

航空宇航学院

0135~014~015 系

5

航空宇航学院

第五分册

航空宇航学院

013 系

014 系

015 系

航空宇航学院2006年学术论文清单（0135）

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	赵淳生	教授	0135	对发展我国超声电机技术的若干建议	微电机	2006. 39. 02
2	赵淳生 杨 淋	教授 博士	0135 0135	人造肌肉及其在未来微特电机中的应用	微特电机	2006. . 10
3	金家楣 赵淳生	博士 教授	0135 0135	A vibrators alternation stepping ultrasonic motor	Ultrasonics	2006. . 44
4	金家楣 赵淳生	博士 教授	0135 0135	Linear Stepping Ultrasonic Motor	3 rd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators, IWPMA 2006	2006
5	金家楣 赵淳生	博士 教授	0135 0135	Characteristic Matching between Stator and Rotor in standing-wave- type Ultrasonic Motors	3 rd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators, IWPMA 2006	2006
6	金家楣 赵淳生	博士 教授	0135 0135	双模态切换式步进超声电机	南京航空航天大学学报	2006. 38. 05
7	朱 华 董迎晖 马相林 赵淳生	博士 博士 博士 教授	0135 外校 0135 0135	New Rod-Shaped Ultrasonic Micromotor and Its Driving Principle	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2006. 23. 01
8	朱 华 贺红林 陈志华 赵淳生	博士 副教授 副教授 教授	0135 0135 外校 0135	超声电机测控系统的一种实现方法	传感器与微系统	2006. 25. 07
9	郑 伟 赵淳生	博士 教授	0135 0135	旋转型行波超声电机寿命试验研究	第十一届中国小电机技术研讨会	2006. 11. 15-17
10	郑 伟 赵淳生	博士 教授	0135 0135	旋转型行波超声电机磨损机理研究	第十一届中国小电机技术研讨会	2006. 11. 15-17
11	季 叶 赵淳生	博士 教授	0135 0135	一种具有高转速的新型非接触式超声电机	压电与声光	2006. 28. 05
12	时运来 赵淳生	博士 教授	0135 0135	声表面波电机的研究	第十一届中国小电机技术研讨会	2006. 11. 15-17
13	祖家奎 赵淳生	博士 教授	03 0135	超声电机定子的驱动方式及其振动响应特性	压电与声光	2006. 28. 01
14	苏 娜 芦 丹 赵淳生	硕士 硕士 教授	0135 0135 0135	超声电机在真空环境下的负载特性试验研究	振动、测试与诊断	2006. 26. 02
15	顾文波 黄卫清	硕士 教授	0135 0135	基于超声电机的目标识别与跟踪系统	振动、测试与诊断	2006. 26. 增
16	展凤江 黄卫清 赵淳生	硕士 教授 教授	0135 0135 0135	圆柱-球体三自由度超声电机模糊自适应控制	压电与声光	2006. 28. 05
17	蔡铖尧 黄卫清	硕士 教授	0135 0135	基于USB通讯的超声电机控制设计	振动、测试与诊断	2006. 26. 增
18	袁又春 黄卫清 赵淳生	硕士 教授 教授	0135 0135 0135	收缩/扩张管型无阀压电泵泵腔流体仿真	第十一届中国小电机技术研讨会	2006. 11. 15-17
19	苏艳文 黄卫清	硕士 教授	0135 0135	一种基于矩形薄板面内振动的新型直线超声电机	第十一届中国小电机技术研讨会	2006. 11. 15-17
20	白永明 纪跃波 黄卫清	硕士 博士后 教授	0135 0135 0135	激光多普勒面内振动测试系统	第十一届中国小电机技术研讨会	2006. 11. 15-17
21	李玉宝 杨 颖 赵淳生	硕士 副教授 教授	0135 0135 0135	新型铁电单晶及其在超声电机上的应用发展	第十一届中国小电机技术研讨会	2006. 11. 15-17
22	曾劲松 姚志远 赵淳生	博士 副教授 教授	0135 0135 0135	超声电机中的非线性现象研究	中国机械工程	2006. 17. 10

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
23	李华峰 赵淳生 辜承林	副教授 教授 教授	0135 0135 外校	Study on the driving model of ultrasonic motor	Journal of Electrical & Electronics Engineering	2006. 06. 01
24	陈 超 曾劲松 赵淳生	讲师 博士 教授	0135 0135 0135	旋转型行波超声电机理论模型的仿真研究	振动与冲击	2006. 25. 02
25	陈 超 赵淳生	讲师 教授	0135 0135	旋转型行波超声电机中三维接触机理的研究	中国电机工程学报	2006. 26. 21
26	陈 超 曾劲松 赵淳生	讲师 博士 教授	0135 0135 0135	行波超声电机动力学模型	机械工程学报	2006. 42. 12
27	陈 超	讲师	0135	Dynamic Analysis of Composite Stator of Ultrasonic Motor Based on Substructure Interface Loading Theory	IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2006)	2006. 12
28	曾劲松 陈 超 赵淳生	博士 讲师 教授	0135 0135 0135	解决超声电机定子模态混叠的有效方法	压电与声光	2006. 28. 06
29	曾劲松 陈 超 赵淳生	博士 讲师 教授	0135 0135 0135	旋转型行波超声电机定子模态频率的一致性调节	南京航空航天大学学报	2006. 38. 05
30	朱 华 陈 超 赵淳生	硕士 讲师 教授	0135 0135 0135	一种微型柱体超声电机的研究	中国电机工程学报	2006. 26. 12
31	纪跃波 赵淳生	博士后 教授	0135 0135	超声波电动机面内振动模态试验测试系统	机械工程学报	2006. 42. 02
32	纪跃波 赵淳生 秦树人	博士后 教授	0135 0135 外校	基于通用计算机的超声电机试验用激励信号	重庆大学学报(自然科学版)	2006. 29. 01
33	纪跃波	博士后	0135	小波包的频率顺序	振动与冲击	2005. 24. 03
34	贺红林 赵淳生	博士后 教授	0135 0135	超声电机驱动的机器人的模糊神经网络控制	压电与声光	2006. 28. 02
35	贺红林 朱 华 赵淳生	博士后 硕士 教授	0135 0135 0135	超声电机基于模糊-PI技术的位置控制	机械科学与技术	2006. 25. 05

航空宇航学院2006年学术论文清单（014）

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	王忠伟 孙中原 宋保银	硕士 硕士 教授	014 014 014	微槽平板热管性能分析	2006年中国航学学会人体工程、航医、救生专业分会第七届学术年会	2006. 08
2	马良军 张中刚 宋保银	硕士 硕士 教授	014 014 014	人椅系统气动特性数值模拟	2006年中国航学学会人体工程、航医、救生专业分会第七届学术年会	2006. 08
3	方贤德	教授	014	缩短气动减速技术的研究及其进展	2006年中国宇航学会还回与再入专业委员会学术年会	2006. 12. 11-14
4	方贤德 苏向辉	教授 副教授	014 014	近空间平台飞艇热分析、仿真设计和电力系统研究	2006年临近空间飞行器系统及应用技术研讨会	2006. 11. 29
5	方贤德 苏向辉	教授 副教授	014 014	平流层飞艇的热分析	2006年中国浮空器学术年会	2006. 10. 25-26
6	方贤德	教授	014	循环再生式环境控制系统（RRECS）	2006年中国航学学会人体工程、航医、救生专业分会第七届学术年会	2006. 08
7	朱高涛 刘卫华	硕士 教授	014 014	微型热管技术的研究现状与发展	制冷与空调	2006. 06. 02
8	朱高涛 刘卫华	硕士 教授	014 014	迷宫密封泄漏量计算方法的分析	润滑与密封	2006. 00. 04
9	朱高涛 刘卫华 孟翔宇 刘 猛	硕士 教授	014 014	迷宫式压缩机的泄漏特性分析	流体机械	2006. 34. 10
10	刘 巍 蒋福根	硕士 高工	014 014	一种测定高压状态下水分离器分水效率的方法	大众科技	2006. 00. 07
11	朱春玲 胡宗尉	副教授	014	吊舱发电系统涵道式冲压空气涡轮叶片性能的研究	航空学报	2006. 27. 02
12	郭 涛 朱春玲	硕士 副教授	014 014	恒电压式热式质量流量计的研究	中国仪器仪表	2006. 00. 11
13	杨汉华 朱春玲	硕士 副教授	014 014	某飞机特种设备舱温度控制系统设计	中国科技信息	2006. 00. 22
14	秦保军 朱春玲	硕士 副教授	014 014	肋片管换热器管外三维流动与传热的数值模拟	暖通空调	2006. 36. 11
15	芦 丹 郑 伟 朱春玲 赵淳生	博士 博士 副教授 教授	0135 0135 014 0135	Testing Study on Ultrasonic Motors under Abnormal Environment	3rd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators, IWPM 2006	2006
16	李 倩 孙建红	硕士 副教授	014 014	网阵结构对变压吸附装置性能的影响	低温与特气	2006. 24. 05
17	曾克思 余 刚 蒋彦龙	硕士 副教授 副教授	014 014 014	等离子体NO _x 脱除技术概述	能源研究与利用	2006. 00. 04
18	蒋彦龙	副教授	014	脉管制冷机中的直流流动	世界科技研究与发展	2006. 28. 05
19	蒋彦龙 陈国邦 余 刚	副教授 教授 副教授	014 外校 014	双向进气结构脉管制冷机直流形成机理	南京航空航天大学学报	2006. 38. 02
20	曹业玲 郭宪民 高 晖	中级 副教授 硕士	014 外校 014	机载蒸发循环制冷系统板翅式蒸发器换热特性	南京航空航天大学学报	2006. 38. 02
21	余 莉 明 晓 胡 斌	副教授 教授	014 012 外校	降落伞开伞过程的试验研究	南京航空航天大学学报	2006. 38. 02
22	余 莉 蒋彦龙 李 萍	副教授 副教授 讲师	014 014 外校	电子设备用冷板散热特性的二维数值模拟	南京航空航天大学学报	2006. 38. 04

航空宇航学院2006年学术论文清单（015）

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	余红发 孙 伟 张云升 黄东升	教授 院士 副教授 教授	015 外校 外校 015	膨胀剂和纤维及其复合对混凝土抗冻性的影响	南京航空航天大学学报	2006. 38. 02
2	余红发 刘俊龙 李美丹 翁智财 陈浩宇	教授 副教授 硕士 硕士 硕士	015 外校 外校 外校 外校	FRHPC在冻融与腐蚀共同作用下的强度变化	沈阳建筑大学学报(自然科学版)	2006. 22. 02
3	余红发 孙 伟 李美丹	教授 院士 硕士	015 外校 外校	混凝土在化学腐蚀和冻融循环共同作用下的强度变化	沈阳建筑大学学报(自然科学版)	2006. 22. 04
4	余红发 孙 伟 金祖权 刘建忠	教授 院士 博士 博士	015 外校 外校 外校	重大土木工程结构混凝土寿命预测的一种新方法——损伤演化方程	混凝土结构耐久性科技论坛	2006. 11. 23-25
5	余红发 孙 伟	教授 院士	015 外校	混凝土氯离子扩散理论模型	混凝土结构耐久性科技论坛	2006. 11. 23-25
6	王甲春 余红发 阎培渝	博士后 教授 教授	015 015 外校	混凝土结构早龄期开裂的预测	混凝土结构耐久性科技论坛	2006. 11. 23-25
7	陈浩宇 余红发 李美丹 刘连新 翁智财 蒋宏伟	硕士 教授 教授 硕士 教授 硕士 讲师	015 015 外校 外校 外校 外校 外校	高强高性能混凝土在沈阳除冰盐环境下的氯离子扩散行为	混凝土	2006. . 01
8	翁智财 余红发 孙 伟 张金花 陈浩宇	硕士 教授 院士 硕士 硕士	外校 015 外校 外校 外校	水灰比与水泥用量对混凝土Cl ⁻ 结合能力的影响	武汉理工大学学报	2006. 28. 03
9	李美丹 余红发 张 伟 张建业 燕 坤	硕士 教授 硕士 硕士 硕士	外校 015 015 015 015	纤维与膨胀剂对大掺量矿物掺合料混凝土塑性收缩开裂的影响	青海大学学报	2006. 24. 06
10	王珊珊 艾 军 周克印 田裕鹏 王 军	硕士 教授 教授 副教授 副教授	015 015 0133 033 外单位	粘钢加固质量红外检测的图像处理	四川建筑科学研究	2006. 32. 03
11	黄文浩 艾 军 田裕鹏 周克印 董 军	硕士 教授 副教授 教授 教授	015 015 033 0133 外校	粘钢加固结构钢板粘贴质量的检测新方法	建筑技术	2006. 37. 06
12	黄东升 刘世美 华新钰 刘俊龙 艾 军	教授 教授 教授 教授 教授	015 外单位 015 外单位 015	FREE VIBRATION ANALYSIS OF SHEAR WALLS WITH SHORT PIERS	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronau	2006. 23. 03
13	高培伟 吴胜兴 林萍华 吴中如 唐明述	副教授 教授 教授 教授 教授	015 外校 外校 外校 外校	Effect of Fly Ash on Deformation of Roller-Compacted Concrete	ACI Materials Journal,	2006. 105. 05

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
14	高培伟 卢小琳 闫亚楠 董 波 李小燕	副教授 讲师 硕士 硕士 硕士	015 06 015 015 015	Effect of composite mineral admixtures on restraining alkali-silica reaction	Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2006. 23. 02
15	高培伟 卢小琳 唐明述	副教授 讲师 教授	015 06 外校	膨胀剂对混凝土变形性能的影响	南京航空航天大学学报	2006. 38. 02
16	李小燕 高培伟 林 晖 陈卫峰 侯 捷	硕士 副教授 硕士 硕士 硕士	015 015 015 015 015	聚丙烯纤维对机场道面砟性能的影响	公路与汽运	2006. 117. 06
17	李小燕 高培伟	硕士 副教授	015 015	机场道面开裂机理及控制技术的研究	江苏建材	2006. . 02
18	董 波 高培伟 闫亚楠 乐建新	硕士 副教授 硕士 硕士	015 015 015 015	具有电磁屏蔽功能的新型建筑材料研究	广东建材	2006. . 11
19	侯 捷 高培伟	硕士 副教授	015 015	水泥混凝土高速公路的发展前景	建材发展导向	23(5), 2006
20	乐建新 闫亚楠 李小燕 高培伟	硕士 硕士 硕士 副教授	015 015 015 015	微生物对混凝土的侵蚀机理及其控制的研究	江苏建材	2006. . 03
21	林 晖 侯 捷 高培伟	硕士 硕士 副教授	015 015 015	砟研究中的现代纳米技术	水泥工程	2006. . 01
22	高培伟	副教授	015	非萘系减水剂和复合超细粉对高性能混凝土渗透性的影响	土木工程学报	2006. 39. 01
23	高培伟	副教授	015	含膨胀剂的碾压混凝土抗硫酸盐侵蚀机理与理论模型	水力发电学报	2006. 25. 01
24	高培伟	副教授	015	Sulfate and frost resistance of mass hydraulic concrete	Key Engineering Materials	2006. 302-303
25	高培伟	副教授	015	The characteristics of air void and frost resistance of RCC with fly ash and expansive agent	Construction and Building Materials	2006. 20. 08
26	石 长 赵新铭	硕士 副教授	015 015	用有限元强度折减法分析边坡稳定	隧道建设	2006. 26. 03
27	欧日强 赵新铭 吴 瑾	硕士 副教授 教授	015 015 015	预应力碳纤维布加固RC梁抗弯性能研究	隧道建设	2006. 26. 02
28	张小平 施 斌	副教授	015	石灰改性膨胀土团聚体的试验研究	工程勘察	2006. 00. 05
29	张小平 胡明亮 吴庆令 谢仁军	副教授 硕士 硕士	015 外单位 015 015	南京地区典型失稳基坑分析及预警系统的探讨	岩土工程学报	2006. 00. S1
31	张海英 张雪华 肖 鹏	硕士 副研究员	015 015	某二级路稀浆封层混合料配合比设计	交通标准化	2006. 00. Z1
32	杨 杰 艾 军 黄东升 戈 立	讲师 教授 教授	015 015 015 外校	研究型大学土木工程专业人才培养模式之探索	高等建筑教育	2006. 15. 02
33	杨 杰 李爱群 缪长青	讲师 教授	015 外校 外校	BP神经网络在大跨斜拉桥的斜拉索损伤识别中的应用	土木工程学报	2006. 39. 05
34	杨 杰 李爱群 缪长青	讲师 教授	015 外校 外校	大跨斜拉桥动力特性的主元特征提取	东南大学学报（自然科学版）	2006. 36. 04
35	张丽芳 郭 涛 吴文涛 叶见曙	讲师	015 外单位 外单位 外单位	旧桥拓宽中拼接方式对旧桥受力状态的影响分析	公路交通科技	2006. 23. 02

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
36	吴 强 程文灏	讲师 教授	015 外校	水平力下板柱结构等代梁等效宽度系数的研究	南京航空航天大学学报	2006. 38. 02
37	吴 强 程文灏	讲师 教授	015 外校	边梁对板柱结构侧向刚度影响的研究	建筑结构	2006. 36. 02
38	吴 强 程文灏	讲师 教授	015 外校	板柱结构中柱节点抗震性能的试验研究	地震工程与工程振动	2006. 26. 04
39	季天剑 安景峰 何申明 李春雷	讲师	015 外校 外校 外校	Depth Prediction of Rain Water on Road Surface Based on Artificial Neural Network	Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2006. 23. 02
40	程 晔 艾 军	讲师 教授	015 015	土木工程专业基础工程课程设计的实践与改革探索	高等建筑教育	2006. 15. 03
41	程 晔 龚维明 艾 军 戴国亮	讲师 教授 教授 副教授	015 外校 015 外校	南宁泥岩扩底桩承载性能研究	建筑结构	2006. 36. 10
42	高俊启 施 斌 张 巍 朱 虹	讲师 教授 副教授 讲师	015 外校 外校 外校	Monitoring the stress of the post-tensioning cable using fiber optic distributed strain sensor	Measurement	2006. 39. 05
43	唐 敢 王法武	讲师 讲师	015 015	Research on imperfection sensitive region of single-layer latticed domes	Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2006. 23. 04
44	唐 敢 赵惠麟 郭小明	讲师 教授 教授	015 外校 外校	板片空间结构缺陷敏感区域	东南大学学报（自然科学版）	2006. 36. 06
45	夏逸鸣 王小乾	讲师	015	钢框架-RC剪力墙高层建筑结构的弹塑性全过程分析	土木工程学报	2006. 39. 02
46	夏逸鸣 姜逸山 王小乾	讲师	015	楼板对高层钢框架-R.C剪力墙结构性能的影响	南京航空航天大学学报	2006. 38. 02
47	解建光	讲师	015	在专业课教学中培养学生的学习兴趣和学习技能——“机场规划设计”教学实践与思考	南京航空航天大学学报（社科）	2006. 08. 01
48	王知乐 解建光	硕士 讲师	015 015	关于新规范中沥青路面压实度测评方法的比较	江苏建材	2006. 00. 04
49	耿 飞 解建光 樊建平 卞大保	助工 讲师	015 015	路用纤维提高沥青混凝土性能的试验研究	现代交通技术	2006. 00. 02
50	耿 飞 秦鸿根 金志强	助工	015	再生修补型路用混凝土的试验研究	公路	2006. 00. 01

对发展我国超声电机技术的若干建议

赵淳生

(南京航空航天大学超声电机研究中心, 南京 210016)

摘要: 该文简要叙述了超声电机技术发展的国内外概况, 重点介绍了南京航空航天大学超声电机研究中心为发展我国超声电机技术所作的努力。针对我国超声电机技术研究的现状, 作者提出加速发展我国超声电机技术的若干建议。

关键词: 超声电机; 压电陶瓷; 行波; 表面声波; 建议

Some Proposals for Development of Ultrasonic Motor Techniques in China

ZHAO Chun-Sheng

(Research Center of Ultrasonic Motors, NUAA, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: This paper described the development of ultrasonic motor techniques at home and abroad. The author mainly introduces that the Research Center of Ultrasonic Motors at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics made an effort to develop the ultrasonic motor techniques in China. According to the actual condition of theory, manufacture, experiment and material for motors in China, the author put forward some proposals for development of ultrasonic motor techniques in China.

KEY WORDS: Ultrasonic motor; Piezoelectric ceramics; Traveling wave; Surface acoustic wave; Proposals

0 引言

1999 年 5 月在国家自然科学基金委员会的支持和委托下, 在南京航空航天大学召开了首次全国超声电机技术研讨会。来自全国 30 多个单位的 70 多位代表出席了会议。国家自然科学基金委员会工程与材料学部电工学科主任黄斐梨教授在会上作了重要讲话。她认为: 面对着日本和世界超声电机发展形势, 我们不能消极等待使用别国的产品, 要把握住现在, 积极发展我国拥有自主知识产权的超声电机。我们有能力、有信心赶上世界超声电机技术发展的步伐, 跟踪这一世界前沿高新技术。她表示, 国家自然科学基金将加大对超声电机技术的资助力度, 以加快我国超声电机技术发展的步伐。

在这次大会后, 国家自然科学基金委员会工程和材料学部机械学科与电工学科共同设立了重点基金资助项目《超声电机关键技术的基础研究》, 再次动员和激励了全国科学技术人员向超声电机技术进军。

最近, 南京航空航天大学超声电机研究中心的

“新型超声电机技术”项目获得了国家技术发明二等奖。黄卫清教授代表本研究中心, 3 月 28 日在人民大会堂, 在中共中央、国务院隆重举行的国家科学技术奖励大会上, 受到党和国家领导人胡锦涛、温家宝、曾庆红、黄菊、李长春等的授奖。这不仅是对南京航空航天大学超声电机研究中心全体人员的奖赏和鼓励, 也是对我国所有从事超声电机技术人员的奖赏和鼓励。

1 超声电机在国外的发展

国外超声电机技术在 20 世纪 80 年代以来得到了迅速的发展和应用^[1]。日本一直处于世界领先地位。它掌握着世界上大多数超声电机技术发明专利。在日本, 几乎各知名大学都对超声电机进行了研究。超声电机的主要开发和生产厂家有佳能、FU KOKU、A SUMO、精工仪器、佳能精机、新生工业、京瓷、奥林巴斯光学工业、MITSUBA 等。图 1 是日本超声电机研发情况。图 2 是日本各公司超声电机的市场占有金额。图 3 是应用的主要领域。

20 世纪末和新世纪初, 中国、美国、德国、法国、英国和全世界一些发达国家都开始了超声电机的研究。现在, 除了日本之外, 美国、德国、法国、中国、瑞

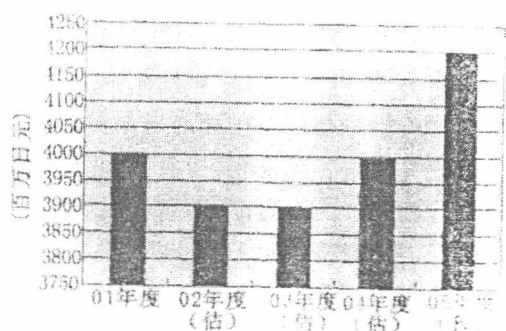


图1 日本超声电机市场规模的发展和预期

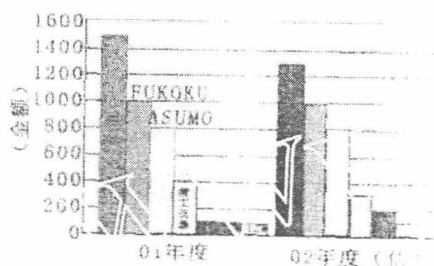


图2 日本各公司超声电机在市场的占有金额

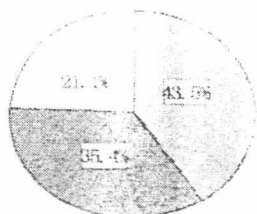


图3 日本超声电机在主要领域的应用情况

士、南韩、土耳其、新加坡等都有超声电机产品进入市场。在这些国家中，尤以美国发展得最快，应用的领域也最广。作者1992-1994在美国作访问学者时，还只有麻省理工学院(MIT)刚开始研究超声电机，可在10年后再到美国访问时，发现超声电机技术不仅在高等学校遍地开花，一些名牌大学，如Stanford、Berkeley、Wisconsin、Penn State等都投入很多力量研究超声电机。一些国防部门，如NASA、JPL和DARPA (Defense Advanced Research Project Agency)等都投入很多人力物力从事超声电机的研究。美国某些公司生产的超声电机产品已经在航空航天、半导体工业、MEMS和BioMEMS等领域先后得到应用。

国外超声电机的发展，归纳起来有以下几个主要特点。

1) 大力提高超声电机使用寿命

由于超声电机是靠摩擦耦合来传递力矩，摩擦

界面的磨损和疲劳是不可避免的。这就大大限制了超声电机的应用。目前超声电机仍仅应用于一些间隙工作场合；如照相机的聚焦系统，累计时间寿命只有10多个小时；汽车窗门开关和座椅头靠调整装置，累计时间寿命只有500个小时。最近2年，日本Canon公司将行波超声电机应用于彩色复印机^[2]，累计时间寿命达3000小时以上。某些应用场合还要求更长的累计时间寿命，甚至期望超声电机能连续地长时间运转。为此，世界各国都在研制新型磨擦材料，不断改进超声电机的设计、加工和装配工艺，以提高超声电机的使用寿命。以日本Shinsei公司超声电机产品为例，近10年来最大改进就是摩擦材料，包括摩擦材料的成分、粘涂方法和粘涂位置等。其结果是寿命和效率都有提高。

2) 研究超声电机对环境工作条件的适应性

近年来对宇宙的探测表明，星际运行有许多特点：运行周期为24小时37分23秒；平均加速度为 3725m/s^2 (约为 $380g$)；夏天在南半球上空，气温为 $-63^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ ；冬天在南极上空，气温达 -100°C ；平均大气压为 5.6mb 。针对这种复杂的环境条件，美国NASA和JPL，对超声电机在高/低温和真空环境下进行了大量的试验^[3]研究。日本Shinsei公司USR-30超声电机，在 -80°C 和 25mTorr 的环境条件下(Cryovac conditions)，经过67小时运转损坏试验。在此试验的基础上，NASA/JPL研制出一种SRPD型超声电机，采取了一些特殊措施。在Cryovac环境条件下，运行了336小时后(在 -80°C 和 25mTorr 下工作65小时后，又在 -150°C 低温和 16mTorr 下工作271小时)运行，具有很好的Cryovac特性。尽管在转速和力矩方面都有大幅度降低，但它仍然能够很好地运转。

当然，要得到超声电机良好的低温特性，除了改善胶接材料和胶接技术之外，就是提高压电陶瓷材料的低温性能。一般情况下压电陶瓷只能在 $-40^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 下工作。最近研究表明，单晶体压电陶瓷具有良好的低温特性。原清华大学董蜀湘博士发展一种用单晶体 $(\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3)$ 做的小型直线压电低温超声电机，能在 -200°C 低温工作，且其工作频率能保持和常态环境下的相近^[4]。

3) 微小型超声电机和集成式超声电机

国外超声电机发展的另一个特点，从大到小，从小型到微型，从微型到集成式。特别值得注意的是，

美国为了发展空间的反导弹、反卫星及情报侦察系统,近几年将要发射100个以上的纳米卫星(质量7-8kg)。这种纳米卫星的核心技术之一是微机械和微传感系统,包括微传感/遥感器、微陀螺、微驱动器。为此,美国正加倍发展微型超声电机(直径仅1-2mm)。美国Penn State大学所研发的微型超声电机,正在被应用于手机和医疗器械。

日本Epson公司发展了一种厚度为0.4mm超薄型超声电机。力矩要比传统的电磁电机大得多。该电机曾在2002年11月Micromachine展览会上展出过。最近该公司又利用这种超薄型超声电机,研制了一种微型机器人Monsieur II-P,体积 7.8cm^3 ,重量12.5g,两边装有轮子,其移动速度达到 150mm/s 。

最值得人们注意的是韩国三星公司将微型超声电机应用于手机照相系统。

4) 直线型超声电机的迅速发展

近年来超声电机从旋转型(提供旋转运动和力矩)发展到直线型(提供直线运动和力)^[5]。这种直线型电机除具有超声电机的一般特点外,加上它不再需要通过滚珠丝杠将旋转运动和力矩转换成直线运动和推力,所以,它还具有结构简单,体积小,重量轻,定位精度高的优点。法国Cedrat Technology公司直线型超声电机在法国的人造卫星Heks上已得到应用。

由于直线型超声电机的位置控制精度很高,可达微米级,甚至纳米级^[6]。目前,世界各国都在竞相发展基于压电型直线电机的定位系统^[7](简称压电型定位系统)。美国Nanomotion公司HR系列压电型直线电机做成的定位系统,具有分辨率100nm,定位精度 $0.25\mu\text{m}$,最大速度 200mm/sec 。德国PI公司最近推出的定位系统,采用层叠式压电型直线电机驱动,高度26.5mm,速度 130mm/s ,行程50mm,定位精度达50纳米级,一体化的驱动控制器,可承受10G的加速度,可在真空度 10^{-8}Pa 的状态下工作。

值得注意的是,东京工业大学M. K. Kurosawa教授,自90年代以来长期从事表面声波超声电机(Surface Acoustic Wave Motor, SAWM)的研究,目前已经达到应用的阶段,工作频率10MHz-100MHz,体积 $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 3\text{mm}$ 。作为步进电机的步距可达亚纳米级(0.5nm)^[8],每一步的响应时间为0.2ms。

5) 超声电机与生物医学工程、微机电系统相结合

超声电机技术正在与生物医学工程、微机电系统相结合^[9]。21世纪是生命科学的世纪。当前在生物医学领域研究的主要问题之一,要寻求微小的、能长期(over time)运行的动力源(如超声电机、压电泵等),将药物及时而准确送到人体。

现代生物医学工程研究中,要经常对细胞进行一系列试验,如植物细胞的染色体切割、细胞融合、动物卵细胞转基因注射和人工受精等。完成这些试验,就需要非常准确的定位和十分微细的操作。在细胞试验研究的初期,实验人员在显微镜下,用手工操作来完成,对进行此类操作的医务人员的技术水平要求很高,一般要经过至少一年以上的专业培训,而且实验的成败与实验人员的情绪以及周围的环境因素关系很大,成功率不超过5%^[10]。近些年来,科学家们一直在研究自动化的微操作系统来代替手工操作器^[11]。随着科学的发展,这种自动化微操作系统越来越完善。例如,在基因移植和人工受精的操作过程中,将一微小吸管插入细胞是不可缺少的一项操作。当采用基于水压作动器的老式细胞微操作系统时,由于细胞膜的弹性,使整个细胞发生很大的变形,以致对细胞结构造成损伤。最近日本T. Higuchi等人在实验室,利用基于压电型冲击式直线电机的纳米定位技术和图像处理技术,研制出一套自动化细胞微穿刺操作系统^[12]。采用这套系统对同样细胞进行穿刺时,细胞变形就大大减小。

国际上现在约有42000种药物可以杀死癌细胞,但它们对人体都有不同程度的毒副作用。如果用它们来治疗癌症,在杀死癌细胞的同时,还会杀死病人的正常细胞。精确定位(控制)和引导这些治癌药物进入癌细胞,使之仅仅杀死病人的癌细胞,而不致于伤害患者的正常细胞,一直是癌症治疗专家们和患者梦寐以求的目标。微小而精密的表面声波超声电机的研制成功给癌症专家们实现这一目标提供了有效工具。

2 超声电机技术在国内研究的状况

我国超声电机研究的起步和美、德、法、南韩等国差不多。自“首次全国超声电机技术研讨会”后,超声电机更受到各方面的关注,特别是得到国家自然科学基金会和863高技术专家组的大力支持和资助。我国的超声电机技术得到较快的发展,正在朝产业化、商品化的道路上迅速迈进。

3 对发展我国超声电机技术的建议

1) 继续扩大研究队伍和研究单位

“科技的灵魂在创新,科技的活力在改革,科技的根本在人才。”现有几十个单位在研究超声电机,还远远不够,而且每个单位研究人员又很少。多数研究者和单位都限于研究超声电机的运动机理和数学模型,涉及超声电机一些关键技术研究得较少;生产单位就更少了。这是不正常的现象。要知道,传统的电磁电机,世界上有多少单位、多少人员在研究,在生产呀!在日本几乎所有大学都有一帮人在研究超声电机。在美国也有越来越多的大学生和研究超声电机。我希望我国也掀起研究、生产和应用超声电机的新热潮。

2) 大力推广和应用超声电机技术

“解决我国经济社会发展中的突出问题,根本要靠科技进步和创新。要通过科技创新,促进产业结构优化升级,提高经济增长的质量和效益……”。研究超声电机的根本目的在于应用。只要有应用,有市场,这种研究才有意义,才有生命力。不能满足于写几篇文章,申请几个专利,而是要把产品做出来,应用到工程上去。当前搞推广应用研究的人员太少。这种高技术产品,人们不了解,不想用,不敢用。我们不仅要宣传,要引导,而且还要示范,要针对具体工程来设计和应用超声电机。

3) 积极开展国内技术合作和交流

在国内的合作交流仍然太少,还需要办学习班、研讨班和单位之间的互相合作和交流。我们已和清华大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、吉林大学、华中科技大学、山东大学、山东科技大学、上海大学、福州大学等高等学校建立了很好的协作关系。我们也和中科院声学所、上海硅酸盐研究所、西安微电机研究所、中电科技集团21所等单位有密切的联系。我们还和一些公司有合作关系,如广州兰天超声电机技术公司、江苏海鹰集团公司、常州宏华电子有限公司等。在这里,我们也向曾经给予我们支持和指导的所有这些单位的同行们、专家们表示衷心感谢。我们非常珍惜和这些单位的合作和交流。我们要放眼世界,要打入国际市场,就要加强我们国内合作和交流,进一步扩大我们的合作单位和队伍。几年来,我们自行研制和购置了大量仪器设备,能基本满足当

前超声电机的各种试验。我们欢迎全国从事超声电机技术的研究者前来使用和进一步开发。

此外,要联合起来,组织起来,要向国家自然科学基金、国家863高技术争取重大项目,要在国家中、长期计划中列入超声电机研究项目。

5) 走向世界,加强国际技术合作和交流

最近,德国Paderborn大学教授、国际著名的超声电机技术专家J. Wallaschek关于在德国召开“第二届国际压电材料及其在作动器上的应用研讨会(WPMA)”的建议书中有段话:“压电驱动器的机械和电的能量转化过程的建模是一个很重要的研究领域。通过它,使很多交叉学科的最新研究成果得到综合的应用。基于宽广的知识领域和广阔的发展前景。这个领域的深入发展只有依靠国际间合作才有可能,因为各种专业知识都没有集中在某一地域或某一个国家。”“近年来中国也涌现了越来越多的超声电机研究小组,但很遗憾的是,由于语言问题,他们的研究成果在国际上还很少被了解。”

这一段说明:当今世界国际合作多么重要!各国的科学家们都非常重视开展国际合作。WPMA国际研讨会也就是基于这个目标召开的。第二段话是对中国超声电机研究的评价。最近,我国超声电机技术进展确实很快,可是国际上不了解,因为我们参加国际会议少,国际杂志上投的文章少(这里特别提出的是,清华大学做得较好,向国外杂志投稿多,我们要向清华学习!),产品尚未进入国际市场。总之,国际上听不到或很少听到我们中国超声电机的声音。

本中心近6年也在注意与国际接轨。例如,2003年10月IEEE在美国Hawaii召开超声学会议上,我们投了4篇文章,后因美国签证太迟,未去人,文章在论文集上刊登了。2004年8月IEEE在加拿大召开的UF&FC第50届年会上,我们投了4篇文章,李华峰博士参加了会议,4篇文章全入论文集。今年5月在德国举行的WPMA会议,我国共投13篇文章,其中本中心有8篇。德国举办会议的Paderborn大学对我非常友好,十分欢迎中国学者参加这次会议。在国家自然科学基金委员会的支持下,我们已组织一个7人的代表团将参加WPMA会议。在这会上,我要向大会报告“超声电机技术在中国的发展和运用”,要向全世界展示中国超声电机研究和应用所取得的信心和决心。只有这样,我国超声电机技术才能真正进入国内市场,才能真正在国际上占有一席之地!。

(下转第96页)

(上接第67 页)

参考文献

- [1] 赵淳生 面向21 世纪超声电机技术的研究[J] 中国工程科学, 2002, 4(2): 86- 91
- [2] 渡边智 用于数字彩色复印机的超声电机[R] Canon 公司技术报告, 2002: 31- 35
- [3] Shyh - shiuh L ih, Yoseph Bar - Cohen, Willem Grandia Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Waves[J] SPIE, 2004, 3041: 912- 917
- [4] Shuxiang Dong, Li Yan, Naigang Wang, and Dwight Viehland A small, linear, piezoelectric ultrasonic cryomotor[J] Applied Physics Letters 2005
- [5] 许海, 赵淳生 直线型超声电机的发展及应用[J] 中国机械工程, 2003, 14(8): 715- 717
- [6] B. Zhang and Z. Zhu Developing a linear piezomotor with nanometer resolution and high stiffness[J] IEEE Trans Mechatron , 1997, 22- 29
- [7] Ken Higuchi Automatic micro manipulation system for cell manipulation [Http://www. ntellect Pe u- tokyo. ac jp/ research/manipulator/manipulator_ e html](http://www.ntellect-peu-tokyo.ac.jp/research/manipulator/manipulator_e.html)
- [8] T. Shigematsu, M. Kurosawa, and K. Asai Sub-nanometer stepping drive of surface acoustic ultrasonic motor[J] IEEE Int Conf Nanotechnology, San Francisco, CA, 2003
- [9] Ilene Schneider Microtools for Medicine[J] Genetic Engineering News, 2003, 23(12): 68- 69
- [10] B. J. Nelson, Yu Sun Microbotics and MEMS Technology for Biological Cell Research [J] Robotics and Machine Perception, 2002: 7- 13
- [11] Y. Sun, B. J. Nelson Autonomous Injection of Biological Cells Using Visual Servoing, Int'l Symp. On Experimental Robotics (ISER 2000): 175- 184
- [12] T. Higuchi Automatic Micro Manipulation System for Cell Manipulation

作者简介: 赵淳生, 男, 教授, 博导, 中国科学院院士, 从事超声电机研究。

人造肌肉及其在未来微特电机中的应用

赵淳生, 杨 淋

(南京航空航天大学, 江苏南京 210016)

Artificial Muscles and its application on the Small & Special Electrical Machine in the Future

ZHAO Chun - sheng, YANG Lin

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要:介绍了一类新型智能材料 - 人造肌肉,概述了人造肌肉 ElectroActive Polymer(EAP)的特性和致动机理,引述了人造肌肉在微特作动器中一些应用实例,最后指出了人造肌肉在未来微特电机中的应用前景。

关键词:人造肌肉; EAP; 作动器; 直线电机; 微特电机

中图分类号: TM 215.3; TM 35 **文献标识码:** A

文章编号: 1004 - 7018(2006)10 - 0001 - 03

Abstract: Introduction of a new kind of smart material which is called artificial muscles, review of the electro active polymer(EAP) characteristics and actuating mechanisms, some applications of the artificial muscles in the micro - actuators are summarized. Finally, future applications to the small & special electrical machines will be pointed out.

Keywords: artificial muscles; EAP; actuator; linear motor; special electrical machines

1 引言

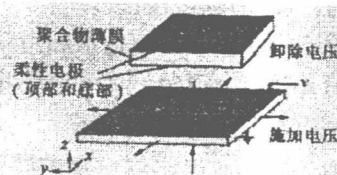
人造肌肉与自然肌肉在某些方面有着惊人的相似性,这为人们制造具有肌肉性能的作动器提供了可能。人造肌肉实际上是一类通电即能产生巨大变形的特殊“塑料”,两侧面粘有柔性电极的这种塑料薄膜在通电后会发生的显著的变形,同时还伴随有快速的响应和相当高的机电效率。由于具有独特的特性以及其它诸如低价等因素,人造肌肉在许多特殊领域有着广泛的应用潜力。例如:用于机器人的人造肌肉作动器;价廉质轻的直线型电机;精密光学仪器;泵的薄膜作动器;声学设备;旋转型微特电机。

人造肌肉的发展起源于 20 世纪 50 年代,但是直到最近 20 年才取得了突破性的进展。人造肌肉的种类很多, EAP 是最适合作致动元件的人造肌肉,它可以划分为两大类:电子型 EAP 和离子型 EAP。电子型 EAP 包括绝缘弹性体、铁电聚合物、电介质以及电致伸缩弹性体。离子型 EAP 包括离子型聚合胶状体、金属与离子型聚合物的合成物、导电聚合物以及炭纳米管。

2 人造肌肉的致动机理和特性

2.1 电子型人造肌肉的致动机理

由于电子型人造肌肉的体积远远大于杨氏模量 Y ,当形状改变时,它的绝对体积变化量是很小的,这导致了平面方向上的变形量很大,所以电极必须能随意变形从而不会妨碍材料的变形。在聚合物薄膜顶部和底部贴上这种柔性电极,分别施加电压和断开电压,就可以观察到明显的变形。



薄膜上施加电压时,厚度方向产生压缩,平面内方向上产生拉伸

图 1 电子型人造肌肉变形原理^[1]

电子型人造肌肉的致动机理很简单,电场驱动自由电荷,在两个电极中分别聚集极性相反的电荷,产生麦克斯韦应力,从而压缩材料导致其变形。我们可以根据库仑定理计算出电子型人造肌肉的有效压力。这个有效压力是纵向压缩以及平面内膨胀所共同引起的,但考虑到薄膜很薄(通常是 $10 \sim 200 \mu\text{m}$),我们可以近似地认为在纵向和平面内的应力相等,所以计算平面内应力时,可以取为 $0.5p$ (p 为施加电压后由两电极在薄膜里产生的有效压力)。 p 的具体计算参考文献 [1~3]。

2.2 离子型人造肌肉的致动机理^[4,5]

离子型人造肌肉的致动与电子型人造肌肉有明显的差异,它的致动不仅与材料有关,同时还与材料中所含的水分有很大的关系。和电子型人造肌肉一样,离子型人造肌肉的致动同样需要柔性电极的支持。如图 2 所示,在两电极上施加电压后,材料中本来平均分布的阴阳离子受到正负极的吸引而分别向正负极聚集。随着阴阳离子的移动,聚合物内部的水分子也随之移动,这导致了薄膜两边的水分子密度有明显的差距。不同的水密度在薄膜的两侧面内产生了不同的压力,两边产生的压力差使薄膜一边

伸长,一边收缩,从而产生摇摆伸缩运动。

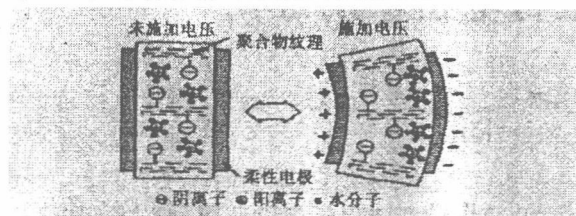


图2 离子型聚合物变形原理

2.3 人造肌肉的特性

表1 人造肌肉、压电陶瓷和生物肌肉的比较^[1,6,7]

作动器类型 (特例)	最大应变 (%)	最大应力 (MPa)	比弹性能量密度 (J/g)	弹性能量密度 (J/cm ³)	最大效率 (%)	相对响应速度 (满周期)
介电弹性体						
丙烯酸	380	7.2	3.4	3.4	60~80	中
硅数值	63	3.0	0.75	0.75	90	快
压电陶瓷 (PZT)	0.2	110	0.013	0.10	90	快
单晶体 (PZN-PT)	1.7	131	0.13	1.0	90	快
聚合物 (PVDF)	0.1	4.8	0.0013	0.0024	n/a	快
生物肌肉	>40	0.35	0.07	0.07	>35	中

人造肌肉还具有其它一些优异特性,在某些特殊领域中有较大的应用前景。

- (1) 寿命长,响应速度极快;
- (2) 产生大运动而不需要轴承和滑动部件;
- (3) 在单片薄膜上设置不同的电极排布方式就可以产生多自由度的运动;
- (4) 类似于生物肌肉比例恒定的特性(即尺度不变性,相同尺寸产生的输出一样,而不同尺寸产生的输出与其尺寸成比例),适用于微型装置;
- (5) 材料高度透明且价格便宜。

电子型人造肌肉的机电响应与施加的电压有关,因此它的变形应该是可控的。但是,这种响应并不是绝对线性的,机械漂移是导致误差的原因。但是在有些材料中,这种误差可以忽略不计,而且作动器可以通过设计来减小这种误差。Kombhuh^[8]等人提出了关于可控性的更详细讨论。

3 人造肌肉在微特电机中的应用现状

近十几年来,在如何应用人造肌肉方面,人们做出了很多尝试,其中有些方法已经取得了初步的成功,并研制出了各种各样的基于人造肌肉的作动器。

1996年,日本 Tadokoro等人根据超声波电动机的原理,利用人造肌肉的尺度不变性,设计了一种基于人造肌肉的椭圆摩擦驱动的新型作动器。在设计中,他们还采用重叠人造肌肉以增大输出力。

1992年,SR I与日本微机械工程签订合同后开始进行人造肌肉的研究。经过十二年的研究,他们已经研制出了多种类型的人造肌肉作动器,其中主要有弹簧卷筒作动器、仿生玩具、拍翅机构、夹钳机器人、六脚机器人。

人造肌肉是一种很特殊的材料,它同时具有压电陶瓷和生物肌肉的一些特性。人造肌肉的电致伸缩性与压电陶瓷很相似,但是它的变形量却要远大于压电陶瓷的变形量大得多,最大可以达到215%^[2],这种大变形量与生物肌肉很相似。表1列出了人造肌肉、压电陶瓷和生物肌肉的一些主要性能,通过比较我们可以发现人造肌肉在某些性能并不是最好的,但是它的综合性能则要优于压电陶瓷和生物肌肉。

弹簧卷筒作动器如图3a所示,它具有三个自由度,它不仅具有超过90°的弯曲能力,而且轴向伸长量也可达到25%。这种作动器在移动、夹持、定位等领域非常有用。图3b是利用类似于图3a的作动元件所做成的旋转型微特电机。这个原理性微特电机的作动元件重量只有0.25g,长度为15mm,最大输出速度为110 r/min,最大扭矩为1.5 mN·m,最大输出功率为9 mW,其工作频率为90 Hz^[9]。

拍翅机构的原型图如图3c所示,它是从昆虫的飞行机理中得到启发的。拍翅机构是利用人造肌肉弯曲带翅膀的塑料外骨骼来实现拍翅运动,它可以通过共振来增大拍翅的幅度,这同时也提高了机构的机械效率。最终这种机构将会用于制造一种在杂乱的环境中进行侦察活动的微型飞行平台。

夹钳机器人如图3d所示,它是利用多块人造肌肉按一定的顺序排列,对每块人造肌肉施加合适的电压,从而控制夹钳模拟机器人手的动作。如果能够提高机器人手的承重,那么它就可以代替人在一些危险性高的地方工作。

六脚机器人如图3e所示,它是最早研制出的基于人造肌肉的机器人,它的每只脚都通过两个人造肌肉作动器来控制,移动时每步有三只脚移动,和动物的移动步法相似。但是这种机器人不能在复杂的地理环境中移动,因此SR I又设计了另外一种六足机器人,它的六只脚都采用二自由度的人造肌肉卷筒式作动器,这些脚不能伸缩,但能够前后左右弯曲。这种机器人不仅能在复杂的地形中行走,而且各个关节部分都可以省掉,提高了灵活性。

2001年,韩国 Sungkyunkwan大学的 Kwangnok Jung等人根据生物肌肉的原理制作了一台直线型