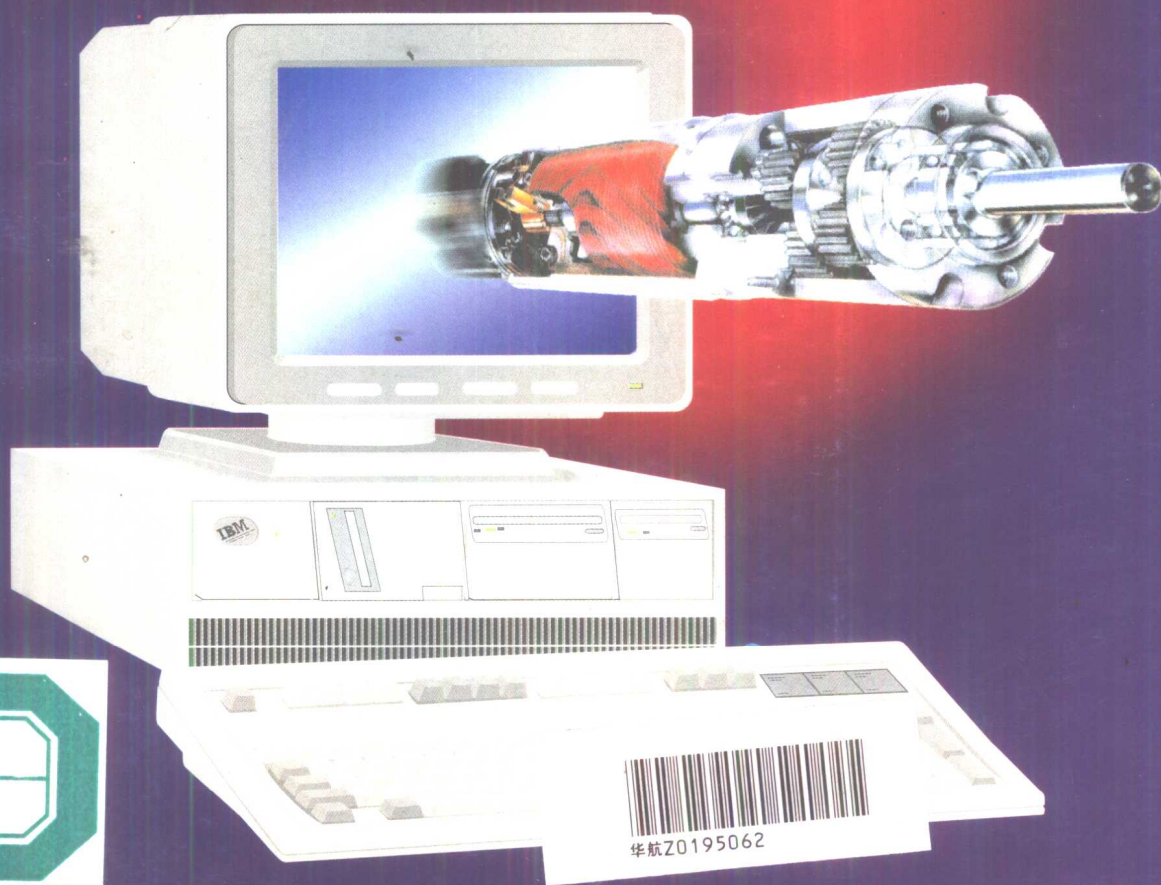


计算机辅助电机 优化设计与制造

叶云岳 林友仰 编著



浙江大学出版社

计 算 机 辅 助 电 机 优 化 设 计 与 制 造

叶云岳 林友仰 编著

浙江大学出版社

内 容 简 介

这是一本介绍如何利用计算机辅助电机优化设计和辅助电机制造工程的专业用书。本书主要分为三大部分,即计算机辅助电机优化设计、计算机辅助绘制电机工程图和计算机辅助电机制造工程。作者力求以较通俗的方式,较系统地介绍以上内容。

本书可作为高等院校电机及其控制专业本科生或研究生使用的教材,也可供从事电机工程设计、制造、运行和试验、检测的工程技术人员参考。

计算机辅助电机优化设计与制造

叶云岳 林友仰 编著

责任编辑 王大根

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州五古路 20 号 邮政编码 310027)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

浙江农业大学印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787×1092 16 开 15.5 印张 396.8 千字

1998 年 6 月第 1 版 1998 年 6 月第 1 次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7-308-01984-5/TP·168 定价:16.00 元

前 言

目前,CAD/CAM 技术在机械工业,特别是电机制造行业中得到了越来越广泛的应用。它的应用及发展,正在深刻地引起一场产品工程设计与制造的技术革命,并对产业结构、产品结构、企业结构、管理结构、生产方式及人才知识结构等产生极大影响。世界上工业发达国家的许多电机制造企业还在 CAD/CAM 基础上又向着 CIMS 系统迈进,取得了更可喜的成效。

我国电机制造企业对 CAD/CAM 技术的需求日臻迫切,一些企业已在逐步应用 CAD/CAM 技术,有些企业则正准备应用 CAD /CAM 技术。这些企业的技术人员以及高校师生、科研院所的科技人员也都希望了解针对电机企业的 CAD/CAM 技术知识。然而,目前我国还没有一本比较系统地介绍电机 CAD /CAM 的著作或教材出版。鉴于此,本书作者在原《电机优化技术》的基础上改写,并结合作者近十几年来在电机 CAD/CAM 技术工作中的点滴体会,编写成《计算机辅助电机优化设计与制造》这本书。希望该书能对电机及其控制专业的教学和电机制造行业 CAD/CAM 的应用和发展会有所帮助。

本书的概述、第 1 章、第 3 章、第 6 章和第 7 章由叶云岳编写,第 2 章、第 4 章和第 5 章由林友仰编写。全书由叶云岳统稿。

本书稿的电脑打印,全部由卢琴芬帮助完成,在此表示感谢。

由于编者水平所限,不妥和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1997 年 8 月

目 录

概 述	1
0.1 CAD/CAM 的发展概况	1
0.2 CAD/CAM 在电机工程中的应用与发展	2
第 1 章 计算机辅助电机设计基础	5
1.1 机辅电机设计的内容与发展简况	5
1.2 机辅电机设计的一般过程	6
1.3 机辅电机设计中常用的数学方法	8
1.4 机辅电机设计中一些问题的处理方法	21
第 2 章 交流绕组的机辅设计	38
2.1 谐波分布系数的通用计算方法	38
2.2 求分布系数的计算机程序	39
2.3 槽相位表	40
2.4 自动打印槽相属	42
2.5 自动分析谐波	44
2.6 通用谐波漏磁计算法	45
第 3 章 计算机辅助电机的一般设计	51
3.1 机辅电机校核设计	51
3.2 机辅电机综合设计	59
3.3 电机 CAD 数据库	64
第 4 章 最优化的数学方法	71
4.1 最优化的数学模型	71
4.2 最优化问题的分类和求解方法	73
4.3 一维函数的直接寻优方法	74
4.4 坐标轮换法	84
4.5 模式搜索法(步长加速法)	88
4.6 共轭方向与方向加速法	92
4.7 单纯形加速法(解非线性规划的单纯形法)	98
4.8 随机搜索法	107
4.9 约束函数的寻优方法	109

第 5 章 电机优化设计	122
5.1 电机优化设计的特点	122
5.2 局部优化技术	129
5.3 电机优化设计	139
第 6 章 计算机辅助电机工程图的绘制	151
6.1 计算机绘图基础	151
6.2 电机图形的特点与编程技巧	169
6.3 电机零件图的绘制	174
6.4 电机装配图的绘制	190
6.5 图库及其它	202
第 7 章 计算机辅助电机制造	203
7.1 计算机辅助制造的基本概念	203
7.2 机辅电机制造中的数控程序编制	205
7.3 机辅电机制造中的工艺过程设计	217
7.4 机辅电机制造中的质量控制	223
7.5 电机的计算机集成制造系统	230
7.6 机辅电机制造中的工程数据库	234
参考文献	239

概 述

0.1 CAD/CAM 的发展概况

一、引言

计算机辅助设计(Computer Aided Design,简称 CAD)和计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing,简称 CAM),常称 CAD/CAM。CAD/CAM 技术是设计人员和组织产品制造的工艺设计人员在 CAD 和 CAM 系统的辅助之下,根据产品的设计和制造程序进行设计和制造的一项新技术,是人的智慧和创造力与计算机系统功能的巧妙组合。设计人员通过人-机交互操作的方式,进行产品设计构思和论证;进行产品总体设计,零部件设计;对有关零件的强度、刚度、热、电、磁进行分析计算;输出零件加工信息(如工程图纸、数控加工信息等);编制技术文件和报告(如数据库等)。而工艺设计人员则可根据 CAM 过程提供的信息和 CAM 系统的功能,进行工艺过程设计、工装设计、数控编程、作业计划安排、质量控制等一系列用计算机辅助进行的工作。计算机集成制造系统是 CAD/CAM 的进一步发展,这是一种全方位、总体高效益和高柔性的智能化制造系统,是未来制造业的发展方向。

CAD/CAM 技术属于高科技范畴,技术复杂,涉及许多学科领域的知识,如计算机科学与工程、计算数学、现代设计方法学、人机工程、计算机图形学、微电子技术以及具体应用工程领域的专业知识等。CAD/CAM 技术的应用和发展,正在引起一场深刻的产品设计与制造的技术革命,并对产品结构、产业结构、管理结构、生产方式以及人才知识结构等产生重大影响。当今,CAD/CAM 技术及其应用水平已成为衡量一个国家的科技现代化和工业现代化水平的重要标志之一。

二、CAD/CAM 的发展

CAD/CAM 技术的兴起、发展及其应用范围的不断扩大,是与计算机技术、软件技术、外部设备和相关技术的发展密切相关的。

本世纪 40 年代中期,世界上第一台计算机的问世及其发展,推动了许多学科的发展和新学科的建立,CAD/CAM 就是在这样的环境下逐渐发展起来的。

50 年代末期以后,由于平板式绘图机与滚筒式绘图机的相继出现,开始了由计算机辅助绘图来替代人工绘图的历史。而光笔的出现,又使交互式图形显示技术得以诞生,从而使 CAD/CAM 得到进一步的发展。

60 年代中期以后,CAD/CAM 技术的研究应用主要集中在一些经济实力雄厚和技术力量较强的大型企业和研究单位,如 IBM 公司的 SMS SLT/MST 设计自动化系统和主要用于二维绘图的 CAD/CAM 系统,美国通用汽车公司为设计汽车车身和外形而开发的 CAD-1 系统等。该时期的 CAD/CAM 系统及规模庞大,价格昂贵,推广应用不易。

60 年代末到 70 年代中期,这一时期可称为 CAD/CAM 技术的成熟期。在这一时期内,计算机硬件的性能价格比不断提高,图形输入板、大容量的磁盘存储器 and 廉价的显示器等相继出现,数据库管理系统等软件陆续开发,三维几何造型技术也开始进行研究。这期间,以小型和超

级小型计算机为主机的 CAD/CAM 系统进入市场并形成主流,与此同时,出现了一批专门经营 CAD/CAM 系统硬件和软件的公司。这期间,CAD/CAM 的特点是硬件和软件配套齐全,价格相对便宜,使用、维护相对简单,从而得到较快的推广和应用。

70 年代末期以后,32 位工程工作站和微型计算机的出现,对 CAD/CAM 的发展起了极大的推动作用。80 年代中期以后,这种以工程工作站为基础的 CAD/CAM 系统发展很快,其功能达到甚至超过小型计算机的 CAD/CAM 系统。这种系统的制造商只提供硬件和系统软件,而基础和应用软件则由其它专门开发软件的公司研制和销售。进入 90 年代以后,随着微电子技术的迅速发展,微机价格不断下降,多媒体技术、人工智能及专家系统、计算机图形学的快速发展,各种软件应有尽有,企业对 CAD/CAM 技术的需求更为迫切,这就促进 CAD/CAM 的进一步快速发展。为此,世界上许多国家和企业都把发展 CAD/CAM 技术和进一步实现 CAD/CAM 技术集成化作为它们的战略目标。CAD/CAM 技术已成为当今科技领域内迅猛发展的一股时代潮流。

我国 CAD/CAM 技术的研究起步于 70 年代,当时仅有少数大型企业和科研单位及部分高等学校参加,进展速度较慢。近年来,由于计算机价格的不断下降,以及 CAD/CAM 技术的日臻成熟和完善,加之国内外市场的激烈竞争,我国科技人员采用新技术的积极性不断高涨,越来越多的人认识到运用 CAD/CAM 技术将会给企业带来许多好处和明显的效益。因此,近几年来,CAD/CAM 技术在我国有了较大、较快的发展,它主要表现在以下几个方面:

- (1) 少数大型企业已经建立起较完善的 CAD/CAM 系统并取得了较好的效益。
- (2) 一些中小型企业已逐步开始应用 CAD/CAM 技术并尝到了甜头。
- (3) 我国一批高校和一些科研院所以及少数大型企业自行开发了一些实用的 CAD/CAM 软件,并正在逐步推广应用。
- (4) 国内外计算机工业部门为 CAD/CAM 提供了相应的微机和低档的工程工作站,为 CAD/CAM 的应用和发展创造了良好的条件。
- (5) 从国外引进了部分成套的 CAD/CAM 系统,为提高我国的 CAD/CAM 技术的水平起到了积极有效的作用。

0.2 CAD/CAM 在电机工程中的应用与发展

一、CAD/CAM 在电机工程中的应用

CAD/CAM 在电机工程中的应用主要有以下几个方面:

1. 计算机辅助电机设计

这是利用计算机帮助人们设计出最佳的电机,是 CAD/CAM 技术在电机工程中的一个重要应用,也是本书的重点,具体可参见本书第 1 章~第 5 章。

2. 计算机辅助电机工程图的绘制

这方面的内容本书作了较详细的介绍,具体可参见本书第 6 章。

3. 计算机辅助电机电磁场、温度场和应力场的计算

过去,电机中场的求解只限于应用解析法和图解法。这些方法的应用,一般限制在边界条件简单而媒质为线性的场合。计算机和计算技术的发展为电机中复杂的场问题数值解提供了条件,从而可以将现代数值解中的差分法、有限元法和边界元法等方法,在利用计算机技术的基础上去求解电机中的各种线性和非线性的稳定场或瞬变场的问题,并获得较满意的结果。

4. 电机的计算机仿真

所谓电机的计算机仿真,就是先将电机或包括控制电机的系统,用一个恰当的数学模型描述,再将数学模型在计算机上进行求解。通过计算机仿真,我们可以对尚未投入运行的电机的静态和动态运行状况进行分析。

5. 计算机辅助电机制造

它包括电机制造中计算机辅助数控机床加工程序的编制,计算机辅助制造工艺过程的设计,计算机辅助检测与试验以及计算机集成制造系统等。详见本书第7章。

二、电机 CAD/CAM 的发展

国外电机 CAD/CAM 的发展,是从 CAD 开始的。50 年代初,首先用模拟计算机作异步电机的性能计算和温升计算。从那时起至今已有四十余年历史,这期间经历了从校核设计到综合设计,最后进入优化设计的发展过程。

70 年代以来,随着科学技术的迅猛发展与社会需求日趋多样化,市场变化频繁,竞争激烈。表现在电机产品方面,产品更新换代的周期越来越短,产品的性能、质量、价格以及交货期的竞争越来越激烈。对大多数电机厂来说,一个明显的特点是品种多、小批量生产占主导地位。在进行多品种、小批量生产时,由于产品的品种和工艺过程的多样性、环境条件(如用户订货、外购、外协、交货期等)的不确定性以及生产计划与生产调度的动态性等因素,致使物料过程复杂多变,信息流的数据和信息庞杂,信息的处理、贮存与传输频繁。因此,按常规的单件生产或按刚性自动化的方式都无法适应,必须解决物流既具高效自动化,又具生产“柔性”即柔性自动化的问题;同时,也必须相应地解决信息流(包括产品设计、工艺设计以及生产管理)的自动化问题。所谓柔性(flexibility)是指,当生产对象改变时,具有灵活的适应性。

电子计算机具有大容量和可靠记忆能力、复杂的数值分析计算能力、快速的数据处理能力和检索能力、准确的检错能力、以及能承受繁冗工作的耐力等一系列特点,这些能力正好与人的特长互补;另一方面,人只要以程序化的方式赋予计算机一定的智能,计算机即可替代人的思维进行逻辑判断与推理,起着“专家”的作用;此外,计算机是可编程的,具有极大的柔性。因此,电子计算机是解决电机产品多品种、小批量生产柔性自动化的最佳途径。

正是由于以上原因,自 70 年代以后,电机 CAM 开始发展并取得了可喜的成效。例如,德国 WEINGARTEN 公司的数控冲槽机,由于采用了微机控制,冲槽机能一片一片地改变扇形片上槽的位置,因此可以制造任意拼片方案、任意槽数和任意槽斜度的电机铁心,这就使电机设计几乎不受什么限制。同时,由于采用了计算机控制,可按照设计要求的锥度冲制锥形转子电机的冲片。计算机根据预先给定的锥度和每次每片测量得到的冲片实际厚度,借助于步进电机的控制来冲裁定、转子冲片的直径。日本富士电机公司铃鹿工厂的通用旋转电机部,自 70 年代以来,电机品种由 500 种增加到 1 500 多种,且 5 台以下的订货增加到总产量的半数以上。由于电机产品趋向于进行多品种、小批量生产,该公司在电机的转轴、转子的加工以及装配中均采用了计算机控制的直接数控加工、装配线,从而使人员减少到 1/20 以下,生产率提高了 10 倍以上,生产周期大大缩短,质量大大提高。日本东芝公司采用的计算机辅助电机端盖加工的柔性自动线,生产 240 个品种的小型电动机端盖,换批时间不满 10min,全线在日班仅由 1 个人照管,晚班无操作人员。美国 GE 公司 Erie 厂加工牵引电机机座的计算机控制柔性制造系统,能根据系统管理或计算机化的材料需要计划所输入的生产要求进行工作,在装夹工位上的上下料工人,通过图形显示,了解上料零件的顺序以便使系统的生产率达到最高。通过管理信息系统还可以直接向计算机询问生产情况并索取生产纪录。该厂还有计算机控制的自动化

仓库等各种计算机辅助制造和管理系统。该公司是美国工厂自动化程度最高的公司之一,不仅电机 CAD/CAM 技术处于领先地位,而且在电机的计算机集成制造系统 CIMS(Computer Integrated Manufacturing System)也居于领先地位。具体可参见本书 7.5。还有许许多多电机 CAM 的应用和发展情况,这里就不一一介绍了。

电机 CAD/CAM 在我国的发展,主要可从 CAD 和 CAM 两个方面进行叙述。

在电机 CAD 方面,我国从本世纪 60 年代末已开始编有计算机辅助电机设计的校核程序。而到 1972 年,作为综合设计程序的开始,是浙江大学为杭州发电设备厂完成的具有自动开槽功能的计算机辅助电机综合设计程序。1976 年,上海电器科学研究所与复旦大学数学系又共同开发了具有循环计算的电机综合设计程序。1977 年,在南京召开了全国第一次计算机辅助电机设计交流会。从那以后,计算机辅助电机设计开始向优化设计程序发展。清华大学、浙江大学、合肥工业大学、上海电器科学研究所与复旦大学等相继展开了计算机辅助电机优化设计方面的研究,并取得了较好的效果。其中,浙江大学于 80 年代初,即在本科生和研究生中率先开设了“电机优化设计”课程,并于 1989 年出版了《电机优化技术》一书。该书被定为全国高校教材。80 年代以后,我国一些电机归口所在国家和企业的支持下又从国外公司引进了一些电机 CAD 软件,经过消化、吸收并在这些软件基础上,开发出了一批符合我国国情,适合于我国电机企业的电机 CAD 软件。此外,国内一些有基础的高校和一些科研院所也相继开发了一批适合于我国电机企业的 CAD 软件,由于这些工作的开展和成果的取得,促使了电机 CAD 软件在我国一些电机企业开始逐步得到了应用,而当一些企业尝到了甜头后,除促使它自身的进一步应用外,也带动和影响了其它电机企业。目前,已有越来越多的电机企业应用了电机 CAD 软件,且取得了很好的效益。

在电机 CAM 方面,我国的电机企业比较早地利用数控机床与计算机辅助数控程序编制加工电机零部件,例如,电机转轴、机座、端盖等;一些大中型企业还采用了计算机辅助电机制造工艺过程的设计,具体可参见本书 7.3;至于计算机辅助电机制造质量的控制,特别是计算机辅助电机制造的检测系统和电机试验系统,在全国许多电机企业包括大、中、小型企业都得到了应用。在少数大型电机企业,正向着电机 CIMS 系统迈进。可以预料,CAD/CAM 在我国电机企业得到普遍应用的时间不会太长了。

第1章 计算机辅助电机设计基础

1.1 机辅电机设计的内容与发展简况

由于近代科学技术的飞速发展,人们已不能容忍那些既耗费大量时间又简单重复的手工演算,也无法再接受那些基于经验或半经验公式的计算。人们希望在更加完善的理论基础上设计电机,使电机设计的精确度更加高,得出的数据更加完整,设计的电机达到最佳;人们还希望在设计阶段就能预测出电机的全部性能和参数,以缩短产品的试制周期,减少试制投资。这些要求只有在计算机高度发展的今天才能得以实现。

早在本世纪50年代,就有人开始在电机设计中应用电子计算机。计算机在电机设计中的应用经历了从简单到复杂的三个阶段,这就是从“校核设计”到“综合设计”,最后进入“优化设计”。

所谓“校核设计”,就是该设计程序是按设计人员预先估计好的若干设计参量,依一定程序步骤来确定产品运行性能的计算值,如果不符合要求时,人工将一些输入参量加以变化再校算之。“校核设计”相当于以计算机演算来代替手算。

“综合设计”是根据已知的性能要求,决定电机各设计参数的程序。它与“校核设计”的区别在于:“综合设计”的目的是在规定的产品性能和技术条件下,使计算机主动选择适当的技术参数和结构尺寸,从而得出一个或一批可行方案。“综合设计”实质上就是不依赖人工而自动修改方案并重复校核计算,直至最终得到符合要求的方案为止。习惯上称之为“循环计算”的电机设计程序是“综合设计”程序中最常见的形式,它能对一些自变量,如 D_n 、 L 、 Z 、 J 、 B 等,按规定步长进行多重循环计算,从而算出一大批方案,经比较后,由人工选出较优方案。

“优化设计”始于60年代初期,它是让计算机直接找出最优设计方案,而中间计算的比较方案个数尽可能少的一种程序。概括地说,“优化设计”的程序主要内容有:第一,是将实际设计问题抽象成为最优化的数学模型;第二,是选择最优化的计算方法,使用电子计算机求解数学模型,得出最优的(而不单是可行的)设计方案。

国外电机的计算机辅助设计,始于本世纪50年代初期。到60年代,有些国家已较普遍地在电机设计中采用计算机辅助设计;同时,随着优化数学方法的发展,在机辅电机设计中也开始了优化设计的尝试。从60年代开始,人们利用各种优化数学方法,如梯度法、随机搜索法、各种罚函数法,最小 p 次幂法及其它数学规划方法等,对异步电机、同步电机、变压器及微电机等进行了优化设计,发表了许多这方面的文章,从而不断推动着电机优化设计的发展。从70年代开始,国外已有不少优化设计程序应用于生产。近十来年,随着自动描图机、自动绘图机配合计算机的自动设计,已使整个电机设计进入了完全自动化的新阶段。

国内电机的计算机辅助设计始于本世纪60年代,当时只有个别单位编制了电机设计的“校核程序”。1973年,杭州发电设备厂与浙江大学共同编制了有开槽计算的初级“综合设计”程序,上海电器科学研究所与复旦大学数学系等单位也都相继开展了这方面的工作。而优化设计的工作,则是从70年代后期开始的。从此,国内在将优化方法应用于电机新系列产品设计方

面取得了一定的进展;但是,多数工厂仍采用“校核设计”程序,依靠人工修改输入参数和凭经验选择较优方案。而“优化设计”程序还只有一些高等院校和研究单位在使用。与国外的计算机辅助电机设计自动化相比,我们还有不少差距。

目前,随着计算机和计算技术的不断发展,电机的计算机辅助设计仍有许多问题需要不断完善和解决。

首先,由于传统的设计方法是以半经验为依据的,公式的精度大多与40年代的试验技术及人工计算的工作量相适应。现在用计算机辅助设计,速度快,精度也高;所以,必须进一步科学地研究和分析原有的电机设计方法,改进计算公式。在电机设计中,要求建立更加严格、更加精确和更符合实际的数学模型以及求解途径。

其次,过去电机设计着重在电磁计算,而对通风计算、热计算、机械计算以及振动、噪声计算等,由于其工作量太大,往往只计算其中的某些部分,或用经验估算,有时甚至不计算。现在有了计算机辅助设计,就可以扩大计算范围,对电机设计的其它各个部分进行计算,并进行整体优化。当然,随着现代优化理论不断发展,对目前在电机优化设计中往往只能找到局部而不是全局的最优解问题,必须进一步完善优化设计方法,提出更加完善的优化设计数学模型及更有效的优化算法。

此外,还要建立一个包括制造、试验和管理在内的系统和完整的信息数据库,为设计人员提供明确和有效的数据资料,以及建立一个图形处理系统,把电磁计算后的定、转子冲片和各种曲线,结构计算后的电机各零部件及整机均以标准的零件图和装配图绘出,然后与计算机辅助制造、管理结合,从而把计算机辅助设计、制造和管理连成一体,形成一个完整的电机自动设计、制造、管理集成系统。

1.2 机辅电机设计的一般过程

计算机辅助电机设计一般按以下几个过程进行。

一、数学模型的建立

机辅设计在确定了设计任务、准备了原始资料及必要的资料后,首先必须建立设计计算的数学模型。所谓数学模型,就是我们对实际问题经过分析、试验之后,用一系列的数学算式来描述的一种方式。我们知道,凡是要用计算机来完成的任何工作,都必须将其规则化并归结为算式运算的方式。因此,数学模型的建立对机辅设计来说是必需的。同时,数学模型的正确与否以及误差的大小都将给设计的精确度带来决定性的影响。有些数学模型尤其是精确的数学模型的建立,并非是一件轻松的事,需要花费较多的时间不断地探索、总结才行。

二、框图设计

编制框图的过程是设计人员按计算机的方式表达设计逻辑的过程,它表达了设计人员的设计思路和方法。框图可以清晰地表示语言源程序的结构、层次及重要的细节,它是编制语言程序的依据,而且对于阅读、调整和修正源程序也是有帮助的。

编制电机设计的计算机程序框图,一般应注意以下几点:

(1) 框图一般由开始、输入、赋值、运算、判别、说明、打印输出、停机等框格以及联结各框的、表示执行的标矢线所组成。电机设计程序框图的主要部分包括输入数据、磁路计算、性能与损耗计算、温升计算、机械结构的计算、图形输出(包括零件图、总装图、电气接线图等)。框图可分为整体框图和分框图,整体框图可简明些,分框图可根据需要略详细些。但总体上要求结构

紧凑、清晰,层次分明,设计逻辑简捷明了。

(2) 在编制框图时要考虑到,在设计中哪些是主要矛盾及其解决途径。如改善性能需要通过哪些途径及改变哪些变量等。

(3) 在编制框图时,对需要用迭代方法确定的计算值都要给定初值,并安排“判别”框,以保证假定值与计算值相符的程度达到的精度要求。对反复多次用到的程序段,当被作为子程序来调用时,也应在框图中体现出来。此外,还要注意安排好数据输出,特别是中间输出。

三、程序编制

对电机设计中将已有的算式编成计算机语言这一过程来讲,它和一般编程没有什么两样,但对于电机设计本身所具有的一些特点,在编制电机设计的计算机运算程序时,应注意以下几个方面:

(1) 编制机辅电机设计程序中最突出和麻烦的问题是图表和曲线的处理,这个问题将在本书 1.4 中作详细介绍。对于处理图表曲线的程序段和一些重复计算的程序段,可将其编成子程序或循环语言,使程序简洁、紧凑、层次分明,也便于编译;分程序(如磁路计算部分、性能计算部分等)的起始部分,可写上注释语句;关键段落,可安置适当标号,以便于程序检查;对于大量的输入、输出数据,要精心合理安排。

(2) 对于导线线规的优选和槽形的优化,要注意设计逻辑,避免出现难于收敛或收敛不理想的情况;对于要用迭代计算的各系数,要慎重给定初始数据和调整方法,做到给值合理、有利于收敛。

(3) 要注意电磁计算程序与绘图程序的衔接问题,其中有些标识符要尽可能统一,以便于绘图程序从电磁计算程序中读入有关数据。

四、程序检验与运行

当程序编制完毕后,即可通过输入设备将其送入计算机内进行编译。此时,计算机上的编译程序对进去的源程序进行各种语法规则的检查。这一过程,有时往往比编写一个程序更费时,更困难。但是,只要对所编语言及本程序内容熟悉,编程、送程序时心细、认真,那么,编译时的出错就少,否则错误就多。对于编译过程中计算机所提示的每一个错误信息,只有冷静地分析,认真仔细地对待,才能较快地使其程序顺利地通过编译。编译过程中,有时前面某一句语法错误会引起后面一大串错误来,这时只要把前面一句改正就行了。此外,输入数据格式也是易出错的部分,编程时要注意。程序编译通过后,说明该程序在语法上已没有问题了。这样的程序可以运行,但不一定能正确地运行,然后对本程序中的公式本身是否有错?执行路线对否?输入数据对否等都没有检查过。所以必须根据手算或别人已算出的确证是正确结果的一套原始数据输入计算机进入试算运行,然后对本程序的输出结果与已知结果进行比较,当两个结果完全一致后,才能认为程序运行正确,计算结果可靠。如果是多功能程序,则必须对各项功能逐一进行试算,直到符合为止。

当一个程序运行后,可能会发现一些地方可以进一步改善。例如,考虑到某种运算方法比原程序中的运算方法更好,或者由于事先估计不足,而出现了一些意外的情况,如原来准备的数组不够用、超界了等。这样,我们就要对源程序某些部分重新进行修改。修改程序时,要从整体考虑,注意前后联系,否则越改越乱,造成编译、运行的错误更多,而且通常运行出错要比编译出错更难查到根源。

1.3 机辅电机设计中常用的数学方法

1.3.1 方程求根

数学物理中的许多问题常常归结为解函数方程

$$f(x) = 0$$

式中： $f(x)$ 可以是超越函数。如果 $f(x)$ 是多项式，则 $f(x) = 0$ 即为代数方程。

方程 $f(x) = 0$ 的解 x^* 称为它的根，或称函数 $f(x)$ 的零解。电机工程中有许多问题可以通过方程求根来解决，如考虑磁饱和时求磁位降、同步发电机极靴外形的设计以及 F_T 、 $(1 - \epsilon_L)$ 、 η 、 I_a 的计算等。下面就电机工程中常用的几种求根方法，即对分法、迭代法、弦截法作一简单介绍。

一、对分法

1. 基本方法

如图 1-1 所示，假定方程 $f(x) = 0$ 在区间 (a, b) 内有且仅有一个根 x^* 。我们先取其中点 $x_0 = \frac{1}{2}(a + b)$ 将区间 (a, b) 分为两半，然后进行根的扫描，即检查 $f(x)$ 与 $f(a)$ 是否同号。如果确系同号，即 $f(x_0) \cdot f(a) > 0$ ，则说明所求的根 x^* 在 x_0 的右侧，这时令 $a_1 = x_0$ ， $b_1 = b$ ；反之，则 x^* 在 x_0 的左侧，这时取 $a_1 = a$ ， $b_1 = x_0$ 。这样就得到一个新的有根区间 (a_1, b_1) ，其长度仅

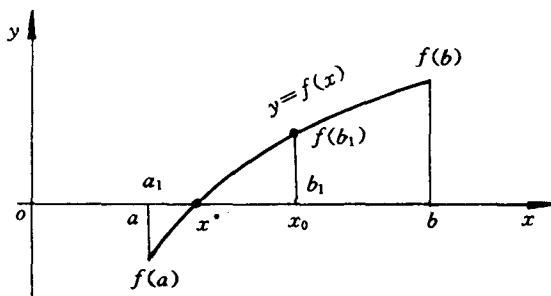


图 1-1 对分法求方程根

为 (a, b) 的一半。对压缩了的有根区间 (a_1, b_1) 又可用同样的方法，即用中点 $x_1 = \frac{1}{2}(a_1 + b_1)$ 将区间 (a_1, b_1) 再分为两半，然后通过根的扫描判定所求的根在 x_1 的哪一侧，从而确定一个新的有根区间 (a_2, b_2) ，其长度是 (a_1, b_1) 的一半。

如此反复下去，便可得到一系列有根区间： (a, b) ， (a_1, b_1) ， (a_2, b_2) ， $\dots$ ， (a_k, b_k) ， $\dots$ 其中每个区间都是前一个区间的一半。因此，区间 (a_k, b_k) 的长度为

$$b_k - a_k = \frac{1}{2^k}(b - a)$$

显然，如果对分过程无限地继续下去，这些区间最终必定收缩于一点 x^* ，该 x^* 就是所求的根。不过在实际计算时，我们没有必要完成这个无限过程，只要有根区间 (a_{k+1}, b_{k+1}) 的长度小于精度要求 ϵ 值，则此时得到的新点就可作为 $f(x) = 0$ 的近似根。对分法的程序框图如图 1-2 所示。

对分法的算法思想除用于方程求根外，在工程中还有其广泛的应用，如对数据（信息）进

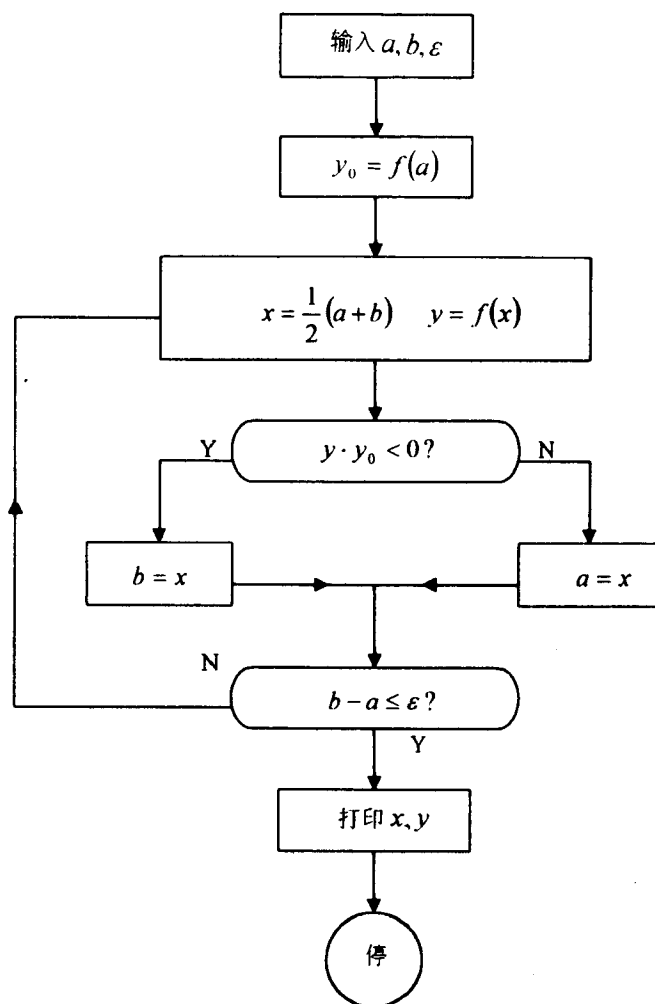


图 1-2 对分法程序框图

行检索、求取两曲线的交点等。

二、简单迭代法

在电机设计中,迭代法是经常要用到的。迭代是计算机运算中最常用的算法。广义地说,凡是可以由一个格式(称为迭代格式)以初值 x_0 生成一个终值

$$x_1 = f(x_0)$$

然后把终值当成新初值(或作某些修改后当成新初值),再重复上面的方法,从而生成一个序列

$$x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$$

这样的过程都可以称为迭代。一般地说要求上述序列有一极限存在:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$$

而迭代过程就是用来求这个极限的。在计算机上,我们显然不能真正进行无穷次迭代来求极限,而只能进行有限次,当第 n 次迭代的初值 x_{n0} 与终值 x^* 之差满足一定的要求

$$|x_{n0} - x^*| \leq \epsilon$$

后即中止迭代。由于 x^* 的真值不知道,上述条件常常代之以如下方式

$$|x_n - x_{n-1}| \leq \epsilon$$

对于一般形式的方程

$$f(x) = 0$$

若此方程可以改写成

$$x = g(x)$$

的形式,则可以用它作迭代格式进行迭代来求解。但同一方程的迭代格式 $x = g(x)$ 不是唯一的。

迭代过程是否收敛及收敛的速度,与迭代格式的选择有关。数学上可以证明,对于方程 $f(x) = 0$ 或 $x = g(x)$ 的某一个根 x^* 的一个邻域 $[a, b]$,若已知:

- ① $[a, b]$ 内上述方程只有一个根;
- ② 由 $[a, b]$ 内某一初值 x_0 开始,迭代格式 $x = g(x)$ 给出的迭代过程的每一步结果都在 $[a, b]$ 内;
- ③ 在 $[a, b]$ 内任一点上,都是

$$|g'(x)| \leq K \leq 1$$

式中: $g'(x)$ 是 $g(x)$ 的导数, K 是一个小于 1 的常数。

则上述迭代过程一定收敛,并且收敛到 x^* 。

迭代法的一个突出优点,就是算法的逻辑结构简单。迭代格式 $x_{n+1} = g(x_n)$ 的计算过程框图,如图 1-3 所示,其中 x_0 和 x_1 分别表示每次迭代的初值和终值。

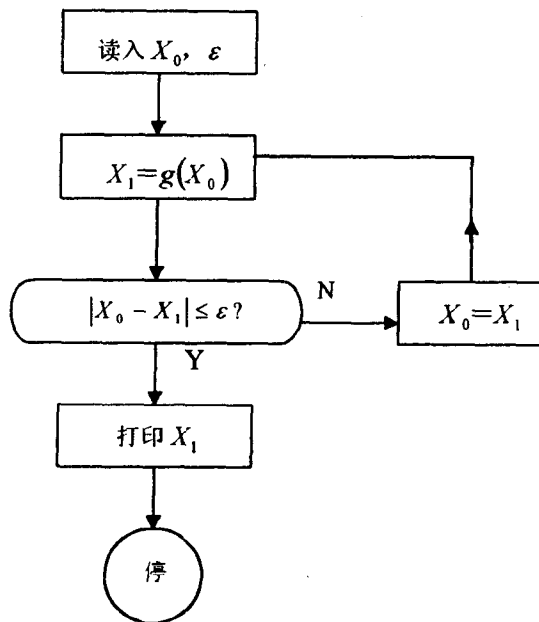


图 1-3 迭代法过程框图

三、牛顿法

这里介绍用于非线性方程求根的牛顿迭代法,它是求解高次代数方程的另一常用方法。

设有方程

$$f(x) = 0$$

它的根就是曲线 $y = f(x)$ 同 x 轴 ($y = 0$) 的交点,如图 1-4 所示。从几何图像出发,我们可以通过下述过程来求根:

先在根的附近(“附近”的含义将在后面说明)任取一初值 x_0 , 相应的函数值为

$$y_0 = f(x_0)$$

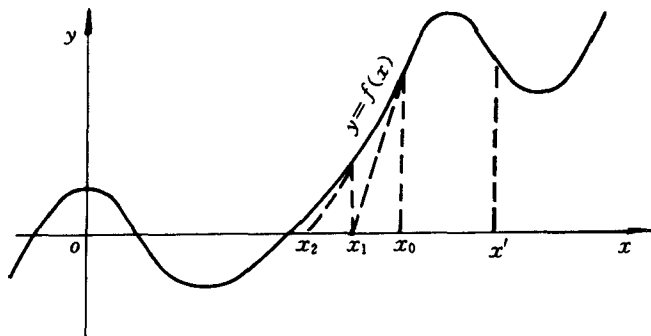


图 1-4 牛顿迭代法求方程根

通过 (x_0, y_0) 点作曲线 $y = f(x)$ 的切线, 与 x 轴交于 x_1 点. 显然有

$$x_1 = x_0 - f(x_0)/f'(x_0)$$

式中: $f'(x_0)$ 为 $f(x)$ 的导数 $f'(x)$ 在 x_0 点的值。

由图可知, x_1 离真正的解 x^* 要比 x_0 近. 实际上, 这就是在 x_0 点用线性函数代替真正函数 $f(x)$ 来求它的近似解. 对应于 x_1 的函数值为 $f(x_1)$, 重复上述过程得

$$x_2 = x_1 - f(x_1)/f'(x_1)$$

这样重复下去, 得到的序列 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$ 应当无限逼近真正的解。

现在可以说明上面所说的初值应选在真正的根附近的意义了. 由图 1-4 可知, 要求初值 x_0 和真正的根在函数 $f(x)$ 的同一个单调变化的区域中. 例如, 如果把初值选在 x' 处, 那显然不能收敛到所求的解。

显然, 上述过程也是一个迭代过程, 其迭代格式为

$$x = g(x) = x - f(x)/f'(x)$$

$$g(x) \text{ 的导数 } g'(x) = 1 - \frac{f' \cdot f' - f \cdot f''}{(f')^2} = \frac{f \cdot f''}{(f')^2}$$

在解的邻域 $f(x) \approx 0$, 可以证明, 只要 $f'(x) \neq 0$, 及 $|g'(x)| < 1$, 则在解的邻域内, 迭代过程一定收敛. 这正是这种方法如此有用的原因之一。

记住上述条件是在解的邻域内成立, 因此初值应选在解的附近, 如先用图解法定出解的近似值. 这不但可以保证收敛性, 还可以减少为达到一定的精度所需要的迭代次数. 若方程有多个根, 将初始值选在不同根的邻近, 便可求出不同的根. 初值显然应当避免 $f'(x) = 0$ 的点. 此外, 在实际计算中, 我们只要求出 x 值的差 $|x_{n+1} - x_n| \leq \epsilon$ (预给的精度), 就认为已求得所需要的根。

牛顿法也可以用来求方程的复根。

四、弦截法

前面介绍了三种求方程根的方法: 对分法、简单迭代法、牛顿法. 在这三种方法中, 对分法是最保险的, 用不着考虑收敛问题, 它的运算简单, 对函数 $f(x)$ 的要求较低, 仅需 $f(x)$ 本身连续, 缺点是只能求实根, 不能求偶数重根. 简单迭代法的算法逻辑简单, 但必须选择恰当的迭代格式, 才能保证收敛. 牛顿法一般是效率最高的, 需要的迭代次数最少, 但是它需要计算导数 $f'(x)$, 而且初值要求较严格, 如果函数 $f(x)$ 本身很复杂(例如: 若 $f(x)$ 不是解析式的, 本身