

中图分类号: TM359.9, TB552
学科分类号: 080202

论文编号: 1028701 06-0023
密 级: 公 开

博士学位论文

旋转型行波超声电机若干 关键技术的研究

研究生姓名 曾 劲 松
学科、专业 机械电子工程
研究方 向 超声电机技术
指 导 教 师 赵淳生 教授

南京航空航天大学

研究生院 航空宇航学院

二〇〇六年九月

中图分类号：TM359.9，TB552

学科分类号：080202

论文编号：1028701 06-0023

密 级： 公 开

博士学位论文

旋转型行波超声电机若干 关键技术的研究

国家自然科学基金重点资助项目（No. 50235010）之子课题

博士研究生 曾 劲 松
学科、专业 机械电子工程
研究 方 向 超声电机技术
指 导 教 师 赵淳生 教授

南京航空航天大学

研究生院 航空宇航学院

二〇〇六年九月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Aerospace Engineering

**Study on Some Key Techniques of Traveling
Wave Type Rotary Ultrasonic Motors**

A part of the priority project supported by
the National Natural Science Foundation (No.50235010)

A Dissertation in

Mechanical Electronic Engineering

by

Zeng Jinsong

Advised by

Professor Zhao Chunsheng

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Philosophy

October, 2006

承 诺 书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除了文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本人授权南京航空航天大学可以有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的学位论文在解密后适用本承诺书）

作者签名：曾劲松
日 期：2007.1.8

摘 要

本课题是国家自然科学基金重点项目“超声电机关键技术的基础研究(编号: 50235010)”之子课题, 研究的是旋转型行波超声电机若干关键技术。

旋转型行波超声电机是目前最具有应用前景的一类超声电机, 独特的工作原理使得超声电机具有传统电磁电机无可比拟的优点, 而适合于小(微)型精密装置的驱动和控制。由于超声电机是多学科发展的产物, 其发展历史还不长, 实际应用时还存在许多问题和不足之处。本文以提高超声电机的输出性能、效率、运行可靠性和稳定性等为目的, 在分析超声电机的工作机理的基础上, 分别对超声电机的定子、转子和驱动电源的某些关键技术进行了深入的研究; 初步分析超声电机在实验和使用中所发现的一些非线性现象, 并指出这些非线性因素对超声电机性能的影响, 并着重研究了定、转子之间的接触力引起超声电机定子的非线性振动。主要研究内容和成果概括如下:

1. 分析了旋转型行波超声电机的工作机理, 指出为提高超声电机的输出性能和运行稳定性, 在超声电机设计和加工中应该注意的问题;
2. 通过对超声电机定子的谐响应分析, 研究了压电陶瓷的不同分区极化方式对定子各个模态的激励效果, 并指出为提高超声电机的性能, 应对定子上压电陶瓷采取合理极化分区方式;
3. 通过分析定子环形薄板模态的多样性, 指出超声电机定子在设计时应该避免模态混叠现象, 首次采用灵敏度分析的方法解决定子模态混叠的问题, 并用实验进行了验证;
4. 通过分析超声电机两工作模态频率不一致对超声电机的影响, 首次采用摄动理论结合有限元计算方法, 解决了定子模态频率分离的问题, 并对南京航空航天大学研制的某 TRUM-60 型定子实验, 效果十分明显;
5. 利用多体动力学理论, 结合有限元分析软件, 对柔性转子进行了动力学分析和仿真, 首次得到结论: 柔性转子的模态频率(与定子工作模态相似的那阶模态)在接近并稍小于电机的工作频率时, 电机会有较好的输出性能和运行效率;
6. 根据计算和分析, 进一步证实: 由于柔性转子改善了定、转子接触状况和减小了定、转子间径向的滑移, 从而使超声电机有更好的输出性能和更高的运行效率。

7. 以实验为基础对超声电机定子的导纳特性进行了深入的研究,指出超声电机定子的导纳是随着电机的运行状态而变化的。驱动电源的电感匹配要根据电机的运行状态而定;

8. 以实验为依据,结合理论分析了旋转型行波超声电机中存在的种种非线性现象,阐述了这些非线性因素对超声电机性能的影响,并提出解决这些非线性现象的办法。

关键词: 旋转型行波超声电机, 压电陶瓷, 灵敏度分析, 结构动力修改, 柔性转子, 电路匹配, 非线性振动

ABSTRACT

This dissertation is a part of the National Science Foundation of China Name of Fundamental Studies on Some Key Techniques of Ultrasonic Motor (No.50235010), and the task is to study some key techniques of traveling wave type rotary ultrasonic motors (TRUM).

Traveling wave type rotary ultrasonic motors have broad prospect. Because of the particular working principles, ultrasonic motors have incomparable features to conventional electromagnetic motors and they are suitable for precision driving and control. As TRUM are a broad of transdisciplinary product with a short history of development, they are far from perfect. Aiming at enhancing output abilities, advancing efficiency and reliability of running, and improving speed stability, on the basis of analyzing TRUM work mechanism, the dissertation studies stators, rotors and driving electrical sources; it also analyzes all the non-linear phenomenon in the process of experiments and operations, and the influence imposed by the phenomenon; and especially it studies that contact between stators and rotors cause stators to make non-linear vibration. Main research the contents and result are as follows:

1. The work mechanism of TRUM is analyzed; and the problems, which should be solved in the design and manufacture of TRUM to improve the output abilities and the speed stability, are pointed out.
2. Through the harmonic analyses of the stator vibration, the different responses of various stator modes are researched at the conditions of different piezoelectric ceramic partition modes and polarization modes; and the result shows the partition modes and polarization modes should be appropriate in order to enhance the manufacture of TRUM.
3. Because of multiform of stator ring disk modes, the modal mixture must be avoided in the process of design stators; then the problem of modal mixture is firstly resolved by the method of sensitivity analyses, and which is confirmed

by experiment.

4. TRUM' operation is affected by the two unequal modal frequencies, so the problem is resolved in a creative way by combining the structural perturbation and finite element method at the first time, by this way, after a TRUM-60 stator with two unequal modal frequencies fabricated by Nanjing University of Aeronautics and Astronautics modified, the result is satisfactory.
5. TRUM with the flex-rotor is made dynamic simulation by the means of multi-body dynamics theory and finite element software. In conclusion, both the output characteristic and operation efficiency of TRUM are improved if rotors' modal frequency (similar to stators working modal) is a little lower than the working frequency of the TRUM.
6. According to the computation and analysis, it is firmly proved that the output characteristic and operation efficiency are better because flex-rotor improves the contact condition and decreases radial slip between the stator and the rotor.
7. The conductance of stator is different when TRUM operation in different conditions by experiment, so the inductance matched for the driving electrical source should be decided by TRUM operation circumstance.
8. By experiment, various nonlinear phenomenon in TRUM are analyzed; then the phenomenon affect TRUM characteristics and the ways solve the effect are pointed.

Key words: traveling wave type rotary ultrasonic motor (TRUM), piezoelectric ceramics, sensitivity analyses, structural dynamic modification, flexible rotor, circuit match, non-linear vibration

注 释 表

符号	含义
TRUM	行波超声电机 (Traveling Wave Ultrasonic motor)
B_{nm}	圆环型薄板结构 n 个节圆 m 条节径的横向弯曲振动模态
$\varphi_{SA}(r, \theta)$	定子薄板横向弯曲模态 A 的振型函数
$\varphi_{SB}(r, \theta)$	定子薄板横向弯曲模态 B 的振型函数
$R_{nmS}(r)$	定子横向弯曲 B_{nm} 模态振型沿半径方向的垂直于中面的位移分布函数
$q_{0mSA}(t)$	定子 B_{0m} A 相模态所对应的响应
$q_{0mSB}(t)$	定子 B_{0m} B 相模态所对应的响应
W_{0mSA}	定子 B_{0m} A 相模态振动对应的振动幅值
W_{0mSB}	定子 B_{0m} B 相模态振动对应的振动幅值
ω	激励频率
w_S	定子上质点的轴向位移
u_{S0}	定子中性面上质点三个方向的位移矩阵
φ_{Smech}	定子中性面的振型矩阵
q_S	定子的模态坐标相量
u_S	定子上质点三个方向的位移矩阵
Φ_{Smech}	整个定子内的振型矩阵
L_{mid}	薄板中性面到位移场的符号运算矩阵
L_{Su}	中性面仅仅只有轴向位移时 L_{mid} 的简化符号运算矩阵
L_{Ss}	柱坐标系下位移场到应变场的符号运算矩阵
σ_p	压电陶瓷内的应力矩阵
C_p	压电陶瓷在等电场条件下的弹性系数矩阵
e	压电陶瓷的压电矩阵
E	施加给压电陶瓷的电场
σ_e	定子弹性体的应力矩阵
C_e	定子弹性体的弹性系数矩阵
$\dot{u}_S$	定子内的速度场

ρ_e	定子弹性体的密度
ρ_p	定子上压电陶瓷的密度
V_{Sp}	定子振动时的变形能
T_{SK}	定子振动时的动能
M_{nmSA}	定子的 B_{nm} A 相模态的模态质量
K_{nmSA}	定子的 B_{nm} A 相模态的模态刚度
F_{nmpA}	压电陶瓷对 B_{nm} A 相模态的模态力
M_{nmSB}	定子的 B_{nm} B 相模态的模态质量
K_{nmSB}	定子的 B_{nm} B 相模态的模态刚度
F_{nmpB}	压电陶瓷对 B_{nm} B 相模态的模态力
K	有限元法划分单元后组装的总体刚度阵
M	有限元法划分单元后组装的总体质量阵
C_{nmSA}	B_{nm} A 相模态的粘性阻尼系数
ζ_{nmSA}	B_{nm} A 相模态的阻尼比
C_{nmSB}	B_{nm} B 相模态的粘性阻尼系数
ζ_{nmSB}	B_{nm} B 相模态的阻尼比
f_n	定、转子接触界面上的法向接触力
f_τ	定、转子接触界面上的切向摩擦力
$ $	表示取向量的长度
k_n	摩擦层的等效分布式弹簧刚度系数
d	摩擦层的接触变形量
μ_d	定、转子接触界面的动摩擦系数
μ_s	定、转子接触界面的静摩擦系数
$f_{r\theta}$	定、转子间摩擦力沿周向的分量
f_{rr}	定、转子间摩擦力沿径向的分量
u_R	电机运行时转子的位移场
$\dot{u}_R$	电机运行时转子的速度场
$\bar{h}$	定、转子没有振动时的摩擦材料的预压量
β	转子的刚体角位移
A	在固连坐标系到全局惯性坐标系下的坐标变换矩阵
$\bar{A}_{RP}$	在固连坐标系下柱坐标到笛卡尔坐标的标变换矩阵
$\bar{\Phi}_{Rmech}$	转子弹性振动所对应的两相似的正交基

q_R	转子弹性振动 $\bar{\Phi}_{Rmech}$ 对应的响应
T_{RK}	转子的动能
M_R	转子的广义质量矩阵
J_R	转子对转轴的转动惯量
m_{R1}, m_{R2}	转子两正交基 $\bar{\Phi}_{Rmech}$ 对应的广义质量
U_{Rp}	转子的势能
S_R	转子的应变场
L_{Rs}	转子的位移场到应变场的算子矩阵
c_R	转子材料的弹性系数矩阵
E_R	转子材料的杨氏模量
μ_R	转子材料的泊松比
s_c	定、转子的接触面积
F_n	定、转子间的预压力
A_R	在惯性坐标系下柱坐标到笛卡尔坐标的标变换矩阵
F_{Rint}	定、转子间的接触界面力
T_{load}	电机的负载力矩
Q_R	转子受到的广义力
C_R	转子的粘性阻尼系数矩阵
Θ_{09}	压电陶瓷对定子 B_{09} 模态的力系数
U_s	驱动电源施加在定子上的电压幅值
C_{d09}	压电陶瓷的静态电容
C_{m09}	等效电路中的动态电容
R_{m09}	等效电路中的动态电阻
L_{m09}	等效电路中的动态电感
R_{d09}	等效电路中的并联电阻
ω_{09s}	定子的模态频率
ω_{09r}	自由定子的导纳谐振频率
ω_{09h}	自由定子的导纳反谐振频率
ω_{09p}	等效电路中的并联谐振频率
Y_{09}	自由定子 B_{09} 模态附近的导纳
(x_c, y_c)	自由定子导纳圆的圆心坐标
R	自由定子导纳圆半径 R

L_p	采用并联匹配电路匹配的电感
L_s	采用串联匹配电路匹配的电感
Y	电机工作时定子的导纳
$\text{Im}(Y)$	表示对导纳 Y 取虚部
U_0	驱动电源的输出电压（匹配电感前的电压）
R_0	驱动电源的输出内阻抗
S_p	压电陶瓷内的应变场
α_1 、 α_2	非线性压电常数
θ_0	转子上波峰位置的周向坐标

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 超声电机的发展历史	1
1.3 超声电机的特点以及应用	3
1.3.1 超声电机的特点	3
1.3.2 超声电机的应用	4
1.4 超声电机目前存在的不足以及研究现状	5
1.5 本课题研究的目的是主要内容	8
第二章 旋转型行波超声电机工作机理及各部件的设计要求	11
2.1 旋转型行波超声电机的结构和运动机理	11
2.2 定子主要作用以及设计时应该注意的问题	12
2.2.1 旋转型行波超声电机定子同频正交弯曲模态及行波的形成	13
2.2.2 定子设计加工应该注意的问题	15
2.3 转子主要作用以及设计时应该注意的问题	16
2.3.1 定子表面质点的椭圆运动和动力传递机理	16
2.3.2 超声电机中转子设计应注意的问题	20
2.4 超声电机驱动电源的主要作用以及设计要求	21
2.5 超声电机系统的非线性因素和超声电机定子的非线性振动	23
2.6 本章小结	24
第三章 旋转型行波超声电机定子关键技术	25
3.1 引言	25
3.2 压电陶瓷的分区极化和激振力的分布	26
3.3 超声电机定子的模态分离	33
3.3.1 模态混叠对超声电机定子振动的影响	33
3.3.2 解决模态混叠的方法	34
3.3.2.1 旋转型行波超声电机定子的模态频率的灵敏度分析	35
3.3.2.2 解决模态混叠的实际例子	38
3.4 超声电机定子的两相模态频率一致性调节	39

3.4.1 模态频率不一致对定子振动及其表面质点运动的影响	40
3.4.2 超声电机定子模态频率一致性的调节方法	41
3.4.3 模态频率一致性调节的例子	44
3.5 超声电机定子设计中应该注意的其他问题	45
3.6 本章小结	47
第四章 旋转型行波超声电机柔性转子的分析与设计	48
4.1 引言	48
4.2 定、转子接触界面的受力分析及其动力传递	49
4.3 柔性转子的动力学仿真	54
4.3.1 柔性转子的几何描述	54
4.3.2 基于柔性转子的旋转型行波超声电机的动力学仿真	57
4.3.2.1 柔性转子的动能	57
4.3.2.2 柔性转子的势能	58
4.3.2.3 柔性转子广义力的计算	59
4.3.2.4 基于柔性转子的旋转型行波超声电机的动力学求解	60
4.3.3 转子的柔性对电机性能的影响	62
4.4 刚性转子与柔性转子研究的对比分析	65
4.4.1 刚、柔两种转子与定子接触状况对比	66
4.4.2 刚、柔两种转子对电机输出力矩和电机运行效率的影响	67
4.5 超声电机转子设计、加工以及装配中应该注意的其他问题	68
4.6 本章小结	69
第五章 超声电机驱动电源电路匹配	71
5.1 超声电机定子电学导纳特性与其动态特性的关系	71
5.2 超声电机在不同运行状态时定子的导纳特性	75
5.3 匹配电路对电机定子电学特性的影响	78
5.4 驱动电源的电感匹配	81
5.5 驱动电源设计中其他应注意的问题	83
5.6 本章小结	85
第六章 超声电机非线性特性的研究	87
6.1 引言	87
6.2 超声电机中的一些非线性现象浅析	87
6.2.1 压电陶瓷的非线性特性引起的超声电机非线性现象	88

6.2.2 压电陶瓷的温度变化所引起的非线性现象·····	90
6.2.3 由于接触引起的非线性现象·····	91
6.2.4 驱动电路的非线性·····	92
6.3 超声电机定子的非线性振动分析·····	93
6.3.1 超声电机定子的非线性振动求解·····	93
6.3.2 超声电机定子的非线性振动对超声电机性能的影响·····	96
6.4 本章小结·····	99
第七章 全文总结·····	101
7.1 本文的主要工作和贡献·····	101
7.2 进一步研究的课题·····	102
参考文献·····	104
致谢·····	112
在学期间的研究成果及发表的学术论文·····	113
附录 A 定子非线性振动的求解推导·····	114

图 表 清 单

图 1.1 Williams 和 Brown 发明的超声电机	1
图 1.2 超声电机的应用领域	5
图 2.1 行波超声电机的工作机理简图	11
图 2.2 旋转型行波超声电机的结构图	12
图 2.3 旋转型行波超声电机及相应的驱动电源的实物	12
图 2.4 定子结构实体图	12
图 2.5 旋转型行波超声电机的定子简化为圆环板	13
图 2.6 圆环薄板状定子的同频正交弯曲模态	13
图 2.7 旋转型行波超声电机转子结构	16
图 2.8 定子驱动表面质点 Q 的运动轨迹	19
图 2.9 超声电机转子受预压力变形	20
图 2.10 定子表面质点轴向位移和周向速度分布	21
图 2.11 旋转型行波超声电机驱动电路的基本原理	22
图 3.1 传统 TRUM-60 型压电陶瓷极化分区方式	30
图 3.2 TRUM-60 型四相激励超声电机压电陶瓷极化分区和电场施加方式	31
图 3.3 不同极化分区方式施加一相电压时激发出来的驻波	32
图 3.4 两种不同极化分区方式下 TRUM-60 型定子的扫频曲线	33
图 3.5 某型超声电机定子模态混叠时的频率—响应曲线及其振型分析	34
图 3.6 典型的旋转型行波超声电机定子结构	37
图 3.7 某型超声电机定子 B_{07} 及其附近模态频率对结构参数的灵敏度	37
图 3.8 某型超声电机定子模态频率分离后的频率—响应曲线及其振型分析	39
图 3.9 两相模态频率不一致时的扫频结果	39
图 3.10 定子两相振幅不相等时的波形和质点的运动轨迹	41
图 3.11 B_{09} 模态下 $K'_{B_{09}S} - \omega_{B_{09}S}^2 M'_{B_{09}S}$ 分布	44
图 3.12 频率一致性调节后的超声电机定子	44
图 3.13 频率一致性调节后的超声电机定子扫频曲线	45
图 4.1 定子表面与摩擦层的接触点 Q 处接触力各方向的分布	50

图 4.2 定、转子接触点沿轴向的位移关系	52
图 4.3 定、转子间在接触面上质点的速度和摩擦力方向关系	53
图 4.4 柔性转子描述坐标系统	54
图 4.5 驻坐标与笛卡尔坐标转换示意图	54
图 4.6 定、转子有相似的振型	55
图 4.7 TRUM-60 型超声电机负载特性仿真曲线	62
图 4.8 定、转子在一个波长内质点位移和速度分布	62
图 4.9 转子上质点径向速度幅值及定、转子波形 相位差与转子模态频率的关系	63
图 4.10 不同模态频率转子一个波长接触面内的摩擦力在不同方向的分布	64
图 4.11 不同模态频率转子电机的输出性能和效率曲线	65
图 4.12 刚性转子的超声电机结构	65
图 4.13 定子模态振型的径向分布	66
图 4.14 刚性转子时，定、转子接触状态	66
图 4.15 柔性转子时，定、转子接触状态	66
图 4.16 刚柔两种转子接触面一个波长内摩擦力不同方向的分布	67
图 4.17 刚柔两种转子的超声电机输出特性和效率比较	67
图 4.18 因振动剧烈而破坏的柔性转子	68
图 4.19 粘贴阻尼材料前后转子的振动响应测试结果	68
图 5.1 不计压电陶瓷损耗的定子等效电路	73
图 5.2 考虑压电陶瓷损耗的定子等效电路	73
图 5.3 超声电机自由定子的导纳圆	73
图 5.4 自由定子导纳测试结果及等效电路模拟导纳曲线	74
图 5.5 界面模态力与模态坐标的相位关系	76
图 5.6 超声电机在不同运行状态导纳测试平台	76
图 5.7 两种电压施加方式下定子的导纳特性	77
图 5.8 不同负载下定子的导纳特性	78
图 5.9 超声电机电感匹配方式	79
图 5.10 考虑驱动电源内阻抗时的超声电机电路	80
图 5.11 定子输入电压与驱动电源输出电压幅值比和相位差	80