

机电学院

052 系

序号	姓名	职 称 或学历	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	林广义 汪炜 刘正坝	博士 副教授 教授	052	多阵元聚焦换能器声场的数值模拟 及分析	压电与声光	2006. 28. 3
2	林广义 汪炜 刘正坝	博士 副教授 教授	052	透镜式聚焦压电换能器超声功率测 试分析	东南大学学报	2006. 36. 1
3	董歧 汪炜 刘正坝	博士 副教授 教授	052	液体压力激波发生器激励电源设计 及研究	航空精密制造技 术	2006. 42. 2
4	但春华 谷安 谢清华	硕士 副教授 硕士	052	低速走丝电火花线切割机运动控制 系统的研究	电加工与模具	2006. 1
5	谷安 谢清华	副教授 硕士	052	机器人触须传感器的设计	传感器与微系统	2006. 25. 6
6	王 蕾 朱 荻	博士 教授	052	采用非线性电解液的叶片电解加工 阴极设计	机械科学与技术	2006, 25 (2)
7	王 蕾 朱 荻	博士 教授	052	采用BP神经网络的叶片电解加工精 度预测	机械科学与技术	2006, 25 (7)
8	王 蕾 朱 荻	博士 教授	052	基于有限元数值方法的电解加工工 件型面的预测	中国机械工程	2006, 17 (9)
9	王明环 朱荻	博士 教授	052	电化学腐蚀法加工微圆柱体	机械工程学报	2006, 42 (6)
10	王明环 朱荻	博士 教授	052	微螺旋电极在改善微细电解加工性 能中的应用	机械科学与技术	2006 (3)
11	王明环 朱荻	博士 教授	052	Preparation of Turbulated Cooling Hole for Gas Turbine Blade Using Electrochemical Machining	Published in Key Engineering Materials.	2006
12	王明环 朱荻	博士 教授	052	航空发动机叶片竹节孔加工及传热 分析	机械科学与技术	2006 (11)
13	王 昆 朱荻	博士 教授	052	微米尺度线电极的电化学腐蚀法制 备	机械科学与技术	2006 (9)
14	王 昆 朱荻	博士 教授	052	Basic Research of Wire Electrochemical Micro- Machining	Proceeding of International Technology &Innovation Conference	2006
15	曾永彬 朱荻	博士 教授	052	基于BP神经网络的SU-8光刻胶工艺 参数优选研究	机械科学与技术	2006 (9)
16	曾永彬 朱荻	博士 教授	052	Novel Electroforming Process of Metal Microstructures by Using Shielded Anode	Proceeding of International Technology &Innovation Conference	2006
17	徐正扬 朱荻	博士 教授	052	Study on Flow Field of Turbine Blade with Flexible 3- Electrode Feeding Method in ECM	Proceeding of International Technology &Innovation Conference	2006
18	张美丽 朱荻	博士 教授	052	钛合金TC4电解加工表面质量的试验 研究	电加工与模具	2006 (6)

19	朱增伟 朱荻	博士 教授	052	Microstructure and Property of Nickel Electroformed Using Rotating Cathode in Hard Particles	Key Engineering Materials	2006, 315-316: 686-690
20	朱增伟 朱荻	博士 教授	052	硬质粒子磨擦法电铸新技术的研究	中国机械工程	2006, 17(1)
21	朱增伟 朱荻	博士 教授	052	硬质粒子扰动对电铸铜微观结构与性能的影响	中国有色金属学报	2006, 16(9)
22	郑晓虎 朱荻	博士 教授	052	模糊神经网络在UV-LIGA工艺优化中的应用	光学精密工程	2006, (1)
23	郑晓虎 朱荻	博士 教授	052	RESEARCH ON ELECTROFORMING Ni-Fe ALLOY FOR MEMS	Proceeding of International Technology & Innovation Conference	2006
24	李志永 朱荻	博士 教授	052	叶片电解加工阴极设计CAD/CAE/CAM专家系统	北京航空航天大学学报	2006, 32(1)
25	李志永 朱荻	博士 教授	052	基于叶片电解加工电场和流场特性的阴极设计及工艺试验研究	中国机械工程	2006, 17(14)
26	李志永 朱荻	博士 教授	052	Numerical solution for cathode design of aero-engine blades in electrochemical machining	The IEEE international conference	2006
27	孙春华 朱荻	博士 教授	052	Application of FEM to tool design for electrochemical machining freeform surface	Finite Elements in Analysis and Design	2006
28	杨建明 朱荻	博士 教授	052	工艺参数对电铸Ni-Mn合金中Mn含量的影响	金属热处理	2006. 11
29	杨建明 朱荻	博士 教授	052	用优化象形阳极改善合金电铸层的沉积分布	机械科学与技术	2006. 7
30	张文峰 朱荻	博士 教授	052	直流和脉冲Ni-ZrO ₂ 纳米复合电铸层显微硬度的研究	电镀与环保	2006. 11
31	张文峰 朱荻	博士 教授	052	Ni-ZrO ₂ 纳米复合电铸层的制备及其耐蚀性研究	腐蚀科学与防护技术	2006. 7
32	张文峰 朱荻	博士 教授	052	Ni-ZrO ₂ 纳米复合电铸层抗高温氧化性能的研究	电镀与涂饰	2006. 1
33	张文峰 朱荻	博士 教授	052	Ni-ZrO ₂ 纳米复合电铸层的制备及纳米颗粒分布均匀性研究	人工晶体学报	2006. 4
34	张文峰 朱荻	博士 教授	052	基于脉冲电铸技术的Ni-ZrO ₂ 纳米梯度功能材料制备工艺	人工晶体学报	2006. 5
35	张文峰 朱荻	博士 教授	052	含纳米ZrO ₂ 颗粒复合电铸层高温氧化行为研究	金属热处理学报	2006. 5
36	张文峰 朱荻	博士 教授	052	Ni-ZrO ₂ 纳米复合电铸层耐磨性研究	机械科学与技术	2006. 12
37	明平美 朱荻	博士 教授	052	纳米氧化镧对电铸极材料抗电蚀性的影响	稀土	2006. 27. 3
38	明平美 朱荻	博士 教授	052	基于UV-LIGA技术制造微结构器件试验研究	中国机械工程	2006. 17. 21
39	安庆龙 傅玉灿 徐九华 徐鸿钧	博士 生教 授教 授教 授	052	The cooling effects of cryogenic pneumatic mist jet impinging in grinding of titanium alloy	Key Engineering Materials	2006, 304-305

40	安庆龙 傅玉灿 徐九华	博士生 教授 教授	052	The Application of Cryogenic Pneumatic Mist Jet Impinging in High-Speed Milling of Ti-6Al-4V	Key Engineering Materials	2006, 315-316
41	安庆龙 傅玉灿 徐九华	博士生 教授 教授	052	低温气动喷雾射流冲击冷却技术在钛合金磨削中的应用	中国机械工程	2006, 17(11)
42	丁文锋 徐九华 傅玉灿 肖冰 苏宏华 徐鸿钧	博士后 教授 教授 副教授 副教授 教授	052	Interfacial Reaction between Cubic Boron Nitride and Ti During Active Brazing	Journal of Materials Engineering and Performanc	2006, 15(3)
43	丁文锋 徐九华 沈敏 苏宏华 傅玉灿 肖冰	博士后 教授 硕士生 副教授 教授 副教授	052	Joining of CBN abrasive grains to medium carbon steel with Ag-Cu/Ti powder mixture as active brazing alloy	Materials Science and Engineering A	2006, 430
44	丁文锋 徐九华 沈敏 傅玉灿 肖冰	博士后 教授 硕士生 教授 副教授	052	Thermodynamic and kinetic analysis of interfacial reaction between CBN and titanium activated Ag-Cu alloy	Materials Science and Technology	2006, 22(1)
45	丁文锋 徐九华 沈敏 傅玉灿 苏宏华 肖冰	博士后 教授 硕士生 教授 副教授 副教授	052	Solid-state interfacial reactions and compound morphology of cBN grain and surface Ti coating	Vacuum	2006, 81
46	丁文锋 徐九华 沈敏 傅玉灿 肖冰	博士后 教授 硕士生 教授 副教授	052	Behavior of titanium in the interfacial region between cubic BN and active brazing alloy	International Journal of Refractory Metals & Hard Materials	2006, 24
47	丁文锋 徐九华 沈敏 傅玉灿 肖冰 苏宏华	博士后 教授 硕士生 教授 副教授 副教授	052	活性元素Ti在CBN与钎料结合界面的特征	稀有金属材料与工程	2006, 35(8)
48	傅玉灿 徐鸿钧 孙方宏	教授 教授 教授	052	Experimental study on creep feed grinding titanium alloy with slotted CBN grinding wheel	Key Engineering Materials	2006, 304-305
49	耿国盛 徐九华 傅玉灿 苏畅	博士生 教授 教授 硕士生	052	Cutting Temperature in High Speed Milling of a Near Alpha Titanium Alloy	Key Engineering Materials	2006, 315-316
50	耿国盛 徐九华 傅玉灿 葛英飞 苏畅	博士生 教授 教授 博士生 硕士生	052	高速铣削近 α 钛合金的切削温度研究	机械科学与技术	2006, 25(3)

51	李曙生 徐九华 徐鸿钧 傅玉灿 肖 冰	博士生 教 授 教 授 教 授 硕士生	052	钛基钎料真空钎焊金刚石的试验研究	机械科学与技术	2006, 25(1)
52	李曙生 徐九华 肖 冰 严明华 傅玉灿 徐鸿钧	博士生 教 授 副教授 硕士生 副教授 教 授	052	Performance of Brazed Diamond Wheel in Grinding Cemented Carbide	Materials Science Forum	2006, 532-533
53	肖 冰 徐鸿钧 苏宏华 傅玉灿 徐九华	副教授 教 授 副教授 教 授 教 授	052	A preliminary investigation on multi-layer brazed diamond tools	Current development in abrasive technology	第九届国际磨粒加工学术会议论文集
54	肖 冰 苏宏华 丁文锋 傅玉灿 徐九华	副教授 副教授 博士后 教 授 教 授	052	The Influence of grinding parameters on the superficial hardening effect of 48MnV microalloyed steel	Key Engineering Materials	2006, 315-316
55	肖 冰 傅玉灿 苏宏华 徐九华 徐鸿钧	副教授 教 授 副教授 教 授 教 授	052	Machining Performance of Brazed diamond wire saw with optimum grain distribution	Key Engineering Materials	2006, 304-305
56	徐正亚 徐鸿钧 傅玉灿 徐九华	博士生 教 授 教 授 教 授	052	高频感应钎焊金刚石工具温控系统设计	传感器与微系统	2006, 25(12)
57	徐正亚 徐鸿钧 傅玉灿 肖 冰 徐九华	博士生 教 授 教 授 副教授 教 授	052	Induction brazing diamond grinding wheel with Ni-Cr filler alloy	Materials Science Forum	2006, 532-533
58	张晓锋 徐鸿钧 傅玉灿	博士生 教 授 教 授	052	Measurement Technique of Grinding Wheel Topography based on Binocular Stereo Vision	Materials Science Forum	2006, 532-533
59	张义平 徐九华 耿国盛	高 访 教 授 博士生	052	Tool Wear and Surface Integrity in High Speed Milling of a Near Alpha Titanium Alloy	Materials Science Forum	2006, 532-533
60	刘志东	副教授	052	高速走丝电火花超高厚度切割工作液的研制	电加工与模具	2006. 1
61	刘志东	副教授	052	高速走丝电火花线切割工作工作介质对电极丝耐用度影响的研究	电加工与模具	2006. 5
62	刘志东	副教授	052	高速走丝电火花线切割加工极间冷却状态的改善	电加工与模具	2006. 6
63	刘志东	副教授	052	高速走丝电火花线切割工作介质性能要求研究	航空精密制造技术	2006. 42. 6
64	刘志东	副教授	052	高速走丝电火花线切割工作介质发展方向研究	新技术新工艺	2006. 11
65	陈劲松 黄因慧	博士 教授	052	高速走丝电火花线切割工作介质性能要求研究	电铸与精饰	2006. 28. 6

66	陈劲松 黄因慧	博士 教授	052	喷射电铸快速制造的试验研究	华南理工大学学报	2006. 34. 11
67	陈劲松 黄因慧	博士 教授	052	喷射电沉积快速成形的定性实验研究	中国机械工程	2006. 17. 13
68	张坚 黄因慧	博士 教授	052	选区激光烧结聚苯乙烯/Al2O3纳米复合材料研究	机械工程材料	2006. 30. 2
69	张坚 黄因慧	博士 教授	052	聚苯乙烯/Al2O4纳米复合材料的选区激光烧结成形工艺研究	机械科学与技术	2006. 25. 1
70	张庆奎	博士	052	船舶全寿命敏捷供应链信息共享研究	中国造船	2006. 47. 3
71	张庆奎	博士	052	基于数据挖掘和数据网格技术的船舶全寿命信息共享和发现研究	中国机械工程	2006. 17. 24
72	曲宁松 朱荻	副教授 教授	052	Fabrication of Ni-CeO ₂ nanocomposite by electrodeposition	Acta Materialia Inc	2006
73	曲宁松 朱荻	副教授 教授	052	Improving the localization of electrochemical micro-manufacturing with nanosecond pulse duration		2006
74	李新建 薛重德	硕士 副教授	052	基于PCI总线的电火花线切割机运动控制卡设计	电加工与模具	2006. 5
75	李新建 薛重德	硕士 副教授	052	用CH365实现PCI总线与DSP的通信	单片机与嵌入式系统应用	2006. 12
76	张志林 薛重德	硕士 副教授	052	无速度传感器矢量控制系统的建模与仿真	金陵科技学院学报	2006. 22. 3
77	徐家文	教授	052	数控电解加工整体叶盘的研究\应用和发展	机电新产品导报	2006. 10
78	朱永伟 徐家文	博士后 教授	052	大扭曲度整体涡轮叶片展成电解加工成形规律及试验研究	中国机械工程	2006. 17. 17
79	丁仕燕 徐家文	博士 教授	052	数控展成超声磨削主轴部件及驱动控制系统研制	中国机械工程	2006. 17. 20
80	丁仕燕 徐家文	博士 教授	052	数控超声磨削陶瓷型面自动编程系统研制	山东大学学报	2006. 10
81	赵建社 徐家文	博士 教授	052	异形型腔数控电解加工过程的数字化模拟	高技术通讯	2006. 16. 4
82	赵建社 徐家文	博士 教授	052	异形型腔数控电解加工阴极及运动轨迹设计	中国机械工程	2006. 17. 1
83	赵建社 徐家文	博士 教授	052	异形型腔组合电加工数字化制造技术研究	航空学报	2006. 27. 1
84	赵建社 徐家文	博士 教授	052	异形型腔电解加工阴极的数字化设计	航空学报	2006. 27. 5
85	鲍怀谦 徐家文	博士 教授	052	基于超纯水电解加工的水解离机理研究	宇航材料工艺	2006. 5
86	鲍怀谦 徐家文	博士 教授	052	超纯水电解加工机理及工艺基础	化工学报	2006. 57. 3
87	郑建新 徐家文	博士 教授	052	陶瓷材料延性域磨削机理	硅酸盐学报	2006. 34. 1
88	郑建新 徐家文	博士 教授	052	超声加工中局部共振机理的模拟试验研究	南航学报	2006. 38. 5
89	郑建新 徐家文	博士 教授	052	Experimental Research on the Ground Surface Quality of Creep Feed Ultrasonic Grinding Ceramics	航空学报	2006. 19. 4
90	葛媛媛 徐家文	博士 教授	052	镍基高温合金GH4169电解加工曲线测定	宇航材料工艺	2006. 4

91	葛媛媛 徐家文	博士 教授	052	基于PRO/E软件的电解加工夹具的参数化设计	宇航材料工艺	2006. 3
92	王福元 徐家文	博士 教授	052	基于加工过程数值模拟的电解加工参数选择方法	中国机械工程	2006. 17. 7
93	吴小康 徐家文	博士 教授	052	基于UG平台的数控电解加工工艺过程模拟	航空精密制造技术	2006. 42. 4
94	李富龙 徐家文	博士 教授	052	AL203陶瓷超声磨削的微观机理分析	电加工与模具	2006. 3
95	张天鹏 云乃彰	硕士 教授	052	微细轴放电反拷成形方式的比较研究	电加工与模具	2006. 4
96	张天鹏 云乃彰	硕士 教授	052	电火花成形机床微细加工相关探索	制造技术与机床	2006. 11
97	朱永伟 云乃彰	博士后 教授	052	超声微细加工工具制作与试验	航空精密制造技术	2006. 42. 4
98	朱永伟 云乃彰	博士后 教授	052	制作微器件的超声电解复合微细加工基础研究	电加工与模具	2006. 2
99	左敦稳	教授	052	Residual stresses in Ti-6Al-4V high-speed milled under stretching fixation	8th international conferece on progress of machining technology	2006
100	卢文壮	副教授	052	Wire electrical discharge machining of doped CVD diamond films	8th international conferece on progress of machining technology	2006
101	黎向锋	副教授	052	Application of sound analysis technique to monitor tool wear during the turning process	8th international conferece on progress of machining technology	2006
102	郭魂 左敦稳	博士 教授	052	The application of FEM technology on the Deformation Analysis of the aero thin-walled frame shape workpiece	Key Engineering Materials	2006
			052			

多阵元聚焦换能器声场的数值模拟及分析

林广义, 汪 炜, 刘正坝, 王春武, 林天军

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:提出一种新型的多阵元聚焦换能器, 该聚焦换能器由 6 个排列在一个球径为 $\varnothing 146$ mm 的凹球面上的透镜式单元换能器组成, 透镜曲率半径为 112 mm, 工作频率为 1 MHz。该文应用坐标变换法对该聚焦换能器的复杂声场分布进行了数值计算, 并测定了其声功率。研究表明: 该结构具有较大的聚焦深度、较理想的焦域、可改变的声场能量, 工艺简单, 成本低廉。

关键词:聚焦换能器; 声场; 声功率; 激波

中图分类号:O426; TB552

文献标识码:A

Sound Field Calculation and Analysis of a New Type Multi-elements Focused Transducer

LIN Guang-yi, WANG Wei, LIU Zheng-xun, WANG Chun-wu, LIN Tian-jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A new type multi-elements focused transducer was presented in this paper. It is composed of six-lens style single-element transducers mounted on a concave sphere of a radius of 146 mm. The lens radius of curvature is 112 mm and it is operated at 1 MHz. The complex sound field distribution of the focused transducers was calculated by the coordinate transform method, and the acoustic power was measured. The results show that it has a deeper focal length, an ideal focal region and the changeable ultrasonic power. It is low price and can also be easily realized.

Key words: focused transducer; sound field; ultrasonic power; shock wave

激波发生器是液体压力激波加工技术的关键所在^[1], 而聚焦技术是激波发生器工作的基础, 目前已有的聚焦方式有多元相干聚焦、多元非相干聚焦、相控聚焦、单元声透镜聚焦^[2]和凹球面晶片聚焦^[3]等。但考虑到制作工艺复杂程度和系统稳定性等因素, 多采用声透镜聚焦和凹球面晶片自聚焦两种方式。相比而言, 前者工艺和成本低于后者。透镜式单元换能器和多阵元平面活塞型换能器^[4-6]的数值模拟曾有过报道, 本文结合单元声透镜聚焦和多阵元聚焦的各自优点, 在此基础上设计了一种新型多阵元聚焦换能器, 并从声场分布和声功率两个方面来证明该结构的可行性。由于该结构的声场计算较难, 因此本文提出一种基于坐标变换的方法对该结构的声场进行计算, 结果表明该发生器具有较好的聚焦能力。通过对该结构的声功率进行测量, 表明其可以满足激波发生器的工作要求, 为下一步进行加工试验打下了良好的基础。

1 多阵元聚焦换能器的几何结构及声场分析

1.1 多阵元聚焦换能器结构

为了在聚焦区域形成高强度聚焦超声, 将单元

换能器安装在球面上, 设球面半径为 R , 单元换能器透镜的曲率半径为 r , 由声学理论单元换能器的焦距 F 可近似计算^[7]

$$F = \frac{r}{1 - n} \quad (1)$$

式中 $n = c_1 / c_2$, c_1 、 c_2 分别为传声媒质和透镜材料的声速。在设计时令 $R = F$, 则当单元换能器同时被激励时, 则可实现凹球壳基体的球心处实现声场的几何聚焦, 焦域的大小由换能器的几何参数确定。

图 1 为本文所述的试验用多阵元聚焦换能器的结构, 单元换能器为 6 个, 球半径 R 为 146 mm。单元换能器采用透镜式压电换能器, 其结构如图 2 所示。

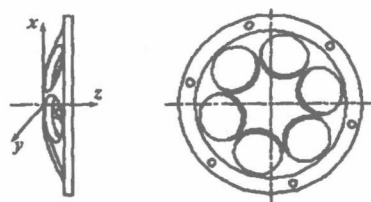


图 1 多阵元聚焦换能器的几何结构

收稿日期: 2005-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50305011), 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2003090), 航空科学基金资助项目 (04H52058)

作者简介: 林广义 (1975-), 男, 山东青岛人, 博士生, 主要从事压电式液体压力激波发生器的研究。

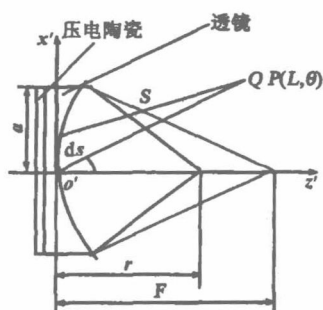


图2 单元换能器的几何结构

压电陶瓷表面各点在电信号激励下产生同相振动,但通过声透镜后,透镜的凹面上各点的振动应引入相应的相位和幅度修正。总的修正量为^[7]

$$q'(R, \alpha) = \exp[-\frac{r^2}{2r}(\alpha + jk_2)] \quad (2)$$

式中 α 为透镜材料的声衰减系数; $k_2 = 2\pi f/c_2$, c_2 为透镜材料中的声速。此时声压分布为

$$P(L, \theta) = P_0 \int_0^{2\pi} \int_{b_1}^{b_2} q'(R, \alpha) \frac{e^{-jk_1 S}}{S} r_1 dn d\phi \quad (3)$$

式中 $P_0 = \frac{k_1 c_1 \rho u}{2\pi}$, k_1 、 c_1 、 ρ 分别为声传播媒质中的波矢、声速和密度; k_2 为透镜材料媒质中的波矢; u 为平面振子的振速。 n 为坐标原点到面元 ds 的距离; S 为面元 ds 到场点的距离; α 为声透镜材料媒质中的声衰减系数。积分限 b_1 、 b_2 分别为原点 o 到环状换能器内、外沿的距离。此式 $b_1 = 0$ 。 ϕ 为过场点 Q 且垂直相交于 $o'x'$ 轴的直线与 $x'o'y'$ 平面的夹角 β_1 与过面元 ds 且垂直相交于 $o'x'$ 轴的直线与平面的夹角 β_2 之差, 即 $\phi = \beta_1 - \beta_2$ 。 r 为透镜的曲率半径, S 为源点到场点的距离, 其长度可表示为

$$S = \left[R^2 - 2Rn \sqrt{1 - \frac{r^2}{4R^2} \sin^2 \alpha \cos \phi} + n^2 \left(1 - \frac{R \cos \theta}{r} \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

由于关心焦域分布, 所以取 $\alpha = 0$, 整理得

$$p(R, \theta) = \frac{k_1 c_1 \rho u}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{b_1}^{b_2} S^{-1} \exp[-j \frac{r^2}{2r} k_2 + k_1 S] J_n dn d\phi \quad (5)$$

整个阵列的声场是各阵元声场的叠加, 即

$$P = \sum_{i=1}^N p_i \quad (6)$$

式中 N 为单元换能器的个数。

1.2 基于坐标变换的多阵元声场计算方法

在上述聚焦换能器声场的计算过程中, 可以将每一阵元划分为有限个小的微元 Δs_n , 利用叠加来代替积分, 这样计算过程中完全去除了积分的运算, 计算过程相对简单和快速。但由于每个单元换能器坐标建立在自己的中心 o' (见图3), 因此需通过坐

标变换, 才能对整个多阵元声场进行计算。其变换原理是: 首先设单元换能器透镜顶点与球面顶点的连线在过顶点球切平面的投影为 y 轴, z 轴为球面顶点与球心的连线且指向球心, x 轴满足右手系, 然后以阵元中心点 $o'(x_{n0}, y_{n0}, z_{n0})$ 建立新的坐标系, 由于各单元换能器排列在球面的切平面上, 因此可通过新坐标原点 o' 指向球心的半径作为 z' 轴, o' 与切平面和 z 轴交点的连线作为 x' 轴, y' 轴满足右手系。这样新坐标系相对于原坐标, 可求出矢量 $o'x'$ 与 ox 夹角余弦 $\cos \alpha_1$, 矢量 $o'x'$ 与 oy 夹角余弦 $\cos \beta_1$, 矢量 $o'x'$ 与 oz 夹角余弦 $\cos \gamma_1$, 其他夹角同理也可求出。设 θ 为单元换能器相对于过坐标原点切平面的张角, β 为旋转角, 则任一单元换能器中心坐标 o' 为

$$\begin{cases} x_0 = R \sin 2\theta \sin \beta \\ y_0 = R \sin 2\theta \cos \beta \\ z_0 = 2R \sin^2 \theta \end{cases} \quad (7)$$

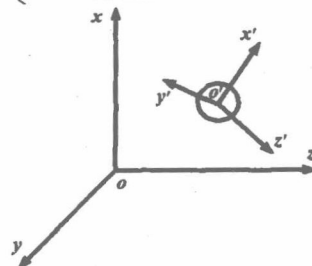


图3 球面阵列声场计算坐标变换示意图

这样新坐标系中任意一点 (x', y', z') 就可由老坐标系表示为

$$\begin{cases} x' = (x - x_0) \cos \alpha_1 + (y - y_0) \cos \beta_1 + (z - z_0) \cos \gamma_1 \\ y' = (x - x_0) \cos \alpha_2 + (y - y_0) \cos \beta_2 + (z - z_0) \cos \gamma_2 \\ z' = (x - x_0) \cos \alpha_3 + (y - y_0) \cos \beta_3 + (z - z_0) \cos \gamma_3 \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)可求出任一单元换能器在空间中的声场分布, 然后由式(6)可得到多阵元聚焦换能器声场在空间的分布。

1.3 声功率测量

声功率是从总体上估计声场能量及作用效果的一个重要参数, 本文采用自制的声功率计测量其声功率。该声功率计具有量程大, 简单易用, 可靠性强等优点, 能直接对多阵元换能器聚焦超声功率进行测量, 其辐射力与声功率之间的关系为

$$P = kF \quad (9)$$

其中 k 由换能器的结构和声功率计的反射靶的角度决定。该声功率计的测量范围为 $0 \sim 2000 \text{ W}$, 理论分辨率为 2.7 W , 最大相对误差在 10% 左右。该多阵元换能器采用并联连接以保证所有的换能器同时激励无相位差, 由阻抗分析仪测定换能器的工作频

率,使换能器工作在谐振状态。

2 结果与讨论

2.1 多阵元换能器的数值计算

多阵元换能器的结构如图1所示,所采用的单元换能器结构与坐标如图2所示,由式(5)可看出,影响此单元换能器焦域形态的声学参数有工作频率 f 、压电陶瓷的外半径 a 、声透镜的曲率半径 r 以及声速 c_1 、 c_2 。确定了传声媒质和透镜材料,就能确定 c_1 和 c_2 。可供选取的变量为 f 、 a 和 r 。本文选定的声学参数为: $f=1\text{ MHz}$, $a=25\text{ mm}$, $r=112\text{ mm}$, $c_1=1500\text{ m/s}$, $c_2=6400\text{ m/s}$,单元换能器相对与过坐标原点切平面的张角 $\theta=11^\circ$,旋转角 $\beta=2\pi/6=60^\circ$ 。由式(5)、(6)进行声场计算得到的三维声场分布及焦域分布如图4、5所示。

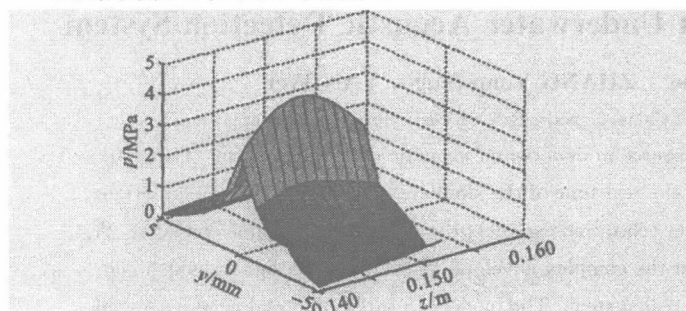


图4 声场在 yoz 面上的声压分布

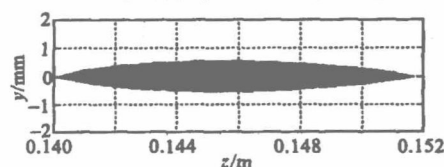


图5 声场在 yoz 面的3 dB焦域

由图4、5可看出,声压在 0.146 m 达最大值,正好位于球心附近区域,与设计要求相符合。还可以看出在垂直于 z 轴离原点 0.146 m 的平面上,其聚焦范围在 1.5 mm 以内,其附近无栅瓣,旁瓣也很小,声场指向性非常好。

2.2 多阵元声功率测量

在电压为 60 V 时,声功率与工作单元换能器个数的关系如图6所示。

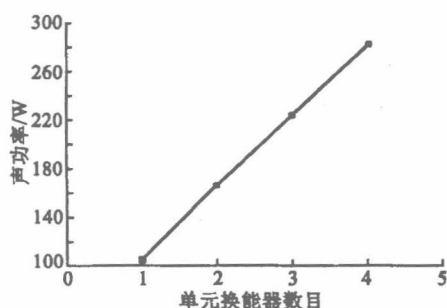


图6 声功率与工作单元换能器数目的关系

由图6可看出,随着参加工作的换能器数目的增加,其发出的声功率也成线性关系增加。这是因为对于同一组内的单元换能器,相对于声功率计来说完全对称,单元换能器增多,则测得的声功率必然线性增加,因此可通过增加单元换能器的个数来提高聚焦换能器的声功率。

3 结论

a. 本文结合单元声透镜聚焦和多阵元聚焦的各自优点,创造性的提出一种新型多阵元聚焦超声换能器,采用多元二次聚焦法,避免了单元声透镜聚焦超声强度偏小和多元聚焦压电陶瓷片数过多的缺点,结构简单,易于实现。

b. 本文采用坐标变换法对该结构进行了声场计算,模拟结果表明,该结构具有较好的聚焦性能。可同时激励所有单元实现几何聚焦,不需单独控制每个阵元的相位,因此降低了设备的复杂性。

c. 通过对其声功率进行测量可看出,随着工作换能器个数的增加,其发出的声功率也随着增大。可以通过增加换能器的个数来提高声功率,以使其有足够的能量对材料进行加工。

从声场分布和声功率测量结果表明该结构作为激波发生器是可行的。本文下一步工作将使用该多阵元聚焦换能器对材料进行加工处理(微冲击成型、表面强化等),这些问题还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 林广义,汪 炜,刘正坝,等.多阵元液体压力激波发生器设计与声场数值模拟[J].南京航空航天大学学报,2005,37(1):87-91.
- [2] ZHANG Qiang, LI Fa-qi, FENG Ruo, et al. Numerical simulation of the transient temperature field from an annular focused ultrasonic transducer [J]. Ultrasound in Med & Biol, 2003, 29(4): 585-589.
- [3] RIVENS I H, CLARKE R L, TERHAAR G R. Design of focused ultrasound surgery transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1996, 43(6): 1023-1031.
- [4] 梅 媚,张力新,王 玮,等.自聚焦多元辐射器超声热场的计算机模拟与实验研究[J].压电与声光,2004,26(4):325-330.
- [5] BUIOCHI F, MARTINEA O, ULLATE L G, et al. 3D computational method to study the focal laws of transducer arrays for NDE application [J]. Ultrasonics, 2004, 42(1-9): 871-876.
- [6] 戴启军,周秦武,卞正中,等.超声治疗换能器的声场分析[J].压电与声光,2001,23(6):433-436.
- [7] 张德俊.高强度聚焦超声换能器[J].中国超声诊断杂志,2000,1(2):1-4.

透镜式聚焦压电换能器超声功率测试分析

林广义 汪 炜 刘正坝 董 歧

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 从声学原理出发推导了作用于锥面反射靶的超声功率和辐射压力之间的关系, 在此基础上设计了一种新型超声功率计, 该超声功率计采用反射靶加吸收靶的结构形式, 避免了反射声束之间的相互干扰. 用校正螺母对该功率计进行了校准和误差分析, 并采用 3 个不同角度的反射靶对该声功率计进行了验证. 理论分析和实验表明: 在 0~200W 的测量范围内, 采用 3 个不同角度的反射靶测量结果基本吻合, 最大相对误差为 10% 左右; 被测量的透镜式聚焦压电换能器的电功率、声功率随着驱动电压的升高而增大, 且声功率增加逐渐变缓, 呈一定的非线性.

关键词: 压电换能器; 声功率测试; 激波

中图分类号: TB 552; O 354.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0505(2006)01-0067-04

Ultra sonic power measurement and analysis of lens style focused piezoelectric transducer

L in Guangyi Wang Wei Liu Zhengxun Dong Qi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A novel ultrasonic power meter is designed according to the relationship between ultrasonic power and radiation pressure deduced from ultrasonic theory. It utilizes the structure of reflecting target plus absorbing target, which prevents the sound beam from intervening. It is calibrated by weights and validated by the reflecting targets with three different angles. The results demonstrate that the measuring results of reflecting targets with three different angles agree within the calibrated range of 200 W. And the overall uncertainty of the measuring results is below 10%. Also the results show that the electric power and the ultrasonic power of the transducer rise along with the driving voltage, while the increase of the ultrasonic power gradually shows down, showing a nonlinear character.

Key words: piezoelectric transducer; ultrasonic power measurement; shock wave.

液体压力激波加工是一种崭新的加工方法^[1,2], 而聚焦技术是激波发生器工作的基础, 因此有必要对超声功率进行测量. 超声功率的测量方法有辐射压力法^[3,6]、电学法、光衍射法^[7]、量热法^[8,9]等, 但现有的测量仪器存在着量程较小、操作复杂等缺点, 不能直接对大口径聚焦超声换能器或多元超声换能器阵列聚焦超声功率进行测量, 因此有必要研制一种新的大功率测试仪器. 传统的反射靶多采用凹锥面反射靶^[10], 本文采用锥面反射

靶加吸收靶的形式进行测量, 避免了反射声束之间相互干扰, 提高了测试精度. 并从原理出发推导了聚焦换能器声场作用于锥面反射靶的功率与压力之间的关系, 并在此基础上设计了一种新型超声功率计, 采用 3 个不同角度的反射靶对该方法进行了验证, 并利用该声功率计对透镜式换能器聚焦声场进行了测量. 结果表明该仪器实现简单, 可靠性强, 量程大, 具有较高的使用价值.

1 理论分析

根据声学原理, 采用超声波聚焦可使焦点处能量达到最大值. 本试验所用的换能器采用声透镜聚焦, 该聚焦方式结构简单, 成本较低, 易于制作, 且其焦距可通过选择透镜曲率来确定或更换. 其球形换

收稿日期: 2005-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50305011)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2003090)、航空科学基金资助项目(04H52058).

作者简介: 林广义(1975—), 男, 博士生; 刘正坝(联系人), 男, 教授, 博士生导师, zxl@nuaa.edu.cn

能器的结构及作用于反射靶上的聚焦声场见图 1.

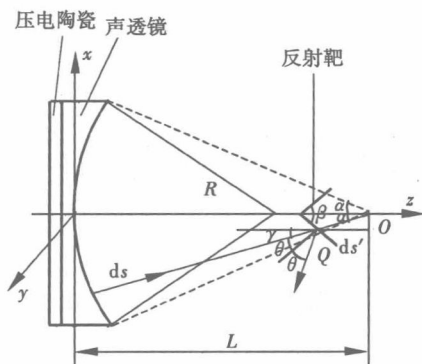


图 1 压电换能器结构及聚焦声场

图 1 中, R 为声透镜表面几何曲率半径; L 为换能器的声焦距; θ 为入射角; α 为换能器边缘上的点与声焦点连线与 z 轴的夹角; β 为反射靶的顶角. 图 1 中声透镜换能器的声焦距近似为

$$L = \frac{R}{1 - n} \quad (1)$$

式中, $n = c_1 / c_2$, c_1 为媒质的声速, c_2 为在透镜中的声速. 由于所使用的超声换能器尺寸一般较大, 远大于超声波波长, 因此满足平面波理论, 可以应用几何声学方法来研究聚焦超声功率与压力之间的关系. 假设: ① 超声波能量在传播过程中无损耗; ② 具有理想的聚焦声场, 满足几何声学条件; ③ 在经过焦点的立体角内声能流恒等.

整个聚焦声束由无数条声线所代表的细声束组成, 设在超声场内某一点 Q 处有一个垂直于声线的面元 ds' , 由焦点 O 与 ds 构成的立体角向声源延伸, 投射到球面上对应的辐射面的面元为 ds 则有

$$I ds' = I_0 ds \quad (2)$$

式中, I, I_0 分别为 Q 点和声源处的声强.

假定换能器上的点与声焦点 O 的连线与 z 轴最大夹角为 α , 在声场的 z 轴上安置一锥形反射靶, 其反射靶的顶角为 β , 声压反射系数为 $r = 1$, 其对称轴与声源的对称轴重合, 如图 1 所示. 若在经 z 轴的一个平面内, 设有一条声强为 I 的声线入射到反射靶上的 Q 点, 与 z 轴的夹角为 γ , 入射角为 θ , 则 $0 = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2} - \gamma$. 则反射靶 Q 点所受该声线的辐射力在 z 轴方向上的分量为

$$dF = \frac{I}{c} (\cos\gamma + \cos(\pi - \beta - \gamma)) ds' \quad (3)$$

根据式 (1), 则 Q 点所受的辐射力在 z 轴上的分量为

$$dF_z = \frac{I_0}{c} [\cos\gamma + \cos[\pi - (\beta + \gamma)]] ds =$$

$$\frac{I_0}{c} [\cos\gamma - \cos(\beta + \gamma)] ds \quad (4)$$

整个反射靶所受的辐射力等于 dF 对 ds 的面积分, 即

$$F = \int_s dF$$

整个反射靶所受的辐射力与在 z 轴相垂直方向上的分量, 因球面与靶面的轴对称性而抵消. 靶面所受的 z 轴方向的辐射力即为总辐射力. 在球坐标系中用下式计算:

$$F = 2\pi R^2 \frac{I_0}{c} \int_0^\alpha [\cos\gamma - \cos(\beta + \gamma)] \cdot \left[\cos\left(\gamma + \arcsin\left(\frac{L - R \sin\gamma}{R}\right)\right) \right]' d\gamma \quad (5)$$

令

$$A = \int_0^\alpha [\cos\gamma - \cos(\beta + \gamma)] \cdot \left[\cos\left(\gamma + \arcsin\left(\frac{L - R \sin\gamma}{R}\right)\right) \right]' d\gamma$$

由于声功率

$$P = 2\pi R^2 I_0 \left[1 - \cos\left(\alpha + \arcsin\frac{L - R \sin\alpha}{R}\right) \right] \quad (6)$$

由式 (5) 和 (6) 可得辐射力与声功率的关系为

$$k = \frac{P = kF}{A} = \frac{\left[1 - \cos\left(\alpha + \arcsin\left(\frac{L - R \sin\alpha}{R}\right)\right) \right]}{A} \quad (7)$$

2 测量系统

2.1 原理及组成

超声能量辐射到声功率计的反射靶上, 由荷重传感器测量作用在反射靶垂直方向上的辐射力, 然后通过声功率与辐射压力的关系求出超声换能器所辐射的总声功率.

本测试系统由荷重传感器及其显示系统, 反射靶、吸收靶、超声换能器构成 (见图 2). 荷重传感器置于水中, 测量时, 采用去气水为传输媒质, 这主要是为了避免产生气泡对超声波产生散射而影响测量的准确性.

本文所设计的系统参数为: 换能器上的点与声焦点 O 的连线与 z 轴最大夹角 $\alpha = 10^\circ$, 反射靶顶角 $\beta = 60^\circ$, 若取在去气水中传播的声速为 1500 m/s , 重力加速度为 9.8 m/s^2 , 则由式 (7) 可计算得 $k = 27 \text{ W/g}$. 这样可通过测量的辐射力值, 求出相应的声功率. 为了测量反射靶上的辐射压力值, 采用荷重传感器进行检测, 将压力信号转换为电信号, 通过 RS232 串口把数据传递到计算机, 由计算机进行处理.

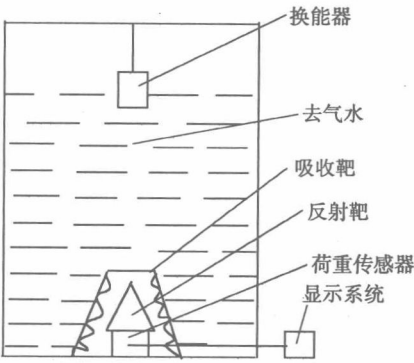


图 2 超声功率计测试系统

2.2 校准结果及误差分析

根据以上原理设计的超声功率测量范围为 0 ~ 2 000 W, 为减小误差, 反射靶采用中空圆锥体设计, 且保证尽可能多的超声能量辐射到靶面上. 为了避免反射声束在超声换能器和靶面之间产生来回反射, 对靶面产生附加压力, 造成测量误差, 本文又附加了一个吸收靶. 吸收靶的主要作用把反射回的声束吸收掉, 所采用吸声材料的吸声效率超过 98%.

本文所采用的荷重传感器分辨率为 0.1 g, 若不考虑其他因素所带来的误差, 由式 (7) 可得, 该超声功率计的理论分辨率为 2.7 W.

本文超声功率计设计完成后, 使用校正螺母对其进行校准, 采用多点校准法, 校准结果如图 3 所示. 图中 m_{av} 为 2 次测量质量的平均值, 从图 3 可以看出该声功率计在量程内具有很好的线性度. 其误差分析见表 1. 从表 1 可以看出测量较小值时受环境影响较大.

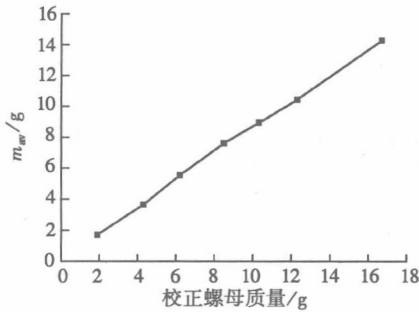


图 3 校准结果

表 1 测量校正螺母误差分析

校正螺母 质量 /g	螺母质量 减去浮力 /g	m_{av} /g	平均值 / g	绝对 误差	相对 误差 /%
1.9	1.59	1.7 (1.7)	1.70	0.11	6.92
4.3	3.59	3.7 (3.6)	3.65	0.06	1.67
6.2	5.17	5.5 (5.6)	5.55	0.38	7.35
8.5	7.07	7.4 (7.8)	7.60	0.53	7.49
10.3	8.56	8.8 (8.9)	8.95	0.39	4.56
12.3	10.25	10.4 (10.5)	10.45	0.20	1.95
16.7	14.25	14.4 (14.2)	14.30	0.05	0.35

2.3 测量方法的验证

由于商用的声功率计量程较小, 不能对大声功率计进行标定, 本文采用 3 种不同角度的反射靶对该方法进行验证.

本文除了顶角为 60° 的反射靶外, 又设计了顶角为 45° 和 112° 的 2 个反射靶. 根据式 (7) 计算可得, 在顶角为 45° 时, $k_2 = 43.82 \text{ W/g}$ 在顶角为 112° 时, $k_3 = 10.67 \text{ W/g}$ 用所设计的 3 个反射靶连续测量同一声功率, 测得的结果如图 4 所示.

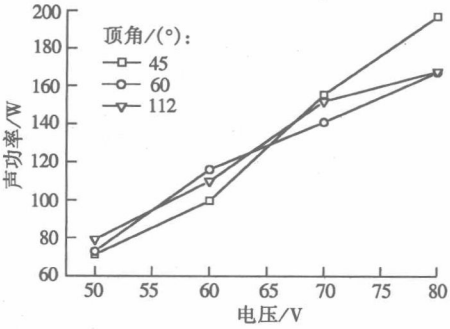


图 4 3个反射靶测量结果的对比

由图 4 可以看出在 200 W 的标定范围内, 3 个不同角度的反射靶测量结果基本吻合, 最大相对误差为 10% 左右, 能够满足工程技术需要, 同时验证了理论和所设计声功率计的准确性.

3 实验结果

本文对所设计的透镜式聚焦换能器超声功率和电功率进行了测试, 表 2 为使用 60° 反射靶时的测量结果.

表 2 声功率测量结果

驱动 电压 /V	平均声 功率 /W	最大 显示值 /W	最小 显示值 /W	最大绝对 误差 /W	最大相对 误差 /%
50	72.9	78.3	62.1	10.8	14.8
60	116.1	118.8	113.4	2.7	2.3
70	141.0	145.8	137.7	4.8	3.4
80	167.4	170.1	162	5.4	3.2

从表 2 可以看出, 在低电压驱动时误差较大, 这是由于信号较弱时, 测量结果受环境影响较大, 小的扰动就可对测量结果有较大的影响. 测量误差主要来源于: ①换能器与反射靶是否对中; ②荷重传感器的分辨率; ③传输过程中能量损耗.

图 5 为电功率、声功率和电声效率随电压变化的关系. 从图 5(a)、(b) 可以看出, 随着电压的升高, 电功率、声功率也随着升高, 且随着电压的升高, 其超声功率增加趋缓, 呈一定的非线性. 进行二次拟合, 近似得到声功率与电压的关系式为

$$P = - 248.3 + 8.54U - 0.042U^2$$

式中, P 为声功率; U 为电压。

由图 5(c) 可以看出, 电声效率随电压的升高而减小, 这与压电陶瓷换能器的非线性有关。

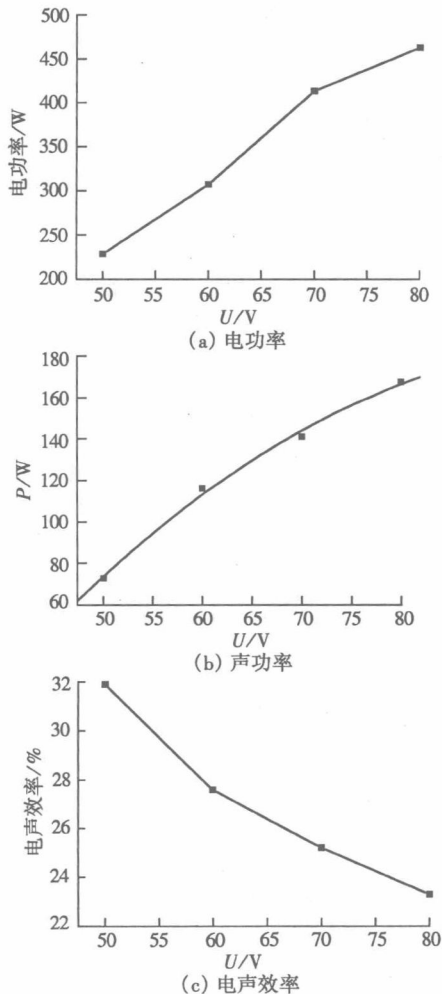


图 5 电压与电功率、声功率和电声效率曲线图

4 结 论

1) 针对聚焦超声研制了一种大量程超声功率计, 该功率计采用反射靶加吸收靶的方式进行测量, 这样被反射靶反射回的声束被吸收靶吸收, 避免了反射声束之间的相互干扰。

2) 用校正螺母对该功率计进行校准测量, 校准结果显示该声功率计在测量范围内有较好的线性度。

3) 采用 3 个不同角度的反射靶对该方法进行验证, 验证试验是连续进行的, 保证测试条件基本一致。结果表明 0~200 W 的测量范围内, 采用 3 个不同角度的反射靶测量结果基本吻合, 最大相对误差为 10% 左右。

4) 对透镜式聚焦换能器进行了测试试验, 测

量结果显示: 随着驱动电压的升高, 其电功率、声功率也随着升高, 且声功率增加平缓, 呈一定的非线性。所给出的声功率与电压的关系, 对声功率预测具有一定的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 林广义, 汪炜, 刘正坝, 等. 多阵元液体压力激波发生器设计与声场数值模拟 [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(1): 87~91.
Lin Guangyi, Wang Wei, Liu Zhengxun, et al. Design of multi-element shock wave generator and sound field numerical simulation [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 37(1): 87~91. (in Chinese)
- [2] 汪炜, 刘正坝, 谷安. 液体压力激波加工技术研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(5): 474~479.
Wang Wei, Liu Zhengxun, Gu An. Study on pressure processing with shock wave in liquid [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(5): 474~479. (in Chinese)
- [3] Swamy K M, Keil F J. Ultrasonic power measurement in the milliwatt region by the radiation force float method [J]. Ultrasonic Sonochemistry, 2002, 9(6): 305~310.
- [4] Hekkenberg R T, Beissner K, Zeqiri B, et al. Validated ultrasonic power measurements up to 20 W [J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2001, 27(3): 427~438.
- [5] Sutton Yvonne, Shaw Adam, Zeqiri Bajram. Measurement of ultrasonic power using an acoustically absorbing well [J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2003, 29(10): 1507~1513.
- [6] Lunt M J, Duck F A. Ultrasonic power balances—effect of a coupling window on the power measured from physiotherapy ultrasound units [J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2001, 27(8): 1127~1132.
- [7] Chan H L W, Chiang K S, Price D C. Use of a fiber-optic hydrophone in measuring acoustic parameters of high power hyperthermia transducers [J]. Phys Med Biol, 1989, 34(11): 1609~1622.
- [8] Fay Burkhard, Rinker Michael. The thermoacoustic effect and its use in ultrasonic power determination [J]. Ultrasonics, 1996, 34(2): 563~566.
- [9] Hodnett Mark, Zeqiri Bajram. A strategy for the development and standardization of high power/cavitating ultrasonic fields: review of high power field measurement techniques [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1997, 4(4): 273~288.
- [10] 高爽, 陈亚珠. 一种新型的智能化超声功率计 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(11): 1591~1593.
Gao Shuang, Chen Yazhu. A new intelligent ultrasonic power with large measuring range [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(11): 1591~1593. (in Chinese)

液体压力激波发生器激励电源设计及研究*

董 岐, 汪 炜, 刘正坝, 林广义, 李为龙

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘 要] 以复合式隔离的双端正激功率变换电路为基础研制了激波发生器激励电源, 分析了电路的主要工作原理, 并用 Pspice 进行了仿真分析, 最后实验结果表明本方案的正确性与可行性, 对压电陶瓷的激励效果好, 电源效率较高。

[关键词] 双端正激; Pspice; 电源

[中图分类号] TM13

[文献标识码] B

[文章编号] 1003-5451(2006)02-0033-03

Design and Research of Power Supply for Shock Wave Generator in Liquid

DONG Qi, WANG Wei, LIU Zheng-xun, et al

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

[Abstract] Based on multiple, isolate, double-ended and positive power inverter, a sort of excitation power supply was developed. The main operating principle of the circuit was analyzed and the simulation with Pspice was carried out. The result shows that the scheme proposed is right and feasible. The power supply promotes piezoelectric ceramic effectively and because of its high efficiency.

[Keywords] double-ended and positive exciter; Pspice; power supply

1 引言

液体压力激波具有能量大且易于控制, 已在医学上得到了广泛的应用^[1]; 而该技术作为一种全新的绿色加工方式, 用于材料表面强化, 复合材料加工等制造领域, 尚刚刚起步, 具有极大的发展空间。产生液体压力激波的方式很多, 通过对压电陶瓷换能器施加脉冲激励时, 压电陶瓷换能器就能产生脉冲超声波。如果采用特殊的聚焦技术, 就可以使压电陶瓷换能器在液体介质中产生高能、瞬时压力激波^[2-3], 而液体压力激波的关键技术之一是压电陶瓷的激励电源。

液体压力激波激励电源实质上是一个功率信号

发生器, 产生一定频率的正弦(或类似正弦)信号。目前国内压电陶瓷的激励电源以低频, 小功率为主, 本课题所涉及的液体压力激波激励电源是高频大功率的开关电源, 设计指标为频率 1MHz 左右, 功率千瓦级, 效率大于 70%, 工作稳定。

基于上述考虑, 我们研制了基于复合式隔离的双端正激的大功率高频超声电源。

2 电路拓扑结构及工作原理

2.1 电路的拓扑结构

电路简要拓扑结构如图 1, 采用双端正激电路, 直接利用直流电压供电, 初级绕组 L_1 、 L_2 上下对称, 极性相反(各绕组的 1 为同名端), 共用同一磁芯, 除了 4 个高频大功率场效应管以外, 还有 4 只续流二

* 国家自然科学基金(05305011)资助项目; 江苏省自然科学基金(BK2003090)资助项目; 航空科学基金(041152058)资助项目

极管,保证逆变可靠性。

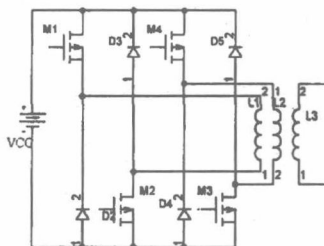


图1 电路的拓扑结构

2.2 电路工作原理

电路工作原理见图2所示。工作状态可分为两个相同的部分,每部分与单端正激的工作状态相似。当M1、M2同时开通,M3、M4同时关断时,初级L1有电流通过,次级绕组产生正电压(以图示为参考方向),当M1、M2同时关断,M3、M4同时开通时,初级L2有电流通过,在次级绕组产生负电压(以图示为参考方向),对于M1、M2来说 t_0 到 t_1 为场效应管的开通过程所需时间, t_2 到 t_3 为场效应管的关断过程所需时间,而对于M3、M4与M1、M2正好相反。

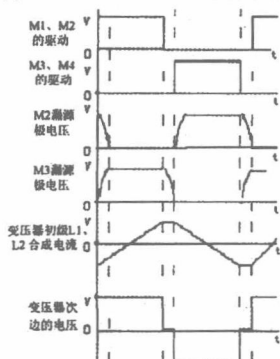


图2 电路工作原理示意图

2.3 主变压器的磁变化规律

当M1、M2开通时,直流电压加在初级绕组L1上,可得公式(1):

$$i = \frac{1}{L} \int_{t_1}^{t_2} U dt + I_0 \quad (1)$$

U 为输入直流电压VCC, L 为高频变压器的等效励磁电感。在电路工作达到稳态后,当开关管M1、M2导通时对应的励磁电流初始值 I_0 应为负值,励磁电流是以斜率 U/L (常数)从负到正线性增加(这里特别要注意 I_0 是指励磁电流,不是指流过L1的电

流,流经L1的电流是由其励磁电流和总负载电流合成的,因而L1中电流的大小还取决于负载的轻重)。

当M3、M4开通时,与M1、M2类似,励磁电流的初始值 I_0 为正值,故此期间励磁电流是以斜率 U/L 从正到负反向线性增加的。



图3 磁势变化规律

从上面的分析我们不难看出主电路高频变压器的励磁磁势是依照规律(图3)而变化的,使得主磁通在第1、3象限内对称的交变,满足双端正激式控制的要求,变化规律中的维持恒定时间由场效应管的PWM占空比决定,而对于本电源来说维持时间很短,约为整个周期的5%不到,主要是用来防止M1、M2和M3、M4同时导通的。

3 Pspice 仿真及分析

本电路可行性研究是通过Pspice9.2软件仿真完成的。

仿真采用Pspice内置的元件:高频变压器的模型由电感元件L(电感量都为200μL)和耦合系数元件K(等于1)构造而成。场效应管的开关频率为1MHz,仿真时间为10μs,直流电压取50V,场效应管的驱动信号用四个脉冲电源代替,压电陶瓷用一个30欧姆的电阻,一个3.33μH的电感,7.59nF的电容串联来代替。

选取 $\Delta=2\mu s$ (4μs到6μs)的波形如图4所示的几组波形,它可以充分完整的说明前面分析的原理。

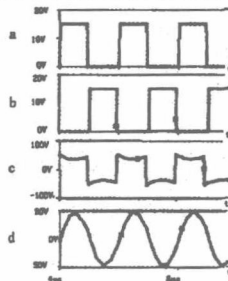


图4 仿真波形

下面对各组波形加以说明和分析:a是周期为