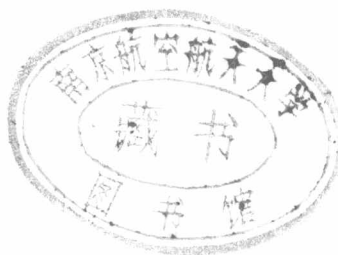


自动化学院

032 系



序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物会议名称	年卷期	类别
1	王晓琳	博士	032	一种新型的五自由度磁悬浮电机	南京航空航天大学学报	2004, 36, 02	
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
2	陈荣	博士	032	永磁同步电机伺服系统中电机启动过程分析	西南交通大学学报	2004, 39, 02	
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
3	陈荣	博士	032	基于LQSF的伺服系统速度调节器的设计与研究	电工技术学报	2004, 19, 07	
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
4	陈荣	博士	032	基于负载观测的伺服系统抗扰研究	中国电机工程学报	2004, 24, 08	
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
5	陈荣	博士	032	永磁同步伺服系统电流环的设计	南京航空航天大学学报	2004, 36, 02	
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
6	陈荣	博士	032	永磁同步伺服系统速度响应研究	中小型电机	2004, 31, 04	
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
7	张宏荃	博士	032	无轴承异步电机转子偏心补偿的研究	电机与控制学报	2004, 8, 02	
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
8	张宏荃	博士	032	无轴承异步电动机间接气隙磁场定向控制	燕山大学学报	2004, 28, 04	
	王晓琳	博士	032				
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
9	张宏荃	博士	032	无轴承异步电动机的系统实现	哈尔滨工业大学学报	2004, 36, 11	
	邓智泉	教授	032				
	王晓琳	博士	032				
	严仰光	教授	032				
10	仇志坚	博士	032	无轴承永磁同步电动机的原理及实现	电工技术学报	2004, 19, 11	
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
11	陈常清	硕士	032	优化开关模式在高频SVPWM逆变器中的应用	电力电子技术	2004, 38, 03	
	邓智泉	教授	032				
12	王晓琳	博士	032	基于探测线圈的无轴承异步电机气隙磁场测量方法研究	中国电机工程学报	2004, 24, 10	
	林盈杰	硕士	032				
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
13	臧晓敏	博士	032	一种改进的基于采样-保持策略的磁悬浮轴承用电流三态调制开关功放	电工技术学报,	2004, 19, 10	
	王晓琳	博士	032				
	仇志坚	博士	032				
	邓智泉	教授	032				

14	臧晓敏	博士	032	磁轴承开关功放中电流三态调制技术的研究	中国电机工程学报	2004, 24, 09	
	王晓琳	博士	032				
	仇志坚	博士	032				
	邓智泉	教授	032				
15	张宏荃	博士	032	基于逆变器开关状态的无轴承异步电机悬浮系统独立控制	南京航空航天大学学报	2004, 36, 05	
	王晓琳	博士	032				
	邓智泉	教授	032				
	严仰光	教授	032				
16	刘日宝	硕士博士	032	正弦波永磁交流伺服系统控制策略的研究	中小型电机	2004, 31, 05	
	陈荣	教授	032				
	邓智泉		032				
17	邓智泉	教授	032	An independent controller of radial force subsystem for super-high-speed bearingless induction motors. Proceedings of the ninth international symposium on magnetic bearings (ISMB-9)	August 3-6,2004, Lexington, Kentucky, USA		
	王晓琳	博士	032				
	严仰光	教授	032				
18	王晓琳	博士教授	032	Magnetic flux detecting of bearingless induction motors with search coils. Proceedings of the ninth international symposium on magnetic bearings (ISMB-9)	August 3-6, 2004, Lexington, Kentucky, USA		
	邓智泉	硕士	032				
	林盈杰	教授	032				
	严仰光		032				
19	朱军卫	硕士正高	032	逆变器单极性电流SPWM控制与滞环控制比较	电力电子技术	2004年, Vol. 38 No. 02	
	龚春英		032				
20	龚春英	正高博士	032	神经网络在逆变器控制中的应用	电工技术学报	2004年, Vol. 19 No. 02	
	沈忠亨	硕士正高	032				
	李春燕		032				
	严仰光		032				
21	龚春英	正高硕士	032	四桥臂三相逆变电源的三维空间矢量控制技术	电工技术学报	2004年, Vol. 19 No. 12	
	熊宇	硕士讲师	032				
	郇鸣	正高	032				
	陈新		032				
	严仰光		032				
22	周平森	硕士	032	并串组合型双管正激变换器的研究	电力电子技术	2004, 38, 4	
	王慧贞	副高	032				
23	王慧贞	副高	032	一种双管正激变换器的LCD箝位电路	电力电子技术	2004, 38, 5	
	周平森	硕士	032				
24	王慧贞	副高	032	ZVS双正激直/直变换器	南京航空航天大学学报	2004, 36, 5	
	周平森	硕士	032				
25	王慧贞	副高	032	推挽正激软开关电路谐振网络的分析与设计	电工技术学报	2004, 19, 8	
	戴卫立	硕士	032				
26	张先进	硕士	032	双BUCK半桥逆变器研究	电源世界	2004年第5期	
	王慧贞	副高	032				

27	张先进 周平森 王慧贞	硕士 硕士 副高	032 032 032	双管反激变换器研究分析	电源技术应用	2004, 7, 4	
28	季画 陈宝林	硕士 讲师	032 032	永磁同步电动机矢量控制方案的一种数字实现	中小型电机	2004 年 31 卷 第二期	
29	季画 陈宝林	硕士 讲师	032 032	PMSM直接转矩控制调速系统的研究现状与发展前景	电气传动自动化	2004 年 26 卷 第4期	
30	穆新华 杨志勇	副高 硕士	032 032	开关电源中印刷电路板寄生参数对传导电磁干扰影响的研究	中国电机工程学报	2004, 24, 11	

31	穆新华 杨志勇	副高 硕士	032 032	开关电源中印刷电路板寄生参数对传导电磁干扰影响的研究	中国电机工程学报	2004, 24, 11	
32	穆新华	副高	032	交错并联式双管正激变换器工作模式分析及系统设计	中国电机工程学报	2004, 24, 12	
33	穆新华 杨志勇	副高 硕士	032 032	用于电火花加工的两级式电流型变换器研究	南京航空航天大学学报	2004, 36, 04	
34	穆新华 王俊	副高 硕士	032 032	两级结构宽输出电压范围的功率因数校正器的稳定性分析和设计	南京航空航天大学学报	2004, 36, 05	
35	穆新华 豆飞进	副高 硕士	032 032	Close-loop design of Pulse Power Supply for Electrical Discharge Machining	TRANSACTIONS OF NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS & ASTRONAUTICS	2004, 21, 03	
36	彭小兵 穆新华	硕士 副高	032 032	基于DSP的SPWM变频电压电源的研究	电力电子技术	2004, 38, 02	
37	彭小兵 穆新华	硕士 副高	032 032	一种新型的SPWM逆变器	电工技术杂志	2004, 03	
38	邹曙 穆新华	硕士 副高	032 032	HPWM逆变器两种电流瞬时值反馈方式性能比较	电力电子技术	2004, 38, 05	
39	阮新波 王建冈	教授 博士	032 032	Calculation of the Resonant Capacitor of the Improved Current-Doubler-Rectifier ZVS PWM Full-Bridge Converter	IEEE Trans. Industrial Electronics	2004年第51 卷第2期	
40	阮新波 李 斌 王建冈 李金钟	教授 硕士 博士 硕士	032 032 032 032	Zero-Voltage-Switching PWM Three-Level Converter with Current-Doubler-Rectifier	IEEE Trans. Power Electronics	2004年第19 卷第6期	
41	张之梁 阮新波	硕士 教授	032 032	Zero-Voltage-Switching PWM Full-Bridge Three-Level Converter	IPEMC	2004	
42	阮新波 危 建 薛雅丽	教授 硕士 博士	032 032 032	Voltage-Sharing of the Divided Capacitors in Non-Isolated Three-Level Converters	IEEE APEC	2004	
43	阮新波 刘福鑫	教授 博士	032 032	An Improved ZVS PWM Full-bridge Converter with Clamping Diodes	IEEE PESC	2004	
44	金 科 阮新波	博士 教授	032 032	Zero-Voltage-Switching Multi-Resonant Three-Level	IEEE PESC	2004	

				Converters			
45	金 科 阮新波	博士 教授	032 032	An Improved ZVS PWM Three-Level Converter	IEEE PESC	2004	
46	李 冬 阮新波	博士 教授	032 032	A High Efficient Boost Converter With Power Factor Correction	IEEE PESC	2004	
47	陈志英 阮新波	硕士 教授	032 032	零电压开关复合式PWM全桥三电平变换器	《中国电机工程学报》	2004年第24卷第5期	
48	金 科 阮新波	博士 教授	032 032	零电压开关多谐振三电平直流变换器	《中国电机工程学报》	2004年第24卷第7期	
49	张元媛 阮新波	硕士 教授	032 032	多电平直流变换器中飞跨电容电压的一种控制策略	《中国电机工程学报》	2004年第24卷第8期	
50	李 冬 阮新波	博士 教授	032 032	高效率的Boost型功率因数校正预调 节器	《中国电机工程学报》	2004年第24卷第10期	
51	梁小国 危 建 阮新波	硕士 硕士 教授	032 032 032	一种新颖的交错并联正激三电平变换器	《中国电机工程学报》	2004年第24卷第11期	
52	金 科 阮新波	博士 教授	032 032	零电压开关多谐振三电平直流变换器的控制策略	《中国电机工程学报》	2004年第24卷第12期	
53	刘福鑫 阮新波	博士 教授	032 032	加钳位二极管的零电压全桥变换器改进研究	《电力系统自动化》	2004年第28卷第17期	
54	陈军艳 王建冈 阮新波	硕士 博士 教授	032 032 032	1kW航空用DC-DC模块电源的研究	《电力电子技术》	2004年第38卷第6期	
55	陈军艳 王建冈 阮新波	硕士 博士 教授	032 032 032	1kW航空用DC-DC模块电源的设计	《通信电源技术》	2004年第21卷第2期	
56	肖 岚 李启明 严仰光	副教授 博士 教授	032	基于吸收功率管变频控制的软开关逆变器研究	南京航空航天大学学报	2004年第36卷第5期	
57	肖 岚 黄 蕾	副教授 硕士	032	A simplified control for inverters in parallel operations	11 th International power electronics and motion control conference, EPE-PEMC	2004 年 6 月 Latvia	
58	肖 岚 胡文斌 蒋渭忠	副教授 博士 硕士	032	变频器的电压空间矢量调制技术研究 (英文)	电工技术学报	2004年第19卷第2期	
59	肖 岚	副教授	032	逆变器综合课程设计教学平台的开发	电气电子教学学报	2004年10月 第26卷电气 工程专辑	
60	陈良亮 肖 岚 龚春英	博士 副教授 教授	032	逆变器并联系统直流环流产生原因及其检测与抑制方法	中国电机工程学报	2004第24卷 第9期	

61	陈良亮 肖岚 胡文斌	博士 副教授 博士	032	双闭环控制电压源逆变器并联系统环流特性研究	电工技术学报	2004年第19卷第5期
62	陈良亮 肖岚 胡文斌	博士 副教授 博士	032	一种基于耦合电感的逆变器并联系统环流抑制方法	南京航空航天大学学报	2004年第36卷第2期
63	陈良亮 肖岚 龚春英	博士 副教授 教授	032	Circlating current's characteristics analysis and the control strategy of parallel system based on double close-loop controlled VSI	IEEE Power Electronics Specialists Conference	Germany, 2004.6
64	陈良亮 肖岚 严仰光	博士 副教授 教授	032	双闭环控制电压源逆变器外特性研究	电力电子技术	2004年第38卷第3期
65	陈良亮 肖岚 龚春英	博士 副教授 教授	032	闭环SPWM逆变器死区效应分析	电源技术学报	2004年第2卷第3期
67	黄蕾 肖岚	硕士 副教授	032	基于同步调幅的逆变器并联技术研究	电力电子技术	2004年第38卷第2期
68	赵海舟 肖岚	硕士 副教授	032	串-并组合式双管正激变换器的研究	电力电子技术	第38卷第4期
69	纪峰 肖岚	硕士 副教授	032	级联型逆变器的电流SPWM控制方法	电源世界	2004年第11期
70	张卓然 陈志辉 杨善水 严仰光	助教	032	飞机发电机电压调节系统数学模型的建立与研究	航空学报	2004, 25, 5
71	张卓然 杨善水 陈志辉 严仰光	助教	032	一种新型双凸极起动发电系统电压调节器的设计	电力电子技术	2004, 38, 3
72	林利华 胡育文	硕士 教授	032 032	磁链观测器的实现	电源世界	2004, 02
73	周扬忠 胡育文 田蕉	博士 教授 硕士	032 032 032	永磁同步电机控制系统中变比例系数转矩调节器设计研究	中国电机工程学报	2004, 24, 09
74	叶万富 胡育文	硕士 教授	032 032	C++Builder 与 MATLAB/SIMULINK 的接口	计算机仿真	2004, 21, 10
75	顾春雷 胡育文	博士 教授	032 032	独立电源起动/发电系统的研究现状及特点	电工技术杂志	2004, 11
76	彭敏志 胡育文	硕士 教授	032 032	改进型异步电动机直接转矩控制方法的仿真研究	电气传动	2004, 34, 6

77	张兰红 胡育文 黄文新	博士 教授 副教授	032 032 032	三相变频驱动系统中逆变器的故障诊断与容错技术	电工技术学报	2004, 19(12)	
78	Wang Shishan, Ji Shengchang, Li Yanming	副教授 讲师 教授	032 西交大 西交大	Numerical Calculation of Power Losses on Cable Coil	ACED2004 Preceddings of the 12 th Asian Conference on Electrical Discharge	Shenzhen, November 19-22,2004. Beijing: Tsinghua University, 2004.11: 657-660.	
79	Wang Shishan Xie Jianming, Zhou Huigao.	副教授 讲师 教授	032 西交大 西交大	Analysis of Electric Field for Composite Insulator Based on Asymmetrical Faulty Condition	ACED2004 Preceddings of the 12 th Asian Conference on Electrical Discharge	Shenzhen, November 19-22,2004. Beijing : Tsinghua University , 2004.11: 653-656.	
80	王世山 汲胜昌 刘家其 李彦明	副教授 讲师 硕士生 教授	032 西交大 西交大 西交大	电缆绕组变压器轴向振动模态特性的分析研究	电工技术学报	2004,19(10): 6-11.	
81	邓铭 王世山 李彦明 何计谋	工程师 副教授 教授 高工	西交大 032 西交大 西电瓷	基于非对称故障条件的复合绝缘子电场分析	电瓷避雷器	2004,19(6): 4-7	
82	王世山 寇晓 刘家齐 汲胜昌 李彦明	副教授 硕士生 硕士生 讲师 教授	032 西交大 西交大 西交大 西交大	电力变压器内线圈屈曲特性的研究	高电压技术	2004,30(1): 1-3.	
83	王世山 汲胜昌 李彦明	副教授 讲师 教授	032 西交大 西交大	电缆绕组变压器短路时线圈轴向稳定性的研究	中国电机工程学报	2004,24(2): 166-169.	
84	付大丰	讲师	032	串行通信在数字化控制UPS 中的应用	测控技术	2004年23卷9 期	
85	付大丰	讲师	032	1553B总线在现代飞机自动配电系统中的应用	沈阳航空工业学院学报	2004年21卷1 期	
86	邢岩	教授	032	Digital Voltage Regulation with Flux Balance Control for Sine Wave Inverters	IEEE APEC2004	2004. 2	
87	邢岩	教授	032	Modeling for a DC Link Inverter	IPEMC2004	2004. 8	

88	邢岩	教授	032	应用于三相功率因数校正的空间矢量快速算法	南京航空航天大学学报	2004年36卷5期	
89	邢岩	教授	032	Low Cost Compound Current Sharing Control for Inverters in Parallel Operation	IEEE PESC2004	2004. 6	
90	邢岩	教授	032	A Fast Algorithm for SVPWM in Three Phase Power Factor Correction Application	IEEE PESC2004	2004. 6	
91	邢岩	教授	032	组合式前端DC-DC变换器	中国电机工程学报	2004年24卷6期	
92	邢岩	教授	032	电流型调节逆变器的冗余并联控制方法	中国电机工程学报	2004年24卷11期	
93	邢丽冬 曲民兴	讲师	037	远场涡流技术检测带翼片管的研究	无损检测	2004年第26卷第11期	
94	邢丽冬 潘双米 任为民	讲师 教授 高工	037	《“电路”相关课程群改革的思路》	《南京航空航天大学学报》(社科版)	2004年第6卷第30期	
95	翁晓光	讲师	032	强化电工课程设计中学生能力的培养	南京航空航天大学学报(社会科学版)	第6卷(总第30期) 2004年12月	
96	戴芊	工程师	032	基于CMM的大学制度下的学院教学管理	南京航空航天大学学报(社会科学版)	第6卷(总第30期) 2004年12月	
97	陈乾宏 阮新波 严仰光	讲师 教授 教授	032	开关电源中磁集成技术及其应用	电工技术学报	2004年19卷3期	
98	陈乾宏 阮新波 严仰光	讲师 教授 教授	032	磁集成变换器的推导及磁件等效电路通用模型	电力电子技术	2004年38卷5期	
99	谢少军 陈东华	教授 博士生	032	电流控制型半桥逆变器直流分压电容电压偏差前馈控制技术	电力系统自动化	2004年28卷3期	
100	谢少军 韩军 张勇	教授 博士生 博士生	032	低输入电压大功率逆变器技术研究	南京航空航天大学学报	2004年36卷2期	
101	谢少军	教授	032	某型飞机交流电源系统改造研究	南京航空航天大学学报	2004年36卷5期	
102	谢少军 陈万	教授 博士生	032	电压电流双闭环瞬时值控制级联逆变器研究	南京航空航天大学学报	2004年36卷5期	
103	李飞 谢少军	博士生 教授	032	级联型航空静止变流器直流环节电路拓扑研究	南京航空航天大学学报	2004年36卷5期	
104	陈东华 谢少军 周波	博士生 教授 教授	032	瞬时值电流控制逆变技术比较	南京航空航天大学学报	2004年36卷3期	

105	陈东华 谢少军 周波	博士生	032	Review of the control strategies applied to active power filters	IEEE DRPT 2004	2004	
106	何礼高						
107	潘双来						
108	Daolia nChen, Lei Li	正高 博士	032 032	Novel Static Inverters with High Frequency Pulse DC Link	IEEE Trans. On Power Electronics	2004, 19, 4	
109	陈道炼 李磊 刘剑 林胜洋 宋晨	正高 博士 硕士 硕士硕士	032 032 032 032 032	电流源高频交流 环节AC/AC变换器研究	中国电机工程学报	2004, 24, 2	
110	李磊 陈道炼	博士 正高	032 032	两种移相控制全桥式高频环节AC/AC变换器比较研究	电工技术学报	2004, 19, 06	
111	刘 剑 陈道炼 尹 春	硕士 正高 硕士	032 032 032	新颖的BUCK-BOOST高频环节AC-AC变换器	电力电子技术	2004, 38, 2	
112	宋 晨 陈道炼 宋海峰	硕士 正高 硕士	032 032 032	不间断供电高功率因数集成AC-DC变换器研究	电力电子技术	2004, 38, 2	
113	王莉, 宋晓峰 孟小利 严仰光	副教授 讲师 讲师 教授	032 032 032 032	用支持矢量机建立电励磁双凸极发电机的非线性模型	电 工 技 术 学 报	Vol.19 No.9, 2004。	
114	蒋贤哲 王莉	硕士 副教授	032 032	延时电路的VHDL设计	四川大学学报(自然科学版)〈增刊〉	NO. 41, 2004	
115	曹小庆 王莉 孟小利	硕士 副教授 讲师	032 032 032	基于有限元分析的电励磁双凸极发电机的模型建立	中国航空学会自动控制专业分会, 控制与应用第十一届学术年会, 烟台. 2004	2004	
116	曹小庆 王莉	硕士 副教授	032 032	励磁电流对电励磁双凸极发电机输出电压脉动分析及仿真	江苏电工技术年会, 南京	2004	
117	谢捷如	中级	032	网络环境下多样性教学模式与教师信息素质的培养	南京航空航天大学学报(社会科学版)	2004, 6, 2	

基于转子磁场定向控制的永磁同步电机 制动过程分析

陈 荣^{1,2} 邓智泉¹ 严仰光¹

(1. 南京航空航天大学自动控制系 南京 210016

2. 盐城工学院 盐城 224003)

摘要 阐述了伺服系统制动过程中电机所处的运行状态,即减流阶段、反接建流阶段、回馈发电制动阶段、能耗制动阶段(或者速度调整阶段)。仔细研究了系统制动过程中各阶段电机电流、电压、速度的变化规律,分析了影响制动过程的各种因素。提出了提高电机制动响应性能、抑制速度超调的措施,以及在系统设计、调整和构成中需要注意的方面。文章还分析了电机制动时能量的回馈和直流侧母线电压的变化,以及直流电压变化对系统的影响。仿真和实验证实了文中所做的分析。

关键词: 永磁同步电机 磁场定向控制 制动运行 过程分析

中图分类号: TM351

Analysis of Braking Process of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Rotor Field-Oriented Control

Chen Rong^{1,2} Deng Zhiquan¹ Yan Yangguang¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016 China

2. Yancheng Institute of Technology Yancheng 224003 China)

Abstract Detailed description of the various stage in moter braking process, including current decline phase, current set-up phase in reversal connection, regenerative braking phase and power consumption braking phase or speed regulating phase, is presented, in order to study dynamic response performance of permanent magnet synchronous servo system. The factors that took effect on motor braking process, as well as its speed, current and voltage response are analyzed. A new approach that improved the motors braking performance and restrained speed overshoot, and the focus that should be taken into account in design, adjust, and constitution of system are introduced. The change of DC voltage in braking process and its effect on system and feedback energy are analyzed. Both numerical simulation and experiment had approved the analysis.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, field-oriented control, braking operation, process analysis

1 引言

永磁同步电机由于具有体积小,重量轻,磁性能稳定,效率高,调速范围宽等一系列优点,在伺

服驱动领域得到了广泛的应用。伺服系统又称跟随控制系统,使控制量快速跟随给定是伺服系统始终追求的目标,因而研究伺服系统的起制动具有现实意义。针对同步电机的起制动问题,国内外已经有论文^[1,2]对此做了研究。但是,对于电机的整个制动过程并没有全面阐述,而制动过程是影响系统动态响应性能的重要方面,尤其是伺服系统的定位过

国家自然科学基金资助项目(50337030)。

收稿日期 2003-09-02 改稿日期 2004-02-26

程, 它影响系统定位速度与定位精度, 影响处于频繁起制动运行伺服系统的运行效率。本文的讨论将基于永磁同步电机 d-q 坐标系上的数学模型, 借助于实验和仿真来分析磁场定向控制下电机的制动过程。

2 永磁同步电机矢量控制系统简介

永磁同步电机在三相坐标系中的电压电流关系为非线性时变方程, 但经坐标变换, 在 d-q 坐标系中, 可以得到比较简单的数学模型^[3, 4]。若使 $i_s=i_q$, $i_d=0$, 此时的控制方式即为磁场定向的矢量控制。

在永磁同步电机磁链方程中, 电机自感和互感均为转子位置角的余弦函数, 自感大于零, 互感小于零, 且自感数值大于互感数值。如果忽略漏感, 自感中恒值部分等于互感中恒值部分的两倍^[5]。

磁场定向控制下的永磁同步伺服系统为一典型的电流、速度双环结构。电流环为 PI 调节, 速度环为带有微分反馈与 Bang-Bang 控制的 PI 调节器。所设计的电流环、速度环动态响应实验结果见图 1、图 2 所示。说明电流环具有良好的稳态及动态跟踪性能, 速度阶跃响应快, 且无超调, 速度的上升具有线性特性, 其斜率与系统限幅电流有关。

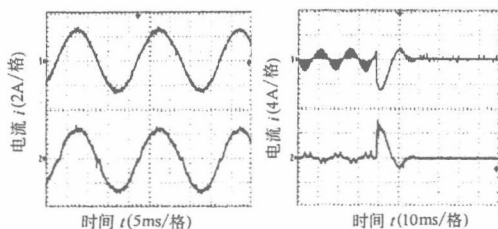


图 1 额定频率时稳态电流跟踪及电流阶跃动态响应

Fig.1 Steady state current tracking and dynamic response at rated frequency

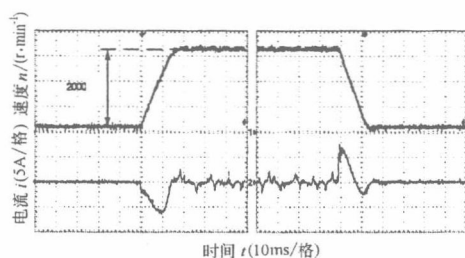


图 2 电机速度阶跃响应与电机一相电流

Fig.2 Step response of motor speed and the phase current

3 矢量控制下电机的制动

根据电机的数学模型^[3], 可以画出转子磁场定向控制下同步电机的相量图, 见图 3 所示。图中 U_s 、 E 、 I_s 、 X_q 、 Ψ_f 分别为电机电枢电压、反电动势、电枢电流、交轴电抗及转子产生的磁链。

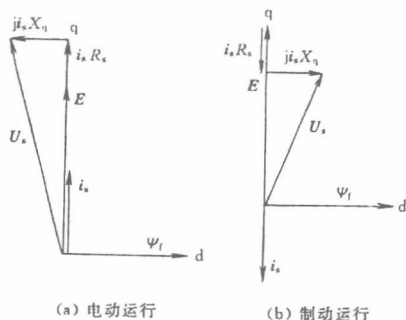


图 3 电机运行相量图

Fig.3 The operation phasor diagram of motor

假定电机此时运行速度为 2000r/min。速度调节器给定值为 n_g^* , 反馈为 n_f , 且 $n_g^* - n_f = e_n > 0$, 但接近于零。电流调节器的给定值为 i_g , 反馈为 i_f , $i_g \geq i_f$, 且接近相等。电流调节器控制 PWM 逆变器以输出相应的电压, 电机稳定运行在给定转速。现在需要将其制动到零或一小于 n_g^* 的速度, 则在制动时, 速度调节器输出最大制动电流给定 $-i_{gm}$, 电机开始进入制动过程。电机制动过程有四个阶段: 减流阶段、反接建流阶段、回馈发电制动阶段、能耗制动或者速度调整阶段, 参见图 4。

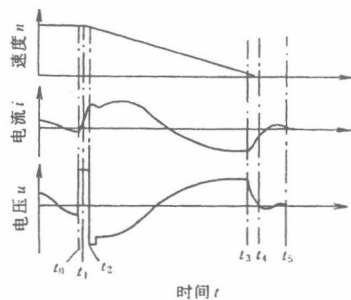


图 4 电机制动中电流电压速度

Fig.4 The current, voltage and speed curves of a motor in braking process

3.1 减流阶段 t_0-t_1

不失一般性, 假定电机开始制动时电流为 $i_a=i_1 < 0$, $i_b=i_2 > 0$, $i_c=i_3 > 0$, $i_1+i_2+i_3=0$, 按电动机定向, 各相电动势 $e_a < 0$, $e_b > 0$, $e_c > 0$ 。速度调节器输出

为 $-i_{gm}$, 经过 2/3 变换成三相电流给定 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 。 $i_a^* < 0$, $i_b^* > 0$, $i_c^* > 0$ 。则由于给定输入的反相, 电流调节器输出电压迅速过零并反相输出接近最大电压, 逆变器输出电压也迅速下降并反相, 电机端电压与电机反电势将由电动运行时的极性相对(方向相反)变成顺串。电机电流将在电源电压和电机反电动势 E 的作用下下降。在电流调节器作用下, A 相电流调节器输出接近正向限幅值, B 相和 C 相输出接近负向限幅值, 与三角波信号比较形成 PWM

信号。设主电路上桥臂管开通为 1, 下桥臂管开通为 0, 则在 $a=1$ 时, b 和 c 有四种组合, 即: 00, 01, 10, 11。在 $a=0$ 时, 只有组合 00。即共有 $abc=100$, 101, 110, 111, 000 五种工作组合。

由于本阶段电机电流减小的时间很短, 可以认为电机没有产生机械位移, 转子位置角 θ 不变, 自感与互感不变, 磁链最后项的微分即为电机反电动势。忽略电阻降, 且有 $di_a/dt+di_b/dt+di_c/dt=0$ 。通过求解回路方程, 可得各阶段电机各相电流变化率为

$abc=100$

$$\begin{aligned}\frac{di_a}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{bc}-L_{bb}-L_{ac})(U_d-e_a+e_c)+(L_{ac}+L_{bc}-L_{cc}-L_{ab})(U_d-e_a+e_b)}{k_1} \\ \frac{di_b}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{ac}-L_{bc}-L_{aa})(U_d-e_a+e_c)-(2L_{ac}-L_{cc}-L_{aa})(U_d-e_a+e_b)}{k_1} \\ \frac{di_c}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{ac}-L_{bc}-L_{aa})(U_d-e_a+e_b)-(2L_{ab}-L_{aa}-L_{bb})(U_d-e_a+e_c)}{k_1} \\ k_1 &= (L_{ab}+L_{ac}-L_{bc}-L_{aa})^2-(2L_{ab}-L_{aa}-L_{bb})(2L_{ac}-L_{cc}-L_{aa})\end{aligned}$$

$abc=101$

$$\begin{aligned}\frac{di_a}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{bc}-L_{bb}-L_{ac})(U_d-e_c+e_b)+(L_{bb}+L_{cc}-2L_{bc})(U_d-e_a+e_b)}{k_2} \\ \frac{di_b}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{ac}-L_{bc}-L_{aa})(U_d-e_c+e_b)-(L_{bb}+L_{cc}-L_{ac}-L_{bc})(U_d-e_a+e_b)}{k_2} \\ \frac{di_c}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{bc}-L_{ac}-L_{bb})(U_d-e_a+e_b)-(2L_{ab}-L_{aa}-L_{bb})(U_d-e_c+e_b)}{k_2} \\ k_2 &= (L_{ab}+L_{ac}-L_{bc}-L_{aa})(L_{ab}+L_{bc}-L_{ac}-L_{bb})-(2L_{ab}-L_{aa}-L_{bb})(L_{ab}+L_{cc}-L_{bc}-L_{ac})\end{aligned}$$

$abc=110$

$$\begin{aligned}\frac{di_a}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{cc}-L_{bc}-L_{ac})(U_d-e_b+e_c)+(2L_{bc}-L_{bb}-L_{cc})(U_d-e_a+e_c)}{k_3} \\ \frac{di_b}{dt} &= \frac{(2L_{ac}-L_{cc}-L_{aa})(U_d-e_b+e_c)-(L_{ac}+L_{bc}-L_{ab}-L_{cc})(U_d-e_a+e_c)}{k_3} \\ \frac{di_c}{dt} &= \frac{(L_{ac}+L_{bb}-L_{ab}-L_{bc})(U_d-e_a+e_c)-(L_{ab}+L_{ac}-L_{bc}-L_{aa})(U_d-e_b+e_c)}{k_3} \\ k_3 &= (L_{ac}+L_{bb}-L_{ab}-L_{bc})(2L_{ac}-L_{cc}-L_{aa})-(L_{ab}+L_{ac}-L_{bc}-L_{aa})(L_{ac}+L_{bc}-L_{ab}-L_{cc})\end{aligned}$$

$abc=111, 000$

$$\begin{aligned}\frac{di_a}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{bc}-L_{bb}-L_{ac})(-e_a+e_c)+(L_{ac}+L_{bc}-L_{cc}-L_{ab})(-e_a+e_b)}{k_1} \\ \frac{di_b}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{ac}-L_{bc}-L_{aa})(-e_a+e_c)-(2L_{aa}-L_{cc}-L_{aa})(-e_a+e_b)}{k_1} \\ \frac{di_c}{dt} &= \frac{(L_{ab}+L_{bc}-L_{bc}-L_{aa})(-e_a+e_b)-(2L_{ab}-L_{aa}-L_{bb})(-e_a+e_c)}{k_1}\end{aligned}$$

由此可知, 在减流阶段, 各相电流变化率和本相电感、另两相电感及互感有关, 表明电机所存在的耦合关系。在逆变器的一个 PWM 周期中, 尽管本桥臂两个管子的开关状态确定, 但电机三相耦合,

且其他两相开关状态还在变化, 电机绕组和直流电源连接方式也在变化, 所以电机每相电流的变化受其他两相工作的制约。由于电机电感是 θ 的函数, 即电流变化率和电机制动时 θ 角有关。但因电感中

随 θ 变化的部分占据恒定部分比例较小,故这部分影响不大;电机电流变化率和直流侧电压及电机电动势成线性关系,则直流电压及电机反电动势将直接影响电流的下降时间;本阶段将在几个PWM周期内完成,桥路的六个开关管在前所分析的五种状态之间转换,根据自感和互感的数值可以测算出,A相电流变化率均大于零,但数值不同,则电流从负值 I_1 将非线性下降到零。B相和C相的电流变化率大部分时间小于零,小部分时间大于零,因而B、C相电流将从 I_2 、 I_3 非线性下降到零;因电机电感较小,所存储的能量极其有限,电机电流很快下降到零,减流结束。如果是面装永磁同步电机,其自感 L 和互感 M 可视为常数且各相均相等。则在五种状态下,通过解电压方程(忽略电阻降)得到:

状态	电流变化率 (L-M) $\frac{di_a}{dt}$	(L-M) $\frac{di_b}{dt}$	(L-M) $\frac{di_c}{dt}$
100	$2U_d/3-e_a$	$-U_d/3-e_b$	$-U_d/3-e_c$
101	$U_d/3-e_a$	$-2U_d/3-e_b$	$U_d/3-e_c$
110	$U_d/3-e_a$	$U_d/3-e_b$	$-2U_d/3-e_c$
111, 000	$-e_a$	$-e_b$	$-e_c$

再考虑本节开始时所给定的电势极性,可以得到在一个PWM周期内三相电流变化率的相对大小,也说明电机电流下降过程的非线性特性。

本阶段电感储能维持电机电流流通,磁场能量一部分返送电源,一部分被电阻消耗,一部分转化成机械能。由于减流持续时间很短,电机速度基本不变。从本阶段开始,速度调节器一直输出最大电流给定,则速度环相当于开环运行。

3.2 反接建流阶段 t_1-t_2

当电机电流降为零后,电流调节器输入给定仍为 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 。但因为反馈电流为零,调节器仍输出与第一阶段相同的数值,电机电流的变化率与3.1所分析相同。A相电流非线性正向上升,B相和C相电流非线性负向上升。在电源电压和电机反电动势共同作用下,电流快速反向(与电动运行时电流反相)上升到给定值,同时产生制动力矩。在本阶段,电机反电动势和电源电压顺串,电机相当于反接制动。由于电机电感不大,电机电流到达给定电流的时间很短。尽管此阶段已经产生制动力矩,但因时间较短,仍可以认为在建流阶段,电机速度不变。由3.1、3.2的分析可知,提高电机减流和建流响应速度,除要求电流环响应速度快外,主要取决于直流母线电压及电机反电动势大小。

前面的两个阶段中,电流变化率很大,为保证电流快速变化,供电电源的内阻抗必须小。另外,为防止电枢电流的瞬态变化在逆变器电源端产生的电压尖峰危及逆变器安全,供电电源应尽可能靠近逆变器,以减小连线阻抗。

3.3 回馈发电制动阶段 t_2-t_3

在第二阶段后期,电机绕组在电源电压及反电动势作用下电流达到设定的反向电流。由于电流调节器是PI调节器,故电流的建立有超调。在电流调节器调节下,经过3.1、3.2两个阶段,电机端口电压和电枢电流建立起新的平衡(此时电压又与反电动势反极性),电机进入稳定制动状态。制动阶段开始时, $i_a=I_1>0$, $i_b=I_2<0$, $i_c=I_3<0$, $I_1+I_2+I_3=0$,电势仍为 $e_a<0$, $e_b>0$, $e_c>0$,电机流过的是制动电流,则电机将在设定的限幅制动力矩及摩擦力矩作用下减速,反电动势减小,电流调节器使输出电压也同步减小,以维持系统设定电流下相量方程的平衡。保持电机电流为系统设定的最大制动交轴电流 $i_q=-i_{qm}^*$ 。由坐标变换得知,电机的三相电流幅值不变,频率随速度线性下降,电机相当于由三相变频恒流源供电。电机相电压由电动时的超前于电动势变成现在的滞后,见图3b,数值上是电动势高于并超前于端口电压,电机电流滞后于d轴 90° 。电机运动方程为

$$-T_e - T_f - T_\Omega = \frac{J}{9.55} \frac{dn}{dt}$$

式中 T_e 、 T_f 、 T_Ω ——电磁、负载、摩擦力矩
电机在电磁力矩及阻力矩作用下恒加速度减速运行,速度线性下降,见图4。电机速度按下式变化

$$n = n_0 - \left| \frac{dn}{dt} \right| \times t$$

本阶段是电机制动的主要阶段,占据系统制动过程的大部分时间。假定电机制动力矩为 m 倍额定转矩,摩擦转矩为电机额定转矩的5%,则电机由2000r/min空载制动到零的时间为

$$t = \frac{2000J}{9.55(m+0.05)T_e}$$

因此,影响电机制动时间的主要因素是系统设定电磁转矩及转子轴联负载的转动惯量。设定为1.7及3倍额定转矩制动时间为14.7ms和8.4ms,实际制动时间为14ms和8ms,结果比较接近,它们之间的差别主要来自于摩擦阻力矩的估算。为提高制动过程响应速度,可充分利用电机潜力,设置较大的制动转矩,可使制动过程有较高的加速度。本阶

段电机电流从电动势正端流出,负端流进,电机将机械能转化成电能由逆变器送到直流母线侧。

3.4 速度调整阶段(或者能耗制动阶段) $t_3 \sim t_5$

针对速度给定的不同情况,制动到后期速度误差值进入误差限时,系统运行状态将有不同。如果给定为一低于电机的起始速度,则系统进入速度调整阶段。如果给定为零,则系统先是速度调整,后进入能耗制动状态。

3.4.1 速度调整阶段

当电机速度接近给定而进入误差限时,速度调节器投入运行。其输出将在原来的 $-i_{gm}$ 基础上减小,迫使电流环输出电流减小。但只要电枢电流不为零,电流仍为制动电流(还有摩擦阻力),电机仍处于减速过程中。当电机电流减小到零时(速度调节器输出为零,其给定等于实际速度),电机仍在阻力矩作用下减速,则速度调节器输出相反的电压,使电机电流反向增加,该电流将产生驱动转矩。当电机电流增加到等于负载电流时,电机速度已经低于给定速度(超调),速度调节器输出增加,电机加速,经过几次调整,电机运行在指定速度。

速度调整过程中,影响系统速度响应规律的是速度调节器比例积分系数。合适选择速度调节器参数,或者采用现代控制理论^[7~9]等方法,系统将有较好的速度跟踪响应。在此系统中,根据工程设计要求设计好速度调节器参数后,适当增加其比例系数,减小其积分系数,并设置速度微分反馈,可以使系统速度既能有较快的上升率,又可以抑制速度超调。

3.4.2 能耗制动阶段

如果电机制动时的速度给定为零,则在速度到达接近零的误差限时,速度调节器参与调节,先进行速度调整(同上)。当电机速度接近零时,因反电动势小,不足以产生系统所给的电流值。电流调节器输出信号过零反向,使逆变器输出也过零反向,在电机端口产生与电机电动势顺串的电压(图4中 t_4 开始)。该电压和电机电动势一道,共同产生电机制动所需要的电流,使电机速度进一步减小。此时,逆变器输出能量,电机也输出能量,所有的能量全部在电枢电阻上消耗,故称为能耗制动。当电机速度为零时,速度调节器输出并不为零,电机在制动电流(变为反向驱动电流)作用下继续减速(超调)而产生负向转速。则速度调节器输出过零并反向输出一电流给定,电流环使电机产生可以平衡负载转

矩的电流,制动完成。伺服系统定位时不允许有超调,为此,根据线性最优控制的设计思想^[10],在速度反馈中加入速度的钝态微分负反馈,可以有效地控制外扰时速度 n 波形的前后沿,抑制速度超调。

4 制动过程的实验和仿真

对本系统在 Simulink 仿真环境下进行了仿真,仿真的电机制动过程曲线见图5a及图7所示。实验波形见图5b和5c,图5b为空载制动时的速度与电流曲线,图5c为带大惯性负载制动的速度与电流曲线,三幅图很好地显示了电机制动的四个运行阶段。其中线性减速制动过程中,电流幅值恒定,表明制动转矩恒定,频率减小,说明速度降低。

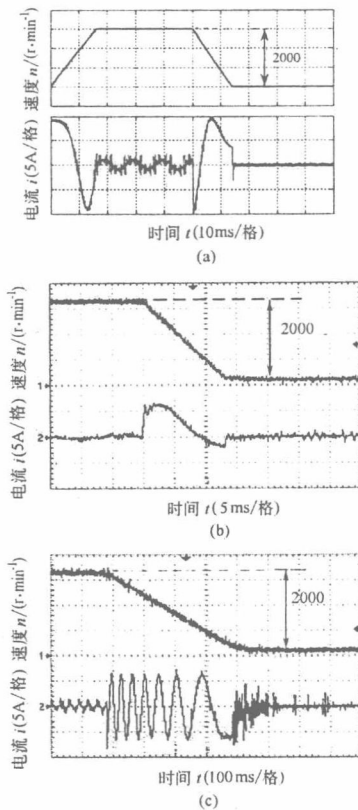


图5 电机制动过程的仿真与实验波形

Fig.5 The simulation and experiment waveforms of motor in braking process

为了更好地说明电机制动过程,图6给出了电机速度、电机端电压和电机电流波形,图中波形很好地说明了电机制动的几个工作阶段以及各阶段电

流、电压的变化规律。图7的仿真波形(依此是电机速度、电流、电压波形)也很好说明电机的制动过程。

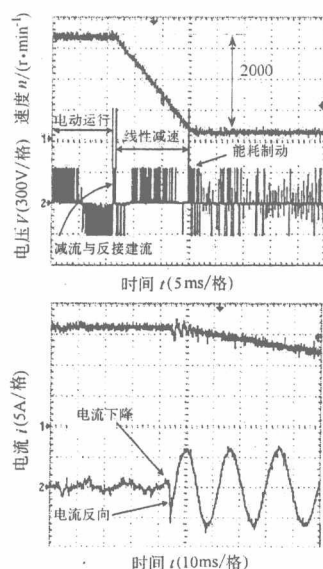


图6 电机制动过程中速度与电机端电压及电流波形

Fig.6 The speed, voltage and current waveforms of motor in braking process

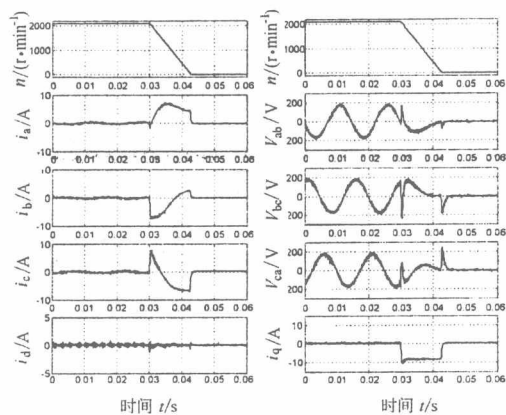


图7 制动过程仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms in braking process

5 电机制动过程中直流电压的变化

电机制动过程中,逆变器要把电机转子及负载所存储的机械能变成电能回送给直流侧,但整流器不是可逆的,则直流侧的电压将要升高,这将危及

逆变器的安全。电压升高的数值与电机轴联负载的转动惯量成正比,与滤波电容的容值成反比。空载制动过程直流电压上升曲线,及逆变器输入电流、整流器输出电流、电机速度及电流波形见图8所示。在制动完成时,根据能量守恒定律可以求得直流电压的变化。制动前直流侧电压 $U_1=310\text{V}$,空载制动后直流端电压 $U_2=330\text{V}$,电压上升 $\Delta U=20\text{V}$ 。图中的上升数值为 18V ,其误差主要来自于制动过程中的阻力损耗、电阻损耗、能耗制动损耗及计算参数的误差。

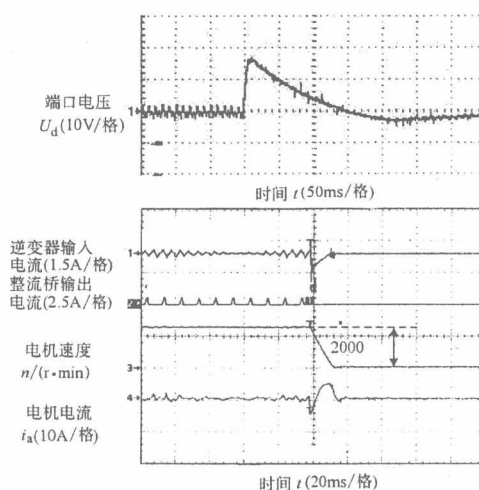


图8 电机制动时电压、电流及速度的变化

Fig.8 The waveforms of voltage, current and speed of motor in breaking process

6 结束语

本文完整地分析了电机制动的复杂过程,其中电流、速度调节器输入给定、反馈将在不同运行阶段做相应变化。电机制动过程将经历减流、反接建流、回馈制动、能耗制动或速度调整几个阶段,其中回馈制动阶段电机速度线性下降,是电机制动的主要阶段,需要充分利用电机潜力以提高电机的制动速度。在减流和反接建流过程中,影响电机电流变化的因素较多,包括制动时刻的转子位置、电源电压与反电动势。建流中,电流上升速率大,电流有超调,容易引起保护装置动作,需要适当设置保护动作时间及门限。电流变化率的增大,将在电源和逆变器的输入端产生过压,故两者连线应尽量地短。电机制动到速度调整过程中,为使系统响应快且无超调,需要合适设置调节器的参数。若电机要

制动到零,则当电机速度接近零时,由于反电动势不足以维持制动电流,电流调节器将使逆变器输出电流,电机实现能耗制动。在系统实际定位过程中,使用速度微分反馈是抑制超调的有效手段。

参考文献

- 1 孙立志,陆永平,邓召春.永磁同步电动机再生制动状态的分析与仿真.微电机,1997(6):8~11
- 2 叶东,张锋奇,孙丽玲等.稀土永磁同步电动机起动过程研究.中国电机工程学报,1998,18(5):335~340
- 3 李崇坚,王祥珩,李发海,高景德等.磁场定向控制交交变频同步电机系统的数学模型.清华大学学报(自然科学版),1995,35(4):1~8
- 4 王成元.矢量控制交流伺服驱动电动机.北京:机械工业出版社,1995.179~197
- 5 汤蕴璆,史乃,沈文豹.电机理论与运行.1984.291~303
- 6 张波,李忠,毛宗源.PWM逆变器供电的同步电动机矢量控制电流环的研究和设计.控制理论和应用,1999,16(5):665~668
- 7 Zhu Guchuan, Louis A. Dessaint, Ouassima Akhrif, Azeddine Kaddouri. Speed tracking control of a permanent-magnet synchronous motor with state and load torque observer. IEEE Trans. on IE, 2000, 47(2): 346~355
- 8 Lin Faajeng, Lin Chihhong, Shen Pohung. Self-constructing fuzzy neural network speed controller for permanent-magnet synchronous motor drive. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2001, 9(5): 751~759
- 9 Marco Tursini, Francesco Parasiliti, Daqing Zhang. Real-time gain tuning of PI controllers for high-performance PMSM drives. IEEE Trans. on IA, 2002, 38(4): 1018~1026
- 10 章卫国,卢京潮,吴方向.先进控制理论与方法导论.西安:西北工业大学出版社,2000.17~55

作者简介

陈 荣 男,1963 年生,副教授,博士生,研究领域为电力电子与电力传动。

邓智泉 男,博士,1969 年生,教授,研究领域为无轴承电机、高速电机、交流电机控制。

第十五届国际电磁场计算会议征文通知

第十五届国际电磁场计算会议 (COMPUMAG 2005), 定于 2005 年 6 月 26~30 日在沈阳召开。会议将讨论电磁场数值计算以及电磁装备的设计与分析的最新发展和应用。会议由沈阳工业大学承办。

一、会议的主要议题

1. 线性与非线性静电场、静磁场问题的计算
2. 时变场
3. 电磁兼容问题的计算技术
4. 波动方程和散射问题
5. 电磁场优化和逆问题的确定方法和随机算法
6. 材料属性仿真
7. 电磁系统的移动边界问题
8. 电磁场的数值技术
9. 软件技术和电磁设计计算机辅助技术
10. 数值技术在电机和驱动装置中的原创性应用
11. 计算电磁学教育
12. 验证电磁场分析方法的国际标准 (Benchmark) 问题

二、论文摘要的投稿要求

1. 论文摘要 (两页纸) 投稿的截止日期为 2004 年 11 月 1 日, 审查录用后全文提交时间为 2005 年 6 月。
2. 论文摘要格式必须严格按照论文模板的要求, 作者可以在会议网站下载论文摘要的模板文件。
3. 论文摘要文件以.doc 或.pdf 格式存储, 采用网上投稿的方式。

三、联系方式

E-Mail: sec@compumag2005.com

地 址: 沈阳市铁西区兴华南街 58 号 571# (110023)

电 话: 024-25691429 传 真: 024-25692028

有关会议的详细情况请访问会议主页: <http://www.compumag2005.com>