

Technology
实用技术

电动机技术 实用手册

〔日〕海老原大树 主编
电动机技术实用手册编辑委员会 编

王益全 刘 军 译
秦晓平 聂凤仁



科学出版社
www.sciencep.com

电动机技术 实用手册

〔日〕海老原大树 主编
电动机技术实用手册编辑委员会 编
王益全 刘 军 译
秦晓平 聂凤仁

科学出版社
北京

图字：01-2004-5408号

内 容 简 介

本书从实用的角度出发,全面系统地介绍电动机的基本理论和应用技术,包括各种电动机的结构与工作原理,现代电机设计技术,电动机驱动与控制技术,电动机测试、特性分析及材料等技术;系统地介绍电动机技术领域的一系列最新成果及其发展方向,包括电动机的高效率、高性能控制、低振动低噪声以及电动机的循环再利用等技术。同时,对电动机技术在十个典型领域的应用及其发展动向作了详细的介绍。

本书在介绍电动机技术最新成果的同时,也贯穿了高效节能和环境保护这一主线,令人耳目一新。书中介绍的电动机技术理论与成果均代表了当今该领域的先进水平。

本书可作为从事电动机技术的研究开发与应用的工程技术人员的实用技术手册,也可作为大专院校电气工程类专业的教师、研究生和高年级本科生的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电动机技术实用手册/(日)海老原大树主编;电动机技术实用手册编辑委员会编;王益全等译. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-016515-2

I. 电… II. ①海… ②电… ③王… III. 电动机-技术手册
IV. TM32-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 139329 号

责任编辑:赵方青 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:郭 艳

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年3月第一版 开本:A5(890×1240)

2006年3月第一次印刷 印张:32 3/4

印数:1—4 000 字数:111 200

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

译者序

20 世纪是科学技术飞速发展的时代,电动机技术也获得了日新月异的进步。随着铁心材料、绝缘材料等电机用材料的进步,绕组技术、电磁场有限元分析技术、CAD 技术等电机设计技术的进步,以及电机制造工艺等技术的提高,电动机的高效率、高品质技术已经可以达到很高的水准。随着电力电子技术、计算机技术以及控制理论的发展,电动机的高性能控制技术也已经达到了很高的水平。例如,具有高效率、高性能的永磁同步电动机、无刷直流电动机等新型电动机技术的进步,为各种控制系统和电气产品的进步做出了突出的贡献。过去效率和功率因数指标都很低的磁阻电动机,经过精心地设计和采用合适的电子控制技术后,目前,开关磁阻电动机也已经跻身到高效率电动机的行列。

近年来,随着科学技术的飞速发展以及人民生活水平的不断提高,对能源的需求量快速增加,人类已经开始面临资源枯竭的严峻现实。大量能源的消耗,使二氧化碳等温室气体的排放量大幅度增加,人类面临着地球变暖等重大环境问题。“有限资源的有效利用”和“环境问题”是 21 世纪人类从事生产活动时的两个关键主题,人们寄希望于生产技术与环境的协调和可持续发展。

面对有限的煤炭、石油和天然气等资源,除努力开发新能源以外,高效节能是解决能源短缺的惟一出路。电动机是能源消费的第一大户,电网总能量的近 70% 是由电动机消耗掉的。因此,电动机的高效节能问题是关系到国计民生的重大问题,电动机的高效节能技术的研究与开发也受到了人们的高度重视。

今天,“环境保护”“循环经济”等概念已深入人心,对此一无所知的人寥寥无几。电动机的环境保护问题主要体现在电动机产品的低振动、低噪声技术以及电动机产品的循环再利用技术等。

本书从实用的角度出发,全面系统地介绍电动机的基础理论和应用技术,包括各种电动机的结构与工作原理,现代电机设计技术,电动机驱

ii 译者序

动与控制技术,电动机测试特性分析及材料技术等。系统介绍了电动机技术研究领域的一系列最新成果及其发展方向,包括电动机的高效率、高性能控制、低振动低噪声以及电动机的循环再利用等技术。同时,对电动机技术在十个典型领域的应用及其发展方向作了详细的说明。这十个典型领域是电动机驱动系统、FA 机器、CA 装置与信息装置、AV 装置、汽车、电动汽车、家用电器、输送搬送搬运设备、特殊环境用电动机以及机械传动与支承机构等。

本书在介绍电动机技术的最新成果的同时,坚持高效节能和环境保护这一主线贯穿全文。在研究和学习电动机技术的同时,也可以使精神境界得到一次升华。本书由日本的电动机专业领域 100 多位作者执笔,每一位作者介绍的都是电动机技术的一个专门领域,应该说,书中介绍的理论和技术成果均代表了该领域的当今先进水平。

本书共分三篇。其中,第 1 篇为基础篇,由刘军、秦晓平和聂凤仁翻译;第 2 篇和第 3 篇分别为提高篇和应用篇,由王益全翻译。

译者有幸承担了本书翻译工作,在翻译的过程中,译者也经历了一个再学习的过程。本书所涉及的领域是非常广泛,所提供的信息是异常丰富,要想集如此众多领域的知识和技术于一身,做到完全准确无误的翻译是困难的。加之译者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

在翻译本书的过程中,得到了科学出版社有关人员的很多指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

王益全

前 言

“电”问世已有大约 200 年的历史了,且与“电”相关联技术发展得也是日新月异。

在开发各种产品的时候,必须对作为驱动源的电动机以及如何满足其适用的条件进行研究开发。最初的开发单纯局限于电动机旋转和产生转矩,而随着电动机械的不断发展,人们对电动机的小型化、轻量化、可变速运行、快速响应性、定位功能、低振动、低噪声等指标提出了更高的要求。并且,在与计算机技术相接合后,出现了具有判断功能的产品。与此相对应,对伺服系统和传动机械也提出更高的要求。近年来,为了保护地球环境、节省资源,以生态平衡为宗旨,涉及电动机制造技术的相关再循环法、PL 法(Product Liability Act)等的演变发展也呈现咄咄逼人的势态。随着激烈的技术变革,要求从事电动机技术的专家、学者具有相应的措施。

在这个背景下,本书是以电动机技术为基础,以简明易懂为目的,根据最新的电动机的技术动向和应用状况而编写而成。

特别是本书以各种电动机的小型化、轻量化技术为首,对高效率、高转矩、低振动、低噪声等最新电动机开发技术予以介绍;同时还把面向节能的最新逆变器等控制技术作为本书的重点。

本书编写方针如下:

- (1) 把握目前正在实用的电动机的全貌;
- (2) 以中、小型电动机为中心进行论述;
- (3) 对电动机的开发和利用时的关键技术,用易于理解的形式表达;
- (4) 综述在 21 世纪主要应用的电动机技术。

执笔时还关注到以下几个方面:

- (1) 将内容置于实用的水平,以现场需要的观点取材;
- (2) 以理解书中的内容为目的,引用基本的数学公式;
- (3) 需要深刻理解的内容,不吝重复;

iv 前 言

(4) 重要的术语力求全书统一。

本书的执笔阵容为：社团法人日本能率协会主办的电动机技术研讨会的企划委员、协会，以及作为日本电动机技术的引领者，活跃在第一线的诸位学者。对以上不顾日常业务繁忙，执笔本书的各位，在此表示由衷的敬意。

最后，谨向为本手册出版不吝协助的社团法人日本能率协会，承担业务工作的日刊工业新闻社的清水崇先生表示由衷的谢意。

海老原大树

(武藏工业大学 教授)

本书原著著者名单

编辑委员长兼基础篇编辑干事 海老原大树(武藏工业大学)

编辑委员兼提高篇编辑干事 堀 洋一(东京大学)

编辑委员兼应用篇编辑干事 百目鬼英雄(东方电机)

编辑委员

海老原大树(武藏工业大学)

百目鬼英雄(东方电机)

三木 一郎(明治大学)

熊田 正次(安川电机)

松井 信行(名古屋工业大学)

渡边 智(佳能)

大石 浩 (长冈技术科学大学)

丸尾 恒弘(索尼)

渡边 利彦(FDK)

水野 哲哉(阿斯莫)

高桥 则雄(冈山大学)

水野 孝行(明电舍)

大西 和夫(日本伺服)

小串 正树(松下电器产业)

泽 孝一郎(庆应义塾大学)

菊田 充二(神钢电机)

堀 洋一(东京大学)

长竹 和夫(东芝)

森永 茂树(日立制作所)

下河边 明(东京工业大学)

奥野 治臣(三菱电机)

三上 亘

执笔者(各章节担当编辑委员)

[基础篇]

海老原大树 武藏工业大学(第

1章,1.1,1.2,1.3)

大崎博之 东京大学(2.6)

三上 亘 (1.4,1.5)

横塚 勉 群馬大学(2.7)

泽 孝一郎 庆应义塾大学(2.1)

前野隆司 庆应义塾大学(2.8)

三木一郎 明治大学(第2章,2.2)

松井信行 名古屋工业大学
(第3章,4.2.3(2))

武田洋次 大阪府立大学(2.3)

千住智信 琉球大学(3.1.1)

小堀 胜 东方电机(2.4)

近藤正示 长冈技术科学大学
(3.1.2)

千叶 明 东京理科大学(2.5,3.1.5)

- | | | | |
|-------|-------------------|------|----------------------|
| 竹下隆晴 | 名古屋工业大学(3.1.3) | 小黑龙一 | 安川电机(4.4) |
| 大森洋一 | 东洋电机制造(3.1.4) | 大石 洁 | 长冈技术科学大学(4.5) |
| 小山 纯 | 长崎大学(3.2.1) | | |
| 谷口胜则 | 大阪工业大学(3.2.2) | 渡边利彦 | FDK(第5章,5.1,5.3,5.6) |
| 五十岚征辉 | 富士电机综合研究所(3.2.3) | 胁若弘之 | 信州大学(5.2) |
| 大石 洁 | 长冈技术科学大学(第4章) | 葛西 功 | 小野测器(5.4) |
| 霍田雅信 | 日本德克萨斯仪器仪表(4.1.1) | 桥诘 隆 | 小野测器(5.5,5.6) |
| 渡边正彦 | 日立制作所(4.1.2) | 高桥则雄 | 冈山大学(第6章,6.3) |
| 正木良三 | 日立制作所(4.1.2,4.3) | 石原好之 | 同志社大学(6.1,6.5) |
| 小林弘和 | 东洋电机制造(4.2.1(1)) | 山崎克巳 | 千叶工业大学(6.4) |
| 百目鬼英雄 | 东方电机(4.2.1(2)) | 宫田浩二 | 信越化学工业(6.6) |
| 野口季彦 | 长冈技术科学大学(4.2.2) | 河濑顺洋 | 岐阜大学(6.7) |
| 久保田寿夫 | 明治大学(4.2.3(1)) | 大西和夫 | 日本伺服(6.2,6.8,第7章7.1) |
| 小坂 卓 | 名古屋工业大学(4.2.3(3)) | 开道 力 | 新日本制铁(7.2) |
| 三浦启正 | 多摩川精机(4.3) | 田中省吾 | 日立金属(7.3) |
| [提高篇] | | 尾川裕二 | 日立电线(7.4) |
| 泽 孝一郎 | 庆应义塾大学(第1章,1.1) | 菊池英行 | 日立电线(7.4) |
| 伊藤元哉 | 日立制作所(1.2.1) | 冈田 学 | 日立化成工业(7.5) |
| 谷本茂也 | 东芝(1.2.2) | 田原和雄 | 日立制作所(7.6) |
| 森本茂雄 | 大阪府立大学(1.3.1) | 武田洋次 | 大阪府立大学(1.4.2) |
| 大山和伸 | 大金空调技术研究所(1.3.2) | 堀 洋一 | 东京大学(第2章,2.10) |
| 本田幸夫 | 松下电器产业(1.3.3) | 岛田 明 | 精工精机(2.1) |
| 松瀨贡规 | 明治大学(1.4.1) | 松原俊介 | FANUC(2.2) |
| | | 二见 茂 | 安川电机(2.3) |
| | | 大石 洁 | 长冈技术科学大学(2.4,2.9) |
| | | 官崎敏昌 | 长冈工业高等专门学 |

	校(2.4)		3.2)
海田英俊	富士电机综合研究所 (2.5,2.7)	盐幡宏规	茨城大学(3.1)
		奥野治臣	三菱电机(第4章,4.1)
池田英俊	三菱电机(2.5,2.7)	前岛 仁	三菱电机(4.2)
岩崎 诚	名古屋工业大学(2.6)	远藤健一	精工爱普生(4.3.1, 4.3.2)
藤本博志	东京大学(2.8,2.11)		松下电器产业(4.3.3, 4.3.4)
铃木文泰	东京大学(2.9)	山下文敏	
小田井正树	日立制作所(2.10)		
森永茂树	日立制作所(第3章,		

[应用篇]

百目鬼英雄	东方电机(第1章,1.1)	山崎茂树	索尼(4.2)
泷本正浩	东方电机(1.2)	菊池 敦	索尼(4.2)
小堀 胜	东方电机(1.3.1)	矢崎耕一	索尼(4.3)
米田 真	东方电机(1.3.2)	江尻 等	索尼(4.4)
三上 亘	(1.4)	石丸英儿	FDK 机电一体化(4.5)
熊田正次	安川电机(第2章,2.1)	水野哲哉	阿斯莫(第5章,5.1)
佐藤育美	安川电机(2.2)	渡部晋治	三菱电机(5.2)
梶本浩二	安川电机(2.3)	高桥 稔	日本精工(5.3)
宫本恭祐	安川电机(2.4)	宗 正浩	电装(5.4)
古贺光浩	安川电机(2.5)	水野孝行	明电舍(第6章,6.2)
坂井明雄	安川电机(2.6)	堀 洋一	东京大学(6.1)
渡边 智	佳能(第3章)	片田 宽	日立制作所(6.3)
大野晃生	佳能(3.1)	田岛文男	日立制作所 (6.2.3(1),6.4)
中杉千夫	佳能(3.2)		
石井 宽	佳能(3.3)	小串正树	松下电器产业(第7 章)
青岛 力	佳能(3.4)		
金子 猛	索尼(3.5)	浅野能成	武生松下电器(7.1, 7.2,7.3,7.4,7.5)
北森辉明	并木精密宝石(3.6)		
丸尾恒弘	索尼(第4章)	菊田充二	神钢电机(第8章, 8.2.2,8.3)
新仓英生	索尼(第4章)		
久山浩二	松下电器产业(4.1)	中村雅宪	东洋电机制造(8.1)

武下 诚	高岳制作所(8.2.1)	北条春夫	东京工业大学
本田正昭	日立机电工业(8.2.3)		(10.1.1,10.1.3)
深井文宪	雅马哈发动机(8.2.4)	春日慎一	日本精工(10.1.2)
樋田直也	本田技术研究所(8.4)	镰野 彻	光洋精工(10.2.1)
长竹和夫	东芝(第9章)	柴田正道	光洋精工(10.2.1)
城下健治	多摩川精机(9.1)	林田一德	光洋精工(10.2.1)
木村元比古	东芝(9.2)	秋山 胜	日本精工(10.2.2)
冈村 学	东芝(9.3)	大西政良	光洋精工(10.2.3)
下河边 明	东京工业大学(第10章)	上山拓知	光洋精工(10.2.3)

注:黑体表示各章编辑委员

目 录

基础篇

第1章 总论	3
1.1 电动机技术与产业	3
1.2 电动机开发的历史沿革	5
1.2.1 电动机基本构造的提案	10
1.2.2 电动机的开发初期	11
1.2.3 实用电动机的开发与研究	11
1.3 电动机的种类与特性	13
1.4 电动机技术开发的现状与课题	17
1.4.1 背景	17
1.4.2 现状	19
1.4.3 课题	22
1.5 电动机技术与外围技术	24
1.5.1 电动机技术	24
1.5.2 外围技术	26
第2章 电动机基础	31
2.1 直流电动机	31
2.1.1 基本原理	31
2.1.2 构造	32
2.1.3 感应电动势和电磁转矩	34
2.1.4 基本关系式和特性	35
2.1.5 电枢反应	39
2.1.6 整流现象	39
2.2 感应电动机	42
2.2.1 三相感应电动机	42

2.2.2	二相感应电动机	50
2.2.3	单相感应电动机	50
2.3	永磁同步电动机	52
2.3.1	永磁同步电动机转子的结构和特征	52
2.3.2	永磁电动机的分类和特征	54
2.3.3	基本特性关系式和等效电路	56
2.3.4	d 、 q 轴等效电路和基本矢量	58
2.3.5	电流的矢量控制法	59
2.3.6	样机的实验特性	64
2.4	步进电动机	65
2.4.1	种类和构造	66
2.4.2	工作原理	68
2.4.3	特性和专业术语	72
2.5	磁阻电动机	76
2.5.1	开关磁阻电动机	76
2.5.2	同步磁阻电动机	81
2.5.3	磁阻电动机的比较和特征	84
2.6	直线型电动机	87
2.6.1	原 理	88
2.6.2	特 征	88
2.6.3	分 类	90
2.6.4	各种直线型电动机的特征	92
2.6.5	直线驱动系统	96
2.7	其他电磁力电动机	98
2.7.1	通用电动机	98
2.7.2	无铁心电动机	100
2.7.3	磁滞电动机	101
2.7.4	直接驱动电动机	103
2.7.5	微型电动机	104
2.7.6	无轴承电动机	105
2.8	非电磁力电动机	107
2.8.1	超声波电动机	107

2.8.2	压电传动机构	111
2.8.3	磁伸缩传动机构	112
2.8.4	静电电动机	113
2.8.5	其他	114
第3章	电动机驱动技术	118
3.1	各种电动机的典型控制方法	118
3.1.1	直流电动机控制	118
3.1.2	坐标变换	124
3.1.3	无刷电动机的控制	133
3.1.4	矢量控制	141
3.1.5	磁阻电动机的控制	148
3.2	电动机驱动电源和器件	158
3.2.1	斩波器	158
3.2.2	逆变器	165
3.2.3	逆变器主电源电路器件	174
第4章	电动机控制技术	187
4.1	电动机的控制器件	187
4.1.1	数字信号处理器	187
4.1.2	微处理器	197
4.2	电机控制方式和特征	205
4.2.1	开环控制	205
4.2.2	闭环控制	214
4.2.3	无传感器控制	224
4.3	电动机控制中的传感器技术	254
4.3.1	电流传感器	254
4.3.2	速度传感器	257
4.3.3	位置传感器	259
4.4	电动机控制特性和评价	271
4.4.1	稳定运转状态的特性评价	271
4.4.2	用传递函数描述电动机控制特性的方法	273
4.4.3	用实际响应评价电动机控制特性的方法	274
4.5	电动机控制理论与特征	277

4.5.1	现代控制理论在电动机控制中的应用	277
4.5.2	用数字系统构成的控制系统	281
4.5.3	对于今后控制理论的展望	283
第5章	电动机特性测试技术和评价方法	285
5.1	特性测量概论	285
5.1.1	电动机的特性测量	285
5.1.2	输入、输出和功率损耗	286
5.1.3	特性测量的目的和测量方法	287
5.1.4	特性常数和特性评价	288
5.2	基本物理量的测量方法	291
5.2.1	输入特性量	291
5.2.2	输出特性量	295
5.2.3	状态量	298
5.2.4	关于性能试验方法的规定	303
5.3	电动机特性的测量方法	306
5.3.1	负载特性的测量	306
5.3.2	无励磁的损失转矩和固定损耗的测量	309
5.3.3	旋转角度转矩特性的测量	310
5.3.4	步进电动机的转矩特性的测量	312
5.3.5	直线电动机推力特性的测量	316
5.4	测量装置	320
5.4.1	转矩仪	320
5.4.2	转速和旋转角度	324
5.4.3	功率计	327
5.4.4	振动计和噪声计	329
5.4.5	电动机的测试装置	331
5.5	数据处理技术	337
5.5.1	利用PC机测量和数据处理	337
5.5.2	高度的数据处理	342
5.6	通用电动机特性的现状	347
5.6.1	有刷直流电动机	347
5.6.2	伺服电动机	349

5.6.3	无刷电动机	349
5.6.4	步进电动机	350
第6章	电动机的特性分析技术	353
6.1	电动机的特性分析	353
6.2	等效电路法及其应用	355
6.2.1	等效电路法的基础知识	355
6.2.2	磁路等效电路的应用实例	357
6.2.3	磁导率的计算	358
6.3	有限元法及其应用	359
6.3.1	计算顺序的概要	360
6.3.2	边界条件	362
6.3.3	电压源的考虑	364
6.3.4	旋转的处理	365
6.3.5	速度项的处理	366
6.3.6	与最优化方法并用	367
6.4	转矩的计算方法和斜槽的考虑	370
6.4.1	转矩的计算方法	370
6.4.2	关于斜槽的考虑	373
6.5	铁心材料的模型化及铁损解析	376
6.5.1	磁特性的模型	376
6.5.2	磁化特性的模型	376
6.5.3	铁损的分析	378
6.6	永久磁铁的模型	384
6.6.1	永久磁铁的磁化特性和数值分析方法	384
6.6.2	形状模型化	385
6.6.3	配向方向的考虑	386
6.6.4	充磁的分析	387
6.6.5	退磁的分析	389
6.7	复合问题及其分析	391
6.7.1	分析方法	391
6.7.2	考虑驱动回路和线圈端部的永磁电动机的 特性分析举例	393

6.7.3	各向异性环型磁铁电动机的特性分析举例	395
6.7.4	齿极型步进电动机的分析举例	397
6.7.5	嵌入磁极式电动机的三维热传导分析	398
6.7.6	嵌入磁极式电动机的三维涡流分析	399
6.8	减低齿槽效应转矩的方法	402
6.8.1	减低齿槽效应转矩的方法概要	402
6.8.2	铁心槽和齿槽效应转矩	403
6.8.3	降低步进电动机的齿槽效应转矩的方法	405
第7章	电动机的构成材料	407
7.1	电动机构成要素的现状和发展动向	407
7.2	铁心材料	410
7.2.1	种类和性能要求	410
7.2.2	各种特性	411
7.2.3	电动机内铁心性能与铁心材料材质特性的 关系	414
7.2.4	通过铁心材料的活用提高电动机的性能	415
7.3	永磁材料	415
7.3.1	永久磁铁概要	416
7.3.2	铁氧体磁铁	416
7.3.3	稀土类烧结磁铁	417
7.3.4	稀土类黏接磁铁	418
7.3.5	永久磁铁在使用上的注意事项	419
7.4	导电材料	421
7.4.1	漆包线的构成材料	421
7.4.2	漆包线的一般特性	424
7.4.3	基本设计中的注意事项	425
7.4.4	最近的技术动向	427
7.5	绝缘材料和注模材料	429
7.5.1	浸渍清漆	429
7.5.2	铸模材料	432
7.5.3	线槽内的绝缘材料	434
7.6	电刷材料	436