文章编号：1001-4888(2020)04-0577-11

基于多项式代理模型的薄膜材料力学参数识别*

段辉亚，杨昌棋，贾子初
（重庆大学 航天航空学院，重庆 400000）

摘要： 针对鼓泡方法对具有不同本构关系的薄膜材料力学参数识别方法难以统一的问题，提出了一种基于代理模型的薄膜材料力学参数识别方法。首先，运用多项式代理模型将薄膜材料力学参数与薄膜试件在不同测点的挠度仿真值之间的关系显式化，然后采用改进的鼓泡实验装置测量并获得薄膜试件上各测点的扰度实验值，再以相应的测点多项式代理模型值与实验值之间的相对误差的平方和作为目标函数，采用状态转移算法对材料参数进行反解，获得能表征薄膜的真实材料参数。采用这一方法，对 304 不锈钢薄膜和橡胶材料进行识别实验，证实了这一方法的有效性和可靠性。因此可以利用本文的方法研究鼓泡实验装置的仪器化，从而为进一步实现薄膜材料力学参数识别方法的统一提供新的思路。

关键词： 多项式代理模型；识别方法；材料参数；薄膜材料
中图分类号： O3 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-19-035

0 引言

薄膜材料具有优良的力、热、光、电性能，在半导体功能器件等方面具有广阔的应用前景[1]。半导体功能器件的稳定性和可靠性在很大程度上取决于薄膜的力学行为[2]，而薄膜的力学行为主要受到薄膜材料力学参数的影响。准确的薄膜材料力学参数对于半导体的设计与模拟分析非常重要，因而使得研究识别薄膜材料力学参数的方法备受关注。

薄膜材料力学参数测量，相对于常规的材料参数测量具有一定的特殊性。实验测量方法主要有鼓泡法[3]、单轴拉伸法[4]、光测实验法[5]、激光超声场检测仪测量法[6]、纳米压痕法[7]等。在薄膜的材料参数测试中，鼓泡法具有试件制作要求不高，无需特别加工，对材料性能干扰小的特点，在薄膜的材料参数测试中受到广泛的关注。本文采用高精度激光位移测量构造了基于激光位移的鼓泡测试系统，克服了常规拉伸法由于膜厚较小而装夹困难及试样边缘损伤等问题，避免了光测实验法中受试样离面位移的影响，也可克服激光超声场测量中测量声时和测量声波传播距离的误差问题，且可以解决压痕法无法剔除基底影响的问题。

由于鼓泡实验中试件应力分布不是均匀的，材料参数的识别必然会涉及力学参数的反解问题。在力学参数的反解问题中的数值优化算法主要有非线性最小二乘法、Levenberg-Marquardt 算法、模拟退火算法、动态正则下降法、粒子群算法等。Salehghaffari 等[8]利用非线性最小二乘法识别了金属薄膜材料粘塑性本构模型的力学参数；Prates 等[9]利用十字形双轴拉伸实验结果，结合 Levenberg-Marquardt 算法识别了金属薄膜材料复杂的本构模型参数；Tuninetti 等[10]利用模拟退火算法识别了 Ti-6Al-4V 钛合金薄膜材料的力学参数；Ying 等[11]利用动态正则下降算法识别了金属薄膜材料的力学参数；谭阳等[12]利用粒子群算法结合模型参数解耦分离识别了纯铝 1060 薄膜材料粘塑性本构模型中的参数。然

* **收稿日期：** 2019-03-04；**修回日期：** 2019-06-05
通讯作者： 杨昌棋(1959—)，男，教授，博士生导师。主要从事实验力学方面的研究。Email：ycq3664@126.com

而,在基于鼓泡法的薄膜材料力学参数识别问题中,以实验值与仿真值之差的平方和作为目标函数,属于隐式的非线性目标函数,对于隐式的非线目标函数进行优化会出现一系列问题,例如:依赖于初始值选取、收敛速度慢,迭代次数多以及容易陷入局部最优等。虽然针对特定材料已有不少学者找出了一些特定算法,但是对于不同的材料,由于材料本构关系差异很大,很难找到一个统一的策略,解决不同本构关系的材料参数识别问题。

本文尝试利用多项式代理模型来处理鼓泡实验法中涉及的隐式的非线性目标函数优化问题。运用多项式代理模型能很好地得到仿真值和参数之间的关系,从而可以把实验值与多项式代理模型值之间相对误差的平方和作为目标函数,使得目标函数显式化。对于显式的目标函数,再采用状态转移算法可以方便地反解求出薄膜材料的力学参数。

1 针对鼓泡实验试件的多项式代理模型的构建

1.1 试件的有限元模型

为了得到材料的多项式代理模型,即测点挠度响应值与材料参数之间的关系,需要通过建立材料的有限元模型,得到不同材料参数下不同测点相对应的挠度值。因此本文采用有限元软件 ABAQUS 对304不锈钢薄膜材料和橡胶薄膜材料的鼓泡实验进行有限元分析与仿真,使得有限元模型与实际鼓泡实验模型基本保持一致。其中边界条件设置为全约束,载荷条件设置为对一侧材料试件表面施加均布压强。在进行有限元仿真时,选择合适的本构模型及单元类型非常重要,因此304不锈钢薄膜试样单元类型采用 S4R 壳单元。对于橡胶材料而言,其单位类型采用 C3D8RH 杂交单元,而 Mooney-Rivlin 模型[13]在一定变形范围内能很好地表征橡胶的力学性能,因此本文选择 Mooney-Rivlin 模型来表征橡胶材料的力学性能,其应变能密度表达式如下:

$$V_\varepsilon = C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+((J-1)^2/D) \tag{1}$$

式中,C_{10}和 C_{01}为待定的力学性能常数,即为本文需要识别的橡胶材料力学参数,但是实际上没有十分明确的物理意义,仅作为实验数据的回归系数处理。其中 $2C_{10}+2C_{01}=G$, G 为材料的剪切模量,因此只要 $C_{10}+C_{01}>0$,Mooney-Rivlin 模型就是稳定的。D 为描述材料压缩性的系数;应变不变量 I_1, I_2 和 J 均由三个方向的拉伸比 $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$ 所决定的,$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2$, $I_2=\lambda_1^2\lambda_2^2+\lambda_1^2\lambda_3^2+\lambda_2^2\lambda_3^2$, $J=\lambda_1\lambda_2\lambda_3$。

通过查询文献以及选择不同的单元进行对比,本文对于不锈钢材料选择的 S4R 壳单元以及橡胶材料选择的 C3D8RH 杂交单元都具有很强的适用性。另外为了验证网格密度对仿真结果的影响,本文选取了四种单元密度情况进行验算,分别是200个单元、500个单元、1000个单元、1500个单元,对这四种情况进行相应的有限元计算,所得到的挠度结果基本一致,所以本文的单元密度选取划分1500个单元。

1.2 薄膜多项式代理模型的构建与检验

代理模型[14]被称为“模型的模型”。代理模型的实质是将复杂的有限元模型及其约束条件用数学模型近似表示。代理模型方法主要包含两方面的内容:一是样本点的选取,即实验设计方法的确定;二是以何种方式进行数据拟合和预测。每一方面都影响着代理模型的精度和效率,实际研究中应结合这两方面进行研究。

1.2.1 拉丁超立方实验设计方法

高精度的代理模型依赖于合理的、有效的空间采样策略,即需要选择一种实验设计方法来合理安排实验,完成构建模型的采样点的数量和空间分布问题。由于本文研究的对象分别只有两个变量,故选样方法采用拉丁超立方实验设计方法。拉丁超立方方法[15]是一种特殊的多维分层抽样方法,广泛应用于工程实际中。该方法引入了“分层”的概念,它将采样值在整个样本空间随机分布的同时,也可以保证不集聚,即对于整个采样空间有很好的覆盖率,并且拟合非线性响应能力强。设薄膜材料未知的力学参数的个数为 n, α^i 为第 i 个未知的力学参数。其中 $\alpha^i\in[\alpha_l^i,\alpha_u^i]$, α_l^i 和 α_u^i 分别为第 i 个力学参数的下、上界,$i=1,2,\cdots,c,\cdots,n$。则利用拉丁超立方实验设计方法在体内产生 H 个样本的过程如下:

step1 确定抽样规模 H

step2 将第 i 个未知的力学参数 α^i 的定义域区间$[\alpha_l^i,\alpha_u^i]$划分成 H 个相等的小区间:$\alpha_l^i=\alpha_0^i<\alpha_1^i<$

$\alpha_2^i<\cdots<\alpha_d^i<\alpha_{d+1}^i<\cdots<\alpha_H^i=\alpha_u^i$，这样就将原来的一个超立方体划分成 H^n 个小超立方体。

step3　产生一个 $H\times n$ 的矩阵 **A**，**A** 的每列都是数列{1，2，…，H}的一个随机全排列。

step4　**A** 的每行就对应一个被选中的小超立方体，在每个被选中的小超立方体内随机产生一个样本，这样就选出 H 样本。

从上述拉丁超立方抽样的过程中可以看出，确定好薄膜材料参数的可能区间是前提，再将拉丁超立方抽样的过程程序化，即可以得到一系列薄膜材料参数样本点 $\alpha_j=(\alpha^1,\alpha^2,\cdots,\alpha^c,\cdots,\alpha^n)$，其中 α_j 表示第 j 个样本点，$j=1,2,3,\cdots,m$。

1.2.2　代理模型构造方法

利用拉丁超立方实验设计方法选取样本点后，以何种方式对样本点进行数据拟合和预测成为了关键。首先代理模型的基本思想是：当设计区域内一定数量样本点的目标响应值已知时，通过插值或拟合等方法可以建立一个超曲面，在此样本点邻近的区域范围内，可用超曲面代替实际目标值的复杂计算。常用的代理模型中多项式响应面模型结构简单、计算量小，能够有效过滤计算中的数值噪声。多项式响应面模型是一种典型的利用拟合原理的构造方法，通过最小二乘法获得近似多项式的参数建立多项式模型。

代理模型构造的主要步骤：(1) 在识别参数可能的分布区域内，根据上述实验设计方法确定构造代理模型所需的一系列样本点 α_j。(2) 将薄膜试件参数样本点 α_j 所对应的挠度响应值 w_j^k 通过薄膜试件有限元仿真模型确定，其中 w_j^k 指的是第 j 个样本点所得到的第 k 个测点的挠度响应值，则(α_j,w_j^k)可构成样本对。(3) 根据部分样本对构造合适的模型，并通过剩余的样本对进行模型验证。得到第 k 个测点所对应的多项式代理模型 $f_k(\alpha_j,w_j^k)$，当采用多项式代理模型时，基本形式如下：

$$f_k(\alpha_j,w_j^k)=\beta_0+\sum_{i=1}^{n}\beta_i\alpha^i+\sum_{i=1}^{n}\sum_{c\geq i}^{n}\beta_{ic}\alpha^i\alpha^c+\cdots \tag{2}$$

式中，β_0，β_i，β_{ic} 是多项式的常数项，通过最小二乘法进行数据拟合求解。

1.2.3　多项式代理模型评估

为保证基于上述多项式代理模型的可靠性，需要进行预测能力评估。一般通过决定系数 R^2、相对均方根误差 RMSE 和平均绝对误差 MAPE 进行评估，其定义式分别如下：

$$R^2=\frac{\sum_{j=1}^{m}(W_j^k-\overline{w^k})^2}{\sum_{j=1}^{m}(w_j^k-\overline{w^k})^2} \tag{3}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(W_j^k-w_j^k)^2}{m}} \tag{4}$$

$$\mathrm{MAPE}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left|\frac{W_j^k-w_j^k}{w_j^k}\right|\times 100\% \tag{5}$$

式中，m 为样本点的个数；$\overline{w^k}$为 m 个样本点所对应的第 k 个仿真输出值的平均值；W_j^k 为第 j 个样本点所对应的第 k 个测点的代理模型计算值。

通过上述多项式代理模型评估公式即可计算每个测点的代理模型的评价值。其中 R 为负相关系数，表示设计变量和分析目标的线性相关性，其值在[0，1]之间，越接近 1 表示线性关系越强；RMSE 为相对均方根误差，其值越接近 0 表示最大局部误差越小。

1.3　不锈钢薄膜材料的多项式代理模型

304 不锈钢薄膜材料的力学参数，以弹性模量 E 和 ν 为设计变量。根据参考文献[16]可知 E 可能的取值范围为[190GPa，210GPa]，ν 的范围为[0.26，0.3]。在采用拉丁超立方实验方法选取 20 组实验数据，依据有限元模型得到不同参数下的挠度仿真值，从而构建每个测点的实验数组。利用二项式函数拟合的 14 个代理模型如表 1。

计算出多项式代理模型之后,要对代理模型进行验证评估,通过 MATLAB 计算出多项式代理模型决定系数均大于 0.9996,均方根误差均小于 0.00695,平均值绝对误差均小于 0.0063。从而由此验证评估值可以看出,以本文的二次多项式代理模型为基础进行优化工作是可行的。

表 1 不锈钢薄膜材料的多项式代理模型

Tab. 1 Polynomial surrogate model for stainless steel film materials

测点序号	多项式代理模型
1	$f_1(E,\nu)=0.212E^2+0.025E\nu-0.008\nu^2-13.42E-0.527\nu+275.1$
2	$f_2(E,\nu)=0.210E^2+0.025E\nu-0.008\nu^2-13.31E-0.522\nu+272.9$
3	$f_3(E,\nu)=0.205E^2+0.024E\nu-0.008\nu^2-13.00E-0.510\nu+266.5$
4	$f_4(E,\nu)=-0.773E^2+0.612E\nu-0.221\nu^2+10.21E-0.462\nu+29.10$
5	$f_5(E,\nu)=0.186E^2+0.022E\nu-0.007\nu^2-11.81E-0.464\nu+242.2$
6	$f_6(E,\nu)=0.173E^2+0.020E\nu-0.007\nu^2-11.81E-0.464\nu+242.2$
7	$f_7(E,\nu)=0.157E^2+0.019E\nu-0.006\nu^2-9.97E-0.391\nu+204.4$
8	$f_8(E,\nu)=0.139E^2+0.016E\nu-0.005\nu^2-8.854E-0.347\nu+181.5$
9	$f_9(E,\nu)=0.120E^2+0.014E\nu-0.005\nu^2-7.649E-0.300\nu+156.7$
10	$f_{10}(E,\nu)=0.101E^2+0.012E\nu-0.004\nu^2-6.389E-0.250\nu+130.9$
11	$f_{11}(E,\nu)=0.08E^2+0.009E\nu-0.003\nu^2-5.117E-0.200\nu+104.8$
12	$f_{12}(E,\nu)=0.061E^2+0.007E\nu-0.002\nu^2-3.875E-0.151\nu+79.44$
13	$f_{13}(E,\nu)=0.042E^2+0.005E\nu-0.001\nu^2-2.713E-0.106\nu+55.62$
14	$f_{14}(E,\nu)=0.026E^2+0.003E\nu-0.001\nu^2-1.686E-0.065\nu+34.56$

1.4 橡胶薄膜材料的多项式代理模型

为了验证本文方法能够对非线性薄膜材料进行参数识别,以识别橡胶材料为例,其 Mooney-Rivlin 模型中的待求参数为 C_{10} 和 C_{01},依据参考文献[17],两者的范围均取为[−3,3],再利用拉丁超立方实验方法选取 50 组实验数据,其中对材料参数的要求是必须使得两个材料参数之和大于零。依据有限元模型得到不同参数下的挠度仿真值,从而构建每个测点的实验数组。利用二项式函数拟合的 14 个代理模型如表 2。

计算出多项式代理模型之后,要对代理模型进行验证评估,通过 MATLAB 计算出多项式代理模型决定系数在 0.963 到 0.9823 之间,均方根误差在 0.15 到 0.18 之间,平均值绝对误差在 0.034 到 0.038 之间。由评价指标可以知道此代理模型可以进行相应的参数识别。

2 薄膜材料的鼓泡实验

为了构造薄膜材料参数识别的反问题模型,通过多项式代理模型建立相应的薄膜材料力学参数与测点挠度之间的关系之后,还需要得到相应测点挠度的实验值,因此本文采用改进的鼓泡法装置结合激光位移测量技术来测量相应测点的挠度值。

2.1 改进的鼓泡实验装置

改进的鼓泡实验装置主要包括测量基座、试件夹持系统、激光位移测量系统、压力加载系统,实验装置设计图如图 1 所示。

表 2　橡胶薄膜材料的多项式代理模型

Tab. 2　Polynomial agent model for rubber film materials

测点序号	多项式代理模型
1	$F_1(C_{10},C_{01})=0.208C_{10}^2+0.441C_{10}C_{01}+0.275C_{01}^2-1.667C_{10}-1.850C_{01}+5.893$
2	$F_2(C_{10},C_{01})=0.207C_{10}^2+0.439C_{10}C_{01}+0.274C_{01}^2-1.660C_{10}-1.843C_{01}+5.869$
3	$F_3(C_{10},C_{01})=0.205C_{10}^2+0.434C_{10}C_{01}+0.271C_{01}^2-1.641C_{10}-1.823C_{01}+5.803$
4	$F_4(C_{10},C_{01})=0.201C_{10}^2+0.426C_{10}C_{01}+0.266C_{01}^2-1.610C_{10}-1.789C_{01}+5.694$
5	$F_5(C_{10},C_{01})=0.195C_{10}^2+0.415C_{10}C_{01}+0.259C_{01}^2-1.566C_{10}-1.741C_{01}+5.541$
6	$F_6(C_{10},C_{01})=0.188C_{10}^2+0.400C_{10}C_{01}+0.249C_{01}^2-1.510C_{10}-1.680C_{01}+5.344$
7	$F_7(C_{10},C_{01})=0.179C_{10}^2+0.382C_{10}C_{01}+0.238C_{01}^2-1.441C_{10}-1.606C_{01}+5.102$
8	$F_8(C_{10},C_{01})=0.169C_{10}^2+0.361C_{10}C_{01}+0.225C_{01}^2-1.36C_{10}-1.517C_{01}+4.815$
9	$F_9(C_{10},C_{01})=0.157C_{10}^2+0.336C_{10}C_{01}+0.21C_{01}^2-1.265C_{10}-1.413C_{01}+4.481$
10	$F_{10}(C_{10},C_{01})=0.143C_{10}^2+0.307C_{10}C_{01}+0.192C_{01}^2-1.156C_{10}-1.296C_{01}+4.098$
11	$F_{11}(C_{10},C_{01})=0.127C_{10}^2+0.275C_{10}C_{01}+0.172C_{01}^2-1.034C_{10}-1.162C_{01}+3.666$
12	$F_{12}(C_{10},C_{01})=0.110C_{10}^2+0.24C_{10}C_{01}+0.15C_{01}^2-0.898C_{10}-1.013C_{01}+3.183$
13	$F_{13}(C_{10},C_{01})=0.091C_{10}^2+0.2C_{10}C_{01}+0.125C_{01}^2-0.747C_{10}-0.848C_{01}+2.646$
14	$F_{14}(C_{10},C_{01})=0.07C_{10}^2+0.157C_{10}C_{01}+0.098C_{01}^2-0.581C_{10}-0.666C_{01}+2.054$

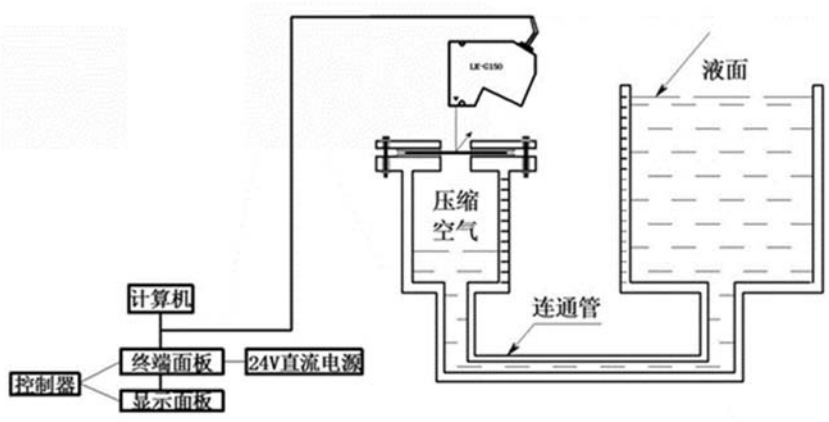


图 1　实验装置设计图

Fig. 1　Design of experimental device

薄膜装夹装置由带通孔的不锈钢压盖(法兰)和圆柱体不锈钢测量基座构成，由螺钉连接，将薄膜固定在压盖与基座之间的通孔位置，通过平垫圈，薄膜，平垫圈的顺序安置，由硅胶进行密封。激光位移测量系统主要引入激光位移测量技术，激光头的测量方法选用漫反射测量，测点的变形量由激光位移传感器测得，其原理为三角测量法。采用三角测量法的激光位移传感器最高线性度可达 1μm，分辨率更是可达到 0.1μm 的水平，所以此测量方法具有成本低、全场测量、非接触式、高分辨率、高灵敏度、无破坏、操作简单、理论精度高、可以快速获取结果等优点。为了能在较稳定的压强作用下进行实验，压力加载系统选用流体静压的方式加载，实验装置的设计选用连通器的方式。为了能时刻准确掌控所施加压强

的大小,需要在容器上刻下刻度,根据连通器内部压强平衡,可得载荷大小为:

$$q = \rho g(H - h) \tag{6}$$

式中,q 为材料实际收到的压强大小,连通器左侧的液柱高为 h,右侧液柱高为 H。因此只要知道连通器两侧的液柱高低,就能得到薄膜所受的压强大小。

为了使鼓包实验装置仪器化,可以对压力测量方式进行改进,采用压力表测量材料所受压力,传输到计算机中,便于整体化。

2.2 实验测试数据

本文利用上文搭建的实验仪器平台来测量两种材料对应测点的挠度值,分别是已知材料参数的 304 不锈钢试件和未知材料参数的橡胶试件,试件的形状为圆形,直径都为 67mm,其厚度分别为0.38 mm 和 0.22mm。另外为了规避初始残余应力的影响,可以采用增量加载法进行测量,即使用两次不同载荷作用下的挠度差值作为测点最终的挠度变化实验值。通过压力加载系统设计了两种工况,如表 3。对实验试件等距标好 14 个测点,通过鼓包实验装置获取两种工况下两种材料相对应测点的挠度实验值,得到的实验数据如表 4 和表 5。依据表 4 和表 5 中的数据,通过增量法得到的两种材料相应测点挠度的变化值如表 6。

表 3 工况设计数据记录表

Tab. 3 Design data record table for working conditions

	工况 1	工况 2	单位
右侧液柱高度 H	62.5	133.5	cm
左侧液柱高度 h	16.6	17.3	cm

表 4 304 不锈钢试件挠度数据记录(单位:mm)

Tab. 4 304 deflection data record of stainless steel specimens (unit: mm)

挠度	0	1.8	3.6	5.4	7.2	9.0	10.8
工况 1	0.6012	0.5906	0.5936	0.5962	0.5959	0.5812	0.5802
工况 2	0.6854	0.6757	0.6755	0.6731	0.6699	0.6494	0.6456
挠度	12.6	14.4	16.2	18.0	19.8	21.6	23.4
工况 1	0.5792	0.5834	0.5673	0.5708	0.5639	0.5528	0.5487
工况 2	0.6331	0.6313	0.6091	0.6108	0.5881	0.5689	0.5585

表 5 橡胶试件挠度数据记录(单位:mm)

Tab. 5 Record of deflection data of rubber specimens (unit: mm)

挠度	0	1.8	3.6	5.4	7.2	9.0	10.8
工况 1	2.3413	2.1805	2.2434	2.1896	2.1446	2.0327	1.7927
工况 2	5.7853	5.4638	5.5896	5.4820	5.3919	5.1667	4.6868
挠度	12.6	14.4	16.2	18.0	19.8	21.6	23.4
工况 1	1.1681	1.4305	1.3067	0.9529	0.6679	0.4499	0.3874
工况 2	3.4377	3.9625	3.7149	3.0073	2.4372	2.0013	1.5763

表 6 两种材料响应测点挠度变化的实测数据(单位:mm)

Tab. 6 Measured data of deflection changes of two materials in response to measuring points (unit: mm)

半径	0	1.8	3.6	5.4	7.2	9.0	10.8
不锈钢	0.0842	0.0851	0.0819	0.0769	0.0740	0.0682	0.0654
橡胶	3.4440	3.2833	3.3462	3.2924	3.2473	3.1340	2.8941
半径	12.6	14.4	16.2	18.0	19.8	21.6	23.4
不锈钢	0.0539	0.0479	0.0418	0.0400	0.0242	0.0161	0.0098
橡胶	2.2696	2.5320	2.4082	2.0544	1.7693	1.5514	1.1889

3　采用状态转移算法反求薄膜材料力学参数

状态转移算法[18]主要借鉴状态和状态转移的概念，可以将优化问题的解看作是一个状态，那么求解的过程就是一个状态转移过程。将状态转移算法与遗传算法和粒子群优化算法进行比较，在文献[19]中通过测试函数进行仿真实验，确定状态转移算法更具优越性，性能更加稳定。其基本流程图如图 2，图中的 g 为迭代次数。

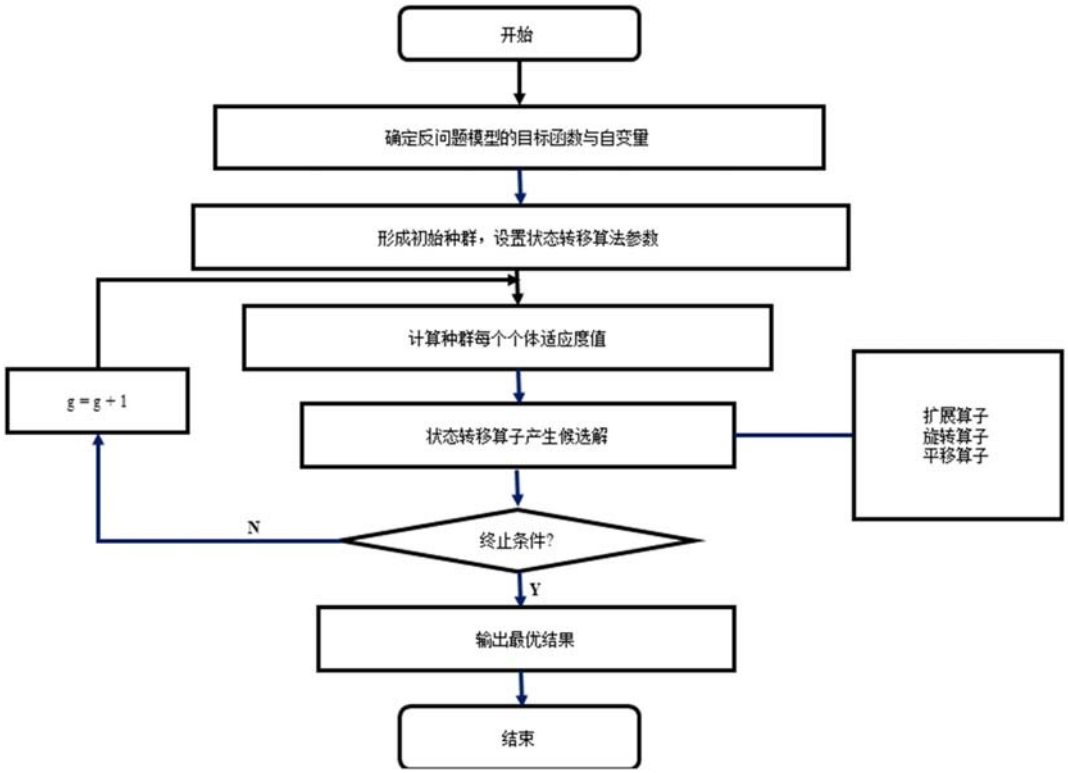


图 2　状态转移算法流程图

Fig. 2　Flow chart of state transition algorithm

由图 2 可知，首先需要确定目标函数，本文以薄膜材料测点的多项式代理模型值与实验值之间相对误差的平方和作为为目标函数，其表达式如下：

$$I=\sum_{k=1}^{14}((f_k(\alpha^2,\alpha^2,\cdots,\alpha^n)-w_k)/w_k)^2 \tag{7}$$

式中，w_k 表示 14 个测点所对应的实验测量值；$f_k(\alpha^1,\alpha^2,\cdots,\alpha^n)$表示每个测点所对应的多项式代理模型。

4　结果分析

4.1　304 不锈钢薄膜材料结果分析

在采用状态转移算法进行参数反求，求解迭代过程如图 3 所示。当反求目标函数值趋于稳定时，得到的不锈钢薄膜材料力学参数 $E=195559$MPa，$\nu=0.3$。本文还通过文献[20,21]中的参数识别方法分别得到了 304 不锈钢薄膜的力学参数，并将此三种方法识别得到的 304 不锈钢的杨氏模量与拉伸实验得到的 304 不锈钢杨氏模量[22]进行了对比，得到相对误差如表 7。

从优化目标函数的求解迭代图中(图 3)可知，目标函数值下降很快，在迭代次数为 6 到 10 次时，优化目标函数值基本稳定。因此利用状态转移算法解决线性材料的参数反求问题时，收敛速度非常快。另外从表 7 的识别结果及相对误差可以看出，本文的参数识别方法精度更高，说明本文方法能够更加精

确地识别具有线性本构关系的材料参数。存在的误差主要归结于实验测量误差。测量误差主要是由于使用的设备为临时组装的系统,水平驱动部分精度不够高等因素引起的,误差可以通过改善实验条件及提高测量精度减少或者消除。

表 7 三种参数识别方法得到的杨氏模量与拉伸实验得到的杨氏模量的相对误差

Tab. 7 Relative error between Young's modulus obtained by three parameter identification methods and Young's modulus obtained by tensile test

方法	杨氏模量/MPa	相对误差/%
拉伸实验	192000	0
文献[20]	198311.3	3.18
文献[21]	182654.1	5.12
本文方法	195559	1.81

注:文献[20]是基于鼓膜法与薄板小变形理论相结合的参数识别方法,文献[21]是基于 Hecnky 问题级数解的参数识别方法。

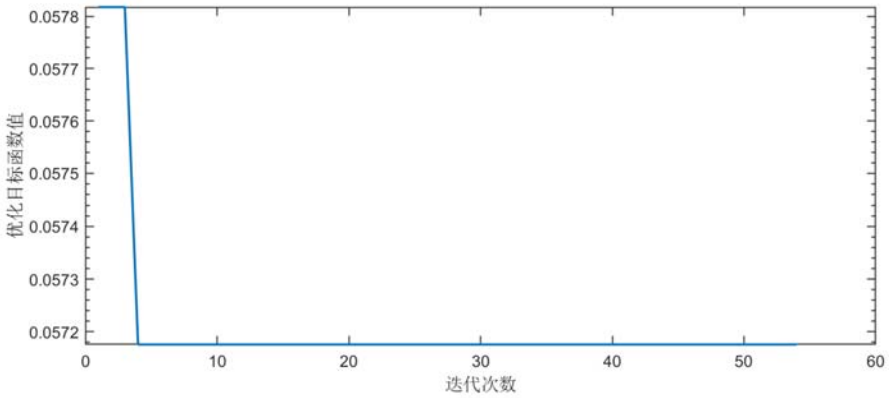


图 3 优化目标函数值的求解迭代过程

Fig. 3 Iterative process for optimizing objective function values

4.2 橡胶材料结果分析

采用状态转移算法对未知橡胶材料进行参数反求,求解迭代过程如图 4 和图 5 所示。当优化目标函数值趋于稳定时,得到的橡胶薄膜材料力学参数 $C_{10}=2.5119$, $C_{01}=-0.3891$。对同样的实验数据进行分析,若采用传统回归方法进行参数识别,可以得到不同的结果,其中非线性最小二乘法[23]最具代表性,以此为例对 MR 模型进行参数识别,可得到橡胶薄膜材料参数 $C_{10}=1.70050$, $C_{01}=-0.08689$。将最小二乘法与本文方法识别得到的力学参数所对应的挠度仿真值曲线,以及测点挠度实验值画在同一坐标系中,如图 6 所示。

从优化目标函数值与材料参数随迭代次数变化图中(图 5)可以看出,当迭代次数达到 81 次,优化目标函数值以及材料参数值的变化趋于稳定收敛,而本算法设置的初始种群数为 100 个,数量较小。因此综合来看,利用状态转移算法处理非线性材料反求问题,收敛速度比较快。另外从图 6 可以看出测点挠度实验值基本分布在本文方法得到的识别参数挠度仿真值曲线两侧,因此本文方法的精度更高,并且能够更加精确地识别非线性材料的力学参数。为了验证本文的方法也适合薄膜材料大变形阶段,因此本文还增加了一种荷载较大的工况,通过不断调整液面高度,使得橡胶薄膜材料相应测点的挠度值不再发生变化,记录此时的液面高度及相应测点的挠度值。其中液面高度 $H=213.6$cm, $h=23.5$cm,把此时的液面高度定义为工况 3。以工况 3 与表 3 中工况 2 下测点的挠度差作为实验值,通过本文所提出的代理模型方法识别出来的橡胶材料参数分别为:$C_{10}=2.4319$, $C_{01}=-0.3907$。与 4.2 节中的材料参数识别误差较小,说明本文方法可以适用于大变形阶段。

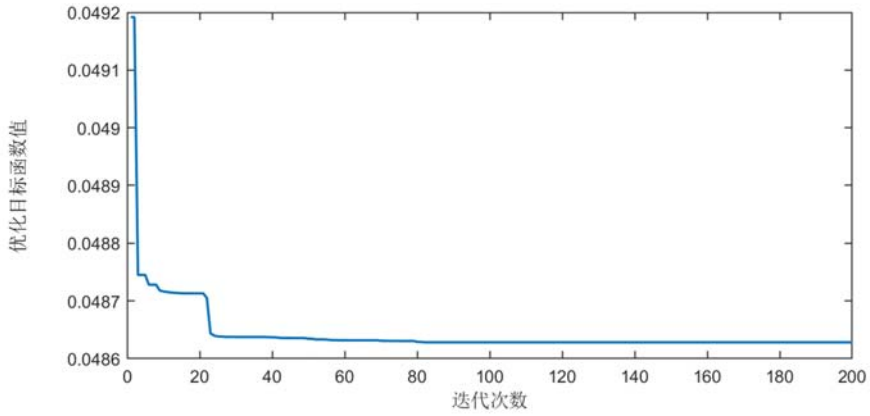


图 4　优化目标函数值的求解迭代过程

Fig. 4　Iterative process for optimizing objective function values

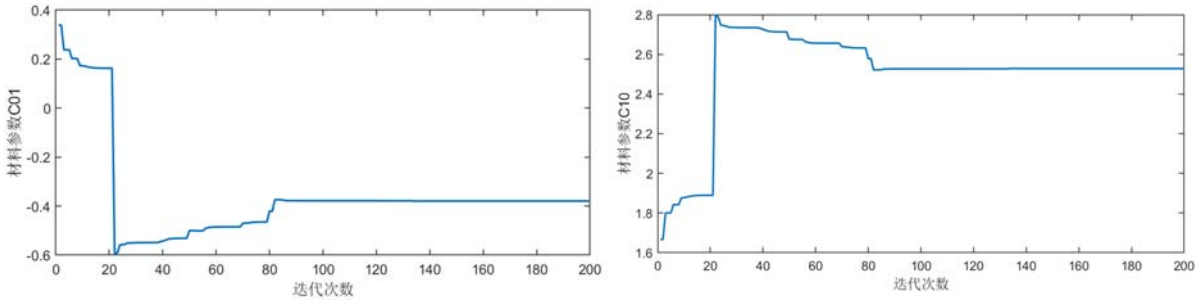


图 5　两个材料参数的求解迭代过程

Fig. 5　Iterative procedure for solving two material parameters

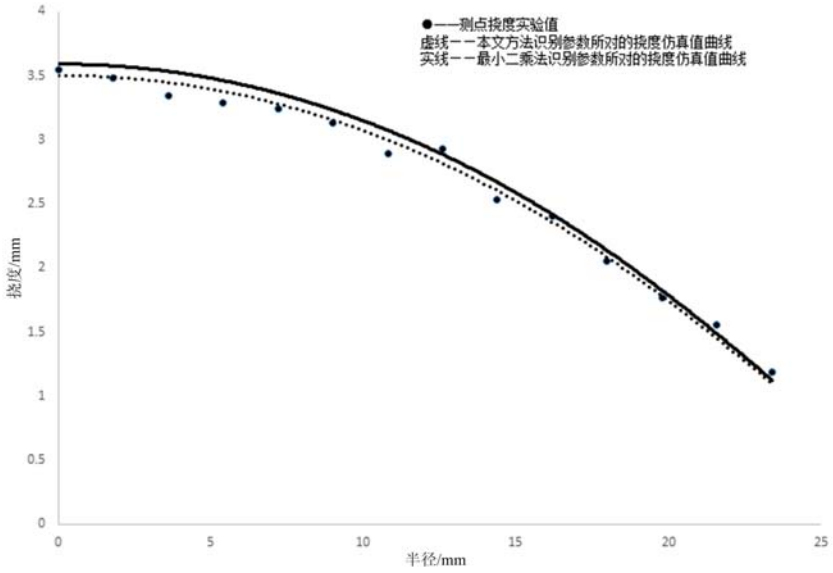


图 6　测点挠度实验值、两种方法识别参数所对的挠度仿真值曲线

Fig. 6　Deflection experimental values of measuring points and deflection simulation curves for identifying parameters by two methods

5　结论及展望

本文提出了一种基于多项式代理模型的薄膜材料力学参数识别方法，它不仅有效地解决了金属材料薄膜参数识别的问题，也可用于其他具有非线性本构关系的薄膜材料参数识别。运用代理模型以及

状态转移算法进行优化识别,大幅度提高了优化效率以及优化结果的精确度,为非线性材料薄膜力学参数的识别提供了一个新思路。由于代理模型不依赖于实验,可以预先建立代理模型数据库,这样在实际的参数识别时就可以与有限元计算脱钩,为鼓泡实验的仪器化提供了一种可能性。

参考文献:

[1] 李秋, 邓卫林, 亢一澜. 原位微拉曼测试技术在碳纳米管纤维和薄膜材料力学性能研究中的应用[J]. 实验力学, 2014, 29(3): 257－261 (LI Qiu, DENG Weilin, KANG Yilan. On the application of in-situ micro-Raman spectroscopy in study of material mechanical properties of carbon nanotube fiber and film[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(3): 257－261 (in Chinese))

[2] 孙建海, 王卫宁, 岳伟. 半导体器件残余应力测试与模拟研究[J]. 实验力学, 2004, 19(4): 519－525 (SUN Jianhai, WANG Weining, YUE Wei. Residual stress determination of the semiconductor devices through combination of experimental measuring and finite element imulation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(4): 519－525 (in Chinese))

[3] 李建康, 孙建忠, 张超福. 钢管混凝土拱桥缀板鼓包应力的测试方法[J]. 实验力学, 2003, 8(4): 555－563 (LI Jiankang, SUN Jianzhong, ZHANG Chaofu. A method for determining the stresses in bulge buns of stitching plates for concrete-filled-steel arch bridge[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(4): 555－563 (in Chinese))

[4] 苏才钧, 吴昊, 郭占社, 等. 微构件材料力学性能测试方法[J]. 实验力学, 2005, 20(3): 442－447 (SU Caijun, WU Hao, GUO Zhanshe, et al. Mechanical testing methods of micro structures[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3): 442－447 (in Chinese))

[5] 郭保桥, 陈鹏万, 谢惠民, 等. 虚位移场方法在石墨材料力学参数测量中的应用[J]. 实验力学, 2011, 26(5): 566－572 (GUO Baoqiao, CHEN Pengwan, XIE Huimin, et al. Application of virtual displacement field for the mechanical property measurement of graphite material[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5): 566－572 (in Chinese))

[6] 李茜茜, 赵金峰, 潘永东. 基于激光超声场检测的材料常数测量方法[J]. 实验力学, 2016, 31(3): 353－360 (LI Xixi, ZHAO Jinfeng, PAN Yongdong. On the measurement method of material constants based on laser ultrasonic field testing system[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(3): 353－360 (in Chinese))

[7] 蒋锐, 胡小方, 许晓慧, 等. 纳米压痕法研究 PZT 压电薄膜的力学性能[J]. 实验力学, 2007, 22(6): 576－580 (JIANG Rui, HU Xiaofang, XU Xiaohui, et al. Study of mechanical properties of PZT piezoelectric film by nano-indentation technique[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6): 576－580 (in Chinese))

[8] Salehghaffari S, Rais-Rohani M, Marin E B, et al. A new approach for determination of material constants of internal state variable based plasticity models and their uncertainty quantification[J]. Computational Materials Science, 2012, 55: 237－244.

[9] Prates P A, Oliveira M C, Fernandes J V. Identification of material parameters for thin sheets from single biaxial tensile test using a sequential inverse identification strategy[J]. International Journal of Material Forming, 2016, 14: 547－571.

[10] Tuninetti V, Gilles G, Milis O, et al. Anisotropy and tension-compression asymmetry modeling of the room temperature plastic response of Ti-6AL-4V[J]. International Journal of Plasticity, 2015, 67: 53－68.

[11] Ying H L, Xia T, Jun Y L. A new optimization algorithm for identification of material parameter[J]. High Performance Structures and Materials Engineering, 2011, 64: 1108－1112.

[12] 谭阳, 迟毅林, 黄亚宇, 等. Bammann-Chiesa-Johnson 粘塑性本构模型材料参数的一种识别方法[J]. 计算力学学报, 2015(4): 490－495 (TAN Yang, CHI Yilin, HUANG Yayu, et al. An approach for identification of material parameters in Bammann-Chiesa-Johnson viscoplastic constitutive model [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015(4): 490－495 (in Chinese))

[13] Kim B, Lee S B, Lee J, et al. A comparison among Neo-Hookean, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for chloroprene rubber[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(5): 759－764.

[14] Dagaut P, Bakali A E, Ristori A. The combustion of kerosene: Experime-Ntal results and Kinetic modelling using 1-to 3-component surrogate model fuels[J]. Fuel, 2006, 86: 944－956.

[15] Donovan D, Burrage K, Burrage P, et al. Estimates of the coverage of parameter space by Latin Hypercube and Orthogonal Array-based sampling[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 57:553－564.

[16] Lotfolahpour A, Soltani N, Ganjiani M. Parameters identification and validation of plastic-damage model of 304 stainless steel by small punch test at ambient temperature[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 200:64－74.

[17] Dewei Sun, Zhigang Chen, Guangyu Zhang, et al. Modeling and parameter identification of amplitude- and frequency-dependent rubber isolator[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18:672－680.

[18] Zhou X J, Li C J, Huang T W, et al. Fast gradient-based distributed optimisation approach for model predictive control and application in four-tank benchmark[J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9(10):1579－1586.

[19] Zhou X J, Long J P, Xu C C, et al. An external archive-based constrained state transition algorithm for optimal power dispatch[J]. Complexity, 2019, 10(9):1－11.

[20] 李鲁鲁，马树军，张冲，等. 基于鼓膜法的薄膜力学性能测试研究[J]. 传感器与微系统，2017，36(9):8－12 (LI Lulu, MA Shujun, ZHANG Chong, et al. Research on mechanical properties of thin films based on bulge test[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(9):8－12 (in Chinese))

[21] 贾子初，杨昌棋. 基于激光位移测量技术的薄膜弹性模量测试方法研究[D]. 重庆大学，2018 (JIA Zichu, YANG Changqi. Study on measurement method of elastic modulus of thin film based on laser displacement measurement technology[D]. Chongqing University, 2018 (in Chinese))

[22] HAN Wei, MENG Xianming, ZHANG Junbao. Elastic modulus of 304 stainless steel coating by cold gas dynamic spraying[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19:73－78.

[23] Liu G R, Han X, Lam K Y. A combined genetic algorithm and nonlinear least squares method for material characterization using elastic waves[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 15:1909－1921.

Mechanics parameter identification of thin film materials based on polynomial proxy model

DUAN Hui-ya, YANG Chang-qi, JIA Zi-chu

(College of Aerospace and Aeronautics, Chongqing University, Chongqing 400000, China)

Abstract: In order to solve the difficulty in unifying the methods for identifying mechanical parameters of thin film materials with different constitutive relations by the bubbling method, a method based on polynomial proxy model for identifying mechanical parameters of thin film materials is proposed. Firstly, the polynomial proxy model is used to show the relationship between the unknown mechanical parameters of thin film materials and the simulated deflection values at different measuring points on the thin film specimens. The experimental values of the deflection at different measuring points on the thin film specimens are obtained by using the improved bubbling device. Then, the inverse problem model is constructed by taking the sum of squares of the difference between the experimental values and the corresponding polynomial proxy model at measuring points as the objective function. Finally, the state transition algorithm is used to reverse the material parameters and obtain the real material parameters which can characterize the thin film. In this work, the 304 stainless steel thin films and the rubber materials are taken as examples to identify the effectiveness and reliability of this method. The numerical results show that the inversion method based on polynomial proxy model has a strong ability to identify the unknown parameters of thin film materials, and can identify all the constitutive parameters of thin film materials at one time. The calculation efficiency and recognition accuracy are both superior.

Keywords: polynomial agent model; identification method; material parameters; thin film materials