DOI: 10.3901/JME.2020.13.242

基于分布应变的薄板变形重构算法研究*

谭跃刚 黄兵 刘虎 谢志超 毛健
(武汉理工大学机电工程学院 武汉 430074)

摘要: 针对薄板变形重构问题, 结合应变与曲率、曲线与曲率的关系, 提出了一种带误差补偿的曲率积分递推算法。根据累计误差的特点, 给出了误差补偿系数的选取方法, 以及误差补偿因子的优化原则, 通过选取合适的补偿因子, 获得一组与补偿因子相对应的补偿系数。建立 600 mm×200 mm×2.45 mm 的铝合金薄板模型, 通过仿真和实验分析, 提取薄板上一条变形曲线的分布应变数据和变形数据, 采用带误差补偿的曲率积分递推算法对试验数据进行重构, 并引入均方根误差(Root mean square error, RMSE)评判算法在不同分段数和不同载荷情况下的重构精度。结果表明, 提出的带误差补偿的变形重构算法可以精确地重构薄板的变形曲线, 重构误差及相对误差均比较小。并且在载荷相同的条件下, 分段数越多, 所提出的曲线重构算法的重构精度也越高。

关键词: 薄板变形; 曲线重构; 曲率; 误差补偿; 分布应变

中图分类号: TG156

Research on Deformation Reconstruction Algorithm of Thin Plate Based on Distributed Strain

TAN Yuegang HUANG Bing LIU Hu XIE Zhichao MAO Jian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430074)

Abstract: A recursive algorithm of curvature integral with error compensation is proposed to solve the problem of thin plate deformation reconstruction, which combines the relationship between strain and curvature, curve and curvature. According to the characteristics of accumulated error, the selection method of error compensation coefficient and the optimization principle of error compensation factor are given. By choosing appropriate compensation factor, a set of compensation coefficients corresponding to compensation factor are obtained. A 600 mm×200 mm×2.45 mm aluminum alloy sheet model was established. The distributed strain data and deformation data of a deformation curve on the sheet were extracted through simulation and experimental analysis. The experimental data were reconstructed by curvature integral recursion algorithm with error compensation. Root Mean Square Error (RMSE) is introduced to evaluate the reconstruction accuracy under different segments and loads. The results show that the proposed deformation reconstruction algorithm with error compensation can accurately reconstruct the deformation curve of thin plate, and the reconstruction error and relative error are relatively small. Under the same load, the more segments, the higher the reconstruction accuracy of the proposed curve reconstruction algorithm.

Key words: deformation of thin plate; curve reconstruction; curvature; error compensation; distributed strain

0 前言

薄板结构件在飞行器机翼、卫星天线板、太阳能帆板和风洞喉道柔板等领域应用较广。在工作过程中, 薄板主要在力和弯矩的作用下产生弯曲和扭转变形以及两者的复合变形。对于薄板的小变形,

可以基于小变形等假设, 将求解薄板的弯曲变形转化为求解弹性偏微分方程 $D\nabla^4\omega=q$, 对于不同的边界条件, 目前已经有了较为完备的求解理论。相比之下, 薄板大变形更具工程实际意义。在大型试验风洞中, 主要依靠薄板产生变形获得高性能流场。在风洞长期工作时, 薄板上无法用肉眼识别的损伤会对风洞试验系统造成严重影响^[1], 这类薄板变形时, 工况复杂, 结构变形大, 且结构受力随着结构变形而变化, 而小变形理论中, 物体受力的大小, 方向和作用点不随物体变形而产生变化, 这点也是

* 国家自然科学基金资助项目(2019CFB590)。20190619 收到初稿, 20200318 收到修改稿

大变形与小变形最大的不同之处。此时用小变形分析方法计算的误差较大, 不能满足工程要求。而对薄板结构大变形进行解析计算是十分困难的, 特别是结构边界条件复杂时, 很难从理论上建立准确的求解模型。即便是简单的边界条件, 在考虑模型几何方程中的高次项后, 求解的过程也十分困难。因此, 可以采用传感器检测的方法, 通过对薄板的应变状态进行分布式检测, 并基于分布应变数据实时重构薄板的变形状态, 这对设备的健康和安全高效运行具有重要的工程意义。

对于薄壁结构件的变形, 国内外学者从不同角度开展了相关的研究工作。LEE 等^[2-4]以风机叶片为研究对象, 利用模态分析, 对分析出的二阶模态进行插值得到应力变化, 再利用应力和挠度之间的关系计算出挠度。张福范等^[5]采用广义简支边的概念, 讨论了在集中力载荷情况下利用叠加法对薄板弯曲问题进行求解。易金聪等^[6-8]基于薄板的小挠度弯曲理论, 将薄板的分布应变转化为薄板的曲率, 采用切角递推算算法实现薄板的变形重构, 其算法的核心思想是把变形曲线等分成若干段后, 将每一段曲线节点的坐标增量表达为含有这一段曲线的切角以及切角增量的递推关系, 曲线分成的段数越多, 重构精度也越高。这些研究侧重于薄板小变形的应变检测以及变形重构。对于薄板大变形的研究, 侯祥林等^[9-10]采用变分原理推导了薄板弯曲的高阶非线性偏微分方程, 求得了薄板简单变形下的数值解。以及基于移动最小二乘法提出了弹性大变形问题的复变量无单元 Galerkin 方法, 并对不同结构进行了计算分析。PARAKKAT^[11]提出了一种基于 Delaunay 三角剖分的非参数曲线重建算法, 并从理论上证明了该方法能够重建原始曲线。ANDRÉS^[12]提出了多层嵌入式 BAT 算法(Me-BAT), 用自由参数 B 样条来求解一般曲线重构问题。王勇等^[13]采用 B 样条插值方法研究柔性矩形薄板的动力学特性。利用 B 样条插值方法对柔性薄板的变形场进行离散, 以拉格朗日方程为基础推导出作大范围运动柔性薄板的动力学方程。通过动力学仿真, 对比分析了 B 样条插值法、假设模态法以及有限元法的仿真结果, 验证了 B 样条插值方法在处理柔性薄板的大变形问题的计算精度上具有优良性能。以上研究侧重于理论方法的分析, 与之对应的算法复杂度高, 求解过程复杂, 无法直接根据应变对变形进行计算, 因此不宜用在基于分布应变的薄板变形重构中。

针对薄板变形重构问题, 本文通过对薄板表面应变进行分布式检测, 主要目的是获得薄板表面的分布应变信息, 建立曲率与分布应变的关系, 提出

基于曲率积分递推的带误差补偿的曲线重构算法。并以悬臂薄板为研究对象, 通过仿真和变形测试分析, 获得了良好的重构效果。

1 基于分布应变的薄板变形重构算法

如图 1 所示, 薄板一端固定, 在自由端施加载荷使薄板发生弯曲变形, 在薄板表面沿 x 方向布置若干应变传感器, 用来检测薄板弯曲变形时的分布应变。将分布应变转化为薄板表面的曲率信息, 然后沿 x 方向对曲率进行样条插值, 可计算出薄板上沿 y 方向的变形量, 得到若干条 x 方向的变形曲线, 最后以这若干条已知变形曲线为边界, 沿 z 方向插值, 从而实现整块薄板的变形重构。

对于薄板纯弯曲 X 变形而言, x 方向的应变远大于 y 、 z 方向的应变, 因此主要考虑 x 方向的应变信息。同理, 薄板沿 y 方向的变形远大于另外两个方向的变形, 因此主要考虑薄板沿 y 方向的变形量。作如下假设。

- (1) 悬臂薄板在纯弯曲状态下, 固定端的位移和位移变化量均为零。
- (2) 薄板沿 x 、 y 、 z 三个方向的变形具有连续性。

图 1 薄板变形简图

1.1 应变-曲率转化

首先, 把薄板表面的应变信息转化为曲率信息。对等截面结构发生纯弯曲而言, 截取长度为 dx 的结构微元, 并假设其符合理想变形条件, 如图 2 所示。结构微元 $\overline{OO}$ 产生弯曲后, 可表示为区曲率半径的变化, 即 dx 的两个端面相对转过一个角度 $d\theta$ 。在变形过程中, 存在应变始终为零的中性层, 如图 2 中点划线所示, 利用中性层 $\overline{OO}$ 的曲率可以表示微元的形状变化。设中性层的曲率半径为 ρ , $d\theta$ 表示变形后微元对应的圆心角, M 表示其所受的力矩, 可得

$$dx = \rho d\theta \quad (1)$$

图 2 纯弯曲时结构微元形变示意图

由应变的定义可以得到

$$\varepsilon(x) = \frac{(\rho + y)d\theta - \rho d\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho} \quad (2)$$

式中, y 和 ρ 都是 x 的函数。根据曲率半径 $\rho(x)$ 与曲率 $k(x)$ 的互为倒数

$$k(x) = \frac{1}{\rho(x)} \quad (3)$$

对于给定的薄板结构而言, 其厚度 B 是确定的, 即在薄板表面有 $y = \pm B/2$; 结合式(2)、(3)可得薄板表面的应变与曲率之间的关系为

$$k(x) = \pm \frac{2 \cdot \varepsilon(x)}{B} \quad (4)$$

在工程应用中, 应变传感器检测到的是薄板表面的应变数据, 根据式(4)计算的曲率是离散的, 为了提高曲线的重构精度, 需要对离散的曲率信息进行插值, 就可得到插值后的连续曲率。

1.2 基于曲率积分的曲线重构算法

针对薄板弯曲问题, 假设薄板变形过程中是连续且光滑的曲面, 于是取薄板的任一截面 xoy , 在该截面 xoy 上, 薄板的变形曲线 $y(x)$ 与曲率 $k(x)$ 的关系为

$$k(x) = \pm \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \quad (5)$$

式中, $k(x)$ 为曲率关于自变量 x 的函数, y 为曲线的函数表达式, y' 和 y'' 分别为曲线关于自变量 x 的一阶导数和二阶导数。

如图1所示, 对于悬臂薄板结构的弯曲变形而言, 设薄板向 y 轴正方向弯曲时的变形为正值, $y'' > 0$ 。于是式(5)可改写为

$$y'' = k(x) \cdot (1 + y'^2)^{3/2} \quad (6)$$

令 $p = y'$, 则 $y'' = dp/dx$, 对式(6)变形后等式两边同时积分

$$\int \frac{1}{(1 + p^2)^{3/2}} dp = \int k(x) dx \quad (7)$$

对式(7)进行积分得到曲线的函数表达式

$$y = \int p dx = \int \frac{\int_0^x k(x) dx - c_1}{\sqrt{1 - \left[\int_0^x k(x) dx - c_1 \right]^2}} dx + c_2 \quad (8)$$

式中, c_1 、 c_2 为积分常数。

悬臂薄板在纯弯曲状态下, 基于对薄板边界条件的假设, 取薄板 x 方向上的一条变形曲线作为重构对象, 则曲线固定端产生的位移以及位移的变化量

均为零。即曲线的边界条件为: $y|_{x=0} = 0, y'|_{x=0} = 0$ 。将边界条件代入式(8)中求得积分常数 $c_1 = c_2 = 0$ 。

于是有

$$y = \int_0^x \left[\int_0^x k(x) dx \right] / \sqrt{1 - \left[\int_0^x k(x) dx \right]^2} dx \quad (9)$$

式(9)即为通过曲率积分和薄板变形的边界条件推导的曲线表达式。式中的是曲率 $k(x)$ 关于自变量 x 的函数, 但在工程实际应用中, 传感器检测的数据为结构的分布应变。鉴于这样的实际工程问题, 将曲线表达式改写为

$$\hat{y}_i = \sum_{j=0}^i \left\{ \left[\sum_{j=0}^i k_j \cdot l_j / \sqrt{1 - \left(\sum_{j=0}^i k_j \cdot l_j \right)^2} \right] \cdot l_j \right\} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中, $\hat{y}_i$ 为变形曲线的变形量, n 为曲线的分段数, l_j 为薄板变形曲线第 j 段弧线段在 x 方向上投影的长度, 在均匀分段的情况下, 可近似认为 $l_j = l/n$, 其中 l 为薄板的长度, 因此 l_j 可以看作薄板每一个小段上的长度。如图3所示, 式(10)里花括号内的式子的几何含义为薄板第 i 段内产生的变形量。

图3 算法几何简图

令 $t_i = \sum_{j=0}^i k_j l_j$ $i = 0, 1, 2, \dots, n$ 可以得到

$$\begin{cases} t_i = \sum_{j=0}^i \frac{2 \cdot \varepsilon_j}{B} \cdot l_j \\ \Delta \hat{y}_i = t_i \cdot l_i / \sqrt{1 - t_i^2} \\ \hat{y}_i = \sum_{j=0}^i \Delta \hat{y}_j \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

在进行变形重构时, 由于算法中存在近似替代, 产生累积误差是必然的, 并且从薄板固定端至自由端, 重构误差的绝对值逐渐增大。为提高算法的重

构精度, 考虑对曲线每一段的变形量 Δy_i 乘以一个误差补偿系数 α_i , 以减小误差累积效应。

做误差补偿时, 考虑薄板纯弯曲变形和递推算误差累积的特点, 在薄板结构对称中心配置较大的误差补偿系数, 在薄板的两端配置较小的误差补偿系数, 并且约定 $\alpha_i \approx 1$ 。因此, 误差补偿系数设定为抛物线形式

$$\alpha_i = m(i/1000)^2 - 0.6m(i/1000) + 1$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式中, α_i 为误差补偿系数, m 为补偿因子, 补偿因子随曲线分段数 n 改变, i 表示曲线的第 i 段。

结合式(4)、(11)和(12)得到带误差补偿的曲线重构递推表达式

$$\begin{cases} t_i = \sum_{j=0}^i \frac{2 \cdot \varepsilon_j}{B} \cdot l_j \\ \Delta Y_i = \alpha_i \cdot t_i \cdot l_i / \sqrt{1 - t_i^2} \\ Y_i = \sum_{j=0}^i \Delta Y_j \end{cases}$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

2 变形重构算法的仿真分析

如图 4 所示, 薄板一端固定, 自由端在载荷作用下发生弯曲变形, 薄板的变形可以看作是以若干条已知变形曲线为边界, 沿 z 方向插值形成的。因此, 任取薄板表面的一条变形曲线作为变形重构的计算示例, 并引入均方根误差(Root mean square error, RMSE)评判算法的重构精度, 其计算公式为

$$R = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - Y'_i)^2}{N}} \quad (14)$$

式中, N 为计算点数, Y_i 和 Y'_i 分别为重构值和理论值。

图 4 薄板变形与变形曲线

在 ANSYS 软件中建立薄板模型, 薄板的相关参数如表 1 所示。在软件中对薄板模型进行材料定义、网格划分、施加载荷(薄板一端固定, 在自由端分别施加 0 N、1.96 N、3.92 N 的沿 y 轴正向的载

荷), 仿真结果如图 5 所示。在距离侧边 30 mm 处, 利用 Path 功能提取沿薄板 x 方向的一条变形曲线的应变和变形数据, 将仿真提取的应变数据作为算法的输入, 提取的变形数据为理论值, 利用式(13)和切角递推算法对曲线 y 方向的变形进行重构, 并与仿真提取的变形数据作对比。在重构过程中, 以误差绝对值的和最小为原则对式(12)中的补偿因子 m 进行优化, 优化结果如图 6 所示, 曲线重构结果如图 7、8 所示, 重构精度如表 2 所示。

表 1 薄板的相关参数

长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	弹性模量 E/GPa	泊松比
600	200	2.45	68.9	0.33

(a) 薄板应变云图

(b) 薄板变形曲线

图 5 按路径提取悬臂薄板的一条变形曲线数据

图 6 补偿因子 $|m|$ 的优化结果

从图 6 中可以看出: 随着分段数 n 的增加, 补偿因子逐渐减小, 当 n 大于 600, 趋近于 0, 这表明随着分段数的增加, 算法的精度逐渐变好, 当分段数超过一定值以后, 补偿因子趋近于 0, 此时该算法即使不做误差补偿, 也能获得较高的重构精度。

图7 不同载荷作用时重构变形与仿真值对比($n=600$) 图8 不同分段数下曲线重构结果($F=3.92$ N)表2 不同分段数下算法的重构精度($F=3.92$ N)

分段数	切角递推算法		曲率积分算法(本文)	
	均方差	最大误差/mm	均方差	最大误差/mm
120	0.116 7	0.201 9	0.030 3	0.052 5
300	0.077 9	0.144 4	0.011 0	0.018 7
600	0.062 6	0.118 4	0.007 7	0.016 7

结合图7、8和表2,当分段数相同时,随着载荷的增加,两种算法的重构误差都逐渐增大,但本文提出的曲率积分递推算法的重构误差整体小于切角递推算法。当3.92 N的载荷作用于悬臂薄板自由端时,在不同的分段数下对变形曲线进行重构。从均方差和最大误差可以得出:曲率积分递推算法可以更加精确地对变形曲线进行重构,重构值更加接近仿真值,并且随着分段数的增加,重构曲线与提取的曲线越贴近,能够更好地重构变形曲线。

3 变形重构算法的试验分析

如图9所示,薄板变形检测系统主要由铝合金薄板(参数如表1所示)、FBG应变传感器、光纤光栅解调仪、激光位移传感器和计算机等组成。在距离薄板侧边30 mm处,等间距粘贴4个FBG应变传感器,FBG传感器主要是检测薄板变形曲线上的分布应变数据,作为重构算法的数据输入,同时利用激光位移传感器检测该曲线的变形量。薄板变形曲线上的分布应变信息和变形数据分别通过光纤光栅解调仪、激光位移传感器控制器传输到计算机。

图9 薄板变形检测试验原理

试验时,在悬臂薄板的自由端的砝码盘内等载荷加载砝码,加载砝码的范围为0~3.92 N,加载步长为1.96 N(200 g),试验开始前,记录第一组光纤光栅初始波长值和激光位移传感器数据,而后每加载200 g砝码,记录一组测点的应变数据与激光位移传感器数据,直到加载到400 g砝码,记录最后一组试验数据。重复试验三次,剔除粗大误差后,求取三次试验的应变平均值和变形平均值。为后面进行变形重构提供数据支撑。

取分段数 $n=600$ ，对光纤光栅传感器检测的分布应变数据进行样条插值，将插值后的应变作为算法的输入，基于图 6 中的优化结果，采用式(13)和切角递推算法对试验数据进行重构，并将重构值与激光位移传感器测量值进行对比，重构结果如图 10 所示，重构精度如表 3 所示。

图 10 不同载荷作用时重构变形与测量值对比

表 3 不同载荷作用下算法的重构精度

载荷 F/N	切角递推算法		曲率积分算法(本文)	
	均方差	最大误差/mm	均方差	最大误差/mm
0	2.259 9	5.497 5	0.135 4	0.266 2
1.96	2.306 1	5.386 0	0.178 4	0.155 9
3.92	2.355 0	4.980 8	0.217 2	0.026 8

试验结果表明：在分段数相同的情况下，随着载荷的增加，两种重构算法的均方差逐渐增大，最大误差逐渐减小，并且曲率积分递推算法的均方差和最大误差均比切角递推算法小，从而可得出曲率积分递推算法重构效果优于切角递推算法。本文算法的最大重构误差为 0.266 2 mm，与之相对应的相对误差为 5.85%。在 3.92 N 载荷作用下时，薄板自由端实测变形为 27.500 mm，本文算法重构变形量为 27.527 mm，重构误差为 0.027 mm，相对误差为 0.098%。产生误差的原因在于递推算法的累积误

差只能进行补偿，不能完全消除。

4 结论

本文以 600 mm×200 mm×2.45 mm 的悬臂薄板为对象，针对薄板变形重构问题，取薄板表面的一条变形曲线为计算示例，通过研究曲线和曲率的关系，结合分布应变数据，提出了一种带误差补偿的曲率积分递推的曲线重构算法，并对重构算法进行了仿真和实验分析。得出如下结论：

- (1) 在同等试验条件下，本文提出的带误差补偿的曲率积分算法重构精度明显优于没有引入误差补偿的切角递推算法；
- (2) 引入误差补偿因子后对提高递推型重构算法的精度具有较为显著的作用。

本文研究的带误差补偿的曲率积分递推算法能够较精确地重构薄板变形曲线，为薄板结构的变形重构提供了有益的技术手段和方法。

参 考 文 献

[1] 郁文山, 马永一, 苏北辰, 等. 基于 LabVIEW 和 OPC 的 2.4 米风洞安全联锁系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(2): 72-74.
YU Wenshan, MA Yongyi, SU Beichen, et al. 2.4m wind tunnel safety interlock system based on LabVIEW and OPC[J]. Automation and Instrumentation, 2014(2): 72-74.

[2] LEE K, AIHARA A, PUNTSAGDASH G, et al. Feasibility study on a strain based deflection monitoring system for wind turbine blades[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 117-129.

[3] BANG H J, KIM H I, LEE K S. Measurement of strain and bending deflection of a wind turbine tower using arrayed FBG sensors[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(12): 2121-2126.

[4] KIM H I, HAN J H, BANG H J. Real-time deformed shape estimation of a wind turbine blade using distributed fiber Bragg grating sensors[J]. Wind Energy, 2013, 17(9): 1455-1467.

[5] 张福范. 悬臂矩形板的弯曲[J]. 清华大学学报, 1979(2): 43-51.
ZHANG Fufan. Bending of a rectangular cantilever plate[J]. Journal of Tsinghua University, 1979(2): 43-51.

[6] 易金聪. 基于 FBG 传感阵列的智能结构形态感知与主动监测研究[D]. 上海: 上海大学, 2014.
YI Jincong. Shape perception and active monitoring for

- smart structure using FBG sensor array[D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.
- [7] 张钰珏. 基于光纤光栅传感网络的变形监测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- ZHANG Yuyu. Research on the deformation monitoring based on fiber bragg grating[D]. Nanjing: Nanjing Aerospace University, 2016.
- [8] 吴朝霞, 吴飞. 光纤光栅传感原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- WU Zhaoxia, WU Fei. Principle and application of fiber grating sensing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [9] 侯祥林, 郑夕健, 张良, 等. 薄板弯曲大变形高阶非线性偏微分方程推导与优化算法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(18): 1-10.
- HOU Xianglin, ZHENG Xijian, ZHANG Liang, et al. Research on derivation and optimization algorithm of high-order nonlinear partial differential equations for thin plate bending large deformation[J]. Journal of Physics, 2012, 61(18): 1-10.
- [10] 李冬明, 彭妙娟, 程玉民. 弹性大变形问题的复变量无单元 Galerkin 方法[J]. 中国科学杂志社, 2011, 41(8): 1003-1014.
- LI Dongming, PENG Miaojuan, CHEN Yumin. The complex variable element-free Galerkin(CVEFG) method for elastic large deformation problems[J]. China Science Magazine, 2011, 41(8): 1003-1014.
- [11] PARAKKAT A D, MUTHUGANAPATHY R. Crawl through neighbors: A simple curve reconstruction algorithm[J]. Computer Graphics Forum, 2016, 35(5).
- [12] ANDRÉS I, AKEMI G, MARTA C. Multilayer embedded bat algorithm for B-spline curve reconstruction[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2017, 24(4): 385-399.
- [13] 王勇, 章定国, 范纪华, 等. 基于 B 样条插值法的柔性矩形薄板的动力学分析[J]. 振动工程学报, 2019, 32(5): 811-821.
- WANG Yong, ZHANG Dingguo, FAN Jihua, et al. Dynamic analysis of flexible rectangular thin plate based on B-spline interpolation [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(5): 811-821.

作者简介: 谭跃刚, 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人及其控制、控制理论与应用和机械设备状态监测技术及应用。

E-mail: ygtan@whut.edu.cn

黄兵(通信作者), 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机械工况监测与故障诊断。

E-mail: 528594660@qq.com