

基于 ANFIS 的球形农业物料 Re^{-C} 关系曲线的拟合

王泽南 张 鹏 尹安东
(合肥工业大学生物与食品工程学院)

摘 要 指出了利用传统的关联式方法求解球形农业物料阻力系数的缺陷, 基于 ANFIS 重新建立模型, 实现了对 Re^{-C} 关系曲线的拟合。利用新方法和传统方法进行计算, 结果表明, 经训练的 ANFIS 能很好的反应 Re^{-C} 之间的函数关系, 利用 Re^{-C} 拟合曲线计算阻力系数是可靠的。

关键词 农业物料; 阻力系数; 雷诺数; Re^{-C} 关系曲线; ANFIS

中图分类号 S 12

Fitting the Equation to Data for Spherical Agricultural Material's Re^{-C} Relation Curve Based on ANFIS

Wang Ze nan, Zhang Peng, Yin Andong

(College of Biology & Food Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract The defects of the traditional method used to solve and calculate the resistance coefficient of spherical agricultural material are pointed out, and the new model, being based on ANFIS, is rebuilt to accomplish the accurate fit of Re^{-C} curve. The comparisons of the new and the traditional method indicated that the trained ANFIS can respectably recur the functional relation between Re and C . It is reliable to get the resistance coefficient with the help of the fit curve.

Key words agricultural material; resistance coefficient; Renault number; Re^{-C} relation curve; ANFIS

在农业物料的气力输送、分离分选及农产品加工等农业工程领域, 物料的临界速度是一个非常重要的流体动力学参数。对农业物料临界速度进行理论计算, 关键是如何准确获得阻力系数 C , C 是一个随流体雷诺数 Re 变化的很复杂的量, 因此寻求 Re^{-C} 的关系又成为问题的核心^[1]。近 3 个世纪以来, Re^{-C} 解析关系的确立在理论上一直没有突破, 只能依赖于实验, 也就是说, 目前确立 Re^{-C} 的关系是依据那些被公认为可靠的但却有限的实验数据(实测点)来进行的, 主要方法是关联式法^[2,3]。不断涌现和推介的 Re^{-C} 关联式有几十种之多, 它们都是以能通过或接近较多的 Re^{-C} 实测点为出发点构造出来的。利用 Re^{-C} 关联式进行阻力系数 C 的求解比较方便, 因此被普遍采用; 但关联式太多, 很难取舍, 简单的关联式误差很大, 误差小的又太复杂, 而且它们大多是分段表示的, 段与段的衔接处误差更大。

新兴的软计算为解决这类不能精确定义的问题提供了有效的途径。神经-模糊系统是一个

收稿日期: 2002-01-28

王泽南, 安徽合肥, 合肥工业大学生物与食品学院, 230009

混合的智能系统,不但具有神经网络容错能力、自适应学习能力强等特点,而且能够像模糊逻辑那样表达模糊或定性的知识,因此具有很强的函数逼近功能^[4,5]。这就为解决上述问题提供了一条新的思路。笔者以 Re^{-C} 实测点为基础,利用已开发的神经-模糊系统完成了 Re^{-C} 关系曲线的拟合,用以求解阻力系数。

1 ANFIS建模与 Re^{-C} 关系曲线拟合

1.1 ANFIS建模

本文中采用的神经-模糊系统为ANFIS(Adaptive-Neuro-based Fuzzy Inference System,自适应神经-模糊推理系统)^[5],是一种从功能上与模糊推理系统等价的自适应网络,在一定条件下能以任意精度逼近任何非线性函数,因此可用于确定 Re^{-C} 之间复杂的映射关系,并实现拟合。

ANFIS采用Sugeno模糊模型,即模糊规则的后件是输入语言变量的函数,典型的情况是输入变量的线性组合。对于本文中的单输入单输出系统来讲,其模糊规则的形式为

$$\text{如果 } x \text{ 是 } A, \text{ 那么 } y = f(x)$$

其中, A 为前件中的模糊集合, x 为输入数据, $y = f(x)$ 为后件中的精确函数, y 为输出。

ANFIS具有5层结构,网络中的各个节点及所有参数均有明显的物理意义,这些参数的初值可以根据系统中模糊或定性的知识来加以确定,然后利用一定的学习算法在训练过程中不断地改变和优化,从而使整个系统可以很快地收敛到要求的输入输出关系。

本文中所有的ANFIS包括11条规则,即给输入变量赋予11个隶属函数,具体形式采用gauss形

$$f(x, \sigma, \lambda) = \exp \frac{(x - \lambda)^2}{2\sigma^2} \quad (1)$$

其中: σ 和 λ 为非线性特征参数。模糊规则后件选用线性函数

$$y = f(x) = ax + b \quad (2)$$

其中: a 和 b 为线性参数。这样,整个系统拟合参数的总数为44个,包括22个前提(非线性)参数和22个结论(线性)参数。学习算法采用最小二乘法和梯度下降法的混合算法,即在学习过程的前向通道中,用最小二乘法辨识结构参数;在反向通道中,用梯度法更新前提参数,以提高收敛速度。由于雷诺数变化范围太广,不便于对其进行处理,因此取雷诺数的常用对数作为系统的实际输入变量。

1.2 Re^{-C} 关系曲线的拟合及 C 值计算

ANFIS的训练样本采用文献[6]推荐的46个原始实测点,这是目前 Re^{-C} 关系研究中普遍采用的数据。利用MATLAB提供的模糊工具箱建立系统模型并进行训练^[7]。

对ANFIS训练次数越多,样本最终误差就越小,本系统取训练次数为2000次。图1给出了训练过程中的均方根误差(RMSE)曲线。训练达2000次时,RMSE值已降到0.00662219,这说明此时ANFIS已经能很好地反应样本点上输入 Re 与输出 C 间的对应关系。为了显示系统更广泛的函数逼近的能力,在 $10^{-1} \sim 10^7$ 范围内取大量的、致密的 Re 值作为输入量进行计算。图2给出了ANFIS输出曲线,即 Re^{-C} 拟合曲线。在曲线上同时显示了46个原始实测点。可以看出,拟合曲线很光滑,由于均方根误差已接近于0,46个实测点都无偏倚地落在曲线

上,说明系统对原始实测点的函数逼近效果很好。图3示出了初始和终止隶属函数。对比图2可以观察到,拟合曲线剧烈变化的区域与隶属函数密集的区域相一致,这也与人类的思维经验相符合。

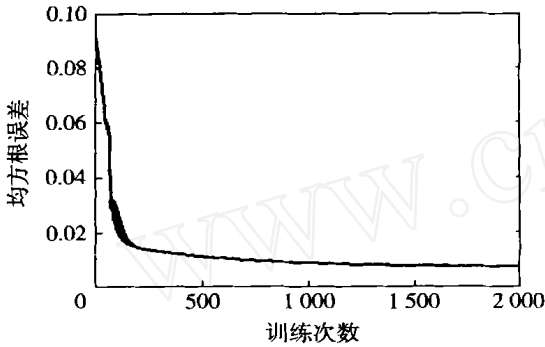


图1 训练过程中的RMSE曲线

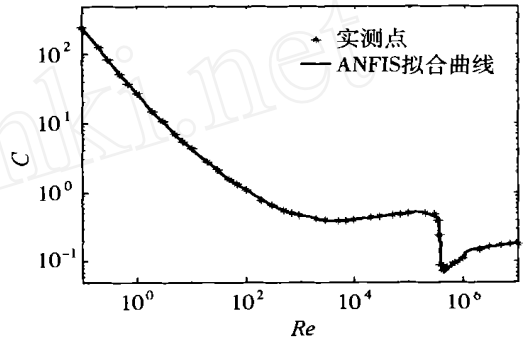
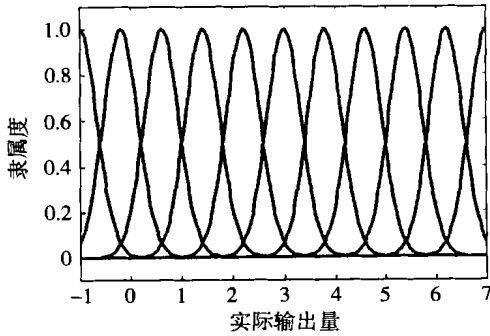
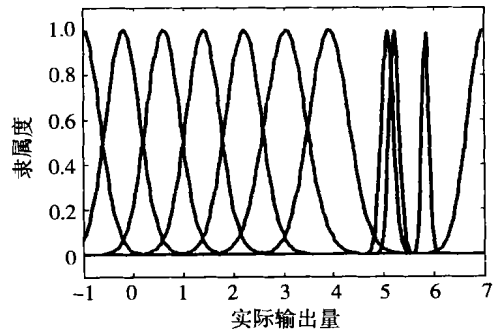


图2 Re^{-C} 拟合曲线



(a) 初始隶属度函数



(b) 终止隶属度函数

图3 隶属度函数

基于ANFIS拟合的 Re^{-C} 关系曲线可用来计算阻力系数 C ,方法是,输入1个雷诺数 Re (具体数值),系统便输出对应的阻力系数 C 。例如,输入: $Re=379$,输出: $C=0.5953$ 。

2 ANFIS与关联式法的比较

图2和以上分析表明,用46个原始实测点来检验拟合的 Re^{-C} 曲线确实是可行的,在没有新的准确的实验数据的情况下,其他任意插值的预测点是否可靠,就无法直接进行检验和判别,当然也不能用各种关联式来检验判别,因此ANFIS方法的优劣无法全面体现。

笔者设计了一种方法来进行误差分析,其基本思想是:ANFIS法中,将每一个实测点经特别处理成为预测点,然后将预测结果与实测数据进行比较。具体做法是:在46个实测点中每次少取1个点,基于ANFIS对45个点重新拟合 Re^{-C} 曲线,拟合方法不变,共拟合出46条各自不尽相同,且与图2也不同的曲线,而后分别在各曲线中将被除去的实测点作为预测点进行阻力系数计算。与此同时用常用的关联式对46个实测点分别进行阻力系数计算。将2种方法所得计算结果与实测值比较,进行误差分析和评判。

由于关联式多是分段的,为便于比较,取最常用,也是最有争议的区域 $0.1 < Re < 1000$ 进

行, 这一区域内共有以上推荐的 46 个实测点中的前 21 个。关联式法选取工程上最常用的 2 个关联式。法 1 取用 Allen 公式, 由式(3)表示; 法 2 取用 Schiller 与 Naumann 公式, 由式(4)表示。其中式(3)表达式简单, 实用区段很窄; 式(4)实用区段较广, 表达式复杂。

$$C = \frac{10}{Re^{0.5}} \quad 2 \leq Re \leq 500 \quad (3)$$

$$C = \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}) \quad Re \geq 800 \quad (4)$$

表 1 示出利用 ANFIS 法与关联式法 1 和法 2 对实测点阻力系数 C 进行的计算及误差分析结果。

表 1 ANFIS 法与关联式法 1 和法 2 计算的实测点阻力系数 C 及误差分析

预测点	Re	C 的 实测值	C 的计算值			C 的偏差值/%		
			ANFIS 法	关联式法 1	关联式法 2	ANFIS 法	关联式法 1	关联式法 2
1	0.1	244.000	235.620		247.401	- 3.430		1.390
2	0.2	124.000	125.620		125.958	1.310		1.580
3	0.3	83.300	82.902		85.248	- 0.480		2.340
4	0.5	51.500	51.100		52.472	- 0.780		1.890
5	0.7	37.600	37.877		38.311	0.740		1.890
6	1	27.200	27.387		27.600	0.690		1.470
7	2	14.800	14.504	7.071	14.898	- 2.000	- 52.220	0.660
8	3	10.500	10.590	5.774	10.553	0.860	- 45.010	0.500
9	5	7.030	7.114	4.472	6.975	1.190	- 36.380	- 0.780
10	7	5.480	5.464	3.780	5.387	- 0.290	- 31.030	- 1.710
11	10	4.260	4.197	3.162	4.151	- 1.480	- 25.770	- 2.560
12	20	2.720	2.738	2.236	2.610	0.660	- 17.790	- 4.060
13	30	2.120	2.141	1.826	2.042	0.990	- 13.880	- 3.700
14	50	1.570	1.565	1.414	1.538	- 0.320	- 9.920	- 2.030
15	70	1.310	1.297	1.195	1.295	- 0.990	- 8.760	- 1.130
16	100	1.090	1.091	1.000	1.092	0.090	- 8.260	0.160
17	200	0.776	0.791	0.707	0.806	1.930	- 8.880	3.820
18	300	0.653	0.651	0.577	0.684	- 0.310	- 11.580	4.730
19	500	0.555	0.542	0.447	0.563	- 2.340	- 19.420	1.380
20	700	0.508	0.509		0.498	0.200		- 2.070
21	1000	0.471	0.483			2.550		
偏差范围/%						- 3.43~ 2.55	- 52.22~ - 8.26	- 4.06~ 4.73
平均偏差/%						- 0.06	- 22.22	- 0.19

由表 1 可见, 利用 ANFIS 拟合的 $Re-C$ 曲线计算样本以外点的阻力系数, 无论偏差范围还是平均偏差都比 2 种关联式法小得多, 这说明 ANFIS 对非样本数据有很强的预测性, 即从

函数拟合的角度,说明ANFIS不仅具有插值功能,而且具有很高的准确度。因此利用训练好的ANFIS对非实验点预测是可信的。

最后,需要说明的是,训练好的ANFIS的输出相对于真实值的精度,与训练样本的数量、分布和精度有关。由于已知数据的限制,所建立的ANFIS都还具有一定的误差,尤其是在 $Re > 10^5$ 时,误差偏大;但它作为一种新的方法,仍然值得推荐,因为整个系统的参数是可调的,且具有自学习、自适应的能力,所以当有更多、更准确的实验数据出现的时候,可以对系统进行再训练,以达到更好的效果。

参 考 文 献

- 1 赵学笃,陈元生,张守勤 农业物料学 北京:机械工业出版社,1987. 76~ 80
- 2 周乃如,朱凤德 气力输送原理与设计计算 郑州:河南科技出版社,1981. 115~ 119
- 3 王宝和,王喜忠 计算球形颗粒自由沉降速度的一种新方法 粉体技术,1996(2): 30~ 39
- 4 孙增圻,张再兴,邓志东 智能控制理论与技术 北京:清华大学出版社,1997. 169~ 187
- 5 张智星,孙春在,水谷英二著 神经-模糊与软计算 张平安,高春华,等译 西安:西安交通大学出版社,2000. 238~ 262
- 6 Perry J H 著 Perry 化学工程手册(上). 北京:化学工业出版社,1992. 117~ 118
- 7 楼顺天,胡昌华,张伟 基于MATLAB的系统分析与设计——模糊系统 西安:西安电子科技大学出版社,2001. 91~ 102