

99年停办一年

南京航空航天大学
第二届研究生学术会议

论文集



南京航空航天大学校团委
主办 南京航空航天大学研究生部
南京航空航天大学研究生会

二〇〇〇年六月·江苏南京

南京航空航天大学
第二届研究生学术会议

论文集



南京航空航天大学校团委
主办 南京航空航天大学研究生部
南京航空航天大学研究生会

二〇〇〇年六月·江苏南京



校长兼党委书记姜澄宇教授

为南京航空航天大学第二届研究生学术会议题词

勇攀科学高峰
开创美好未来

姜澄宇

二〇〇〇年六月

南京航空航天大学第二届研究生学术会议

论文评审专家组

(以姓氏笔划为序)

于盛林	王志瑾	云乃彰	王从庆	叶文华
孙文宾	左敦稳	刘毅	阮新波	刘春生
刘建业	许宗泽	江可申	刘益平	朱冰静
刘颖范	江国华	沈梦山	张宏绍	张曾锟
张堃元	陆宇平	吴宁	张丽艳	陈文亮
杜世海	林钧海	周燕飞	周春华	周来水
周建江	杨晓明	郭海丁	姜长生	聂宏
夏云程	夏健	徐家文	徐国跃	徐志伟
奚杭生	高航	游有鹏	盛松柏	黄金泉
龚春英	龚华军	黄圣国	黄翔	蒋福根
温卫东	焦连渤	傅铅生	楼佩煌	翟建军
潘军	戴嘉尊			

南京航空航天大学第八届研究生会

南京航空航天大学第二届研究生学术会议组委会

二〇〇〇年六月

前 言

伴随着这本优秀论文集的诞生，经过数月组织和筹备的“南京航空航天大学第二届研究生学术会议”终于顺利召开了！本届会议主题是“投身国防科技建设，活跃校园学术气氛”。会议由校研究生部、校团委、校研究生会主办，校研究生会具体承办，江苏天正计算机科技有限公司提供赞助。

在此，我们要感谢学校各级领导和广大研究生热情参与和大力支持以及广大评审老师的辛勤劳动，谨向他们表示最崇高的敬意！

二十一世纪是科学技术突飞猛进的时代，是知识更新和技术创新的时代。青年在科技创新体系中是关键，是核心，是我国增强综合国力、实现现代化的重要力量之一，高校研究生教育担负着培养素质全面和建设未来社会高级人才的重任。开展广泛的课外科技学术活动可以激发广大研究生从事科研活动的热情，扩大在校研究生之间的交流，鼓励跨学科和跨专业的交流与合作，活跃校园学术氛围，促进科技教育与经济的紧密结合以及高校科技成果向现实生产力转化的重要方式和手段。在此过程中高校研究生会责无旁贷地担负起在新世纪建设有中国特色社会主义的历史重任，要为广大研究生提供展示自我的舞台，为他们营造良好的学术氛围。因此，在学校各级领导的指导、关心和支持下，我们一直把活跃研究生的学术氛围、推动课外学术活动作为我们的一贯工作中心，并进行了一系列的卓有成效的探索和努力。

本次学术会议是新世纪南航研究生首次大规模的学术交流活动，我们寄希望于在弘扬“团结、俭朴、唯实、创新”的校训基础上，通过本次学术会议的召开，进一步将勇于攀登科学高峰、敢于创新、敢于突破自我的精神在广大研究生中广为传播，并借此促进各学科各专业之间的交流与合作，实现校际之间的优势互补，使我校研究生的课外学术活动有效地开展下去。

最后，敬请各位老师、同学不吝赐教、指正！

南京航空航天大学第八届研究生会
南京航空航天大学第二届研究生学术会议组委会

二〇〇〇年六月

目 录

旋转驻波型超声电机摩擦界面的数学模型.....	苏鹤玲(1)
飞机环境控制系统的现状与未来.....	苏向辉(8)
纤维增强树脂基复合材料的剩余刚度研究进展.....	翟红军(13)
F-22战斗机的特点分析和三维外形重建.....	刘万博(19)
冷藏柜的降噪.....	刘俊标(24)
复杂型面零件精加工中投影法的研究与实现.....	周 强(28)
锯齿形状桨尖旋翼气动特性试验研究.....	陆 洋(32)
科学计算与 GUI 用户界面设计的统一	
——使用混合编程和动态连接库.....	夏 浩(36)
基于 Euler 方程的跨音速翼型优化设计 IFGA 研究.....	隋洪涛(40)
航空发动机加速任务试车的综述.....	李宗成(45)
CFM56-3 发动机 MEC 可靠性分析.....	卜继兴(50)
一种埋入式进气道的设计方法.....	刘少永(55)
基于 BP 神经网络的结构优化设计综述.....	路志峰(60)
发动机实时优化技术研究.....	熊 智(65)
轴对称结构形状优化中解析敏度分析方法.....	邓建龙(70)
结构优化中的神经网络与变尺度模拟退火方法.....	马海全(75)
三维喷管内跨声流场的数字模拟.....	王国庆(80)
一种双斜切双压缩面进气道性能的数值模拟.....	谭慧俊(85)
纤维增强复合材料疲劳模型的对比研究.....	齐红宇(90)
基于 GPS/DP 的车辆导航系统.....	张乃镇(95)
SINS/GNSS 组合导航系统方案及实现.....	刘建国(99)
基于全阶磁链观测器的无速度传感器直接转矩控制系统研究.....	李 磊(104)
小波压缩中的误差最优分配算法.....	高 攀(107)
双路并联双管正激电路的研究.....	印 健(112)
OpenGL 在开发对舰导弹的视景环境中的应用.....	徐胜友(117)
基于神经网络的非线性大系统直接自适应分散控制的逆系统方法.....	苏丙未(121)
基于移植技术的无人机建模方案.....	汤 峰(126)
基于非线性逆变换的控制选择器设计.....	高 晖(129)
基于遗传算法的模糊神经网络在动态系统辨识中的应用.....	朱少华(134)
前向神经网络的样本选取方法.....	刘国刚(139)
模糊神经系统的现状与发展.....	卢振芳(143)
利用 VC++ 中的定时器来实现动画主窗口.....	王 云(147)
美无人驾驶飞机飞行品质规范简要评述.....	邓 辉(152)
空中交通管制中轨迹预测的一种相互作用多模型算法.....	刘建国(154)
无人驾驶直升机发动机控制.....	彭召勇(159)
多变量系统解耦和控制增稳系统设计.....	孙海力(164)
基于 ASP/ADO 的 Web 数据库的设计与实现.....	李 伟(169)
SPWM 方波直流环节逆变器的原理分析.....	赵小俭(172)
一类非线性系统的在线鲁棒故障检测.....	汪 芳(176)
峰值电流模式及其控制 IC 应用.....	李维琴(180)
基于模糊控制的自行车目标跟踪技术初探.....	张仁宙(184)
一种新型的适于自驱动同步整流的驱动方案的研究.....	秦海鸿(189)

基于 MultiGin II/Vega 的低空突防三维视景及实时飞行仿真研究与实现.....	王 超 (192)
一种高频软件开关与硬开关逆变器的分析比较.....	顾建平 (197)
曲面拟合在机载数字地图中的应用.....	孙云枫 (200)
模糊 PID 在可编程多轴运动控制系统中的应用.....	周士兵 (204)
导弹攻击区实时计算的研究及实现.....	任清海 (208)
一类非线性大系统的间接自适应分散神经网络控制.....	张 锐 (213)
基于 MCU 控制的视频信号场逆程切换的原理与实现.....	叶文青 (218)
离心试验台控制系统的程序设计.....	姜太平 (222)
宽带高效率 E 类功率放大器的理论与设计.....	黄云新 (227)
一种 DSP 基于的磁悬浮轴承控制系统.....	程志坤 (232)
数字网络电视机顶盒研究.....	陈仁波 (237)
基于 Log-Spiral 变换的 ISAR 自动目标识别.....	陈武棍 (242)
发展中的电铸技术.....	吕益艳 (247)
基于直线电机驱动的凸轮车削伺服刀架系统.....	庄 磊 (251)
选择性电极沉积快速成型法.....	郭海生 (255)
面向 Web 的零件图形格式的转换及特征识别.....	王志海 (258)
决策支持系统的研究现状和发展.....	王 祎 (263)
一种基于 Intranet 的决策支持系统体系结构.....	王 祎 (268)
基于工作流的产品并行开发过程管理技术研究.....	王 进 (272)
VB6 中类的继承性的实现方法.....	李 辉 (276)
基于 ACIS 平台的实体造型技术及其软件开发.....	庞秀峰 (281)
基于 ACIS 的真实感图形显示软件研究与开发.....	杨凤霞 (284)
基于 WEB 技术的航空发动机故障远程诊断系统.....	吴振锋 (288)
基于 C/S 体系结构的库存和销售管理系统.....	崔 英 (293)
用 ARX 开发冲裁模 CAD/CAM 软件.....	李 磊 (297)
数控加工中动态仿真技术综述.....	汪 辰 (300)
截平面法加工刀轨算法的研究与实现.....	王孜孜 (303)
基于截面轮廓数据的光滑曲面拟合.....	蔡炜斌 (307)
X Windows/Motif 下的事件处理与客户间通讯技术探讨.....	陈传飞 (312)
用 CMAC 前馈神经网络实现多关节机器人动力学控制.....	蔡自立 (317)
在 ASP 中实现数据库的可移植性.....	张 华 (322)
飞机租赁研究.....	李文绅 (326)
基于 TCP/IP 协议的内部 EDI 系统中的通讯与加密系统设计与实现.....	喻 瑛 (333)
CS 与 4Cs.....	吴俐萍 (338)
通货紧缩时期我国货币及财政政策的效果分析及对策建议.....	宁 健 (342)
决策树和决策图在多阶段决策中的应用.....	黄孝国 (346)
让消费热起来.....	范华敏 (350)
泰州中学校园网及管理信息系统建设的思考.....	吴新民 (353)
我国企业技术创新的对策研究.....	王福东 (358)
基于小波变换的分形图像编码.....	钱泽伟 (361)
软件复用.....	应艳钦 (365)
动态 ERP 概念模型及其关键技术研究.....	王冰洋 (370)
Windows NT 环境下实时主从容错系统的设计与实现.....	周 波 (375)
基于部件重用的商用医疗保险系统设计实现.....	左银龙 (379)
数学形态学在图像和视频压缩中的应用.....	许 峰 (383)

南京航空航天大学第二届研究生学术会议

基于 Internet/Intranet 和三层结构的信息系统设计和实现方法.....	许 峰 (388)
多处理机的实时动态任务调度.....	许 峰 (393)
COM 组件技术及其应用.....	杨 凯 (397)
Web 应用开发技术综述.....	李 勇 (401)
线程同步技术及其应用.....	钱 涛 (406)
基于 Agent 的机场生产管理系统.....	张瑶新 (410)
浅析 XML 在电子商务中的应用.....	黄 敏 (414)
银行自动回单机软件系统设计与实现.....	李 勇 (419)
银证互连系统的研究与实现.....	王俊芳 (424)
基于 B/S 的网上考试系统的实现.....	刘凤翔 (429)
自蔓延合成内衬陶瓷的改性.....	顾金楼 (433)
HA 生物陶瓷研究进展.....	顾金楼 (436)
不可压 Navier-Stokes 方程的一种 FVE 格式及其软件实现.....	朱 君 (440)
一类矩阵特征值的估计.....	刘秀红 (445)
几种二阶 TVD 格式的精度分析.....	朱明明 (450)
Lagrange 乘子存在性的另一种证明.....	陈晓红 (456)
用 VXD 技术实现文档的保护.....	姚志峰 (461)
空心光纤应用于智能材料断裂测量的研究.....	邱 浩 (464)
基于 Visual C++6.0 的飞机大气数据受感器优化设计软件的开发.....	张红霞 (468)
LabWindows/CVI5.0 中虚拟仪器驱动程序的开发与应用.....	李明齐 (472)
基于 VGA 的反走样线性快速绘制算法.....	胡美叶 (475)
基于 80C196KC 的智能多串口通讯卡的研制.....	江 修 (480)
民航机务 CBT 的研究与初步设计.....	徐艳华 (482)
ACMS 的飞机状态监控新概念.....	曹 霞 (487)
民航机务 CBT 网络的设计与实现.....	徐艳华 (490)
一种带偏置线圈的电磁轴承的研究.....	增学明 (494)

南京大学特邀稿

基于域理论的自适应谐振神经网络研究.....	周志华 (498)
基于遗传算法的模拟退火罚函数方法求解地下水管理模型.....	吴剑峰 (507)

注：特邀南京航空航天大学测试工程系陶宝祺院士为大会做主题报告。

旋转驻波型超声电机摩擦界面的数学模型

苏鹤玲 赵向东 赵淳生

南京航空航天大学 超声电机研究中心 210016

摘要: 本文以旋转驻波型超声电机为研究对象, 首先用假定模态法对驻波型超声电机的定子上的齿的运动状态作了仿真研究, 并进一步在比较了驻波型超声电机与行波型超声电机运动机理的不同的基础上分析了定转子摩擦界面的接触特性, 提出了一种对该类电机具有普适意义的摩擦界面数学模型。

关键词: 超声电机, 假定模态, 摩擦界面, 动态接触

引言

超声电机是一种利用压电陶瓷的逆压电效应, 使定子产生超声波振动, 并通过定、转子间的摩擦界面驱动转子。与传统的电磁电机相比它具有惯性小、响应快、控制特性好、不受磁场影响、断电自锁、低速大扭矩、无齿轮箱等特性。超声电机经过近二十年的研究取得了许多成果, 但尚未建立起一整套完整的理论体系, 其中有两个主要原因: 1. 如何考虑压电陶瓷的机电耦合的复杂性; 2. 如何考虑定转子接触界面的摩擦、磨损的非线性性。超声电机是一种利用摩擦进行驱动的电动机, 故研究压电超声电机的定转子摩擦界面对超声电机的设计及效率提高具有很大意义。

按照超声电机利用的波型的差异可以将超声电机分为行波型、驻波型等。行波型超声电机是所有类型中用途较广泛、发展也较成熟的一种。对行波型超声电机摩擦传动的研究取得了许多成果, 积累了很多经验。但对驻波型超声电机摩擦传动的研究却开展的较少。尽管与行波型超声电机有许多共同点, 驻波型超声电机由于其驱动波型的不同导致其在摩擦驱动方面与行波型超声电机有较大的差异, 这一点会在后面详细讨论。

无论是那一种类型的超声电机都有一个具有共同形式的两阶段能量转换过程。第一阶段: 压电元件将电能转化为定子的机械能, 表现为定子的微观超声波振动; 第二阶段: 定、转子的摩擦界面将定子的微观运动转化为转子的宏观运动来带动负载。

本文首先以旋转驻波型超声电机为研究对象, 通过假定其工作模态的方法分析了其定、转子接触点处的运动形式, 接下来比较了旋转行波型超声电机与旋转驻波型超声电机摩擦界面的异同, 分析了旋转驻波型超声电机定转子摩擦界面的接触特性, 提出了一种适合于驻波型超声电机的摩擦界面数学模型。

1 旋转驻波型超声电机定子上齿的运动轨迹

旋转驻波型超声电机的结构形式与图一所示的结构形式类似, 定子上有齿是驻波型超声电机结构设计中必不可少的一部分, 用来产生驱动力。圆环型薄板的驻波振动方程为:

$$W = R(r) \cdot \sin(n\theta) \sin(\omega t) \quad (1)$$

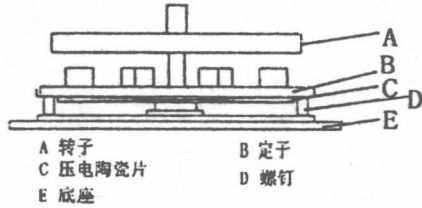
其中 $R(r)$ 为径向振动位移函数, $\sin(n\theta)$ 为周向振动位移函数。假设某一旋转驻波型超声电机的工作模态是 B_{mn} (m 代表节圆数, n 代表节径数), 则定子中性层上任意一点周向切线斜率为:

$$W_{\theta}' = nR(r) \cos(n\theta) \sin(\omega t) \quad (2)$$

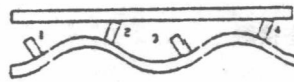
该点的周向法线斜率为:

$$\tan \beta = -\frac{1}{W_{\theta}'} = -\frac{1}{nR(r) \cos(n\theta) \sin(\omega t)} \quad (3)$$

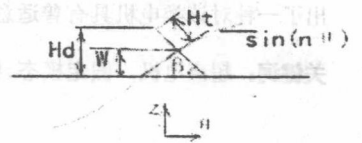
为了形成椭圆运动, 定子上的齿布在节圆位置上, 由定子的径向振动产生齿的纯轴向位移, 由定子的周向振动产生齿的水平位移。定子齿在节圆处的周向展开图如图二 a 所示。



图一 驻波超声电机结构图



图二 a 定子齿周向展开图



图二 b 齿在任意时刻的位置

根据 Kirchoff 假设, 齿高为 H 的齿在任意时刻的摆角 (见图二 b) 为:

$$\beta = \arctg \frac{-1}{nR_{\max} \cos(n\theta) \sin(\omega \cdot t)} \quad (4)$$

齿的水平摆动位移为:

$$S_h = (H_i + \frac{t_s}{2}) \cos \beta \quad (5)$$

齿的轴向位移为:

$$S_v = W + (H_i + \frac{t_s}{2})(1 - \sin \beta) \quad (6)$$

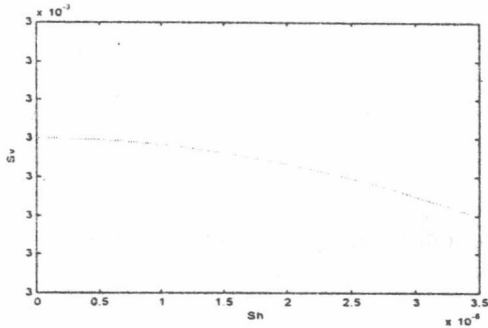
齿的运动轨迹满足椭圆方程:

$$\left(\frac{S_h}{H_i + t_s/2}\right)^2 + \left(\frac{S_v - W - H_i - t_s/2}{H_i + t_s/2}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

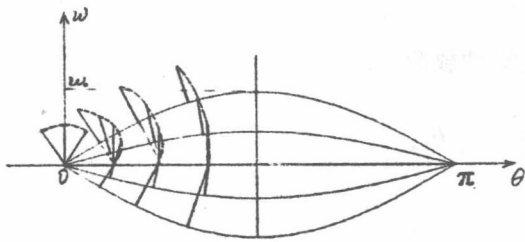
这样齿在将转子顶起的同时拨动转子旋转。由于 W 是时间的函数, 齿端质点的运动轨迹为半径为 $H_i + t_s/2$ 变圆心的一族圆的包络线。随着齿周向位置的不同, 齿端质点的轨迹变化如图三。由于齿是周向对称布置, 从图二 a 及图三 b 我们可以看出, 当齿处于节线处时, 相邻的两个齿具有相同的轴向位移, 产生的驱动力互相抵消, 不会驱动转子。当齿是处于波峰处时, 由图三 b, 可知齿只有轴向运动, 不会产生驱动力, 也不可能驱动转子转动。根据齿在周向位置的不同, 得到的齿的水平速度如图四。

齿的水平速度为:

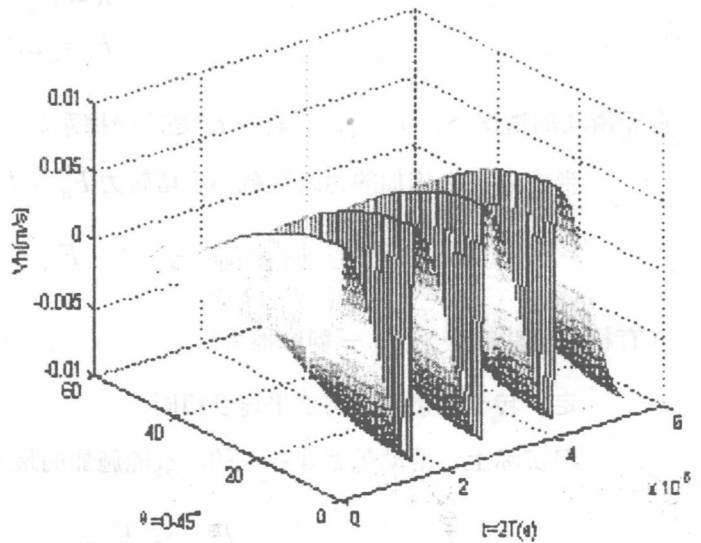
$$V_{sh} = \frac{\partial S_h}{\partial t} \quad (8)$$



图三 a 驻波超声电机定子上齿偏离节线 15° 时的齿端轨迹



图三 b 驻波超声电机齿的轨迹图



图四 齿的水平速度

2 旋转驻波型超声电机定、转子摩擦界面的数学模型

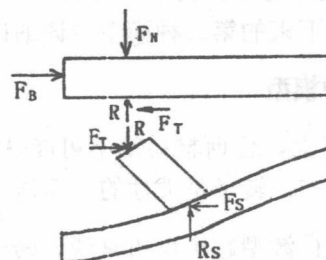
驻波型超声电机与行波型超声电机都是利用接触点的椭圆运动来产生驱动力驱动转子运动的。根据行波波形不随时间变化,而随空间位置变化的特点,我们可以认为行波型超声电机定转子的接触面积及接触形式是不随时间变化的。可是驻波型超声电机定、转子的接触情形却大不一样。由于驻波波形是随时间变化的但具有空间不变性,定子上齿的位置随时间作周期性变化,这样导致与转子接触的齿端的面积也是时间的周期函数。

目前对于定、转子界面分析有三种假定:

- 1) 定、转子均为刚性的,接触区为一条直线,遵守库仑摩擦定律;
- 2) 定子是刚性的,转子是柔性的,以面接触的形式接触,遵守库仑摩擦定律;
- 3) 定子是刚性的,转子是柔性的,以面接触的形式接触,遵守粘性摩擦定律。由于第三种模型非常复杂,对它的研究也不多,下面仅就第一、二种假定进行分析。

2.1 第一种模型

在无滑动的情况下,转子与定子齿端在接触点处的水平速度相等。旋转驻波型超声电机定、转子的接触情况如图二 a。在刚性定转子的假设下,定子上的齿没有弯曲变形,也没有弹性变形,定子与转子的接触区是沿径向,长度为齿的径向长度 b 的直线。受力分析如图五:



图五 受力分析图

$$\begin{aligned} R &= F_N \\ F_T &= \mu R = \mu F_N \end{aligned} \quad (9)$$

在无滑动的情况下, $\mu = \mu_s$, 其中 μ_s 是静摩擦系数。

当在电机上施加的力或负载小于堵转力 F_B (力矩) 时, (静) 摩擦力就会增加与之平衡。

$$F_{TS} = -F_B \quad (10)$$

(有相对运动趋势) F_{TS} —静摩擦力。

定、转子在接触区内水平速度相同。

但实际上, 滑动是客观存在的, 故能施加的最大无滑动载荷为:

$$F_B = F_{TSMAX} = -\mu_s F_N \quad (11)$$

其中, F_{TSMAX} —最大静摩擦力

当相对滑动产生后, 定转子间的摩擦力就变为:

$$F_{TD} = \mu_d F_N \quad (12)$$

其中 μ_d —动摩擦系数

由 (8) 式, 可以得到转子的转速

$$\omega_r = \frac{v_{sh}}{r_p} \quad (13)$$

其中 r_p 为接触点的半径

在有相对滑动的情况下

$$\tau_r = \mu_d F_N r_p \quad (14)$$

由于这种假设是纯理想的情况, 转子的转速与预压力无关, 这显然不符合实际情况, 但是, 由这种模型可得到无负载转速与堵转力矩的上限。

在预压力的作用下, 定转子的接触区内有轴向的弹性变形产生, 因此接触区应是一小面积。这种情况会在接下来的第二种模型中详细讨论。

2.2 第二种模型

事实上, 任何材料都不可能是绝对刚性的, 一般说来定子的刚度比转子的刚度大得多, 所以假设定子是刚性的, 转子是柔性的, 而这种假设更符合实际情况。

对于行波型超声电机来说, 转子将在接触区内服从于定子的变形状态 (定子渗入到转子中), 该接触区由参数 x_0 来描述, 从 $-x_0$ 到 $+x_0$, 定子表面上每一质点的水平速度都不相同。设行波的前进方向为 $+x$

方向, 定、转子的包容区 $0 < x_0 < \lambda/4$ (λ 为波长), 即包容深度 $w_{overlap} < w_0$ (振幅)。定子表面在定转子接触区内的每一质点都有水平速度分量, 只是大小不同而已, 速度的变化从 $x = x_0$ 处的 $v_h = v_{min}$ 到 $x = 0$ 处的 $v_h = v_{max}$ 。但是, 转子却是以单一速度运转的, 该速度将等于定子表面接触点中某些点的水平速度, 在其它点上将存在相对速度, 导致滑动的产生。

在接触界面上的作用力如图六。

法向力 F_N 将导致压力分布 $p(x)$

$$F_N = \int_{-x_0}^{x_0} p(x) dx \quad (15)$$

由库伦摩擦定律:

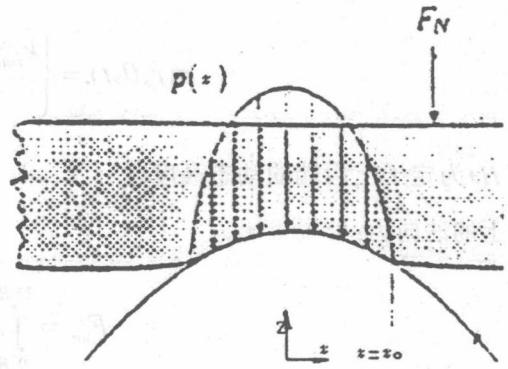
$$F_T = - \int_{-x_0}^{x_0} \frac{\Delta v(x)}{|\Delta v(x)|} \mu_d p(x) dx \quad (16)$$

$$\Delta v(x) = v_{sh} - v_{rh} \quad (17)$$

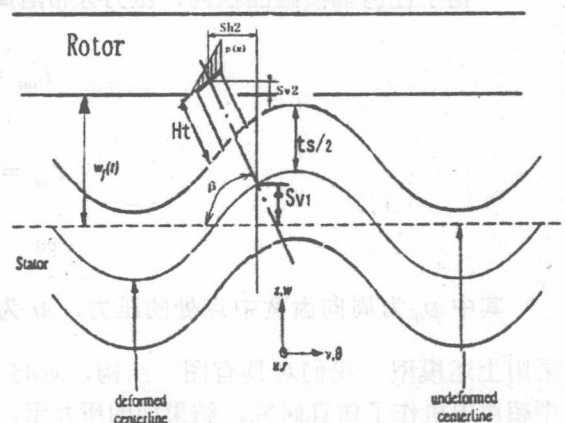
对于驻波型超声电机来说, 由于驻波型超声电机是靠定子上的齿的摆动来产生水平速度, 驱动转子, 在一个驻波波长内, 定、转子的接触只是单齿接触, 驻波型超声电机定转子接触区域比行波型超声电机定转子接触区要小的多。旋转行波型超声电机定转子的接触状态如图六。该图描述了在任意时刻旋转行波型超声电机定转子的接触状态。

有一点可以借鉴: 驻波型超声电机定子上齿的变形与运动状态在一个周期内随时间的变化情况与任意时刻旋转行波型超声电机定子上齿在一个波长范围内随空间位置的变化是大致相同的。但是驻波型超声电机转子转速的动态变化是非常剧烈的, 这是因为驻波型超声电机是以间歇驱动方式驱动转子的, 由于定子的振动频率远远高于转子的轴向振动频率, 当齿把转子顶起来后, 转子的下降速度比齿的下降速度要慢很多, 在一个振动周期内, 只有第一、三个 $T/4$ 是接触驱动的, 每个齿的工作期为 $T/4$, 其余两个 $T/4$ 是处于定转子分离状态。在这里我们要定义一个新的状态变量 w_f 来描述定转子间的弹性距离。由于约束的限制, 它不可能比定子的高度低很多, 但是当它高于定子的动态变形高度时, 定转子处于分离状态。图七描述了驻波型超声电机的定、转子接触状态。

定转子接触界面上存在两种类型的广义力:



图六 行波型超声电机接触界面上的作用力



图七 驻波型超声电机的定转子接触界面

(1) 法向力；(2) 界面扭矩。在这里我们可以把转子看作是一个线性弹簧，得到界面压力。

$$p(r, \theta, t) = \begin{cases} k_{rotor}(w_f - H_d) & w_f < H_d \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

其中 H_d 为定子上齿端的动态高度。

界面上的法向力：

$$F_{int} = \int_0^{2\pi R+tr/2} \int_{R-tr/2} p(r, \theta, t) r dr d\theta \quad (19)$$

界面上的扭矩：

$$\tau_{int} = \int_0^{2\pi R+tr/2} \int_{R-tr/2} \mu_d \text{sign}(r, \theta, t) p(r, \theta, t) r^2 dr d\theta \quad (20)$$

其中

$$\text{sign} = \begin{cases} 1 & |v_{hs}| > |v_{sr}| \\ -1 & |v_{hs}| < |v_{sr}| \end{cases} \quad (21)$$

由力平衡方程，我们得到

$$M_r \ddot{w}_f + C_z \dot{w}_f = F_{int} - F_{applied} \quad (22)$$

其中 M_r 为转子的质量， C_z 为轴向阻尼， $F_{applied}$ 为系统输入的轴向载荷。

定转子的摩擦驱动状态可由图八所示的摩擦机械系统加以简化模拟。由力矩平衡方程，我们得到转动方程：

$$I_r \alpha + C_a \alpha = \tau_{int} - \tau_{applied} \quad (23)$$

其中 $\tau_{applied}$ 为界面扭矩， $\tau_{applied}$ 为外加负载， C_a 为转动阻尼， I_r 为转子的转动惯量。

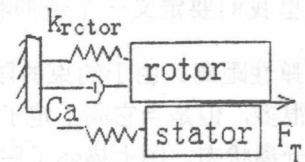
由于在齿端接触面积内，压力分布沿周向齿宽呈线性变化，沿径向均布，可得

$$F_{int} = p_0 A_t \quad (24)$$

$$\tau_{int} = \mu_d F_{int} r \quad (25)$$

其中 p_0 为周向齿宽中点处的压力， A_t 为齿端面积。

采用上述模型，我们对具有图一结构， $\phi 45$ 的旋转驻波型超声电机作了仿真研究，结果如图所九示。



图八 摩擦驱动状态

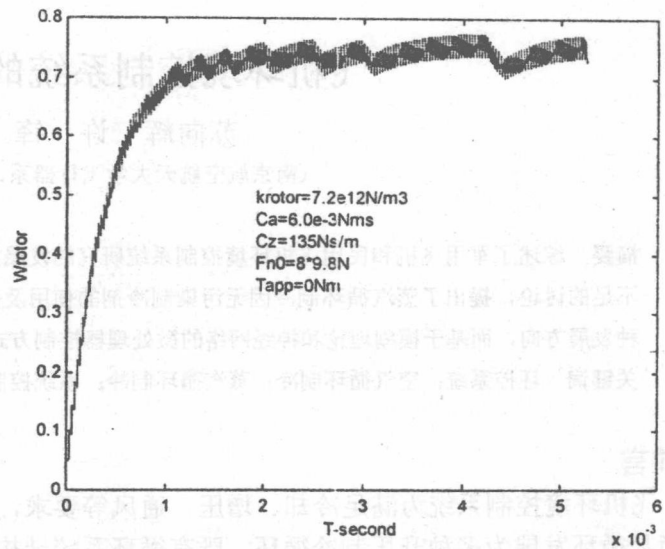
3. 结论

(1) 用假定模态的方法, 证明了旋转驻波型超声电机定子齿端质点曲线运动的存在, 推导了运动方程, 给出了齿端质点的水平速度和运动轨迹:

(2) 描述、分析了旋转行波型超声电机的连续驱动工作方式, 旋转驻波型超声电机的间歇驱动工作方式;

(3) 由全刚性假设的第一种模型得到了最大堵转力(矩);

(4) 由刚性定子柔性转子假设, 在分析行波、驻波型超声电机异同点的基础上, 推导出了适用于驻波型超声电机的摩擦界面数学模型。



图九 旋转驻波型超声电机的转速响应曲线

参考文献

1. Nesbitt W. Hagood and Andrew J. McFarland, Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor, IEEE, Trans, UFFC, Co/3/94.
2. A. M. Flynn, Torque Production in Ultrasonic Motors, MIT, Artificial Intelligence Laboratory, December 13, 1993.
3. Yoshiro Tomikawa, Takehiro Takano, Proceedings of the 7th Meeting on Ferroelectric Materials and Their Applications, Kyoto 1989, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 28 (1989) Supplement 28-2, pp. 198-201.
4. 陈永校, 郭吉丰, 超声波电动机, 浙江大学出版社, 1992.
5. 霍斯特·契可斯, 摩擦学, 机械工业出版社, 1974.
6. 王桂芹, 金龙, 赵淳生, 驻波型超声电机的研究, 压电与生光, 1999.

飞机环境控制系统的现状与未来

苏向辉 许 锋 昂海松

(南京航空航天大学飞行器系, 南京, 210016)

摘要 综述了军用飞机和民用飞机环境控制系统研究的发展历程与前景。通过对各种现有环控系统的优点与不足的讨论, 提出了蒸汽循环制冷因无污染制冷剂的使用及高可靠性的实现, 有可能成为飞机环控系统的一种发展方向, 而基于模糊理论和神经网络的微处理器控制方式的导入, 将改进飞机环控系统的控制性能。

关键词 环控系统; 空气循环制冷; 蒸汽循环制冷; 系统控制

1 前言

飞机环境控制系统为满足冷却、增压、通风等要求, 近年来有了很大的发展。其中空气制冷循环已从简易循环发展为多种升压制冷循环, 既有循环系统结构的改变, 也有系统部件的改进, 以满足各种飞机型号的冷量需要, 提高空调系统的性能。具有突破性的是高压水分离器的研制和使用, 使得空调系统的制冷量有了很大增加, 同时提高了系统的可靠性, 减少了维修次数。其他如: 在某些情况下, 涡轮效率的提高、空气轴承的使用、热交换器设计的改进等, 减轻了系统的重量, 减少了燃油代偿损失。数字电子控制不仅使系统中各子系统可以互相交换数据, 而且使失效诊断及空调系统运行性能更好。

军用飞机电子设备的不断增加, 使其冷却要求已成为环控系统的首要任务, 一旦超出现有系统的制冷能力, 将使电子设备降低可靠性, 因此, 发展新型高效制冷系统、利用燃油作为冷源、使用液体冷却电子设备等技术将在很大程度上提高军用飞机环控系统的性能。采用独立的环控装置, 主要使用蒸汽循环和空气循环两种制冷方式, 对电子设备舱进行冷却。如美国著名的夜间低空导航和瞄准红外系统 Lantirn 即采用蒸汽制冷方式, 其核心部件则为电驱动全封闭叶片旋转活塞式压缩机。

一种分子筛氧气发生器用于军用飞机上, 为驾驶员提供源源不断的氧气, 虽然系统的重量稍有增加, 而且从空气循环系统中引气损失一部分冷量, 但可通过改进发动机初始热交换器的性能而得到恢复。

近年来, 出现了各种制冷循环系统, 但没有一种系统占主导地位, 著名的 737-400 代表了新老技术的结合, 使用了基本的二轮升压空气循环制冷系统, 而空中客车 A330/A340、Fokker F-100 和 Tupolev 240 使用了三轮升压空气循环制冷系统, 且装备了空气轴承、高压水分离器和不同类型的控制器。

新的波音 777 的制冷系统中使用了四轮升压循环即冷凝循环, 系统中使用了高压水分离器, 空气调节和座舱温度控制由数据信息通路完成。与二轮、三轮循环不同的是, 冷凝循环增加了第二级涡轮, 冷凝器位于两级涡轮之间, 第一级涡轮出来的冷空气先用来冷凝来自压缩机的空气, 再进入第二级涡轮, 低温空气由第二级涡轮产生, 故第一级涡轮出口温度不低于零度, 防止冷凝器结冰。同时使得效率比三轮循环的效率。

Kim Linnett 和 Ronald Crabtree^[2]对二轮、三轮、四轮循环进行了比较, 结果表明, 在相同的基础上设计时, 三轮循环制冷系统与四轮循环制冷系统的重量几乎相同, 而二轮循环制冷系统较轻, 如图 1 中所示, 该图比较了系统主要组成部件的重量, 包括空气循环部件、热交换器、冷凝器、二轮循环系统中的涡轮风扇, 其余部件(阀门、传感器、电机、水分离器、控制器)对所有系统几乎是相同的重量, 二轮循环中主要是空气循环机械最轻, 但它需要 APU 驱动冷却风扇。

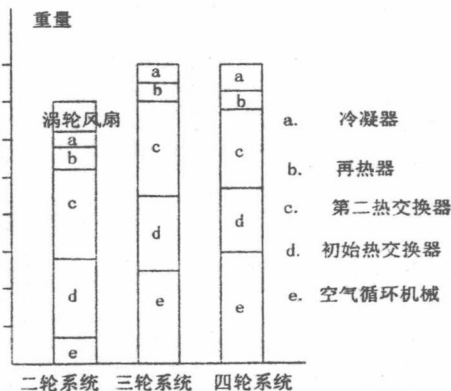


图 1. 三种循环系统主要组成部件比较

2 系统的改进

现在的飞机都是在原有机型的基础上进行改进,

民用飞机增加机身的长度或宽度, 军用飞机则增加一些电子设备或武器, 因此, 空调系统主要根据增加的热载荷和不同的发动机类型进行改进, 并不希望增加油耗和重量。

2.1 高压水分离器代替了低压水分离器

电子设备舱的冷却能力受制于空气流量和供气温度, 最大空气流量取决于冷却涡轮的喷嘴面积, 最小供气温度取决于水分离器的除水能力。如图 2 中 a、b 分别为 F-15 使用的低压水分离器 and 高压水分离器空气流程图:

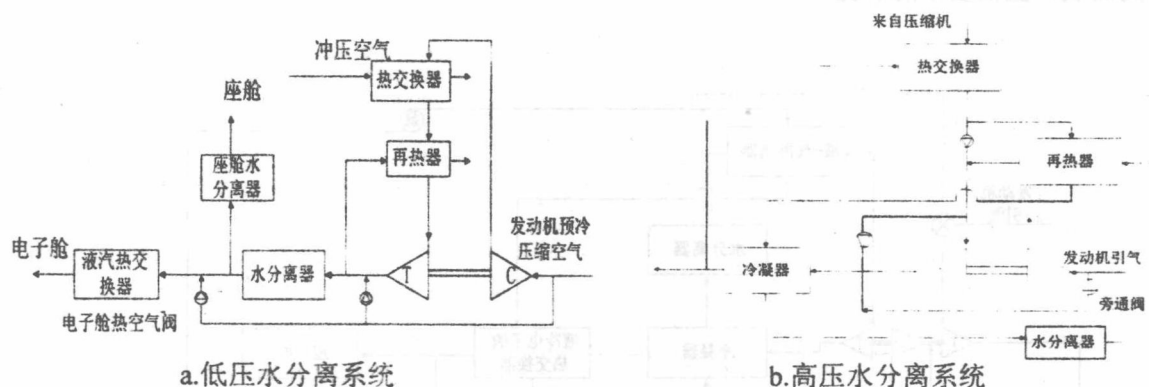


图 2. 分别用于 F-15 的高、低压水分离系统

在低压水分离器中, 气流要保持在 0°C 以上, 防止水分离器冰塞, 气流的冷却能力是有限的。

高压水分离器首次用于 Bell Huey Cobra 直升机上, 在 McDonnell/Northrop F-18 上得到进一步发展。之后, 波音 757、767 也采用了高压水分离器。如图所示, 冷凝水在涡轮冷却器的高压部分被分离。在冷凝器中, 气流被冷却到露点以下, 冷凝水被惯性地分离后, 干空气被再加热, 进入涡轮。再加热器在很大程度上恢复了因分离过程失去的热动力效率, 同时可防止冷凝器冷边结冰。

使用高压水分离器的空气制冷循环, 其排气温度不受限制, 因此, 空气制冷循环系统设计可供气温度接近 -18°C , 每公斤空气增加了双倍的冷却能力, 冷却座舱的气流量因此减少了 50%, 进一步节省了燃油。

此外, 对于军用飞机来说, 如 F-15, 高压水分离器的使用增加了制冷量, 使得经过电子舱的温度下降, 从而增加了可靠性。由于在高压水分离器中不使用纤维凝聚袋, 因此不需要定期更换, 维修次数减少。

2.2 系统控制

早期飞机的制冷系统和座舱温度由电磁放大器和电动阀控制, 流量由气动控制。随着电子技术的发展, 在 DC-10、A300 和其他飞机上, 压缩空气温度由电子气动阀来控制, 在 DC-10 上还增加了温度和压力传感器, 提供智能控制, 并监视系统的正常运行。

在一些宽体客机客舱的不同地方, 温度可以单独选择和控制在, 晶体模拟电子控制器从固态温度传感器得到输入, 并发射信号到电子气动阀。

80 年代, 微电子技术对空调系统的控制能力产生了主要影响, 控制软件的改进使控制能力和灵敏度有了很大提高, 从飞机数据库中可获得更多的控制器信息, 这一数据库也允许控制器提供数据到驾驶舱显示器, 控制器也能对所有系统零件起到监控作用, 一个零件出现故障时, 不是关闭它, 而是由控制器决定一个最好的方式重定控制功能绕过或减小故障, 这一自动功能代替了监控空调系统功能的飞行机械师的工作。例如, 如果一个空气制冷循环系统出现故障, 控制器可自动把系统置于“热交换器冷凝模式”, 使气流绕过空气制冷循环系统, 直接通过热传递在主热交换器中冷却, 冲压空气在高空温度足够低, 能提供所需的冷量, 所以可维持座舱温度和流量而不使用制冷循环。甚至当冲压空气不够冷时, 剩下的没有发生故障的制冷装置也可以提供附加的制冷量来补偿故障引起的冷量损失, 这种模式已用于 A340。

随着数字式控制技术的飞速发展, 在先进的军用和民用飞机上已采用综合数字式控制系统, 即把环控系统各子系统在功能上和结构上综合起来, 并通过数据总线与飞机其它系统综合, 充分发挥新技术的