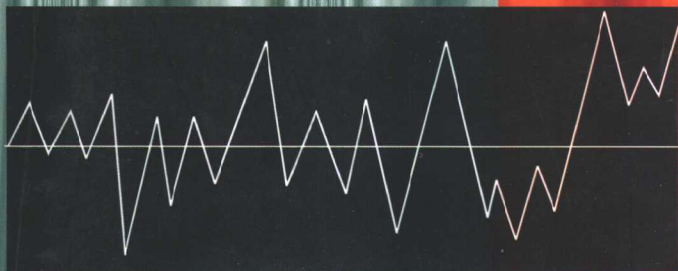


● 童 怀 著



磁阻电机动态特性的非线性分析

与计算机仿真

科学

社

内 容 简 介

本书详细介绍了步进电机和开关磁阻电机运行性能的非线性分析方法——等效磁网络模型分析方法。步进电机结构属细齿结构,开关磁阻电机结构属大齿结构,两者不同,因此所建立的非线性分析数学模型有差别。本书详细推导了这两种电机动态特性的等效磁网络非线性分析模型。围绕着如何求解所建立的数学模型,本书研究了等效磁网络模型方法中非线性方程的解法问题,讨论了状态方程和系统的稳定性,提出了状态方程初始条件的确定方法,讨论了磁阻电机等效磁网络模型的降阶处理方案,同时研究了磁阻电机的同步仿真分析方法和磁阻电机驱动系统中的电磁谐振问题。本书还提供了磁阻电机静态、动态特性计算的源程序。

本书可供(微特)电机研究、设计人员和高等院校有关专业的师生以及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁阻电机动态特性的非线性分析与计算机仿真/童怀
著. —北京:科学出版社,2000
ISBN 7-03-008625-2

I. 磁… II. 童… III. ①磁阻电机-动态特性-非线性-
分析②磁阻电机-计算机仿真 IV. TM352

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 64119 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

北京双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 11 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

2000 年 11 月第一次印刷 印张: 8 3/8

印数: 1—2 000 字数: 216 000

定价: 15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

前 言

关于电机运行特性的非线性分析,传统的方法是建立以绕组电流为状态变量的微分方程,着重解决绕组电感的非线性值计算问题和微分方程的求解问题。近年来随着微机运算速度的提高,有限元分析计算方法的不断完善,较容易建立电机的“磁参量数据库”。在进行电机运行特性的非线性分析时,以“磁参量数据库”取代“绕组电感”来描述电机各相绕组磁链与绕组电流之间的非线性关系,是目前研究电机运行非线性特性时采用得最多的一种方法。

作者在攻读博士学位期间深入研究了步进电机的动态特性分析理论和电机的优化设计方法,将导师王宗培教授所创立的“步进电机齿层比磁导理论”从静态特性推广到了动态特性研究领域,建立了步进电机动态特性的等效磁网络模型,推导出了电机绕组满足的以绕组磁链为状态变量的微分方程,通过求解微分方程计算出绕组磁链之后,再计算电机运行时的相电流和瞬时转矩等动态特性。所提出的模型方法在仿真计算时不需要计算绕组的电感参数,而只需输入电机的结构参数,使仿真计算原始数据的精度大大提高。所取得的研究成果在博士学位论文答辩时受到中科院丁舜年院士、浙江大学许大中教授等专家的高度评价。

作者在博士后研究工作期间,将步进电机的研究方法应用于开关磁阻电机稳态特性非线性分析当中。步进电机为细齿结构,开关磁阻电机为大齿结构,两者结构不同,所建立的非线性分析数学模型有差别,但在研究这两种磁阻电机数学模型的稳定性、等效磁网络方程组的解法及状态方程的性质时,又有很多共同的地方。在等效磁网络模型的基础上建立开关磁阻电机稳态特性的非线性分析模型,将开关磁阻电机的“非线性磁参数法”从单相电流系统推

广到了多相电流系统,这种研究方法得到电机界专家们的肯定。

本书详细介绍了步进电机和开关磁阻电机这两种磁阻电机运行性能的非线性分析方法——等效磁网络模型分析方法。这种方法不但适合于研究磁阻电机的非线性,同时也可以推广到其它类型电机的非线性研究中,目前,国内外有很多学者从事这方面的研究工作。

本书内容取材于近 10 年来作者陆续发表的论文中的有关核心内容及作者导师的有关论著,较详细地介绍了磁阻电机动态特性的等效磁网络模型分析方法。全书共十二章,主要包括磁阻电机的理论研究概况和发展动向、步进电机的非线性等效磁网络模型(齿层比磁导法)、步进电机稳态特性的齿层比磁导分析模型、步进电机驱动系统牵入特性的仿真计算、步进电机动态特性的分析与研究、步进电机稳态运行的同步仿真分析、混合式步进电机驱动系统电磁谐振问题的研究、开关磁阻电机稳态特性的等效磁网络模型分析方法、开关磁阻电机等效磁网络模型的降阶处理方案、开关磁阻电机驱动系统稳态特性的仿真计算实例、磁阻电机等效磁网络模型的稳定性,以及等效磁网络模型方法中非线性磁网络方程组的求解方法。

本书既介绍了哈尔滨工业大学微特电机课题组、华中理工大学开关磁阻电机课题组及作者导师王宗培教授多年来研究成果的有关部分,也总结了作者多年来的研究工作。

本书的出版得到了广东工业大学“研究生课程建设基金”、人事处、科研处、电信系及孙友松副校长的大力支持,在此深表感谢。

本书由广州电器科学研究所副总工程师谭建成教授审阅,亦深表感谢。

童 怀

2000 年 3 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 磁阻电机分析理论的发展概况	1
1.2 磁阻电机动态特性的几种典型非线性分析方法	6
第二章 步进电机的非线性等效磁网络模型	10
2.1 步进电机的非线性等效磁网络模型(齿层比磁导法)	10
2.2 步进电机的齿层磁参量数据库	14
2.3 齿层磁参量数据库的调用	20
2.4 矩角特性的非线性计算	24
2.5 混合式步进电机静态特性计算源程序	31
2.6 混合式步进电机定子内径的合理取值及电机设计步骤	63
第三章 混合式步进电机稳态特性的齿层比磁导分析模型	71
3.1 混合式步进电机的齿层比磁导法稳态仿真模型	71
3.2 电机的相电压和定转子相对位置角的确定	77
3.3 混合式步进电机多相通用稳态仿真程序	81
第四章 混合式步进电机牵入特性的仿真计算	108
4.1 五相混合式步进电机牵入特性的齿层比磁导分析模型	109
4.2 用齿层比磁导模型分析牵入特性时计算方法的研究	112
4.3 混合式步进电机牵入特性的仿真计算源程序	115
第五章 混合式步进电机动态特性的分析与研究	135
5.1 电机动态转矩的计算	135
5.2 齿层结构参数对动态转矩的影响	141
第六章 混合式步进电机稳态运行的同步仿真分析	153

6.1	同步仿真分析的数学模型	153
6.2	状态方程的辅助状态变量解法	157
6.3	仿真计算实例	159
6.4	五相混合式步进电机的稳态运行分析	161
第七章	混合式步进电机驱动系统电磁谐振问题的研究	165
7.1	驱动系统的统一等效电路	166
7.2	谐振频率的计算	170
7.3	实验研究	172
7.4	升频升压驱动系统中电容、电感的选择	173
7.5	结论	177
第八章	开关磁阻电机稳态特性的等效磁网络分析模型	179
8.1	开关磁阻电机的等效磁网络模型	180
8.2	开关磁阻电机绕组满足的状态方程	186
8.3	开关磁阻电机稳态运行时动态转矩的计算	189
8.4	开关磁阻电机稳态特性仿真程序	193
第九章	开关磁阻电机稳态特性的仿真计算与实验研究	219
9.1	开关磁阻电机稳态特性的实验研究装置	219
9.2	稳态特性的仿真计算与实验验证	221
9.3	结论	227
第十章	磁阻电机稳态仿真分析时初始条件的确定	228
10.1	系统的稳定性及迭代方法收敛性的证明	229
10.2	初始条件的确定方法:时间推移法	234
10.3	结论	236
第十一章	等效磁网络模型方法中非线性磁网络方程组的解法	237
11.1	非线性方程组迭代解法的评估	237

11.2	直接迭代法收敛性的证明	239
11.3	结论	242
第十二章	磁阻电机等效磁网络模型的降阶处理方案	243
12.1	开关磁阻电机稳态运行过程中绕组的工况分析	243
12.2	开关磁阻电机磁网络模型的降阶处理方案	248
12.3	结论	255
参考文献		256

第一章 绪 论

1.1 磁阻电机分析理论的发展概况

磁阻电机的结构和工作原理与传统的交直流电动机有着根本的区别,它不像传统电动机那样依靠定转子绕组电流产生磁场相互作用形成转矩,而遵循磁通总要沿着磁导最大的路径闭合的原理产生磁拉力形成转矩。磁阻电机定子、转子采用凸极结构,定子上有最简单的集中绕组,转子上没有绕组,也没有换向器、滑环等。磁阻电机是根据转子位置采用简单的控制方式来导通和断开定子电路的电流而产生转矩的,它通过适当的措施,可以得到范围很宽的各种机械特性。由于磁阻电机控制回路比异步电动机的控制回路简单,一般具有最少数目的开关设备,因此磁阻电机系统完全有可能实现高精度、快响应、高效率和高输出的性能指标。

磁阻电机转矩的产生基于定转子的齿槽效应,这是与传统结构电机的最大差别。这使得磁阻电机的计算变得很复杂,因为它不能像传统结构电机那样,可以简单地用气隙系数来近似考虑齿槽的影响。磁阻电机的气隙磁场是随定转子的相对位置(转子位置角)不同而改变的,所以主磁路的特性不能简单地用一条磁化特性曲线来表示。另外,磁阻电机定子绕组内的电流不是稳定的直流,也不是正弦交流,同时定子各相绕组的通电状态有不同的组合方式,这使得电机内的磁状态复杂多变,计算复杂化;还有一点与普通电机不同,就是磁阻电机的气隙特别小,常常在 0.05mm 以下,通电相定子极的齿与转子齿对齐时,气隙磁压降不大,当绕组电流增大时,主磁路很快饱和,特别是为了尽可能提高电动机的转矩,常常使电动机工作在高饱和状态下,因此计算时不计主磁路饱和

会造成相当大的误差。此外,随着定转子相对位置的改变,即使在励磁磁势不变的情况下,主磁路的饱和情况也会发生变化,这使得磁阻电机内部的磁系统既是高度非线性的,又是变非线性度的。

磁阻电机在实际应用中主要包括步进电机和开关磁阻电机。步进电机属细齿结构的磁阻电机,开关磁阻电机属大齿结构的磁阻电机,两者的工作机理相同,但结构有所不同,驱动方式也不相同,因此所建立的动态特性非线性分析模型有差别,但在研究这两种磁阻电机数学模型的解法及状态方程的性质时,又有很多共同的地方。在国内外的文献报导中关于磁阻电机的研究基本上都是具体针对步进电机或者开关磁阻电机来展开的。

1.1.1 步进电机研究发展概况

步进电机从20世纪40年代末发展至今已有近60年了。对步进电机理论的研究,主要是建立步进电机磁系统的精确的数学模型,在此基础上分析计算步进电机的基本特性和参数,对所设计的电机的运行性能进行预测;更进一步的,可以根据运行要求及设计指标进行优化设计。由于步进电机结构的特殊性、复杂性,步进电机理论的发展和完善经历了一个较长的时期。步进电机的数学模型在20世纪70年代及以前基本上均采用线性模型。线性分析方法中的基本假定:(1)磁路铁心部分的磁导率为无穷大;(2)不计磁滞涡流效应;(3)气隙磁导随转子位置作周期变化,主要考虑其恒定分量及基波。

按上述假定,电动机的转矩只与气隙磁场的变化有关,磁系统的其它部分只起闭合磁路的作用。线性分析方法主要有:(1)解析分析气隙磁场;(2)直线圆弧法近似计算气隙磁场;(3)气隙比磁导法;(4)加修正系数的线性模型方法。

上述线性方法根本的不足,是将定转子铁心表面看成等磁位面,并且认为齿部磁密分布均匀,事实上步进电机定转子都有齿槽,槽宽常大于齿宽,齿的高度相对较小,齿部常常十分饱和,即使在正常工作时,视在磁密可达 $2 \times 10^4 \text{Gs}$ ($1 \text{Gs} \approx 10^{-4} \text{T}$)以上,齿内

磁密分布很不均匀,铁心表面也不是等磁位面,因此线性分析的结论以及在此基础上建立的计算方法不太精确。

20 世纪 70 年代后期,随着计算机的发展,数值方法在其它电机电磁场的计算中的成功运用对步进电机的分析计算产生了很大的影响。从 20 世纪 70 年代末,数值计算方法开始被引入步进电机的计算。由于步进电机的整个磁系统的最关键部分是定转子齿部及气隙,气隙中及定转子齿内磁场的分布随定转子相对位置的不同而改变,一般来讲,齿内磁场分布很不均匀,特别是当定转子齿间磁压降较高时齿顶部沿齿宽方向的磁密的分布很不均匀,在定转子齿重叠部分的齿尖处磁密相当高,同样沿齿高方向不同截面上的磁密也是不同的。定转子齿内磁场分布的复杂性,决定了步进电动机的定转子齿不能像一般电机那样用磁路计算的方法来处理,只有直接求解磁场才能获得准确的结果。所以,数值方法刚刚引入步进电机时,人们的注意力便集中在定转子齿部及气隙的磁场。

1979 年和 1980 年, H. B. Ertan 首次采用有限差分法预测多段反应式步进电机的矩角特性曲线。1981 年他又在原来的基础上,给出了表示多段反应式电机既简捷又精确的模型,即所谓的“重复单元法”。一些研究单段结构反应式步进电机静转矩的文献中也应用了类似于“重复单元法”的方法,由于“重复单元法”在齿层这一关键部位采用场求解,结果表明,该法较线性模型法及修正的线性模型大大提高了计算精度。

1982 年, Chai 和 Konecny 采用有限元法重点分析了齿饱和情况下齿部磁导及其导数,揭示了磁导的导数与磁阻力间的关系。J. R. Brauer 利用通用的磁场计算有限元程序 AOS/MAGNETIC 计算了轴向磁化的永磁盘式转子步进电机,取整个电机作为场求解区域,包括定子轭、定子极身、定子绕组及永磁转子。为简化起见,将定子线圈作为轴对称场进行分析。因为整个电机的磁场都用数值求解,精度要比重复单元法的求解模型高。计算结果表明,最大静转矩的值与测值的误差仅为 2%,但是计算过程所占计算机

的内存及耗费的机时都很多,在普通的 PC 机上无法完成,实用性小。

为了既可减小磁场数值求解法的计算量,又可提高等效的网络法的精确性,1986 年 Hanselman 采用磁场的“磁网络单元法”来计算 VR 步进电机的磁场。

1988 年, G. Heine 提出了精确的混合式步进电机的等值磁网络模型,作者首次在模型中考虑了定子极间漏磁通,每极边缘转矩对电机矩角特性及步距误差的影响,分析了四相混合式步进电机谐波转矩对电机矩角特性及步距误差的影响;值得一提的是,这种模型耗费的机时量很大。自 20 世纪 80 年代数值方法应用于步进电机的计算以来,人们一直在努力解决计算精度和计算量之间的矛盾。重复单元法虽然对步进电动机的最关键部位一齿层部分进行场求解,但忽略了电机的其它部分,这样的模型虽然占用机时不多,但计算精度仍不能令人满意。对步进电机的内部整个磁系统都进行场域求解,可获得很精确的计算结果,但耗费机时大,实用性差。为了解决计算精度与计算量的矛盾,在后来,一种新模型——步进电机的齿层比磁导法模型开始用于步进电机的计算、设计及研究,并在近几年得到很大的发展,正在逐步完善之中。这种模型是场路结合的模型,具体地讲就是对步进电机的关键总分齿层区域包括气隙和定转子齿层铁心用数值计算方法进行场求解,将求解后的磁参数——齿层磁导作为集中参数与电机其它部分磁路(包括定子极身磁路、定子极间漏磁路、定转子轭磁路)构成一个非线性的磁网络。求解磁网络,从而计算电机的特性及参数。

齿层比磁导法模型具有如下特点:(1)能适应定转子双开槽的结构;(2)能适应高饱和度和就饱和度情况;(3)能适应多相绕组通电的复杂组合;(4)实用性强。

以前齿层比磁导法主要用于静态特性的计算,本书将详细介绍齿层比磁导法在步进电机动态特性的进一步发展。

1.1.2 开关磁阻电机研究发展概况

从 20 世纪 60 年代后期起,国外开始对磁阻电机进行深入的研究和论证。1970 年左右,英国 Leeds 大学步进电机和磁阻电机研究小组首创了一台开关磁阻电机雏形进行试验研究,发表了许多论文。加拿大、南斯拉夫在磁阻电机的运行理论、电磁场的分析计算等方面进行了很多研究。埃及对小功率的单相、二相磁阻电机的结构、起动性能等方面进行了大量研究。美国采用磁阻电机作为飞机涡轮发动机的起动发电机。

在电机设计方面,由于磁阻电机复杂的饱和现象,准确计算电机的电感和静态特性是研究磁阻电机的基础。有限元方法的发展为磁阻电机静态特性的准确计算奠定了基础。1985 年加拿大的 R. Arumugam 等人应用二维有限元方法分析了 6/4 极磁阻电机,较准确地计算出随转子位置变化的绕组电感,并获得了一些以前论文未涉及的结果,如相邻极间的漏磁通。G. E. Dawson 等人用二维有限元方法分析了 7.5kW OULTON 磁阻电机,与测量结果比较表明,有限元方法可较准确地预测磁阻电机的静态转矩-转角特性。此外,采用边界元和有限元结合的计算方法,采用自适用有限元法对磁阻电机的磁场进行分析计算亦取得了良好的效果。1992 年英国的 S. Williamson 教授将三维有限元方法用于磁阻电机磁化曲线的计算,真正地计及了磁阻电机的端部磁场。

在优化设计方面,M. Tohucum 提出了一种有代表性的单元双凸极结构方法,该方法利用规范化的概念,通过有限元方法获得规范化磁导率-齿表面磁通密度、力-齿表面磁通密度的数据库,将磁阻电机的性能计算归结为对单元双凸极结构的分析计算。以该方法作为性能计算的基础,1988 年 M. Tohucum 等人采用外逞罚函数法,以磁阻电机质量最小作为目标函数进行了优化计算,1990 年又用直接搜索法求取最佳磁路及驱动系统参数,以获得具有近似最优性能的设计结果。英国的 T. J. E. Miller 等人研制开发的 CAD 软件包能够完成磁阻电机的设计、校核和仿真等多项任务,

并能输出电机的主要零件结构尺寸图和各種性能特性曲线。随着理论研究的深入和实践经验的积累,软件包亦渐趋成熟。

从 20 世纪 70 年代末开始,我国许多单位先后开展了磁阻电机的研究工作,如华中理工大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、东南大学、福州大学、华南理工大学、西安微电机研究所及北京纺织机械研究所等对磁阻电机的控制、仿真、设计理论和电磁场的数值分析都做了大量的工作。

由于磁阻电机磁路高度非线性,其电压、电流和磁通都是非正弦量,导致这种电机的性能分析方法与传统电机的分析方法有很大差别。为了设计制造出高效节能的磁阻电机,对电机的动态特性进行深入的研究是目前磁阻电机理论的主要发展方向。

1.2 磁阻电机动态特性的几种典型非线性分析方法

对磁阻电机进行动态分析,无论是关于步进电机的研究,还是关于开关磁阻电机的研究,其主要的工作在于求解电机绕组满足的电压方程

$$v = ri + \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.1)$$

式中: v 为绕组外加电压; r 为绕组的电阻; i 为绕组电流; Ψ 为穿过绕组的磁链。

采用何种非线性分析方法,主要看在电机的电磁系统中用什么方法来描述绕组磁链和绕组电流之间的非线性关系。围绕着如何求解方程(1.1)主要有两种思路:

一种思路是以绕组磁链为微分方程的状态变量,利用电机的磁化曲线来求解方程,或者联立求解方程(1.1)与电机磁场满足的泊松方程。

另一种思路和传统的交流电机动态分析方法相同,即将式(1.1)中的磁链表示成电流与电感的乘积,将方程(1.1)转化成以电流为状态变量的微分方程,求解方程的任务主要在于如何确定电机

的电感参数。

在已有文献报导中,研究磁阻电机的动态特性时主要有下面几种非线性方法:

1.2.1 非线性磁参数法

这种方法属于第一种思路,它首先将有限元方法计算或测量所得到的完整的电机磁化曲线数据 $\Psi(\theta, i)$ 反演为 $i(\theta, \Psi)$ 形式的数据表格。如果将方程(1.1)写成形式

$$\frac{d\Psi}{d\theta} = \frac{1}{\omega} [v - ri(\theta, \Psi)] \quad (1.2)$$

只要有了 $i(\theta, \Psi)$ 曲线族,则任给一对 (θ, Ψ) 值, i 经过插值都可以求出来。知道了式(1.2)中的 $i(\theta, \Psi)$, 则式(1.2)在给定的初始条件下,可用 Runge-Kutta 法等数值积分方法求解,得到 $\Psi(\theta)$ 、 $i(\theta)$ 的数值解。

非线性磁参数法不需要计算微分系数,输入数据少,计算结果比较精确,但计算量大且只能用来分析电机单相通电时的情况。

1.2.2 快速非线性法

这种方法也是属于第一种思路,其求解过程如下:

(1) 由上一步的电流值 i_k , 解微分方程(1.1)获得当前转子位置 θ_{k+1} 下的磁链值 Ψ_{k+1} 。

(2) 利用模化的磁化曲线解析表达式,求取 Ψ_{k+1} 对应的对齐或不对齐位置下磁链的值 $\Psi_{a_{k+1}}$ 、 $\Psi_{u_{k+1}}$ 。

(3) 由磁链 $\Psi_{a_{k+1}}$ 或 $\Psi_{u_{k+1}}$ 和对齐或不对齐位置下的磁化曲线,求取所需的电流值 i_{k+1} 。

快速非线性法计算速度快,但精度不高,只能作为一种近似的性能计算方法。

1.2.3 电感参数法

这种方法是属于第二种思路的方法。如果将磁链表示成电感

的电流的乘积,这时可将方程(1.1)写成下面的以电流为状态变量的形式:

$$v = ri + \frac{d\Psi}{dt} = ri + \frac{d(Li)}{dt} = ri + l \frac{di}{dt} + i \frac{\partial L}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (1.3)$$

式中 $l = \left(L + i \frac{\partial L}{\partial i} \right)$, 为绕组的增量电感, L 为绕组的平均电感。如果能用某种方法求出这些电感参数, 则方程(1.3)可以方便地求解。

这种方法能计算多相通电情况下电机的运行性能, 但是由于绕组的增量电感、平均电感是绕组电流和转子位置角的函数, 要准确计算这些电感参数相当困难。

1.2.4 混合模型方法

1995年, Longya Xu 等人提出了将电机磁场所满足的泊松方程和绕组电压方程(1.1)联立求解的方法。在稳态运行的每一瞬时, 电机内的场域分析的泊松方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_0 \quad (1.4)$$

式中的电流密度 J_0 可以由绕组电流来确定。

在混合模型方法中, 绕组电流和穿过绕组的磁链被同时当作状态变量, 在开关磁阻电机的稳态分析时, 只要在稳态周期的每个离散点上联立求解方程(1.1)和(1.4), 即可求出电机的绕组磁链和绕组电流, 然后再计算其它稳态特性。这种方法也不需要计算电机的电感参数, 且可以分析电机多相同时通电的情况, 具有很高的计算精度, 但是这种方法的计算量非常大, 介绍的文献没有提出多相通电情况下运行特性分析的具体实施方案, 只给出了单相通电情况下电机稳态特性的仿真分析结果。

1.2.5 等效磁网络模型分析法

最初, 磁阻电机的等效磁网络模型主要是为了计算电机的静态参数(矩角特性、电感等)而提出来的, 与有限元法相比, 此模型

方法的计算量小而精度又比较高,一些学者对它进行了深入研究。但是,用磁阻电机的等效磁网络模型直接分析电机运行特性的方法的报导还很少。

非线性磁参数法在将 $\Psi(\theta, i)$ 反演为 $i(\theta, \Psi)$ 时,要求 Ψ 和 i 是一一对应的,这就限制了这种方法只能分析单相通电的情况。但从另一个角度来分析,电机某相绕组的磁链 Ψ 与该相定子齿层上的磁压降 ΔU 是一一对应的,磁压降 ΔU 通过等效磁网络可以和多相电流系统建立联系,因此通过电机的等效磁网络模型可以将非线性磁参数法的思想从单相电流系统推广到多相电流系统;这就是等效磁网络模型分析法的建模思想。

本书将详细介绍步进电机和开关磁阻电机这两种磁阻电机运行性能的非线性分析方法——等效磁网络模型分析方法。这种方法不但适合于研究磁阻电机的非线性,同时也可以推广到其它类型电机的非线性研究中,目前,国内外有很多学者从事这方面的研究工作。

第二章 步进电机的非线性等效磁网络模型

2.1 步进电机的非线性等效磁网络模型 (齿层比磁导法)

步进电机中,定转子铁心表面开槽的效应起主要作用,不能像一般电机理论中那样把定转子铁心表面看成光滑的,而仅有气隙系数来考虑开槽的影响,因而使计算和分析复杂化。通常的方法是引入一个定子齿距的气隙比磁导(G_g)的概念。它的定义是单位铁心长度上一个定子齿距的磁通(ϕ_{gt})与气隙磁压降(F_g)的比值。 G_g 与定转子齿的相对位置即转子的位置角(α)有关

$$G_g = \phi_{gt}(\alpha)/F_g(\alpha) \quad (2.1)$$

这种方法在文献[1]中作了相当详细的介绍,可以相当成功地用来对步进电机作一般的定性分析和一些工程估算。气隙比磁导法是建立在定转子铁心表面分别为等位面的基础上的。然而,步进电机的定转子齿磁密往往相当高,用气隙比磁导法计算出的转矩值有较大的误差。

20 世纪 80 年代初期,在气隙比磁导方法的基础上,王宗培教授提出了步进电机的“齿层比磁导”的概念和方法^[6]。这种方法的实质在于:

(1) 仍旧用一个定子齿距单位铁心迭厚作为单元,与定子齿的气隙比磁导法相类似,但是不把铁心表面看成等位面,而是把等位面取在齿根后铁心内,充分考虑了定转子齿内磁场分布的不均匀及变化情况,使所得的结果精确化。

(2) 如图 2.1 示,若单位铁心迭厚一个齿距的磁通为 $\phi(\alpha)$,齿层磁压降 $F(\alpha) = u_s - u_r$,则齿层比磁导 $G = \phi(\alpha)/F(\alpha)$ 是位置角 α