

滑动轴承非线性油膜力的神经网络模型

秦 平, 孟志强, 朱 均

(西安交通大学 润滑理论及轴承研究所, 陕西 西安 710049)

摘要: 在已有的滑动轴承非线性油膜力数据库基础上, 将轴承的位置和速度参数加以综合, 利用变量状态空间变换将分段的油膜力数据转换成连续的数据空间, 建立非线性油膜力连续型数据库和相应的网络模型 以圆轴承-转子系统为例, 分别采用有限差分法、数据库法和 BP 网络模型计算了轴承系统的非线性油膜力和轴心轨迹 结果表明, 网络模型计算结果与基于数值方法的结果较为吻合, 可以显著地提高轴承系统的计算效率

关键词: 非线性油膜力; BP 网络; 滑动轴承

中图分类号: TH133 3

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2002)03-0226-06

流体动力润滑轴承受到较大扰动时, 所提供的油膜力往往呈现很强的非线性, 因此滑动轴承-转子系统运动方程的非线性分析日益为人们重视 目前主要采用数值计算方法研究转子系统的非线性运动现象^[1,2], 其中用有限元或有限差分法等方法计算滑动轴承的非线性油膜力, 存在计算精度与效率之间的矛盾 王文等^[3]采用量纲分析法建立了油叶型径向滑动轴承非线性油膜力数据库, 为高效准确地计算非线性油膜力提供了新的方法 采用该方法, 对同一类轴承, 将不同轴心位置及速度下的非线性油膜力预先计算出来, 按一定顺序构成油膜力数据库 在转子系统分析中, 只需在数据库中检索插值就可得到实际油膜力 孟志强等^[4]运用状态空间的 Poincare 变换将滑动轴承系统的轴心速度变量由无限区间变换到有限区间, 建立了以轴心运动状态变量有限数据组合所构成的非线性油膜力数据库以及相应的插值计算程序 但其数据库由 4 组分段的子库组成, 计算轴承系统的实际油膜力时需要选择不同的计算公式和子库

本文作者研究了滑动轴承非线性油膜力数据库的计算方法, 利用状态空间变换将分段的油膜力数据库转换成连续的数据空间, 同时将分段的油膜力数据库计算公式合成 1 个连续统一的数学模型 借助于神经网络(ANN)如 BP 网络的以任意精度逼近任意非线性函数的能力^[5], 建立滑动轴承非线性油膜力的网络模型, 将神经网络技术应用于滑动轴承-转子系统的瞬态运动分析中 这样一方面可以减轻大量数据

文件存储给系统的分析计算带来的沉重负担, 另一方面通过采用数据建模方法构造以轴心的位置和速度参数为自变量的数学模型, 可以探讨非线性油膜力的表征和识别方法

1 连续型非线性油膜力数据库的建立

以有限宽圆弧瓦轴承为对象, 在等温情况下, 油膜压力分布由 Reynolds 方程决定, 其无量纲形式为:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} (G_{\varphi} H^3 \frac{\partial P}{\partial \varphi}) + (\frac{D}{L})^2 \frac{\partial}{\partial \lambda} (G_{\lambda} H^3 \frac{\partial P}{\partial \lambda}) = -3\epsilon(1-2\theta') \sin \varphi - 6\epsilon' \cos \varphi \quad (1)$$

式中: λ 和 φ 为无量纲坐标, P 为无量纲压力, H 为无量纲膜厚, ϵ 为偏心率, θ 为偏位角, ϵ' 和 θ' 为轴心变速速度, D 和 L 分别为轴承直径和宽度^[1]. G_{φ} 和 G_{λ} 为紊流系数^[6]:

$$G_{\varphi} = \frac{1}{12(1+0.00116R_h^{0.916})} \quad (2)$$

$$G_{\lambda} = \frac{1}{12(1+0.00120R_h^{0.854})} \quad (3)$$

其中 R_h 为局部雷诺数 式(1)的边界条件为:

$$\begin{cases} P(\theta, \lambda) = 0, \\ \frac{\partial P(\theta, \lambda)}{\partial \lambda} = 0, \\ P(\varphi, 1) = 0, \\ \frac{\partial P(\varphi, 0)}{\partial \lambda} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

则 θ 和 θ' 为油膜的起始边和终止边 令 $\xi = (1-2\theta')$, $\eta = 2\epsilon'$, 则式(1)可转换为:

基金项目: 国家自然科学基金重大项目资助(19990510).

收稿日期: 2001-07-25; 修回日期: 2001-10-16/联系人秦平, E-mail: qinping@tlbi.xjtu.edu.cn

作者简介: 秦平, 女, 1973 年生, 博士研究生, 目前主要从事摩擦学及机械设计和数据智能建模的研究

$$\frac{\partial}{\partial p}(G H^3 \frac{\partial p}{\partial p}) + (\frac{D}{L})^2 \frac{\partial}{\partial \lambda}(G H^3 \frac{\partial p}{\partial \lambda}) = -3\epsilon \xi \sin \varphi - 3\eta \cos \varphi \quad (5)$$

式中: ξ 和 η 表示轴心速度扰动项, 是轴心运动状态空间的独立坐标

对式(5)求相应积分, 得到的非线性油膜力 F_x 和 F_y 是轴心瞬时位置 ϵ, θ 和瞬时变位速度 ϵ', θ' 的函数, 或者是 ϵ, θ, ξ 和 η 的非线性函数。油膜力数据库算法是在定义域内离散 ϵ, θ, ξ 和 η 并计算出各离散点上的油膜力, 将其存储到数表文件中可形成油膜力数据库。理论上 $\epsilon \in [0, 1], \theta \in [0, 360^\circ]$, 但是 $\theta', \epsilon' \in (-\infty, \infty)$, 即 ξ 和 $\eta \in (-\infty, \infty)$, 很难确定其范围并进行合理的离散, 用有限区间内的变量来取代无界变量是建立非线性油膜力数据库的关键问题。在文献[4]中把非线性油膜力的定义域中速度扰动项作为状态空间的独立坐标, 作如下的 Poincare 变换,

$$\begin{cases} z = 1/\xi, u = \eta/\xi & \text{if } |\xi| > |\eta|, \xi > 0, & (a) \\ z = 1/\eta, v = \xi/\eta & \text{if } |\xi| < |\eta|, \eta > 0, & (b) \\ z = 1/\xi, u = \eta/\xi & \text{if } |\xi| > |\eta|, \xi < 0, & (c) \\ z = 1/\eta, v = \xi/\eta & \text{if } |\xi| < |\eta|, \eta < 0. & (d) \end{cases} \quad (6)$$

这样 $u, v \in (-1, 1)$, 将 (ξ, η) 的无限平面域映射到 (u, v) 有限域内, 解决速度扰动项无法离散的问题。当 $\xi = 0, \eta = 0$ 时无法进行 Poincare 变换, 但是式(5)为齐次方程, 根据边界条件得到特解 $P(\varphi, \lambda) = 0$ 则油膜力数据库由 4 个子库组成, 其相应的 ξ 和 η 取值分布如图 1 所示

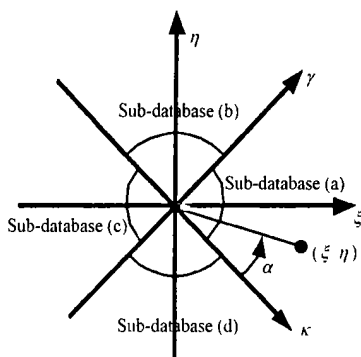


Fig 1 State space transformation in vector space of shaft center

图 1 轴心速度变量空间的变换

由数据库得到的非线性油膜力的计算公式为:

$$F = \begin{cases} |\xi| f_1(\epsilon, \theta, \eta/\xi) & \text{if } |\xi| > |\eta|, \xi > 0, & (a) \\ |\eta| f_2(\epsilon, \theta, \xi/\eta) & \text{if } |\xi| < |\eta|, \eta > 0, & (b) \\ |\xi| f_3(\epsilon, \theta, \eta/\xi) & \text{if } |\xi| > |\eta|, \xi < 0, & (c) \\ |\eta| f_4(\epsilon, \theta, \xi/\eta) & \text{if } |\xi| < |\eta|, \eta < 0, & (d) \\ 0 & \text{if } \xi = 0, \eta = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: f_i 是根据 ϵ, θ, ξ 和 η 值从分段的油膜力数据库检索或插值得到的数值。这样不仅数据库的值是分段的, 而且计算公式也是分段的。进一步分析数据库和式(7), 将分段的油膜力变换成连续的数据空间, 使建立轴承的非线性油膜力网络模型成为可能

由于在油膜力数据库中, 通过比较 ξ 和 η 的数值对数据库进行有限和分段处理, 将 (ξ, η) 坐标平面分成 4 个部分。将坐标轴 (ξ, η) 顺时针旋转 45° (如图 1 所示), 得到新坐标系 (κ, γ) , 相应的坐标变换为

$$\begin{cases} \kappa = (\xi - \eta)/\sqrt{2}, \\ \gamma = (\xi + \eta)/\sqrt{2}. \end{cases} \quad \text{即:} \quad \begin{cases} \xi = (\kappa + \gamma)/\sqrt{2}, \\ \eta = (-\kappa + \gamma)/\sqrt{2}. \end{cases} \quad (8)$$

在坐标系 (κ, γ) 的第一象限中, $\kappa > 0, \gamma > 0$, 符合条件 $|\xi| > |\eta|$, 且 $\xi > 0$

$$|\xi| = (\kappa + \gamma)/\sqrt{2} = (|\kappa| + |\gamma|)/\sqrt{2}. \quad (9a)$$

在坐标系 (κ, γ) 的第二象限中, $\kappa < 0, \gamma > 0$, 符合条件 $|\xi| < |\eta|$, 且 $\eta > 0$

$$|\eta| = (-\kappa + \gamma)/\sqrt{2} = (|\kappa| + |\gamma|)/\sqrt{2}. \quad (9b)$$

在坐标系 (κ, γ) 的第三象限中, $\kappa < 0, \gamma < 0$, 符合条件 $|\xi| > |\eta|$, 且 $\xi < 0$

$$|\xi| = (-\kappa - \gamma)/\sqrt{2} = (|\kappa| + |\gamma|)/\sqrt{2}. \quad (9c)$$

在坐标系 (κ, γ) 的第四象限中, $\kappa > 0, \gamma < 0$, 符合条件 $|\xi| < |\eta|$, 且 $\eta < 0$

$$|\eta| = (\kappa - \gamma)/\sqrt{2} = (|\kappa| + |\gamma|)/\sqrt{2}. \quad (9d)$$

综合式(9), 在新的坐标系 (κ, γ) 下, 可以得到

$$\begin{cases} |\xi| = (|\kappa| + |\gamma|)/\sqrt{2} & \text{if } |\xi| > |\eta|, \\ |\eta| = (|\kappa| + |\gamma|)/\sqrt{2} & \text{if } |\xi| < |\eta| \end{cases} \quad (10)$$

则在固定轴承轴心位置参数下, 轴心速度扰动项 ξ 和 η 之间的夹角与油膜力数据库中的数值是一一对应的, 定义 α 为轴心速度合成变量,

$$\alpha = \begin{cases} \arctg(\gamma/\kappa) & \text{if } \kappa > 0, \gamma > 0, \\ 180^\circ + \arctg(\gamma/\kappa) & \text{if } \kappa < 0, \gamma > 0, \\ 180^\circ - \arctg(\gamma/\kappa) & \text{if } \kappa < 0, \gamma < 0, \\ 360^\circ + \arctg(\gamma/\kappa) & \text{if } \kappa > 0, \gamma < 0 \end{cases} \quad (11)$$

在坐标系 (ξ, η) 下, 轴心速度合成变量 α 的计算式为:

$$\alpha = \begin{cases} 45^\circ + \arctg(\eta/\xi) & \text{if } |\xi| > |\eta|, \xi > 0, \\ 135^\circ + \arctg(\xi/\eta) & \text{if } |\xi| < |\eta|, \eta > 0, \\ 225^\circ + \arctg(\eta/\xi) & \text{if } |\xi| > |\eta|, \xi < 0, \\ 315^\circ + \arctg(\xi/\eta) & \text{if } |\xi| < |\eta|, \eta < 0 \end{cases} \quad (12)$$

由式(7)和(10)得到

$$F = \frac{1}{2} (|\xi - \eta| + |\xi + \eta|) f(\epsilon, \theta, \omega). \quad (13)$$

绘制油膜力 F_x, F_y 和速度合成变量 α 之间的图形(圆轴承, $L/D = 0.6, \epsilon = 0.6, \theta = 110^\circ$), 曲线具有严重转折. 为了保证使 4 组油膜力数据之间能够以光滑曲线连接构成连续函数, 进行如下变量空间变换,

$$f_0 = \begin{cases} f_1/\sqrt{1+(\eta/\xi)^2} & |\xi| > |\eta|, \xi > 0, \\ f_2/\sqrt{1+(\xi/\eta)^2} & |\xi| < |\eta|, \eta > 0, \\ f_3/\sqrt{1+(\eta/\xi)^2} & |\xi| > |\eta|, \xi < 0, \\ f_4/\sqrt{1+(\xi/\eta)^2} & |\xi| < |\eta|, \eta < 0 \end{cases} \quad (14)$$

变换后的图形如图 2 所示, 由该数据组成滑动轴承非

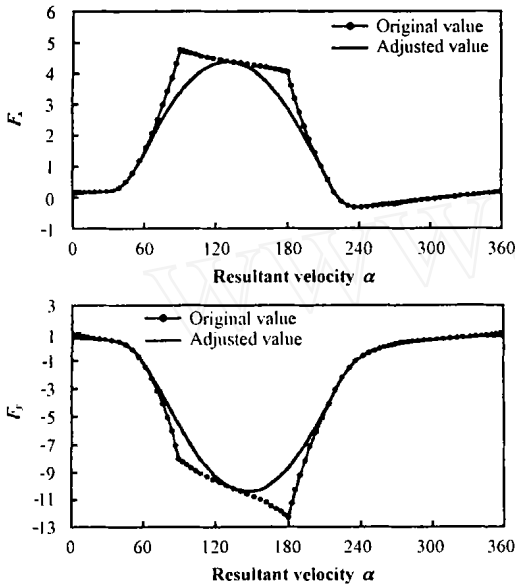


Fig 2 Comparison between original and adjusted force databases

图 2 调整前后油膜力数据曲线的比较

线性油膜力的当量数据库

综合式(13 和 14), 根据当量油膜力数据库建立的轴承实际油膜力公式为

$$F = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} f_0(\epsilon, \theta, \alpha)$$

即:
$$\begin{cases} F_x = \sqrt{(1-2\theta)^2 + 4\epsilon^2} f_{x0}(\epsilon, \theta, \alpha), \\ F_y = \sqrt{(1-2\theta)^2 + 4\epsilon^2} f_{y0}(\epsilon, \theta, \alpha). \end{cases} \quad (15)$$

式中: α 为 ξ 和 η 的夹角, f_{x0} 和 f_{y0} 为根据参数 $(\epsilon, \theta, \alpha)$ 从数据库检索或插值得到的数值

把非线性油膜定义域中的力轴心速度项作为状态空间旋转变换, 这种变换不影响 Reynolds 方程的数值计算, 而且解决了由于离散 ξ 和 η 而影响油膜力数据库连续性的问题, 便于建立油膜力数据库以及通过轴心运动状态变量来拟合油膜力表达式. 对于一定长径比及瓦包角运行在一定转速下的圆柱轴承或椭圆轴承, 以当量油膜力数据库 $(\epsilon, \theta, \alpha, f_{x0}, f_{y0})$ 为基础,

根据轴心运动状态参数和式(15) 计算轴承的非线性油膜力分量, 进一步使用神经网络模型对当量油膜力数据库进行建模, 实现输入输出数据的高精度逼近, 便于系统的数值计算和分析

2 非线性油膜力的神经网络模型

以宽径比 $L/D = 1.0$ 的圆轴承(不考虑进油压力和温度对润滑剂粘度的影响) 为例, 说明非线性油膜力的神经网络模型的建立

2.1 网络训练样本的构造

根据前面分析, 在圆轴承非线性油膜力数据库中输入变量为轴心的瞬时位置和反映轴心瞬时变位速度的综合变量, 输出变量为 2 个方向上的油膜力分量. 偏心距 $\epsilon \in [0, 1]$ 和偏位角 $\theta \in [0, 360]$, 按式(12) 得到的速度合成变量 α 的取值范围是 $[0, 360]$, 从油膜力当量数据库中选取输入参数以及相应的输出参数作为网络的训练样本

如果将轴心的运动状态按照完全组合方法进行网络的完全一次性学习, 则训练样本量过多, 使网络出现学习速度慢甚至振荡不收敛的现象. 如果随意删除若干样本, 又可能会影响网络映射的全局性能. 针对这种大容量样本的网络训练, 采取分批训练的循序渐进学习法, 首先选取包含边界和特征点在内的 500 个样本进行训练, 达到精度后, 增加学习的样本量, 用上一次收敛的权值作为初始权值再训练网络, 再次达到相应精度后继续扩大网络的训练样本, 经过多次重复增加样本式训练, 使数据库中的全部样本达到收敛

2.2 油膜力网络模型的结构

根据神经网络映射存在定理, 任意一个连续函数可以由三层网络逼近, 但是隐层的神经元个数由所要求的学习误差来决定. 在建立轴承非线性油膜力网络模型时, 由于网络学习的海量样本, 为满足预定的误差, 隐层神经元要求足够地多, 造成网络学习速度很慢. 为此采用四层网络逼近滑动轴承的非线性油膜力分量

通过非线性油膜力网络结构的调整试验, 选择的网络结构为 3-30-25-2, 即输入层有 3 个神经元, 对应的是偏心距、偏位角和速度合成变量; 输出神经元有 2 个, 分别为轴承的非线性油膜力分量, 输出层神经元取线性传递函数. 二个隐层神经元的个数为 30 和 25, 其传递函数为双曲正切 S 型函数

2.3 BP 网络的学习算法

BP 网络的学习算法是采用误差反传训练算法,

把一组样本的输入输出向量转化为一个非线性优化问题, 通过一个使代价函数最小化过程来完成从输入到输出的映射. 使用梯度下降法优化网络的连接权值, 收敛速度比较慢, 而且容易陷于局部最小. 为了克服BP 算法的缺陷, 提出一些改进的学习算法, 变学习率的训练算法, Levenberg-Marquardt 算法和尺度共轭梯度算法等^[7]. 本文在非线性油膜力的当量数据库网络模型中, 网络采用Levenberg-Marquardt 算法进行学习.

2.4 网络模型的精度检验

采用网络模型计算得到油膜力的学习误差平方和为 0.001, 对获得的油膜力网络模型进行内插检验. 取 3 组数据进行验证:

- (a) $\theta = 160^\circ, X' = 0, Y' = 0,$
- (b) $\epsilon = 0.5, X' = 4.0, Y' = 1.0,$
- (c) $\epsilon = 0.2, \theta = 230^\circ.$

这里 X' 和 Y' 为轴心沿径向的无量纲速度分量. 计算结果如图 3, 其中 $F_{x,BP}$ 和 $F_{y,BP}$ 表示由BP 网络模型和式 (15) 计算的油膜力分量, F_x 和 F_y 表示根据有限差分法计算的值. 网络模型依靠其联想功能输出的结果与 Reynolds 方程的数值解结果相吻合, 为转子系统的瞬态分析提供有效又简洁的计算模型.

3 圆轴承-转子系统的轴心轨迹计算

转子系统模型采用质量为 $2m$ 的刚性转子支承在两个完全相同的瓦张角 $2\sim 150^\circ$ 的圆轴承上, 由于对称性, 系统可以简化为质量为 m 的轴颈支承在单个轴承上的模型. 圆轴承的主要参数为: 轴承直径 $D = 105\text{ mm}$, 宽度 $L = 105\text{ mm}$, 间隙比 $\Psi = 0.2\%$, 转子质量 $m = 1\,505.7\text{ kg}$, 转子质量偏心率 $\rho = 0.2$, 润滑油粘度 $\mu = 0.01802\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. 在有质量偏心条件下, 刚性转子系统轴颈运动方程的无量纲表示为:

$$\begin{cases} Z_1' = Z_3 \\ Z_2' = Z_4 \\ Z_3' = -(F_x/M) + \rho\sin\tau \\ Z_4' = -(F_y/M) + \rho\cos\tau + G \end{cases} \quad (16)$$

式中: 无量纲位移分量 $Z_1 = X = x/c, Z_2 = Y = y/c, Z_3 = X', Z_4 = Y'$, 其中“ $'$ ”表示 $d/d\tau, c$ 为轴承侧隙. 无量纲油膜力分量 $F_x = (f_x\Psi^2)/(\mu\omega L r), F_y = (f_y\Psi^2)/(\mu\omega L r)$, 无量纲质量 $M = (m c\omega\Psi^2)/(\mu L r), G = g/(c\omega^2)$, 无量纲不平衡偏心距 $\rho = e/c$, 无量纲时间 $\tau = \omega t, \omega$ 为转速, r 为轴承半径. 动态油膜力分量 F_x, F_y 分别采用有限差分法、数据库插值法和数据库网络模型计算, 轴心运动状态的初始值为 $[Z_1, Z_2, Z_3, Z_4]_0 =$

$[0.5, 0.1, 0.0, 0.0]$, 则转子在转速 $n = 3\,500\text{ r}/\text{min}$ 和 $n = 7\,500\text{ r}/\text{min}$ 时轴心轨迹如图 4 所示, 同时 3 种

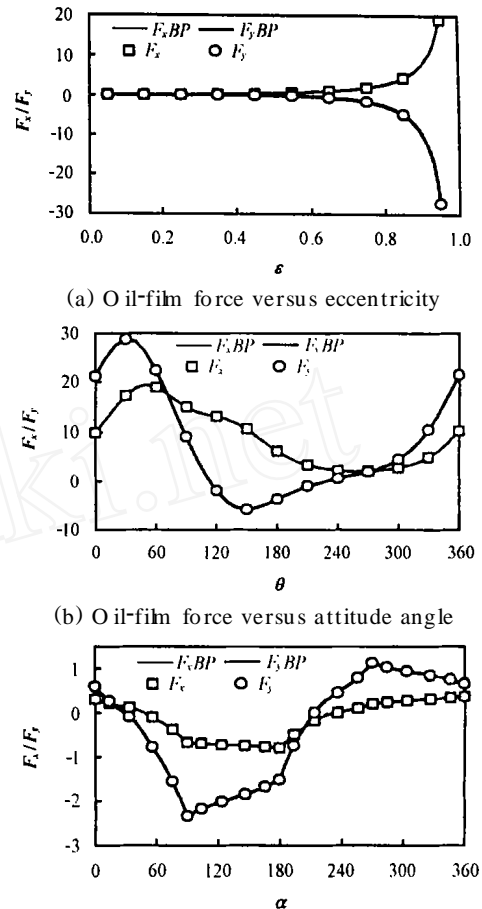


Fig 3 Comparison between BP network model and numerical method ($F_{x,BP}, F_{y,BP}$: Output value of BP model; F_x, F_y : Results with finite differential method)

图 3 非线性油膜力的BP 网络模型与数值结果的比较

算法的计算时间列于表 1, 计算程序利用 Matlab 环境

表 1 3 种计算方法的运行时间
Table 1 Running time of three methods

Method	t/s	
	$n = 3\,500\text{ r}/\text{min}$	$n = 7\,500\text{ r}/\text{min}$
Finite differential	2447.8	3716.6
Database method	294.8	411.4
Network model	18.9	32.7

进行编译和运行.

从图 4 中可见, 3 种计算方法的轴心轨迹几乎相同, 均能反映出系统在 $3\,500\text{ r}/\text{min}$ 和 $7\,500\text{ r}/\text{min}$ 时轴心的运动状态, 网络模型计算法和数据库插值法近似于有限差分法的计算结果. 3 种求解方法的运行时

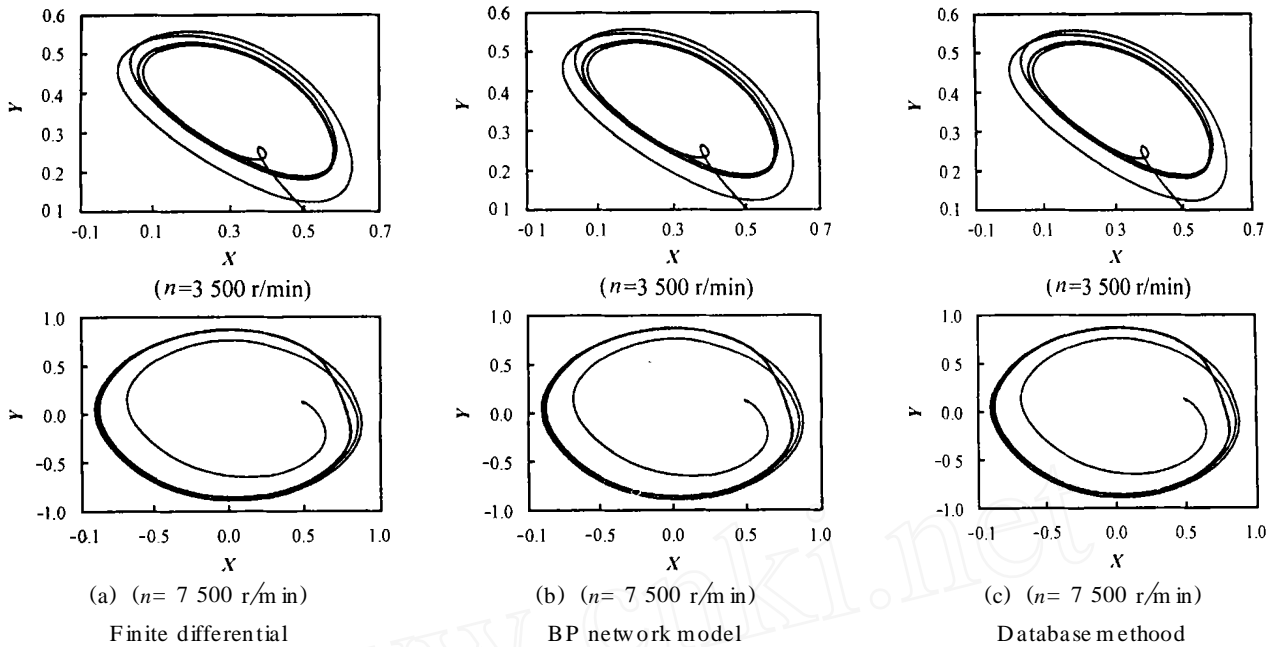


Fig 4 Orbit of shaft center from three methods

图 4 3 种计算方法得到的轴心轨迹

间有着显著的差别,其中网络模型的计算效率最高,借助于训练过的网络和式(15)代入轴心的运动参数直接输出其油膜力分量,不必数值求解二阶偏微分方程;与数据库插值法相比,则省略数据库的检索时间

4 结论

a 利用非线性油膜力定义域中轴心速度状态空间的旋转变换,解决由于离散轴心速度变量而致使油膜力数据库非连续的问题,建立连续的当量油膜力数据库以及油膜力的数据库计算公式

b 对于滑动轴承在不考虑温度场和进油压力对润滑油粘度影响下,建立非线性油膜力数据库的人工神经网络模型,该网络模型可以精确地计算任意轴心位置和速度下的油膜力分量,将训练好的网络模型用于转子系统的瞬态响应分析中,不仅提高计算效率,同时也满足一定的计算精度

参考文献:

- [1] Bernard J, Ham rock. Fundamentals of fluid film lubrication [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994
- [2] Earles L L, Palazzo A B, Amentrout R W. A Finite Ele-

ment Approach to Pad Flexibility Effects in Tilt pad Journal Bearings: Parts I and II[J]. ASME Journal of Tribology, 1990, 112(2): 169-182

- [3] Wang Wen, Zhang Zhiming. Calculation of journal dynamic locus aided by database of non-stationary oil film force of single bush segment [C]. Asia-Pacific Vibration Conference'93, Japan, 1993 365-369
- [4] MENG Z Q (孟志强), XU H (徐华), ZHU J (朱均). A Database Method of Nonlinear Oil Film Force Based on Poincare Transformation (基于 Poincare 变换的滑动轴承非线性油膜力数据库方法) [J]. Tribology (摩擦学学报), 2001, 21(3): 223-227.
- [5] Cybenko G. Approximation by Superposition of Sigmoidal Functions[J]. Mathematics of Control, Signals and Systems, 1989, 2: 303-314
- [6] Mikami M, Kumagai M, Uno S. Static and Dynamic Characteristics of Rolling-Pad Journal Bearings in Super-Laminar Flow Regime [J]. ASME Journal of Tribology, 1988, 112(1): 73-79
- [7] CONG S (丛爽). Theory and Application of Neural Networks Based on MATLAB Toolbox (面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用) [M]. Hefei (合肥): University of Science and Technology of China Press (中国科技大学出版社), 1998

BP Network Model for Nonlinear Oil-film Force on Hydrodynamic Bearing

Q N Ping, M EN G Zhi-qiang, ZHU Jun

(Theory of Lubrication and Bearing Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The database method to compute nonlinear oil-film force of the finite width hydrodynamic journal bearings can solve the contradiction between accuracy and efficiency, but the database and formulae of oil-film force are subsections. Positions and velocities of bearings are synthesized into three basic parameters and state space transformation is used to change discontinuous oil-film force databases to consecutive. So the integrative formula and BP network model based on consecutive databases forces are established to obtain oil-film force under any movement states of axes with high accuracy. By means of computation example of cylinder journal hydrodynamic bearings, finite differential method, database method and BP neural network models of nonlinear oil-film forces are employed to calculate oil-film forces and orbit of shaft center in the transient analysis of the rotor-bearing system. Results are shown that BP network model is more approximate to numerical computation methods and raises remarkably computational efficiency of bearings.

Key words: nonlinear oil-film force; BP neural networks; hydrodynamic bearing

Author: Q N Ping, female, born in 1973, Ph. D. student, E-mail: qinping@tlbi.xjtu.edu.cn