

ABCDEFGHIJKLM

NE 电机的计算机 PQ

辅助设计与优化技术

RSTUVWXYZ 12345

67890ABCDEFGHIJ

KLMNQPORSTUVV

WXYZ 1234567890 EF

王冲权 编著

上海交通大学出版社

# 电机的计算机辅助设计与优化技术

王冲权 编著

396145

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

目前,利用计算机辅助设计电机的方法,特别是电机的最优化设计技术,是以电子计算机技术和近代最优化技术为基础,结合电机设计特点而形成的一种最新设计方法,可以解决各种电机复杂的设计问题,并取得某种意义下的最优设计方案。

本书系统地介绍了电子计算机在电机设计中的应用技术,并介绍了电机最优化设计的理论和方法。前几章阐述了计算机辅助电机设计的常用计算方法、电机分析及电机综合设计的计算机程序编制和处理方法。最后一章较全面地阐述了电机最优化设计的基本理论和各种优化计算方法,给出了优化设计的计算实例。

本书可供从事电机设计和研究部门的工程技术人员参考,亦可作为高等院校电机专业学生及研究生的教材或参考书。

### 电机的计算机辅助设计与优化技术

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

常熟市梅李印刷厂印装

---

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 19 字数 472,000

1988年10月第1版 1989年1月第1次印刷

印数: 1—2,000

ISBN 7-313-00295-5/TM3 科技书目: 180—250

---

定价: 3.75元

# 前 言

随着电子计算机的迅速发展,小型的和微型的计算机得到了广泛的普及。如何充分地发挥电子计算机在产品设计、生产管理方面的效能,越来越引起人们的关注。计算机辅助设计(简称 CAD)是近 20 年来发展起来的一门新技术。国内在这方面的探索研究在 70 年代开始逐渐增多起来。与传统的电机设计方法相比,应用计算机辅助电机设计,可以使设计的速度提高几百倍,使产品设计周期大为缩短,以满足电机产品迅速更新换代的需要;同时,应用计算机辅助电机设计,可以提高电机设计的计算精度,有利于进行严密的科学计算,以适应现代科学技术对电机产品高质量的要求;如果应用计算机进行电机的最优化设计,更可以取得高产、优质、低消耗的经济技术效果。目前在国外,电机优化设计已成为电机设计的主要方法,在国内最优化设计的发展也很快,它已引起了电机工程技术人员的普遍兴趣。

本书共分 5 章。第 1 章为计算机辅助电机设计的概述;第 2 章为计算机辅助电机设计中常用的计算方法,内容有处理曲线图表的插值法、拟合法,数值积分法,非线性方程组的解法;第 3 章为电机的分析设计,内容有电机 CAD 程序的编制技术,分析设计程序的技术问题及计算框图实例;第 4 章为电机的综合设计,内容有综合设计程序的循环处理,自动开槽设计,绕组线规的自动选择及有关的计算框图、计算实例;第 5 章为电机设计的最优化技术,内容有最优化设计的数学基础、无约束优化问题的解法、约束优化问题的解法、电机最优化设计程序的技术问题及电机优化设计的实例。本书还配备有计算机辅助电机设计的多种电机产品设计用的 CAD 软件及教学用的软件,均可在 IBM-PC 微型计算机上直接使用详见书后附录。

本书是根据近几年来作者在这方面的的工作实践及对电机专业的大学生高年级课程“计算机辅助电机设计”和研究生课程“电机优化设计”的授课讲稿整理而成。由于作者水平有限,经验不足,书中难免有缺点和错误,热忱欢迎读者批评指正。

在本书编写过程中,谭菲娃副教授认真地审阅了全书,并提出了宝贵的意见,在此谨致谢意。

作 者

1987 年 4 月

# 目 录

<b>第1章 概述</b> .....	( 1 )
§ 1.1 计算机辅助电机设计的意义 .....	( 1 )
§ 1.2 计算机辅助电机设计的发展概况 .....	( 2 )
§ 1.3 电机设计的基本任务和步骤 .....	( 4 )
§ 1.4 计算机辅助电机设计的主要过程 .....	( 7 )
<b>第2章 电机机辅设计中常用的计算方法</b> .....	( 11 )
§ 2.1 函数插值 .....	( 11 )
§ 2.2 曲线拟合 .....	( 29 )
§ 2.3 数值积分 .....	( 36 )
§ 2.4 线性方程组的解法 .....	( 43 )
§ 2.5 非线性方程组的求解 .....	( 53 )
<b>第3章 电机的分析设计</b> .....	( 64 )
§ 3.1 电机设计的计算机程序编制技术 .....	( 64 )
§ 3.2 电机分析设计程序的主要技术问题 .....	( 77 )
§ 3.3 异步电机分析设计程序 .....	( 92 )
§ 3.4 永磁无刷直流电动机分析设计程序 .....	( 99 )
<b>第4章 电机的综合设计</b> .....	( 108 )
§ 4.1 概述 .....	( 108 )
§ 4.2 综合设计中的主要技术问题 .....	( 109 )
§ 4.3 交流三相感应电机综合设计程序 .....	( 131 )
§ 4.4 微型单、三相感应电机的综合设计程序.....	( 150 )
<b>第5章 电机设计的最优化技术</b> .....	( 172 )
§ 5.1 电机优化设计的数学模型 .....	( 172 )
§ 5.2 最优化方法的数学基础 .....	( 182 )
§ 5.3 无约束最优化方法 .....	( 214 )
§ 5.4 约束优化设计问题的解法 .....	( 246 )
§ 5.5 电机优化设计实例 .....	( 266 )
§ 5.6 多目标优化方法 .....	( 287 )
<b>参考文献</b> .....	( 294 )
<b>附录</b> .....	( 295 )

# 第 1 章 概 述

## § 1.1 计算机辅助电机设计的意义

在电机设计中应用电子计算机，国外是从 50 年代初开始的，至今仍在进行广泛的研究和各种新的探索。随着电子计算机的不断发展，特别是小型和微型电子计算机在我国的迅速普及和应用，采用计算机进行机电产品或其他一些产品的设计工作已成为一种必然的发展趋势。一门新兴的学科——计算机辅助设计，或简称 CAD (Computer Aided Design) 正在逐步形成，并日益完善，它越来越受到人们的重视。

电机产品在积累了几十年的生产技术经验后，产品结构大多已经典型化，设计的方法和以经验数据为依据的手工计算程序也已趋于成熟。但是，由于生产技术和科学研究的进一步发展，对电机产品的设计和制造提出了更高的要求。人们希望电机产品具备更高的技术经济指标，以更少的材料和能源消耗，得到更加可靠、优良的质量。

因此，首先要求电机设计具有较先进的水平，计算更为精密，设计方案更加合理。这就要求电机产品的设计从传统的，以经验设计为主的较粗糙的手工计算，逐步转入以计算机计算为主的比较精密的科学计算。电子计算机不仅作为高速运算工具来代替繁杂的手工计算，而且可以发挥其存贮功能和逻辑判断功能，使人们有条件提出更加符合实际的数学模型，改进现有

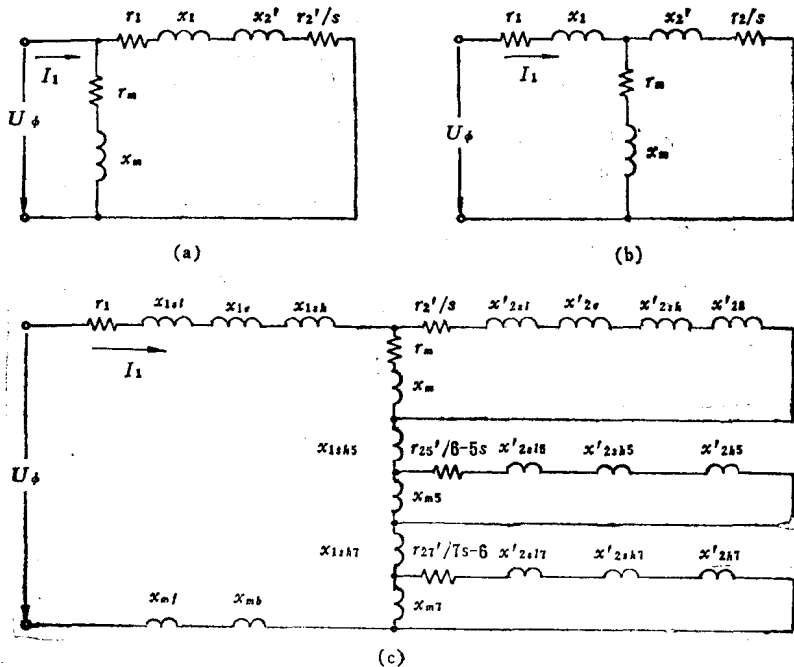


图 1-1 异步电动机的等值电路  
 (a)  $\Gamma$  型等值电路 (b) T 型等值电路 (c) 链型等值电路

的设计计算公式。例如，异步电动机的等值电路(如图 1-1 所示)原是 T 型等值电路，以前为了适应手工计算需要，将其简化为  $\Gamma$  型等值电路。在使用电子计算机后，就可以方便地使用 T 型电路，计算精度可得到提高。如果再考虑 5、7 次谐波作用，采用链形等值电路，则设计计算就更为精确了。应用计算机后，我们还可以进一步将电机设计方法逐步从传统的“路”的范畴过渡到更加符合实际的“场”的范畴，从电磁场的有限元分析计算出发，综合电机参数及分析计算电机的性能指标。除电磁设计程序外，还可以将温度场计算、瞬变过程、杂散损耗、噪音分析、机械强度及轴承承载能力、临界转速的计算逐步纳入电机设计程序中，这样，就使电机设计计算建立在更加可靠的科学基础上。

另一方面，随着经济的发展，新技术的不断开发，要求电机产品的新品种不断增多，以满足各种控制、驱动、能源系统的需要。为了迅速更新电机产品，缩短设计周期，增强产品的竞争能力，也迫切要求电机设计工作从繁重的手工计算中解放出来。采用计算机辅助电机设计后，可使设计周期大大缩短，设计质量大为提高，产品的技术经济指标也有很大提高。如果采用自动选优和自动绘图相结合的自动化设计系统，则在输入电机的规格和性能指标至计算机几十分钟后，便能自动地输出一个最优设计方案的设计单并画出全部设计图纸。

生产和科学技术的发展不但对电机产品的计算机辅助设计提出了要求，同时反过来又使电机的计算机辅助设计成为可能，计算机和计算数学的发展大大促进了 CAD 的发展进程。自 1946 年出现了以电子管为主要元件，使用机器语言的第一台电子计算机以来，至今已经历了五代。1959 年出现以晶体管为主的第二代计算机，并使用了一系列程序语言，应用范围也由科技计算扩大到数据处理和管理程序。1965 年又开始使用以集成电路为主要元件的第三代计算机，各种高级语言应运而生。70 年代开始又进入以大规模集成电路为主的第四代计算机。目前已开始发展以超大规模集成电路为主的第五代计算机，功能齐全巨型计算机和微型计算机是它目前的两个方向。随着计算机的迅速发展，它的功能日益完备，给人们的应用带来越来越多的方便：计算机的计算速度越来越快，只要有系统化的计算程序，最繁琐的计算也能迅速地完成，据统计，设计一台普通的异步电动机，手工计算约需 16 个小时，在 1957 年计算机需 3 分钟，到 1967 年计算机只需 1.5 秒便完成了计算。如今的微型计算机也能达到这样的水平。计算机的存贮容量也越来越大，从过去的几十 k 增加到数十兆，上百兆，实际上已使一般的计算不受内存的限制。计算机字长的增加，使计算精度足够满足工程计算的要求。另外计算机的图像显示和人机对话的功能也日益增强，不仅可以显示或打印各种字母、数字信息，还能显示各种图形、曲线，有的还可以用光笔直接在屏幕上进行修改图形尺寸，调整计算参数。这么强的功能无疑对 CAD 的应用和发展是如虎添翼。

在计算机迅猛发展的同时，数学领域中的应用数学理论、运筹学、数学规划和计算方法等也得到了迅速的发展，尤其是最优化方法这一数学领域更得到数学家们的青睐。从 1965 年以来国际上有大量的专门性论文陆续发表，最优化理论和方法的专著达数百种，并且发行了专门性的最优化刊物。毫无疑问，计算数学和计算技术的迅速发展必将给电机的计算机辅助设计和优化工作带来新的活力和促进。

## § 1.2 计算机辅助电机设计的发展概况

纵观 30 多年来应用电子计算机设计电机的过程，大致可分为三个阶段：

### 1. 设计分析

从 1952 年在电机设计中开始应用电子计算机,直至 60 年代初,近 10 年的时间内,由于计算机在速度、容量、外围设备以及计算技术方面的限制,计算机的使用仅起到“高速计算尺”的作用。在这一阶段,一般是按设计人员预先估计好的各设计参量,依一定程序步骤来计算产品的性能。这样的程序称为设计分析程序,实际上是设计的核算。根据计算结果再对设计参量人为地加以调整,直至得到满足性能要求的设计为止。这方面以 C. G. Veinott 的工作最具代表性。他对异步电动机设计,进行了大量的工作,并且发展成一种性能程序,在 IBM 650 计算机上进行运算。1954 年 Saunders 提出数字计算机执行重复计算的方法,解脱了设计人员的繁重劳动,它只是多次重复设计分析程序,并不允许插入中间决定。这样经多次重复以后,直至算出一个符合性能要求的较佳方案。苏联 A<sub>2</sub>、AO<sub>2</sub> 小型异步电动机系列所采用的方法就属于这种程序。

### 2. 综合设计

在设计分析程序应用的同时,大约在 1955 年开始,又发展起另一种综合设计程序。它不是先给定设计参量,再校核性能,而是在规定的性能指标和技术条件下,计算机自动选择适当的设计参数和结构尺寸,得出满足要求的许多可行方案,以供设计人员凭经验来挑选。综合程序实质上是自动修改并重复分析设计以满足给定标准的一种程序。1967 年 B. J. 本宁顿和 B. J. 查默斯提出了一种应用迭代方法并结合预知的电机参数的综合程序。通过对绕组、冲片等主要参数、尺寸进行“搜索”,此时所选参数的变化方向和步长在每次循环之后可根据计算结果随机的改变或插入中间决定。综合设计开始发挥计算机的逻辑判断功能,比分析设计进了一步,可以自动选择绕组参数,自动选择槽形尺寸,自动调整设计参量。利用主要设计参量的循环还可以得到许许多多合格的和不合格的设计方案,供人们选优。

### 3. 优化设计

在 60 年代初期,国外开始出现电机设计的优化程序。1959 年 G. L. 戈德温提出了一种鼠笼型异步电动机的优化程序。1961 年 Q. W. 安德森提出一种对于同步电机使用梯度法的优化程序。C. 曾纳和 R. 辛兹格都对变压器的设计采用数学规划办法处理,成功地解决了;变压器在效率和温升的约束条件下使其费用函数获最小值的问题。从 1966 年以来,陆续发表了不少文章介绍优化设计程序。它们的共同点是:① 对设计任务有明确的数学模型,② 依据现代数学的寻优理论——多数是应用数学规划的方法,③ 采用了比较成熟的优化技巧,④ 大部分是采用数值方法,从而避免了严格的数学方程和求解函数的导数。

尽管优化设计的方法尚处于探索阶段,但从 70 年代开始已有不少优化设计程序应用于生产。特别是对异步电机,已经取得不少成功的经验和研究出有实用价值的程序。1976 年 S. C. Bhattacharyya 和 P. K. Mukherjee 以七个设计变量,在温升、效率等约束下,以成本作为目标时,对异步电动机进行优化,花费 15 分钟时间,电机成本降低为原来的 73.5%。近几年来更是使电子计算机的自动设计和自动绘图机相配合,进入了完全自动化设计的新阶段。

在我国,应用计算机辅助电机设计的研究工作起步并不算迟,1965 年已编制了电机设计的分析设计程序。由于受到计算机应用条件方面的限制,这方面的研究工作还只限于使用计算机较方便的一些高等院校、研究所及大工厂。自进入 80 年代以来,由于中小型计算机,特别是微型计算机在我国迅速普及,计算机辅助电机设计的研究工作得到了广泛开展,应用较多的



是分析设计程序和一部分综合程序,不少单位已开始研究、探索一些有实用价值的优化设计程序,成功地完成了一些电机产品的最优化设计工作,取得了显著的经济技术效果。

今后,电子计算机在电机设计方面的应用将越来越广泛,对它的研究也将逐渐深入,必将给电机设计的理论和实践带来根本性的变化,提出新的研究课题。原有的一套电机设计方法有个过渡和适应的过程,新的设计方法和理论有个探索过程,需要摸索和开创。从目前来看,有以下几个新课题正有待解决:

① 对电机设计任务提出更加严格的、符合实际的、更加精确的数学模型以及解决任务的数学计算途径。

② 进一步研究电机设计的内在规律,进行科学分析,改进以半经验公式为依据的设计方法,改造计算公式,提高公式的精度,逐步形成适合现代化计算技术的设计程序。

③ 总结生产技术经验,形成系统而完整的信息,内存于计算机内,为设计人员提供简明的设计逻辑和必要的资料。

④ 在发展实验技术的同时,进一步发展计算机的模拟技术,加强对产品的研究和对比试验。

⑤ 逐步扩大设计分析程序的内容,将某些局部问题的详细计算成果引进程序中。除了电机的电磁计算外还应对发热、通风和杂散损耗等项加强专题的深入研究,充分发挥计算机的效能。

⑥ 加强电机设计中最优化方法的研究,改善优化结果。从寻找局部最优点,向寻找全局最优点方向努力;从单目标优化问题,向多目标优化问题方向探索。

## § 1.3 电机设计的基本任务和步骤

### 1.3.1 电机设计的基本任务

电机设计的基本任务是设计人员根据用户提出的产品规格(如容量、电压、转速等)、技术指标(如效率、功率因数、温升等),结合国家的技术经济政策和生产工艺的实际情况,运用有关的理论和计算,或者参照同类型电机的数据,根据设计经验,预先确定电机的主要尺寸和参量(如冲片尺寸、铁心长度及绕组匝数、线规等);经过校核计算,使各项电磁性能指标满足国家标准或用户的特殊要求;并经过生产制造后试验,能使电机产品的实际性能与设计值基本相符合,使电机产品具有性能好、体积小、结构简单、运行可靠、使用维修方便的特点。

电机设计中要确定哪些主要尺寸和参量呢?我们知道电机运行的基本原理是靠电流  $I$  与磁感应强度  $B$  的相互作用来产生力矩或使线圈切割磁力线产生电压。因此,在电磁设计中要确定的主要尺寸参量也就是指与磁路有关的冲片尺寸以及与电路有关的绕组参数。前者一般是指定、转子冲片的内、外径、槽数、槽形尺寸、冲片叠厚等;后者一般是指绕组的线径、匝数、电流密度、绕组形式及连接方式等。电机的其他一些结构尺寸、零部件尺寸、通风冷却系统等,一般放在稍后的结构设计中确定,有时根据需要也可以与电磁设计交叉或平行进行。

在工厂生产实际中,并不一定对每种规格的电机产品都进行完整的重新设计。除了一些重要新产品或批量较大的产品外,不少的设计任务往往是根据工厂已有的模具、工艺装备,在

现有的系列或标准产品基础上进行改进设计,派生成新的电机产品,对原有的设计根据不同情况分别作小改、中改和大改。这时,需要确定的只是一部分电机尺寸和参量。然后进行校核性能。

### 1.3.2 电机设计的规格和技术要求

电机设计时通常要给定下列规格数据:

① 额定功率:发电机为电枢端输出的电功率(kW 或 kVA);电动机为轴上输出的机械功率(kW)。

② 额定电压:对交流电压均指线电压(V 或 kV);对直流电机指电枢端电压。

③ 额定频率:指电网频率(Hz)。

④ 额定转速或同步转速:(r. p. m)

⑤ 相数及相间连接方法。

⑥ 额定功率因数。

对异步电动机通常给定①~⑤,同步电机给定①~⑥,直流电机给定①、②、⑤。

电机设计时给定的主要技术要求一般在有关的国家标准或技术条件中规定,其内容视具体电机而异,大体上可以分为以下三类:

第一类是对电机的一般规定和技术要求。如国家标准《GB 755-65 电机基本技术要求》;《GB 760-65 电机安装尺寸和外形尺寸的代号》。

第二类是对某一类型电机的技术条件。如第一机械工业部部颁标准《JB 742-66 J<sub>2</sub>、JO<sub>2</sub> 系列三相异步电动机技术条件》、《JB 1104-68 Z<sub>2</sub> 系列小型直流电机技术条件》等。

第三类是各种电机的试验方法。如国家标准《GB 1032-68 中小型三相异步电动机试验方法》等。

我国电工产品的国家标准,正准备有计划地向国际电工委员会(IEC)的标准靠近,以便更好地与世界各国进行技术交流和发 展我国的外贸事业。

异步电动机的性能指标有六项,它们是:

① 效率  $\eta\%$ 。

② 功率因数  $\cos\phi$ 。

③ 起动电流  $I_{st}$ 。

④ 起动力矩  $T_{st}$ 。

⑤ 最大力矩  $T_{max}$ 。

⑥ 温升  $\Delta\theta(^{\circ}\text{C})$ 。通常,在温升计算有困难时,此项常通过电机的热负荷  $AJ(\text{A}^2/\text{cm}^2\cdot\text{mm}^2)$  来考核估算。

### 1.3.3 电机设计的一般步骤

各种类型电机设计的具体步骤可以有所不同,但大致的设计过程还是相似的,现以三相异步电动机的电磁设计为例来说明,电机设计过程基本上可以分为四步:

① 选取电机初始设计参量,

② 校核电机性能指标,

③ 调整电机有关参量,

#### ④ 挑选最佳电机设计方案。

##### 1. 预选电机的主要设计参量, 给出初始设计方案

设计人员根据设计任务书中所给定的电机规格和主要技术指标值, 通过估算或参考同类型相近产品的设计值来选择电机初始设计方案的各主要参量, 它们是:

##### (1) 冲片尺寸(如图 1-2 所示)

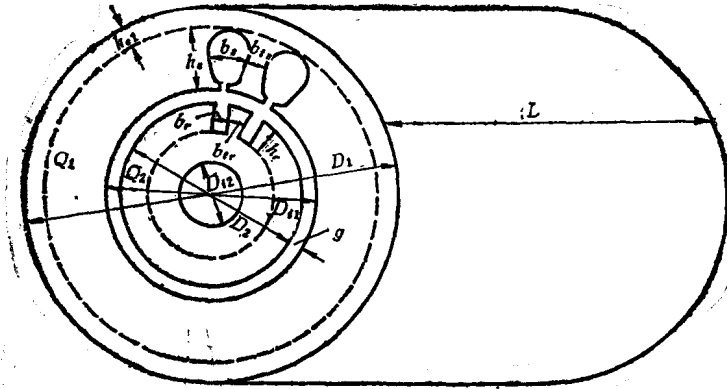


图 1-2 电机的主要尺寸

电机冲片构成了电机磁通的路径, 因而冲片是电机的重要尺寸。它包括:

冲片外形尺寸:

- ① 定子外径  $D_1$ 。
- ② 定子内径  $D_{11}$ 。
- ③ 转子轴径  $D_{22}$ 。
- ④ 气隙长度  $g$ 。
- ⑤ 铁心长度  $L$ 。

冲片槽形尺寸:

- ① 定、转子的槽数  $Q_1$ 、 $Q_2$ 。
- ② 定、转子的槽形。槽形有圆底槽、梨形槽、梯形槽、凸形槽、刀形槽及圆形槽等; 槽口形式有开口槽、半开口槽、半闭口槽及闭口槽等。
- ③ 槽形尺寸。有槽口宽  $b_{o1}$ 、 $b_{o2}$ , 槽口高  $h_{s0}$ 、 $h_{r0}$ , 槽口肩胛角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ , 槽下部宽,  $b_{11}$ 、 $b_{12}$ 、 $b_{r1}$ 、 $b_{r2}$ , 槽下部高  $h_{s1}$ 、 $h_{s2}$ 、 $h_{r1}$ 、 $h_{r2}$  等。

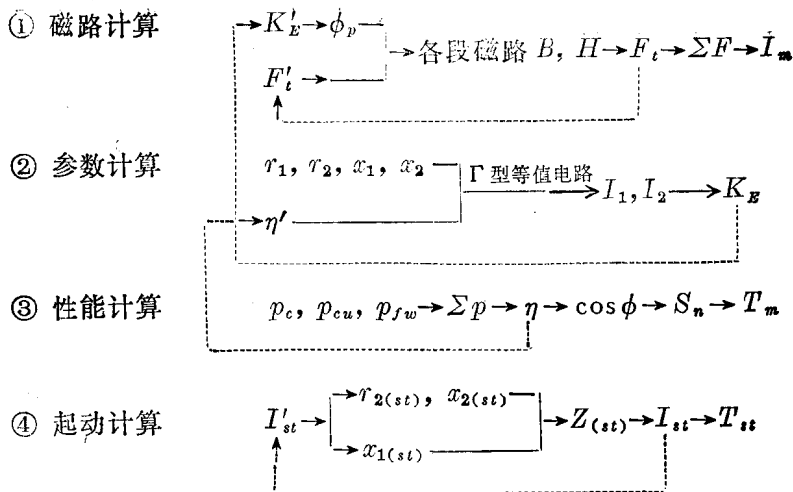
##### (2) 绕组参量

主要指: 绕组裸导线直径  $d$  和带漆膜线径  $d_1$ , 导线并绕根数  $NN$ , 每槽导体数  $Z$ , 绕组并联支路数  $a$ , 绝缘材料厚度及绝缘方式, 绕组连接方式。

##### 2. 性能校核计算

性能校核计算是电机设计中的主要计算工作, 工作量大, 并需反复计算和协调, 有的非线性问题还需反复迭代。仍以异步电机设计为例, 共有上百个计算公式, 可分成磁路计算、参数计算、性能计算和起动计算四部分, 包含了四个重要电磁参量的迭代计算: 饱和系数  $F_T$ 、电势系数  $K_E$ 、效率  $\eta$  及起动电流  $I_{st}$  的迭代。

上述四个迭代计算流程图可以简单表示如下:



其中  $K'_E$ 、 $F'_l$ 、 $\eta'$ 、 $I_{st}$  表示迭代的初值,不带撇的为计算值,虚线表示迭代回程线。

### 3. 调整设计参量

每一个设计方案经过性能校核后,便可知该方案是否满足性能指标要求。对不合格的方案必须对设计参量加以调整,再重新校核。有时为了选择一个较优的设计方案,也经常对其他有关的设计参量加以调整,以便比较各方案性能的优劣,从中选优。

通常,可供调整的设计参量应选择那些对性能影响较大的主要参量。在异步电机设计时选作调整参量的常有定子内径  $D_a$ 、铁心长度  $L$ 、气隙长度  $g$ 、每槽导体数  $z$ 、转子槽形尺寸等。当然,具体选用哪些参量进行调整,如何调整,要根据性能校核的计算结果由设计者进行判断决定。这个问题涉及面较广,也比较复杂。需要设计人员有较丰富的经验,对各项性能指标及相互影响作全面的分析,既要抓住主要矛盾又要对其他指标统筹兼顾加以考虑。应当指出,无论调整过哪一个设计参量,必须重新进行性能校核计算。

### 4. 挑选最佳设计

在电机设计过程中,为了寻求一个较好的设计方案,一般总要算好几个满足全部性能指标的可行设计方案,然后再对这些方案进行分析比较和筛选,从中挑选出一个比较理想的设计方案。采用计算机辅助电机设计后,可以比较方便地得到多个可行设计方案。然后由设计人员凭经验在纷繁众多的设计方案中进行挑选。如果采用优化设计,则能自动地利用数学选优理论得到一个较优的设计方案。

至于挑选最佳设计标准,可以按用户在性能指标方面的特殊要求,如效率最高或起动力矩最大等。在一般意义上说,最佳方案是指在满足各项性能指标的前提下,使某项或某些技术经济指标最优,如材料最省、重量最轻等。

从上述电机设计的四个步骤中,可看出电机设计工作虽然比较繁复,计算工作量大,但重复性高并具有一定的规律性。因此,电机设计工作非常适合于使用电子计算机。

## § 1.4 计算机辅助电机设计的主要过程

应用电子计算机来解决电机设计问题如同解决其他工程设计问题一样,可以分成如下几个过程:选定对象、数学描述、数值处理、编制程序、数据整理、程序检验、运行程序和输出结果

分析等。我们知道计算机是一种能自动、高速计算的工具，具有很强的存贮功能和逻辑判断功能，但是它毕竟还只是人类的一种工具，本身不能创造思维，只会按照人的意志，一步一步地按人们事先编好的程序去执行。因此，编制好程序是计算机辅助设计（CAD）中的一个关键，也是相当费时间、费脑力的工作。一般来说，电机 CAD 工作要经过下列几个步骤：

### 1.4.1 准备阶段

#### 1. 选定计算机机型和程序语言

由于计算机的迅速发展和普及，现有的计算机型号十分繁多，有各式大、中、小型计算机，还有大量品种更多的微型计算机，一般来说普通的计算机都可以用来作电机的计算机辅助设计。但如果要进行优化设计的话，则希望计算机的速度不要太慢，字长最好能大于八位，以保证一定的计算精度和速度。每种计算机通常都配有数种可供选择的高级算法语言。

目前应用最广泛的算法语言为：

FORTRAN (Formula Translator 的缩写)

ALGOL (Algorithmic Language 的缩写)

BASIC (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code 的缩写)

COBOL (Common Business Oriented Language 的缩写)

PASCAL (法国数学家名)

一般说来，FORTRAN、ALGOL 这两种语言比较适合于科技问题的计算，COBOL 语言适合于商业、经济管理。BASIC 是从 FORTRAN 语言提炼、简化而来的。它的程序结构简单、语言简单易懂，尤为突出的是它可以通过显示器或打印机实行人机对话，因而它是一种会话式的语言，特别便于程序的检查和修改。它适合一般的科技计算和事务管理。PASCAL 语言是 70 年代公布的一种新的语言，它的语法规则简单，数据类型丰富，表达方式简洁而又清楚，它是 ALGOL—60 演变而来的。FORTRAN—77 语言是目前国际标准语言，它吸取了 ALGOL 语言的某些优点，具有较强的功能。由于 BASIC 语言基本上采用了解释执行方式，能方便地实行人机对话，几乎各类计算机都配有这种语言，因此目前较广泛用于电机的机辅设计。

#### 2. 明确电机机辅设计任务的类型

如前所述，计算机辅助电机设计有三种不同的类型，即分析设计、综合设计和优化设计。这三种不同的设计程序往往具有不同的程序结构，不尽相同的数学模型，输入的数据也有所不同。

一般，分析设计程序比较简单，容易获得成功。在分析设计比较成熟后，根据需要可着手编制综合程序。综合设计的难度往往与综合程度的高低有关，有的简单地在分析设计基础上增加了局部综合的功能，形成了自动选择绕组线规综合、自动冲片开槽设计；有的如“穷举法”的综合循环设计，可自动得到大批设计方案；还有综合调整设计，具有较强的自动调整设计参量的功能。我们可以根据实际需要，先易后难，加以选择。自然，我们还可以编制一份既能进行分析设计又能进行综合设计的功能较强的程序，这样使用起来更为方便。但是，应当指出，编制程序的通用性越强，照顾面越宽，则程序结构就越复杂，出错的机会也越多，调试程序的时间也越长。优化设计的效果好，不仅计算时间省，而且可直接得到性能优良、耗费又省的理想设计方案，具有较高的技术经济效益。但是编制优化程序需要事先确定优化的目标和优化的数

学模型,并根据数学模型的性质选择有效、快速的优化方法,因此,优化程序的编制自然也要复杂得多。

### 3. 准备原始资料

在正式编制程序之前需要准备好的原始资料有:

- ① 手工设计计算时的计算公式的整理和分块归类。
- ② 将不适宜计算机的图解法改造成有关的数学计算公式。
- ③ 电机的规格、型号及性能指标值。
- ④ 需计算机插值计算的常用曲线图表的数组处理。
- ⑤ 随设计类型而异的设计控制数组,如分析数组、综合数组和优化数组。
- ⑥ 设计中所准备采用的计算方法。
- ⑦ 需输出打印输出结果量及重要中间量。
- ⑧ 程序验证考核题目,即经过手工计算的,有中间结果和最后结果的电机设计方案。

## 1.4.2 编制源程序

### 1. 构思程序的总框图

在源程序正式编写以前,应根据设计流程和计算逻辑画出程序的总框图。对初学者或对较复杂的大程序更必不可少。框图可作为编制程序时的依据,同时又有利于编好源程序的阅读和修改。总框图应力求清晰、明了,能简明而形象地表达程序的逻辑思想,反映程序的基本结构和计算层次,给人以一目了然之感。除总框图外,对于程序中的一些重要细节或难点可以另外画出较详细的分框图,作为对总框图的补充。

### 2. 编写源程序

用算法语言编写源程序是一项十分细致的工作,主要根据设计总框图和准备好的原始资料进行,同时又要注意不同计算机对使用算法语言方面的一些特殊规定或限制,选用合适的变量标识符,有直观性、系统性、规律性。不要一时贪快,急于上机试算,要宁稳勿急。不要存侥幸心理,要仔细推敲。只有这样,才能收到事半功倍的效果,使以后的上机调试工作顺利进行。

### 3. 检查源程序

源程序编写完毕后,不要马上急于上机,还须认真地加以检查以下的内容:

- ① 语法检查 检查所用的程序语句、格式有无违反算法语言的各项规定,各变量标识符是否合法,有无重复混淆。
- ② 公式检查 核对计算公式及量纲的正确性。
- ③ 结构检查 检查主程序及转向目标是否符合框图和各子程序与主程序的联结环节的合理性。

## 1.4.3 调试源程序

把经过检查的源程序在计算机上键入内存或存入磁盘后,经核对便可开始程序的调试工作,这是程序投入正式使用的一个重要步骤,它是程序经受实践检验的过程。

所谓调试程序,就是将一套已知计算结果的手工计算题目的原始数据输入计算机,从计算机算得中间结果和最终结果的正确与否来判断程序的正确性或找出源程序的错误所在并加以

修改的过程。

调试过程中主要进行两种检查:其一是语法检查,其二是结果检查。根据计算机对不同算法语言执行方式的不同,语法检查的方式也有所不同:对 FORTRAN、ALGOL 等编译程序方式,计算机是先编译后执行,编译时计算机对全部源程序自动进行语法检查,并显示全部的出错信息,待错误消除、编译通过后方可进行程序计算。对 BASIC 语言,计算机一般采用解释程序方式,它是边解释、检查语法边执行计算,遇到有语法错误时,自动停止运行并显示出错信息,待错误改正后再重新运行。计算结果的检查是逐项检查各中间结果和最后结果是否与手算结果一致,观察执行计算的路线是否符合设计逻辑,有无死循环的发生等。

应当指出,为保证全部程序的正确可靠,应对程序所具有的各种功能都要逐一试算通过。

#### 1.4.4 上机正式计算

在经过调试源程序、修改满意后,就可以将正式待计算的电机设计数据输入计算,根据控制变量的要求,实施计算,并将计算结果显示在屏幕上或打印在纸上。

#### 1.4.5 分析计算结果

分析研究并比较各设计方案的输出打印结果值及重要的中间电磁参量值,以便挑选合适的方案,或者判断进一步的修正措施,或者总结有关电磁设计的规律等。

## 第2章 电机机辅设计中常用的计算方法

### §2.1 函数插值

#### 2.1.1 概述

在工程设计中用来描述各种物理量以及技术数据关系的函数  $f(x)$  通常是很复杂的,往往只有很少一部分可以找到它的解析表达式  $y=f(x)$ 。在许多场合,通过实验测试或数值计算,所得到的只是自变量  $x$  在一些离散点上的函数值

$$y_i = f(x_i) \quad i = 0, 1, 2, \dots, n$$

或者用数据表格形式给出

$x$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	...	$x_n$
$y$	$y_0$	$y_1$	$y_2$	...	$y_n$

这种用数据表格形式给出的函数  $y=f(x)$  通常称为列表函数或离散函数。其中自变量的离散点  $x_0, x_1, \dots, x_n$  称作结点。为了便于设计人员使用和手工查找的方便,工程上又常常把有的离散表格画成曲线或曲线族的形式,一条曲线代表着一组一一对应的数据。

在电机设计中,也有许多这样的表格或曲线来表示不同电磁参量及结构数据之间的函数关系。如磁化曲线中  $B$  与  $H$  之间的关系、轭部磁通密度  $B_c$  与轭部磁路长度修正系数  $C$  之间的关系等。

在电机设计中经常要根据图表或曲线确定某一设计参量的数值。手算时,这可以很方便地用人的眼睛寻找坐标或表格的办法来实现;但在计算机上目前还无法按这样的步骤去工作。所以必须对曲线或图表进行必要的数学处理,而使通常的设计逻辑能为计算机所接受。

对于这种离散函数  $y=f(x)$ , 如何依据离散数据表格或曲线上有限个离散点的数据,利用计算机求取  $f(x)$  在结点外的任意给定点  $x$  的函数值,这就是插值方法要解决的问题。

插值方法的基本思想是,对于离散函数(列表函数)  $f(x)$ , 先设法构造一种简单的插值函数  $y=P(x)$  作为原  $f(x)$  的近似表达式,使插值函数  $P(x)$  与原函数  $f(x)$  在所有给定的结点上具有相同的函数值。然后,对任意所求的被插点  $x$  的函数值  $f(x)$ , 用插值函数  $P(x)$  的计算值来近似代替。这种用插值函数(近似函数)近似代替函数  $f(x)$  的方法就是插值法。

可以选择不同的近似函数的类型,从而形成了不同的插值方法,譬如有拉格朗日(Lagrange)插值、牛顿(Newton)插值、埃尔米特(Hermite)插值及(Spline)样条函数插值等。但最常用的近似函数是代数多项式,因为多项式具有各阶导数,而且求值又非常方便。这种采用代数多项式作近似函数的插值称为代数插值,也就是拉格朗日插值。它是我们讨论插值的主要对象。

对于给定的离散函数(列表函数),构造一个  $n$  次多项式(即次数不超过  $n$  次的多项式)



$$y = P_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n,$$

使得它在已知结点  $x_i$  的函数值  $P(x_i)$  取给定的离散函数值  $f(x_i) = y_i$ , 即满足条件:

$$P_n(x_i) = y_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, n.$$

利用上述  $n+1$  个结点条件, 可以求出插值多项式  $P_n(x)$  的  $n+1$  个待定的系数  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ . 因此, 构造一个  $n$  次插值多项式, 需要给定  $n+1$  个结点的函数值. 这  $n+1$  个结点  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  称为插值结点. 插值结点所界定的区间  $(x_0, x_n)$  称为插值区间. 而插值多项式的次数  $n$  称为插值的阶. 如果插值点  $x \in (x_0, x_n)$ , 则称内插; 反之, 如果  $x \notin (x_0, x_n)$ , 则称外推.

很明显, 插值的几何意义就是通过给定的  $n+1$  个点  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ , 作一条  $n$  次代数曲线  $y = P_n(x)$ , 用以近似地表示曲线  $y = f(x)$ .

一般来说, 插值多项式的阶数高些, 要求给定的结点信息也多了些, 插值的结果也较精确, 但是计算也随之比较复杂.

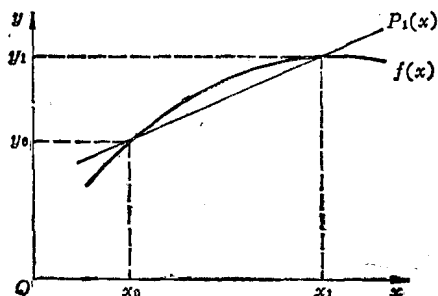
### 2.1.2 拉格朗日插值公式

#### 1. 线性插值(两点插值)

已知函数  $y = f(x)$  在点  $x_0, x_1$  的函数值  $y_0 = f(x_0), y_1 = f(x_1)$ , 我们作一个一次多项式  $P_1(x)$  来逼近  $f(x)$ , 使满足

$$\begin{cases} P_1(x_0) = f(x_0) \\ P_1(x_1) = f(x_1) \end{cases} \quad (2-1)$$

从几何上说  $P_1(x)$  表示通过两点  $(x_0, y_0), (x_1, y_1)$  的直线(图 2-1), 因此两点插值也称线性插值. 根据解析几何知识我们可以写出直线方程  $y = P_1(x)$  的两种表达式:



$$y = P_1(x) = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad (2-2)$$

$$y = P_1(x) = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} y_1 \quad (2-3)$$

其中, 2-2 式是实际计算时常用的点斜式, 2-3 式是分析时常用的对称式.

由 2-3 式, 可以表示为

$$P_1(x) = A_0(x)y_0 + A_1(x)y_1 \quad (2-4)$$

其中  $A_0(x) = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1}$ ,  $A_1(x) = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$ . 这两个插值多项式  $A_0(x), A_1(x)$  称为以  $x_0, x_1$  为结点的基本插值多项式. 从 2-4 式中可以看出基本插值多项式应满足的条件是:

对本身结点 ( $i = j$ ),  $A_j(x_i) \equiv 1$ . 即  $A_0(x_0) = 1, A_1(x_1) = 1$ .

对其他结点 ( $i \neq j$ ),  $A_j(x_i) \equiv 0$ . 即  $A_0(x_1) = 0, A_1(x_0) = 0$ .

从 2-4 式中可以知道, 线性插值多项式  $y = P_1(x)$  可以用两个基本插值多项式  $A_0(x)$  和  $A_1(x)$  通过线性组合的方法构造出来.

#### 2. 抛物线插值(二次插值)

线性插值比较简单, 但它仅利用两个结点上的信息, 用直线来代替曲线, 精度自然很低.