

基于 Elman 的荧光油膜厚度近效测量

钱泓江^{1,2}, 董秀成¹, 张征宇³, 徐柳烺¹, 王 超¹

(1. 西华大学 电气与电子信息学院, 四川 成都 610039;

2. 四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610065;

3. 中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 为解决荧光油膜灰度与厚度现标定方法(微小高度装置法)存在采集工况复杂、标定周期较长等缺陷,提出了一种新的近效测量方法,该方法只需极少量标定数据,便可达到与现标定方法相近的效果。近效方法利用了 Elman 动态神经网络对小样本数据进行量程扩展并引入一维插值算法使扩展后的数据项平滑,对解算出的三维荧光油膜厚度数据采用二维插值算法进行二次平滑以求得完整的厚度分布图。经模拟试验结果显示,通过该近效方法进行厚度测量最终可以清晰、准确、定量地显示荧光油膜厚度分布,与目前广泛使用的微小高度装置法相比效果相近,在荧光油膜汇集处(较厚区域)误差最大不超过 $\pm 2.5 \mu\text{m}$,在平滑适中及较薄区域误差不超过 $\pm 2 \mu\text{m}$,达到荧光油膜厚度工程测量标准,为飞行器全局摩擦阻测量提供了一种新标定思路,具有一定的实际工程应用意义。

关 键 词: 摩擦阻力; 油膜厚度; 荧光油膜; 量程扩展; 插值

中图分类号: V19

文献标志码: A

Fluorescent oil film thickness approximate efficiency measurement based on Elman

QIAN Hongjiang^{1,2}, DONG Xiucheng¹, ZHANG Zhengyu³, XU Yeting¹, WANG Chao¹

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information,

Xihua University, Chengdu Sichuan 610039, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China;

3. High Speed Aerodynamics Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: To address the shortcomings of the current calibration method for fluorescent oil film grey scale and thickness (tiny height device method) with complex acquisition conditions and a long calibration period, an approximate measurement method was proposed, by which only a very small amount of calibration data were required to achieve similar results to the current calibration method. The Elman dynamic neural network was used to extend the range of the small sample data and a one-dimensional interpolation algorithm was introduced to smooth the extended data items. The solved 3D fluorescent oil film thickness data were smoothed twice using a two-dimensional interpolation algorithm to obtain a

收稿日期: 2022-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(11872069, 11872259); 国家科技重大专项(2019-IV-0010);

四川省中央引导地方科技发展专项(2021ZYD0034)

作者简介: 钱泓江(1997—), 男, 博士生, 主要从事航空航天力学与工程、机器学习研究。

通信作者: 董秀成(1963—), 男, 教授, 硕士, 主要从事机器视觉研究。E-mail: dxc136@163.com

引用格式: 钱泓江, 董秀成, 张征宇, 等. 基于 Elman 的荧光油膜厚度近效测量[J]. 航空动力学报, 2023, 38(3): 558-568. QIAN Hongjiang, DONG Xiucheng, ZHANG Zhengyu, et al. Fluorescent oil film thickness approximate efficiency measurement based on Elman[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(3): 558-568.

complete thickness distribution. The simulation results showed that the thickness measurement by this near-efficient method can finally display the fluorescent oil film thickness distribution clearly, accurately and quantitatively, and the effect was similar to that of the currently widely used tiny height device method, with the maximum error not exceeding $\pm 2.5 \mu\text{m}$ at the pool of fluorescent oil film (thicker area), and not exceeding $\pm 2 \mu\text{m}$ in the smooth and moderate and thinner area; hence the engineering measurement standard of fluorescent oil film thickness could be met. It provides a calibration idea for the global friction measurement of aircraft, and has certain practical engineering application significance.

Keywords: friction; oil film thickness; fluorescent oil film; range extension; interpolation

表面摩擦阻力(简称表面摩阻)是空气动力学中最为重要的物理量之一,降低摩阻意味着飞行器油耗减少和续航时长增加,且对高超声速飞行器还意味着气动热流降低,隔热材质质量减少,有效载荷增加^[1-2]。有效进行飞行器减阻设计的关键在于表面摩阻的准确测量,研究表明每降低飞行器的 1% 摩阻,燃油损耗和碳排放量则会减少 0.625% 左右^[3-4]。我国是众多航空大国之一,据国内官方统计,2019 全年我国航空燃油消费量高达 3 684 万吨,已成为全球第二大航空燃油消费国,燃油消费已成为我国消费经济的重要组成部分,而未来 5 年,我国航空业仍将处于上升期,预计 2025 年我国航空燃油消费量将突破 5 000 万吨大关,由此可见,降低摩阻使航空燃油高效使用刻不容缓^[5-7]。

高精度的飞行器表面摩阻测量技术在航空航天领域的减阻研究与设计不可或缺。虽 Preston、Stanton 管摩阻测量法已较为成熟,但几何外形、气流夹角、刀刃厚度与距离壁面高度的比值等因素都对该方法精度有较大影响^[8],且标定使用不易;热膜、热线法在未来存在较大发展潜力,但该方法在实际检测中很难获得摩阻与热交换之间的精确校准模型,同时还存在温漂现象造成失真^[9];目前新兴的基于微机电技术摩擦天平测量法作为一种表面摩阻直接测量仪器而得到广泛应用,但其空间分辨率低、制造成本巨大等缺点也十分显著,且实际风洞试验中如何解耦合成作用力也是较为复杂的难题^[10-11];而激光多普勒测量法则是利用粒子通过具有条纹光线的黏性底层时散射而产生的多普勒效应,该方法在距离壁面小范围内有较高精度,但也面临较难加工出适用于高雷诺数的湍流边界层传感器、发散场和接受场的交点位于边界层的黏性底层等问题^[12]。

Liu 等于 2008 年提出的基于荧光油膜的全局摩阻测量法^[13-14],较传统测量方法而言具有操作

简易、设备简单、空间分辨率高、对被测物面无特殊要求、运算速度快、解算精度高等系列优点,已成为现目前测量全局表面摩阻的国际主流方法。该方法将硅油与荧光分子按特定比例混合,其受紫外光照射可激发出更长波段可见光,该可见光亮度(灰度)与油膜厚度成正比,将其代入荧光油膜控制方程可得到在表面摩阻、压力梯度、自身体积力和表面张力影响因素下油膜厚度值的连续时空变化,该模型提供了理论基础,但还无法直接用于工程测量中。2011 年由李鹏等^[15]将荧光油膜灰度与厚度线性方程引入相对表面剪切力模型,得出相对剪切力与成像平面灰度分布间的映射模型,为进行全局剪切力直接测量方法的研究和建立求解模型提供了有利的基础,并提供了荧光油膜灰度与厚度传统标定方法,他们通过用盖玻片和载玻片等高透光光学玻璃构成斜面来进行荧光油膜灰度、厚度标定数据的采集,并初步验证了近似线性关系的正确性。2016 年黄湛^[16]探索了全局摩阻分布的直接测量方法,并采用变分迭代法求解了表面摩阻分布,验证了全局摩阻直接测量方法的有效性。2019 年邹易峰等^[17]提出了风洞背景下试验模型的荧光油膜路径速度解耦方法,并基于模型运动的连续性,推导了映射矩阵的全局优化方程,实现油膜路径速度的高精度测量。

目前使用广泛的荧光油膜灰度与厚度标定方法采用了微小高度采集装置^[1, 3, 6, 16, 18],该装置依赖光学材料构造特定几何模型以匹配荧光油膜灰度值与厚度值,但该方法存在标定试验工况复杂、采集工序繁琐、耗时耗力等问题,整体拉长了全局摩阻测量的试验周期。为优化此问题,本文提出了一种近效测量方法,即直接通过丝印的方式对荧光油膜进行均匀印刷,再由基恩士非接触式测厚仪进行间接测厚以完成荧光油膜灰度与厚度值数据采集工作。但该近效测量方法存在丝印材

料有限导致标定图像较少的小样本局限性,即为保证生产的丝印材料达到工业级标准,丝印材料的制作存在一定厚度阈值以及受到机床工艺精度限制。为克服此局限性,综合考虑本文采用了比反向传播神经网络(back propagation, BP)、径向基函数(radial basis function, RBF)、极限学习机(extreme learning machines, ELM)等方法建模精度更高的 Elman 动态神经网络^[19-21]来对该小样本数据建立预测模型以实现量程扩展并保持了较高的精度,且引入工程测量常用的一维插值算法来使扩展后的数据项平滑;对基于被测图片进行测量解算得到三维厚度数据图采用二维插值算法进行二次平滑以解算出完整的三维厚度分布图。最后经模拟风洞试验结果显示,本文所提出的近效测量方法可以清晰、定量地显示荧光油膜厚度分布情况,与目前广泛使用的微小高度装置法相比效果相近,厚度测量误差在荧光油膜厚度工程测量范围以内,达到领域测量标准,为荧光油膜灰度与厚度数据采集提供一种新的标定思路。且该近效测量方法对其他领域如轴承油膜厚度测量等同样可以有效应用,具有一定的实际工程应用价值。

1 理论基础

1.1 一维插值模型

令 t 、 x_i 及 y_i 分别为插值点、结点和结点函数值, q 为结点个数; x_j 表示除 x_i 的其余结点; k 、 z 分别为结点编号和计算结果值; i 、 j 为从属于 k 的两个不同变量,一维插值数学模型^[22]表示为

$$z = \sum_i^{k+(q-1)} y_i \prod_{j \neq i}^{k+(q-1)} [(t-x_j)/(x_i-x_j)] \quad (1)$$

该算法使插值点 t 满足下式:

$$x_k < \cdots < x_{k+\left(\frac{q}{2}-1\right)} < t < x_{k+\left(\frac{q}{2}\right)} < \cdots < x_{k+(q-1)} \quad (2)$$

通过 $(q-1)$ 次拉格朗日插值多项式计算插值点 t 的结果值 $z=f(t)$;而针对外插情况,则取区间某端的 $q/2$ 个结点作多项式插值计算。

1.2 二维插值模型

二元全区间插值法^[23-24],理论为给定矩阵 $n \times m$ 个结点 (a_i, b_j) 上的函数值 $z_{ij}=z(a_i, b_j)$,其中 $(i=0, 1, \cdots, n-1)$ 、 $(j=0, 1, \cdots, m-1)$,利用二元插值公式计算指定插值点 (u, v) 处的函数近似值 $w=z(u, v)$ 。其示意图如图 1 所示。

设给定矩阵域上 $n \times m$ 个结点在两个方向上

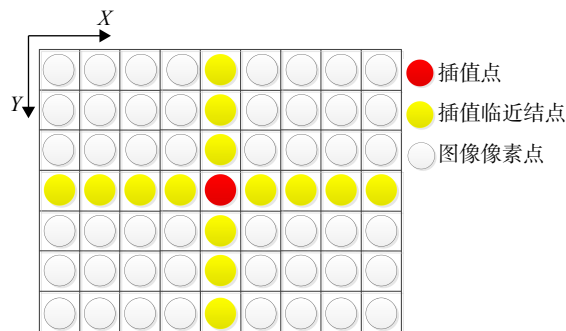


图 1 二维插值示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional interpolation

的坐标分别为

$$\begin{cases} a_0 < a_1 < \cdots < a_{n-1} \\ b_0 < b_1 < \cdots < b_{m-1} \end{cases} \quad (3)$$

相应的函数值为

$$z_{ij}=z(a_i, b_j), i=0, 1, \cdots, n-1; j=0, 1, \cdots, m-1 \quad (4)$$

计算插值点 (u, v) 处的函数近似值 $w=z(u, v)$,以插值点 (u, v) 为中心,在 a 方向上,前后各取 4 个坐标, b 方向上同理可得

$$\begin{cases} a_i < \cdots < a_{i+3} < u < a_{i+4} < \cdots < a_{i+7} \\ b_j < \cdots < b_{j+3} < v < b_{j+4} < \cdots < b_{j+7} \end{cases} \quad (5)$$

然后如式(6)所示利用二元插值公式来计算插值点 (u, v) 处的函数近似值^[25-26],其中 c 、 d 分别为 a 、 b 方向所取结点的编号。

$$z(a, b) = \sum_i^{i+7} \sum_j^{j+7} \left(\prod_{c \neq i}^{i+7} \frac{a-a_c}{a_i-a_c} \right) \left(\prod_{d \neq j}^{j+7} \frac{b-b_d}{b_j-b_d} \right) z_{ij} \quad (6)$$

1.3 Elman 动态神经网络模型

Elman 动态网络相较于其他网络,多设计了承接层作为延时算子因而具备强大的记忆功能,模型也具有适应时变特性的能力而避免陷入局部最优问题,增强全局稳定性,它比 BP、ELM、RBF 网络具有更强的计算能力,还可以用来解决快速寻优问题。网络结构图如图 2 所示。

网络的各指标可以表达为

$$\begin{cases} Y(t+1) = g[W_3 \cdot X(t+1)] \\ X(t+1) = D[W_1 \cdot X_c(t+1) + W_2 \cdot U(t)] \\ X_c(t+1) = X(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中 $Y(t+1)$ 、 $X(t+1)$ 、 $U(t)$ 分别为输出向量、中间层向量和输入向量;而 X_c 为反馈状态向量, W_1 、 W_2 、 W_3 分别定义为承接层与中间层的权值系数、输入层与中间层权值以及中间层至输出层的

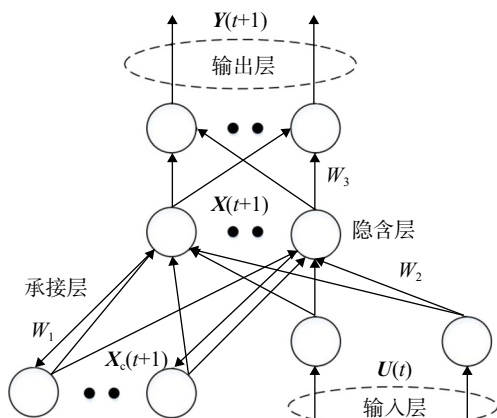


图2 Elman 结构

Fig. 2 Elman structure

权值; 而 g 、 D 则为输出神经元传递函数和中间层神经元传递函数, 且网络还进行了如下权值修正:

$$E(W) = \sum_{t=1}^n [Y_{t+1}(W) - Y_{t+1}^*(W)]^2 \quad (8)$$

该动态神经网络既可以实现静态系统的建模, 也可以进行动态系统的映射来反映该系统的特性。

2 荧光油膜标定方法

2.1 微小高度装置法

国际主流使用的荧光油膜灰度与厚度标定方法由高透光率的光学载玻片放置表面平整的平台搭建而成^[1, 3, 6, 16, 18], 能通过几何关系求解出连续且不同厚度值的荧光油膜, 该几何关系式可以表示为

$$h = S \cdot \tan\left(\arcsin \frac{H}{F}\right) \quad (9)$$

其中 h 、 S 为待测点的厚度与所在测量区域长度, H 、 F 分别为载玻片高度和载玻片斜面有效长度, 通过该微小装置, 可求得测量区域中任一点的厚度信息, 该微小高度装置示意图如图3所示, 其中有效长度 F 与测量区域长度 S 的夹角为 α 。

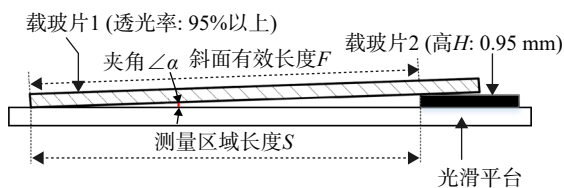


图3 微小高度装置给定示意图

Fig. 3 Schematic diagram of micro-height device given

该公认方法目前广泛应用于飞行器全局摩擦阻测量中的荧光油膜厚度标定领域, 采集的数据庞大, 可由一般数值分析方法如插值法等建立函数模型便能实现数据估计与预测。

但该方法标定过程、工况颇为复杂, 标定试验周期较长; 且较油膜-空气多了层玻璃镜面, 可能会引起光的镜面二次反射从而影响荧光油膜真实灰度值的测量, 同样该玻璃镜面还存在折射现象, 将直接对油膜量测点定位信息和厚度与灰度的匹配造成一定误差。

2.2 近效测量方法

本文所提出的近效测量方法采用了丝印和基恩士测厚仪间接测厚的方式对荧光油膜灰度与厚度进行标定采集, 且利用 Elman 网络克服了因丝印材料稀少而导致的标定数据较少的不足。其中使用的真实丝印样例如图4所示, 印刷的真实荧光油膜灰度图像则如图5所示。

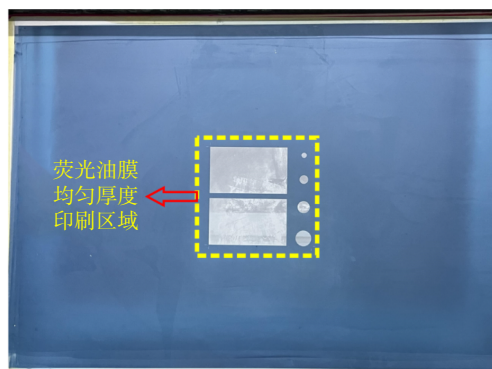


图4 丝印材料样例

Fig. 4 Example of silk-screen printing materials

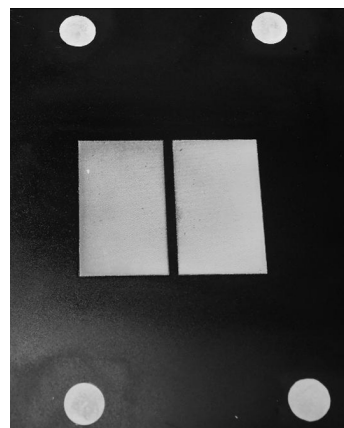


图5 荧光油膜丝印灰度图像样例

Fig. 5 Example of gray image of fluorescent oil film silk screen printing

具体操作步骤如下:

- 1) 不同厚度的丝网材料印刷出不同厚度的荧光油膜;
- 2) 利用基恩士测厚仪对不同厚度的荧光油膜进行非接触式厚度测量,其方式为单张油膜数据测量五次厚度值后去掉最大值和最小值后其余取均值;
- 3) 开启紫外激发光源,开启高速图像采集系统以进行图像采集,对灰度测量区域图像进行灰度统计并取均值;
- 4) 将测量厚度值与灰度统计值相对应匹配获得小样本数据,利用 Elman 神经网络实现量程扩展,并引入一维插值算法进行数据平滑;其原

理如图 6 所示,其中 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6 和 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 、 H_6 分别表示数据图 A、B、C、D、E、F 的灰度值和厚度值;

5) 载入荧光油膜测试灰度图像,通过已建立的模型求解待测试图片的三维厚度数据,并联合二维插值算法对该三维数据进行二次平滑,输出最终的荧光油膜厚度测量分布图,实现荧光油膜厚度实时测量。

该近效测量方法较主流标定方法避免了复杂的标定工况,有效缩短标定周期,且不存在微小高度装置玻璃面的光二次反射问题,使荧光油膜的灰度值测量更为精确。

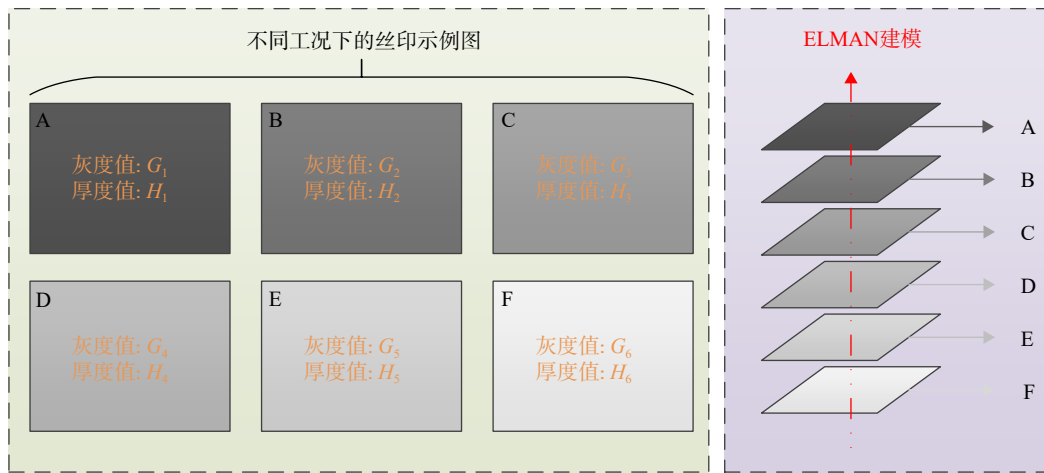


图 6 Elman 模型测量示意图

Fig. 6 Schematic representation of the Elman model measurements

2.3 数据整理

经近效方法采集的小样本数据、微小高度装置法采集的数据可以分别如表 1、表 2 所示,为了后续方便两种方法的比较,微小高度装置法取灰度值与表 1 相近似的一段。

表 1 近效法采集数据

Table 1 Data collection by the near-effect method

序号	灰度值	厚度值/ μm
1	168	34.34
2	159	21.26
3	155	19.21
4	151	11.21
5	145	10.31
6	136	5.872

表 2 微小高度装置采集数据

Table 2 Data collection by micro height devices

序号	灰度值	厚度值/ μm
1	170	28.956 3
2	169	28.162 4
3	168	27.014 2
4	167	25.884 7
5	166	25.679 2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
40	131	6.127 5

3 模拟试验论证

3.1 试验设备

针对数据采集所使用的相机,本次试验将采用德国 Baumer 高速 CMOS(complementary metal oxide semiconductors)工业相机,型号为 Baumer-

HXC13, 该相机具有出色的帧率和 130 万像素的分辨率, 且包含黑平衡校正以及 Global shutter 曝光模式等强大功能, 相机参数如表 3 所示。

表 3 Baumer-HXC13 工业相机参数

Table 3 Baumer-HXC13 industrial camera parameters

型号	Baumer-HXC13
黑白分辨率/像素	1 280×1 024
像素大小/μm	14×14
全帧/(f/s)	500

试验所使用的定制紫外光激发光源型号为 JZFZ-220/18-001, 较其他光源具有发出的紫外光线较均匀、频率稳定等特点, 并搭配了 100~240 V、50/60 Hz 的光源可调节控制器, 能够实时对紫外激发光源输出功率进行调节控制, 调节功率的范围为 0~18 W, 精度为±10%; 试验还使用了型号为 BBD-150 的三相变频无刷风机进行风洞吹风试验, 该风机具有输出风力稳定、无抖动的优点, 具体实物如图 7 所示, 具体参数如表 4 所示。

试验所使用的荧光油膜是由少量高可见 UV (UVHiVisOR) 粉末与黏度约为 100 Pa·s 的硅油混

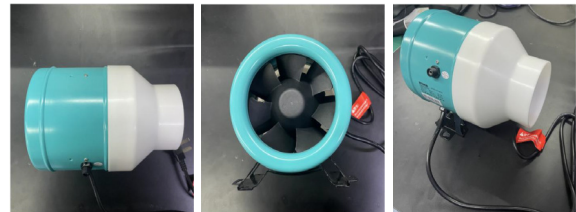


图 7 BBD-150 三相变频无刷风机

Fig. 7 BBD-150 three-phase inverter brushless fan

表 4 BBD-150 风机参数

Table 4 BBD-150 fan parameters

型号	BBD-150
风量/(cm ³ /s)	165 000
风压/Pa	500
转速/(r/min)	5 000
出风口尺寸/cm	15

合搅拌均匀制备而成的, 所获得的荧光油膜在紫外激发光源的作用下将发生斯托克斯位移 (Stokes shift) 效应^[3, 18] 从而辐射出 620 nm 左右波段的红色荧光。试验过程中当荧光油膜处于激发状态, 为排除杂光如紫外灯光光源、环境光等干扰, 故在相机的镜头处加装了一片 620 nm 的光学滤光片, 该光学滤波片可以截断其他波段的杂光干扰而只通过 620 nm 左右波段的红色荧光, 提高了像素灰度值的测量精度。

3.2 荧光油膜厚度动态测量试验

荧光油膜厚度动态测量试验环境中风速恒定马赫数 (Ma) 约为 0.06 的低速环境, 以至于试验支架无抖动, 避免了振动因素^[11] 影响荧光油膜的厚度测量。

经高速采集系统保存的油膜流动视频, 通过对视频分割处理后随机选取了帧数分别为 $T_0 = 1\,000$ 、 $T_1 = 2\,000$ 、 $T_2 = 5\,000$ 等 3 张具有明显厚度变化的测试图进行试验, 提高试验验证的泛化性。试验的具体工况及搭建平台如图 8、图 9 所示, 试验过程中将一直保持工业相机、紫外激发光源位置固定不变, 以保证试验的科学性、可靠性和准确性。

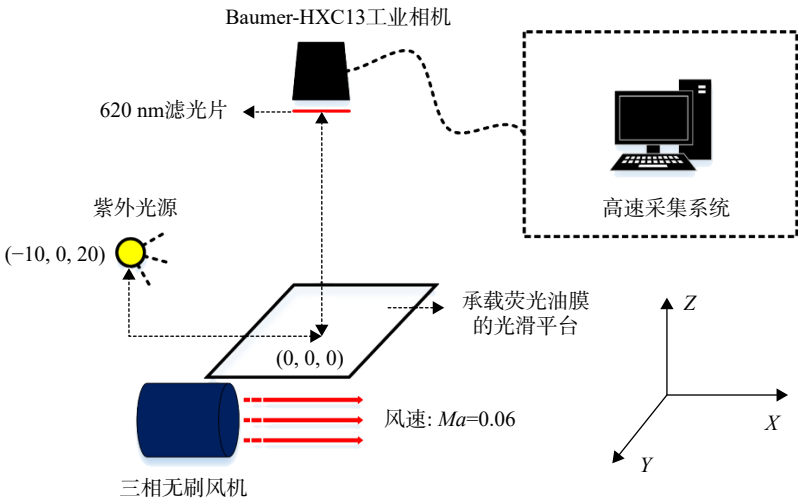
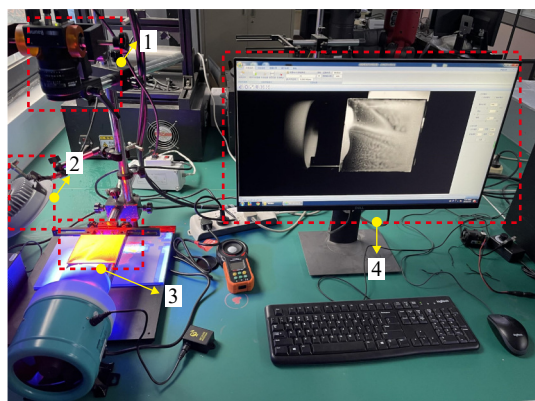


图 8 试验工况(单位: cm)

Fig. 8 Test conditions (unit: cm)



1 Baumer-HXC13; 2 可控紫外激发光源;
3 荧光油膜; 4 搭载高速采集系统的计算机。

图 9 试验平台

Fig. 9 Test platform

针对 Elman 网络的超参数优化与调整, 因网络为一维输入特征, 故网络的超参数调整主要是针对网络的隐藏层神经元个数进行调整。由于涉及超参数调优问题, 故将两种方法的全局厚度平均误差 θ 作为目标函数, 特别注意的是, 平均误差计算中仅考虑厚度计算区域, 无关区域将不考虑, 以保证计算的准确性和科学性。最优超参数选取可由图 10 所示, 综合考虑选取隐藏层神经元的个

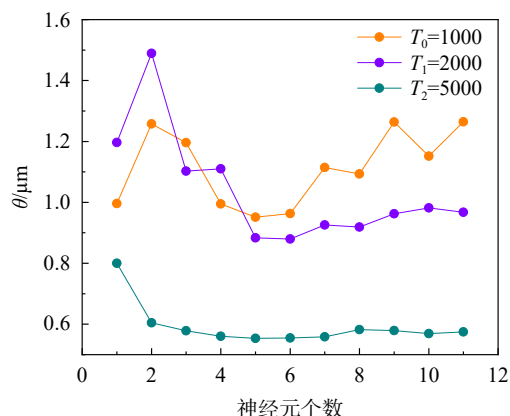


图 10 隐藏层神经元个数选取过程

Fig. 10 Process of selecting number of neurons in hidden

数 5, 即 Elman 神经网络的结构为 1-5-1, 学习率为 0.01, 训练次数为 500 次。

试验中承载荧光油膜的光滑平台为机床加工的不透光金属板; 采集的荧光油膜测试图片如图 11 所示, 测试图像灰度分布情况如图 12 所示。试验目的为验证所提出的近效测量法是否能够达到微小高度装置法的测量效果, 故本次试验将直接使用微小高度装置法的测量结果作为真实值来进行误差比对分析。

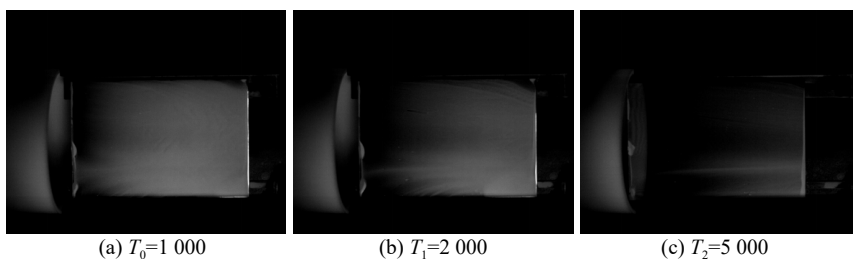
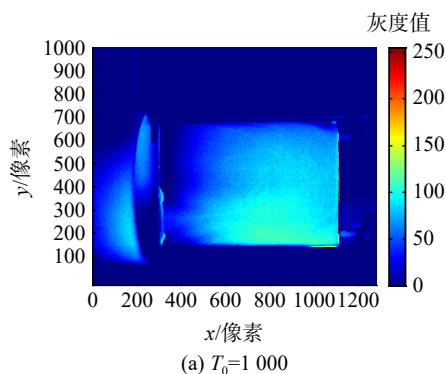


图 11 荧光油膜测试图像

Fig. 11 Fluorescent oil film test images

通过微小高度装置法解算得到的油膜厚度分布图如图 13 所示; 而近效测量法中经 Elman 动态网络扩展小样本数据量程后结合一维插值法平滑数据并引入二维插值法平滑输出厚度值, 解算后得到的荧光油膜测试图像的厚度三维图如图 14 所示。由图 13、图 14 中的荧光油膜厚度分布情况, 针对微小高度装置法与近效测量法荧光油膜厚度分布图像, 取对应每帧图像横坐标为 900 的厚度分布情况数据以便直观分析两种方法的厚度测量对比情况, 近效测量法对比微小高度装置法的 1000、2000、5000 帧厚度测量结果曲线如图 15 所示。

两种方法的 1000、2000、5000 帧误差分布曲线如图 16 所示。



(a) $T_0=1000$

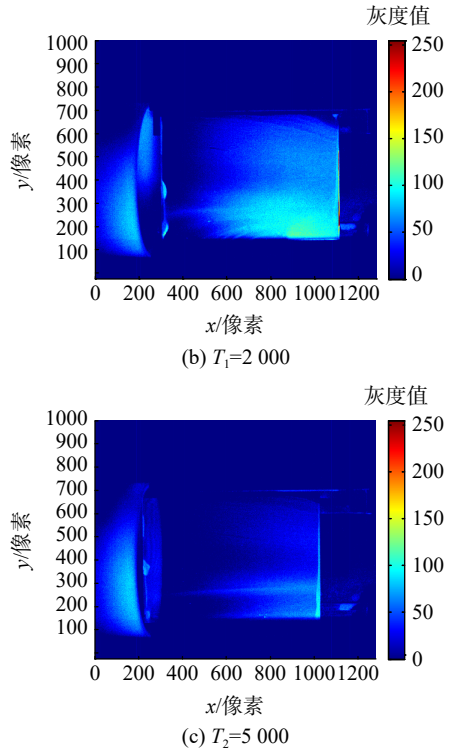


图12 荧光油膜测试图像灰度分布

Fig. 12 Gray scale distribution of fluorescent oil film

使用平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)来对误差结果 σ 进行定量分析, MAPE的计算式如式(10)所示, 其中 n 表示采样点个数, P_i 表示近效测量结果, R_i 表示微小高度装置测量结果, σ 定量分析结果如表5所示。

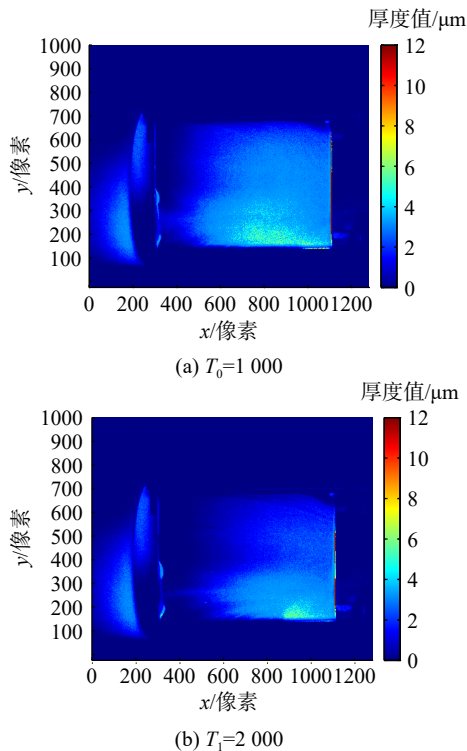


图14 近效测试厚度分布结果

Fig. 14 Near-effect test results of thickness distribution

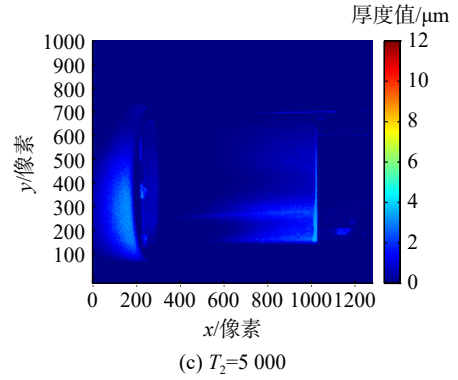


图13 微小高度装置法厚度分布结果

Fig. 13 Measurement of thickness distribution by micro-height device method

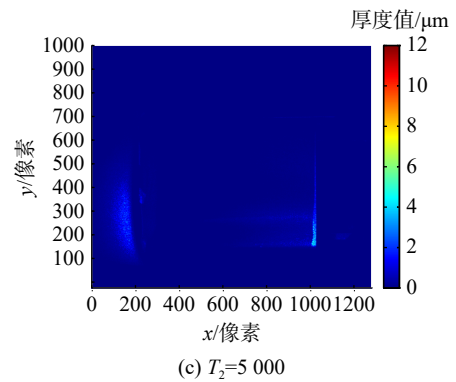
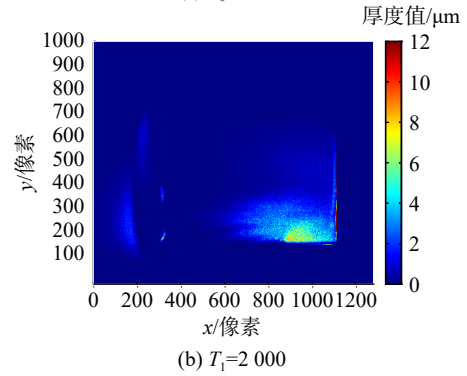
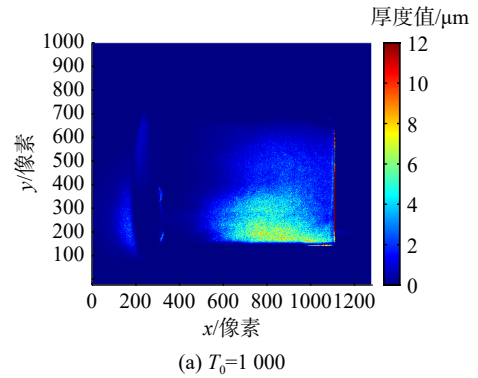


图14 近效测试厚度分布结果

Fig. 14 Near-effect test results of thickness distribution

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - R_i}{R_i} \right) \times 100\% \quad (10)$$

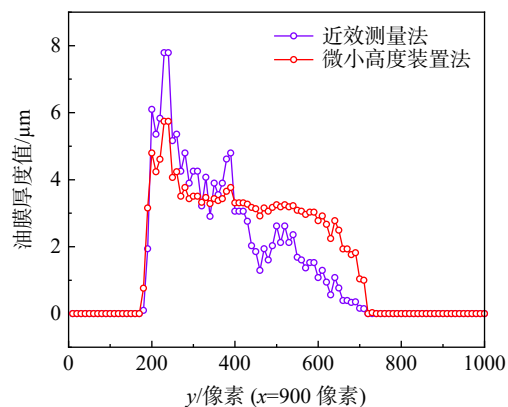
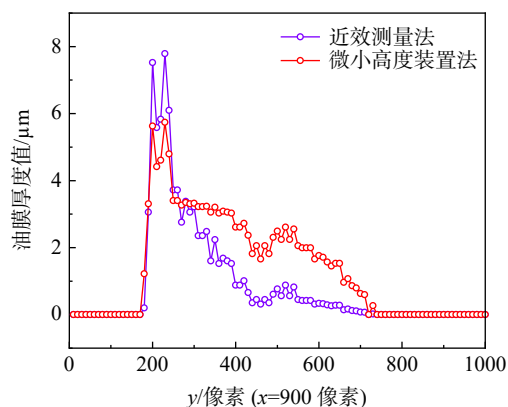
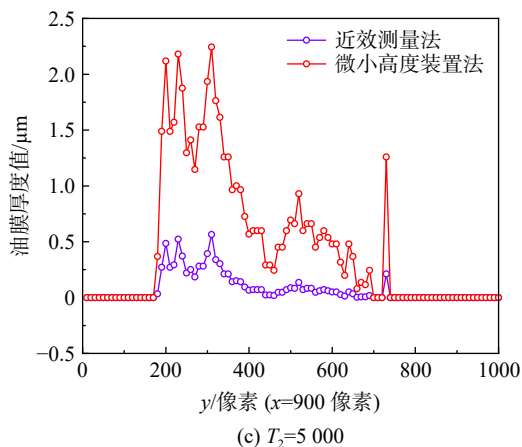
(a) $T_0=1\ 000$ (b) $T_1=2\ 000$ (c) $T_2=5\ 000$

图 15 1 000、2 000、5 000 帧对比情况

Fig. 15 Comparison of 1 000, 2 000 and 5 000 frames

由图 11 荧光油膜灰度分布图能够直观看出, 模具下半部分区域的荧光油膜灰度值较大, 其原因可能是涂抹荧光油膜不均匀或者搭载荧光油膜的模具并非理想状态下的水平所造成。

由试验所进行的荧光油膜厚度测量结果显示, 本文提出的荧光油膜厚度近效测量方法实现了荧光油膜厚度定量显示, 测量厚度分布图能够清晰表征荧光油膜受风力影响的流动情况以及局部明显特征; 由图 15、图 16 结果分析显示, 提出的近

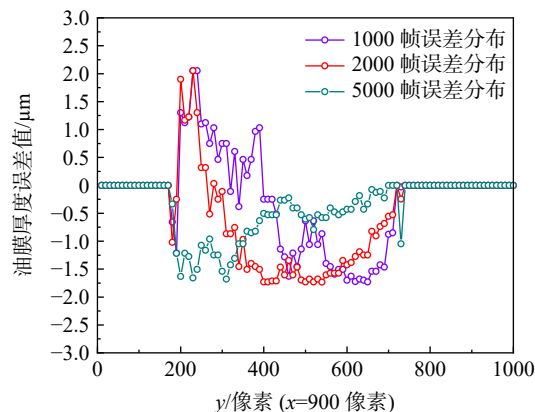


图 16 第 1 000、2 000、5 000 帧误差分布

Fig. 16 1 000, 2 000, 5 000 frame error distribution

表 5 MAPE 定量分析

Table 5 Quantification of MAPE

帧数	$\sigma/\%$
1 000	39.33
2 000	57.54
5 000	82.52

效测量方法在荧光油膜汇集处(较厚区域: 1 000、2 000 帧)误差最大不超过 $\pm 2.5\ \mu\text{m}$, 在平滑适中区域以及较薄区域(5 000 帧)误差不超过 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 。定量分析显示, 1 000 帧时 σ 为 39.33%, 2 000 帧时为 57.54%, 5 000 帧时 82.52%, 总体趋势为随着待测量荧光油膜的厚度越薄, 其测量误差越大, 而事实也正是如此, 不论是传统的接触式测量或者是非接触式测量方案, 都存在着对非均匀分布状态薄油膜难以准确测量的问题和局限性。

4 结 论

本文针对荧光油膜灰度与厚度微小高度装置标定法存在数据采集工况复杂、标定试验周期长等缺陷, 提出了一种近效方法, 经模拟风洞试验结果分析, 可以得到以下结论:

1) 提出的近效测量方法较现全局摩阻测量领域中使用广泛的微小高度装置法而言, 避免了复杂的标定工况, 大大缩短了标定周期, 且不存在微小高度装置玻璃面的光二次反射问题, 使荧光油膜的灰度值测量更为精确。针对 Elman 动态神经网络具有全局稳定性更强、动态建模的特点, 利用了 Elman 动态网络克服了近效测量方法存在的小样本数据问题, 实现其数据量程扩展; 并由一维插值法对量程扩展后的数据进行平滑, 从而得到荧光油膜灰度与厚度标定数据, 此举在较大

程度上避免了微小高度装置法的复杂步骤和工况,较大程度上节省标定材料和缩短标定周期。

2) 经模拟试验结果显示,通过近效测量方法所得到的标定数据对测试图片各像素点灰度值进行解算得到三维厚度数据并引入二维插值法使其厚度数据平滑,最终可以清晰、准确、定量地显示荧光油膜厚度分布,与微小高度装置法对比分析,在荧光油膜汇集处(较厚区域)误差最大不超过 $\pm 2.5 \mu\text{m}$,在平滑适中区域及较薄区域误差不超过 $\pm 2 \mu\text{m}$,符合全局摩阻测量领域工程测量误差范围,为荧光油膜灰度与厚度标定方法提供了一种新的思路和技术路线,为飞行器全局摩阻测量提供了荧光油膜厚度数据基础,且该近效测量方法对其他领域如轴承油膜厚度测量等同样可以有效应用,具有一定的实际工程应用意义。

3) 当荧光油膜厚度越薄(小于 $2.5 \mu\text{m}$),小样本的近效测量方法误差较大,未来的工作将继续对较薄油膜的厚度测量展开进一步研究。

致 谢:

感谢中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所提供的设备支持与指导帮助。

参考文献:

- [1] LIU T, MONTEFORT J, WOODIGA S, et al. Global luminescent oil-film skin-friction meter[J]. *AIAA Journal*, 2008, 46(2): 476-485.
- [2] LIU T, WOODIGA S, TIAN M. Skin friction topology in a region enclosed by penetrable boundary[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 51(6): 1549-1562.
- [3] 钱泓江, 董秀成, 张征宇. 基于Hankel阵的荧光油膜灰度与厚度预测模型改进[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(10): 2061-2071.
QIAN Hongjiang, DONG Xiucheng, ZHANG Zhengyu. Improved prediction model of gray and thickness of fluorescent oil film based on Hankel matrix[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(10): 2061-2071. (in Chinese)
- [4] LIU Tianshu, CHEN Tao, SALAZAR D M, et al. Skin friction and surface optical flow in viscous flow[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(6): 1-14.
- [5] 朱自强, 吴宗成, 丁举春. 层流流动控制技术及应用[J]. *航空学报*, 2011, 32(5): 765-784.
ZHU Ziqiang, WU Zongcheng, DING Juchun. Laminar flow control technology and application[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(5): 765-784. (in Chinese)
- [6] 钱泓江, 董秀成, 徐椰桢, 等. 基于神经网络的荧光油膜厚度与灰度研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2021, 53(3): 470-476.
QIAN Hongjiang, DONG Xiucheng, XU Yeting, et al. Fluorescence oil film thickness and gray level identification based on neural network[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 53(3): 470-476. (in Chinese)
- [7] 王帅, 何国强, 秦飞, 等. 超声速内流道摩擦阻力分析及减阻技术研究[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(4): 908-919.
WANG Shuai, HE Guoqiang, QIN Fei, et al. Research on skin-friction drag and drag reduction technics in a supersonic inner flow path[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(4): 908-919. (in Chinese)
- [8] LIU T, MONTEFORT J, STANFIELD S, et al. Inverse heat transfer methods for global heat flux measurements in aerothermodynamics testing[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, 107: 1-18.
- [9] 周江宁, 殷一民, 郭秋亭, 等. 基于激光诱导荧光的高速飞行粒子低温段测温方法[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(12): 2642-2647.
ZHOU Jiangning, YIN Yimin, GUO Qiuting, et al. Thermometry method for high speed flying particle at low temperature based on laser induced fluorescence technique[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(12): 2642-2647. (in Chinese)
- [10] 陈磊, 朱涛, 徐筠, 等. 荧光油流显示技术在高超声速风洞中的应用[J]. *空气动力学学报*, 2017, 35(6): 817-822.
CHEN Lei, ZHU Tao, XU Yun, et al. Applications of fluorescence-oil-flow visualization technique in hypersonic wind tunnel test[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2017, 35(6): 817-822. (in Chinese)
- [11] QIAN Hongjiang, DONG Xiucheng, ZHANG Zhengyu. Research on stability of gray value of excited-state fluorescent oil film based on variable light vector angle[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021(51): 8632992.1-8632992.12.
- [12] 刘通, 蔡晋生, 屈崑. 壁面粗糙度湍流扩展模型及流动数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(8): 1981-1989.
LIU Tong, CAI Jinsheng, QU Kun. Roughness for wall turbulence extension model and flow numerical simulation[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(8): 1981-1989. (in Chinese)
- [13] LIU T, SHEN L. Fluid flow and optical flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 614: 253-291.
- [14] LIU T, WOODIGA S, MONTEFORT J, et al. Global skin friction diagnostics in separated flows using luminescent oil[J]. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 2009, 16(1): 19-39.
- [15] 李鹏, 明晓. 风力机叶片的全局表面摩擦力测量的荧光油膜法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(5): 581-585.
LI Peng, MING Xiao. Fluorescent oil film method for global surface friction measurement of wind turbine blades[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 43(5): 581-585. (in Chinese)
- [16] 黄湛, 王宏伟, 魏连风, 等. 基于荧光油膜的全局表面摩阻测量技术研究[J]. *空气动力学学报*, 2016, 34(3): 373-378, 403.
HUANG Zhan, WANG Hongwei, WEI Lianfeng, et al. Research of global skin friction measurement based on fluorescent oil film[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2016, 34(3): 373-378, 403. (in Chinese)
- [17] 邹易峰, 张征宇, 王学渊, 等. 风洞试验模型表面的荧光油膜路径运动速度测量[J]. *航空学报*, 2019, 40(6): 92-105.
ZOU Yifeng, ZHANG Zhengyu, WANG Xueyuan, et al. Velocity measurement of fluorescent oil film path movement on wind tunnel testing model surface[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(6): 92-105. (in Chinese)
- [18] 李鹏. 全局表面摩擦应力直接测量技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
LI Peng. Research on direct measurement technology of global surface friction stress[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [19] MA Xinyu, ZHANG Xiaohong. A short-term prediction model to forecast power of photovoltaic based on MFA-Elman[J]. *Energy*

- Reports, 2022, 8(4): 495-507.
- [20] 皮骏, 黄江博. 基于IPSO-Elman神经网络的航空发动机故障诊断[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(12): 3031-3038.
PI Jun, HUANG Jiangbo. Aero-engine fault diagnosis based on IP-SO-Elman neural network[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(12): 3031-3038. (in Chinese)
- [21] ZHANG Yufei, ZHAO Jianping, WANG Limin, et al. An improved OIF Elman neural network based on CSO algorithm and its applications[J]. *Computer Communications*, 2021, 171: 148-156.
- [22] MU B Q, CHEN H F. Hankel matrices for system identification[J]. *Journal of Mathematical Analysis & Applications*, 2014, 409(1): 494-508.
- [23] 李海涛, 邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. *计算机系统应用*, 2019, 28(7): 1-8.
LI Haitao, SHAO Zedong. Review of spatial interpolation analysis algorithm[J]. *Computer Systems & Applications*, 2019, 28(7): 1-8. (in Chinese)
- [24] 孙思梦. 关于连分式插值方法的若干研究[D]. 安徽 淮南: 安徽理工大学, 2020.
SUN Simeng. Some research on continued fraction interpolation method[D]. Huainan Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [25] 张营, 左洪福, 佟佩声, 等. 基于谱插值和奇异值差分谱的滚动轴承静电监测信号去噪方法[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(8): 1996-2002.
ZHANG Ying, ZUO Hongfu, TONG Peisheng, et al. Denoising method for electrostatic monitoring signal of roller bearing on spectrum interpolation and difference spectrum of singular value[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(8): 1996-2002. (in Chinese)
- [26] ZHANG H D, ALEXANDRINA R, ABDELAZIZ B. An enhanced N -point interpolation method to eliminate average precision distortion[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2022, 158: 111-116.

(编辑: 张 雪)