

CMTDR' 91

1991年中国机床设计与研究会议论文集

1991年5月于武汉

PROCEEDINGS OF CHINA
MACHINE TOOL DESIGN AND
RESEARCH CONFERENCE IN 1991
(IN WUHAN, MAY, 1991)

中国机械工程学会生产工程专业学会

Production Engineering Institution of CMES

机械工业出版社

内 容 简 介

本书汇集1991年中国机床设计与研究会议上宣读的A类论文35篇全文与B类论文14篇摘要。论文反映了近几年来我国机床设计与研究领域的最新进展,涉及到机床零部件、自动化、性能控制技术、动态特性、静态与准静态性能、产品开发与新工艺等若干方面。全书约42万字,可供生产工程专业科研、设计部门与高等院校参考。

1991年中国机床设计与研究会议

论 文 集

中国机械工程学会生产工程专业学会

•

机械工业出版社(北京阜成门外白万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

北京密云小白印刷厂印刷

机械工业出版社机工书店发行

•

开本787×1092 1/16·印张16.4·字数420千字

1991年4月北京第一版·1991年4月北京第一次印刷

印数 001—500·定价:25.00元

•

ISBN 7-111-02904-6/TC·632(X)

前 言

由中国机械工程学会生产工程专业学会机床专业委员会、全国高校机床热变形研究会、全国高校机床学研究会共同主办的一九九一年中国机床设计与研究会议于一九九一年五月在武汉华中理工大学举行。这是继1987年举行的第四届机床设计与研究会议后的又一届学术会议，即第五届机床设计与研究会议。会议共征得论文58篇。经有关专家审阅，评选出A类论文35篇、B类论文14篇。现将A类论文全文和B类论文摘要汇编成论文集印刷出版。全书约42万字。

论文按内容分为六组：

A、机床零部件

B、自动化

C、机床性能控制技术

D、机床动态特性

E、机床静态与准静态性能研究

F、产品开发与新工艺

论文集由机械工业出版社作为正式出版物出版。为召开这次会议，华中理工大学和学会的许多同志付出了辛勤的劳动。北京机床研究所信息中心情报组的同志参加了本书的编辑加工，密云白小印刷厂为赶印本书也进行了巨大的努力，为此深表谢意。

中国机械工程学会生产工程专业学会理事

张世堂

机床专业委员会主任委员

1991年3月14日

目 录

A. 机床零部件

- A-1. 磁力轴承在机床上的应用及发展趋势.....陈易新、冒家友、李静伟、武丽梅、肖正锋 (1)
- A-2. 轴向磁力轴承控制系统的分析与设计.....冒家友、贾延林、李静伟 (8)
- A-3. 蜗杆砂轮的成形方法及DGS系列砂轮修整器的设计、应用.....许昶康 (13)

B. 自动化

- B-1. 变增益自适应控制系统及其计算机仿真.....林益耀、吕雨霏 (22)
- B-2. 应用模糊数学进行机床主轴部件优化设计.....唐火生 (29)
- B-3. FMC500柔性制造单元工件运输小车位置识别与准停控制.....张冰蔚、金瑞琪 (35)
- B-4. 多轴箱CAD/CAM一体化系统的开发研究.....王隆太、黄鹤汀 (41)
- B-5. 微机专用CAD/CAPT/MNC系统的研究.....李晶、杨卫华、程国全、董毅 (48)
- B-6. 具有闭环结构的工业机器人动力学分析.....王树新、刘又午、张大钧 (54)
- B-7. 计算机辅助绘制变速箱装配图的探讨.....陆还珠 (60)
- B-8. 装配图CAD中消隐问题的研究.....孙红岩 (70)
- B-9. 加工中心总体布局计算机辅助设计—BJCAD系统的研究.....李虎城、郭雷 (77)
- B-10. 加工中心机床总体布局CAD中的模块化设计.....吕秉德、宁汝新、唐承统 (86)
- B-11. 变速齿轮传动系统最佳结构布局智能设计的推理机制.....许超、汤文成、温文源 (91)
- B-12. 镗孔加工误差自动检测补偿技术的研究.....汪传明、华玉亮、盛伯浩 (99)

C. 机床性能控制技术

- C-1. 在线抑制机床颤振的控制策略.....吕松 (107)
- C-2. 剃齿刀修形的数控装置.....赵一丁、林其骏、薛进才 (116)
- C-3. 高精度丝杠磨床传动链误差微机补偿的研究.....李培生、陈卓宁、杨克冲、杨叔子 (121)
- C-4. 导轨精密磨削微机补偿控制实用方法研究.....张济生、胡立德、蒋贤跃 (128)
- C-5. 应用时间序列方法控制长丝杠的螺距加工精度.....杨庆东、朱曦北 (137)
- C-6. 工业微机控制系统故障自诊断初探.....李健博、宾鸿赞、张福润 (143)

D. 机床动态特性

- D-1. 车床刀具—刀架系统的动态特性研究.....王太勇、张纪锁、邓达茂、张策 (151)

D-2.	机床结构试验模态分析.....董存贤、胡木、刘沐华	(156)
D-3.	关于机床结构动态特性的求解方法.....李刚、阎秋生、徐燕申、彭泽民、孙宝熙	(163)
D-4.	CF7120仿形车床车削加工噪声控制.....庞怀玉、曾荣芳	(169)
D-5.	机床强迫再生颤振的研究与控制.....吴雅、柯石求、杨叔子、李维国、徐善祥、蒋其昂	(177)
E.机床静态与准静态性能研究		
E-1.	数控车床床身模型试验.....滕立波	(185)
E-2.	机床热态特性线性化理论及实验研究.....陈子辰、方学、傅建中、童忠飏、高承煜	(194)
E-3.	机床温度预测智能控制.....郭满堂、陈子辰、高承煜、陈兆年	(201)
E-4.	坐标镗床坐标误差主要影响因素的确定.....刘裕先	(206)
E-5.	大型机床床身调平时热变形的补偿.....田春雨	(216)
E-6.	固体温度场计算的新方法.....诸乃雄、侯镇冰、陈伟	(223)
F.产品开发与新工艺		
F-1.	微机控制模块组合式自动车床.....陈永明、刘承弟、张云路	(229)
F-2.	大型多用齿轮加工机床的设计与研制.....孙宝元、陈企平、姜秀萍	(236)
F-3.	活齿齿形的加工原理及其加工装置的研究.....孙玉鑫、曲继方、王向宣	(241)
B类论文目录与摘要		(246)

CONTENTS

SESSION A, MACHINE TOOL ELEMENTS

- A-1 APPLICATIONS AND DEVELOPMENT TENDENCY OF ACTIVE
MAGNETIC BEARING ON MACHINE TOOL
Chen Yixin, Mao Jiayou, Li Jingwei, Wu Limei, Xiao Zhengfeng
(1)
- A-2 ANALYSIS AND DESIGN OF CONTROL SYSTEM ON AXIAL
MAGNETIC BEARINGS —IMPLEMENTATION OF CLASSICAL
CONTROL METHOD
Mao Jiayou, Jia Yanlin, Li Jingwei
(8)
- A-3 THE PROFILING METHOD FOR GRINDING WORM AND THE
DEVELOPING OF GRINDING WHEEL PROFILING ATTACHMENT
WITH DIAMOND ROLLER SERIES DGS
Xu Changgeng
(13)

SESSION B, AUTOMATIZATION

- B-1 VARIABLE GAIN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM AND ITS
COMPUTER SIMULATION
Lin Yiyao, Lu Yufei
(22)
- B-2 AN OPTIMIZATION DESIGN FOR SPINDLE ASSEMBLY WITH
FUZZY MATHEMATICS
Tang Huosheng
(29)
- B-3 THE POSITIONS IDENTIFICATION AND POSITIONING CONTROL
OF THE RAIL GUIDED PALLET TRUCK IN FMC500
Zhang Bingwei, Jin Ruiqi
(35)
- B-4 STUDY ON THE CAD/CAM INTEGRATED SYSTEM FOR
MULTIPLE-SPINDLE HEAD
Wang Longtai, Huang Heting
(41)
- B-5 RESEARCH ON SPECIAL CAD/CAPT/MNC SYSTEMS WITH
MICROCOMPUTER
Li Jing, Yang Weihua, Cheng Guoquan, Dong Yi
(48)
- B-6 DYNAMIC ANALYSIS OF INDUSTRIAL ROBOT INCLUDING
CLOSED LOOP
Wang shuxin, Liu Youwu, Zhang Dajun
(54)
- B-7 A RESEARCH ON THE COMPUTER AIDED DRAWING OF THE
ASSEMBLING GRAPH OF THE GEARBOX
Lu Huanzhu
(60)

- B-8 HIDDEN-LINE ELIMINATION IN THE COMPUTER-AIDED
ASSEMBLY DRAWING DESIGN
Sun Hongyan (70)
- B-9 THE COMPUTER-AIDED DESIGN FOR THE GENERAL LAYOUT
OF MACHINING CENTER
Li Hucheng, Guo Lei (77)
- B-10 MODULAR DESIGN FOR THE LAYOUT CAD OF MACHINING
CENTER
Lu Bingde, Ning Ruxin, Tang Chengtong (86)
- B-11 MECHANISM OF AI INFERENCE FOR DESIGNING OPTIMAL
STRUCTURE OF GEAR TRANSMISSION SYSTEM
Xu Chao, Tang Wencheng, Wen Wenyan (91)
- B-12 A STUDY ON AUTOMATIC MEASURING AND COMPENSATING
TECHNOLOGY FOR BORING ERRORS
Wang Chuanming, Hua Yuliang, Sheng Bohao (99)

SESSION C, PERFORMANCE CONTROLLING OF MACHINE TOOLS

- C-1 AN ON-LINE CONTROLLING STRATEGY FOR SUPPRESSING
CHATTER IN METAL CUTTING PROCESS
Chang Song (107)
- C-2 THE CNC DEVICE FOR MODIFYING PROFILE OF SHAVING
CUTTERS
Zhao Yiding, Lin Qijun, Xue Jincai (116)
- C-3 MICROCOMPUTER-AIDED COMPENSATING ERRORS FOR
TRANSMISSION IN HIGH PRECISION LEADSCREW GRINDING
MACHINE
Li Peisheng, Chen Zhuoning, Yang Kechong, Yang Shuzi (121)
- C-4 A STUDY ON PRECISION GUIDEWAY GRINDING BY MEANS
OF MICROCOMPUTER COMPENSATING CONTROLS
Zhang Jisheng, Hu Lide, Jiang Xian Yao (128)
- C-5 IMPROVING THE THREAD PITCH ACCURACY OF LONG
LEADSCREW WITE TIME SERIES METHOD (137)
Yang Qingdong, Zhu Jibei
- C-6 STUDY ON FAULTY SELF-DIAGNOSIS OF AN INDUSTRIAL
MICROCOMPUTER CONTROL SYSTEM
Li Jianbo, Bin Hongzan, Zhang Furun (143)

SESSION D: DYNAMIC BEHAVIOUR OF MACHINE TOOLS

- D-1 RESEARCH ON THE BEHAVIOUR OF TOOL-POST SYSTEMS
OF LATHES
Wang Taiyong, Zhang Jisuo, Deng Damao, Zhang Ce (151)
- D-2 EXPERIMENTAL MODAL ANALYSING FOR MACHINE TOOL
STRUCTURES
Dong Cunxian, Hu Mu, Liu Muhua (156)
- D-3 RESEARCH ON IDENTIFYING METHOD OF DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF MACHINE TOOL STRUCTURES IN
GRINDING
Li Gang, Yan Qiusheng, Xu Yanshen, Peng Zemin, Sun Rongxi
(163)
- D-4 CONTROL OF NOISE DURING TURNING AT COPYING LATHE
MODEL CE7120
Pang Huaiyu, Zeng Rongfang (169)
- D-5 STUDY AND CONTROL ON FORCED REGENERATIVE CHATTER
IN MACHINE TOOLS
Wu Ya, Ke Shiqiu, Yang Shuzi, Li Weiguo, Xu Shanxiang,
Jiang Qiang (177)

SESSION E: STUDY ON STATIC AND QUASI-STATIC PERFORMANCE
OF MACHINE TOOLS

- E-1 AN EXPERIMENTAL STUDY ON BED MODEL OF NC LATHE
Teng Libo (185)
- E-2 LINEARIZATION THEORY OF MACHINE TOOL THERMAL
CHARACTERISTIC AND EXPERIMENT RESEARCH
Chen Zichen, Fang Xue, Fu Jianzhong, Tong Zhongfang,
Gao Chengyu (194)
- E-3 FORECAST-INTELLIGENT CONTROL OF EIGENTEMPERATURE
OF MACHINE TOOL
Guo Mantang, Chen Zichen, Gao Chengyu, Chen Zhaonian (201)
- E-4 THE DETERMINATION OF THE MAIN EFFECT FACTORS ON
THE COORDINATE ERRORS OF THE JIG BORING MACHINE
Liu Yuxian (206)
- E-5 THERMAL DEFORMATION COMPENSATING OF LARGE
MACHINE TOOLS DURING BED LEVELING
Tian Chunyu (216)

- E-6 A NEW CALCULATING METHOD OF TEMPERATURE FIELD
OF SOLID
Zhu Naixiong, Hou Zhenbing, Chen Wei (221)

SESSION F, DEVELOPING NEW TYPE PRODUCTS AND NEW
TECHNOLOGY

- F-1 MC CONTROL MODULAR COMBINED AUTOMATIC LATHE
Chen Yongming, Liu Chengdi, Zhang Yunlu (229)
- F-2 DESIGN AND DEVELOPMENT OF A LARGE MULTIFUNCTIONAL
GEAR CUTTING MACHINE
Sun Baoyuan, Chen Qiping, Jiang Xiuping (236)
- F-3 A STUDY ON PRINCIPLE AND DEVICE FOR MANUFACTURING
PERIPHERAL PROFILE OF SLIDING-TOOTH GEAR
Sun Yuxin, Qu Jifang, Wang Xiangxuan (241)
- TITLES AND ABSTRACTS FOR THE SUPPLEMENTARY PAPERS (246)

磁力轴承在机床上的应用及发展趋势*

哈尔滨工业大学 陈易新 冒家友 李静伟 武丽梅 肖正锋

APPLICATIONS AND DEVELOPMENT TENDENCY OF ACTIVE MAGNETIC BEARING ON MACHINE TOOL

Chen Yixin, Mao Jiayou, Li Jingwei, Wu Limei, Xiao Zhengfeng
(Harbin Institute of Technology)

〔摘要〕现代机械加工技术正向着高精度、高速度和高度自动化的方向发展,而如何在结构和性能上研究、开发和应用适于这种发展趋势的新型支承元件和系统,已经成为当今机械工程界的重要课题。

本文概要地介绍了一种国际上正在研究开发,并已得到初步应用的新型支承技术——磁力轴承及其系统,回顾了磁力轴承的发展过程,从原理、结构上概述了这种新型轴承的性能和特点,以及研究、开发的主要过程和技术路线。阐述了磁力轴承在机床上的应用现状及发展趋势,并对我国如何发展这项技术提出了一些看法,旨在促进我国机床领域今后研究、开发和应用这种新型支承元件。

关键词: 可控磁力轴承 (AMB) 机床主轴 开发与应用

一. 前言

现代工业和科学技术的高速发展,以微电子技术为首的新兴前沿技术领域如:新能源、海洋、空间、生物工程等方面的开发所需技术装备的特殊需求,而制造这些技术装备,要求先导的机械工业提供性能优异的机床。即具有柔性化、智能化、耐环境化、节能、低噪、可靠耐用的机电一体化、高智力密集型的高精、高速、高度自动化的机床。作为机床主轴关键部件的轴承,其承载能力、支承刚度、回转精度、极限回转速度等直接制约着机床的技术水平。传统轴承越来越难以适应机床向高速度、高精度和高度自动化方向发展的要求。为此,人们突破了传统支承原理的限制,大胆把磁悬浮技术应用到轴承中,研究开发出磁力轴承,它具有精度、刚度和阻尼可控,转速和承载范围大,功耗低,适应环境能力强,便于自律控制的特点。较好地解决了传统支承难以克服的矛盾,实现了高精度和高度自动化,高效率与低能耗的统一。

二. 磁力轴承的原理和性能特点

磁力轴承就是利用电磁力,将主轴无机械接触、无润滑地悬浮起来的一种新型高性

* 国家自然科学基金资助项目No.5880263。

能智能化的轴承。磁力轴承和传统轴承一样，由定子环和固定于主轴上的转子环组成。此外，还有一套电磁力的控制系统，由传感器检测转子的偏移，通过反馈控制回路调节相对各极的电磁力差，按需实现转子位置的自动调节，这种轴承之所以在近十年来受到许多工业发达国家的重视，就在于它具有传统轴承所无法比拟的特点和性能。

(1) 基于机械结构上轴承和主轴的不接触，而不存在机械摩擦，不需要润滑和密封，温升和热变形小，转速高，寿命长，能耗低，并适于恶劣和特殊的环境；

(2) 基于电磁力反馈控制系统的特点，使主轴的位置精度自律，且刚度和阻尼可调。通过对主轴的动力学控制，使主轴在稳定平衡状态下绕自身惯性轴旋转，从而消除了转子质量不平衡引起的振动，并使主轴平稳地越过各阶临界转速，实现超高速旋转，全部回转特性可由传感器和控制系统获得，便于实时诊断和状态监控。

根据国外有关资料，机床主轴用可控磁力轴承的主要性能指标如表1所示。

表1 磁力轴承性能指标

回转精度	$Ra \leq 0.03 \sim 0.05 \mu m$
速 度	$0 \sim 800,000 r/min; 200 m/s$
承 载 力	$(1 \sim 3) \times 10^5 N$
刚 径 向	$K_{r静}: 30 \sim 300 N/\mu m, K_{r动} 10 \sim 100 N/\mu m$
度 轴 向	$K_{a静}: 50 \sim 2000 N/\mu m, K_{a动}: 30 \sim 100 N/\mu m$
主轴直径	$14 \sim 1250 mm$
功 耗	$(1/10 \sim 1/100) \times W$ W : 同类尺寸传统轴承功耗
工作温度	$-253^\circ C \sim +450^\circ C$
可 靠 性	$MTBF \geq 40,000 h$
工作环境	真空、空气、氯气、各碳氢化合物、蒸气、海水、轴的六氟化物、液态氧和氢、宇宙空间、失重、低温、污染、人无法或不直接接近的环境等。

三、机床用磁力轴承发展简史及现状

磁力轴承的研究起源于十九世纪初，根据实现稳定悬浮的电磁力是静态的还是动态的，磁力轴承被划分为无源（被动）和有源（可控）两种。早期磁力轴承的研究主要是针对无源悬浮，多应用于仪器、仪表、导航等领域。这一时期研究的代表是美国MIT、法国Hispano—Suizu公司等，无源磁力轴承的主要缺点是刚度低（ $0.08 N/\mu m$ ）、响应速度慢，这使得磁力轴承的应用受到很大限制。进入本世纪六十年代后，随着电子技术、控制技术的飞速发展，各工业国家相继投入有源（可控）磁力轴承的研究，其中，英国伦敦大学热离子实验室、法国LRBA、美国NASA处于领先地位。这一时期的研究成果主要在军事、宇航等领域获得应用。

进入本世纪七十年代后，可控磁力轴承的研究开始向一般工业应用转化，并在难度

较高的机床主轴上获得初步应用。1976年,法国SEP公司接替LRBA的研究工作,并与SKF轴承公司联合投资建立了S2M公司对机床用可控磁力轴承进行了系统的研究和产品开发。1977年S2M开发出了世界上第一台转速为 $(2\sim 7.5)\times 10^4\text{r}/\text{min}$ 的高速机床电主轴头。1981年S2M在Hanover欧洲国际机床展览会上,首次向公众推出了B20/500主轴系统,并在 $3.5\times 10^4\text{r}/\text{min}$ 下进行了钻、铣削的现场表演,其高速、高效、高精度、低功耗的优良性能引起了各国的关注。1983年S2M还在第五届欧洲机床展览会上展出了系列磁力轴承及其主轴部件(见表2)。并在其后与日本精工公司共建了JMB(JAPAN MAGNETIC BEARING, LTD.),与美国KOLLMORGEN公司共建了MBI(MAGNETIC BEARING, INC),形成了以S2M总公司和JMB、MBI两个子公司为基地的生产、销售和研究开发体系。十余年来,S2M公司已开发出三十余个品种系列,生产了近500余套磁力轴承应用于机床,主要成果如下:(1)高速铣削(钻削),型号为B25/500、B25/750、B15/1000,主要用于航空工业;(2)高速磨削,型号为B15/1000、B11/3000,主要适于高速、高效和高精度磨削加工;(3)超精加工,已应用的超精密主轴部件, $n=3600\text{r}/\text{min}$,回转精度达 $0.03\sim 0.05\mu\text{m}$,工况可实时监控。主要用于精密光学和电子器件加工;(4)加工中心,主轴直径加大不受限制,便于刀具自动装夹,且换刀后能自动平衡,无附加加载和振动产生,适于FMS、FMC及MC需要。美国已经采用;(5)适应控制机床,根据传感和控制系统信息,采用动态数据分析系统即可实现工况监控,省去专门的附加检测装置,使机床具有自动诊断、故障报警、质量监控等功能,适于FMS,特别是自适应机床的需要。

从以上应用可以看出,将磁力轴承应用于机床主轴,特别是用于超精密加工和超高速加工方面是大有发展前途的。

表2 S2M主轴部件系列规格

型号	额定转速 (rpm)	额定转速下的功率 (KW)		承载能力 (轴端) (1GIV)		轴端静刚度 $10\text{N}/\mu\text{m}$		轴端动刚度 $10\text{N}/\mu\text{m}$		主轴工具孔	主要应用
		额定	最大	轴向	径向	轴向	径向	轴向	径向		
B25/500	30,000	25	35	200	150	200	60	35	5.6	ISO40	铣、钻
B25/750	15,000	20	30	100	100	50	40	20	4	ISO30	铣、钻
B15/1000	60,000	15	22	35	35	20	40	25	4	锥度1:5	铣、钻、磨
B3/1500	90,000	3	5	20	20	15	15	15	2	定做	磨
B2/2000	120,000	2	3.5	12	12	10	8	12	1.6	定做	磨
B1/3000	180,000	1	1.6	5	5	5	3	8	1	定做	磨

四、磁力轴承研究方法学及其技术关键

迄今为止,还没有人对机床用可控磁力轴承进行过系统的方法论研究,这里有两个原因:一是目前的可控磁力轴承还处于研究、设计和应用的初级阶段,还有许多课题需要进行理论与实验研究;二是各专业公司和研究单位都有自己独立的技术开发体系,并且由于可以理解的原因,对具体的研究开发过程,设计原则和关键技术均未作详细的论述。

根据大量的文献资料和研究经验,机床用可控磁力轴承设计开发体系主要内容如框图1所示。在这个过程中,最关键的问题是控制系统的设计,其设计的一般流程如图2。

理论上已经证明,五自由度可控磁力轴承轴向和径向是可以分开设计的,因此磁力轴承控制系统设计也被归结为轴向(单自由度)、径向(四自由度)两个方面。就其控制策略而言,大致有如下方案:

轴向:独立控制;

径向: A. 独立控制 + 平衡回路

B. 多输入/多输出或解耦控制

由于径向轴承系统本身阶数太高(>12 阶),其控制系统很难按现有理论进行精确设计或控制电路本身很难实施。研究表明,在技术上和工程上解决如下难题是磁力轴承应用于机床主轴的

核心所在。(1)前后径向轴承的耦合问题;(2)水平轴与垂直轴的干涉问题;(3)高速旋转时的陀螺效应和振动问题;(4)控制系统的鲁棒性问题。

就应用而言,A、B两种方案都有成功的实例。A型控制系统设计简单、有效,属于棒控系统。其关键是平衡回路的设计,由S2M公司研究并成功地应用于机床主轴。B型控制系统,侧重于系统的整体性,理论上可实现最优控制,其缺点在于系统构造过于复杂,如果控制参数选择不当,很难构造出与理论设计相对应的控制电路。然而,无

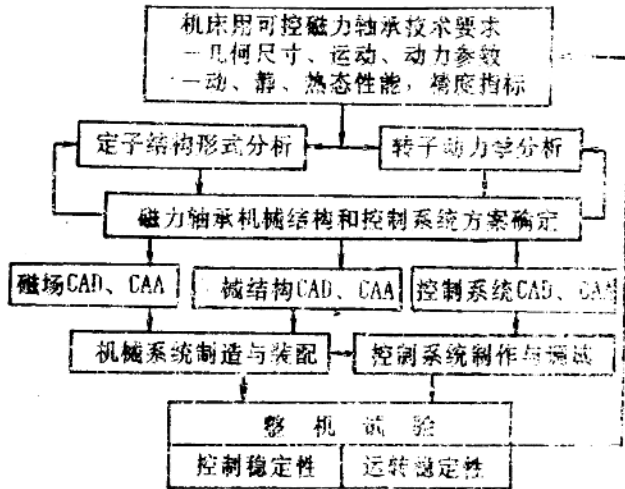


图1 机床用可控磁力轴承设计开发过程框图

无论采用何种方案均要涉及耦合、干涉、陀螺效应和鲁棒性问题，这一点在S2M公司研究和应用磁力轴承过程中也得到了充分的体现。

五. 国内研究现状与发展的几点看法

国内对磁力轴承的研究起步较晚，1981年，上海微电机研究所曾研制过用于电机上径向被动、轴向主动的磁力轴承，其径向刚度很低（ $0.032\text{N}/\mu\text{m}$ ）。国防科技大学自1980年后，就五维可控磁力轴承及其控制系统进行过研究，设计制作了一台立式外转子型磁力轴承试验装置，但未深入下去，现主攻方向为磁悬浮列车。清华大学自1980年后对磁力轴承的稳定性问题作过研究，其研究对象是立式轴向单自由度可控磁力轴承，主要考虑在离心机上的应用问题。

1986年后，我校与广州机床

所合作研制五自由度可控磁力轴承机床电主轴，先后完成了磁力轴承定子、转子结构优化设计计算及控制系统设计等基础研究，并设计制造了第一台样机，这是国内首次对五自由度可控磁力轴承机床电主轴进行较为系统的理论分析与实验研究。1988年后，我校得到国家自然科学基金的资助，继续对该课题进行深入研究。目前，我们设计制造了第二台全主动式试验装置，并在结构及控制系统的某些关键技术问题上取得了可喜的进展，运用独立控制回路实现了转子的静态、动态稳定悬浮，由于电动机转速的限制，现已实现在转速为 $14,000\text{r}/\text{min}$ 时稳定悬浮，并具有很强的抗干扰能力，承载力达 500N ，静态悬浮精度小于 $0.5\mu\text{m}$ 。

然而，和国外相比，我国对磁力轴承的研究还有很大差距，尤其是适用于机床主轴的全主动型磁力轴承，其研究才刚刚起步。为适应机械工业的发展要求，急需对可控磁力轴承进行理论、实验和应用的系统研究，建议有关部门综合国内外研究和应用现状，在国内已有基础上，制定出切实可行的研究方案，并在政策和资金上给予积极的支持，这对加速我国研究和开发实用全主动型可控磁力轴承电主轴的进程是非常重要的。可以

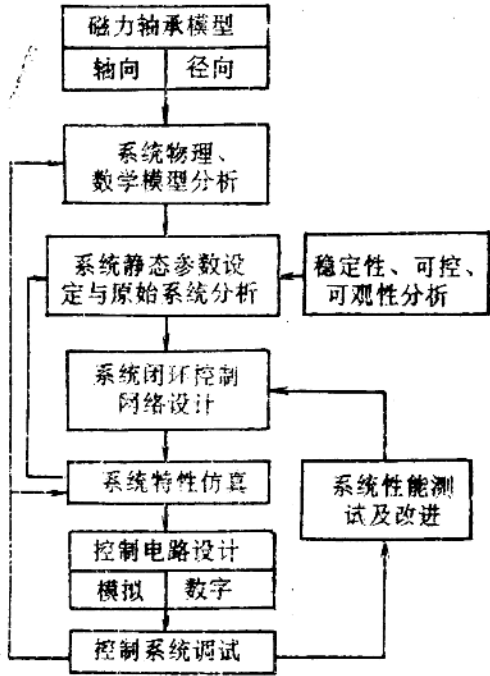


图2 磁力轴承控制系统设计的一般流程

预计,在不久的将来,我国对全主动型可控磁力轴承的研究将会得到飞速发展。

六. 趋势和展望

可控磁力轴承发展到今天,已经成为集控制、电磁、材料、机械等学科于一身的科学技术高度密集的机电一体化的智能型的支承原件。成为高技术领域的前沿课题,受到了许多国家的重视,有着广泛的应用范围和发展前景。

现在,世界上从事磁力轴承研究的主要国家有法、日、美、苏、加、英、德、瑞典、中国、巴西等,而法、日、美处于领先地位,1983年和1990年,国际第一届、第二届磁力轴承学术会议先后在苏黎士和东京召开,这标志着磁力轴承的研究和应用又跨入了一个新阶段,虽然已发表了数百篇文献,注册了百余项专利,应用了几百台磁力轴承电主轴,但其研究和应用远未成熟。总体上,仍处于发展的初级阶段。随着工业技术的进一步发展,磁力轴承会越来越显示出其强大的生命力,与其发展相关的众多课题还亟待人们去开发和研究。预计,今后的主要发展方向和课题是:

1. 进一步的工业应用研究,包括:进一步研究开发新机型;对已成功应用的领域,适时扩大战果;逐步向标准化、系列化、专业化方向过渡,为商品化作好准备,这是大规模应用AMB的关键所在。就其应用范围而言,机床仍将是首位的,其次是压缩机、泵以及涡轮机械,在其应用过程中,应突出发挥它的优势,做到扬长避短。

2. 控制技术与变频电源(VVVF)设备的研究,包括:不平衡与干扰的检测与控制;集成多用传感器;系统参数识别(动静态性能);信号处理器及新型变频电源。

3. 数字控制系统的研究:大约进入八十年代中期后,数字控制AMB越来越受到人们的重视,主要在于它具有模拟控制所不具备的特点,即:硬件简单;控制系统可变性大;可实现复杂控制;软件可变性大;使用CPU系统,控制精度高。有关数控系统的开发与研究,会成为今后磁力轴承一个十分活跃的领域,但数控系统的造价问题将是一个重要课题。

4. 安全和可靠性方面的研究:从设计与制造上如何确保AMB的安全性与可靠性,是将来AMB能否得以大面积推广应用的关键之一。

5. 新型材料的研究:今后一个时期,材料科学,特别是超导材料的突破性进展,必然给AMB的发展带来大转折,因为只有材料研究有新的进展,才能使AMB能耗降低、体积减小、电流(或场力)加大、承载力大大提高变为轻而易举。毫无疑问,超导材料以及某些非晶态金属等材料的研究和应用,将会使AMB应用前景更美好。

七. 结束语

综上所述,随着电子技术和新型磁性材料的发展,磁力轴承的性能价格比将会不断提高,可以毫不夸张地说,磁力轴承是支承技术的一次革命。当然,把AMB应用于机床主轴,国外还处在初级阶段,尚有许多问题有待解决。国内还需进行基础实验研究,包括机械结构,控制系统,电磁材料等方面的问题,达到实用阶段尚有大量的工作需要国家在技术政策等方面给予积极的支持与鼓励。可以相信,磁力轴承的研制将在我国机床技术领域里达到初步的应用。

参 考 文 献

- [1] H. Habermann & G. L. Liard, Practical, Magnetic Bearing, IEEE Spectrum, Sept, 1979.
- [2] 松村文夫, (日) 磁力轴承的现状及应用, 《机械设计》vol. 139, No. 1, 1987.
- [3] 陈易新、陈世玉等, 机床主轴可控磁力轴承的结构分析与设计, 《机床与液压》1988, No. 3.
- [4] 陈易新等, 轴向磁力轴承计算机辅助设计, 《机床与液压》1988, No. 3.
- [5] 陈易新等, 磁力轴承结构设计方法, 《第二届中-日超精密加工技术学术研讨会论文集》, 1988, 8.
- [6] 陈易新等, 可控轴向磁力轴承控制系统的设计, 《第二届中-日超精密加工技术学术研讨会论文集》, 1988, 3.

轴向磁力轴承控制系统的分析与设计*

——经典控制方法的实施

哈尔滨工业大学 冒家友 贾延林 李静伟

ANALYSIS AND DESIGN OF CONTROL SYSTEM ON AXIAL MAGNETIC BEARINGS —— IMPLEMENTATION OF CLASSICAL CONTROL METHOD

Mao Jiayou, Jia Yanlin, Li Jingwei
(Harbin Institute of Technology)

【摘要】本文介绍了磁力轴承的主要特点及应用,并以一轴向磁力轴承模型作为研究对象,建立了系统的数学模型,应用经典控制理论中的根轨迹法进行闭环控制系统设计,设计了控制系统调节器,并给出了实验结果。

关键词: 磁力轴承 根轨迹法 调节器

一. 概 述

磁力轴承由磁场力使转子无机械接触无摩擦地悬浮起来,并采用闭环反馈控制轴线的位置,系统的刚度和阻尼可调,是一种新型的轴承技术。使转子能安全通过其临界转速,实现超高速旋转。通过在电路中施加适当的平衡回路可以使转子在超临界转速运转状态下绕其自身的惯性主轴旋转,而不是象传统支承那样绕几何轴旋转,从而消除了转子的质量不平衡引起的振动^[4]。总之,磁力轴承与传统轴承相比,具有巨大的优越性。目前,采用磁力轴承的机床主轴头在国外已进入市场,而国内的研究才刚刚起步。

采用磁力轴承的机床主轴一般有两个径向磁力轴承和一个轴向磁力轴承。在理论上已经证明,轴向和径向磁力轴承相互间可以完全分开设计。本文以轴向磁力轴承作为研究对象,设计了控制系统,并给出了实验结果。

二. 基本原理

图1示本文所采用的轴向磁力轴承实验模型,固定于基板的两个U型电磁铁在悬浮体两端产生磁场力。电磁铁芯由厚0.35mm的硅钢片迭成。悬浮体(轴)为45号钢料,轴在磁场力作用下悬浮于U型电磁铁之间,气隙为0.5mm。差动变压器式位移传感器检测轴向位移,检测信号与基准信号比较,其差与轴的偏位成正比。偏差信号经过放大和调节器处理后,再由功率放大器转化成控制电流,从而改变电磁力,也就改变了轴的位置。直线滚动轴承4的作用是限制轴的径向移动和摆动,保证轴作单自由度运动。其控制原理如图2所示。

* 国家自然科学基金资助项目No.5880203。