

南京航空航天大学
论文集

(二〇〇五年) 第17册

机电学院

(第1分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇〇六年三月

机电学院

051 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	卜林森	副教授	051	汉代铜镜装饰风格探微	苏州工艺美术职业技术学院学报	2005. 2
2	卜林森	副教授	051	非纯美术历史发展规律 探析	装饰	2005. 1
3	朱小春 徐龙祥	硕 士 教 授	051	新型永磁同步无轴承电 机的设计	机械工程与自动 化	2005. 3
4	王 军 徐龙祥	博 士 教 授	051	磁悬浮轴承转子位移自 检测系统研究	传感器技术	2005.24.3
5	杨朝英 徐龙祥	硕 士 教 授	051	磁轴承系统中差动变压 器式位移传感器的研究	传感器技术	2005.24.9
6	徐龙祥	教 授	051	HIGH TEMPERATURE DISPLACEMENT SENSOR	CHINESE Journal of mechanical engineerng	2005.18.3
7	燕惠芳 陈炳发	硕 士 教 授	051	金相组织自动识别技术 的研究	东华大学报	2005.31.4
8	姜俊杰 陈炳发 燕惠芳	硕 士 教 授 硕 士	051	基于Java 3D技术的虚 拟随机场景生成及其应 用	东华大学报	2005.31.4
9	薛红艳	讲 师	051	“点线面动态构成”一 研究工业设计史的科学 方法	艺术百家	2005.85
10	薛红艳	讲 师	051	汉代墓葬艺术中的阴阳 素	英学与艺术学研 究	2005.4
11	岳 林 费庆国 张令弥	副教授 博士后 教 授	051	IMPROVERMENT ACCURACY OF SYSTEM IDENTIFICATION BASED ON MORLET WAVELET	南航学报（英文 版）	2005.22.3
12	郭勒涛 张令弥	讲 师 教 授	051	结构动力学有限元模型 确认方法研究	应用力学学报	2005.22.4
13	郭勒涛 张令弥	讲 师 教 授	051	以冲击响应谱为响应特 征的有限元模型确认	振动与冲击	2005.24.6

14	郭勒涛 张令弥	讲 师 教 授	051	IDENTIFICATION OF THE MECHANICAL JOINT PARAMETERS WITH MODEL UNCERTAINTY	中国航空学报 (英文版)	2005.18.2
15	戴维康 孙传伟 李靖谊	硕 士 讲 师 教 授	051	直升机飞行品质评估系 统的TCL/TK和C/C++混 合编程	东华大学学报	2005.31.4
16	李靖谊 梁 春 祝恒云 严潮红	教 授 博 士 博 士 硕 士	051	基于计算机仿真的虚拟 自动生产线实验系统	东华大学学报	2005.31.4
17	熊亚莉 谢小刚 周小蔚 李靖谊	硕 士 硕 士 工 程 师 教 授	051	面向教学评估的人事信 息管理系统的设计	安徽理工大学学 报	2005.25.4
18	周 瑾	副教授	051	基于小波包神经网络的 制动系统安全监测	传感器技术	2005.24.1
19	张荣荣 朱如鹏	硕士生 教 授	051	2K-H行星齿轮传动稳健 优化设计	机械工程师	2005.5
20	曹如球 朱如鹏	硕士生 教 授	051	EDMA在WCDMA基带 处理上的应用	机械科学与技术	2005.25.4
21	许兆棠 朱如鹏	博士生 教 授	051	直升机复合材料传动轴 的主共振分岔分析	机械科学与技术	2005.24.11
22	付自平 朱如鹏	硕士生 教 授	051	正交面齿轮加工的计 算机仿真	机械工程师	2005.9
23	程显富 朱如鹏	硕士生 教 授	051	数字查片仪的调焦原理 及实现方法	机械工程师	2005.12
24	鲍和云 朱如鹏	博士生 教 授	051	两级星型齿轮传动动态 均载特性分析	航空动力学报	2005.20.6
25	徐 锋 朱如鹏	硕士生 教 授	051	镜架扫描仪机电系统的 设计	机械工程师	2005.2
26	刘 双 朱如鹏	博士生 教 授	051	计算机立体视觉图形开 发	电气技术与自动 化	2005.34.2
27	朱龙英 朱如鹏 刘正坝	博士生 教 授 教 授	051	基于信息公理的产品设 计方案评价方法	南航学报	2005.37.3
28	鲍和云 朱如鹏	博士生 教 授	051	基于Ma tlab的两级星 型齿轮传动的优化设计	工程设计学报	2005.12.4
29	陈胡兴 朱如鹏 孟祥战	硕士生 教 授 硕 士 生	051	基于ANSYS的双圆弧齿 轮弯曲应力有限元分析	机械设计	2005.22.2
30	周 蓓 朱如鹏	硕士生 教 授	051	国内外飞机疲劳寿命分 散系统计算	机械工程师	2005.2
31	许兆棠 朱如鹏	博士生 教 授	051	弹性多支点传动轴弯曲 主共振的影响因素分析	工程设计学报	2005.10

32	许兆棠 朱如鹏	博士生 教授	051	多支点传动轴扭转主振型的正交性	中国航空学会第十一届机械动力传输论文集	2005.10
33	张荣荣 朱如鹏	硕士生 教授	051	一种低齿面滑动齿轮齿廓的设计方法	中国航空学会第十一届机械动力传输论文集	2005.10
34	付自平 朱如鹏	硕士生 教授	051	正交面齿轮插齿加工的计算机仿真	中国航空学会第十一届机械动力传输论文集	2005.10
35	许兆棠 朱如鹏	博士生 教授	051	直升机尾传动系扭转振动的一种分析方法	中国航空学会第十一届机械动力传输论文集	2005.10
36	鲍和云 朱如鹏	博士生 教授	051	基于均载要求的星型齿轮传动系统误差的静力学设计研究	中国航空学会第十一届机械动力传输论文集	2005.10

汉代铜镜装饰风格探微

卜林森

一、汉代铜镜历史简述

在我国历史上,铜镜的发展经历过几次较兴盛的时期。第一个高峰始于战国。战国是中国封建社会的开端,物质文化已经进入铁器时代,同时,随着农业生产的发展,青铜礼器的衰退,制铜业转向日常生活用品,推进了铜镜的发展。当时出现了大量铸造精美、装饰考究的铜镜。铜镜发展的第二个高峰是在汉代。汉代是中国统一多民族封建国家的强盛时期,经济和文化都达到了前所未有的高度,各个方面都为汉民族文化的形成奠定了基础。当时陶瓷业的进步和漆器的发展,虽然代替了青铜器皿在人们日常生活中的地位,但制铜工艺并没有衰退,而是转向了制造铜镜等方面。因此,两汉时期铜镜的铸造业获得了重大发展,出现了新的高潮。

在我国古代铜镜发展的历史中,汉代铜镜有着重要的地位。两汉时期包括西汉、新莽、东汉,这时的青铜器失去了早先神圣的光辉,不再占有主导地位。冶铁技术的成熟使青铜器的应用范围日益缩小,青铜器的发展逐步走向生活实际的方面。铜镜是当时普遍的生活用品,不仅是汉代女子梳妆时使用的主要用具,而且也是民俗中的随葬物品。两汉时期铜镜的纹饰较之战国铜镜已有了很大的变化,表现技法从战国单线勾勒到浅浮雕、高浮雕。在纹样的处理上,汉代铜镜打破了战国时期纹样的单一化。抽象纹样与具象纹样的相互运用,铭文的图形化,几何装饰形的巧妙运用,在汉代铜镜中都有很好的体现。

西汉早期的铜镜仍然延续着战国铜镜的风格,具有战国晚期典型装饰纹样的“山”字纹、蟠螭纹镜在当时很流行。在汉武帝前后,铜镜图案布局和纹路也有新的变化,出现了以四乳钉为基点组织的四分法布局形式,主纹突出,地纹逐渐消失。主题纹饰素朴,图案结构简单,改变了战国时期那种严谨的细密风格,其中草叶纹镜最为多见。再往后,星云纹镜又成为时尚。西汉中后期草叶纹镜、星云纹镜继续流行,日光镜、昭明镜也成为主要镜型。西汉晚期至东汉中期,规矩镜成为最精美的类型,纹饰以四神为主,图案有四神、动物、禽鸟及羽人之类,活泼生动。纹饰布局突破了“心对称”古代样式设计,出现了“轴对称”式新风格。新莽至东汉早期的铜镜装饰又有了新的变化,除西汉后期常见的几种镜外,开始流行鸟兽纹镜、神兽纹镜。东汉中期,神兽画像镜开始风靡起来。此外,“透光镜”的出现,也给汉代铭文镜带来极大光彩。所谓透光镜,是指将镜面对日光或其它光源时,与镜面相对的墙壁上能映像出镜背纹饰或铭文字样的铜镜。

总的来说,汉代铜镜可分为前后两个时期,前期的铜镜多平雕,纹饰平整,富有装饰性,主要有蟠螭、星云纹、草叶纹、重圈纹、兽面纹等纹饰。后期的铜镜,镜面渐呈微凸状,装饰纹样有规矩纹、禽兽纹、神兽纹、人物画像纹等。

二、汉代铜镜主要装饰纹样及其艺术特点

西汉高祖至文景帝以前,社会处于经济恢复时期,铸造工艺发展不快,仍沿用战国铜镜的风格,到“文景之治”以后,特别是武帝继续推行休养生息的政策以后,社会安定、经济繁荣,这时铜镜铸造才出现了高潮,产品质量提高,数量也增加了。汉代时期的铜镜已经成为了人们日常生活中的必备品,并作为商品流入社会。随着审美情趣的提高,那时的人们不单单满足于战国铜镜上较为简单的抽象装饰纹样,而是更加偏爱复杂具象的装饰纹样。这些复杂的纹样能更加明确清晰地表达人们升仙、辟邪和祝福的美好愿望。所以到了汉代,战国铜镜那种抽象的纹饰已不复存在,代之而起的是新颖的草叶纹、星云纹。

草叶纹镜的基本形式是在圆形的镜面正中套有一个正方形框,这与其它镜子的圆中套圆的结构完全不同。直线与圆形镜面的弧线相互搭配,比单纯地运用圆要更为生动。在方框内角通常有方形对角斜线图,框内有篆书铭文,如“日月之光,天下大明”。篆书铭文在方框中沿边缘规矩排列,同时又由于汉字是方块字的构架,所以在方框中就自然而然地呈现出方形的几何效果,铭文的几何图形化在这里充分体现。在方框的四角一般还配有草叶形瓣状的纹样,有的是双叶花枝,有的是桃形叶。这种草叶纹多偏于具象,而铭文却是极为抽象的,具象与抽象的交替表现,使草叶纹镜更具有装饰性。

星云纹镜的主题纹饰是数目不等的小乳丁,用曲线相连,从构图上看,这些乳丁可以归为点。在乳丁的周围伴有许多的弧纹,这些弧纹可以理解为线,其形状很像天文星象图,故称星云纹。众多的点与众多的线在星云纹镜中反复体现,无形中构成了一个完美的面。

草叶纹、星云纹的花纹装饰受当时帛画、壁画、石刻的直接影响,往往以绘画、双勾阳线的表现技法出现于镜背,围绕镜钮组成同心圆的多层连续图案,并用四分法把纹样分成四等份,构成既对称又连续的圆形装饰图案。草叶纹镜是四方装饰对称的草叶形,有的象花瓣,有的象草叶,装饰性很强。星云纹镜的镜纹由蟠螭纹演变而来,更加抽象化。

在用线上,帛画对人物的描绘多采用匀细而刚劲的线条,但描绘动物和器物,则运用浑厚朴实的粗线。星云纹镜中的乳丁就如同用墨点上上去的一个个大墨点,是粗犷的,而乳丁周围的曲线则是精细的。帛画中的抽象与具象的结合也为草叶纹、星云纹镜提供了艺术上的借鉴。

从题材上看,草叶纹和星云纹镜已趋于写实,内容与当时社会上流传的羽化升仙、祥瑞辟邪说法相吻合。还出现了条带式的铭文,都是祝福式的吉祥韵语。

神仙思想形成于战国，至汉代演变成一种全社会的普遍信仰。这一时期，从皇宫贵族到平民百姓，其生活的每一个角落都飘散着仙灵的迷雾。人们狂热地信奉着道教。汉代铜镜也是这种社会意识形态从一个侧面的具体体现，反映了这个时代的信仰狂潮。

道教虽然产生于东汉，但是作为道教核心内容的神仙信仰远在战国时楚国的诗歌中就已出现，秦汉时黄老思想兴起，升仙之说盛行，秦始皇、汉武帝等均追求长生不老之道，而好神仙。这种思想直接影响了当时铜镜的纹饰。受向往神仙升天、渴望祥瑞的人文思想的影响，东汉最为常见的神兽纹镜的装饰纹样中间往往穿插着青龙、白虎、朱雀、玄武等鸟兽图案，并配有相应的铭文，充分反映了当时阴阳五行观念和神仙方术的盛行。

此外青铜技术的成熟也使铜镜工艺表现出一种不断革新和提高的势头。受当时画像石、砖的影响，装饰图案上的人物和动物已普遍流行，整个构图，除中间一圈动物外，是由许多同心圆组成的，收到稳定而严谨的效果。这种铜镜发展到东汉后期，动物形象浮雕化，加入人物神仙，外缘的云纹复杂化，更自由灵活。在技法上，吸收了汉代画像石和画像砖的表现手法，多采用减地平起（即在磨平的石面上用阴线刻划好物象后，将物象轮廓以外减低，使物象呈平面凸起，物象有平面隐起的感觉）和高浮雕刻法（同浅浮雕，而物象外剔地较深，物象浮起特高，细部层次起伏明显，有较强的立体感）来表现物象，其效果如剪影一般。在大量汉画作品中物象细部，如人物的脸、手等部位用阴线刻加以表现，进一步显示出物象的层次，收到更为逼真的艺术效果。同样在神兽纹镜中，对神兽的刻画也是细致的，是精彩的细节装饰。汉代画像石和画像砖是在砖石上做雕刻效果，而铜镜则是在金属上加以表现。两者的效果非常相似，只是他们的材质有所不同而已。

神兽纹和画像纹的出现，是前所未有的。神兽镜是以浮雕手法表现主题纹饰神像、龙虎等题材的镜类。这种镜将南极老人、伯牙、钟子期、东王公、西王母、句芒、黄帝、玉皇大帝等神像和青龙、白虎、朱雀、玄武四神以及其它神兽按一定方式排列布局。如重列式纹饰神兽镜，神像居中自上而下分成五段，每段又有不同人物的排列。在神像周边配置青龙、白虎、朱雀、玄武于钮的左右。这种排列看似简单，其实是有几何规律的。它无形中按照了三等分、四等分或八等分来分割画面，使构图更加均匀，视觉也更为平稳。学者们称其为“轴对称式”、“阶段式”、“重列式”。

无论是在西汉或者是在东汉，铜镜上往往铸有句数不等的三言或七言铭文，它字体多样，文辞内容丰富。这时铜镜铭文的演变规律接近书写文字，字体多为小篆间杂汉隶。

最初，铭文多出现在钮座外，句法往往加“兮”字，比较接近楚辞的文风。后来，铭文占据了重要位置，有的甚至取代了纹饰。这时铭文的字体笔书，除尚方镜中能保持整齐划一的姿态外，一般铜镜则不同于汉初谨严不苟的作风，出现了代用字、简笔字及句中缺字等现象。这种状况之所以能被社会习俗接受，是因为简字、代字在当时大众中已广为流传，故凡遇到笔画较繁或文字较生涩的字，多以简字来代替，如最常见的“古”代“贾”，“守”代“兽”，“次”代“饮”，“周”代“雕”等。“守”和“兽”在读音上非常相似，但“守”的笔画要比“兽”简单很多。在铜镜的制作上也就相对容易，而且笔画层次的单一也可以突出铭文的几何装饰效果。用“周”代“雕”，是简化了“雕”的一个边旁，在习俗中人们是可以理解的，这样就缩减了汉字中的细节，突出其几何构架。这些简字既满足了汉字识别功能的需要，也满足了图形装饰的需要。

汉代铜镜虽为实用品，但造型千变万化，装饰纹样显示了汉代人博大的艺术气魄和高超的工艺水平。其文字结构、审美情趣在铜镜装饰中都达到空前的高度。它广泛地吸取了同时代帛画的绘画语言，画像砖和画像石的雕刻技法。东汉辉煌的书法成就也为铭文的装饰效果注入了活力。汉代铜镜纹饰所选用的题材和装饰手法具有很强的时代特性和艺术特点，为我们认识和研究古代社会提供了可靠的实物资料。

参考文献:

- [1] 贺西林,李松.中国古代青铜器艺术.西安:陕西人民出版社,1999
- [2] 英炬,扬爱国.汉代画像石与画像砖.北京:文物出版社,2000
- [3] 邓苏.中国古代史.南京:江苏人民出版社,2002
- [4] 孙立谋.铜镜鉴赏.沈阳:辽宁画报出版社,2001

(卜林森,南京航空航天大学机电学院讲师)

非纯美术历史发展规律探析

Analysis to Laws of Development of Non Fine Arts History

卜林森 Bu Linsen

内容摘要: 本文把美术分为纯美术和非纯美术两大类, 并从自然界的角度和文化人类学的角度分析了非纯美术历史发展的规律。

关键词: 纯美术 非纯美术 工艺美术 工业设计

通常情况下, 美术可分为两大类: 一类名为纯美术, 即一种纯欣赏性的美术, 如油画、国画、版画等; 另一类称谓不一, 根据其基本性质, 与纯美术相对, 因而可称之为非纯美术, 这类美术具有实用性质, 与人类具体生活相关联。现有的称谓是: 实用美术、应用美术、工艺美术、工业设计等。非纯美术通称的不确定性与其历史发展相关, 尤其是与区别于纯欣赏性美术的使用性有关。随着社会生产力的提高, 新的物态形式不断更新, 与其相应的生产方式和生活方式也不断更新, 非纯美术必然会因时代而异。因此必须从非纯美术的历史发展来弄清它的本质和发展规律。

从自然界的角度看, 物界的变迁更替经历了四种自然形态, 它与人类生产方式、生活方式更替的阶段及其特征是完全一致的。第一自然形态: 体现为人与自然的同一, 人类主客体不分, 以为自己受制于外物界某种生灵, 于是导致图腾的产生; 第二自然形态: 已经建立了主观经验, 开始意识到自身与自然动物界的区别, 人与自然开始分离, 有了异于动物的审美行为; 第三自然形态: 开始把客体当作主体认识提高的参照物, 已具备独立使用有利于自身发展的因素进行“运算”的能力, 有着启蒙的意义; 第四自然形态: 对客体的认识日臻完善, 重新回到对自身的质疑——进而返归自然, 使主体在客体的作用下表现出纯粹主体的心灵活动, 真正成为有知识和智慧的主体。这四种自然形态可简述为: 人与自然的同一; 人与自然的分离; 人与客体的分离; 人与主体的分离。显然, 人类的文化产生于第一自然形态与第二自然形态的交接处, 即渔猎社会旧石器时代末、新石器时代初, 因为此期人类开始有了独立于物质生产的纯粹精神性生产。

非纯美术每一个新形态都是对前一个形态的纠正与完善。如工艺美术重感性的人文特征正是由于纠正手工艺的粗陋与不完善而形成的; 工业设计重理性, 科学实证之特征也是由于纠正工艺美术虚饰“美化”的偏激发展而形成的。这种转换可以认为是一种量变, 也可以

认为是一种质变。量变的结论是基于非纯美术总类的角度, 质变的结论是基于每一形态之间的本质差异。转换中每后一个形态都表现为对前一形态的矫正而形成了自己的特色。没有工艺美术的感性人文追求, 就不可能使手工艺升华为精神层次的文化活动; 同样, 没有工业设计把物质更新作为系统人性中精神更新的基础, 就不可能使工艺美术抛弃“粉饰、美化”观, 成为真正指导造物活动的精神文化。这种相互依赖、相辅相成又相互扬弃的发展, 正是人类文化不断平衡、完善发展的模式——朝着最高之感性之与最高之理性相重合的方向发展。

在非纯美术发展的进程中, 任一阶段的形态成为主导形式后并不排斥原形态, 而将其作为新形态趣味风格的调节手段。工艺美术重人文、意匠表现的特征仍然把手工艺作为达到这一目的的手段; 工业设计重理性、功能的特征也未必能使工艺美术退出历史舞台。在一些工业设计的环节中, 如大机器生产试验、样品制作、开模等仍然是通过手工艺来实现的。因此, 同一形态层次会存在多种生产方式和多种趣味: 工艺美术以手工生产为主、机器生产为辅; 工业设计以机器生产为主、手工生产为辅; 而后工业设计则以信息工业为主、机器生产为辅。

就非纯美术形态而言, 我国正处于工业设计阶段。工艺美术仍会作为新形态的调节手段与工业设计并存。很多人把工业设计理解为工艺美术的现代化, 生产部门往往把工业设计纳入工艺美术的门类中去。这就极可能造成用农业社会建立起来的狭义价值观和民族心理来衡量工业设计的价值, 把科学文化民族化, 形成小生产的理想。工艺美术的以局部度全局的农业社会狭义价值观主要来源于对文化的错觉。因为文化史的概念产生于人类有了独立于物质性生产的精神性生产, 人们误认为人类的发展进化完全是由人类区别于动物属性的精神意识形态的独立发展推动的。文化就被定义为本脱离动物属性的一部分精神哲学。文化的本质在于把某种外在于他的东西引入自身的发展中。在当今世界, 文化发展已不再被理解成个人的、独特的艺术品更替过程, 而应理解为包括生活、环境所有范围的一个综合过程。因此, 文化由狭义向广义的拓展是必然的, 工艺美术是一个时代的产物, 它仅仅是非纯美术形态中代表那个时代的风格形式而已。

从文化人类学的角度看, 人类所建立的不更新任何阶段的生产方式与生活方式结构, 都反映出人类具有一种自我调节、完善的能力, 使人类始终保持着朝群体有益的方向发展, 并选择必要的行为来保证这种调节的有效性, 这便是文化广义性拓展的根本动因。从这一角度看, 文化的价值与美学的价值相异, 它不求个体理想的绝对美, 而追求一种群体系统完善的伦理目的性美, 一种“相对美”。所以, 美的价值是以文化的价值为前提的, 或者说, 两者从来就不应分离。这是人类文化发展规律及非纯美术历史的发展给我们的启示。

以中国传统文化为基础的工艺美术遇到的责难, 是社会历史、人类文化规律发展的必然, 是其内部结构纵向运动的结果。新的生产方式需要与新的生活方式相适应, 新的文化才能导致新文明的建立。因此, 非纯美术历史的发展所表现出来的人文文化与科学文化的冲突, “人道”与“物道”的冲突、感性与理性的冲突、“美化”与设计的冲突以及现代与后现代的冲突、技术与高技术的冲突、共性与个性的冲突、理性与非理性的冲突, 本质上都是人类文化发展的悖论冲突, 是文化发展的必然过程。

综上所述, 非纯美术历史发展受到不断转换更替的生产方式与生活方式的影响。纵观自有了文化概念以来的造物活动, 它们有一个相同的特征, 那便是设计。很显然, 无论是工艺美术还是工业设计都必须经历一个从构思立意到制作完成的过程, 这就是设计过程。其实自人类一开始从事造物活动时, 设计的特征就已包涵在里面, 只是由于生产方式的更替给造物手段带来的影响太大, 以致淹没了设计的特征。如工艺美术受传统手工制作和纯美术的影响, 工业设计受工业大机器生产的影响等。设计一开始就是在这些不断更新的制作手段中实现的, 因而其每一步都打上了生产方式的烙印。但是, 可以肯定, 非纯美术越是发展到高级阶段, 生产方式对它的影响就会越小。因此, 后工业设计时代将会是一个更加合“情”合“理”的设计时代。

参考文献:

- ① [美] 西美尔:《论文化的本质》, 对外翻译出版社, 北京, 1991。
- ② 张应杭主编:《中国传统文化概论》, 上海人民出版社, 2002。

卜林森 南京航空航天大学机电学院

文章编号: 1672-6413(2005)03-0042-03

新型永磁同步无轴承电机的设计*

朱小春¹, 徐龙祥²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 对一种新型薄片式永磁同步无轴承电机的设计进行了分析。从无轴承电机和普通永磁电机的基本原理出发, 通过对各种转子结构的比较, 研究它们的磁场分布, 提出了一套优化的转子结构。与传统的电机相比, 内转子薄片式永磁同步无轴承电机的结构比较特殊, 它的运行原理、分析和设计与普通无轴承电机有着较大的不同且应用前景广阔。着重阐述了内转子薄片式永磁同步无轴承电机的工作原理和控制方法。

关键词: 无轴承电机; 磁悬浮技术; 永磁电机; 转子设计

中图分类号: TM 301.42 文献标识码: A

0 引言

20世纪30年代各国开始研制永磁同步电机(简称PM SM), 由于其具有结构简单、体积小、效率高等一系列优点, 在工业生产、民用等方面得到了广泛应用。将无轴承技术应用到永磁电机上, 有利于发挥其优点, 使其在高速甚至超高速领域得到发展。作为一种新型的电机, 永磁无轴承电机的发展才经历了十几年, 研究水平还远远没有达到系统和完善的地步。国外的研究进程领先于国内, 日本、德国等国家已经大力开展对这项高新技术的研究, 处于世界领先水平^[1]。

为了实现对转子的径向悬浮控制, 在普通永磁电机转矩绕组中加入另一套悬浮力绕组, 两套绕组的磁场通过气隙相互作用产生径向力, 合理的控制该力就可实现转子的悬浮, 而电机的旋转力矩由原来的转矩绕组产生, 从而形成了无轴承永磁电机^[1~6]。

本文介绍了一种新型电机——内转子薄片式永磁无轴承电机。该电机在结构上是主动磁轴承和永磁电机的组合, 由于是薄片式永磁电机, 可以保证三个自由度的被动稳定, 且可以实现转矩绕组和悬浮力绕组的解耦控制。实验证明, 这种新型无轴承电机能实现转速 $n \leq 12\,000\text{r/min}$ 时的稳定运行^[2]。通过分析永磁转子在气隙处的磁场分布, 阐述了此种新型电机转子结构的优化设计。

1 运行原理

无轴承永磁电机是根据磁轴承结构与永磁电机定子结构的相似性^[7], 把磁轴承中产生径向力的绕组叠加到电机的定子绕组上。永磁无轴承电机对于不同的转子结构型式, 其工作原理基本一致。

1.1 基本结构

一台普通的永磁无轴承电机由两个无轴承电机单元(每个是2个自由度)和一个轴向磁轴承构成^[1]。而我们研究的这种新型电机在结构上和普通永磁无轴承电机有着一定的差异, 其最大的差异在于它的转子是薄片式永磁转子, 厚度只有10mm。将很薄的永磁体贴在转子表面形成 M 对极的转子, 这样就能保证轴向的被动稳定, 所以我们只需控制两个径向力和电机的旋转。而且当满足电机绕组的极对数 $M \geq 3$ 时^[2], 就保证了径向力的控制和电机旋转控制的自动解耦。定子上有两套绕组: 一套是悬浮控制绕组, 一套是转矩绕组。悬浮控制绕组的绕制方法是在径向 x 和 y 方向上各绕一套两极绕组。

1.2 悬浮力产生原理

内转子薄片式永磁无轴承电机的悬浮力产生原理可以从图1所示的简化模型得到解释。

图1是产生向上悬浮力的原理图, 其中的绕组部分由转矩绕组和磁悬浮力绕组组成, 转矩绕组是三相

* 回国人员基金资助项目 (M 0061 无轴承电机的研究)

收稿日期: 2004-12-21

作者简介: 朱小春(1979-), 男, 江苏通州人, 在读硕士研究生。

交流绕组, 磁悬浮力绕组是两相直流绕组。只要控制 x 方向悬浮力绕组的电流, 使上端气隙处的磁通密度增强, 而下端气隙处的磁通密度减小; 如果 x 方向悬浮力绕组通相反的电流, 则转子受到 y 负方向的磁悬浮力。同理, 控制 y 方向悬浮力绕组电流的大小和方向, 则可以产生 x 方向上的磁悬浮力。

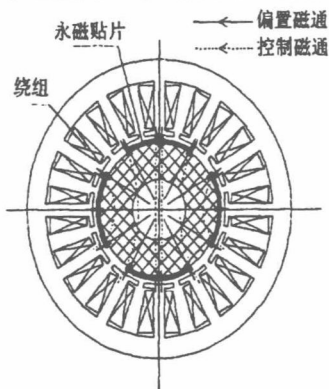


图1 磁悬浮力产生的原理图

1.3 控制系统

内转子薄片式永磁无轴承电机的控制系统见图2。由于电机结构设计能使转矩绕组和悬浮力绕组的控制自动解耦, 因此径向力和电机旋转可以分散独立地控制^[2]。

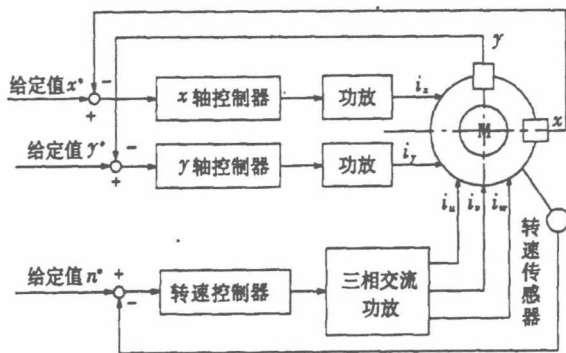


图2 控制系统结构框图

2 转子结构的优化设计

永磁电机与其它电机最主要的区别是转子的磁路结构, 所以永磁无轴承电机因转子结构的差异而表现出不同的性能。

2.1 转子结构的分类

永磁无轴承电机的转子结构总的来说可以分为内插式和表面式, 表面式又有表贴式和表嵌式两种, 分别如图3(a)、图3(b)和图3(c)所示^[6,7]。

表面式转子的制造工艺简单、成本低, 应用较为广泛。内插式转子结构比较复杂, 广泛用于要求有异步启动能力或动态性能高的永磁电机。对于我们研究的这种采用稀土永磁的电机来说, 由于永磁材料的相

对回复磁导率接近1, 所以表面贴片式转子在电磁性能上属于隐极转子结构; 而表面嵌入式转子的相邻永磁磁极间有着磁导率很大的铁磁材料, 故在电磁性能上属于凸极转子结构^[7,8]。



图3 永磁转子

2.2 转子的优化设计

永磁内转子薄片式无轴承电机的转矩绕组是三相交流正弦波绕组, 考虑到隐极式的永磁电动机的数学模型相对比较简单 (因为交轴同步感抗 L_{mq} 和直轴同步感抗 L_{md} 相等), 而且永磁无轴承电机要求永磁体的励磁磁场尽量接近正弦分布以避免谐波磁场对悬浮力的影响, 所以我们采用了永磁表贴式的转子结构, 永磁材料是钕铁硼 (NdFeB)。

传统表贴式转子的永磁体是均匀地贴在转子的表面, 这样在电机气隙处产生的是矩形波的磁密, 谐波分量较大。我们设计的转子在结构上对其进行了优化, 图4为永磁贴片的平铺图, 图5为永磁转子的正视图。

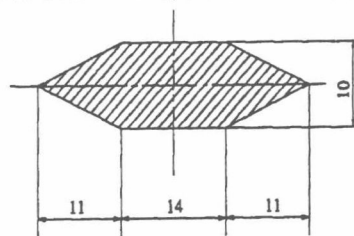


图4 永磁贴片的平铺图

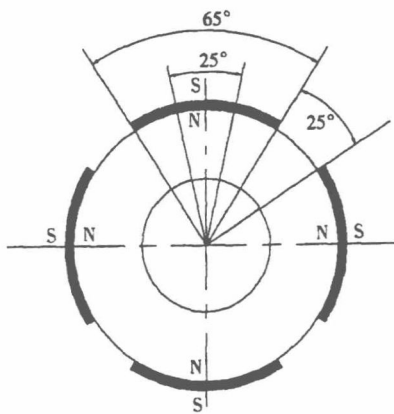


图5 永磁转子的正视图

如图4、图5所示的设计方案中, 永磁转子在气隙中形成的是八极磁场 ($M=4$), 和电机绕组的极对数相

同且满足了自动解耦的条件 ($M \geq 3$)。下面我们对永磁贴片在气隙中产生的磁场密度进行分析。

图6是在 $\omega t = 0$ 时刻, 永磁贴片在气隙中的磁密分布图。其中永磁贴片在气隙中的磁密 B_1 是由所选

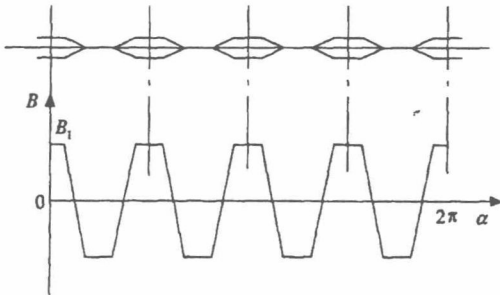


图6 永磁贴片在气隙中的磁密分布图

永磁材料的退磁曲线和气隙来计算确定的。因为图6中的分布函数是偶函数, 分解中只含余弦项; 又因为上面的分布函数与横轴对称, 分解中仅含有1、3、5等奇次谐波。对图6中的波形进行傅立叶变换可以得到各次谐波的系数为:

$$a_n = \frac{8}{\pi} \int_0^{\pi} f(\alpha) \cos n\alpha d\alpha \quad (n = 0, 1, 2, 3 \cdots)$$

所以: $a_1 = 1.17B_1$, $a_3 = -0.17B_1$, $a_5 = 0.02B_1 \cdots$ 。这样:

$$f(\alpha) = 1.17B_1 \cos \alpha - 0.17B_1 \cos 3\alpha + 0.02B_1 \cos 5\alpha \cdots$$

从上式中我们可以看到其它谐波分量的比重很小, 尤其对于三次以上的谐波, 所以可以近似用基波分量代替整个磁感应强度的分布。

这种设计方案较传统的方案有以下的优点: ①减轻了转子的体积和重量, 这样对永磁贴片厚度的要求可以适当放宽; ②传统方案在气隙中形成的是方波, 谐波分量很大, 而这套方案在气隙中形成的是近似正弦磁场, 这样避免谐波磁场对悬浮力的影响, 从而显著

提高了该电机的性能。

3 结束语

本文设计了一种新型电机——内转子薄片式永磁同步无轴承电机, 研究并提出了该电机转子结构的优化设计。这种转子结构的优化设计将大大地改善此种电机的性能, 应用前景广泛。

参考文献

- [1] 陈保进, 朱焜秋, 王德明 无轴承永磁同步电机基本原理及研究现状[J] 排灌机械, 2003(1): 42-45
- [2] Okada Y, Shimonishi T, Seung-Jong Kim, et al Development of hybrid type self-bearing slice motor for small and high speed rotary machines[J] IEEE, 2001, 3: 2005-2012
- [3] Mark A Casemore, Lyndon S Stephens Actuator gains for a toothless permanent magnet self-bearing motor [J] IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(6): 4482-4489
- [4] Fengxiang Wang, Longya Xu Calculation and measurement of radial and axial forces for a bearingless PMDC motor[J] IEEE, 2000, 1: 249-252
- [5] Inagaki K, Chiba A, Rahman M A, et al Performance characteristics of inset-type permanent magnet bearingless motor drives[J] IEEE, 2000, 11: 202-207
- [6] Baoguo Wang, Zheng Wang, Fengxiang Wang Levitation forces control by current vector orientation for a bearingless motor with hybrid rotor structure [J] Electrical and Computer Engineering, IEEE, 2003, 1: 383-386
- [7] 唐任远 现代永磁电机理论与设计[M] 北京: 机械工业出版社, 1997
- [8] 王会宗 磁性材料及其应用[M] 北京: 国防工业出版社, 1989

Design of Self-bearing Slice PM Motor with Inner Rotor

ZHU Xiao-chun¹, XU Long-xiang²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract The design of a new type of self-bearing slice PM motor is analysed. Based on the basic principle and theory of self-bearing motor and traditional PM motor, this paper makes a comparison between some different kinds of rotor structure by probing into their flux distribution, then an optimized rotor structure is proposed. Due to its unique structure, self-bearing slice motor with inner-rotor is very different from traditional PM motor as far as its function theory, analysis, design as well as its great potentiality for application is concerned. The function theory and control technique of self-bearing slice PM motor with inner rotor is also expatiated in this paper.

Key words: self-bearing motor; magnetic levitation; PM synchronous motor; rotor designing

磁悬浮轴承转子位移自检测系统研究*

王 军¹, 徐龙祥²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 研究一种无传感器磁轴承转子位置自检测的方法, 该方法不需要专用的位移传感器, 因为线圈的电感是转子位移的函数, 故其两端的电压也为转子位移的函数, 在磁轴承系统的线性功放的输入端注入一高频信号作为转子位置的测试信号, 将线圈端电压经过谐振电路来提取含有位置信号的高频电压信号, 再将电压信号进行精密半波整流后得到脉动的直流信号, 最后, 通过低通滤波器得到平滑的转子位移直流信号, 经由 PID 控制器和功放对转子位移进行闭环控制, 测试结果证明: 此方法是可行的。

关键词: 磁悬浮轴承; 无传感器; 位置自检测

中图分类号: TH133.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2005)03-0027-03

Study on automation detection system of rotor displacement of self-sensing magnetic bearing

WANG Jun¹, XU Long-xiang²

1. Coll of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Coll of Mech Elec, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A method of automatically detecting rotor position of self-sensing magnetic bearing is studied, in this method, no special displacement sensors are used. Because the winding inductance is the function of the rotor displacement, the winding voltage is also the function of the displacement. A high frequency signal as the testing signal of the displacement is injected into the input of linear power amplifier. Through the resonance circuit, the output voltage contains the information of the displacement, then this signal is transformed to the voltage signal, which is proportional to the rotor displacement by full wave rectification circuit and low pass circuit. This signal is put into a PID controller and power amplifier to realize the closed loop for the rotor displacement. Finally the experiment proves the feasibility of this method.

Key words: magnetic bearing; self-sensing; position automatic detection

0 引 言

为实现磁悬浮系统的位置可控, 则需要建立一个位置闭环的反馈控制系统, 即为磁轴承的位移检测系统。目前, 国内多采用位移传感器, 由于位移传感器的存在, 使磁悬浮轴承的轴向尺寸变大、系统的动态性能降低、成本较高、可靠性低, 而且, 由于结构的限制, 传感器不能装在磁悬浮轴承的中间, 使系统的控制方程相互耦合, 控制器设计较为复杂。

为了克服使用传感器带来的不便, 且降低磁悬浮轴承的成本, 出现新的研究方向——无传感器(自检测)磁悬浮轴承。在无传感器磁轴承系统中, 转子位移是根据电磁铁线圈上的电流或电压信号而得到的。因不需要位移传感器, 磁悬浮轴承转子的轴向尺寸变小, 系统的动态性能得到了提高, 特别适合在高速场合运行; 减少了传统位移传感器的故障, 提高了磁轴承系统的可靠性; 磁轴承的总体成本价格明显降低^[1,2]。

1 系统的工作原理和结构

本文研究单自由度无传感器磁悬浮轴承, 转子位移自检测的原理见图 1, 磁轴承结构见图 2。自检测系统^[3]主要由带通电路、一级放大电路、差动检测电路、解调电路、低通滤波电路等部分组成。磁轴承线圈含有阻抗和感抗, 其两端的电压除了作用在电阻上的直流分量外, 还有在电感上高频信号的交流分量。带通滤波器用来提取含有转子位移的中心频率 ω_0 成分, 滤除直流电压和 $2\omega_0$ 以上的交流电压。一般检测的结果信号较微弱, 通常需要进行一级放大后的上下两路信号通过差动电路相减得到含有中心频率 ω_0 的正弦信号, 将其精密半波整流后为脉动的直流电压, 再通过低通滤波器滤去除交流信号, 即可获得与转子的位移成比例的直流电压。控制器^[4]采用的是模拟 PID, 特点是成本低、容易实现、响应速度快, 但电路参数的确定比较

困难。功率放大器在磁悬浮系统中的作用是根据控制器的输出信号 u 自动地向电磁铁的线圈提供电流。功率放大器性能的好坏对磁轴承系统的动态性能有很大的影响。由于电磁铁线圈是一个由电感和电阻组成的负载,如果功率放大器的输出是电压,则流过负载的控制电流 I 会由于电感的影响而产生滞后作用,这对提高系统的动态性能很不利,故采用电压-电流功率放大器。功率放大器的输出与电磁线圈相连后,直接控制的就是线圈上的电流。

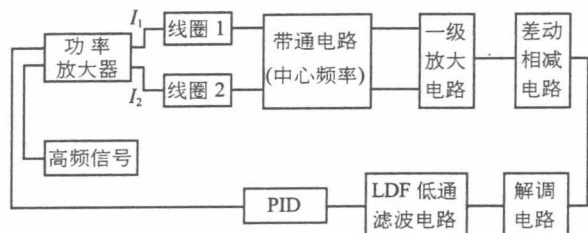


图1 磁轴承转子位移自检测系统的原理图

Fig 1 Schematic diagram of automation detection system of rotor displacement in AMB

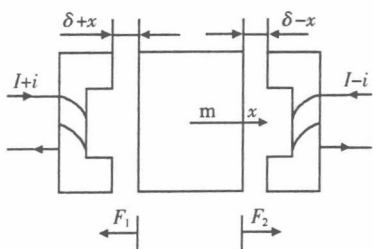


图2 单自由度磁轴承系统

Fig 2 Magnetic bearings of one freedom

图中, x 为转子位移, F_1, F_2 为转子 m 所受的磁力, I 为偏置电流, i 为控制电流

1.1 气隙磁感应强度

设转子上、下线圈的匝数各为 N , 忽略气隙的边缘效应、磁路的漏磁及材料的磁阻, i_0 为转子在平衡位置时的偏置电流, i_c 为控制电流, i_m 为高频测试电流, 转子向上偏离平衡位置的距离为 x 时, 在气隙处产生的上下线圈的磁感应强度为

$$B_1 = \frac{\mu_0 N (i_0 + i_c + i_m)}{2(x_0 + x)}; \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 N (i_0 - i_c + i_m)}{2(x_0 - x)}; \quad (2)$$

式中 μ_0 为真空磁导率; N 为线圈匝数; x_0 为平衡位置处的空气气隙; x 为转子位移。

1.2 磁悬浮的合力

由麦克斯韦方程可得作用在转子上的磁悬浮合力为

$$F = \frac{S(B_1^2 - B_2^2)}{\mu_0} = \frac{\mu_0 S N^2}{4} \left[\frac{(i_0 + i_m + i_c)^2}{(x_0 + x)^2} - \frac{(i_0 + i_m - i_c)^2}{(x_0 - x)^2} \right], \quad (3)$$

式中 S 为气隙磁极的截面积。

因 $F \gg mg$, 当转子稳定悬浮在平衡位置, 即在 $x=0$ 时, 理想上控制电流 i_c 为 0, 上式的合力为 0。由上式可知, 转子稳定悬浮时, 由于忽略转子的质量, 作用在上位和下位线圈上的电磁力相等, 使转子悬浮于平衡位置。

2 转子位移自检测的原理

由于主动磁轴承系统为开环不稳定系统, 故必须对转子位移进行检测, 以实现闭环控制。

在磁轴承系统中线圈的电感是转子位移变化 x 的函数^[3,4], 对电感在平衡位置 x_0 处进行泰勒级数展开, 上位电感有

$$L_1 = \frac{\mu_0 S N^2}{x_0 + x} = \frac{\mu_0 S N^2}{x_0} \left(1 - \frac{x}{x_0} + \frac{x^2}{x_0^2} - \Lambda \right). \quad (4)$$

由于 x 为一微小量, 可忽略二次及以上各项, 得到上下位线圈的电感

$$L_1 = \frac{\mu_0 S N^2}{x_0} \left(1 - \frac{x}{x_0} \right);$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 S N^2}{x_0} \left(1 + \frac{x}{x_0} \right). \quad (5)$$

设加入的高频正弦电压(电压幅值小, 且恒定)为

$$u(t) = U_m \cos \omega_0 t, \quad (6)$$

式中 ω_0 为正弦电压的中心频率; U_m 为正弦电压幅值。

此磁轴承系统中, 用电压-电流型线性功率放大器, 则通过功率放大后的高频电流为

$$i(t) = I_m \cos \omega_0 t, \quad (7)$$

式中 I_m 为高频电流幅值。

于是, 在上下 2 个线圈上产生的电压为

$$\begin{aligned} u_1(t) &= j\omega_0 L_1 i(t) + (i_0 + i_c) R_c \\ &= j \frac{\omega_0 \mu_0 S N^2}{x_0} \left(1 - \frac{x}{x_0} \right) (I_m \cos \omega_0 t) + (i_0 + i_c) R_c; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u_2(t) &= j\omega_0 L_2 i(t) + (i_0 - i_c) R_c \\ &= j \frac{\omega_0 \mu_0 S N^2}{x_0} \left(1 + \frac{x}{x_0} \right) (I_m \cos \omega_0 t) + (i_0 - i_c) R_c, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 L 为线圈电感; R_c 为线圈等效电阻。通过带通电路后滤除直流信号得到上两式的第一项, 再进行解调, 即各式乘以单位的正弦信号, 输出电压为

$$\begin{aligned} u'_1(t) &= \frac{\omega_0 \mu_0 S N^2}{x_0} \left(1 - \frac{x}{x_0} \right) I_m \cos \omega_0 t \cdot \cos \omega_0 t \\ &= \frac{\omega_0 \mu_0 S N^2 I_m}{x_0} \left(1 - \frac{x}{x_0} \right) \frac{(1 + \cos 2\omega_0 t)}{2}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} u'_2(t) &= \frac{\omega_0 \mu_0 S N^2}{x_0} \left(1 + \frac{x}{x_0} \right) I_m \cos \omega_0 t \cdot \cos \omega_0 t \\ &= \frac{\omega_0 \mu_0 S N^2 I_m}{x_0} \left(1 + \frac{x}{x_0} \right) \frac{(1 + \cos 2\omega_0 t)}{2}. \end{aligned} \quad (11)$$

将上式两电压信号差动相减,再进行低通滤波除去2倍的中心频率成分,可得与转子位移 x 成正比的电压信号。

$$e = u'_2(t) - u'_1(t) = \frac{K\omega_0\mu_0SN^2I_m}{x_0^2}x, \tag{12}$$

式中 K 为一级放大电路的放大系数。

3 实验结果

实验参数如表1。在单自由度自检测磁轴承的静态悬浮实验中,取高频的测试电压为 μ ,其幅值较小,初始气隙为 x_0 ,匝数为 N ,磁极的面积为 S ,当位移偏移量为 $-0.4 \sim 0.4$ mm时,输出电压如图3、图4所示。

表1 实验参数

Tab 1 Experiment parameters

平衡位置 x_0 (mm)	面积 S (mm ²)	匝数 N	激励频率 f (kHz)	线圈偏置电流 I (mA)	激励信号幅值 V (mV)
0.4	299.26	130	20	500	5

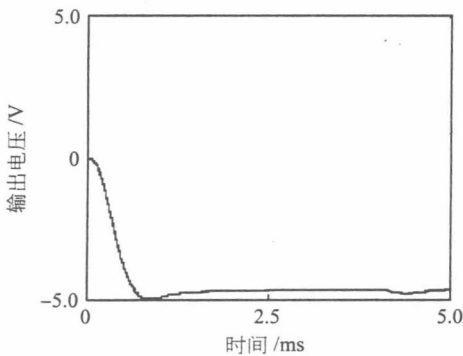


图3 转子在 $x = -0.4$ mm处的输出电压
Fig3 Output voltage at $x = -0.4$ mm

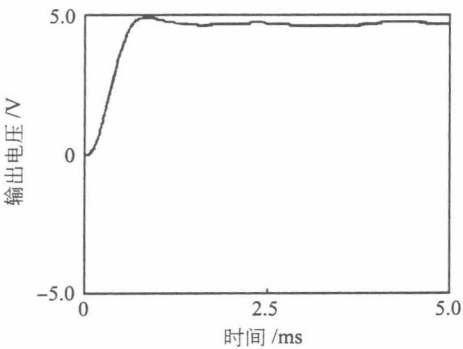


图4 转子在 $x = 0.4$ mm处的输出电压
Fig4 Output voltage at $x = 0.4$ mm

实验结果证明:此方法是可行的,自检测电路的输出电压是双极性的,电压范围在 $5 \sim -5$ V之间变化,电压值与转子的位移成正比变化,图3和图4分别是转子位移在2个最大值时的输出电压波形,输出电压近似相等。图5为结果数据的 V - x 曲线,可见输出电压和转子的位移基本上是成线性关系的。实验室中,通常使用开关功率放大器,其开关频率一般为 $20 \sim 40$ kHz之间,而本实验的高频测试信号也较高,选为 20 kHz,这就和开关功率放大器的频率相近,会影响电路的测试,故改用连续的线性功率放大器,这也就说明:此方法适合用于小功率的场合。

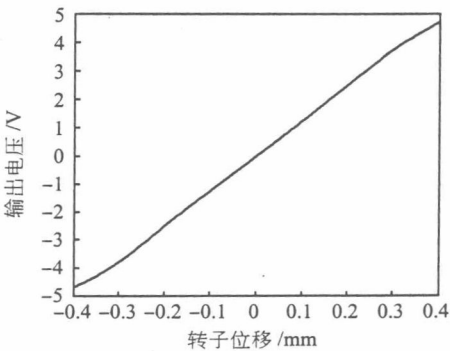


图5 输出电压与位移关系曲线
Fig5 Relation curve of output voltage with respect to rotor displacement

4 结束语

本文主要讨论了无传感器磁轴承的转子位移的检测不需要专用的非接触位移传感器,而是通过检测线圈上的电压来得到与转子位移成比例的电压信号,线圈既是作为产生磁悬浮力的执行器,又作为间接检测转子位移的传感器,通过在功率放大器输入端注入一高频小信号作为测试信号,经变换得到与位移成正比的直流电压,经过控制器和线性功率放大器后直接驱动电磁线圈,以达到转子位移的闭环控制,使磁悬浮轴承转子的轴向尺寸变小,系统的动态性能得到提到,提高了系统的可靠性,降低了总体成本。

参考文献:

[1] 刘赢澍,黄 田.磁悬浮轴承研究综述[J].机械工程学报,2000,36(10):5-9.
[2] 张小建.主动磁悬浮轴承数字控制系统的研究[D].南京:南京航空航天大学,2002.1-8.
[3] 李益民.互感式自检测磁悬浮轴承系统的检测原理研究[J].机械,2002,29(6):58-60.
[4] 曹广忠,张 钢,虞 烈,等.电磁轴承系统的电气系统研究[J].机械科学与技术,1999,18(2):207-209.

作者简介:

王 军(1980-),男,安徽安庆人,在读硕士研究生,主要从事磁悬浮轴承和机电一体化技术的研究。

研究与探讨

磁轴承系统中差动变压器式位移传感器的研究*

杨朝英¹, 徐龙祥²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 设计了用于磁悬浮轴承系统中的差动变压器式位移传感器。从基本原理出发, 结合磁轴承特点, 提出了改进的传感器结构方案。利用线性差动变压器的专用芯片 AD598 作为传感器的测量电路。实验结果表明: 所设计的传感器具有较好的性能: 在 $-0.35 \sim 0.35$ mm 测量范围内, 线性度为 $\pm 1.25\%$, 灵敏度可高达 $23.77 \text{ mV}/\mu\text{m}$, 完全适用于磁悬浮轴承系统中。

关键词: 非接触; 位移传感器; 磁悬浮轴承; 测量电路

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2005)09-0008-02

Study on differential transformer displacement sensors for active magnetic bearings

YANG Chao-ying¹, XU Long-xiang²

(1. Coll of Automation Engin, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Coll of Mech & Elct Engin, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The differential transformer displacement sensor applying in active magnetic bearings is designed. Based on the principle and characteristic of active magnetic bearing, the improved project in structure for the sensor is presented. The linear variable differential transformer (LVDT) signal conditioner AD598 is used as measuring circuit for the sensor. The experiment concludes that the designed sensor has preferable performance: the linearity is $\pm 1.25\%$ and sensitivity is $23.77 \text{ mV}/\mu\text{m}$ in the measuring range of $-0.35 \sim 0.35$ mm. It is suitable to active magnetic bearing.

Key words: contact-less; displacement sensor; active magnetic bearing; measuring circuit

0 引言

传感器技术涉及的知识非常广泛, 渗透到各个科学领域, 它的共性是利用物理定律或物质的物理、化学或生物特性将非电量转换成电量。在信息采集系统中, 传感器通常处于系统前端, 即检测和控制系统的之首, 它提供给系统赖以处理和决策所必须的原始信息。因此, 传感器的性能对整个系统是至关重要的^[1]。

在一些应用场合, 对传感器有特殊的要求, 如磁悬浮轴承系统中使用的位移传感器, 要求传感器是非接触的、能真实地反映出转子中心的位移变化, 而且, 测量的线性范围一般较小。因此, 对位移传感器的灵敏度和线性范围等技术指标的要求都很高, 要求灵敏度高达 $20 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 、线性范围为 $-0.35 \sim 0.35$ mm。目前, 用于电磁轴承控制系统中的位移传感器大多是电涡流式传感器。电涡流式传感器是利用电磁感应原理制成, 因而, 它对外磁场比较敏感。此外,

电涡流式传感器的信噪比较低, 这是传感器转换电路中的电子元件的固有噪声所致。要提高信噪比则要提高灵敏度, 但这又会使电涡流式传感器的线性范围受到限制。本文所分析的电感式位移传感器, 灵敏度高、线性度好, 分辨力高时, 可测位移范围小, 一般为几微米到几百微米, 此范围已经能够满足磁轴承位移测量的要求。而且, 此电感式传感器由于线圈被软磁材料所屏蔽, 对周围磁场不敏感。因而, 此传感器比较适合用于磁悬浮轴承系统中。

1 基本原理

电感式传感器是利用线圈的自感或者互感的变化来实现测量的一种装置, 它的核心是可变自感或可变互感。本文采用的是变气隙式差动变压器式电感传感器, 是利用互感的变化来工作的。

1.1 基本结构及工作原理

如图1所示, 上下2只铁芯上均有1个初级线圈(也称

励磁线圈)和1个次级线圈(也称输出线圈)。上下2个初级线圈串联后接交流励磁电源电压 U_{in} , 2个次级线圈则按电势反向串联。忽略高阶无穷小量, 当 $\omega \gg R$ (ω 为交流励磁电源电压 U_{in} 的频率, R 为初级线圈的等效电阻)时, 可推导出

$$U_{out} = -\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta} U_{in},$$

式中 U_{in} 为初级线圈的交流励磁电源电压, V; U_{out} 为次级线圈的输出电压, V; N_1, N_2 分别为初级线圈和次级线圈的匝数; $\Delta\delta$ 为轴偏移平衡位置的距离, mm; δ 为轴处于平衡位置时的气隙大小, mm。

当轴处于中间位置时, $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, 初级线圈中产生交变磁通 Φ_1 和 Φ_2 , 在次级线圈中便产生交流感应电势。由于两边气隙相等, 磁阻相等, 所以, $\Phi_1 = \Phi_2$, 次级线圈中感应出的电势 $E_{21} = E_{22}$, 由于次级是按电势反向连接的, 结果输出电压 $U_{out} = 0$ 。当轴偏离中间位置时, 两边气隙不等 (即 $\delta_1 \neq \delta_2$), 次级线圈中感应的电势不再相等 (即 $E_{21} \neq E_{22}$), 便有电压 U_{out} 输出。 U_{out} 的大小及相位取决于轴的位移大小和方向^[2]。

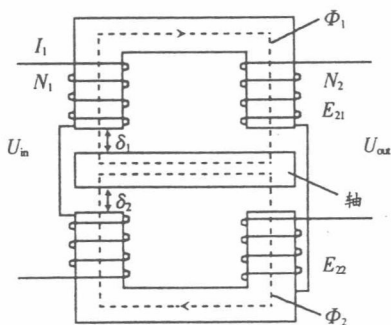


图1 基本结构

Fig 1 Basic structure

1.2 磁轴承系统中传感器的结构及工作原理

用于磁轴承系统中的传感器的结构必须根据磁轴承系统的特点来设计。磁路结构形状的确定既要考虑到传感器铁芯在磁路上的要求和对位移传感器工作行程及非线性误差的要求, 又要使传感器有足够的窗口面积和散热面积。同时, 还要考虑到磁轴承结构上的特点和空间尺寸的限制^[3]。

从目前磁轴承的使用情况来看, 磁轴承和传感器都安装在同一个圆柱筒内。考虑到这种情况、安装方便及传感器铁芯磁路结构上的要求, 设计了图2的结构。用于测量轴的径向位移, 其基本工作原理与1.1所述的相同。上下2个磁极用于测量轴的纵向位移。1, 1' (即 U_{in}) 为输入端, 2, 2' (即 U_{out}) 为输出端。左右2个磁极用于测量轴的横向位移, 其绕线方式与上下两磁极的绕线方式相同。图2只给出了纵向2个磁极线圈的绕制方式。

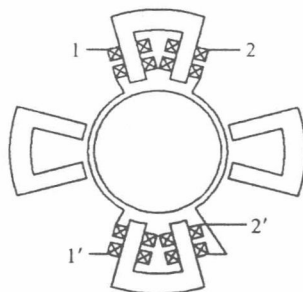


图2 改进的结构

Fig 2 Improved structure

2 传感器测量电路

本文所研究的用于磁轴承系统中的差动变压器式电感位移传感器的测量电路, 可由AD598来实现。此芯片是线性差动变压器(LVDT)的专用芯片^[4,5]。AD598内部的调节电路包含了比值部分 $(A-B)/(A+B)$, 此处的 A, B 对应于上述的2, 2' (即 U_{out})。AD598与LVDT配合, 可将差动变压器的机械位移量转换成高精度的电压量。AD598将一个高精度的正弦波发生电路和差动变压器信号调节电路的绝大多数功能集成在一块芯片上, 只要增加几个简单的外围元件就可以构成一个高精度的测量电路, 使用比较方便。AD598与传感器的连接方法如图3所示。

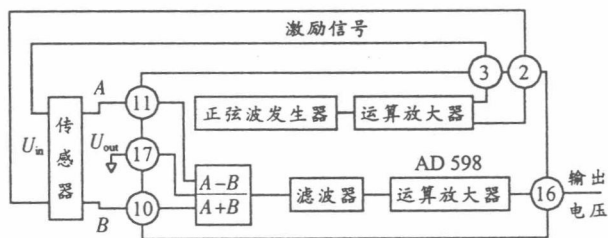


图3 AD598与传感器的连接

Fig 3 Connection of AD598 and sensor

3 实验结果分析

对所设计的传感器进行实验测试, 测试范围为 $-0.5 \sim 0.5$ mm, 每隔 0.05 mm 测一数据, 重复实验6次, 求得平均值。用Matlab软件对实验结果进行拟合, 拟合曲线如图4所示, 进而求得传感器的性能指标: 线性范围、线性度、灵敏度、迟滞、重复性, 如表1所示。

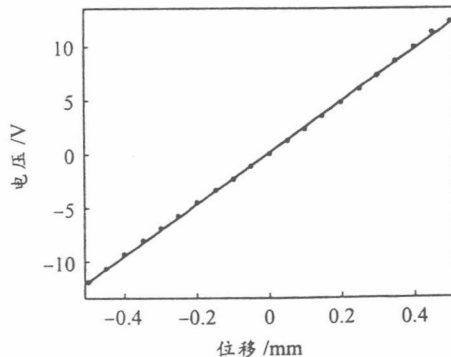


图4 拟合曲线图

Fig 4 Curve diagram of fitting

(下转第12页)

3 试验结果

3.1 稳定性试验

在进行稳定性的测量时,被测者坐姿、闭目,以自然舒服为准。测量部位为前额中上部。测头光源入射光点和信号接收点间距为25 mm。分别紧贴在头上。

在被测者静止稳定情况下,经按照与脉搏血氧计的比对试验建立的数学模型计算后即可得出血氧饱和度 S_{O_2} 的试验曲线。由该试验可看出:系统相当稳定,受外界温度变化影响很小,其波动值小于1%。

3.2 憋气试验

为了检测脑部血氧的变化,被试者采用坐姿、闭目,同时,被试者手指套上脉搏血氧计测头,以便实时比对。

图5为一位试验者进行憋气试验中脑部血氧饱和度的变化曲线。被测者年龄25岁,男性。试验时,先均匀呼吸(图5中 A_1),然后,闭气(图5中 A_2),再均匀呼吸(图5中 A_3)。可明显看出:由 A_2 时间段,总血红蛋白浓度开始缓慢

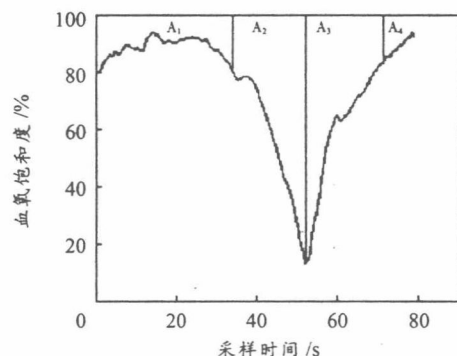


图5 憋气试验

Fig 5 Experiment for holding one's breath

(上接第9页)

表1 传感器的性能指标

Tab 1 Performance index of sensor

线性范围 (mm)	线性度 (%)	灵敏度 (mV/ μ m)	迟滞 (%)	重复性 (%)
-0.50~0.50	± 1.86	24.23	± 0.32	± 0.28
-0.45~0.45	± 1.60	24.06	± 0.34	± 0.32
-0.40~0.40	± 1.43	23.90	± 0.38	± 0.36
-0.35~0.35	± 1.25	23.77	± 0.44	± 0.41

从表1可以看出:在线性范围为-0.35~0.35 mm时,其线性度可达 $\pm 1.25\%$,灵敏度为23.77 mV/ μ m。而磁悬浮轴承的单边间隙通常为0.20~0.30 mm,可见所设计的传感器完全适用。

4 结束语

根据磁悬浮轴承的特点,设计了更加适用于轴承系统的差动结构的传感器。实验结果表明:所设计的电感式传感器具有较好的线性度、较高的灵敏度,完全适用于磁悬浮

下降,然后,从 A_3 迅速上升。这可以解释为憋气开始后,随着人体对氧的消耗,氧合血红蛋白浓度减少。当憋气结束后,迅速补充了人体的氧,使脑部血氧含量迅速上升。可以看到:血氧饱和度开始时在98%左右,在憋气过程中降到60%左右。从图中可看出所测 S_{O_2} 的明显变化。

4 结束语

试验证明:该检测系统稳定可靠,与脉搏血氧计显示趋势一致,且比后者超前2~3 s显示,说明完全能够快速、实时感知人体脑部血氧浓度的变化情况。可以广泛用于心血管手术、神经外科的血管内手术、脑意外的急救、心脏骤停后大脑复苏的治疗的监测,还可以开发出脑功能的无创诊断仪器及脑部监测的各种医疗仪器^[3,4]。

参考文献:

- [1] 王强. 无创伤红外光谱脑血氧监测仪[J]. 国外医学, 1998, 21(1): 19-26.
- [2] Madsen P L, Secher N H. Near-infrared oximetry of the brain[J]. Prog Neurobiol, 1999, 58(6): 541-560.
- [3] Menke J, Voss U. Gerhard möller reproducibility of cerebral near infrared spectroscopy in neonates[J]. Biology of the Neonate, 2003, 183(1): 6-11.
- [4] Tomohiro Suto, Masato Fukuda, Makoto Ito, et al. Multichannel near-infrared spectroscopy in depression and schizophrenia: cognitive brain activation study[J]. Biological Psychiatry, 2004, 55(5): 501-511.

作者简介:

李胜利(1948-),男,广东台山人,高级工程师,中国光电技术学会理事。主要研究方向为几何量光电检测和利用激光光电原理的医疗仪器研究。曾发表相关论文30余篇。

轴承系统。同时,还可用于其他某些测量系统中(如测转速)。

参考文献:

- [1] 段开波. 用于磁悬浮轴承系统的差动变压器式位移传感器[D]. 南京:南京航空航天大学,1999.
- [2] 孟立凡,郑宾. 传感器原理及技术[M]. 北京:兵器工业出版社,2002. 105-107.
- [3] Lin C S, Lay Y L, Chen P W. The laser displacement measurement with control in a magnetic levitation and suspension system[J]. Comput Methods Appl Mech Engrg, 2000, 190: 25-34.
- [4] de Lezana K D. Comparative study of alternative circuit configuration for inductive sensors[J]. Sensors and Actuators A, 2001, 91: 226-229.
- [5] 赵负图. 现代传感器集成电路[M]. 北京:人民邮电出版社, 2000. 431-435.

作者简介:

杨朝英(1979-),女,福建南平人,在读硕士研究生,研究方向为现代传感技术及系统。