

# 热带气旋路径预报的 MCE 客观综合决策方法研究<sup>①</sup>

杨元琴

(国家气象中心,北京 100081)

## 提 要

采用 MCE(Multi-Criteria Evaluation)方法,在台风路径客观综合预报方法研究与业务实验中,根据多家预报的主要结果进行综合评估分析,提出最佳客观综合预报结果以供决策者及预报员参照。取得初步结果:(1)对 9711 号台风进行了 MCE 客观综合决策方法的预报试验。结果表明,对于 9711 号台风生命史中几个关键点的预报,即登陆预报、台风转向北上预报及出海转向预报等以及全程预报,MCE 方法取得较佳预报结果。(2)在综合平台上对近 10 年的疑难路径台风和 2000 年全年台风进行了 MCE 方法试验及多种预报结论的对比分析研究。MCE 方法预报误差检验结果较好。(3)所提出的模拟预报员预报思维的联想智能模拟方法,以及可操作综合预警平台,为台风路径预报,包括分析、学习、回忆、对比、推理、联想直到形成综合预报结论提供了一个十分有用的工具。(4)讨论的自反馈函数对形成和推演多规则评估决策有一定的实用性。

**关键词:** 热带气旋路径 MCE 方法 客观综合预报

## 引 言

当前,在预报热带气旋未来的移动趋势时,难度最大的是多种预报结论的综合。这种综合通常是由首席预报员,根据多家预报结果进行综合分析,提出综合的预报意见。大多数情况下,各主要预报中心往往会提出各自不同的结论,甚至完全相反的预报结果,使领班预报员的“综合”结论难以形成。还有更为重要的现象,通常几家预报结论“惊人的一致”之时又往往是预报彻底失败之时,这时,“少数派”的意见又成为人们综合时不得不考虑的。因此,如何客观地把多家的预报结果通过客观综合和智能化的计算机模拟过程,形成客观综合结果,得出一个最佳数据,

意义十分重大。

近年来,多结论综合决策研究引起广泛重视。Carver(1991)等研究表明<sup>[1]</sup>,如果把每种结论看作为规则,即是研究一种对多规则的综合评估方法。称之为 MCE(Multi-Criteria Evaluation)。这种方法在地理信息系统(GIS)研究中,取得初步成果。

### 1 MCE 方法的概念模型

图 1 给出了 MCE 方法的概念模型。由图 1 可以看到,通常多结论的综合评估可由以下步骤实现:

#### 1.1 非此即彼淘汰

第一步,对每两个规则(结论)进行简单淘汰,这就是非此即彼的简单原则,每个被 2

① 本文获中国科学技术部专项(2001DLA20026)百年登陆台风系统研究项目资助

对1淘汰的一批弱者之间再进行第二轮2对1淘汰。这种方法是最初级、低智能的方法，所谓“一刀切”，在电子计算机中为二进制最易表达的(0,1)算法。

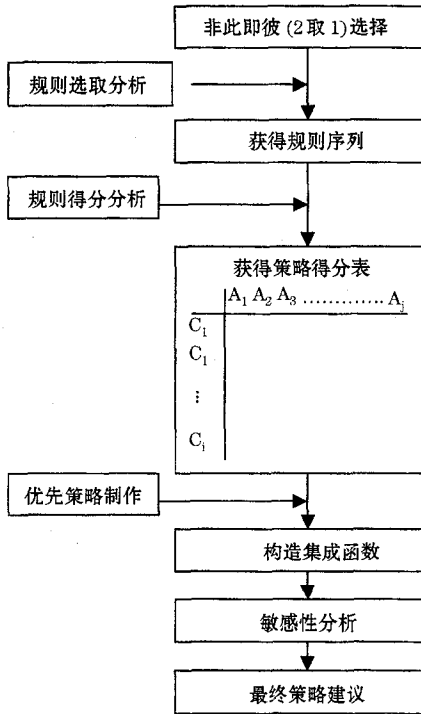


图1 MCE 概念模型

1.2 获得规则

第二步,通过对样本的学习,获取规则。其方法是对每项规则的重要性做出判断。研究指出<sup>[2,3]</sup>,模拟人类思维中的“同情(弱者)”,是对上述非此即彼简单思维的最好补充。这称为思维的补偿性(compensatory)原理。即在模拟规则思维来构造评价函数(value functions)时,上述非此即彼选择的优胜者,要对同次对比中的弱者给以补偿,因为非此即彼的选择很难避免片面性和主观性。通过模拟人类思维的理智和同情心,实现对规则策略打分的客观和公正。这种补偿也可用反馈机理加以模拟。

模拟人类对上述补偿思考问题的神经网络如图2。其中,  $W_0$  是神经元的端点。

图2中的 output 设计,给出了非线性思

维方法的评估。

1.3 构造集成函数

图2中的  $f$  是待构造的描述函数,这是如何对多种规则进行非线性采集的关键。人们模拟这一过程有多种方法,通常采用 Sigmoid 函数<sup>[3]</sup>。本文将在下一节讨论。

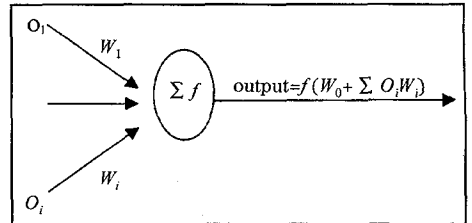


图2 人工神经网络的神经元设计

1.4 敏感性分析

智能联想与反馈补偿方法是控制论中的基本方法之一。联想与反馈是人们把给定信息作用于被控制对象后产生的真实信息再输送回来,并对信息的再输出发生联想的映射过程。它符合人类思维的基本过程——联想与反思。也可称之为学习与回忆<sup>[4,5]</sup>,反馈从效应上来分,有正反馈和负反馈,其中,广泛应用的是负反馈。它在系统一旦出现偏离目标的情况时,就会自动出现对偏差的调整,发出减小偏差的制约命令,就是人工智能技术中的减少偏差的调节效应的一种应用。这种敏感性分析与调节应该设计成为多次的,每次根据敏感性分析做出修改,以至逐渐逼近目标。本文对台风路径综合预报敏感性分析中,反馈过程如图3所示。

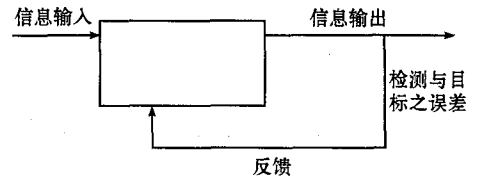


图3 反馈过程

自然界留给我们的信息处理问题可大体分为两类,即结构性与非结构性的问题。结构性是指一类问题可用数学语言清楚地而严格地描述,并映射成计算机程序,然后由计算机以百万倍于人的计算能力求得结果。因此,

计算机在求解结构性问题时远远超过人类自身的能力。对于非结构性问题,其特点是:

(1)人知道怎样处理,但难以用数学语言表达。

(2)存在大量的实际范例可供学习,并可抽象上升为概念或规则。

这类问题,如天气预报中对天气图形势的识别,对人的形象、声音以及书写文字的识别方面,人的能力却大大超过计算机。在人工智能、思维、直觉方面,计算机难以与人的分析能力相比。由此,人们希望追求一种新型的计算机系统,它既有超越人的计算能力,又有类似人的识别、智能、联想能力<sup>[5]</sup>。控制理论中的自反馈原理与人工神经网络技术有了很好的发展前景,对于模拟预报人员天气会商中的综合决策也有较好的应用价值。

## 2 台风路径预报的 MCE 客观综合决策方法

台风路径预报的多种预报规则评估的客观综合方法可从对样本的训练学习开始。

### 2.1 最佳求值

模拟人的思维的神经元通常有两个有特色的相元,第一是学习,即是通过训练(培训)使系统搭建样本中各事件间的联系;第二是回忆,就是联想。聪明的决策系统是在样本多的基础上,训练得到正确联想、回忆、记忆的能力。目前,发展比较完善的学习算法通常采用 Back Propagation (BP)算法<sup>[6-8]</sup>。在通过一组样本进行训练学习时,连接的权重自动向梯度下降方向调整,以使网络的实际输出矢量之间的差达到最小,并求得所期望的矢量。

矢量差一般用误差函数表示:

$$E = \frac{1}{2} \sum \sum (Y_{i,c} - d_{i,c})^2 \quad (1)$$

这里,  $c$  是个例(输入输出对)指数,  $i$  是输出单元指数,  $Y$  是输出单元的实际状态(实况),  $d$  是期望(预报)状态。梯度下降法产生的下一代的最简形式是计算误差随其权重变化的变率,即:

$$\Delta W = \zeta \delta E / \delta W \quad (2)$$

其中,  $\zeta$  是学习效率。

设计一个神经网络的可推广能力,或者对一个未曾学习训练过的资料的适用能力是这个网络设计的关键。网络的推广能力可通过回访历史,建立一组测试样本来衡量。

以对中国、美国和日本等多家国际知名的气象预报中心的预报产品进行台风路径综合决策为例,首先,在最初我们总会试图在每次预报中给每家预报一定的权值,即给一个最初的策略分。重要的问题是如何在进程中通过多次测试(学习与训练)动态反馈修正各家的策略得分。于是,我们在控制试验中,模拟了首席预报员的预报思维,即不对任何一家的预报给予固定的偏见,其贡献按“现实为主,历史为辅”原则来实现<sup>[6-8]</sup>。可表示为:

$$\text{output } X = f(W_0 + \sum X_i W_i)$$

( $X$  为经度)

$$\text{output } Y = f(W_0 + \sum Y_i W_i)$$

( $Y$  为纬度) (3)

为说明方便,仅讨论三家预报的情形,令  $W_c$ 、 $W_u$  和  $W_j$  分别为中、美、日三家预报的贡献,分别采用策略分  $W_c$ 、 $W_u$  和  $W_j$ ,它表达了此三家预报的相对预测能力。此时,当  $T = \tau$  时,对  $W_c(\tau)$ 、 $W_u(\tau)$ 、 $W_j(\tau)$  三个参量的评估,只能根据  $(X_{i\tau} Y_{i\tau}) (i = \tau, \tau - 1, \tau - 2, \dots)$  在历史表现的训练中取得,其中  $W_c(\tau)$  取决于  $X(\tau - 1, \tau - 2, \tau - 3, \dots)$  及  $Y(\tau - 1, \tau - 2, \tau - 3, \dots)$  等,  $(X_{i\tau} Y_{i\tau})$  中  $i = 1, 2, 3, \dots$  分别代表中、美、日各家的值。于是某家的预报试验结论(即规则序列)和台风发生的实际位置序列误差越小,则它对综合决策预报贡献就越大,反之贡献越小。

### 2.2 联想式智能决策

智能分析与决策,是把人工智能(Artificial intelligence,简称 AI)技术引入决策的一项新技术。对台风的分析与预报是预报员对运动、过程、变化进行分析、学习、理解,并对未来运动趋势进行思考、推断和预测过程。

用计算机实现这一过程称为智能分析与预测决策。因此,如上所述的测试过程,当设计对预报员思维过程的计算机模拟时,首先建立与决策有关的台风知识库,并对台风知识库中的信息之间的联系进行规划(Project),使在进程中能像预报员考虑预报和决策预报结论时一样进行快速地最佳联想、反馈、响应与决策。

在设计台风智能决策系统时,第一步是建立智能记忆子系统。智能记忆库的设计就是把已收集到的百余年的西北太平洋台风资料及其有关的信息,以联想树的形式置于各自的联想结点上,使预报员看到当前的台风过程便可先后联想到历史上的相似台风<sup>[8-10]</sup>。智能联想式台风决策系统可提供台风实况任意逐日回放、检索,以图形图像方式模拟预报员对台风过程的会商、联想与对比。例如,第一级联想有10步,每一步的第二级联想仍为10步,则得到100个联想结点,以此类推。一个智能系统所占有的原信息及联想信息可以相当庞大,联想的路径可因天气过程的变化而动态结合。

### 2.3 自反馈函数的构造

激活函数  $f(u_i)$  描述了神经元在输入信号作用下产生输出信号的规则。目前,  $f(u_i)$  的形式多样,利用他们的不同特性可以构成功能各异的神经网络<sup>[3,4]</sup>, Sigmoid 函数是有别于简单映射、线性分段映射的一种非线性函数。

图4是一个单调上升的光滑的非线性函数。在 Back - Propagation 模型中采用的就是这种输入输出变换函数。可表示为:

$$Y_i = f(u_i) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (4)$$

当  $u \geq 0$  或  $u \leq 0$  时,神经元的输出对输入不敏感。所以应当使  $u$  的值落在 0 附近。另外,网络的输入,即样本的特征矢量各元素也不宜太大或太小。因此在特征量提取做处理时要考虑这一因素。

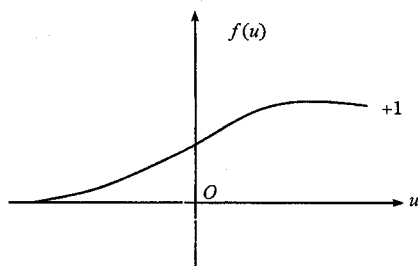


图4 Sigmoid 函数图

我们在建立台风路径的客观综合决策模型中,首先考虑纠错规则。因为纠错规则广泛适合于我们对预报问题的处理。纠错规则的一个主要特征,是依赖于输出节点的动态反馈以改变系统对各预报结果的决策信度。

在最终制作决策时,需要测量各家预报值的误差,本文采用了含有地球曲率变化的台风路径误差公式,以反映误差对纬度变化的响应<sup>[11]</sup>:

$$\epsilon = \{ [(X_0 - X_f) \cos[(Y_0 + Y_f)/2]]^2 + (Y_0 - Y_f)^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中  $(X_f, Y_f)$  为预报值,  $(X_0, Y_0)$  为实测值。

预报误差是提供给 MCE 系统对预报过程进行学习和积累经验的重要信息之一。有了上述智能记忆库,有了实际预报误差信息,学习过程就是系统要做的重要工作了。从式(5)中得到各预报误差,为构造反馈函数提供了参数化信息。

### 3 MCE 客观综合决策方法用于台风路径预报及检验

9711 号台风(Winnie)于 1997 年 8 月 10 日在太平洋中部海面上生成(即  $15^\circ\text{N}$ 、 $155^\circ\text{E}$  附近)。生命史达 12 天之久(含内陆低气压阶段)。是近年来路径复杂、灾害严重影响我国的著名台风之一。因此,研究其运动过程具有一定代表性。其移动可划分为五个阶段。

第一阶段:西北方向移动,时间在 8 月 10 日 00 时至 8 月 14 日 00 时。此间移向移速稳定少变。第二阶段:继续西北偏西并进入东海。时间为 14 日 00 时至 18 日 00 时。

第三阶段:西北方向移动向我国沿海的登陆运动。时间为 18 日 00 时至 19 日 00 时。第四阶段:登陆后在内陆的北上移动。时间为 19 日 00 时至 20 日 00 时。第五阶段:转向东北方向并从黄河口出海,时间从 20 日 00 时至 20 日 12 时。

上述五个阶段的运动历经 10 天,其中有四个关键点的决策预报是十分重要的。

第一,8 月 14 日 00 时,当台风移至 21°N,140°E 附近时,台风有明显的北上运动趋势。根据多年台风移动的历史资料研究发现,该地区是台风运动的“叉路口”所在位置。有 40% 的台风将北上转向日本列岛运动;另有 50% 的台风将取向偏西路径,影响我国长江以北。而取“中间路径”移动的非常少。决策预报尤其重要。

第二,8 月 18 日 00 时,当 9711 号台风移至台湾东北方约 300km 附近,如果登陆我国沿海,有不到 24 小时的时效,是发紧急警报的关键时刻。

第三,8 月 19 日 00 时,台风移至杭州湾以西,未来是就地减弱消失,还是偏西移动进入河南? 或者将北上影响华北甚至东北地区,对何时何地会出现何种台风灾害天气,此时是减灾预警服务的关键时刻。

第四,20 日 00 时,当 9711 号台风移入鲁西南地区后,是否会出海再登陆影响华北和东北地区,也是预报的关键。

表 1 列出了用本文 MCE 方法制作这四个关键时刻的决策预报结果,并与美国关岛、日本及中央气象台值班定位(下同)的预报作对比分析。

表 1 9711 号台风系统客观决策预报及其他方法的 24 小时预报误差比较(km)

预报关键点	起报时间	中央气象台	日本	美国	MCE
西行预报	8 月 14 日 00 时	67	82	94	70
台风登陆预报	8 月 18 日 00 时	60	64	78	50
内陆转向北上预报	8 月 19 日 00 时	60	73	77	56
台风低压出海预报	8 月 20 日 00 时	74	84	83	57
以上四次预报平均误差	8 月 10 日 00 时	65.2	75.8	83.0	58.2
9711 号台风全程预报	8 月 10 日至 8 月 20 日时	78	94	104	66

从表 1 可以看到:

(1)四个关键时刻,登陆、北上转向与出海的预报检验对比分析显示,MCE 方法平均预报误差较小。

(2)在关键的登陆点预报中,MCE 客观综合决策预报方法预报误差仅 50km。

(3)在台风起始阶段,各家客观预报方法在资料较少的时段,中央气象台的值班预报效果是最好的。

(4)对 9711 号台风全程预报检验结果显示,MCE 客观综合决策预报方法平均预报误差最小。

为了讨论本文给出方法的代表性,对 1990~1996 年 10 个疑难台风及 2000 年全年 15 个台风作了平行对比分析检验。

表 2 是从 1990~1996 年中选取的 10 个疑难台风共 225 次预报过程的对比检验结果。可以看出,在 10 个台风的预报中,有 7 个台风的预报 MCE 方法的平均预报误差最小。表 3 给出 MCE 方法、中央气象台值班预报、日本和关岛对 2000 年全年 15 个台风预报的平行对比检验结果(个别台风由于路径短或资料原因未包含)。

表 2 1990~1996 年疑难台风预报误差对比检验结果(纬距)

台风号	中国	日本	关岛	MCE
9606	1.99	1.82	1.83	1.81
9104	1.25	1.09	1.35	1.08
9215	1.30	1.31	1.10	1.17
9302	1.41	1.42	1.55	1.38
9120	1.53	1.39	1.33	1.26
9401	1.82	1.44	1.68	1.51
9408	1.66	1.39	1.70	1.54
9420	1.49	1.38	1.58	1.35
9425	1.60	1.42	1.44	1.32
9012	1.95	1.59	1.498	1.39

#### 4 小结与讨论

本文给出的 MCE 方法在台风路径客观综合预报方法研究与业务试验中,取得初步成果。

(1)对 9711 号台风进行了 MCE 客观综合决策方法的预报试验。结果表明,对于 9711 号台风生命史中几个关键点的预报,即

表3 2000年台风路径24小时预报误差平行对比检验结果(km)

台风号	中国	日本	关岛	MCE
200001(达维)	165.0	187.0	180.0	156.2
200003(鸿雁)	148.6	148.9	129.4	121.8
200004(启德)	226.2	157.5	221.3	156.8
200005(天枰)	86.0	118.2	73.5	69.0
200006(布拉万)	126.7	129.2	114.9	106.0
200008(杰拉华)	89.4	91.3	77.0	76.9
200009(艾云尼)	219.4	183.4	157.7	151.5
200010(碧利斯)	109.1	97.7	90.6	87.9
200012(派比安)	200.1	136.2	169.5	151.7
200013(玛莉亚)	161.0	202.5	135.8	134.7
200014(桑美)	175.7	159.7	154.6	135.0
200015(宝霞)	178.4	146.1	152.2	132.0
200016(悟空)	92.1	94.3	76.3	70.4
200017(清松)	229.9	157.2	188.7	157.4
200018(珊珊)	168.2	157.6	169.8	140.1

登陆预报、台风转向北上预报及出海转向预报等以及全程预报, MCE方法取得较好预报结果。

(2)在综合平台上对近10年的疑难路径台风和2000年全年台风,进行了MCE方法预报试验及多种预报结论检验的对比分析研究。MCE方法预报误差检验结果较好。

(3)本文所提出的模拟预报员预报思维的联想智能模拟方法,以及可操作的综合平台,为台风路径预报,包括分析、学习、回忆、对比、推理、联想直到形成综合预报结论提供了一个有用的工具。

(4)本文讨论的自反馈函数对形成和推演多规则评估决策有一定的实用性,取得了较好的应用效果。

### 参考文献

- 1 Carver, S. J. Integrating Multi-Criteria Evaluation into Geographic Information System, International Journal of Geographical Information System, 1991:321.
- 2 王继志,杨元琴. AFDOS新系统的设计. 气象, 1993, 19(2):56.
- 3 Jiang Zhou, Daniel L. C. Using Genetic Learning Neural Networks for Spatial Decision Making in GIS, 98.
- 4 杨元琴. 多种台风警报结论计算机综合决策系统的研究, 台风暴雨预报报警系统研究. 北京: 气象出版社, 1996:75.
- 5 Wang Jizhi, Yang Yuanqin. An Analysing Forecasting and Data - Processing Operational System. Seventh International Conference on Interactive information for Met. Jan 14-18, New Orleans, USA, 1991:117.
- 6 R. J. Fffen. VLSI Image Processing Collins & co. t + d, 1985:22.
- 7 Beijing Milky Way Computer Corporation, JMC-550 实时图形压缩, 1991.
- 8 Herbert Sehidlt, 白为民等译. C语言与人工智能. 北京: 中科院希望电脑公司出版, 1991:132.
- 9 王继志. 一个西北太平洋台风预报的 Markov 相似模式, 中国科学, 1985, (4):62.
- 10 费亮. 西北太平洋台风预报误差问题的研究. 南京国际热带气旋研讨会, 1992:91.
- 11 王继志. 近百年西北太平洋台风活动. 北京: 海洋出版社, 1992:211.

## Integrated Prediction Decision Making of Typhoon Tracks By Using Multi-Criteria Evaluation Method

Yang Yuanqin

(National Meteorological Center, 100081)

### Abstract

The integrated prediction decision making for typhoon tracks by using the Multi Criteria Evaluation (MCE) method is made. It is shown that the MCE can provide a reasonable integrated prediction for typhoon tracks. An objective integrated decision for typhoon track forecasting, which is a neural network to simulate the human being, is made instead of the traditional experiment one. Parallel analyzing results by using typhoon track forecasting data, 10 year's special landing typhoons, the full year for 2000 and typhoon 9711 (Winnie) with abnormal track indicated that MCE method gives a good behaviour.

**Key Words:** tropical cyclone track MCE method objective integrated prediction