

文章编号: 1000-8055(2008)04-0693-06

基于小波神经网络的无叶扩压器失速分析

高 闯, 谷传纲, 王 彤, 舒信伟

(上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 用来自不同文献的实验数据作为样本, 对小波神经网络进行训练, 并利用训练好的神经网络研究叶轮和扩压器几何尺寸对无叶扩压器失速的影响. 计算分析结果表明: 几何尺寸对于宽、窄扩压器失速的影响表现不同, 这也证明了不同宽度的扩压器的确存在不同的失速机理. 文章的结果, 对无叶扩压器的设计具有一定的借鉴意义.

关 键 词: 无叶扩压器; 旋转失速; 小波神经网络; 失速机理

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Analysis of stall in vaneless diffuser based on wavelet neural network

GAO Chuang, GU Chuangang, WANG Tong, SHU Xirwei

(Key Laboratory of Power Machinery and Engineering of Ministry Education,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Wavelet neural network (WNN) was trained with experimental data collected from a variety of literature and then was utilized to study influences of geometries of impeller and diffuser on rotating stall in vaneless diffuser, and the results were presented in graphs. Results show that diffusers with different width ratios exhibit distinct responses to geometry variation, proving that different stall mechanisms exist for wide diffuser and narrow diffuser. The conclusions provide reference to the design of vaneless diffuser.

Key words: vaneless diffuser; rotating stall; wavelet neural network (WNN); stall mechanism

离心压缩机广泛应用于冶金、石油、化工和动力等工业部门, 在国民经济中占有重要地位. 在实际运行过程中, 考虑到安全因素, 运行点总是远离喘振线, 这样就使得压缩机有效工作范围变窄. 旋转失速和喘振是离心压缩机在小流量下出现的两种不同气动不稳定现象, 而无叶扩压器则是可能导致这些不稳定现象的主要通流部件之一. 由较大正冲角而引起的流动分离被认为是引起叶轮和有叶扩压器失速的原因^[1]. 而关于无叶扩压器的失速机理目前尚无一致观点. 多年来, 许多学者对于无叶扩压器的失速进行了实验和理论的研究,

这些研究主要专注于以下几个方面: 无叶扩压器内部的旋转流动形式^[1-2]; 预测失速起始和失速团旋转速度^[3-5]; 失速中流动波动情况^[6-7]; 无叶扩压器失速的主动和被动控制^[8-9]; 影响无叶扩压器失速的因素^[10-13]. 尽管如此, 无叶扩压器的失速机理和影响起始的因素仍存在不同的甚至相互矛盾的观点. 关于无叶扩压器失速机理的解释, 主要有两种: Jansen^[4]认为扩压器壁面上形成的附面层分离是引起失速的原因; Tsujimoto^[13]认为扩压器内部的势流核心区才是引起失速的原因. 此外, 在影响失速的因素上, Senoo Y^[12] 和 Jansen^[4] 在扩

收稿日期: 2007-04-02; 修订日期: 2007-07-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划 863 项目(2006AA05Z250); 国家自然科学基金项目资助(50776056)

作者简介: 高闯(1982), 男, 江苏宿迁人, 博士生, 主要研究叶轮机械非稳定性.

压器宽度比对失速临界角的影响上持相反观点, Tsujimoto^[13]认为叶轮对无叶扩压器的失速几乎没有影响,而 Ljevar S^[14]的数值结果表明叶轮的叶片数对扩压器失速具有很大的影响,等等. 由此可见,关于扩压器内部失速的问题进一步研究十分必要.

对于内部机理尚不清楚的黑盒问题,可以采用神经网络进行研究. 广泛采用的神经网络主要有基于 Sigmoid 函数的 BP 网络和基于径向基函数的 RBP 网络,然而 BP 网络具有收敛速度慢和容易陷入局部最小解的缺点; RBP 网络无局部最小解的问题,但是其隐层节点的中心难求. 小波神经网络是小波分析和神经网络发展到一定阶段后,二者结合的产物. 采用小波函数作为基函数优势明显: 首先小波函数可以是正交的,可以保证逼近函数表达式的一致性; 其次,对不同的逼近函数,小波函数可以有更广泛的选择; 最后小波函数具有对突变函数逐步精细的描述特征,使得逼近效果更好,这是 RBP 网络所不具备的. 本文尝试采用小波神经网络建立扩压器失速的神经网络模型,并利用训练好的小波神经网络对影响扩压器失速的因素进行了系统的研究. 理论分析结果和文献对比表明了神经网络的可行性,同时分析结果也对无叶扩压器的设计具有一定的借鉴意义.

1 学习算法和神经网络的拓扑结构

小波分析方法是一种窗口形状固定,但是大小可变的方法. 这样就使得在低频时候,小波变换时间分辨率较低而频率分辨率较高. 在高频的时候,小波变换的时间分辨率较高而频率分辨率较低. 小波基函数可以通过母函数进行一系列的伸缩和平移变换后产生.

1.1 小波神经网络的拓扑结构

小波神经网络是以小波函数为基函数的前馈神经网络. 采用多输入多输出的小波神经网络基本结构如图 1.

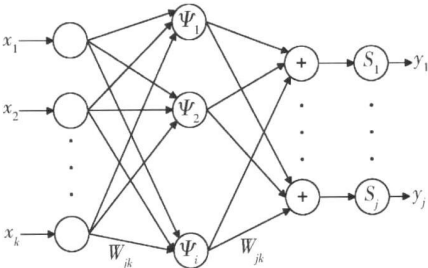


图 1 小波神经网络结构

Fig. 1 Structure of wavelet neural network

输出表示为

$$y_j = S \left[\sum_{i=0}^N W_{ij} \Phi_{a_i, b_i} \left(\sum_{k=0}^m W_{ki} x_k \right) \right] \quad (1)$$

式中 $i=1, \dots, N$, S 为 Sigmoid 函数; Φ 为小波母函数; a_i, b_i 为小波变换系数; x_k 表示输入层第 k 个输入样本; y_j 表示输出层的第 j 个输出值; W_{ij} 为连接输出层结点 i 和隐层结点 j 的权重; W_{ki} 为连接隐层结点 i 和输入层结点 k 的权重; M, N 分别表示输入层和输出层结点数. 本神经网络主要是研究叶轮和扩压器几何尺寸如何影响失速的起始以及和失速团相关的特征,即失速团数及其相对于叶轮的转速. 神经网络有三层: 输入层有 5 个节点,分别是无叶扩压器进出口半径比 r_3/r_2 , 叶轮叶片数 N_b , 从径向算起的叶片出口角度 β_{2A} , 叶轮转速 w_i , 无叶扩压器宽度比 b/r_2 ; 输入层有 3 个节点,分别是失速团转速和叶轮转速的比值 Ω_{ss} , 切向算起的失速临界角 α_{cr} , 失速团数目 m . 隐层节点经反复尝试选取为 18 个.

1.2 误差函数的选择和学习算法

假设 x_p^k 是第 p 个输入模式, y_i^p 是第 p 个输入模式第 i 个实际输出, d_i^p 是第 p 个输入模式的第 i 个目标输出. 神经网络中较常采用的误差函数是均方误差函数,但是由于该函数是权值的多维超平面,平面上存在较多的“平坦”区域和局部最小值的“沟谷”,影响网络的收敛速度甚至不收敛. 1992 年, Karayiannis^[15]提出了熵误差函数,以解决传统误差函数训练中的假饱和现象,具体形式为

$$E = \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^N [d_i^p \ln y_i^p + (1 - d_i^p) \ln (1 - y_i^p)] \quad (2)$$

但是该式子的最优值不是 0,同时其给出的误差函数信号过于强烈,常导致过学习现象,因此 Oh S H^[16]在 1997 年参照香农的信息熵定义,对此进行修正,得到的误差函数如下:

$$E = - \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^N \left[d_i^p \ln \frac{y_i^p}{d_i^p} + (1 - d_i^p) \ln \frac{1 - y_i^p}{1 - d_i^p} \right] \quad (3)$$

但是其速度仍然是一阶的,为此作者采用均方误差函数^[17],定义如下

$$E = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^N \left[d_i^p \ln \frac{y_i^p}{d_i^p} + (1 - d_i^p) \ln \frac{1 - y_i^p}{1 - d_i^p} \right] \right\}^2 \quad (4)$$

求导即可证明该函数在精确值下最小值为 0.

神经网络的连接权重和小波因子按修改 BP 网络的动量法更新. 小波母函数选取 Morlet 函

数. 样本数据训练前先进行归一化处理, 使输入值位于区间[0, 1]. b_i 初值为(− 1, 1) 之间随机值, a_i, W_{ij}, W_{ki} 为(− 0.5, 0.5) 之间随机值.

2 神经网络数据的搜集和结果检验

2.1 数据搜集和处理

为了对神经网络进行成功训练, 必需搜集尽可能多的训练样本. 较好的训练样本应该既包含一般情况, 也包含特例和边界条件等. 对于本文问题, 数据收集遵循以下原则:

(1) 只搜集文献中的实验数据, 理论分析作为参考用. 相关有量纲物理量, 按照统一方式处理为无量纲量;

(2) 将实验数据分为两大类, 一类作为训练数据, 一类作为检验数据. 选择数据尽可能具有代表性, 覆盖范围大, 减小网络的局限性.

样本数据来自于文献[1-3, 5-8, 10-11, 18-19]. 训练集中一共有 37 个样本, 检验集中有 8 个样本, 二者没有重复.

2.2 神经网络的检验

经过 8 000 次迭代之后, 误差达到收敛标准, 为方便比较, 归一化输出被重新整理. 检验样本来自文献[18](N_b : 8, β_{2A} : 27°, w_i : 4 998 r/min), 比较结果见表 1.

表中, 失速团数目是将神经网络的输出结果按照四舍五入进行圆整, 横线表示文献中没有提供临界角的实验结果, 理论计算方法可参照文献[4].

总体而言, 小波神经网络的预测结果和实验结果还是比较吻合的, 其有效性得到了验证.

3 影响扩压器失速起始的因素分析

为了分析几何因素对失速的影响, 从训练集中选取了两组具有代表性的数据: 文献[1], 代表宽扩压器; 文献[3], 代表窄扩压器. 下面的分析都是基于这两组数据.

3.1 叶片数目的影响

除了 Ljevar S^[14] 之外, 几乎没有文献研究叶片数目对失速的影响. 为此, 首先将两个选定样本的其他几何参数保持不变, 改变叶片数目, 由图 2 可以发现: 叶片数目对于窄扩压器的影响很大, 而对于宽扩压器几乎没有影响.

表 1 小波神经网络验证

Table 1 Validation of wavelet neural network

扩压器参数	输出参数	实验数据	WNN 数据
$r_3/r_2=1.55$ $b/r_2=0.076$	Ω_{rs}	0.354 1	0.383
	m	2	2
	$\alpha_{cr}/(^{\circ})$	—	14.6
$r_3/r_2=1.55$ $b/r_2=0.09$	Ω_{rs}	0.336 1	0.361 0
	m	1	1
	$\alpha_{cr}/(^{\circ})$	—	11.5
$r_3/r_2=1.55$ $b/r_2=0.108$	Ω_{rs}	0.324 1	0.342 9
	m	1	1
	$\alpha_{cr}/(^{\circ})$	—	10.3
$r_3/r_2=1.55$ $b/r_2=0.126$	Ω_{rs}	0.312 1	0.290 2
	m	1	2
	$\alpha_{cr}/(^{\circ})$	—	8.43
$r_3/r_2=1.83$ $b/r_2=0.076$	Ω_{rs}	0.270 1	0.287 2
	m	2	1
	$\alpha_{cr}/(^{\circ})$	—	19.6
$r_3/r_2=1.83$ $b/r_2=0.09$	Ω_{rs}	0.264 1	0.271 5
	m	1	1
	$\alpha_{cr}/(^{\circ})$	—	17.7
$r_3/r_2=1.83$ $b/r_2=0.108$	Ω_{rs}	0.264 1	0.255 0
	m	1	1
	$\alpha_{cr}/(^{\circ})$	—	14.5
$r_3/r_2=1.73$ $b/r_2=0.126$	Ω_{rs}	0.246 1	0.239 8
	m	2	2
	$\alpha_{cr}/(^{\circ})$	—	13.4

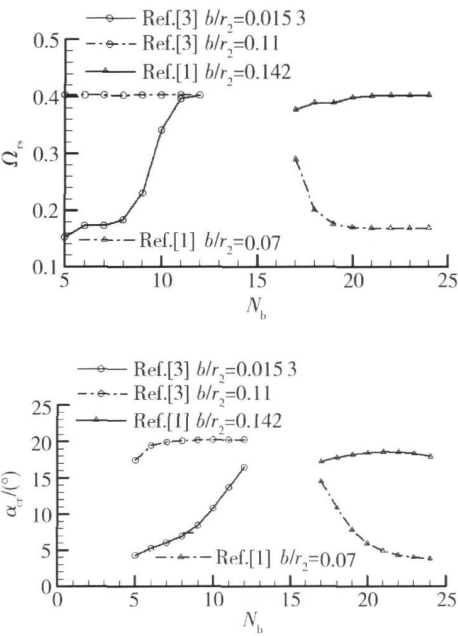


图 2 叶片数目的影响

Fig. 2 Effects of blade number

为了进一步说明问题,将窄扩压器的 b/r_2 逐渐增大,宽扩压器的 b/r_2 逐渐减小,叶片数的变化范围保持不变.结果发现,当窄扩压器的 b/r_2 增加到 0.11 时,叶片数对临界角的影响几乎可以忽略不计;而当宽扩压器的宽度减小到 0.07 时,叶片数的影响显著起来.由此可见,叶片数目对宽窄扩压器呈现不同的影响,按照宽度比 b/r_2 来分的话,宽窄扩压器的分界线应该在 0.7~0.11 之间,和文献[14]提出 0.1 的结果吻合.上述分析结果说明,宽、窄不同的无叶扩压器的确存在不同的失速机理.

3.2 叶片出口角的影响

图 3 分别给出了失速团旋转速度,失速团数目以及临界角随着叶片出口角的变化图.可以发

现增加叶片出口角度,对扩压器的稳定性有利,同时还可以降低失速团的旋转速度.同样,叶片出口角对于宽窄扩压器的影响也不相同.但是却没有一定的趋势.对于相同的叶轮转速而言,后弯角越大的叶轮,叶片出口气流角越大,则不容易失稳.同时关于系统稳定性增加的原因,还可以通过系统特性曲线来解释:增加叶片出口角,可以使得叶轮的特性曲线负斜率更大,可以补偿扩压器的正斜率,使得系统的特性曲线斜率为负,这样就使得扩压器在较小流动角下,仍可以保持稳定流动.

3.3 叶轮旋转速度的影响

叶轮旋转速度对于失速特性的影响见图 4.由于失速团数目基本不受叶轮转速的影响,没有给出该图.图中可以看出,对于 $b/r_2=0.142$ 的宽扩压器而言,转速的增加使得其临界角减小了 6° ;而对于 $b/r_2=0.0153$ 的窄扩压器,转速对临界角几乎没有影响,由于改变叶轮转速相当于改变扩压器进口雷诺数,文章的结论和文献[12]的结论完全一致.

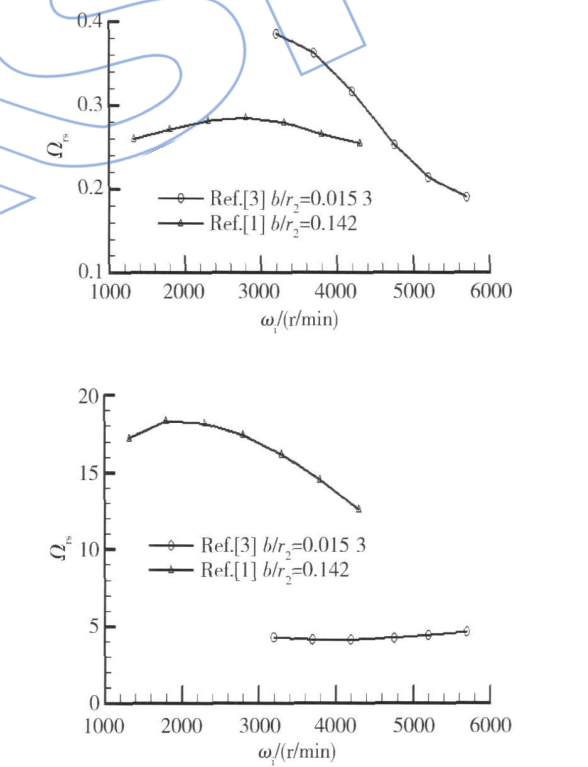


图 4 叶轮旋转速度的影响

Fig. 4 Effects of impeller rotational speed

3.4 扩压器宽度比的影响

图 5 给出了扩压器宽度比 b/r_2 对失速团速度和临界角影响.

图中可以看出,临界角随着宽度比的增加而

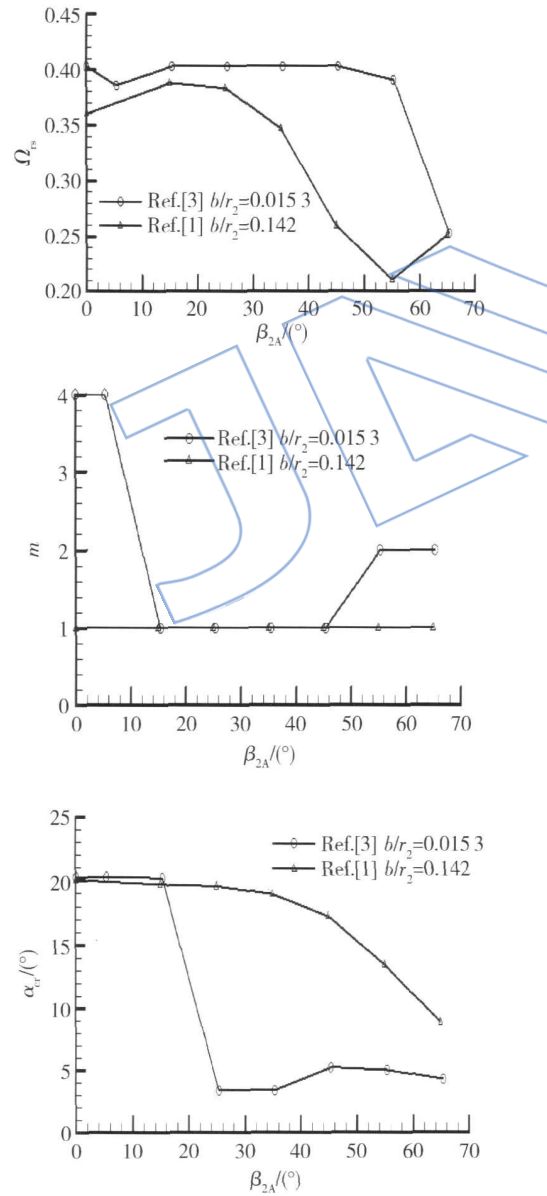


图 3 叶片出口角的影响

Fig. 3 Effects of blade exit angle

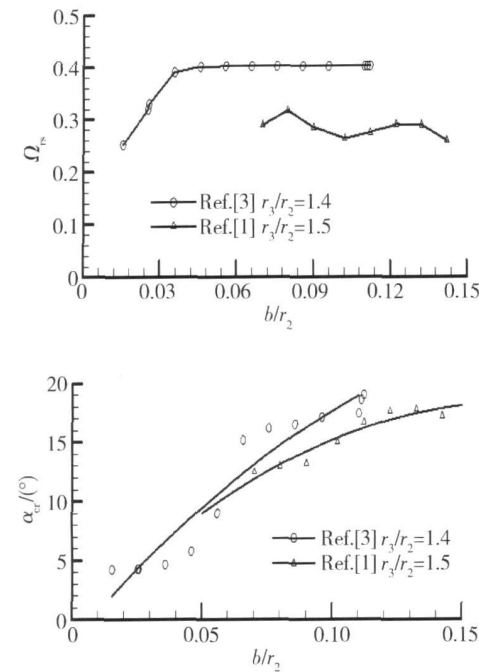


图 5 扩压器宽度比的影响

Fig. 5 Effects of diffuser width ratio

增加. 换句话说就是, 降低宽度比, 对扩压器的宽度有利, 尽管这一结论和 Jansen^[4]的结果吻合得很好, 但是却和表 1 中数据以及 Abidogun^[7]的结论相反. 这说明一定还有其他因素影响着扩压器的稳定性, 由于 Abidogun^[7]和 Jansen^[4]以及表 1 中研究扩压器的半径比不同, 可以推测半径比应该是影响临界角的另一因素.

3.5 扩压器半径比的影响

图 6 给出了扩压器宽度比对失速团速度和临

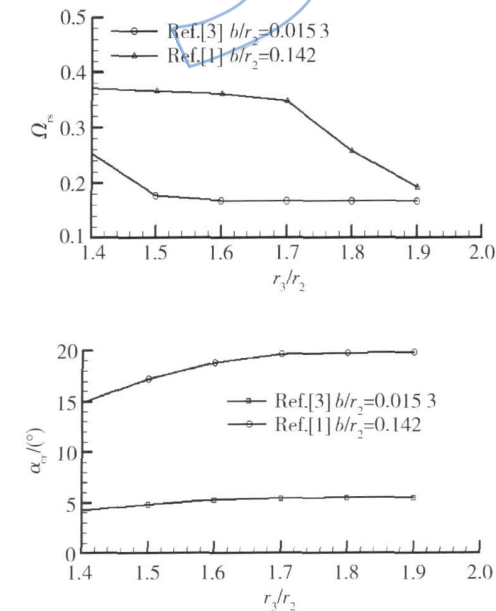


图 6 扩压器半径比的影响

Fig. 6 Effects of diffuser radius ratio

界角的影响. 可以看出对于 $b/r_2 = 0.0153$ 的扩压器而言, 半径比改变几乎对临界角没有影响; 而对 $b/r_2 = 0.142$ 的扩压器而言, 临界角随着半径比增大而增大, 这就意味着, 对于宽扩压器而言, 增加扩压器长度容易使扩压器失稳.

这一结论与 Senoo^[12]较为吻合.

4 结 论

小波神经网络被用来研究叶轮和扩压器几何形状对失速起始的影响. 所得到结果总结如下:

- (1) 同一参数对于具有不同宽度比的扩压器影响表现不一, 这样差异证明了对于宽、窄扩压器的确存在不同的失速机理;
- (2) 除了叶片出口角之外, 其余四个参数对失速团的数目均没有明显影响;
- (3) 叶片数对于窄扩压器的稳定性和失速团速度影响较大;
- (4) 增加叶片出口角可以降低失速团速度, 同时对稳定性有利;
- (5) 增加叶轮的转速可以减小宽扩压器的失速临界角, 而对窄扩压器没有影响;
- (6) 宽度比对于失速团速度没有影响, 而宽度比减小对扩压器的稳定有利;
- (7) 半径比越大, 失速团的旋转速度越小, 对于宽扩压器而言, 减小半径比有利于扩压器稳定, 窄扩压器稳定性几乎不受半径比的影响.

致 谢 本文工作得到国家 863 计划先进能源领域专题目标导向类课题“叶片式流体机械先进节能设计技术及应用”(No. 2006 AA05Z250)以及国家自然科学基金项目(No. 50776056)资助. 在此向基金委员会表示衷心感谢.

感谢比利时冯·卡门流体动力研究所(Von Karman Institute for Fluid Dynmics) R. A. Van Den Braembussche 教授提供相关文献数据及对失速问题的探讨.

参考文献:

[1] Otugen M V, So R M C. Diffuser stall and rotating zones of separated boundary layer[J]. Experiments in Fluids, 1998, 6: 521-533.

[2] Shin Y H, Kim K H, Son B J. An experimental study on the development of a reverse flow zone in a vaneless diffuser[J]. JSME International Journal, Series B, 1998, 41(3): 546-555.

[3] Kinoshita Y, Senoo Y. Rotating stall induced in vaneless diffusers of very low specific speed centrifugal blowers

- [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1985, 107(3): 514-519.
- [4] Jansen W. Rotating stall in a radial vaneless diffuser[J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1964, 86(4): 750-758.
- [5] Tsurusaki H, Kensaku I, Ryo M. A study on the rotating stall in vaneless diffusers of centrifugal fans[J]. JSME International, Series B, 1987, 30(260): 279-287.
- [6] Frigne P, Van Den Braembussche R. Distinction between different types of impeller and diffuser rotating stall in centrifugal compressor with vaneless diffuser[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(3): 468-474.
- [7] Abidogun K B. An experimental investigation of stall characteristics in vaneless diffusers[D]. Dhahran, Saudi Arabia: Mechanical Engineering Department, King Fahd University of Petroleum and Minerals, 2000.
- [8] Abdelhamid A N. A new technique for stabilizing the flow and improving the performance of vaneless radial diffusers [J], ASME Journal of Turbomachinery, 1987, 109(1): 36-40.
- [9] Tsurusaki H, Kinoshita T. Flow control of rotating stall in a vaneless diffuser[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(1): 281-286.
- [10] Abdelhamid A N. Effects of vaneless diffuser geometry on flow instability in centrifugal compressor systems[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 1983, 29(3): 259-266.
- [11] DAI Zhengyuan, GU Chuangang, WANG Tong, et al. Decision of sample sizes in experiments of turbulente flow based on wavelet analysis[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 18(3): 324-328.
- [12] Senoo Y, Kinoshita Y. Influence of inlet flow conditions and geometries of centrifugal vaneless diffusers on critical flow angle for reverse flow [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1977, 99(1): 98-103.
- [13] Tsujimoto Y, Yoshida Y, Mori Y. Study of vaneless diffuser rotating stall based on two dimensional inviscid flow analysis[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1996, 125(2): 123-127.
- [14] Ljevar S, Lange H C D, Van Steenhoven A A. Rotating stall characteristics in a wide vaneless diffuser[C] // Proc. of ASME Turbo Expo 2005, Nevada, USA: Reno-Tahoe.
- [15] Karayannis N B, Venetsanopoulos A N. Fast learning algorithms for neural networks[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1992, 39(7): 453-474.
- [16] Oh S H. Improving the error back propagation algorithm with a modified error function[J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1997, 8(3): 799-803.
- [17] 徐晋. 基于熵方误差的NL2SOL 前馈神经网络[J]. 武汉大学学报, 2004, 37(6): 55-58.
- XU Jin. NL2SOL feed forward neural network based on entropy square error function[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2004, 37(6): 55-58 (in Chinese).
- [18] Abdelhamid A N, Bertrand J. Distinction between two types of self-excited gas oscillation in vaneless radial diffusers[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 1980, 26(2): 105-117.
- [19] Van Den Braembussche R, Frigne P, Roustan M. Rotating nonuniform flow in radial compressors[R]. AGARD CP 282, 1980.