

Structuring of Motor Electromagnetism Property CAD Systems and Its Analytic Method*

Yi Yang, Zhijian Liu, Lili Yue

Faculty of Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming
Email: 44947434@qq.com

Received: Jul. 29th, 2013; revised: Aug. 24th, 2013; accepted: Sep. 12th, 2013

Copyright © 2013 Yi Yang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This article describes the composition of the CAD system to solve the electromagnetic characteristics of the motor resolution issues. It researches a motor electromagnetic property of the visual optimization of analytical methods. The study showed that the CAD system can provide the motor magnetic field distribution characteristic visual analog graphics, visual analog graphics based on the magnetic characteristics of the motor can accurately and quickly determine the motor structure to provide reliable motor performance optimization basis for effective and efficient means.

Keywords: Motor; Electro-Magnetic Property; CAD System

基于 CAD 系统的电机磁性特性解析方法研究*

杨毅, 刘志坚, 岳莉莉

昆明理工大学电力工程学院, 昆明
Email: 44947434@qq.com

收稿日期: 2013 年 7 月 29 日; 修回日期: 2013 年 8 月 24 日; 录用日期: 2013 年 9 月 12 日

摘要: 介绍了 CAD 系统的构成, 解决电机的电磁特性解析问题, 研究一种可对电机电磁特性进行可视化的优化解析方法。研究表明, 此 CAD 系统可提供电机磁场分布特性的可视化模拟图形, 根据电机磁场特性的可视化模拟图形, 可以准确、快速地判断出电机结构存在的问题, 为电机性能的优化提供可靠的依据及快捷的手段。

关键词: 通用电机; 电磁特性; CAD 系统

1. 引言

随着科学技术的不断进步, 现代化设备对电机的要求也越来越高, 电机小型化、高效率、高速化的要求在不断提高。与此同时, 电机的机械构造及电气构造也需要不断改进和优化, 以满足工业生产需求。因此, 研制性能优越的电机, 对电力工业乃至其他相关行业, 有着巨大的推动作用。

CAD 系统在电机的研究、开发及制造领域应用非常广泛。但是, 在一般情况下, 通常只是用来构建电

机的结构模型, 不具备分析电机磁性特征的功能, 无助于电机的功能特性解析^[1-3]。本文对电机的构造进行优化, 最主要的环节之一就是分析其磁场特性。如何检验和分析改进后的电机的磁性特性, 是电机理论研究与实际技术应用相结合的重点问题之一。

本文应用有限单元法^[4](Finite Element Method, FEM)和磁回路图的形式^[5,6], 对电机的磁性特征进行模拟, 并结合现代计算机技术, 利用 CAD 系统建立电机磁性特性可视化的模型, 提出了相应的解析方法。

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51007034)。

2. 非线性方程组的数值求解

在有限元素法的场合，多元非线性联立方程式常具有成百上千个变量。可应用牛顿·拉普逊法，对元素的非线性问题进行求解^[5-9]。假设广函数为 F ，未知节点数为 n ，应用有限元素法求解的方程式，可用下面(1)式表示

$$\frac{\partial F(D)}{\partial D_i} = 0 (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中 $\partial F/\partial D_i$ 为有限元素领域中节点的电位 D_1, D_2, \dots, D_n 的函数，将这个多变量函数用泰勒展开可得：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial D_i} F(D_1 + \alpha D_1 + \Lambda + D_n + \alpha D_n) &= \frac{\partial}{\partial D_i} F(D_1, \Lambda D_n) \\ &+ \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial^2}{\partial D_i \partial D_i} F(D_1, \Lambda D_n) \cdot \alpha D_i \right\} + \Lambda \end{aligned} \quad (2)$$

对(2)式，略去高次项，可得：

$$\frac{\partial}{\partial D_i} F(D + \alpha D) = \frac{\partial F(D)}{\partial D_i} + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial^2 F(D)}{\partial D_i \partial D_j} \alpha D_j \right\} \quad (3)$$

在(3)式中，为了简单方便起见，用 $F(D)$ 代替了 $F(D_1, D_2, \dots, D_n)$ ，如果将 $D + \alpha D$ 视为真值则有：

$$\frac{\partial}{\partial D_i} F(D + \alpha D) = 0 \quad (4)$$

于是(4)式可以改写成下式：

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial^2 F(D)}{\partial D_i \partial D_i} \alpha D_i \right\} = -\frac{\partial F(D)}{\partial D_i} \quad (5)$$

将(5)式用矩阵的形式来表示，并用 F 作为 $F(D)$ 的省略符号后可得：

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial D_1 \partial D_1} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial D_1 \partial D_n} \\ \vdots & \frac{\partial^2 F}{\partial D_i \partial D_j} & \vdots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial D_n \partial D_1} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial D_n \partial D_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha D_1 \\ \vdots \\ \alpha D_i \\ \vdots \\ \alpha D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial F}{\partial D_1} \\ \vdots \\ -\frac{\partial F}{\partial D_i} \\ \vdots \\ -\frac{\partial F}{\partial D_n} \end{pmatrix} \quad (6)$$

可得出(6)式的系数矩阵为对称矩阵。

本文中，首先对全体元素进行计算，求出(6)中的

$\partial F/\partial D_i$ 和 $\partial^2 F/\partial D_i \partial D_j$ 。然后，将未知节点的电位的初始值看作为零，在反复计算的过程中，第一次的计算即可以线性解求。

3. CAD 系统及其逻辑指令

依据前述非线性问题的求解方法，构成 FEM 的软件基础，但是要构成完整的 CAD 系统，还须数据输入及结果解析算法^[10-12]。本文将 CAD 系统的功能进程分成三个，即：网状结构衍生、FEM 解析、可视化模拟结果及解析。

3.1. 数据输入模块

数据输入模块的功能是为满足 FEM 解析的需要，根据不同电机，输入其所有相关参数。这些参数及形成的网状结构模型，对解析对象的离散化和物理特性有直接的关联。

在电机网状结构形成前，依据电机各自模块领域进行分层分区，划定出电机内部结构边界，以形成一系列的节点和元素。元素划分后，考虑到区域边界和不同的区域间的边界问题，根据元素的类型和构成节点，就其特征确定电机坐标。电机网状结构的形成过程如图 1 所示。

3.2. 数值解析模块

数值解析模块的功能是完成 FEM 解析中求解未知变量的计算过程，即求解根据牛拉法、变分法导出的非线性方程组。

在求解过程中，输入数据为满足分层分区、边界条件及节点元素特征。其输出数据为网状结构中各元素及节点未知量所对应的值。在求解对时间有依存性的数值方程的过程中，本文应用了逐次缓和法等方法，FEM 解析流程如图 2 所示。

3.3. 结果解析模块

结果解析模块的功能是将解析结果进行整合计算，使结果能产生可视化的模拟解析效果。为了将数值计算结果体现出电机的物理特性，本文采取的解析方法为：

首先在解析结果的基础上进行数据筛选，在保证冗余度合理的同时，筛除坏数据。如果数据量不足，则要追加数据，增加节点和元素；然后利用基于 RBF

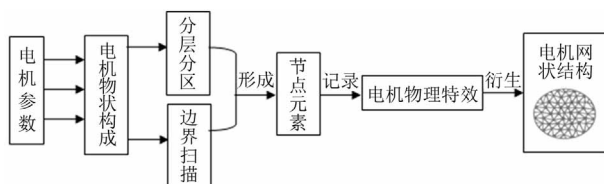


Figure 1. Mesh record formation process
图 1. 电机网状结构的形成过程

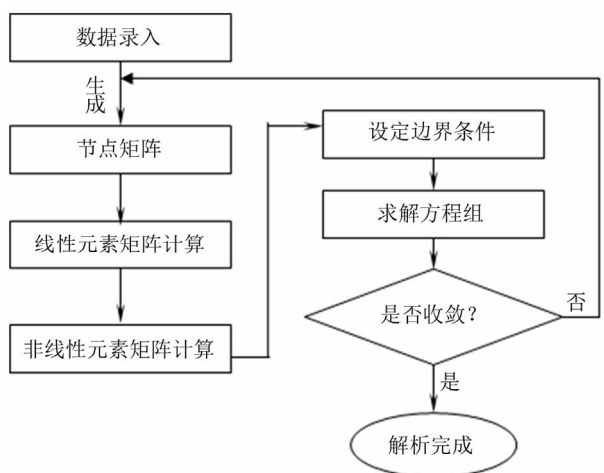


Figure 2. Nonlinear dynamic analysis execution flowchart
图 2. 非线性动态特性解析流程图

曲线拟合的方法进行信息整合，得到可视化的电机磁性特性曲线图。

上述方法如图 3 所示。

为得到可视化的磁性特性的解析结果，本文编制了解析结果可视化程序。该程序依网状分割图形成，能实现解析条件指定的节点号码优化，完成将 FEM 解析计算程序解析结果的各种数据子库在分割图画面上显示、模拟整个电机的磁性特性。

4. 电机磁性特性算例分析

本文选用仿真模型参数为：电机额定输出功率为 0.55 KW，额定电压为 300 V，额定转速为 1500 rpm。

依据前述方法，首先应用 FEM 对电机本体进行网状结构解析，生成相应的节点和元素分割图，其画面如图 4 所示。

形成网状结构后，对其结果进行数值解析。如图 5 所示，为元素做成时电机本体的画面。元素构成需要指定三个节点，在其指定之后，就构成了一次三角元素的三个顶点，元素构成的节点将以反时针旋转的顺序自动记忆。

解析条件的指定，是在网状分割图做成的基础

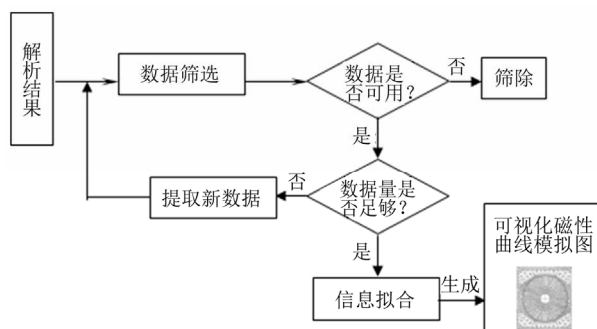


Figure 3. Interpretation of the results flowchart
图 3. 结果解析流程图

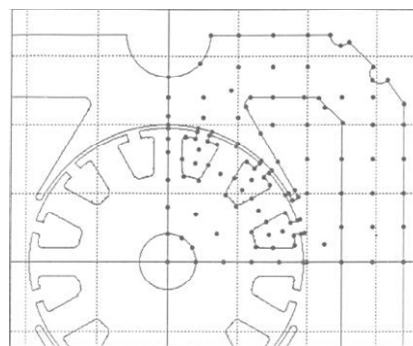


Figure 4. Said screen segmentation map
图 4. 网状分割图做成时的画面

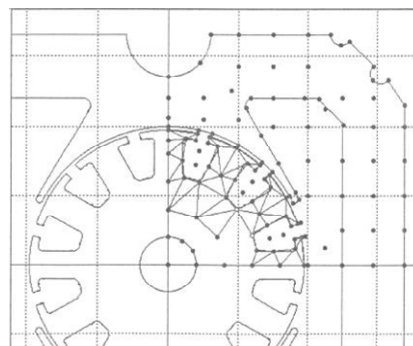


Figure 5. Said screen element map
图 5. 元素做成时的画面

上，对其数据进行已知电位、元素电流及元素材料定数三种解析条件的指定，画面如图 6 所示。

利用解析结果可视化程序，得到可视化的磁性特性的解析结果图如图 7 所示。

5. 结论

为了有效地解析电机设计或改造优化的结果，本文从实际应用理论的角度，研究基于 FEM 的电机磁性特性的 CAD 系统及其解析方法，不仅从应用理论上解决了电机领域的磁性特性解析问题，还提供了磁

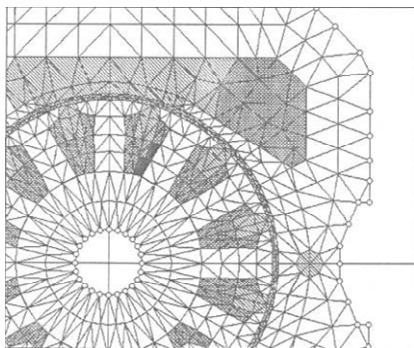


Figure 6. The specified conditions screen
图 6. 指定解析条件的画面

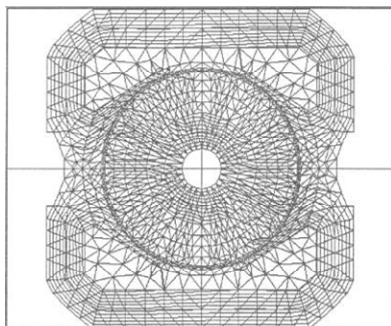


Figure 7. Magnetic properties screen
图 7. 电机磁性特性的画面

场分布特性的可视化模拟视图。根据电机磁性特性的可视化模拟图形，可以迅速、准确地判断电机结构的

各类问题，为各种新型电机的研发及电机性能的优化提供可靠、快捷的分析手段。

参考文献 (References)

- [1] 汤蕴缪. 电机内的电磁场[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [2] 胡之光. 电机电磁场的分析与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [3] 范镇南, 韩力. 电机优化设计技术发展情况[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(8): 3-7.
- [4] 王勳成, 邵敏编, 著. 有限单元法基本原理和数值方法(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [5] 梁慧. 计算电磁学在电磁兼容仿真中的应用[J]. 现代电子技术, 2011, 14: 44-47.
- [6] 冯奎胜, 卢万铮, 朱章虎. 电磁场数值计算方法分析[J]. 山西电子技术, 2005, 6: 50-53.
- [7] 于亚婷, 杜平安, 王振伟. 有限元法的应用现状研究[J]. 机械设计, 2005, 22(3): 6-9.
- [8] N. D. Hung and T. T. Ngoc. Analysis of cracked plates and shells using “metis” finite element model. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 40(8): 855-878.
- [9] 韩西, 钟厉等. 有限元分析在结构分析和计算机仿真中的应用[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20: 124-126.
- [10] L. N. Zhang, H. P. Li, D. S. Qiu and J. H. Zhu. An improved genetic algorithm for task scheduling of electro-magnetic detection satellite with uncertain detecting duration. Conference Proceedings—IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2009: 5128-5133.
- [11] 张金华, 彭涵, 陈永庚, 陈勇. 汽轮发电机电磁场有限元分析应用[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(1): 54-57.
- [12] 陶瑞民. 永磁电机电磁场的边界元方法[J]. 电气技术, 2011, 11: 20-22.