



国防科学技术大学

全国优秀博士学位论文丛书

碰摩转子混沌振动 识别与控制技术研究

刘耀宗 著

国防科技大学出版社

碰摩转子混沌振动识别与 控制技术研究

刘耀宗 著

国防科技大学出版社
·长沙·

**Research on Recognition and Control
Technology of Chaotic Vibration of Rotor Rubbed
with the Stator**

Candidate: Liu Yaozong
Supervisor: Prof. Wen Xisen

A Dissertation
Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Engineering
in Mechanical Engineering
Graduate School of National University of Defense Technology
Changsha, Hunan, P. R. China
April, 2001

图书在版编目(CIP)数据

碰摩转子混沌振动识别与控制技术研究/刘耀宗著. —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;6/曾淳主编)

ISBN 7-81099-152-3

I. 碰… II. 刘… III. 转子—振动理论 IV. TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 005560 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:肖 滨
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:10.75 字数:218 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

国防科学技术大学
全国优秀博士学位论文丛书

主 编 曾 淳

副主编 张春元 周珞晶

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,承担着为国家安全和军队信息化建设、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,胡莒庆博士的论文《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。

分类号 0322, TH133

UDC

学号 9739015

密级

工学博士学位论文

碰摩转子混沌振动识别与控制技术研究

博士生姓名：刘耀宗

学科专业：机械电子工程

研究方向：机器状态监控与故障诊断

指导教师：温熙森教授

国防科学技术大学研究生院

二〇〇一年四月

缩略词说明

AAFT	amplitude adjusted Fourier transform(幅值调整的傅立叶变换)
AB	auxiliary bearing(辅助轴承)
ACD	average combined displacement(平均组合位移法)
AD	average displacement(平均位移法)
AFN	averaged false neighbors(平均伪近邻法)
AMB	active magnetic bearing(主动式磁轴承)
ARMA	autoregressive moving average(自回归滑动平均模型)
DFT	discrete Fourier transform(离散傅立叶变换)
EKG	electrocardiogram(心电图)
EEG	electroencephalograph(脑电图)
FFT	fast Fourier transform(快速傅立叶变换)
FNN	false nearest neighbors(伪近邻法)
IAAFT	iterated amplitude adjusted Fourier transform(迭代的幅值调整傅立叶变换)
LQR	linear quadratic regulator(线性二次型最优调节器)
MLE	maximum Lyapunov exponent(最大李雅普诺夫指数)
NMP	non-minimum phase(非最小相位)
OGY	Ott、Grebogi and Yorke(三位学者提出的混沌控制方法)
PRFT	phase randomized Fourier transform(相位随机化傅立叶变换)
SSA	singular spectrum analysis(奇异谱分析)
SVD	singular value decomposition(奇异值分解)
TLS	total least square(总体最小二乘法)
UPO	unstable periodic orbit(不稳定周期轨道)

摘要

混沌被誉为 20 世纪自然科学的第三大发现。它打破了传统的确定论观点,认为那些貌似随机的时间序列可以由低维的确定性系统产生,从而在随机性和确定性之间架起了一座桥梁,为人们解释和分析自然界中的复杂现象提供了崭新的思路和方法。在旋转机械中,转定子碰摩问题具有显而易见的非线性,由碰摩引起的转子非线性振动很早就引起了研究者的注意,人们迫切希望能够更准确地理解和识别转子系统中的复杂振动现象,认识其非线性振动规律。

在国家自然科学基金项目“转子系统混沌行为与故障的关联关系及其预测方法研究(编号:59775025)”的资助下,本文在数值仿真分析的基础上,立足于实验观测和信号分析,结合非线性动力学和混沌理论,对碰摩转子非线性振动问题进行了较为系统的研究,主要研究内容与结论有:

1. 针对具有转定子偏心的 Jeffcott 转子局部碰摩时的非线性振动问题,从数值仿真和实验观测两方面揭示了其分频伪共振现象和随转速升高而振动周期依次增加一个旋转周期的分叉规律。特别地,在数值仿真结果的指导下,在实验装置上观测到了碰摩转子的不规则非周期振动,并从观测数据出发说明了这些振动是混沌的。

2. 详细研究了相空间重构的嵌入维和时延的确定方法,提出了确定重构时延的平均组合位移法。该方法继承并发展了平均位移法的思想,在保留其计算量小、对测量噪声不敏感等优点的同时,克服了平均位移法可能导致重构轨迹向辅助对角线汇聚的问题,并使重构时延的确定准则具有明确的物理意义。简要介绍了嵌入维选择的平均伪近邻法,并用上述两种方法确定了实验数据的合适重构参数,为后续分析奠定了基础。

3. 在详细分析了时间序列非线性检验的替代数据法的基础上,提出了检验序列是否为线性非高斯随机过程的替代数据生成算法,解决了基于相位随机化的替代数据检验可能把非最小相位线性非高斯随机过程误判为非线性的问题,并通过替代数据检验说明了实验数据的非线性动力学本质。

- (1) 详细分析了替代数据法的基本原理。基于相位随机化的替代数据法假设原序

列来自(经过单调静态非线性变换的)平稳线性高斯随机过程,本文指出,拒绝此假设,并不能说明序列必然来自确定性的非线性动力系统,非最小相位的线性非高斯序列也会导致基于相位随机化的替代数据检验拒绝此假设。文中通过实际算例说明了这一现象的确存在。

(2) 为了解决这一问题,提出并详细推导了基于功率谱等价的非最小相位序列求逆方法;沿着替代数据典型实现的思路,提出了检验序列是否为线性非高斯过程的替代数据生成算法(ARMA 算法),成功地克服了相位随机化替代数据的上述不足。这样,通过分别检验序列是否为线性高斯过程和线性非高斯过程,实现了对“序列来自线性随机过程”的零假设检验,从而可以更可靠地检验序列的非线性。

(3) 分别用 IAAFT 算法和文中提出的 ARMA 算法对几组具有连续谱的典型实验数据进行了替代数据检验,结果表明,碰摩转子振动信号来自非线性动力系统。

4. 研究并改进了关联维和最大 Lyapunov 指数的估计方法。系统分析了实验观测到的具有连续谱的不规则振动信号的关联维和最大 Lyapunov 指数,结果表明碰摩转子振动信号具有混沌特征。

5. 对混沌控制问题进行了初步的研究,基于 OGY 方法的思想,提出了混沌控制的线性二次型最优调节器(LQR)方法。该方法充分考虑了 OGY 法对控制律作用域和控制量的限制,克服了 OGY 法过渡过程较长的不足,在其他参数相同的条件下能够更快更好地实现混沌控制。通过对碰摩转子混沌控制的数值仿真,说明了能够用 LQR 方法抑制碰摩转子的混沌振动。

总之,本文围绕碰摩转子混沌振动“有没有”和“是不是”的基本问题,从数值仿真和实验观测两方面揭示了具有转定子偏心的局部碰摩转子的非线性振动规律,证实了混沌振动的存在。另外,本文还从混沌控制的角度对抑制碰摩转子的混沌振动进行了研究。本文的研究结论对于人们正确认识碰摩转子的非线性振动,特别是混沌振动有重要的参考价值,并为转子系统中转定子碰摩故障的准确诊断奠定了基础。本文关于混沌时间序列分析和混沌控制的研究结果对于分析和控制其他混沌系统也有良好的借鉴意义。

关键词: 转定子碰摩;碰摩力模型;非线性振动;混沌振动;相空间重构;替代数据检验;混沌统计特征;混沌控制

ABSTRACT

Chaos is honored as the third greatest discovery in science in the 20th century. Chaos theory introduces the fascinating idea that apparently random time series might have been generated by a low-dimensional deterministic system, according to which chaos provides an alluring explanation for erratic behavior in nature. In high speed rotating machinery, it is frequently encountered that a rotor, excited by unbalance, is running in local contact with a stator. The rotordynamics is obviously nonlinear when rotor rubs with stator. This nonlinearity was observed as early as 1960s. Since then, great concerns for the anomalous vibration of rubbed rotor have been attracted from many researchers.

This dissertation is supported by the National Natural Science Foundation of China (Project name: Research on Relationship between Chaotic Behavior and Fault in Rotors and Its Prediction Method. Grant No.: 59775025). By means of experimental observations and data analysis, as well as numerical analysis of the theoretical model, the nonlinear vibration in a rotor rubbing a static part is studied in this dissertation. The main contents are as follows:

1. A Jeffcott rotor eccentrically placed within a stiffer stator is investigated numerically and experimentally. In both investigations, we notice that the vibratory motion has subharmonic pseudo-resonant peaks which are large components asynchronous with the rotational frequency, and that the vibration period increases by one and one rotating period when the rotating speed increases. It is worthy of note that disordered aperiodic vibration is observed when the Jeffcott rotor is operated in a clearance bearing with eccentricity. In these data sets the chaotic characteristics are found.

2. The methods of choosing delay times and embedding dimension for attractor reconstruction are discussed. A new approach to selecting delays, named as average combined displacements (ACD), is developed based on the method of average displacement (AD). Besides the merits inherited from AD, such as being reliable with small and noisy data sets and modest computational

cost, ACD deals with the matter of AD that the reconstruction attractor expands from identity line of embedding space but does not expand from other diagonal lines. The criterion to choose delays for ACD is significative of the largest reconstruction expansion. A practical method to determine the minimum embedding dimension is recommended. The proper reconstruction parameters of observed data are determined by using above methods.

3. In order to test the nonlinearity of the observed vibration data, the method of surrogate data is thoroughly discussed. It is pointed out that the phase randomized surrogate data test of linear non-Gaussian time series with non-minimum phase (NMP) might indicate false nonlinearity. So, a new method to test the hypothesis of linear non-Gaussian process is proposed in light of typical realization of surrogates. The observed data sets are convinced of nonlinearity according to the results of surrogate data tests.

(1) We have made a scrutiny into the method of surrogate data. The explicit null hypothesis normally used is that the time series was generated from a linear, stochastic, Gaussian stationary process, possibly including an invertible nonlinear static observation function. It is pointed out that the rejection of such a hypothesis may not only result from an underlying nonlinear or even chaotic system, but also from, e.g., a linear, stochastic, non-Gaussian and NMP process. Numerical examples are presented in this dissertation to show such cases.

(2) To avoid false nonlinearity in surrogate data test result, we have proposed an algorithm to generate surrogates for the hypothesis of linear non-Gaussian stochastic process. Based on the concept of power spectrum equivalence, a method to extract the non-Gaussian white noise from the NMP time series is deduced, which is the bottleneck to generate surrogates for such time series. Combining the phase randomized surrogate data test with ARMA surrogate data test, we can test the nonlinearity of time series reliably.

(3) With the IAAFT surrogates based on phase randomization and ARMA surrogates proposed in this dissertation, the observed vibration data sets with broad spectrum are tested. All the results indicate that they were generated by nonlinear dynamical system.

4. The algorithms for the numerical estimation of correlation dimension (D_2) and maxim Lyapunov exponent (MLE) from time series are discussed. For estimation of D_2 , the GP algorithm and its improvements are summarized and employed. The algorithm to estimate MLE

proposed by Kantz is ameliorated. The D_2 and MLE of the observed data sets are calculated exploiting these algorithms, which indicate that they are chaotic.

5. Pilot study of controlling chaotic vibration in rubbed rotor is discussed at the end of this dissertation. A method using linear quadratic regulator to control chaos (LQR) is proposed based on the OGY method. Because the limitation of transition state and parameter perturbation is considered in the objective function of the LQR, the proposed method is more efficient than OGY. Numerical simulation for comparison is presented.

To sum up, the existence of chaotic vibration in rubbed rotor is confirmed both in numerical analysis and experiments. The methods to control chaos are also discussed. The results in this dissertation are helpful to understand the nonlinear dynamics of rubbed rotor, and useful in its diagnosis. The methods and algorithms about chaotic time series analysis and control may be referenced to dealing with other chaotic systems.

Keywords: Rotor rubbed with stator, Rub-impact forces model, Nonlinear vibration, Chaotic vibration, Phase space reconstruction, Surrogate data test, Chaotic characteristics, Controlling chaos

目 录

摘 要	(i)
-----	-------

第一章 绪 论

1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 机械系统中的非线性与混沌	(2)
1.2.1 碰撞振动系统研究概述	(2)
1.2.2 旋转机械中的非线性与混沌	(4)
1.3 混沌的基本概念和识别方法	(6)
1.3.1 动力系统、吸引子与混沌	(6)
1.3.2 混沌信号初步分析——定性识别方法	(8)
1.3.3 相空间重构及重构参数选择	(10)
1.3.4 时间序列的非线性检验——替代数据法研究现状	(13)
1.3.5 混沌的统计特征——关联维和 Lyapunov 指数	(15)
1.3.6 混沌控制	(16)
1.4 本文研究思路及内容安排	(16)

第二章 转子系统碰摩振动的数值仿真与实验观测

2.1 转定子碰摩模型	(20)
2.1.1 碰摩过程的数学描述	(20)
2.1.2 基于碰摩力的 Jeffcott 转子碰摩模型	(22)