

# 飞机位置预测模型的净空区障碍物评定方法

吴 鹏, 种小雷<sup>✉</sup>, 耿 昊

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 运用经纬度转换法对收集的飞参数据进行判读处理,为达到国际民航组织提出的飞行时纵向碰撞概率应小于 $5 \times 10^{-9}$ 的要求,训练 BP 神经网络用以预测飞机空间位置,在观察纵向偏移分布规律的基础上假定其符合极值 I 型分布,选用 K-S 检验法进行验证,结合验证的结论建立碰撞风险模型并对机场净空区的障碍物高度对飞行的影响进行风险评定,本文为新建机场选址中的净空条件评定及现有机场净空区的障碍物管理工作提供了一种新的思路和方法。

**关键词** 机场净空;BP 神经网络;碰撞风险模型

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.04.004

**中图分类号** V35 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)04-0020-05

## An Evaluation Method of Clearance Obstacles Based on the Prediction Model of Aircraft Position

WU Peng, CHONG Xiaolei<sup>✉</sup>, GENG Hao

(Aeronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** On the basis of aircraft coordinates calculated by latitude and longitude conversion, this paper utilizes the BP neural network for predicting the spatial position of aircraft in accordance with the acceptable level of safety  $5 \times 10^{-9}$  put forward by the International Civil Aviation Organization. On the basis of observing the longitudinal deviation distribution law, it is assumed that it conforms to the Gumbel distribution and the K-S test method is used for verification. The verification result is then adopted to build a collision risk model for risk assessment of obstacles height in airport clearance. The paper provides a new way to evaluate clearance condition for selecting airport location and administrate obstacles in airport clearance.

**Key words:** airport clearance; BP neural network; collision risk model

机场净空要求是为了保证飞机飞行安全,在训练航线下方及训练航线两侧一定范围内对地形地物的高度进行限制。国务院、中央军委于 2001 年联合颁布了《军用机场净空规定》,这是现行军用机场净空区划定和管理的主要依据。针对机场净空区障碍物的评定,文献[1~3]基于飞行程序提出了障碍物

限制面的概念;文献[4~6]建立了碰撞风险模型并利用该模型进行净空评定;文献[7]提出了基于不同安全性和碰撞概率的净空评定方法;文献[8~9]利用 GIS 技术进行机场净空评定和障碍物管理;文献[10~11]提出了机场净空区障碍物位置、高程等信息的采集计算方法;文献[12]提出了基于满足博弈

**收稿日期:** 2018-03-07

**作者简介:** 吴 鹏(1994—),男,河北邢台人,硕士生,主要从事机场规划研究。E-mail:15131361026@163.com

**通信作者:** 种小雷(1973—),男,陕西西安人,教授,主要从事机场规划研究。E-mail:kgywxcxl@qq.com

**引用格式:** 吴鹏,种小雷,耿昊.飞机位置预测模型的净空区障碍物评定方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(4):20-24.  
WU Peng, CHONG Xiaolei, GENG Hao. An Evaluation Method of Clearance Obstacles Based on the Prediction Model of Aircraft Position[J].  
Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(4): 20-24.

理论的避让方法。这些研究工作都把关注点放在了净空规格的制定和净空评定技术上,在实际的净空评定中,同一等级机场,虽然位于不同的地理环境,有着不同的飞行航线,但是其障碍物限制要求却是一致的,使得在新建机场选址的净空条件评定和现有机场净空区内的高层建筑物建设批准方面针对性不强,不能直观、有力地说明障碍物对飞行所产生的危险性程度。

## 1 飞机实际运行中空间坐标的获取

建立坐标系如下:以跑道一端中点为原点,  $X$  轴沿跑道中线方向,  $Y$  轴垂直于跑道中线,  $Z$  轴垂直于  $XOY$  平面。利用经纬度转换法的思想编程处理原始飞参数据,解析得到飞机空间坐标,再将飞机空间坐标转换到机场坐标系中。对于飞参中对应时刻缺失的数据,考虑到飞机空中姿态变化的连续性,选用相邻数据进行 3 次样条插值来得到。图 1 为采用经纬度转换法生成的某次飞行的起飞阶段航迹图。

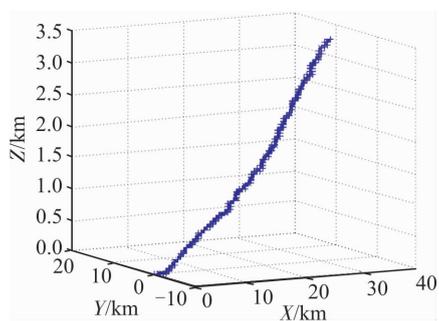


图 1 起飞阶段航迹

Fig. 1 Flight path during takeoff

由于收集的飞参数据显示飞机横向偏移不具有明显的分布规律,现只针对纵向偏移分布规律进行研究。图 2 为采用经纬度转换法处理 27 个飞行架次的飞参数据得到的飞机纵向位置分布图,表示了飞机沿 2 个相反方向起飞时  $XOZ$  平面位置的分布情况,图中  $X$  坐标的取值范围为  $-20$  km 到  $20$  km,即净空区的设定范围。

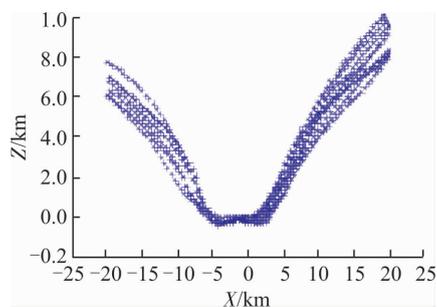


图 2  $XOZ$  平面运动情况

Fig. 2 Movement of  $XOZ$  plane

观察飞机在  $XOZ$  平面的运动情况,判断其具有一定的分布规律。由于机场净空区组成的对称性,只考虑一个方向的飞行情况即可。

## 2 基于神经网络的飞行位置预测模型

在得到飞机运行的数据后,在研究特定  $X$  坐标所对应的  $Z$  坐标的分布情况时发现:由于飞参数据打点的限制,很难得到确定位置的数据,即使通过统计大量数据得到了一定的分布情况,但是相较于国际民航组织提出了飞行器在横向、纵向的安全目标水平  $5 \times 10^{-9}$  [13],数据量仍然过少,于是为了扩大统计数据,增加统计结果的可靠性,本文基于现有数据,采用神经网络法来模拟飞机位置坐标。

### 2.1 BP 神经网络的建立

BP 神经网络是一种多层前馈神经网络,主要特点是信号向前传递,误差反向传播。在前向传递中,输入信号从输入层经隐含层逐层处理,直至输出层。每一层的神经元状态只影响下一层神经元状态。如果输出层得不到期望输出,则转入反向传播,根据预测误差调整网络权值和阈值,从而使 BP 神经网络预测输出不断逼近期望输出。

BP 神经网络虽然在信息、自动化等领域应用十分广泛,但在解决本问题上仍需要将经验与实际情况相结合,对方案进行针对性的优化,在实际仿真中,通过调整隐含层神经元个数  $j$  以及径向基扩展速度  $spread$  的取值等参数来实现训练效果的最优化。图 3 中(a)为实测飞参数据生成的飞机在  $XOZ$  平面的运动图像,(b)为训练生成的运动图像,可以看出与原始数据相比趋势基本一致。

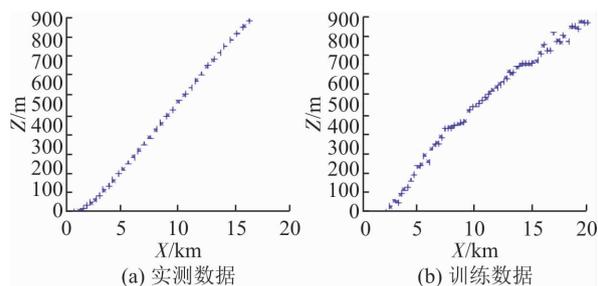


图 3  $XOZ$  平面实测运动情况与预测运动情况对比

Fig. 3 Prediction of movement in  $XOZ$  plane

为防止过拟合情况的发生,神经网络设置了验证集,当验证集与测试目标之间误差连续 6 次上升时,终止训练。图 4 为回归分析,横坐标均代表期望的目标值,纵坐标均代表网络的输出值,左侧公式均代表图中拟合曲线的公式,(a)、(b)、(c)、(d)分别显示了训练集、验证集、测试集及整体回归情况相关系数  $R$  的取值,  $R$  为输入与输出之间的相关性,  $R$  越

接近 0 代表输入与输出之间关系是随机的,  $R$  越接近 1 代表输入与输出之间关系是确定的, 4 部分数据的  $R$  值都较接近于 1, 即各拟合曲线都位于各自图像的对角线位置, 说明训练情况较好。

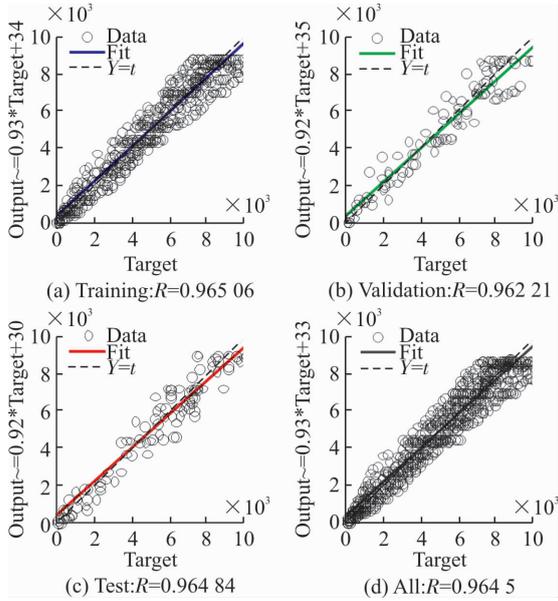


图 4 训练情况分析

Fig. 4 Training analysis

在原始数据量较少的情况下, 选用 BP 神经网络进行数据的训练并进行结果分析, 通过研究内在的对应关系从而确定任一  $X$  坐标所对应的  $Z$  坐标取值, 实现了采用 BP 神经网络对飞参数据进行分析、扩展的可能。

## 2.2 纵向分布假设检验及检验结果统计

采用本文建立的方法, 针对某机场, 收集飞参记录 87 条, 经过经纬度转换法计算, 采用 BP 神经网络仿真, 得到飞机轨迹在端净空区分布情况。从横坐标  $X=1\ 000$  的位置开始, 取  $600\text{ m}$  为 1 个间隔对垂直方向的偏移进行分析, 统计  $Z$  值分布情况,  $X=7\text{ km}$  处对应的  $Z$  值分布直方图如下:

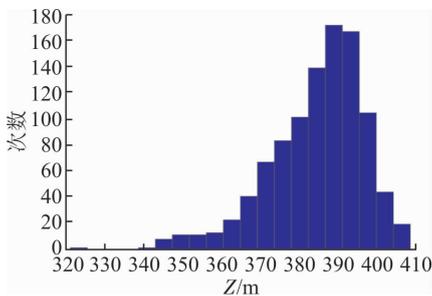


图 5  $X=7\text{ km}$  处对应的  $Z$  值分布

Fig. 5  $Z$  value distribution at  $X=7\text{ km}$

根据对图 5 的分析及飞行实际情况, 假定纵向偏移符合极值 I 型分布, 其分布公式为:

$$F(x, a, b) = \exp\{-\exp[-(x-b)/a]\},$$

$$-\infty < x < +\infty \quad (1)$$

采取概率矩估计法<sup>[14]</sup>对极值 I 型分布的参数  $a, b$  进行估计, 在估计出其参数的基础上采用 K-S 检验法进行验证。不同  $X$  坐标所对应的  $Z$  坐标的均值  $\bar{Z}$ 、标准差  $\sigma_Z$ 、特定  $Z$  坐标所对应的极值分布参数  $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$  及检验结果  $H_0$ 。如表 1 所示。

表 1 不同  $X$  坐标对应的  $Z$  坐标统计情况

Tab. 1 Statistics of  $Z$  for different  $X$

$X$	$\bar{Z}$	$\sigma_Z$	参数 $\hat{b}$	参数 $\hat{a}$	$H_0$
1 000	35.58	5.63	4.15	38.14	1
1 600	66.18	5.58	4.17	68.67	1
2 200	95.49	4.89	3.77	97.65	1
2 800	123.94	5.81	4.66	126.51	1
3 400	156.46	6.80	5.47	159.52	1
4 000	194.54	9.60	7.60	199.07	1
4 600	227.36	10.68	8.32	232.21	1
5 200	271.11	10.83	9.19	276.19	1
5 800	306.26	12.98	10.11	312.11	1
6 400	340.57	14.65	11.25	346.87	1
7 000	385.03	12.42	9.89	390.16	1
7 600	412.69	13.06	10.36	418.51	1
8 200	448.21	13.11	10.05	454.43	1
8 800	482.74	11.59	9.18	487.74	1
9 400	506.21	12.43	10.10	512.45	1
10 000	531.33	11.76	8.82	536.40	1
10 600	548.81	10.68	8.56	553.50	1
11 200	580.32	12.17	9.90	585.63	1

## 3 建立并运用碰撞风险模型进行障碍物评定

### 3.1 碰撞风险模型的建立

碰撞风险模型可用于: 对确定的机场净空环境提供危险计算, 确定其可接受的最小超障高度; 进行新建机场选址中的净空评定工作; 管理净空区障碍物。按图 6 建立碰撞风险模型的坐标系: 将跑道一端中点设为原点,  $X$  轴沿跑道中线方向,  $Y$  轴垂直于跑道中线,  $Z$  轴垂直于  $XOY$  平面, 向上为正方向。该模型将障碍物视为坐标  $(X_k, Y_k, Z_k)$  限定的“桩”型障碍物或坐标  $(X_{k1}, Y_{k1}, Y_{k2}, Z_{k1})$  限定的“墙”型障碍物。当考虑飞机尺寸时, 就将障碍物视为“墙”型。

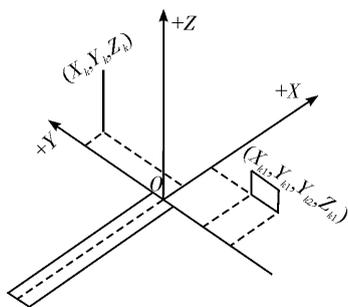


图 6 碰撞风险模型坐标系

Fig. 6 Coordinate system of collision risk model

制作简单障碍物模型。实际情况中多数障碍物构成复杂,无法保证其与进近的航线成直角,并可能沿 X 轴延长相当长一段距离,可以将复杂障碍物分为若干个具有所需形状的简单障碍物。例如,一架在等待位置的飞机可以认为由 2 个“桩”类的障碍物替代:一个代表机头的位置,其为距跑道中心线最近的点,另一个代表垂直尾翼,其为离跑道一端中点标高最高点。图 7 表明了一建筑物如何由一系列“桩”型障碍物替代。

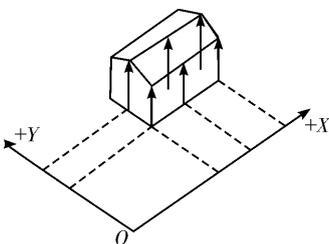


图 7 简单障碍物模型制作

Fig. 7 Simple obstacle model production

制作复杂障碍物模型见图 8。若进行净空评定时发现某一障碍物的精确形状对于评估整体的碰撞风险十分重要,就需要采用复杂的障碍模型制作技术。制作不规则障碍物模型的步骤如下:

- 1) 建立与穿过此障碍物一条边( $Y_1$ )和另一条边( $Y_2$ )的 X 轴平行的线段。这些线段到 X 轴的垂直距离为横向边界尺寸。
- 2) 此障碍物最高点的高度(Z)是从跑道一端中点计算的高。
- 3) 距离(X)为离从障碍物靠近跑道一端中点最近边界点的垂直距离。

此外,在制作复杂障碍物模型时应注意:若障碍物按“桩”的模式制作模型,横向间隔应不大于飞机的翼展;若最远点与障碍物离跑道最近点之差超过 100 m,此障碍物应分成一系列的“墙”型障碍物,其分割距离不小于 100 m,给这种“墙”型障碍物设定的高度,应取跑道一端中点为标高,由此得到的障碍物最高点的高度。

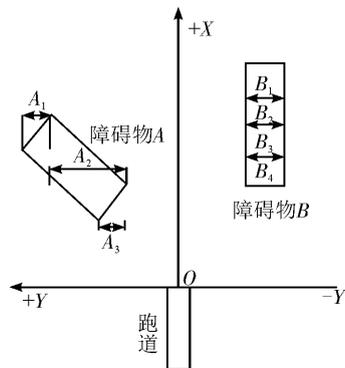


图 8 复杂障碍物模型制作

Fig. 8 Complex obstacle model production

### 3.2 运用碰撞风险模型进行障碍物评定

设  $P(O_k)$  为飞机与障碍物  $k$  发生碰撞概率, $k$  的坐标为  $(x_k, y_{k1}, y_{k2}, z_k)$ ,飞机在 YOZ 平面中的概率密度函数为  $f_{x_k}(y, z)$ ,则  $P(O_k)$  可表示为:

$$P(O_k) = \int_0^{z_k} \int_{y_{k1}}^{y_{k2}} f_{x_k}(y, z) dy dz \quad (2)$$

相关研究表明飞机在飞行过程中,横向、纵向相对于标准航线的偏移可以认为是相互独立的,假设  $g_{x_k}(y)$ 、 $h_{x_k}(z)$  分别代表飞机在横向、纵向的偏移概率密度函数,有:

$$f_{x_k}(y, z) dy dz = g_{x_k}(y) dy h_{x_k}(z) dz \quad (3)$$

则式(2)可表示为:

$$P(O_k) = \int_{y_{k1}}^{y_{k2}} g_{x_k}(y) dy \int_0^{z_k} h_{x_k}(z) dz \quad (4)$$

在进行多障碍物碰撞危险评价时,若相关障碍物之间没有影响,总的碰撞风险等于单个风险的累加和,若相关障碍物之间有遮蔽原则<sup>[15]</sup>的影响,则需对相关障碍物的尺寸进行调整,然后再进行计算,这里先研究不考虑障碍物遮蔽原则的风险评定。

本文主要针对端净空区内的障碍物高度对飞行产生的影响进行风险评定,暂不考虑障碍物的宽度与飞机水平偏移之间的关系,即假定  $g_{x_k}(y) = 1$ ,将式(1)带入式(4)可表示为:

$$P(O_k) = \int_0^{z_k} h_{x_k}(z) dz = \int_0^{z_k} F'(z) dz = \frac{1}{a} \int_0^{z_k} e^{-\frac{z-b}{a}} e^{\frac{z-b}{a}} dz \quad (5)$$

采集飞参数据的机场的端净空区中,拟建造一建筑物  $l$ ,其在机场坐标系中坐标为(10 600, 675.5, 804.3, 120),现计算飞机与该障碍物的碰撞风险:

$$P(O_l) = \frac{1}{a} \int_0^{z_k} e^{-\frac{z-b}{a}} e^{\frac{z-b}{a}} dz = \frac{1}{a} F(z) \Big|_0^{z_k} = \frac{1}{553.50} e^{-\frac{z-8.56}{553.50}} \Big|_0^{120} \quad (6)$$

计算得  $P(O_l) \approx 8.23 \times 10^{-4}$ ,大于国际民航组织提出的  $a = 5 \times 10^{-9}$  的安全目标水平,应不予批准建造。

## 4 结语

本文运用BP神经网络建立了飞机位置预测模型,通过假设检验的方法判定飞机纵向偏移符合极值I型分布,建立碰撞风险模型并结合障碍物实例对飞行的纵向风险进行了评定,经计算得出该障碍物对飞行产生的危险高于要求的水平,应不予批准建造,在下一步的工作中可以结合飞机水平偏移产生的影响更全面地进行评价。本文的工作使得障碍物评定工作更加直观,更加科学,开辟了一种可用于新建机场选址和现有机场净空管理的新方法。

### 参考文献(References):

- [1] International Civil Aviation Organization. Annex 14 to the Convention of International Civil Aviation-Aerodromes, Sixth Edition, Volume I-Aerodrome Design and Operations[Z]. ICAO, 2013.
- [2] 民用航空局. 民用机场飞行区技术标准(MH5001-2013) [S/OL]. (2013-07-31) [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/201511/t20151102\\_7849.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/201511/t20151102_7849.html).  
Civil Aeronautics Board, Technical Standards for Civil Airport Flight Area(MH5001-2013) [S]. (2013-07-31) [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/201511/t20151102\\_7849.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/201511/t20151102_7849.html). (in Chinese)
- [3] AHNERT K., FRICKE H. Redesigning Runway Obstacle Limitation Surfaces in Consideration of Performance Based Navigation[C]//International Symposium on Precision Approach and Performance Based Navigation: ISPA 2013, Berlin, Germany, 2013: 153-158.
- [4] International Civil Aviation Organization (ICAO). Doc. 9274-AN/904, Manual on the Use of the Collision Risk Model(CRM)for ILS Operations[Z]. 1980.
- [5] 周密. 考虑飞行程序的民用机场净空区范围优化研究[D]. 天津:中国民航大学,2015.  
ZHOU M. Consider the Optimization of the Area of Clearance Area of Civil Airfields in Flight Procedures [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015. (in Chinese)
- [6] 刘志浩. 机场净空安全保障水平提升方法研究[D]. 天津:中国民航大学,2016.  
LIU Z H. Study on the Method of Improving the Level of Security of Airport Clearance Security [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016. (in Chinese)
- [7] 种小雷,许金良,蔡良才. 基于不同安全性的机场净空区障碍物管理方法研究[J]. 安全与环境学报, 2009,9(1):151-154.  
CHONG X L, XU J L, CAI L C. On the Methods of Obstructions Management Based on Security in the Airport Clearance Area [J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(1):151-154. (in Chinese)
- [8] LUO C L, CAI L C. Assessment of Military Airfield Obstacle Free Space Based on GIS[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011,28(3):294-299.
- [9] XU M X, CAI L C, SHAO B, et al. 3D Model of Airfield Clearance and A Case Study[C]//Progress in Industrial and Civil Engineering. 2012:1732-1735.
- [10] 丁德亮,蔡良才,李光元,等. 机场净空智能监测仪测距和高程精度分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2012,13(2):20-23.  
DING D L, CAI L C, LI G Y, et al. Analysis of Distance and Elevation Accuracy of Airport Clearance Intelligent Monitors [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 13(2):20-23. (in Chinese)
- [11] 孟凡强,刚慧龙. 机场净空测量的数据处理程序设计与实现[J]. 城市勘测,2017(4):118-121.  
MENG F Q, GANG H L. Data Processing Program Design and Implementation of the Airport Clearance Measurement [J]. Urban Geotechnical Investigation & Survey, 2017(4):118-121. (in Chinese)
- [12] JI X H, ZHANG X J, GUAN X M. A Collision Avoidance Method based on Satisficing Game Theory [C]//4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. 2012: 456-459. (in Chinese)
- [13] LI D B, XU X H, LI X. Target level safety for Chinese airspace [J]. Safety Science, 2009, 47 (3): 421-424.
- [14] 卢安平,赵林,郭增伟,等. 基于 Monte Carlo 法的极值分布类型及其参数估计方法比较[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(2):88-95.  
LU A P, ZHAO L, GUO Z W, et al. A Comparative Study of Extreme Value Distribution and Parameter Estimation based on the Monte Carlo Method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45 (2):88-95. (in Chinese)
- [15] 张瑞军,黄武. 机场净空管理技术研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2009,25(9):169-170.  
ZHANG R J, HUAN W. Research on Airport Clearance Management Technology [J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2009, 25 (9): 169-170. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)