

基于 Hankel 阵的荧光油膜灰度与厚度预测模型改进

钱泓江¹, 董秀成¹, 张征宇²

(1. 西华大学 电气与电子信息学院, 成都 610039;

2. 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: 针对荧光油膜灰度与厚度关系数据采集方法较为繁琐、耗时耗力这一问题,研究了基于 Hankel 阵的系统辨识算法,并在此基础上提出了 Hankel 阵误差修正模型和 Hankel 阵高阶迭代误差修正模型等两种改进方法,利用了极少数据量建立模型,实现了对其余未知荧光油膜厚度值的预测,且保持了较高的精度。试验结果表明:基于极少数据量建模以预测该数据量外的数据点这一特殊背景下,插值法的外插能力显得并不适用。而传统 Hankel 阵预测模型的预测精度为 76.69%,Hankel 阵误差修正模型和 Hankel 阵高阶迭代误差修正模型的预测精度分别为 85.69% 和 89.25%,较之传统方法预测精度分别提高了 9% 和 12.56%,为荧光油流技术领域针对荧光油膜灰度与厚度建模问题提供了一种可行技术路线,具有一定的实际工程应用意义。

关 键 词: 荧光油膜; 灰度; 油膜厚度; Hankel 阵; 预测模型

中图分类号: V19

文献标志码: A

Improved prediction model of gray and thickness of fluorescent oil film based on Hankel matrix

QIAN Hongjiang¹, DONG Xiucheng¹, ZHANG Zhengyu²

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information,

Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. High Speed Aerodynamics Institute,

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

Abstract: In order to solve the problem of tedious and time-consuming data collection methods for the relationship between gray and thickness of fluorescent oil film, the system identification algorithm of Hankel matrix was studied, and two improved methods such as Hankel array error correction model and Hankel array high order iterative error correction model were proposed accordingly, which can achieve the prediction of the remaining unknown fluorescent oil film thickness values by using a very small amount of data to build the models. The prediction of the remaining unknown fluorescent oil film thickness values was achieved with high accuracy. The test

收稿日期:2021-04-06

基金项目:国家自然科学基金(11872069);教育部“春晖计划”科研项目(Z2017076);

四川省高校科研创新团队-机器视觉与智能控制资助项目(18TD0024);

四威高科-西华大学产学研联合实验室资助项目(2016-YF04-00044-JH)

作者简介:钱泓江(1997—),男,硕士生,主要从事机器视觉、空气动力学研究。

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:dxcl36@163.com

引用格式: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.

results showed that the interpolation capability of the interpolation method seemed not applicable in the particular context of modelling a very small amount of data to predict data points outside that amount of data, while the prediction accuracy of the traditional Hankel array prediction model was 76.69%; the Hankel array error correction model and the Hankel array high order iterative error correction model had a prediction accuracy of 85.69% and 89.25%, respectively, 9% and 12.56% higher than those of the traditional method. This has provided a feasible technical route for modelling the gray and thickness of fluorescent oil film in the field of fluorescent oil flow technology with certain practical engineering application significance.

Key words: fluorescent oil film; gray; oil film thickness; Hankel matrix; prediction model

表面摩擦阻力(简称为表面摩阻)为空气动力学中最为重要的物理量之一,是航空器飞行时所受总阻力的重要组成部分,其能很好地描述湍流边界层的状态,是最难确定的物理量之一^[1]。降低表面摩阻不仅能降低飞行器的油耗和提高飞行器续航时长,对超声速飞行器还意味着其表面热流降低,隔热材质质量减少,有效载荷增加^[2]。经现有研究表明,新型民航客机稳定运行时其表面摩阻约占总阻力的一半,远超其他阻力因素而占据主导地位;而对现中国研制的超声速飞行器,其表面摩阻最大可占总阻力的50%以上,严重影响超声速飞行器运行的稳定性,也直接关系到飞行器的使用寿命^[3-6]。因此降低表面摩阻对改善飞行器性能、降低成本以及节省能源有着重要的意义^[7]。

传统测量表面摩阻的方法多数存在一定缺陷和局限性,如热膜法、Preston管法、Stanton管法、摩擦天平法,以及激光多普勒法等。热膜法主要原理是测量可电加热金属薄膜上的热量,通过建立焦耳热转化率与流体间的数学模型,从而解算得到表面摩阻^[8],但该方法可能存在温漂现象导致失真;Preston管、Stanton管对模具几何外形、气流夹角等因素要求较高,且难以灵活运用^[9];摩擦天平法则将浮动元件装在位移传感器上,能直接测量作用于浮动元件上的表面摩阻的合力^[10],但测量精度受环境因素、传统工艺制造因素、人为因素的影响较大;激光多普勒法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^[11],但因黏性底层中的示踪粒子密度低导致采样率低,在非定常测量中很难适用。

通过将硅油和荧光分子按特定比例混合配制而成的荧光油膜,据其在紫外光照射下激发的显色反应,可由荧光油膜图像灰度值表征油膜的厚

度值,进而解算得到表面摩阻分布。1977年,Tanner^[12]利用油膜的激光干涉法来测量表面表面摩阻,为油膜法测量表面摩阻奠定理论基础。其后Brown、Naughton^[13]精确建立了在流体场中的荧光油膜演化方程,形象地演示了油膜厚度随着时间的变化与其自身体积力、表面摩阻等因素的关系,为基于荧光油膜的全局表面摩阻直接测量提供可能性。2008年,Liu等^[14]提出通过荧光油膜的灰度成像来表征油膜厚度这一新方法,并阐述了荧光油膜灰度与厚度的线性关系,为后续荧光油膜灰度与厚度研究提供坚实的基础。李鹏、明晓^[15-16]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支撑。2012年李鹏^[16]提供了荧光油膜灰度与厚度数据采集方法,其通过使用盖玻片和载玻片等高透光光学玻璃构成斜面进行荧光油膜灰度、厚度标定数据的采集,并初步验证了该线性关系的正确性。但该采集方法步骤颇为繁琐、数学转换颇多、耗时较长。2016年,黄湛等基于荧光油膜技术对全局表面摩阻测量技术进行了深入研究^[17],阐明了获取高精度表面摩阻值的关键在于油膜厚度值的测量与计算是否准确,并重复了李鹏的荧光油膜灰度与厚度数据采集方法试验,验证了方法的有效性。

基于上述研究,其一,目前国内外对利用荧光油膜厚度解算表面摩阻的研究颇多,但针对荧光油膜灰度与厚度关系的研究较少,且未对其进行系统性建模;其二,荧光油膜灰度与厚度数据采集方法较为复杂,且采集的数据量较少,而实际测量表面摩阻中往往会用到更多采集数据以外的数据。传统的插值法对采集数据进行内插时能满足

精度要求,但针对采集数据以外的数据外插时,特别是插值数据离采集数据甚远情况下,其精度往往不能达到要求甚至出现错误数据^[18]。2014 年, Mu、Chen^[19]建立用于系统识别的 Hankel 阵,该矩阵法的特点在于能够通过极少量数据建立预测模型,实现对建模数据以外的大量数据预测并能达到良好的精度,这是插值法所不具备的能力。基于此,本文利用 Hankel 阵法对荧光油膜灰度与厚度关系进行模型建立,实现通过灰度值对油膜厚度值的预测,使模型更系统化。并在此研究基础上,提出 Hankel 阵误差修正预测模型、Hankel 阵高阶迭代误差修正预测模型等两种预测改进方法,经试验结果分析表明,依托少量数据建模以实现建模数据集以外的数据预测,Hankel 阵模型、Hankel 阵误差修正模型以及 Hankel 阵高阶迭代误差修正模型的预测精度分别为 76.69%、85.69% 和 89.25%。对比分析,通过 Hankel 阵建立预测模型,其预测精度较之插值法占据绝对的优势;且改进的 Hankel 阵高阶迭代误差修正模型预测精度较传统 Hankel 阵模型提高了 12.56%,具有强大的预测能力,也为荧光油膜灰度与厚度建模问题提供一种可行的参考路线,有较大的实际工程应用意义。

1 预测模型数学理论

1.1 插值模型

针对插值法的选取问题,应用较为广泛的有一元全区插值法、一元三点插值法、埃特金插值法及连分式插值法^[20]等。在比较外插能力的情况且令有 q 个采集数据结点构成的区间,一元全区插值法则仅取该区间某端的 $q/2$ 个结点作多项式插值计算;一元三点插值法则取该区间某端的两个结点作线性插值;埃特金插值法则取最靠近插值点的 $m(m \leq q)$ 个结点作逐步线性插值计算;连分式插值法是通过构造 q 节连分式逐步递推计算。结合本试验和算法外插能力的考虑,本次采用一元全区插值和连分式插值算法作验证试验。一元全区插值数学模型表示为

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

其中 t, x_i 及 y_i 分别为插值点、结点和结点函数值; 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;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。

连分式插值算法^[21]则是令 q 个结点为 $x_0 < x_1 < \cdots < x_{q-1}$, 与之对应的函数值为 $y_i (i=0, 1, \cdots, q-1)$, 则可以构造 q 节连分式 $\psi(x)$:

$$\psi(x) = \psi_0(x_0) + \frac{x-x_0}{\psi_1(x_1) + \frac{x-x_1}{\psi_2(x_2) + \psi_3(x_3) + \cdots}} \quad (3)$$

其中常数项 $\psi_0(x_0)$ 及部分分母 $\psi_1(x_1), \psi_2(x_2), \cdots$ 可由下式计算:

$$\begin{cases} \psi_0(x_j) = y_j & (j=0, 1, \cdots, q-1) \\ \psi_{i+1}(x_j) = \frac{x_j - x_i}{\psi_i(x_j) - \psi(x_i)} & \begin{cases} i=0, 1, \cdots, q-1 \\ j=i+1, \cdots, q-1 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 Hankel 阵预测模型

1.2.1 传统 Hankel 阵预测模型

令传统 Hankel 阵预测模型的 z 域传递函数^[22-23]如式(5)所示, $[b_1, b_2, \cdots, b_n]$ 为分子系数, $[a_1, a_2, \cdots, a_n]$ 为分母系数, n 为系统阶数大小, 则

$$G(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + \cdots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_n z^{-n}} \quad (5)$$

对式(5)进行幂级数展开

$$G(z^{-1}) = w_1 z^{-1} + w_2 z^{-2} + \cdots w_n z^{-n} = \sum_{p=1}^n w_{(p)} z^{-p} \quad (6)$$

式(6)中的 $[w_1, w_2, \cdots, w_n]$ 为展开得到的常数项系数, 即脉冲系数, 将式(6)带入式(5)得式(7)

$$\frac{b_1 z^{-1} + \cdots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_n z^{-n}} = \sum_{p=1}^n w_{(p)} z^{-p} \quad (7)$$

进一步展开并化简得式(8)

$$\sum_{p=1}^n b_{(p)} z^{-p} = \left(\sum_{p=1}^n w_{(p)} z^{-p} \right) \left(1 + \sum_{p=1}^n a_{(p)} z^{-p} \right) \quad (8)$$

对式(8)作乘积变换并对相同幂级项化简, 即

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^n b_{(p)} z^{-p} &= w_1 z^{-1} + \cdots + \\ &\left(w_n + \sum_{i=1}^{n-1} a_{n-i} w_i \right) z^{-n} + \cdots + \\ &\left(w_{n+1} + \sum_{i=1}^{n-1} a_{n-i+1} w_i \right) z^{-n-1} + \cdots + \end{aligned}$$

$$\left(w_{2n} + \sum_{i=n}^{2n-1} a_{2n-i} w_i \right) z^{-2n} \quad (9)$$

等号两边相同幂级项对应的系数相等,构造出脉冲响应数据与传递函数分子系数 b_n 与分母系数 a_n 的矩阵关系^[24-28],如式(10)所示:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{n-1} & a_{n-2} & \cdots & a_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(10)等式右边的幂级数系数构造为Hankel阵形式

$$H(w_{(k)}) = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_n \\ w_2 & w_3 & \cdots & w_{n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_n & w_{n+1} & \cdots & w_{2n-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

则传递函数分母系数 a_n 的求解矩阵如式(12)所示:

$$H(w_{(k)}) \begin{bmatrix} a_n \\ a_{n-1} \\ \vdots \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -w_{n+1} \\ -w_{n+2} \\ \vdots \\ -w_{2n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

综上所述,通过对脉冲响应数据进行Hankel阵的构造,求得传递函数的分子系数 b_n 与分母系数 a_n ,进而得到 z 域传递函数预测模型。

1.2.2 Hankel阵误差修正预测模型

由于传统Hankel阵预测模型无修正误差功能,产生的误差将不断累积和放大,该误差由系统本身产生,也可能包含四舍五入计算误差。针对该问题本文提出一种改进方法,其算法流程如图1所示。

由式(12)可得,分母系数 a_n 与脉冲响应数据有直接的关联,故对分母系数 a_n 作优化处理,即对直接作用于分母系数 a_n 的脉冲响应数据进行修正可得良好效果。具体理论推导如下,令 $w_{(n)}$ 为用于模型建立的脉冲响应数据组, $\hat{w}_{(n)}$ 为模型对 $w_{(n)}$ 的预测结果数据组,则可得到式(13)

$$\Delta \epsilon_{(n)} = \hat{w}_{(n)} - w_{(n)} \quad (13)$$

其中 $\Delta \epsilon_{(n)}$ 为误差数据组,由此建立 $\Delta \epsilon_{(n)}$ 的 z 域传递函数 $G_{(\epsilon)}(z^{-1})$,并根据 z 域传递函数特性^[29],该传递函数可表达为脉冲模型:

$$G_{(\epsilon)}(z^{-1}) = \sum_{n=1}^{\infty} \Delta \epsilon_n \cdot \delta(g - n \cdot \Delta G) \quad (14)$$

式(14)中 $\Delta \epsilon_n$ 为误差数据组 $\Delta \epsilon_{(n)}$ 中的数据, g 表示某时刻的灰度值, ΔG 为间隔灰度值, $\delta(g - n \cdot \Delta G)$ 为脉冲函数,当满足 $g = n \cdot \Delta G$,即 $\delta(g - n \cdot$

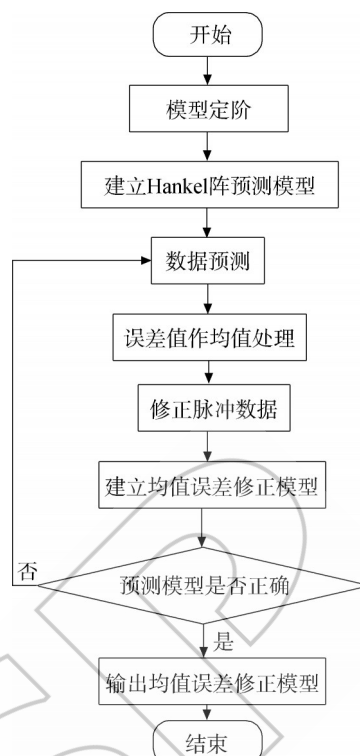


图1 Hankel阵均值误差修正流程图

Fig.1 Flowchart of mean error correction for Hankel matrix

$\Delta G) = 1$ 成立。

分析式(10)、式(11)及式(12),考虑单个建模数据 w_n 直接影响分母系数 a_n ,故作修正处理,故对其误差修正得到修正脉冲数据 Γ_{w_n}

$$\Gamma_{w_n} = w_n + \sum_{i=1}^n \Delta \epsilon_n \cdot \delta(g - n \cdot \Delta G) \quad (15)$$

基于此,将得到的修正脉冲数据 Γ_{w_n} 更新至原数列得到新数据组 $\Gamma_{w_{(n)}}$ 以建立误差修正预测模型,即

$$\Gamma_{w_{(n)}} = (w_{(n)} - w_n) + \Gamma_{w_n} \quad (16)$$

1.2.3 Hankel阵高阶迭代误差修正预测模型

为进一步提升预测模型精度,本文提出一种利用迭代方式建立高阶系统传递函数模型的改进方法,即在Hankel阵均值误差修正模型的基础上进行扩展。核心思想为把均值误差修正模型预测得到的数据补充至原脉冲数据列中以扩大脉冲数据量从而建立更高阶次的预测模型,且该补充的预测数据是经误差修正过后的数据,降低了误差的累积效果,能使后续预测结果步入正轨。用补充后的新脉冲数据构造Hankel阵并建立模型,通过迭代计算直到模型精度逐渐提高至收敛状态,最后对此进行预测分析。其算法流程如图2所示。

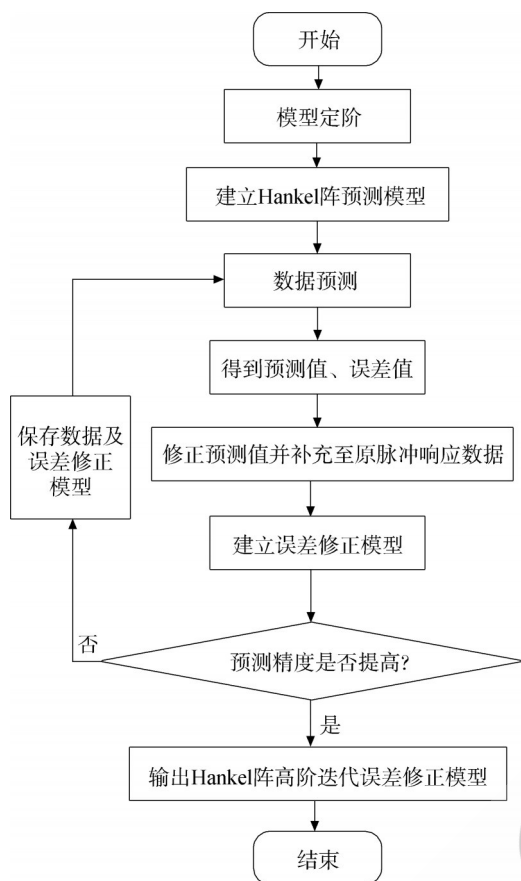


图2 Hankel阵高阶迭代误差修正模型流程图

Fig.2 Flowchart of Hankel array higher order iterative error correction model

其主要理论推导如下,令 $w_{(n)}$ 为所需建立模型的脉冲响应数据组,则可得其构造的 Hankel 阵 $H_{(w)}$ 为

$$H_{(w)} = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 & \cdots & w_{\frac{n}{2}-1} \\ w_2 & w_3 & w_4 & \cdots & w_{\frac{n}{2}-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{\frac{n}{2}-1} & w_{\frac{n}{2}-2} & w_{\frac{n}{2}-3} & \cdots & w_{n-1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

利用式(17)建立传递函数预测模型 $G(z^{-1})$, 并建立迭代公式,其中 $\hat{w}_m$ 表示传递函数预测模型 $G(z^{-1})$ 预测的数据, r 为迭代次数。结合式(15)、式(16)的修正模型,可得更新至原数列的新数据组 $\Gamma_{w_{(n)}}$,如式(18)所示:

$$\begin{aligned} \Gamma_{w_{(n)}}^{(r+1)} = & \left\{ (w_{(n)} - w_n) + \left[w_n + \sum_{i=1}^n \Delta \epsilon_n \cdot \delta(g - n \cdot \Delta G) \right] \right\} + \\ & \left(\sum_{m=r}^{\infty} \hat{w}_m \right)^{(r)} = \Gamma_{w_{(n)}} + \left(\sum_{m=r}^{\infty} \hat{w}_m \right)^{(r)} \end{aligned} \quad (18)$$

代入式(13)中的误差数据组 $\Delta \epsilon_{(n)}$ 并设立收敛函数如式(19)所示,当 $E_{(w)} \leq 0$ 时收敛

$$E_{(w)} = \frac{\Delta \epsilon_{(n+r+1)}}{n+r+1} - \frac{\Delta \epsilon_{(n+r)}}{n+r} \leq 0 \quad (19)$$

由此可求得最终收敛状态下的传递函数,即 Hankel 阵高阶迭代误差修正模型。

2 油膜灰度与厚度数据匹配

正确地提取和处理标定数据对试验结果有指向性意义,荧光油膜灰度与厚度数据匹配处理主要流程图如图3所示。

本次试验所使用平台如图4所示,使用了型号为 Canon EOS 550D 相机,其水平分辨率和垂直分辨率为 72 像素,位深度为 24-bit(位),具有高

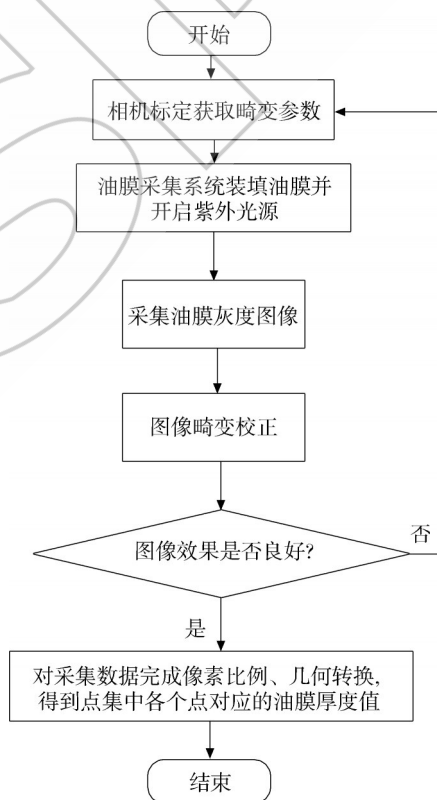


图3 数据采集流程图

Fig.3 Flowchart of data acquisition



图4 试验平台

Fig.4 Test platform

分辨率、采集速度快、操作简便等特点。试验用的机器视觉紫光灯型号为JZFZ-220/18-001,有效功率为 $18\text{ W} \pm 10\%$,具有发出紫外光较均匀的特点。为得到试验用荧光油膜,将少量的高可见UV粉末(UVHiVisOR)与黏度为 $100\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的硅油混合制备,所获得的荧光油膜在紫外光源的激发下由于斯托克斯位移(Stokes shift)效应,会辐射出一较长波段的荧光,且在紫外光源照度范围内,荧光油膜受激发光强与紫外光源初始光强将保持高度线型比例关系^[16]。试验过程中当荧光油膜呈激发状态,为排除杂光如紫外光灯光源、环境光等干扰,在相机的镜头处加装了一片 520 nm 波长的光学滤光片,以提高像素灰度值的精度。试验过程中将一直保持相机、光源固定不变,以保证试验的科学性、可靠性与准确性。

2.1 油膜数据采集微小高度装置

荧光油膜灰度与厚度采集系统由高透光率的光学载玻片放置表面平整的平台搭建而成^[16],能通过几何关系求解出连续且不同厚度值的荧光油膜,该方法目前在国内外较为通用且具有良好的普适性^[16-17]。因荧光油膜灰度只与自身物质的量浓度、紫外光功率及油膜厚度值有关,故可根据实际试验情况更改微小高度装置的尺寸,对所提取的荧光油膜灰度与厚度数据并无直接影响。且该采集系统于极短时间内采集效果良好,适用于黏度较高的荧光油膜。如图5所示,该微小装置满足

$$h = s \cdot \tan\left(\arcsin \frac{H_g}{F}\right) \quad (20)$$

其中 h 、 s 为待测点的厚度与所在测量区域长度, H_g 、 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。

本次使用的载玻片为国际标准载玻片,长为 76.20 mm ,宽为 25.40 mm ,高为 0.95 mm ;具体操作步骤如下:

- 1) 将载玻片2放置在平整光滑不透光的平

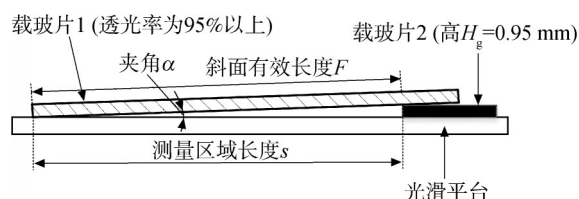


图5 微小高度装置给定示意图

Fig.5 Schematic diagram of micro-height device given

台上。因平台表面曲率、底面反射不均匀等都会影响采集得到荧光油膜灰度值,故试验选择的平台由高精度机械加工以确保平台的光滑性和平整性,提高采集的荧光油膜灰度值可靠性;

- 2) 在光滑平台上倒入适量荧光油膜,取载玻片1,一端接触平台,按压荧光油膜使另一端接触载玻片2,需尽量使荧光油膜充满载玻片1与平台空隙处;

- 3) 开启紫外光灯,采集图像。

2.2 油膜灰度与厚度数据匹配及提取

荧光油膜灰度与厚度数据的正确提取对算法的验证有重大意义。由成像原理可知相机采集的方式主要有两种:一种是像平面与被测平面平行的特殊情况,即像素平面坐标系 (x,y) 与被测平面空间坐标系 (X_w,Y_w) 的像素比例尺 λ 呈正比关系;另一种为一般映射情况,即像平面与被测平面非平行状,则需进行相机标定与位姿解算来完成像素坐标系与空间坐标系间的转换。基于本次试验目的主要在于验证Hankel阵及其改进算法在预测荧光油膜厚度值方面的应用价值和实用意义,故仅考虑简易且采集效果佳的像平面与被测平面平行(正投)的特殊情况^[16]。为提高采集图像信噪比,本次试验对此作了以下措施:

- 1) 缩短了荧光油膜与紫外光源距离;
- 2) 提高了曝光时间。

世界坐标系的建立以及微小高度装置坐标信息如图6所示,令紫外光源于荧光油膜正上方并处合适距离,使其均匀照亮模型表面的荧光油膜;为排除相机畸变干扰,在数据采集流程图中(图3),对相机进行了标定并获得相关畸变参数,以实现图像的畸变校正,提高荧光油膜灰度与厚度对应的真实性;为保证采集的灰度值精度,对像素值采取均值处理措施,采集工况如图7所示。

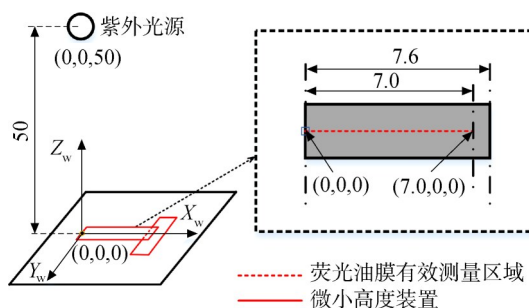


图6 坐标系建立与位置信息(单位:cm)

Fig.6 Establishment of coordinate system and position information (unit:cm)

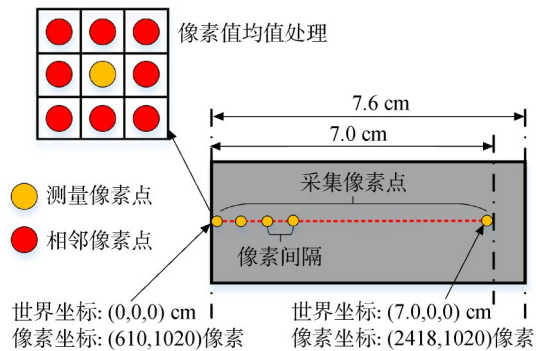


图 7 灰度值均值处理及采集分布
Fig.7 Gray value mean processing and collection distribution

荧光油膜灰度图像和所需采集点区域图如图 8 所示。因灰度值均值处理后存在小数,故对其进行相应换算处理为整数,采集的荧光油膜灰度与厚度数据如表 1~表 2 所示,其中经换算,本次

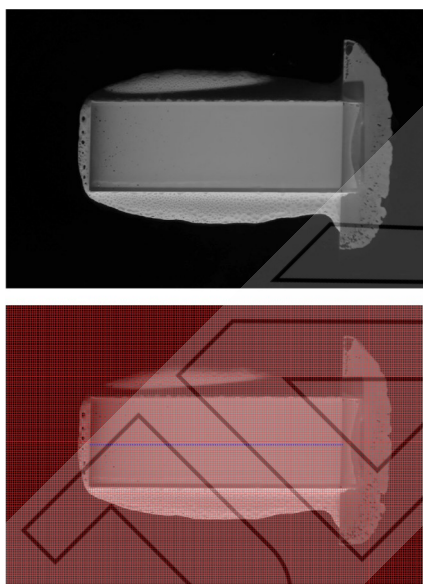


图 8 标定视场图
Fig.8 Calibrate the field of view

表 1 荧光油膜灰度-厚度测试数据

Table 1 Fluorescence oil film gray-thickness test data

序号	油膜灰度值/像素	油膜厚度值/ μm
1	76	77.986 73
2	72	64.712 39
3	68	47.566 37
4	64	38.163 72
5	60	29.827 26
6	56	24.889 38
7	52	19.911 50

续表

序号	油膜灰度值/像素	油膜厚度值/ μm
8	48	15.486 73
9	44	12.168 14
10	40	9.402 654
11	36	7.190 266
12	32	5.530 973
13	28	4.424 779
14	24	3.871 681
15	20	2.765 487
16	16	2.212 389

表 2 荧光油膜灰度-厚度建模数据

Table 2 Fluorescence oil film gray-thickness modeling data

序号	油膜灰度值/像素	油膜厚度值/ μm
1*	100	301.991 2
2*	96	235.619 5
3*	92	178.097 3
4*	88	142.146 0
5*	84	117.256 6
6*	80	96.238 90

试验的像素比例尺系数 λ 为 $38.712\ 89\ \mu\text{m}/\text{像素}$;在采集过程中,本次荧光油膜厚度在 $320\ \mu\text{m}$ 左右亮度就达到了饱和状态,即亮度不再增长,故采集的最大厚度 $300\ \mu\text{m}$ 左右,且采集点顺序由右往左,即以饱和灰度值点开始。以表 2 中的少量数据建立插值模型和 Hankel 阵模型,对表 1 中的测试数据进行预测分析,验证算法的可行性。

3 荧光油膜预测模型验证

3.1 插值模型验证

本次试验利用一元全区插值法和连分式插值法进行了验证,其预测结果曲线图如图 9 所示,可直观看出一元全区插值法和连分式插值法在表 2 中的极少量数据建模情况下进行外插预测时并不适用,其原因在于建模数据量太少而难以描述数据的发展趋势,故在较远处曲线甚至偏离原始数据曲线。综上所述,在众多一维插值法中,外插能力稍好的一元全区插值法与连分式插值法同样比较依赖大的数据量,在极少数数据量的情况下显得

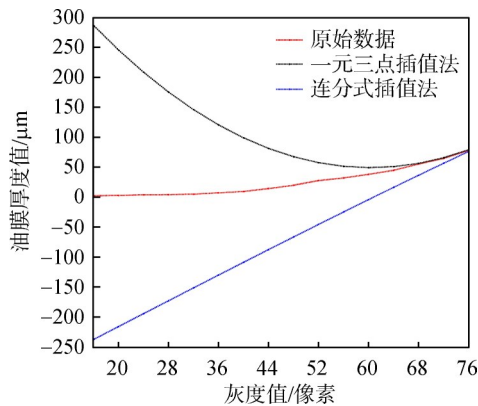


图9 插值法预测

Fig.9 Interpolation prediction

不适用。

3.2 Hankel阵预测模型验证

3.2.1 传统Hankel阵预测模型验证

由表2中的少量数据构造Hankel阵,表1数据作为检验数据以检验预测模型精度。其传递函数预测模型如式(21)所示,预测结果数据如表3所示,计算结果分析,该传统Hankel阵模型的预测误差为23.31%,即预测精度为76.69%。

表3 传统Hankel阵预测模型预测数据

Table 3 Traditional Hankel matrix model predicts the resulting data

序号	油膜灰度 值/像素	油膜厚度/ μm		绝对误差 值/ μm
		试验值	预测值	
1	76	77.986 73	76.563 5	1.423 2
2	72	64.712 39	61.237 6	3.474 8
3	68	47.566 37	49.311 6	1.745 2
4	64	38.163 72	39.828 3	1.664 6
5	60	29.827 26	32.112 8	2.245 5
6	56	24.889 38	25.843 7	0.954 3
7	52	19.911 50	20.799 6	0.888 1
8	48	15.486 73	16.753 3	1.266 6
9	44	12.168 14	13.497 6	1.329 5
10	40	9.402 654	10.872 1	1.469 4
11	36	7.190 266	8.755 6	1.565 3
12	32	5.530 973	7.051 3	1.520 3
13	28	4.424 779	536 793	1.254 5
14	24	3.871 681	4.574 3	0.702 6
15	20	2.765 487	3.684 2	0.918 7
16	16	2.212 389	2.967 2	0.754 8

$$G(z)=\frac{302z^2-108.3z+52.84}{z^3-1.139z^2+0.4737-0.1687}\tag{21}$$

3.2.2 Hankel阵误差修正预测模型验证

在传统Hankel阵预测基础上,得到修正误差 $\Delta\epsilon=0.6573$,修正误差后的传递函数模型如式(22)所示,预测结果数据如表4所示,经分析计算,该Hankel误差修正模型的预测误差为14.31%,即预测精度为85.69%。

$$G(z)=\frac{302z^2-94.09z+71.79}{z^3-1.092z^2+0.4998-0.2168}\tag{22}$$

3.2.3 Hankel阵高阶迭代误差修正预测模型验证

在Hankel阵误差修正模型的基础上,利用预测得到的数据经误差修正后补充至原脉冲数列以达扩大数据量的目的,本次试验迭代收敛至四阶系统,其传递函数模型如式(23)所示,预测结果数据如表5所示,计算分析可知,该Hankel阵高阶迭代误差修正模型的预测误差为10.75%,即预测精度为89.25%。

表4 Hankel阵误差修正预测模型预测结果

Table 4 Hankel matrix error correction model predicts the resulting data

序号	油膜灰度 值/像素	油膜厚度/ μm		绝对误差 值/ μm
		试验值	预测值	
1	76	77.986 73	77.111 2	0.875 5
2	72	64.712 39	60.580 3	4.132 1
3	68	47.566 37	48.376 0	0.809 6
4	64	38.163 72	39.165 0	1.001 3
5	60	29.827 26	31.602 6	1.735 3
6	56	24.889 38	25.350 7	0.461 3
7	52	19.911 50	20.246 8	0.335 3
8	48	15.486 73	16.235 7	0.749 0
9	44	12.168 14	13.050 6	0.882 5
10	40	9.402 654	10.498 1	1.095 4
11	36	7.190 266	8.422 3	1.232 0
12	32	5.530 973	6.753 8	1.222 8
13	28	4.424 779	5.417 1	0.992 3
14	24	3.871 681	4.350 8	0.479 1
15	20	2.765 487	3.493 6	0.728 1
16	16	2.212 389	2.804 5	0.592 1

表 5 Hankel 阵高阶迭代误差修正预测模型预测结果

Table 5 Hankel matrix high order iteration error correction model of predicts the resulting data

序号	油膜灰度 值/像素	油膜厚度/ μm		绝对误差 值/ μm
		试验值	预测值	
1	76	77.986 73	78.179 3	0.192 6
2	72	64.712 39	63.192 3	1.520 1
3	68	47.566 37	51.204 1	3.637 7
4	64	38.163 72	41.576 2	3.412 5
5	60	29.827 26	33.760 4	3.893 1
6	56	24.889 38	27.396 6	2.507 2
7	52	19.911 50	22.226 3	2.314 8
8	48	15.486 73	18.033 4	2.546 7
9	44	12.168 14	14.633 2	2.465 1
10	40	9.402 654	11.874 4	2.471 7
11	36	7.190 266	9.635 4	2.445 1
12	32	5.530 973	7.818 5	2.287 5
13	28	4.424 779	6.344 1	1.919 3
14	24	3.871 681	5.147 9	1.276 2
15	20	2.765 487	4.177 2	1.411 7
16	16	2.212 389	3.389 5	1.177 1

$$G(z)=\frac{302z^3+70.65z^2+20.33z+73.57}{z^4-0.5463z^3-0.0962z^2+0.1701-0.2072}$$

(23)

3.2.4 结果对比分析

通过试验数据验证了在基于极少量数据背景下,传统插值法的外插预测能力显得并不适用,其插值预测结果呈发散状态,不能很好地描述数据变化趋势。

对比分析表 3~表 5 中的预测结果值和误差值,可以得到经改进后的 Hankel 阵误差修正模型较传统 Hankel 阵模型其预测精度提高了 9%;而再改进的 Hankel 阵高阶迭代误差修正模型,较 Hankel 阵误差修正模型其精度提高了 3.56%,较传统 Hankel 阵模型其精度提高了 12.56%。改进的两种预测模型较传统方法在预测精度方面有一定的提升,三种方法预测结果曲线如图 10 所示。

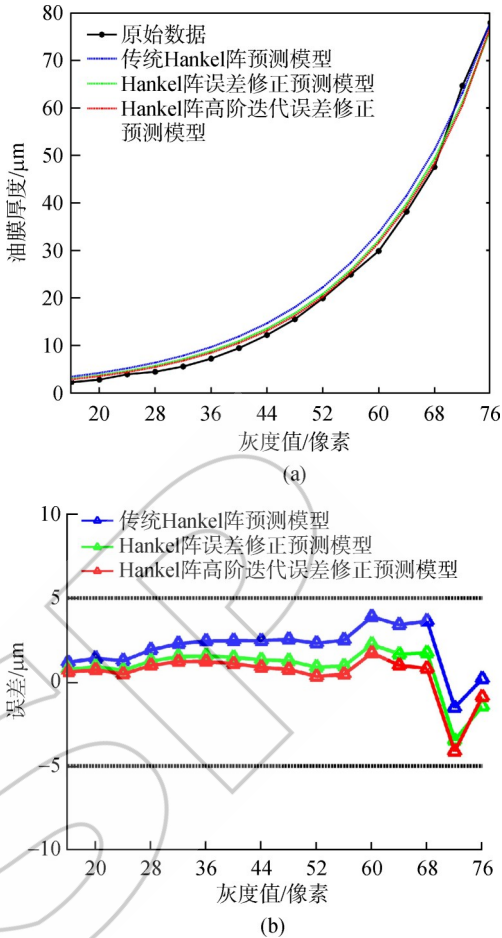


图 10 三种模型预测结果对比图

Fig.10 Comparison of the prediction results from the three models

4 结 论

本文对荧光油膜灰度与厚度关系数据进行了系统地采集。基于极少数据量这一情况,验证了传统插值法的不适用性,且利用 Hankel 阵建立荧光油膜灰度与厚度预测模型,并在传统 Hankel 阵预测模型的基础上进行了改进,最后通过科学的试验进行了验证,可得以下结论:

1) 荧光油膜灰度与厚度关系数据的采集步骤较为繁琐、耗时耗力;故巧用一种建模方法,其目的在于通过极少数据量来预测出其余想要得到的数据,且保持较高的精度,这样在极大程度上避免了数据采集的繁多操作,节省了大量的时间和工具器材。

2) 试验表明,基于极少数据量且针对预测该极少数据量以外的数据这一特殊背景,传统的插值法显得并不适用,其外插预测的曲线往往会发生较大的偏离,预测较远处的数据点甚至会出现

错误的数据库。

3) 通过 Hankel 阵的形式建立预测模型,能很好地满足由极少数据量建模以预测其他数据且保持较高精度这一特殊背景,且经试验数据表明,传统 Hankel 模型的预测精度能够达到 76.69%,基于此的改进算法 Hankel 阵误差修正模型和 Hankel 阵高阶迭代误差修正模型的预测精度分别为 85.69% 和 89.25%,较传统 Hankel 阵模型其精度分别提高了 9% 和 12.56%。在测量全局表面摩擦阻中,荧光油膜的厚度测量极其重要,且厚度的测量达到了微米级别,因此该改进算法的精度提升在工程实际中具有较大的应用价值。

4) 本文利用的 Hankel 阵建立预测模型的方法目前适用于四阶的荧光油膜灰度与厚度模型及四阶以下的其他系统模型,而针对其他更高阶次的模型则还需相应有关的试验验证。

参考文献:

- [1] LIU T, SHEN L. Fluid flow and optical flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 614:253-291.
- [2] 雷鹏飞, 周恩民, 胡运华. 连续式跨声速风洞与压缩机的气动性能匹配[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2):233-239.
LEI Pengfei, ZHOU Enmin, HU Yunhua. Aerodynamic performance matching of continuous transonic wind tunnel and its driving compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2):233-239. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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.
- [7] 邢宇, 罗东明, 余雄庆. 超临界层流翼型优化设计策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(8):1616-1624.
XING Yu, LUO Dongming, YU Xiongqing. Optimization strategy of supercritical laminar flow airfoil design[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(8):1616-1624. (in Chinese)
- [8] 刘志勇, 李建强, 高荣钊, 等. 应用 OFI 和 Preston 管测量亚跨声速摩擦应力[J]. 实验流体力学, 2018, 32(5):76-81.
LIU Zhiyong, LI Jianqiang, GAO Rongzhao, et al. Skin friction measurements using oil film interferometry and Preston tube at subsonic/transonic regime[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018, 32(5):76-81. (in Chinese)
- [9] 张华辉. 低温漂混合集成砷化镓霍尔器件的研究与设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
ZHANG Huahui. Research and design of hybrid integrated gallium arsenide Hall device with low temperature coefficient [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 徐大川, 龙彦志, 李玉栋, 等. 基于激光多普勒原理的极低风速测量实验[J]. 航空动力学报, 2020, 35(6):1228-1237.
XU Dachuan, LONG Yanzhi, LI Yudong, et al. Experiment of extremely low wind velocity measurement based on laser Doppler[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(6):1228-1237. (in Chinese)
- [12] TANNER L H. A skin friction meter, using the viscosity balance principle, suitable for use with flat or curved metal surfaces (based on thickness measurement) [J]. Journal of Physics E:Scientific Instruments, 1977, 10(3):278-284.
- [13] BROWN J L, NAUGHTON J W. The thin oil film equation [M]. Washington DC: NASA AMES Research Center, 1997.
- [14] LIU T, MONTEFORT J, WOODIGA S, et al. Global luminescent oil-film skin-friction meter[J]. AIAA Journal, 2008, 46(2):476-485.
- [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] 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)
- [17] 黄湛, 王宏伟, 魏连风, 等. 基于荧光油膜的全局表面摩擦测量技术研究[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)
- [18] 向珉江,高厚磊,安艳秋,等.一种提高数据同步精度的自适应插值算法[J].电力系统自动化,2012,36(8):77-81.
XIANG Minjiang, GAO Houlei, AN Yanqiu, et al. An adaptive interpolation algorithm to improve data synchronization precision[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8):77-81.(in Chinese)
- [19] MU B Q, CHEN H F. Hankel matrices for system identification[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2014, 409(1):494-508.
- [20] 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 and Applications, 2019, 28(7):1-8.(in Chinese)
- [21] 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)
- [22] ALI S, WENG C, KONG J. Vector Hankel transform analysis of annular-ring microstrip antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(4):637-644.
- [23] CHEN G N, ZHAO B, ZHANG H P. The general rational interpolation problem in scalar case and its hankel vector[J]. Linear Algebra and its Applications, 1996, 244(1):165-201.
- [24] FORTAKI T, KHEDROUCHE D, BOUTTOUT F, et al. Vector Hankel transform analysis of a tunable circular microstrip patch[J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2010, 21(5):219-231.
- [25] 张波,李健君.基于 Hankel 矩阵与奇异值分解(SVD)的滤波方法以及在飞机颤振试验数据预处理中的应用[J].振动与冲击,2009,28(2):162-166.
ZHANG Bo, LI Jianjun. Denoising method based on hankel matrix and SVD and its application in flight flutter testing data preprocessing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(2):162-166.(in Chinese)
- [26] AHN H S, PARK S H, YE J C. Quantitative susceptibility map reconstruction using annihilating filter-based low-rank Hankel matrix approach[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2020, 83(3):858-871.
- [27] WANG C, ZHU Z, GU H. Low-rank seismic denoising with optimal rank selection for hankel matrices[J]. Geophysical Prospecting, 2020, 68(3):892-909.
- [28] LI T, CHEN J. The core invertibility of a companion matrix and a Hankel matrix[J]. Linear and Multilinear Algebra, 2020, 68(3):550-562.
- [29] LAL M, MITTRA R. A comparison of transfer function simplification methods[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 19(5):617-618.

(编辑:陈 越)