



華夏英才基金學術文庫

方瑞明 著

电机智能设计方法



科学出版社

www.sciencep.com

中国电机工程学会

国家科技图书文献中心 华夏英才基金学术文库

电机智能设计方法

方瑞明 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要围绕电机智能设计的基本理论和方法,详细阐述了近年来形成的适于 CAD 系统的电机智能设计方法。全书分为绪论、基础篇、技术篇和展望篇四大部分。第一章是本书的绪论篇。第二至第四章组成了基础篇,该篇围绕电机智能设计这一主题,介绍了电机智能设计所涉及的电机设计、电机 CAD 基础以及智能设计的理论和方法。第五至第八章组成了技术篇,该篇介绍了电机智能设计的具体方法和开发实例,包括基于模糊逻辑的电机设计综合评价方法、基于实例推理技术的电机初始设计方法、基于混合型专家系统的电机调整设计方法和基于遗传算法的电机优化设计方法。第九章为展望篇,从智能化、集成化、网络化的角度对电机 CAD 技术的发展进行了分析,提出了基于网络的电机设计智能集成平台的概念。

本书既有较强的理论性,注意介绍基本理论和基本概念,同时又兼顾工程实际,反映了作者近十几年来从事电机智能设计研究和开发的科研成果和国内外的研究进展,可供从事电机 CAD 的工程技术人员参考,也可作为高等学校电机与电器专业的研究生教材;还可作为电工类专业、自动控制类专业的师生或有关技术人员的教学参考书或继续教育教材。

图书在版编目(CIP)数据

电机智能设计方法/方瑞明 著. —北京:科学出版社, 2010
(华夏英才基金学术文库)
ISBN 978-7-03-028693-2

I. 电… II. 方… III. 电气-电机:计算机辅助设计 IV. TM302-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 161841 号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:李 影
责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

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

*

2010 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 8 月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 1—3 000 字数: 256 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电机计算机辅助设计(computer aided design, CAD)技术的发展,将设计人员从繁琐的数值计算和手工绘图中解放出来,极大地提高了设计效率,缩短了产品设计周期。然而,电机设计过程不仅涉及大量基于物理模型和数值处理的计算型工作,还需要设计人员发挥自己的创造性,应用多学科知识和实践经验,分析推理、运筹决策、综合评价,才能取得合理的结果。传统 CAD 技术在数值计算和图形绘制上扩展了人的能力,可以比较圆满地完成计算型工作,但对设计过程中所涉及智能决策行为却无能为力。人工智能技术的发展为解决电机 CAD 技术的这一瓶颈问题提供了新的思路。研究电机智能设计技术,将人工智能技术与电机计算机辅助设计技术有机结合,各取所长,能够使计算机参与电机设计的方案决策、性能分析、优化设计等全过程,大幅度提高设计自动化的水平,进而大大提高设计工作的效率和质量。

本书作者自 20 世纪 90 年代中期开始从事电机智能设计领域的研究工作,十余年来,先后完成了多项电机智能设计相关课题,开发了多种电机类型的电机智能 CAD 系统。本书就是作者在电机智能设计领域研究成果的总结,同时也参考了国内外这一领域研究前沿的学术文献,其内容既反映了电机智能设计研究的热点、前沿及发展方向,也包括了一些较为成熟的理论和技术。全书由四部分组成:第一章是绪论;第二至第四章组成了基础篇,该篇围绕电机智能设计这一主题,介绍了电机智能设计所涉及的电机设计基础知识(第二章)、电机 CAD 基础知识(第三章)以及智能设计的基础知识(第四章);技术篇由第五至第八章组成,该篇介绍了电机智能设计的具体方法和开发实例,包括基于模糊逻辑的电机设计综合评价方法(第五章)、基于实例推理技术的电机初始设计方法(第六章)、基于混合型专家系统技术的电机调整设计方法(第七章),以及基于遗传算法的电机优化设计方法(第八章);第九章为展望篇,从智能化、集成化、网络化的角度对电机 CAD 设计技术的发展进行了分析,提出了基于网络的电机设计智能集成平台的概念。

本书注重系统性和可读性,力求准确无误、深入浅出。全书既有较强的理论性,注意介绍基本理论和基本概念,同时又兼顾工程实际,结合作者开发相关电机智能 CAD 系统的经验体会,详细阐述不同智能设计方法的实现策略,希望能够给电机智能 CAD 系统的开发者提供参考和帮助。

作者在电机智能设计领域的研究先后得到了包括国家自然科学基金(50175013)、机械工业技术发展基金(96JA0705)、福建省自然科学基金(2004J032、

2008J0021)、国务院侨办自然科学基金(07QZR01)、中船重工集团科技计划项目、厦门市科技计划项目以及华侨大学高层次人才科研基金(03B01)等项目的资助。本书的出版是在“华夏英才基金”的资助下完成的,特此鸣谢!

本书写作过程中,得到了东南大学胡度生教授悉心指导和帮助。上海电器科学研究院傅丰礼教授高级工程师,河海大学马宏忠教授,中船重工集团七一二研究所电机事业部湛瑾研究员、祝后权副研究员,以及闽东电机股份有限公司杨继秀高级工程师、刘立恩高级工程师等曾与作者就电机智能设计所涉及的许多问题进行了坦诚而有效的讨论,令作者受益匪浅,在此一并向他们表示深深的谢意!

本书在写作过程中,参考了大量文献,已尽可能地列在书后的参考文献中,但其中难免有所遗漏,特别是一些资料经反复引用已难以查实原始出处。这里特向被漏列参考文献的作者表示歉意,并向所有的作者表示诚挚的谢意。由于作者的学识水平有限,书中的不妥之处在所难免,恳请同行和读者批评指正!

目 录

前言

绪 论

第一章 绪论	3
1.1 电机 CAD 技术的发展概况	3
1.2 问题的症结	4
1.3 从常规计算机辅助设计到智能设计	5
参考文献	6

基 础 篇

第二章 电机设计的基础理论与方法	11
2.1 基于变参数模型的电磁设计分析方法	11
2.2 计及转子集肤效应影响分析	15
2.2.1 半开口槽模型	15
2.2.2 闭口槽模型	16
2.2.3 计算实例	18
2.3 计及电源中时间谐波的影响分析	19
2.3.1 时间谐波分量对定子电流的影响	20
2.3.2 时间谐波分量对电机效率的影响	20
2.3.3 时间谐波分量对电机转矩的影响	21
2.3.4 计及谐波影响的等效电路	24
2.3.5 基于谐波分析法的变频电机分析计算	25
2.3.6 实例与分析	26
2.4 电机直接设计综合法	28
2.4.1 Levi 的直接设计综合法	28
2.4.2 改进的直接设计综合法	28
2.5 小结	34
参考文献	35
第三章 电机 CAD 的基本理论与方法	37
3.1 电机 CAD 的一般过程	37

3.1.1	电机电磁设计内容和一般步骤	37
3.1.2	电机 CAD 的一般过程	39
3.2	开放式电机 CAD 集成系统	40
3.2.1	软件评价原则	40
3.2.2	当前电机 CAD 系统的主要问题分析	41
3.2.3	开放式电机 CAD 集成系统的软件思想	42
3.2.4	开放式电机 CAD 集成系统结构	43
3.2.5	开放式电机 CAD 集成系统的三视图模型	44
3.2.6	开放式电机 CAD 集成系统的面向对象分析	47
3.2.7	开放式电机 CAD 集成系统实现	48
3.3	开放式电机 CAD 集成系统的数据模型与数据库设计	49
3.3.1	开放式电机 CAD 集成系统数据分析	50
3.3.2	开放式电机 CAD 系统数据的模块化分析	51
3.3.3	开放式电机 CAD 系统数据库系统设计	53
3.3.4	开放式电机 CAD 集成系统数据库实现	54
3.3.5	数据库系统的安全模式	55
3.4	开放式电机 CAD 集成系统的人机界面设计	56
3.4.1	人机界面设计及原则	56
3.4.2	开放式电机 CAD 集成系统的人机界面设计	58
3.5	小结	59
	参考文献	59
第四章	智能设计的基本理论与方法	61
4.1	智能设计的基本概念	61
4.1.1	智能设计的内涵	61
4.1.2	智能设计的发展阶段	61
4.1.3	智能设计的层次	62
4.1.4	智能设计的特点	64
4.2	智能设计的主要方法	65
4.3	电机智能设计系统的体系结构	67
4.3.1	电机智能设计流程分析	67
4.3.2	电机智能设计系统的总体设计思想	69
4.3.3	电机智能设计系统的体系结构	70
4.3.4	电机智能设计系统的关键技术	71
4.4	支持向量机在电机分析仿真中的应用	72
4.4.1	支持向量机的基本原理	73

4.4.2 硅钢片材料特性的支持向量机建模	74
4.4.3 转子槽集肤效应的支持向量机建模	77
4.5 小结	79
参考文献	80

技 术 篇

第五章 基于模糊逻辑的电机设计综合评价方法	85
5.1 评价指标体系	86
5.1.1 电机设计方案的评价指标体系	87
5.1.2 评价指标权重的确定	87
5.2 评价指标隶属度的建立	88
5.2.1 定量指标特征值的量化	89
5.2.2 定性指标特征值的量化	91
5.3 电机设计方案的模糊综合评价	92
5.3.1 单级评价模型的建立	93
5.3.2 综合评价过程	93
5.3.3 电机设计方案评价实例	94
5.3.4 电机多方案模糊优选	95
5.4 面向智能设计的电机设计状态综合评价系统	96
5.4.1 电机设计综合评价分析	96
5.4.2 电机设计状态综合评价模型	97
5.5 小结	99
参考文献	99
第六章 基于实例推理技术的电机初始设计方法	100
6.1 CBR 的基本原理	100
6.1.1 CBR 的一般过程	101
6.1.2 CBR 系统的开发流程	101
6.1.3 范例表示和索引	102
6.1.4 范例检索和改编	103
6.1.5 基于范例的学习	104
6.2 基于神经网络和数据库技术的电机初始方案设计方法	105
6.2.1 神经网络的基本概念	106
6.2.2 基于神经网络和数据库技术的电机设计初始方案确定方法	109
6.2.3 电机设计工程数据库与设计系统的结合方法	110
6.2.4 电机设计工程数据库系统设计	112

6.3	基于 CBR 的电机初始方案设计系统	114
6.3.1	电机设计实例描述及实例库建立	115
6.3.2	基于神经网络的 CBR 系统检索机制	118
6.3.3	基于神经网络的实例相似度判断	120
6.4	小结	122
	参考文献	122
第七章	基于混合型专家系统技术的电机调整设计方法	123
7.1	基于规则推理的专家系统基本原理	124
7.1.1	专家系统的基本特征	124
7.1.2	专家系统基本结构及一般方法	125
7.2	基于规则推理的电机设计混合专家系统	126
7.2.1	系统的总体设计	126
7.2.2	知识库的建立	130
7.2.3	知识的表达	131
7.2.4	知识库的组织	135
7.2.5	系统中推理机制的实现	135
7.3	电机调整设计规则分析	138
7.3.1	电机的设计层次	138
7.3.2	热负荷的调整	138
7.3.3	铁耗及主磁路饱和的调整	139
7.3.4	电机额定转速的调整	139
7.3.5	堵转性能的调整	140
7.4	集成神经网络推理机制的电机调整设计专家系统	141
7.4.1	系统的总体设计与构成	142
7.4.2	系统的工作流程	143
7.4.3	基于神经网络的推理机制实现	143
7.4.4	调整实例	146
7.5	小结	147
	参考文献	147
第八章	基于遗传算法的电机优化设计方法	148
8.1	电机优化设计的数学模型	148
8.1.1	优化设计目标函数的选择	149
8.1.2	优化设计变量的选取和处理	154
8.1.3	优化约束条件的处理	156
8.2	遗传算法的基本原理	158

8.2.1 遗传算法的常用术语	159
8.2.2 遗传算法的计算过程及相关技术	160
8.3 电机遗传算法优化设计的实现	165
8.3.1 编译码技术	166
8.3.2 群体设定	168
8.3.3 遗传操作	172
8.3.4 收敛问题与迭代停止条件	178
8.4 基于变焦自适应遗传算法的电机优化设计	179
8.4.1 初始种群形状对优化结果的影响及其对策	179
8.4.2 变焦控制策略的提出	180
8.4.3 基于变焦自适应遗传算法的电机优化设计程序编制	183
8.4.4 优化实例	184
8.5 小结	186
参考文献	186

展 望 篇

第九章 电机智能设计集成平台的研究	189
9.1 电机智能设计集成平台概念的提出	190
9.1.1 集成平台的定义	190
9.1.2 集成平台的基本特性	190
9.2 集成平台的总体结构与实现	191
9.2.1 集成平台的功能结构	191
9.2.2 集成平台的实现	194
9.3 集成平台中的关键技术研究	196
9.3.1 电机设计模型的集成技术	196
9.3.2 电机计算机辅助绘图技术	197
9.3.3 集成平台远程设计方法及其实现	200
9.4 小结	203
参考文献	203

绪 论

第一章 绪 论

1.1 电机 CAD 技术的发展概况

近年来,随着计算机科学的迅猛发展,电机的计算机辅助设计(computer aided design,CAD)技术也随之产生并得到了长足的发展。电机设计是一个复杂的过程,需要考虑的因素和确定的设计参数很多,并且设计参数间相互关联和影响,设计时通常都要经过一个“设计-调整-再设计”的反复尝试过程。因此,电机设计要求设计者运用先进的计算工具和设计方法,才能得到较为满意的结果。CAD 技术把计算机快速准确的特点与设计者的综合分析及智能决策能力结合起来,能够加速设计过程,缩短设计周期,提高产品质量,适应了电机产品小批量多品种生产模式的要求。因此,电机 CAD 技术越来越得到了广大工程技术人员的重视。

纵观电机 CAD 的发展历史,大致经历了如下几个阶段:

1. 起步阶段(20 世纪 50 年代中期至 60 年代初)

1954 年 R. M. Saunder 首次提出采用计算机进行电机设计,随后 C. Q. Veinott 于 1956 年最早将计算机实际应用到电机设计领域,宣告了电机 CAD 技术的产生。至 60 年代初,人们在此方面已取得了一定的成果。但是,受计算机水平的限制,此时的电机 CAD 只是协助设计者完成设计过程中的性能分析过程,即设计者事先估计好若干设计参量,计算机根据一定的程序步骤计算产品的性能,而对计算结果的评价和设计方案的调整仍需由设计者决定。故此阶段又可称作“设计分析”阶段。尽管如此,电机 CAD 的出现将设计者从繁琐的性能分析计算过程中解脱出来,缩短了设计时间,具有较大的意义。

2. 发展阶段(20 世纪 60 年代至 70 年代末)

20 世纪 60 年代期间,计算机科学进一步发展使得计算机的存储能力和计算速度均有较大的提高,高级编程语言的出现也使得计算机进一步普及,反映到电机设计领域,则是电机 CAD 由“设计分析”阶段向“设计综合”和“设计优化”阶段的跨越。此阶段的电机 CAD 软件不仅能够完成设计方案校核计算功能,并且,能够对主要设计变量进行调整,自动完成传统的尝试设计过程。计算机不仅被当作快速运算的工具,它的决策能力也开始引起人们的重视。

3. 成熟阶段(20 世纪 80 年代至今)

进入 20 世纪 80 年代后,计算机科学的发展日新月异,硬件的不断升级和软件工程理论、数据库技术及计算方法的成熟使得电机 CAD 的研究在内容、方法方面均发生了重大变化,除电磁设计外,电机 CAD 的适用范围还涉及电机的稳态和暂态热计算、电机瞬变过程分析、电磁场计算和计算机辅助制图等多个领域,功能更加齐全,说明电机 CAD 技术已渐趋成熟,并在实际生产中发挥着越来越重要的作用。

1.2 问题的症结

电机设计不仅包括基于数学模型和数值处理的计算型工作,还涉及大量的基于知识模型的推理型工作。传统 CAD 技术在数值计算和图形绘制上扩展了人的能力,可以比较圆满地完成计算型工作,但对推理型工作往往难以胜任。由于产品设计是人的创造力与环境条件交互作用的物化过程,是一种智能行为,所以有相当多的工作是不能单纯靠建立起精确的数学模型并用数值计算方法求解的,而是需要设计人员发挥自己的创造性,应用多学科知识和实践经验,分析推理、运筹决策、综合评价,才能取得合理的结果。通常把提供了诸如推理、知识库管理、查询机构等信息处理能力的系统定义为知识处理系统,例如专家系统就是一种知识处理系统。具有传统计算机能力的 CAD 系统被这种知识处理技术加强后称之为智能 CAD(intelligent CAD, ICAD)系统。ICAD 系统把专家系统等人工智能技术与优化设计、有限元分析、计算机绘图等各种数值计算技术结合起来,各取所长,相得益彰,其目的就是尽可能地使计算机参与方案决策、结构设计、性能分析、图形处理等设计全过程。这种以 ICAD 为代表的设计技术是现代设计技术的主要标志。

电机 ICAD 技术最早起源于电机设计专家系统,1988 年南非 Witwatersrand 大学的 R. Kalphen 和 C. F. Lamndy 首次提出用正向推理法指导用户完成电机设计,将专家系统引入电机设计领域,引起了国内外研究者的重视,相关研究成果不断出现。国内对电机设计专家系统的研究起步于 20 世纪 90 年代初期,东南大学、华中理工大学、沈阳工业大学和西安交通大学等单位都在进行这方面的研究,并取得了一定的成果。近年来,神经网络、遗传算法等技术不断发展,电机 CAD 的研究者将这些技术引入电机 CAD 领域,并结合传统的电机设计技术进行电机 CAD 的研究。例如将人工神经网络技术应用于电机优化设计的电机优化设计系统;神经网络与专家系统技术结合的混合型专家系统可以解决单纯使用专家系统技术时难以克服的知识获取瓶颈等问题;基于自然选择机制的遗传算法和模拟退

火算法等新型优化方法引入电机优化设计领域,与传统的优化数学方法相比,在求取优化设计的全局最优解方面取得了突破。

所有上述研究成果,为我国电机 CAD 技术的进一步发展打下了基础,同时,从中亦可以看到,现有的研究工作还存在着一些欠缺。

1. 智能化不足

现有的电机 ICAD 系统还未能充分利用人工智能的最新成果,人工智能技术在电机设计中的应用还停留在浅层次,只是围绕电机设计过程某一特定环节。缺乏能够综合设计专家思维、推理和决策,面向电机设计全过程的智能系统。

2. 集成程度不高

目前大多数电机 CAD 系统的软件设计都是由一种具体类型的电机出发,面向某一特定的设计任务,功能较为单一,比较孤立和封闭,缺乏一种能够面向电机设计与优化、性能预测与仿真、数据报表与图纸生成等产品设计全过程,甚至能够与 CAM/CAPP 系统有效集成,具有开放型体系结构的集成系统。

3. 模型准确性不够

电机物理模型的准确性是保证电机设计质量的基础。长期以来,对于电机物理模型的分析主要有基于数值分析的电磁场分析法和等效电路法。前者计算精度高,但计算时间较长,很难应用于电机优化设计过程中。而等效电路法由于较多地采用了基于经验的修正系数,在计算新型电机时准确度不够。

4. 不支持远程设计

计算机网络技术的发展,使得产品的异地合作设计成为可能。广大企业能够借助于互联网,与设计力量较为雄厚的设计院所、科研院校结成设计联盟,从根本上解决困扰企业的设计力量薄弱的问题。而目前的电机 CAD 系统都是面向个人电脑的单机版本,距离网络化距离还很远。

此外,目前的电机 CAD 大多滞后于计算机软件技术的发展,多数程序不具备友好界面,使用不方便,不具备编程经验的使用者无从更新,导致程序生命周期短,利用率低;许多界面友好的 CAD 程序专用性强,无法使用统一的人机界面,增加了对用户的培训负担。这些都限制了电机 CAD 进一步推广应用。

1.3 从常规计算机辅助设计到智能设计

进入 21 世纪后,随着人工智能技术和计算机科学的进一步发展,电机 CAD

的概念和内涵正在发生诸多改变,一些基于新的设计方法和设计思想的新型设计系统纷纷出现:浙江大学在其所开发的 Visual EMCAD 软件系统中提出了可视化电机 CAD 系统概念,强调整个电机设计过程均应在参数驱动图形的可视化环境下进行,以帮助设计人员快速掌握系统使用,提高设计效率;东南大学在与国外电机 CAD 研究机构合作的基础上,提出建立“开放式电机 CAD 集成系统”,摆脱了传统电机 CAD 中电机类型与软件系统一一对应的关系,从软件工程学的意义上首次将开放与集成的概念引入电机 CAD 领域;美国通用电气公司从计算机集成制造系统(computer integrated manufacturing system, CIMS)的角度出发,改造并集成电机 CAD 系统。

与此同时,信息技术在其他学科,例如在机械设计领域中的应用得到了迅速发展,基于信息技术的新型设计方法不断涌现:香港理工大学提出了基于网络的异地协同设计的观点,通过建立企业动态设计联盟提高企业对市场的快速响应能力;西安交通大学则从支持创新设计的知识获取的角度出发,研究异地合作设计;华中科技大学下属的华工科技股份有限公司建立了产品设计的电子商务网站。

由此可见,随着信息技术的进一步发展,传统的电机设计方法正经受着广泛的冲击,整个产品的开发阶段越来越多地利用计算机辅助完成。信息时代的设计模式的发展趋势可概括为:由静态向动态,由孤立向集成,由串行向并行,由单一向综合发展。其功能不是局限于电机设计的局部环节,而是覆盖设计的各个方面,强调功能与过程的集成和信息共享,支持灵活多变的设计合作模式。电机 CAD 在信息化的基础上,必然朝着数字化、集成化、网络化、智能化的方向发展。

参 考 文 献

- 方瑞明,胡虔生. 2000. 异步电机设计混合型专家系统的研究. 中小型电机, 27(3): 11~14
- 方瑞明,胡虔生. 2001. 基于网络的电机设计集成平台研究. 东南大学学报, 31(5): 24~27
- 方瑞明,吴明,曾国树. 2003. 基于场路结合法的永磁无刷直流电机性能分析. 微电机, 36(5): 11~13
- 方瑞明. 2002. 高速变频电机电磁设计与电机智能设计方法. 南京:东南大学电气工程系
- 方瑞明. 2004. 基于谐波分析法的高速变频电机铁耗计算方法. 电机与控制学报, 8(1): 25~28
- 方瑞明. 2004. 基于谐波分析法的高速变频电机稳态仿真研究. 中小型电机, 31(1): 1~4
- 方瑞明. 2005. 电机设计模糊综合评价系统的研究与实现. 微电机, 38(5): 16~19, 33
- 方瑞明. 2005. 利用神经网络预测高速变频电机转子闭口槽集肤效应系数. 电机与控制学报, 9(2): 156~160
- 方攸同,陆俭国,魏世泽. 2000. 基于随机算法的三相异步电动机全局优化. 中国电机工程学报, 20(5): 18~20
- 黄哲理,赵光,汪国梁. 1995. 模拟退火法在电机全局优化设计中的应用研究. 西安交通大学学报, 29(2): 7~14

- 李景川, 励庆孚, 丁国兴. 1998. 基于遗传算法的大中型异步电机优化设计. 大电机技术, (3): 34~38
- 李鲲鹏, 胡虔生. 2002. 电机设计方案的多级模糊综合评判. 微特电机, 35(1): 11~14
- 李梦薇, 金如麟, 谭弗娃. 2000. 中小型三相异步电动机智能设计专家系统. 微特电机, 28(6): 239~250
- 刘锦兴. 1999. 基于信息网络的异地协同设计与制造系统的研究. 中国机械工程, 10(8): 882~885
- 刘君. 2000. 基于关系型数据库和 OOP 的开放式电机 CAD 集成系统. 南京: 东南大学电气工程系
- 刘向群, 仇越. 2000. 模拟退火算法和遗传算法在航空直流测速发电机优化设计中的应用与性能比较. 航空学报, 21(6): 561~563
- 刘振凯, 蔡青, 丁梵林. 1999. 人工神经网络在电机设计专家系统中的应用研究. 中国电机工程学报, 19(2): 52~55
- 刘振凯, 蔡青. 1998. 电机设计智能混合系统的研究. 电工技术学报, 13(3): 1~4
- 孟朔, 赵争鸣. 2001. 异步电机的优化设计新方法清华大学学报, 41(6): 120~123
- 钱巍. 1991. 小型异步电机 CAD 及其优化设计研究. 南京: 东南大学电气工程系
- 曲利岩, 吴建华, 陈永校. 2000. 面向对象的直流电机可视化 CAD 系统. 微特电机, 28(6): 40~42
- 王安麟, 姜涛, 刘广军. 2008. 智能设计. 北京: 高等教育出版社
- 王冲权. 1989. 电机的计算机辅助设计与优化设计. 上海: 上海交通大学出版社
- 王秀和, 郑敦良. 1999. 电机设计专家系统及其发展现状. 电机技术, (2): 19~23
- 肖人彬, 陶振武, 刘勇. 2006. 智能设计原理与技术. 北京: 科学出版社
- 叶云岳, 林友仰. 1998. 计算机辅助电机优化设计与制造. 杭州: 浙江大学出版社
- 袁斌, 盛剑霓, 邱愿仁. 1997. 面向对象永磁直流力矩电机电磁设计专家系统. 微电机, 30(2): 3~6
- 周济, 查建中, 肖人彬. 1998. 智能设计. 北京: 高等教育出版社
- Ali Keyhani, Amuliu Bogdan Proca. 1999. A virtual testbed for instruction and design of permanent machines. IEEE Transactions on Power System, 14(3): 795~801
- Basu A, Majumdar A K. 1997. An object-oriented CAD system for high level synthesis//IEE Proceedings Computer Digital Technique, 144(5): 331~342
- Carret J H. 1987. A knowledge-based system for designing transformers and inductors//Proceedings of the Forth Conference on Artificial Intelligence Applications
- Delforce C, Lemaire-semail B. 1995. Induction machine modeling using finite element and permeance network methods. IEEE Transactions on Magnetics, 27(3): 2092~2095
- Dongjin Bae, Chang Seop Koh. 1997. Determination of induction motors parameters by using neural networks based on FEM results. IEEE Transactions on Magnetics, 33(2): 1924~1927
- Kamel Idir, Chang L C, Dai H P. Improved neural network model for induction motor design. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 34(5): 2948~2951
- Kandy C F, Kaplan R, Lun V. 1987. An expert system for the design of three-phase squirrel