



国防科学技术大学

全国优秀博士学位论文丛书

转子碰摩非线性行为 与故障辨识的研究

胡芑庆 著

国防科技大学出版社

转子碰摩非线性行为与 故障辨识的研究

胡莒庆 著

国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

转子碰摩非线性行为与故障辨识的研究/胡芑庆著.—长沙:国防科技大学出版社,
2005.4

(国防科学技术大学全国优秀博士学位论文;1/曾淳主编)

ISBN 7-81099-152-3

I.转… II.胡… III.转子—非线性—研究 IV.H136

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 006207 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:耿 筠 责任校对:文 慧

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:333 千

2005 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 7-81099-152-3/N·1

全套定价:280.00 元

序 言

当今世界,科学技术日新月异,科技创新已经成为社会生产力解放和发展的重要标志。科学技术的迅猛发展,正在引发一场广泛而深刻的军事变革,知识军事的时代已经来临。在新的历史条件下,面对世界新军事变革的严峻挑战,面对推进中国特色军事变革和军事斗争准备的紧迫需求,军队研究生教育的地位和作用比以往任何时候都更加突出。

博士学位论文水平反映了高层次创新型人才培养的质量,同时学位论文也是博士生学科专业知识水平、特别是创新能力的集中体现。教育部每年评选 100 篇左右的全国优秀博士学位论文,作为国家 21 世纪教育振兴计划的重要内容,已成为提高研究生培养质量,鼓励创新,促进高层次创造性人才脱颖而出的重要措施。国防科技大学作为我军工程技术的最高学府,承担着为国家和军队信息化建设、研究开发国防高科技和先进武器装备、培养军队高级工程技术和指挥人才的重要历史使命,是我军实现新军事变革和军队信息化建设的人才培养和科学研究重要基地。提高人才培养的质量已成为我们现阶段迫切需要解决的问题之一。

自 1999 年教育部开展全国优秀博士学位论文评选以来,我校积极参加评选工作,并以全国优秀博士学位论文评选为契机,组织学校博士学位论文的评优工作,同时参加湖南省和军队优秀博士、硕士学位论文的评选,在我校研究生中大力倡导科学严谨的学风和勇攀高峰的精神,营造鼓励人才积极创新、支持人才实现创新的浓厚氛围,为学生的禀赋和潜能的充分开发创造一种宽松的环境。同时通过深化博士学位论文评阅制度改革;实施创新

工程,资助博士研究生创新研究;加强学校研究生指导教师队伍建设;建立激励机制,鼓励优秀人才脱颖而出等措施不断完善质量保证体系的建设。

博士学位论文是博士生学术水平、科研能力、创造性成果的集中体现,也是学校研究生教育水平、学术水平和创新能力的重要标志。全国优秀博士学位论文是我国优秀博士学位论文中的杰出代表,全国优秀博士学位论文作者是具有创造能力和竞争能力的高层次创造性人才,是支撑国家崛起的骨干创新力量。认真总结全国优秀博士学位论文的成功经验,对于进一步提高博士生教育的整体水平,培养数量更多、水平更高的高层次创造性人才,具有十分重要的启示作用。我校已有五篇博士学位论文获全国优秀博士学位论文,有五篇博士学位论文被评为全国优秀博士学位论文提名论文。现将这些优秀论文汇集出版,旨在为广大在学博士生及其导师树立高水平博士学位论文的范本和学习榜样,也期望进一步推动我校研究生教育改革的深入发展,以培养高层次创新性人才为目标,认真总结创新性人才的培养经验和方法,深入探讨博士生教育改革的思路 and 措施。

努力提高我军新型军事科技人才培养质量,为我校的快速发展和我军现代化服务,是我们今后一个阶段十分重要的任务。我们要在培养大批各类专业人才的同时,努力为优秀人才的脱颖而出创造条件。尤其要下功夫造就一批真正能站在世界科学技术前沿的学术带头人和尖子人才,以应对世界新军事变革的严峻挑战,为推进中国特色军事变革做出新的更大贡献。

国防科学技术大学研究生院

曾淳

2005年3月于长沙

历届国防科学技术大学 全国优秀博士学位论文及 全国优秀博士学位论文提名论文

2001 年三篇全国优秀博士学位论文:

信息与通信工程学科,王雪松博士的论文《宽带极化信息处理的研究》,导师庄钊文教授;

计算机科学与技术学科,王意洁博士的论文《面向对象数据库的并行查询处理与事务管理》,导师胡守仁教授;

控制科学与工程学科,王正明博士的论文《弹道跟踪自校准方法》,导师黄柯棣教授。

2004 年二篇全国优秀博士学位论文:

机械工程学科,胡笃庆博士的论文《转子碰摩非线性行为与故障辨识的研究》,导师温熙森教授;

航空宇航科学与技术学科,黄玉辉博士的论文《液体火箭发动机燃烧稳定性理论、数值模拟和实验研究》,导师王振国教授。

2003 年三篇全国优秀博士学位论文提名论文:

机械工程学科,刘耀宗博士的论文《碰摩转子混沌振动识别与控制技术研究》,导师温熙森教授;

计算机科学与技术学科,彭伟博士的论文《移动自组网络中的广播与路由技术研究》,导师卢锡城教授;

航空宇航科学与技术学科,黄玉辉博士的论文《液体火箭发动机燃烧稳定性理论、数值模拟和实验研究》,导师王振国教授。

2004 年二篇全国优秀博士学位论文提名论文:

原子与分子物理学科,曾交龙博士的论文《使用细致谱项模型研究铝等离子体的辐射不透明度》,导师袁建民教授;

计算机科学与技术学科,李舟军博士的论文《传值 CCS 和 π -演算互模拟等价的验证理论和算法》,导师陈火旺教授。

摘要

20 世纪下半叶兴起的混沌理论为非线性动力学系统的研究开创了新途径。对复杂机械系统中可能出现的强非线性行为(如混沌)展开研究并探讨混沌理论在机械故障诊断中的应用,对于复杂机械系统的设计、使用、诊断与维修具有重要意义。

随着机械运转速度的日益提高以及各种新型材料在高速机械中的广泛应用,机械系统的非线性将更加突出,可能直接(或间接)导致机械系统的故障。从理论和实验上对这个问题进行研究意义重大。而对非线性行为特别是混沌行为的预测与机器运行状态的早期检测,以及利用基于混沌理论的信号/信息处理方法的研究显得尤为突出。本文正是在这样的背景下,提出对转子系统中存在的复杂非线性行为展开研究,并对非线性行为的辨识方法以及基于混沌理论的转子故障早期诊断新方法进行了深入研究与探讨。

本论文主要完成两个方面的研究工作:从碰摩转子实验系统中观测混沌现象并进行辨识与分析;基于非线性科学理论与技术对转子系统的行为进行分析、预测与早期辨识。概述地说,围绕上述问题所开展的具体研究内容包括以下方面:

1. 深入系统地研究了碰摩转子的非线性行为的特征与规律。

(1) 采用并改进了已有的转子尖锐碰摩模型,通过定量和定性的理论分析,获得了尖锐碰摩转子振动响应形式;设计了尖锐碰摩转子试验台,并开展了细致的实验研究,获得了不同碰摩情况下的振动响应特征规律;通过理论和实验分析,得出在尖锐碰摩情况下早期碰摩在一定条件下会出现 $1/3X$ 、 $2/3X$ 的分频成分的结果(X 表示工频)。

(2) 建立了基于局部碰摩力变化且具有转、定子偏心的 Jeffcott 非线性转子的动力学模型,大量的数值仿真表明局部碰摩转子存在分频现象和一定的分叉规律,获得了在大不平衡、小阻尼、高转速条件下,局部碰摩容易产生拟周期或混沌振动的结果;基于数值分析结果,设计并建立了局部碰摩转子系统试验台,在大范围的转速里进行了细致的实验研究,观察到了包括周期、拟周期、次谐波与超谐波以及混沌振动在内的丰富的振动现象。观测与仿真结果定性一致。

(3) 采用基于观测时间序列的重构相空间分析方法,对转子系统的非线性行为进行辨识与分析,获得了系统出现强非线性行为的统计意义上的证据。

研究表明,早期碰摩时产生的分频现象为这类故障的早期诊断提供了依据。理论与实验分析获得的碰摩转子振动响应的特征规律对于碰摩的预测具有一定的参考价值。

2. 提出了具有工程化前景的相空间重构技术和统计特征指数算法,以评判碰摩转子观测数据所隐含的动力学行为。

(1) 在短数据集情况下,为了快速、合理地选择嵌入空间参数,提出了延迟时间选择的交叉位移改进法和嵌入维数选择的伪近邻距离统计增长法。其特点是速度快、重复性好。

(2) 对影响关联维数计算的各种因素进行了深入分析,提出了在短数据集约束下估计关联维数的具体方法。

(3) 提出了在短数据集条件下,通过最大瞬时 Lyapunov 指数来估计最大 Lyapunov 指数的方法,并指出 Lyapunov 指数之和与系统的能量耗散机制相关联。从理论上分析并提出了 Lyapunov 指数之和的变化规律可用来监测强非线性系统的阻尼变化,从而可以监测系统状态变化的新策略和新方法。

研究表明,关联维数和最大 Lyapunov 指数对非线性动力学行为的辨识是行之有效的,其有效性在转子碰摩的各种状态的分类与辨识中获得了证实。

3. 通过观测数据的不可长期预测性,并结合特征指数分析,提出了对信号的混沌特性进行综合判别的新方法。

(1) 改进了局部线性拟合的非线性预测方法。

(2) 提出了非线性时间序列预测的相轨迹方法。

(3) 提出了利用观测数据的短期、长期可预测性可对动力学行为进行辨识的新方法。

研究表明,上述预测方法结合特征指数分析,可以对非线性行为进行综合分类与辨识,通过多指数、多角度地对观测数据进行分析,使获得的辨识结果更为可信。事实表明该预测方法在转子碰摩非线性行为的分类与辨识中的应用是行之有效的。

4. 以理论和实验分析所获得的碰摩故障特征规律为基础,提出了采用 Duffing 振子微弱信号检测手段对转子系统碰摩故障特征进行早期检测的新方法。

(1) 理论分析了 Duffing 方程的全局解和全局分叉规律,并讨论了分叉值随阻尼、外

部激励幅值的变化规律,发现 Duffing 方程外轨解的最大轨道所对应的分叉阈值特性可用来进行微弱信号检测。

(2) 提出了利用 Duffing 振子进行早期故障特征微弱信号检测的实现模型,并对相关问题进行了深入讨论。

(3) 提出了检测信号存在性策略、确定微弱信号幅值的方法和估计信号频率的方法。

(4) 针对机械故障诊断应用环境,提出了利用该方法进行故障早期检测的决策策略。

(5) 首次提出了采用源于符号动力学的符号序列分析技术(STSA)对振子的相变进行自治地快速辨识的方法与实现流程。

数值分析与实验表明,该方法可以对信噪比为 -25dB 左右的微弱信号进行可靠检测。该方法对于诸如碰摩故障特征的早期检测是行之有效的。

5. 本文首次将随机共振理论与方法引入机械故障早期诊断领域,提出了采用随机共振原理来检测微弱的特征信号的新方法,以尽早而准确地捕捉表征转子碰摩早期的特征信号。

研究表明,该方法简单、稳健、可靠,能把信噪比较低的表征碰摩故障的周期信号从强背景噪声中可靠地提取出来。该方法是一种具有实际应用价值的故障早期特征检测方法。

关键词: 转子系统;碰摩故障;相空间重构;关联维数;最大 Lyapunov 指数;最大瞬时 Lyapunov 指数;相轨迹演化;非线性时间序列预测;Duffing 混沌振子;随机共振;符号时间序列分析;微弱信号检测;故障早期诊断与预测

ABSTRACT

Chaos theory developed in the late half of 20th century gives a new approach to the research on nonlinear dynamical system. The researches on strong nonlinear behavior such as chaos in complex mechanical system and application of chaos theory in machinery fault diagnosis are of significance to design, operation, diagnosis and maintenance of complex mechanical system.

With the increase of machinery operating speed and wide application of various new-style materials in high-speed machinery, nonlinear problem of mechanical system which may cause abnormal state even fault directly or indirectly becomes more and more obvious. Theoretical and experimental studies focusing on this problem are very important. Particularly, it is more important to study the prediction of nonlinear behavior and chaotic behavior, early detection of operating state and signal/information processing method based on chaos theory. Under this circumstance, this dissertation suggests two research aspects, namely experimental study on complex nonlinear behavior underlying rotor system with stator-rotor rub and deep study on identification method and early diagnosis of rotor fault based on chaos theory.

Subsequently, this dissertation mainly includes, observation and identification of chaotic phenomena from rub-impact rotor rig, analysis and prediction for nonlinear behavior of rotor rub-impact based on nonlinear signal processing, early detection and recognition of rub-impact fault based on nonlinear theory and chaos theory. The detailed contents and innovative work include.

1. Nonlinear behavior and characteristic rule of rub-impact rotor are deeply and systematically studied.

(1) Combined with quantitative and qualitative analysis, solutions of vibration response of sharp rub-impact rotor are obtained by the improved sharp rub-impact model of rotor. Test rig of sharp rub-impact rotor is designed and meticulous experiment has been accomplished. Characteristic rule of vibration response is obtained in various cases of rub-impact. The result that the $1/3X, 2/3X$ sub-harmonic components (X denotes operating frequency component) occur in inception of rub-impact in the case of sharp rub-impact under certain condition, is obtained via theoretical and experimental analysis.

(2) Dynamic model of Jeffcott nonlinear rotor with eccentric between stator and rotor is built

based on rub-impact force. Numerical simulation demonstrates that local rub-impact has sub-harmonic phenomena and bifurcation phenomena. The rub-impact rotor response includes quasi-periodic or chaotic vibration when severe unbalance, small damping and high rotating speed. Based on the result of numerical analysis, rotor test rig about local rub-impact is designed and built. Experimental research has been done within broad range of rotating speeds. Very rich and complicated vibration phenomena including not only periodic (synchronous and non-synchronous) components but also quasiperiodic and chaotic motions, are observed. The observed result is qualitatively consistent with that of simulation.

(3) Phase space reconstruction analysis method based on observed time series is used to analyze and identify nonlinear dynamics of rotor system. The evidence with statistical meaning representing strong nonlinear behavior is obtained. The results show that sub-harmonic phenomena produced by local rub-impact provide mechanism and evidence for the early diagnosis of this fault. Vibration response characteristics of rub-impact rotor obtained by theoretical and experimental analysis are of significance to prediction of rub-impact.

2. Phase space reconstruction technology and characteristic indices algorithms, which show the wide prospects of engineering application, are presented to distinguish dynamical behavior underlying observed time series from rub-impact rotor.

(1) In the case of short data set, to select embedding space parameters as fast and exact as possible, the improved across displacement method for selecting time delay and the relative gain ratio of false neighbors distances method for selecting embedding dimension are presented. These methods have high computational speed and good repeatable capacity.

(2) Various factors related to the estimation of correlation dimension are analyzed deeply and the implemented method for estimating correlation dimension is also presented under the constraint of short data set.

(3) The method for estimating largest Lyapunov exponent via instantaneous largest Lyapunov exponent is presented under the condition of short data set. An important property is concluded that the sum of Lyapunov exponents is related to the generalized divergence of the flow in phase space of the system, and related to the energy dissipation mechanism of a system. Theoretical analysis demonstrates that the sum of Lyapunov exponents must be related to the damping of a mechanical system, and can be utilized to monitor any damping change of the system. Consequently, a new strategy is presented to monitor changes of states of complex nonlinear system.

The above research shows that identification of nonlinear behavior using correlation dimension and the largest Lyapunov exponent synchronously is feasible and their effectiveness is validated.

ed on classification and identification of various states of rub-impact rotor.

3. A new integrated method is presented to identify chaotic property of signal by short-term predictability, non-long-term predictability of observed data and the result of characteristic indices including correlation dimension and the largest Lyapunov exponent.

(1) Local linear fitting method for predicting nonlinear time series is improved.

(2) Prediction method based on phase trajectory (PBPT) for predicting nonlinear time series is presented.

(3) A new idea on identification of dynamical behavior is presented via short-term predictability and long-term predictability of observed data.

The research shows that the above predicting method combined with characteristic indices analysis can classify and identify nonlinear behavior. Experimental data are analyzed with several indices and from multi-angle. Consequently, the identified result will be more reliable. The effectiveness of the above method has been validated on classification and identification for nonlinear behavior of rub-impact rotor system.

4. On the basis of characteristic pattern of rub-impact fault from theoretical and experimental analysis, a new idea is presented for the early detection of rub-impact fault of rotor using weak signal detection method via Duffing oscillator.

(1) All forms of solutions and global bifurcations of Duffing equation are analyzed in theory. Various bifurcations thresholds varying with damping and external exciting amplitude are discussed. The analysis concludes that the bifurcation threshold corresponding to the maximum orbit of solutions outside homoclinic orbit of Duffing equation can be used to detect weak signal.

(2) The implemented model of Duffing oscillator for weak signal detection is presented and some aspects considered about weak signal detection via Duffing oscillator for practical reasons are discussed deeply.

(3) The approaches for testing existence of characteristic signal and estimating the amplitude and frequency of certain signal are presented.

(4) In view of practical application environment of machinery fault diagnosis, A decision-making strategy is presented for early fault detection via Duffing oscillator method.

(5) It is for the first time that a quick identification method and implemented procedure using symbolic time series analysis technique (STSA) based on symbolic dynamics are presented to determine the phase transition of oscillator autonomously.

Numerical and experimental analysis demonstrate that the method can reliably detect weak signal with signal-noise ratio as small as -25dB . This method is feasible for characteristics detec-

tion of early fault such as rub-impact fault of rotor.

5. It is the first time that the theory and method of stochastic resonance (SR) are introduced to machinery fault diagnosis. A new detection method for weak characteristic signal based on SR is presented to catch the characteristic signal of mechanical faults as early and accurately as possible. The result shows that this method is simple, robust and reliable. The weak sinusoid signal of lower signal-to-noise ratio can be reliably extracted from heavy noise. This method is valuable in practical engineering for characteristics detection of early fault.

Keywords: Rotor system, Rub-impact fault, Phase space reconstruction, Correlation dimension, Largest Lyapunov exponent, Largest instantaneous Lyapunov exponent, Phase trajectory evolution, Nonlinear time series prediction, Duffing chaotic oscillator, Stochastic resonance, Symbolic time series analysis, Weak signal detection, Diagnosis and prediction for inception of fault

目 录

摘 要	(i)
-----	-------

第一章 绪 论

1.1 研究背景	(1)
1.1.1 需求分析	(1)
1.1.2 机械系统(转子系统)中的混沌研究综述	(3)
1.1.3 工程中的混沌应用研究概况	(9)
1.1.4 非线性科学与机械系统故障诊断	(10)
1.2 课题来源及本文的主要研究工作	(14)
1.2.1 问题提出与课题来源	(14)
1.2.2 本文研究内容和章节安排	(15)

第二章 碰摩转子非线性行为的理论与数值分析以及实验研究

2.1 混沌概念的演化与理论基础	(18)
2.1.1 混沌探源、基本概念与发展情况	(18)
2.1.2 混沌的研究内容	(20)
2.1.3 与混沌相关的理论基础	(22)
2.2 转子系统中混沌行为的理论分析与探讨	(24)
2.3 局部尖锐碰摩转子系统中非线性行为的理论分析与实验研究	(27)

2.3.1 转子、定子间尖锐碰摩的振动分析	(28)
2.3.2 转子系统转子、定子间尖锐碰摩时的振动特征实验研究	(34)
2.3.3 转子、定子间尖锐碰摩的振动分析结果讨论	(40)
2.4 转子、定子间局部碰摩的数值仿真与实验研究	(41)
2.4.1 转子、定子间因间隙变化引起碰摩的振动分析	(42)
2.4.2 转子系统局部碰摩时的振动特征数值仿真	(44)
2.4.3 转子系统局部碰摩时的振动特征实验研究	(49)
2.4.4 进一步讨论	(53)
2.5 本章小结	(54)

第三章 基于混沌理论的碰摩转子响应时间序列辨识与分析方法

3.1 引言	(55)
3.2 相空间重构的基本思想与非线性特征判别方法	(56)
3.3 确定时间延迟的平均互信息法和交叉位移法	(58)
3.4 确定嵌入维数的伪近邻法和统计增长法	(66)
3.4.1 引言	(66)
3.4.2 全局伪最近邻方法	(68)
3.4.3 伪近邻距离统计增长法	(70)
3.5 关联维数的计算及在非线性辨识中的应用	(74)
3.5.1 相关问题简述	(74)
3.5.2 关联维数的计算方法及在非线性辨识中的应用	(76)
3.6 最大 Lyapunov 指数的估计及在非线性辨识中的应用	(79)
3.6.1 Lyapunov 指数	(79)
3.6.2 从观测数据中计算 Lyapunov 指数	(81)
3.6.3 最大 Lyapunov 指数的 ILEs 估计方法及其在非线性辨识中的应用	

.....	(86)
3.6.4 ILEs、SLEs、广义流形发散与机械系统的阻尼特性	(91)
3.7 关联维数和最大 Lyapunov 指数在非线性状态辨识中的综合 应用	(92)
3.8 本章小结	(94)
第四章 基于混沌理论的时间序列预测方法在碰摩转子动态行为辨识中的应用	
4.1 线性预测与非线性预测	(96)
4.2 混沌时间序列预测方法简述	(98)
4.2.1 全局方法	(98)
4.2.2 局部函数估计	(99)
4.3 改进的局部拟合方法及应用	(100)
4.3.1 改进局部拟合方法的基本思想	(100)
4.3.2 刻画预测精度的归一化均方误差	(101)
4.3.3 改进局部拟合的具体算法	(102)
4.3.4 算法验证与优化参数选择	(103)
4.3.5 在碰摩转子非线性行为辨识中的应用	(106)
4.4 基于相轨迹的非线性预测理论与方法	(107)
4.4.1 预测原理	(107)
4.4.2 预测基本算法	(108)
4.4.3 邻近点的搜索	(109)
4.4.4 最佳近邻点的确定	(110)
4.4.5 算法测试与验证	(111)
4.4.6 相轨迹法非线性预测在碰摩转子动态行为辨识中的应用	(112)
4.5 本章小结	(114)