基于BP神经网络的飞行绩效评价模型

柳忠起 袁修干

(北京航空航天大学 生物与医学工程学院，北京 100191) (北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

樊瑜波

(北京航空航天大学 生物与医学工程学院，北京 100191)

摘 要：为实现飞行绩效的客观评价，利用眼动数据，建立了拓扑结构为6-14-3型的BP(Back Propagation)神经网络模型.已有的实验数据和随机插值法得到的数据作为建模的数据来源，数据分为训练集和测试集并归一化.基于Matlab的神经网络工具箱，利用经验公式和实验比较法确定了BP网络模型的隐含层节点数；对BP算法的各种改进算法进行了优化选择；将训练集数据和测试集数据先后输入网络模型进行学习训练和仿真测试；对3个技术水平的飞行员的飞行绩效进行了预测和评价.研究表明，眼动数据的BP神经网络模型可以较为准确地评价飞行绩效，评价方法可以为飞行训练提供参考.

关 键 词：眼动；飞行绩效；评价；BP神经网络；仿真

中图分类号：TP 3-05

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)04-0403-04

Pilot performance evaluation model based on BP neural networks

Liu Zhongqi

(School of Biological Science and Medical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Yuan Xiugan

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Fan Yubo

(School of Biological Science and Medical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to evaluate pilot performance objectively, back propagation(BP) neural network model of 6-14-3 form in topology with eye movement data was established. Data source of BP neural networks that came from former experiment and random interpolation was divided into training set and test set and normalized. Based on neural networks toolbox in Matlab, hidden layer nodes of BP networks were determined with empirical formula and experimental comparision; BP algorithms in the toolbox were optimized; The training set data and test data were input into model for training and simulation; Pilot performance of the three skill levels was predicated and evaluated. The research shows that pilot performance can be accurately evaluated by setting up BP neural networks model with eye movement data and the evaluation method can provide a reference for flight training.

Key words: eye movement; pilot performance; evaluation; BP neural network; simulation

飞行绩效评价有主观和客观两种方法：主观评价法一般由教官观察飞行过程后打分或者设计量表问询评价[1]；利用飞行数据记录系统记录的飞行参数评价飞行绩效属于客观评价法.主观评

收稿日期：2009-04-23

基金项目：国家自然科学基金资助项目(30970904)

作者简介：柳忠起(1975—)，男，河北邢台人，博士生，lzq505@163.com.

价法简单易操作,实际中广泛采用,但这种方法容易受评价者自身因素的影响,如喜好、情绪、动机、疲劳等,评价结果容易产生偏差.客观评价法避免了主观方法的缺陷,但要根据不同任务对飞行参数指标进行调整,没有适用于各种任务阶段的统一的方法,目前仅限于实验室的研究.寻找一种更加切实可行的客观评价方法是目前需要研究的课题.

在研究飞行员的眼睛运动规律时,发现不同熟练水平的飞行员的眼动模式存在着明显差异,认为眼动模式和飞行绩效相关,可以利用眼动模式诊断操作缺陷和评价飞行绩效[2].目前的眼动追踪技术已趋成熟,可以无干扰和自动化地采集眼动数据,利用技术手段挖掘眼动数据中的有效信息,实现飞行绩效的客观评价是有应用价值的研究课题.

人工神经网络 ANN(Artificial Neural Network)是对人类大脑的一种抽象、简化与模拟,具有大规模并行处理能力、分布式存储能力、自学习能力、良好的容错性与联想记忆功能等特性[3].本文基于 ANN 理论和 Matlab 的神经网络工具箱,建立了眼动数据的 BP 神经网络模型,实现了对 3 类飞行员飞行绩效的预测和评价.

1 BP 神经网络简介

迄今为止,人们从不同角度提出了近百种 ANN 模型,其中应用最广泛的是 BP 神经网络模型.BP 网络是基于 BP 误差反向传播算法的多层前向神经网络,每个神经元只前馈到其下一层的神经元,没有层内连接和反馈连接.采用 Sigmoid 型传递函数.算法由两部分组成:信息的正向传递与误差的反向传播.在正向传播过程中,输入信息从输入层经隐含层逐层计算传向输出层,每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态.如果在输出层没有得到期望输出,则计算输出层的误差变化值,然后反向传播,通过网络将误差信号沿原来的连接通路反传,修改各神经元的权值,直至达到期望目标.

2 数据样本来源

在已做的实验研究里,记录了专家和新手模拟飞行中的眼动数据和飞行参数数据[4].经过统计处理发现,专家和新手不仅在飞行绩效方面存在明显差异,眼动数据也存在着明显差异,突出表现为 6 个眼动指标的差异,它们是平均注视时间、平均扫视幅度、平均瞳孔变化率、平均扫视速度、注视频率和扫视频率.本研究将用这些眼动数据建立神经网络模型.受客观条件限制,实验只对专家和新手两个水平的人群进行了采样,在多个水平上建立预测和评价飞行绩效的 BP 神经网络模型才更有实际意义;因此,根据神经网络的输入和输出关系以及输入数据之间的空间分布特征,利用插值法(见式(1))得到了介于新手和专家之间的中间水平人群的眼动数据.为了和实际对应,称专家为一级飞行员,中间水平的人员称为二级飞行员,新手称为三级飞行员;在建模过程中用飞行绩效数据作为导师数据,对应的输出为 3 类飞行人员,眼动数据作为学习数据,对应的输入为 6 个眼动指标.经过实验和插值得到了 40 组一级飞行员、48 组二级飞行员和 56 组三级飞行员的眼动数据.

$$P_{2i}=|\overline{P}_{1i}-\overline{P}_{3i}|\times\mathrm{rand}()+\min(\overline{P}_{1i},\overline{P}_{3i}) \tag{1}$$

式中,P_{2i}为二级飞行员的眼动指标数据($i=1,2,\cdots,6$);$\overline{P}_{1i}$为一级飞行员眼动指标数据的平均值;$\overline{P}_{3i}$为三级飞行员眼动指标数据的平均值;rand( )为 Matlab 的随机函数,产生 0~1 之间的随机数,加入随机函数乘积项主要是考虑了眼动数据的随机性;min( )为取最小值函数.

3 基于 Matlab 的 BP 神经网络模型

利用 ANN 解决问题和程序设计时,涉及大量的数值计算,尽管现代数值计算理论已经很完善,多数计算问题都有高效的标准解法,但是,利用计算机对神经网络模型仿真时,仍然很麻烦.Matlab 的神经网络工具箱以 ANN 理论为基础,用 Matlab 语言构造出各种典型的神经网络函数,只要调用这些函数即可建立所需的网络模型,大大节省了程序设计、调试和网络训练的时间.Matlab 的神经网络工具箱提供了很多改进的经典学习算法,使用它们能够快速地对实际问题建模求解.本研究采用 Matlab 6.5 环境下提供的神经网络工具箱函数对眼动数据建模[5].

3.1 BP 神经网络模型的设计

利用眼动数据和神经网络模型评价飞行绩效的首要问题是网络模型的整体设计,在设计 BP 网络时,一般应从样本集的构造和分配、实验样本数据的预处理、网络层数的设计、输入和输出层的节点设计、隐层节点的设计几个方面考虑.

1) 样本集的构造和分配.

从数据样本的来源可知,样本集里有 40 组一级飞行员、48 组二级飞行员和 56 组三级飞行员的眼动数据.为了建模的需要,将 3/4 的数据分配到训练集用于神经网络模型的学习和训练,1/4 的数据作为测试集验证模型的精度.训练集里有 32 组一级飞行员的数据、40 组二级飞行员的数据和 40 组三级飞行员的数据;其余 32 组作为测试集数据验证模型的精度.

2) 样本数据的预处理.

样本集数据由 6 个眼动指标构成,单位和量纲各不相同,需要归一化.归一化的方法有很多,这里用 Matlab 神经网络工具箱的归一化函数 premnmx 和 tramnmx 将样本数据归一化到[-1,1]范围内,premnmx 对样本集数据进行归一化,tramnmx对测试集数据归一化.计算公式为

$$y=\frac{2(x-x_{\min})}{x_{\max}-x_{\min}}-1 \tag{2}$$

式中,y 为归一化后的数据;x 为归一化前的原始数据;$x_{\min}$为归一化前数据的最小值;$x_{\max}$为归一化前数据的最大值.

3) 输入和输出层的设计.

BP 网络由输入层、输出层和隐含层构成.理论证明,具有偏差和一个无限隐层节点的 3 层 BP 网络可以实现任意从输入到输出的非线性映射.误差精度的提高可以通过增加隐含层中的神经元数目获得,其训练效果比增加层数更容易观察和调整.一般情况下,应优先采用 3 层的 BP 网络,即 1 个输入层,1 个隐含层和 1 个输出层,所以本研究对 3 层的 BP 网络建模.6 个眼动指标为输入层的输入指标,因此,输入层有 6 个节点.建立的模型希望能正确地评价飞行员的飞行绩效,所以将 3 个技术水平的飞行员作为输出,输出节点确定为 3 个,分别以(1,0,0),(0,1,0)和(0,0,1)表示一级飞行员、二级飞行员和三级飞行员.由于误差的存在,网络的输出向量为 0～1 之间的数值,本文规定如果输出数值小于 0.3 则近似看作 0,大于 0.7 则近似为 1.例如,如果输出向量为(0.857 6,0.254 1,0.132 5),则可以判定其为一级飞行员.

4) 隐层节点的设计.

隐层的设计是 BP 网络模型的核心问题,隐层节点数目的选择对于网络的性能影响很大,本研究参考相关文献的一组经验公式确定节点数目[6].经初步估算,隐层节点的数目应该在 3～16 之间.用标准算法 traingd 对不同节点数目的网络分别训练,学习 3000 次后,收敛精度如表 1 所示.可以看出隐层有 14 个节点时精度最高.

表 1　节点数目与网络收敛精度对比

节点数目	收敛精度	节点数目	收敛精度
3	0.176 144	10	0.100 706
4	0.128 231	11	0.115 003
5	0.196 888	12	0.094 898
6	0.150 268	13	0.088 259
7	0.116 720	14	0.082 550
8	0.152 338	15	0.157 604
9	0.098 644	16	0.099 937

3.2　BP 算法的优化选择

标准训练算法 traingd 采用梯度下降法,学习时间长,误差大.如果用标准算法训练网络,建立的模型的范化能力可能达不到要求,不能正确地评价飞行员的绩效.Matlab 的神经网络工具箱里提供了很多改进的 BP 算法,对于一个给定的问题,到底采用哪种训练算法速度最快,很难预料.因为这取决于许多因素,包括给定问题的复杂性、训练样本集的数量、网络权值和阈值的数量、误差目标、网络的用途(如用于模式识别还是函数逼近)等.本文采取实验比较法,用每种算法分别对网络进行训练,选择训练误差小,收敛速度快的作为 BP 网络的学习算法.经过训练对比,发现正则化方法 trainbr 的训练误差最小,收敛速度快,将其确定为 BP 网络的算法.

3.3　BP 网络模型的学习训练

通过以上过程建立了拓扑结构为 6-14-3 型的 BP 网络模型(如图 1 所示),隐含层选用双曲正切 S 型激活函数,输出层选用对数 S 型激活函数.将归一化后的训练集数据输入模型进行训练,输入时将 3 种水平人员的数据交叉输入,可以保障网络有较好的学习效果和范化能力.对网络多次训练,保存误差较小的一次用来测试.经过 35 次训练后,网络收敛,误差精度为 0.000 195 224,误差为 0.010 9.

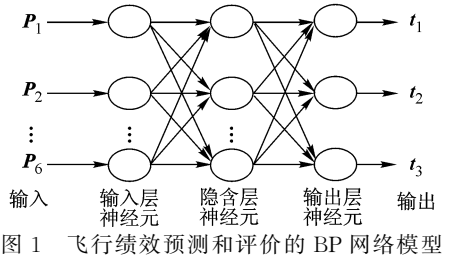


图 1　飞行绩效预测和评价的 BP 网络模型

3.4　BP 网络模型的测试验证

构建神经网络模型过程中,最难和最重要的是建立的模型的范化能力,即对于没有经过训练的输入也能输出想要的结果.把归一化的 32 组测试集数据输入网络模型仿真验证(结果如表 2 所

示),只有第9、第15、第18和第19组数据输出结果误差较大或者输出错误,准确率为87.5%,达到了较高精度,证明所建立的网络模型正确合理,能够对3类人员的飞行绩效预测和评价.

表2 仿真后期望输出与实际输出值对比

编号	期望输出	实际输出	编号	期望输出	实际输出
1	(0 1 0)	(0.0000 1.0000 0.0000)	17	(0 0 1)	(0.0000 0.1868 0.8732)
2	(0 1 0)	(0.0153 0.9937 0.0000)	18	(0 0 1)	(0.0000 1.0000 0.0000)
3	(0 1 0)	(0.0021 0.9995 0.0000)	19	(0 0 1)	(0.0000 0.9939 0.0005)
4	(0 1 0)	(0.0000 1.0000 0.0000)	20	(0 0 1)	(0.0000 0.0000 1.0000)
5	(0 1 0)	(0.0000 1.0000 0.0000)	21	(0 0 1)	(0.0000 0.0002 1.0000)
6	(0 1 0)	(0.0005 0.9998 0.0000)	22	(0 0 1)	(0.0000 0.0000 1.0000)
7	(0 1 0)	(0.0000 0.9999 0.0001)	23	(0 0 1)	(0.0501 0.0000 1.0000)
8	(0 1 0)	(0.0000 0.9999 0.0000)	24	(0 0 1)	(0.0004 0.0002 0.9996)
9	(1 0 0)	(0.6408 0.1120 0.0000)	25	(0 0 1)	(0.0001 0.0000 0.0009)
10	(1 0 0)	(1.0000 0.0000 0.0000)	26	(0 0 1)	(0.0000 0.0024 0.9992)
11	(1 0 0)	(1.0000 0.0000 0.0000)	27	(0 0 1)	(0.0001 0.0001 0.9998)
12	(1 0 0)	(0.9898 0.1429 0.0000)	28	(0 0 1)	(0.0000 0.0000 1.0000)
13	(1 0 0)	(1.0000 0.0034 0.0000)	29	(0 0 1)	(0.0000 0.0000 1.0000)
14	(1 0 0)	(0.9999 0.0019 0.0000)	30	(0 0 1)	(0.0001 0.0001 0.9999)
15	(1 0 0)	(0.0855 0.7686 0.0000)	31	(0 0 1)	(0.0000 0.0000 1.0000)
16	(1 0 0)	(1.0000 0.0007 0.0000)	32	(0 0 1)	(0.0000 0.0001 0.9999)

4 结 论

利用眼动数据建立人工神经网络模型可以较为准确地评价飞行绩效.在实际飞行中充分采集不同飞行技术等级的飞行员的眼动数据,以他们的数据作为基准,建立眼动数据的神经网络模型,在飞行绩效评价时,将新采集的飞行员的眼动数据输入模型就可以得到飞行绩效的评价结果.从人机交互的过程分析,眼动指标体现了信息输入阶段的视觉行为规律,飞行绩效是反应输出的结果,神经网络模型把人的眼动输入和绩效输出联系在一起,从信息输入环节预测和评价飞行绩效,为飞行员的绩效评价提供了一种新的客观方法.

本文在评价方法上是一种尝试和探索,模型比较粗略,只是初步地对3类飞行员的绩效进行了预测和评价.如果在实际飞行训练时,将飞行员的眼动数据采集后建立眼动数据库,并不断扩充和完善,建立的模型精度就会越来越高.由于神经网络模型具有"黑箱"性质,飞行绩效和眼动模式之间的相关性关系具有不可解释性,如果能得到一个描述飞行绩效和眼动数据相关性关系的量化模型将更具有现实意义,这是进一步的研究内容.

参考文献(References)

[1] Johnson N R, Rantanen E M. Objective pilot performance measurement: a literature review and taxonomy of metrics [C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Aviation Psychology. Dayton, OH: Wright State University, 2005: 283-288

[2] Kasarskis P, Stehwien J, Hickox J, et al. Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight[EB/OL]. Columbus, OH: The Ohio State University, 2001[2009-03-26]. http://www.humanfactors.illinois.edu/Reports&PapersPDFs/isapol/procedo1.pdf

[3] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2002:1-2
Han Liqun. Atificial neural networks theory, design and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 1-2 (in Chinese)

[4] 柳忠起,袁修干,樊瑜波,等. 模拟飞机着陆飞行中专家和新手眼动行为的对比[J]. 航天医学与医学工程,2009,22(5):358-361
Liu Zhongqi, Yuan Xiugan, Fan Yubo, et al. Comparison of expert and novice eye movement behaviors during simulated landing fligh[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2009, 22(5): 358-361(in Chinese)

[5] 董长虹. Matlab 神经网络与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2007:64-91
Dong Changhong. Matlab neural networks and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 64-91 (in Chinese)

[6] 于同洋. 基于 BP 神经网络的营销风险评估[D]. 武汉:武汉理工大学管理学院,2006:44-45
Yu Tongyang. The study of marketing risk on BP neural network [D]. Wuhan: Management Institute, Wuhan University of Technology, 2006: 44-45(in Chinese)

(编 辑:文丽芳)