j^i)^2},\end{aligned}\quad (8)$$

因此有

$$\begin{aligned}c_j^i(k+1) &= c_j^i(k) - \alpha \frac{\partial J}{\partial c_j^i} \\ &= c_j^i(k) + \alpha \cdot \delta \cdot \left[y^i \sum_{i=1}^m w^i - \sum_{i=1}^m (w^i y^i) \right] \cdot 2(x_j - c_j^i) \frac{w^i}{\left(\sum_{i=1}^m w^i\right)^2 d_j^i},\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}d_j^i(k+1) &= d_j^i(k) - \beta \frac{\partial J}{\partial d_j^i} \\ &= d_j^i(k) + \beta \cdot \delta \cdot \left[y^i \sum_{i=1}^m w^i - \sum_{i=1}^m (w^i y^i) \right] \cdot (x_j - c_j^i)^2 \frac{w^i}{\left(\sum_{i=1}^m w^i\right)^2 d_j^i},\end{aligned}\quad (10)$$

式中 α 和 β 为学习效率, $0 < \alpha \leq 1, 0 < \beta \leq 1$.

2) 后件参数 (q_j^i) 修正

采用梯度法, 则有

$$\frac{\partial J}{\partial q_j^i} = \frac{\partial J}{\partial Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial q_j^i} = -\delta \cdot \frac{\sum_{i=1}^m w^i y^i}{\sum_{i=1}^m w^i} = -\delta \left(\frac{w^i}{\sum_{i=1}^m w^i} \right) \frac{\partial y^i}{\partial q_j^i},\quad (11)$$

$$\frac{\partial y^i}{\partial q_j^i} = x_j^i,\quad (12)$$

因此有

$$q_j^i(k+1) = q_j^i(k) - \alpha \frac{\partial J}{\partial q_j^i} = q_j^i(k) - \eta \cdot \delta \cdot \left(\frac{w^i}{\sum_{i=1}^m w^i} \right) x_j^i,\quad (13)$$

式中 $j=1,2,\dots,n$, η 为学习效率, $0 < \eta \leq 1$.

4 空军飞行事故自适应模糊神经网络预测模型的建立

4.1 预测模型输入量的确定

1) 1950-2005 年飞行训练总时间的确定

空军每年飞行训练总时间是由空军相关部门根据上级要求、飞机使用和部队装备的具体情况而提前制定的. 是有一定的理论依据的, 基本是按计划的时间来进行训练的, 即使有浮动, 范围也是非常小的. 通过分析得知, 2004 和 2005 年的飞行训练总时间可以认为与 2004 年相同.

2) 1950-2005 年费用投入的确定

空军每年飞行训练、维护修理和基础设施建设等的总投入基本上也是确定的. 每年上级部门要根据人员状况、装备机型等情况来制定短期和长期的年度财务计划, 然后按照计划下拨给下属部门, 即使有变动对飞行事故来说也是延期表现出来的. 通过对 2004 年以前的费用分析, 基本上可以认为 2005 年比 2004 年费用总投入递增 5%.

3) 人、装备、环境和管理因素对空军飞行事故的影响程度的量化

本文采用层次分析法对人、装备、环境和管理准则层与各自下属的因素层进行量化, 权重和相对重要度越大, 对飞行事故的影响也就越大.

①建立多级递阶结构如图 2 所示

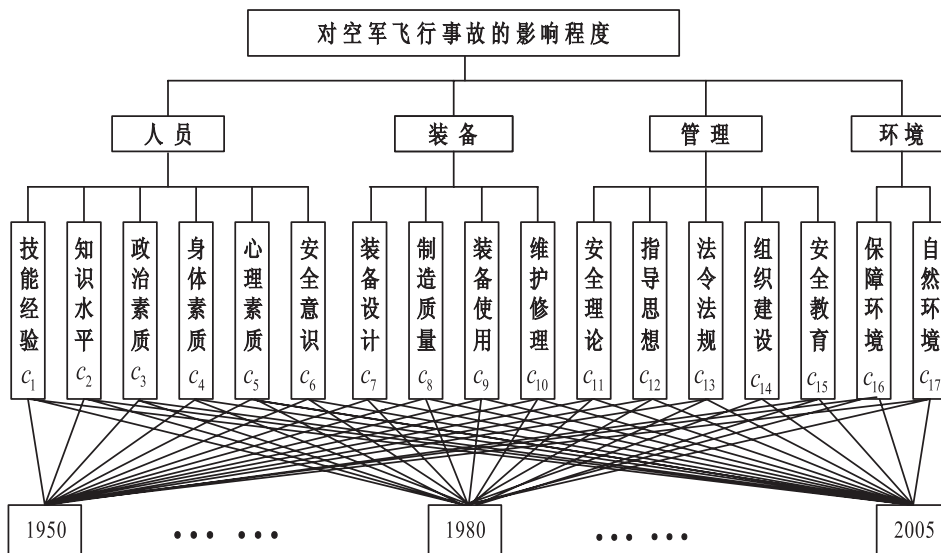


图 2 飞行事故影响程度递阶结构

②通过层次分析法确定因素层相对空军飞行事故的权重如表 1 所示

表 1 影响程度权重表

因素	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
权重	0.256	0.107	0.089	0.045	0.112	0.032	0.051	0.029	0.038
因素	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}	c_{16}	c_{17}	
权重	0.027	0.015	0.079	0.020	0.016	0.015	0.028	0.072	

③ 对因素层中的各个因素进行评判

如是按照每年之间进行比较判断, 则时间跨度太长, 年与年之间很难给出一个比较准确的评判值. 如果根据实际情况划分为几个时间段, 便可以明显地看出相对重要程度的大小.

以技能经验为例, 将 1950-2005 年划分为如下五个阶段, 主要体现在飞行员在各个阶段的训练情况, 如文化大革命时期, 在“政治可以冲击一切”的口号下, 飞行训练有多少算多少, 1968 年飞行员只飞了 23 小时, 由于飞行时间太少, 破坏了飞行的连续性和课目连贯性; 不切实际的缩短学制, 认为培养飞行员只几个月最多一年, 严重的违背了掌握飞行技术的客观规律, 也违反了保证飞行安全的客观规律, 所以飞行员技术基础很差, 更谈不上经验.

- 1) 50-53 空军初建时期;
- 2) 54-65 空军稳步发展时期;
- 3) 66-76 文化大革命时期;
- 4) 77-89 改革开放时期;
- 5) 90-05 新的历史时期.

因素层中技能经验的判断矩阵 A_{c_1} 为

$$A_{c_1} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & \frac{1}{9} \\ 5 & 1 & 7 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ 3 & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{6} \\ 7 & 3 & 5 & 1 & \frac{1}{4} \\ 9 & 5 & 6 & 4 & 1 \end{pmatrix},$$

则有 $\lambda_{\max}=5.5629$, $CI = \frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}=0.1407$, $CR=\frac{CI}{RI}=0.1256>0.1$. 判断矩阵 A_{c_1} 具有满意的一致性, 则权重为

$$[w_1^1, w_2^1, w_3^1, w_4^1, w_5^1] = [0.0336, 0.1687, 0.0637, 0.2361, 0.4978].$$

而对于因素层中的指导思想, 划分为如下 11 阶段, 主要体现在各个阶段的飞行训练的侧重点和强度上.

- 1) 50-53 抗美援朝时期;
- 2) 54-60 战后相对平静时期;
- 3) 61-63 中印边境紧张时期;
- 4) 64-71 中苏关系紧张时期;
- 5) 72-76 相对平静对峙时期;
- 6) 77-79 中越边境战争时期;
- 7) 80-85 中越边境小磨擦时期;
- 8) 86-90 苏东解体前平静时期;

- 9) 91-94 苏东解体后平静时期; 10) 95-96 台海关系倒退时期;
11) 97-05 对台军事斗争准备时期.

同理, 可得权重

$$[w_1^{12}, w_2^{12}, w_3^{12}, w_4^{12}, w_5^{12}, w_6^{12}, w_7^{12}, w_8^{12}, w_9^{12}, w_{10}^{12}, w_{11}^{12}]$$

$$= [0.1413, 0.0207, 0.0810, 0.1406, 0.0314, 0.1202, 0.0817, 0.0706, 0.0520, 0.1301, 0.1304],$$

因素层中的其它各项也通过这种方法求得各自的权重, 阶段的划分都是建立在对该项详尽分析和认真研究基础上的.

④对 1950-2005 年各年综合重要度计算

对于每年的综合重要度计算采用下式

$$d_j = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{17} c_i w_k^i, \quad (14)$$

式中, m 为划分的阶段数, $i=1950, 1951, \dots, 2005$.

计算结果如表 2 所示.

表 2 1950-2005 年各年综合重要度

年份	d	年份	d	年份	d	年份	d	年份	d
1950	0.4325	1962	0.1241	1974	0.1532	1986	0.0864	1998	0.0620
1951	0.5675	1963	0.1077	1975	0.1790	1987	0.0712	1999	0.0802
1952	0.5328	1964	0.0721	1976	0.1492	1988	0.0855	2000	0.0832
1953	0.2994	1965	0.0548	1977	0.1097	1989	0.0976	2001	0.0746
1954	0.2949	1966	0.0770	1978	0.1382	1990	0.0716	2002	0.0674
1955	0.2117	1967	0.1399	1979	0.1058	1991	0.0774	2003	0.0707
1956	0.3486	1968	0.1783	1980	0.0909	1992	0.0877	2004	0.0715
1957	0.2503	1969	0.1406	1981	0.0906	1993	0.0603	2005	0.0689
1958	0.1006	1970	0.1209	1982	0.1002	1994	0.0710		
1959	0.0939	1971	0.1858	1983	0.0807	1995	0.0914		
1960	0.1009	1972	0.1622	1984	0.0921	1996	0.0713		
1961	0.1017	1973	0.1497	1985	0.0777	1997	0.0839		

4.2 自适应模糊神经网络的训练和泛化检验

根据上面得到的每年的综合重要度, 年飞行训练总时间和年费用投入等 3 个输入变量的 1950-2002 年值和空军年严重飞行事故万时率 (输出变量) 对自适应模糊神经网络进行训练 (资料和数据来源: 空军质控办、飞行安全局等部门). 本文将 3 个输入变量的模糊子集均匀化为 NL, NM, NS, PS, PM, PL, 每个隶属函数的宽度初值均为 0.05, 经 3000 次训练后, 得到所求的自适应模糊神经网络预测模型. 使用 1950-2002 年的数据对该模型进行检验, 结果表明预测结果是令人满意的. 另一方面, 为了说明和检验该网络的泛化能力, 用未包含 1969, 1979, 1989 三年的样本数据对自适应模糊神经网络进行训练, 由此获得的预测模型也能得到满意的预测结果, 说明该项模型具有较高的可靠性. 学习结果还表明, 各模糊子集的隶属函数均有修正, 避免了人为主观性. 图 3 为严重飞行事故万时率的泛化检验图 (注: 图中飞行事故万时率的值已经做了防涉密处理).

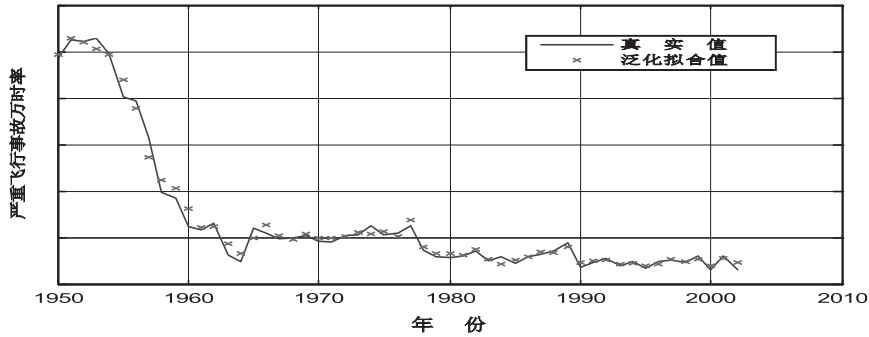


图3 严重飞行事故万时率的泛化检验

4.3 空军飞行事故的预测

根据 2003-2005 输入变量的值, 利用上面建立起来的预测模型, 对未来 3 年严重飞行事故万时率进行了预测, 拟合效果和预测结果如图 4 所示.

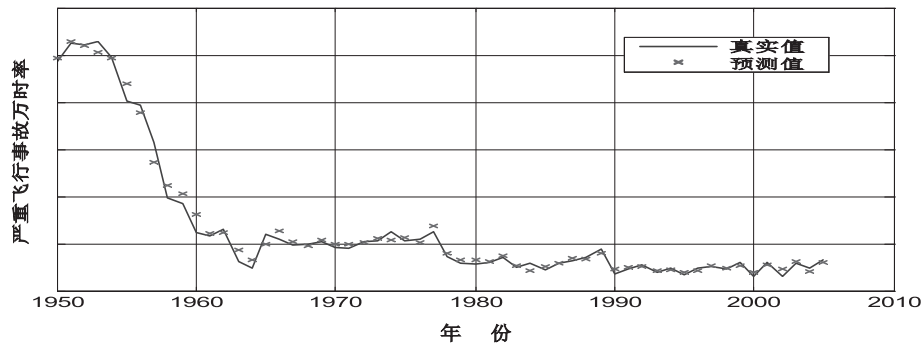


图4 严重飞行事故万时率的拟合与预测

从图 4 中可以看出, 拟合效果是比较显著的, 对于历史上的几次事故高发期也有较好的拟合效果, 能较好地反映出空军飞行安全的演变规律. 有关专家也对该预测结果给予了肯定, 认为比较符合空军飞行安全的实际情况. 表 3 给出了几种飞行事故预测法的拟合的平均相对误差以及 2003-2005 预测的平均相对误差. 很明显本文提出的方法在拟合和预测方面比其它方法都具有更高的精度.

表3 飞行事故预测方法比较

预测方法	拟合精度	预测精度
灰色 - 马尔柯夫预测法	16.07%	21.00%
灰色 - 均生函数预测法	14.86%	17.44%
BP 神经网络预测法	8.11%	11.01%
自适应模糊神经网络法	6.25%	8.79%

5 结 论

本文运用高木 - 关野模糊系统和 pi-sigma 神经网络构建了一种自适应模糊神经网络, 并对空军的飞行事故万时率进行了建模和预测. 该预测模型不仅能在学习中不断的修正各模糊子集的隶属函数, 而且能实现模糊规则的自动更新, 使预测模型更具有合理性. 另一方面在预测中尝试应用飞行事故定性分析的成果, 使预测能反映政策性因素的影响和安全管理人员的经验, 整个预测过程突破了纯数学模型预测的局限性, 实现了预测的定性和定量的结合, 体现了预测过程中初步的人 - 机结合. 本文的方法在其它领域同样具有广泛的应用前景.

参 考 文 献

- [1] 甘旭升, 端木京顺等. 基于灰色马尔柯夫模型的严重飞行事故频数预测. 空军工程大学学报, 2004, **2**(5): 18-21.
- [2] 许登超, 罗旭光等. 军品订货量的一种自适应模糊预测方法研究. 系统理论与实践, 1999, **3**(3): 38-46.
- [3] 余桂林, 徐邦年等. 空军飞行安全学. 中国人民解放军空军飞行安全局, 2000, **12**: 8-13, 30-66.
- [4] 陆惠良. 军事飞行事故研究. 北京: 国防工业出版社, 2003, **8**: 40-80.
- [5] 程维维, 金懋康等. 1950-1996 年机械原因严重飞行事故分析. 中国人民解放军空军装外场部, 1997, 10.
- [6] 张智星, 高春华等. 神经模糊 - 模糊和软运算. 西安: 交通大学出版社, 2000: 239-257.
- [7] 金耀初. 自适应模糊预测及其在天气预报中的应用. 模式识别与人工智能, 1993, **2**(4): 283-290.
- [8] Ishibuchi H, Fujioka R and Tanaka H. Neural networks that learn from fuzzy if-then rules. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 1993, **1**.
- [9] 王士同. 模糊系统、模糊神经网络及应用程序设计. 上海: 科学技术文献出版社, 1998, **12**: 12-13, 333-373.
- [10] Ishibuchi H, Okada H and Tanaka H. Interpolation of fuzzy if-then rules by neural networks. Proc. 2nd Internat. Conf. on Fuzzy Logic and Neural networks, Iizuka, Japan, 1992.
- [11] Lee S C and Lee E T. Fuzzy neural networks. *Math. Biosci.*, 1975, **23**.

AN ADAPTIVE FUZZY NEURAL NETWORK PREDICTIO METHOD ON AIRCRAFT ACCIDENT

GAN Xusheng ZHANG Hongcai CHENG Yongmei XIONG Xianzhe

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The prediction of aircraft accident has the extremely vital significance for preventing aircraft accident. First of all, the main factors are systemically analyzed, which influence the air force aircraft accident, and the related qualitative factors are quantified. Then an adaptive fuzzy neural network prediction model is established according to historical data and the result of system analysis. The forecast process eliminates the limitation of pure mathematics model, and realizes the integration of the quantitative and qualitative forecast. The prediction model has very strong self-adaptability because of using adaptive fuzzy neural network based on Sugeno-Tanaka fuzzy model, and the forecast result is also satisfactory.

Key words Aircraft accident, fuzzy system, neural network, AHP.