****

**毕业设计（论文）开题报告**

**题 目：基于区域分解与传输线法的电器静磁场有限元求解方法**

**专 业 电气工程及自动化**

**学 生 杨钰琛**

**学 号 1140610107**

**指导教师 杨文英**

**日 期 2018.01.04**

**哈尔滨工业大学教务处制**

**说 明**

**一、开题报告主要内容**

1．课题来源及研究的目的和意义

（正文 宋体小4号字，行距1.25倍，段前0行，段后0行）

2．国内外在该方向的研究现状及分析

3．主要研究内容

4．研究方案

5．进度安排，预期达到的目标

6．课题已具备和所需的条件、经费

7．研究过程中可能遇到的困难和问题，解决的措施

8．主要参考文献

**二、开题报告要求**

1．开题报告的字数应在3000字以上。

2．参考文献的要求：

（1）理工类论文的参考文献一般为10-15篇，其中学术期刊类文献不少于7篇，外文文献不少于3篇（特殊专业可酌情确定明确要求，并报教务处备案）；文科、管理类论文，参考文献一般为15-20篇，其中学术期刊类文献不少于12篇，外文文献不少于3篇。近五年的文献数不应少于总数的1/3，应有近两年的参考文献。教材、产品说明书、国家标准、未公开发表的研究报告不宜作为参考资料。

（2）参考文献按在开题报告中出现的次序列出。

（3）参考文献书写顺序：序号 作者.文章名.学术刊物名.年，卷（期）：引用起止页。

**哈尔滨工业大学毕业设计（论文）任务书**

|  |
| --- |
| 姓 名： 杨钰琛 院 （系）：电气工程及自动化  专 业： 电气工程及自动化 班 号 ：1406161  任务起至日期： 2017年 12月 20日至 2018年 6 月 20日 |
| 毕业设计（论文）题目：  基于区域分解与传输线法的电器静磁场有限元求解方法 |
| 立题的目的和意义：  电器用途广泛，职能多样，对电路起控制、保护、检测等作用，是电路中的重要部分。继电器、接触器是其中很重要一类的电器，常用于控制电路通断，性能直接影响电路的安全与稳定，往往一只接触器失效就会造成系统瘫痪，造成巨大损失。  在电器产品的研发设计过程中，利用有限元方法求解时常常会耗去大量时间。例如，接触器常见的优化问题为多目标优化问题，涉及到动态特性、温升、振动性能等因素，需要进行多次重复仿真计算，对于某些问题通常还要考虑到多场耦合，方程中存在多个未知量，使得仿真求解时间更长。如果能大幅地改进有限元求解的效率，将会解决­­­电器仿真设计中的一大痛点。区域分解技术可以将一个完整的求解域拆解为不同的子域，传输线法具有分割不同求解域的作用，同时在求解过程中，可以省去对逆矩阵的计算，大大简化计算过程，采用区域分解与传输线法相结合的方法，能够实现计算任务的并行计算，达到对有限元计算加速的目的，对于加速电器仿真计算效率提升有着重大的意义。 |
| 技术指标与主要内容：   1. 研究区域分解技术（DD）和传输线迭代法（TLM）相结合的实现方法； 2. 研究并设计C++程序，编程实现电器静磁场有限元求解算法； 3. 实现牛顿迭代法、松弛迭代法和DD-TLM法，同时比较分析它们和商用有限元软件的计算结果精度和效率； 4. 在静磁场有限元求解结果基础上，实现典型电磁机构电磁吸力的计算，并与实测电磁吸力值比较分析； 5. 采用文中提出的DD-TLM方法完成电磁机构的参数设计。 |
| 进度安排：（1）2017.12.20到2018.01.01 针对题目明确思路，查找与有限元、牛顿迭代法和传输线迭代法相关的文献。  （2）2018.01.01到2018.01.04 总结整理资料准备开题  （3）2018.01.04到2018.04.05 寻找区域分解法和传输线迭代法结合的实现方法，学习C++编程  （4）2018.04.05到2018.04.20 编程实现电器静磁场求解算法，分析比较牛顿迭代法，松弛迭代法，传输线迭代法以及他们和商用软件计算结果的异同  （5）2018.04.20到2018.05.04 学习电磁结构电磁吸力的计算，将其和实测数据进行比较  （6）2018.05.04到2018.06.20 利用DD-TLM方法实现电磁机构的参数设计 |
| 同组设计者及分工：  独立完成各项工作 |
| 指导教师签字\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_    年 月 日    系或教研室（研究所）主任意见：  主任签字\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  年 月 日 |

1课题来源及研究的目的和意义

1.1课题背景

随着集成电路的不断发展，计算机的数值解算性能在不断提升。有限元理论可以说是应用最为广泛，商用化最成熟的数值方法之一了。借助市面上常见的有限元仿真软件如ANSYS和COMSOL，技术人员可以方便地对产品的温度场、热场、电磁场等参数进行计算，实现对产品性能的估计和预测[1-3]。继电器、接触器等电器元件是载人飞船、国防武器装备等设备当中的重要操作部件，它的寿命指标以及可靠性都必须达到一定的使用要求才能够投入使用。早期的传统优化设计常采用“设计-试制-测试-校正-再测试”的反复循环模式，需要较高的时间及成本，优化后的结果也未必显著。而后随着电磁、机械仿真技术的发展，虚拟样机技术逐渐取代了传统优化设计方法。虚拟样机技术通过仿真得到接触器等的性能，加快了产品的试制过程，该方法常与正交试验相结合，以稳健性为优化目标对接触器的各参数进行优化设计。

在产品优化过程中，往往需要进行大量重复的仿真分析。而在有限元分析计算中，从单场分析到多场耦合分析，每增加一个物理场意味着有限元计算方程组中将增加一个未知变量，这无疑对计算效率提出了更高的要求。可以说，通过合适的计算手段提高非线性有限元的求解速度，应用到产品参数化设计及优化过程上是一个非常值得探讨的课题。

1.2课题的研究目的和意义

电器用途广泛，职能多样，对电路起控制、保护、检测等作用，是电路中的重要部分。继电器、接触器是很重要一类的电器，常用于控制电路通断，其性能直接影响电路的安全与稳定。在航天航空、轨道交通、工业控制等领域中，往往一只失效就会令整个系统失效，进而引发上百万至上亿元的损失，例如高铁上的接触器失效可能会导致高铁的延误或停运，火箭控制和检测系统的接触器故障可能导致整个发射失败等。近年来随着全电武器、电动汽车等武器装备、民用设备的发展，接触器不断向大功率、小型化发展，随之而来的，大功率接触器的寿命、温升、抗振性等优化设计成为热点问题。

如今常用于电器的优化设计所选的优化目标通常具有多个要求，也就是说多目标优化问题比单目标优化问题更普遍。例如对大功率接触器来说，寿命是重点问题，其寿命受衔铁吸合速度、断开速度等动态特性的共同影响，也就是还要对动态特性进行优化设计。而随着大功率接触器向小型化大功率发展，热量难以向外界散发，进而导致接触器温度过高而失效。为避免该问题，温升也是设计重点之一，因此大功率接触器优化设计就是典型的多目标优化问题，其优化目标为寿命、动态特性、及温升。除了这三者，接触器所需优化设计的目标还有很多，例如可靠性、振动性能、体积、成本等。这些需要优化的目标相互影响。现有的优化设计方法例如遗传算法、粒子群算法等都需要重复计算，适用于接触器的体积、成本等易于求解的目标。但对其他目标，例如动态特性、温升、振动性能等在工程应用中常用限元法求解，因此，有限元的计算速度很大程度决定这优化设计的速度，如果能大幅地改进有限元求解的效率，将会解决电器优化设计中的一大痛点。

2国内外在该方向的研究现状及分析

2.1电磁问题数值解算技术的研究现状

目前解决电磁系统计算问题的数值计算方法主要有：有限元方法（FEM）、有限差分法（FDM）、有限体积法（FVM）等。

有限元法的基本思想是将求解域进行离散化，用有限个简单的单元插值来表示复杂的研究对象，从而求解各种物理问题，是迄今为止最为有效的数值计算方法之一。有限元的发展得益于数学理论的发展，19世纪末及20世纪初，数学家Rayleigh 和Ritz首先提出的变分法原理是现代有限元求解的核心思想。在1968年，有限元理论开始应用于电磁场的计算, 从此人们对这一便捷准确的计算方法的关注越来越多。如 Xiao Wen Wu将有限元分析应用于隔绝气体的电器热分析，可以同时得到涡流，流体场，热场等多种参数。[4]而对于有限元对电磁场分析这一方向现在也在不断完善中，Lefevre日前就发布了对于有限元分析电机装置边界条件处理的论文。[5]凭借其稳定性和通用性，有限元方法逐渐成为求解电器问题的主要计算方法。

有限差分法是计算机数值模拟最早采用的方法。这种方法是将求解域细分成有限格点组成的网格，通过采用有限差分公式来替代每一个格点的导数，这一过程可以看作是用一个插值多项式及其微分来代替偏微分方程的解的过程[6]。在电磁场领域，时域有限差分法最早是由Kane S.Yee 在1966 年提出的，几乎与优有限元同时发展起来[7]。对于低频电磁场，很少有用有限差分来求解电磁系统的磁场分布，往往会用来求解电磁系统中电路耦合与机械运动耦合的微分方程。

有限体积法又称控制体积法，是指将求解域分成一系列不重叠的控制体积，将对于微分方程的求解化为对每个控制体积的积分，得到一组离散方程。其优点在于即使是粗糙网络也能够得到较为准确的解。Madsen 等人应用有限体积法到电磁计算当中，针对三维空间当中的Maxwell 方程组，使用一种修改的有限体积法技术，实现了求解[8]。

2.2有限元求解加速方法的研究现状

在有限元程序的求解过程当中，消耗时间最多的几个阶段为：分网过程、单元装配以及非线性迭代求解过程。在分网过程中，一种基于动态负载平衡（DLB）的算法被用来实现并行3-D 分网优化问题，这个方法允许对系统更为详细的描述以及揭示更多的关键性能特性[9]。另外，在提升装配矩阵效率方面，Markal 等人通过将一个分网区域分解为几个区域，在一个多核CPU 和许多核GPU 上进行独立的装配来实现并行加速[10]。

为了提升非线性迭代求解速度，传统方法如Newton-Raphson，松弛方法均被提出和实现。传输线方法作为一种新的方法也被应用到求解过程当中。Lobry 等人采用了这种方法来实现了感应电机当中的时域分析[11]。而后随着多核计算资源的不断涌现，并行化计算也开始被应用在求解过程中。Rischmuller 将并行的边界元方法和串行有限元方法进行了结合，并用到了GMERS 迭代当中[12]。这个方法不仅加速了计算过程，而且也克服了单个计算机的存储容量问题。基于以上研究，Knight 又进一步对比了DD-TLM 和Newton-Raphson 方法，并且指出了对于时感应电机时域中涡流分析的计算所必须的步骤[13]。

3主要研究内容

本文的最终目标是通过DD-TLM方法实现对非线性二维轴对称磁场的加速计算，主要研究内容包括以下五个部分：

1. 区域分解技术（DD）和传输线迭代法（TLM）

区域分解技术原理是将求解域分解成多个子域，在多核处理器上进行计算，最终重建得到最终结果。传输线迭代法是一种求解电路的迭代方法，其原理是主要是在线性系统和非线性元件添加一段无损传输线，电压信号在传输线上不断反射的过程即为迭代过程。如果系统存在稳定状态，那么传输线的迭代过程必然也存在一个稳定状态，通过等效变换，将有限元的求解方程转化为等效的电路网络，然后进行区域分解，通过传输线来实现各个子域之间的相互迭代，最终实现有限元问题的并行化求解。

1. 设计C++程序，编程实现电器静磁场有限元求解算法

目前，主流的计算机编程语言有十几种之多，但是真正应用广泛，历史悠久的当属C/C++。C++ 采用面向对象思想设计的结构，可读性高，由于继承的存在，即使改变需求，维护也只是在局部模块，所以维护起来是非常方便和较低成本的。另外，从思维方式上来说，在软件开发时人们根据设计的需要对现实世界的事物进行抽象，产生类。这种解决问题的方法接近于日常生活和自然的思考方式，势必提高软件开发的效率和质量。此外，由于C++继承、封装、多态的特性，可以自然设计出高内聚、低耦合的系统结构，使得系统更灵活、更容易扩展，而且成本较低。因此，采C/C++ 作为主要的编程语言。

1. 多种求解方法的计算效率对比

为了研究计算速率的提升，对比牛顿迭代法、松弛迭代法和DD-TLM法三种方法求解速率计算精度的异同，再通过与商用软件计算，比较计算结果精度。

1. 对典型电磁机构电磁吸力的计算和比较分析

电磁结构是大多数电器元件的重要组成部分，其静态吸力特性的计算是电器设计计算的主要内容之一。电磁吸力可以通过衔铁表面的积分计算求得，通过对比程序求得的电磁吸力和商用软件计算结果，分析求解速率和计算精度的异同。

1. 电磁机构的参数设计

通过编写的程序对指定的电器设计方案进行分析，完成简单的参数设计。

4研究方案

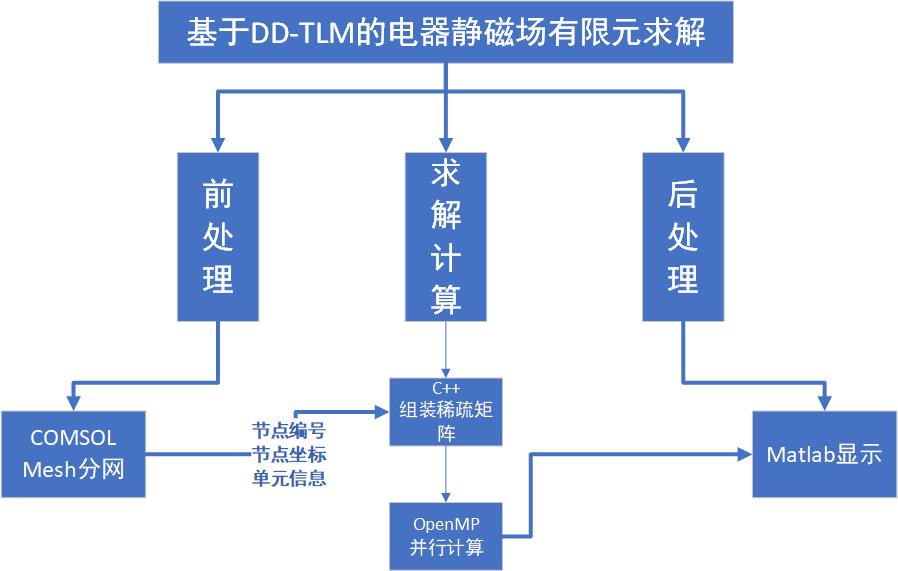
4.1研究方案综述

图 1 研究方案总体框图

本课题旨在通过C++编程，应用基于DD-TLM的计算方法实现对二维轴对称静磁场有限元的加速计算。主要工作可以分为三个部分：前处理，求解计算，后处理。

前处理是指分网处理。通过COMSOL软件实现分网，将有限元建模。利用商用软件可以省去很大一部分工作量。其次是求解计算。利用前处理所获得的信息，如节点编号，节点坐标，单元信息等，导入C++组装稀疏矩阵。同时，利用数据库的METIS算法可以实现对求解域的分解，随后在OpenMP中进行并行计算。最后进行后处理。后处理也就是对结果的可视化处理。这里可以选用Matlab进行绘图展示结果，便于下一步的比较。

4.2建立静磁场的有限元分析模型

分析二维非线性磁场问题可以大概分为四个部分[14]。首先是建立二维非线性磁场的微分方程。通常先求解磁矢位，其双旋度方程为：

其中，磁阻率。

对于二维平面场（平面），电流密度和磁矢位互相平行，且平行于轴，即，；，。磁场的微分方程为：

边界条件为：

对于二维场有

代入能量泛函可得

第二步是对求解区域进行剖分差值。将求解域剖分成任意的三角形单元，如图1所示。利用三角形的三个顶点对每个单元进行编号，这样三角形中任意点的矢量磁位A就可以用三个节点上的矢量磁位值表示，实现对恒定磁场的离散化。而三角形单元e中任一点磁位函数就可以用线性插值函数去逼近

即

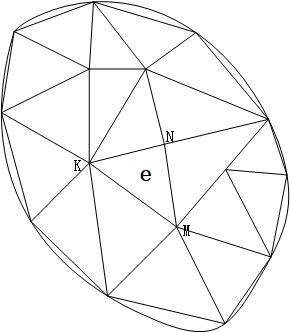
其次是单元分析对能量泛函作离散化处理，将求能量泛函极值问题转化为求一阶偏导为零的问题。

图 2 有限元离散分网

令

则

最后，进行整体合成。能量积分达到极值的必要条件是对每一变量的偏导数为零，则对于节点可以得到下列方程：

式中，为求解节点总数

令

令，可得到阶联立方程组。写成矩阵形式为

4.3基于DD-TLM的静磁场有限元磁场的数值实现

4.3.1.有限元建模分网

有限元分网的过程一般包括：CAD模型的读入，几何模型的编辑修改，网格划分[15]。有限元分网是求解过程前很重要的一个功能，网格单元质量的好坏将直接决定有限元的计算结果[16]。目前已经有很多优秀的开源分网生成软件提供了这方面的功能，包括libMesh，triangle 等，为了降低软件开发的难度，实现代码的重用性，避免编写低质量的代码，这一部分将通过可以通过COMSOL软件分网然后导入实现。

4.3.2. DD-TLM求解有限元

1. 求解域区域分解

并行有限元计算依赖于对求解域的有效划分，每个划分的子域应该包含相近数目的单元。一般来讲，如果并行系统包含p个处理器，问题域也会被分成p个子域。这里我们可以利用C++数据库中的METIS算法实现2D分解。

1. 传输线迭代法原理

传输线迭代法是一种用来求解非线性电路的方法，其迭代原理是在线性电路系统与非线性电路元件之间添加一段无损传输线，通过电压信号在传输线中不断反射，来实现非线性电路元件的迭代求解过程。由于传输线的添加并没有使电路的本质发生改变，如果所求解电路系统存在稳定状态，那么传输线的反射也会存在一个稳定状态，即传输线迭代也会达到收敛。

图3是一个简单的含有非线性电阻R 的直流电路，其中U 为电压源，Z 为电源内阻。为了使用传输线迭代法进行求解，我们在电阻R 两端添加一段传输线线段。根据传输线模型，我们可以得到如图4和图5的诺顿等效电路。图4为电压信号入射到电路系统时的情况，此时为了获得电压，可以通过节点电压法来求解这个电路。图5为电压信号经过电路系统之后反射时的等效电路，同样地，为了获得电压，我们需要求解此时的非线性小电路。

图6为电压信号的迭代原理图，其中曲线为电阻的非线性特性曲线，直线AB 为电源曲线，非线性的真值应该为这两条曲线的交点处。图6a和图6b分别为传输线导纳大于和小于电阻导纳的真值的情况。以图6a为例，电压信号从节点c入射到线性电路，其求解为斜率为的线性函数与电源曲线的交点。当电压信号开始反射回节点c 时，其求解过程为斜率为的直线与电阻的非线性特性曲线的交点。之后的迭代过程以此类推，从图中可以看到电压收敛过程为1，3，5，7，9……和2，4，6，8，……。类似的，当传输线的导纳值小于非线性电阻的导纳真值时，迭代效果如图6b所示。因此可以说，传输线导纳和实际电阻导纳值越接近，迭代速度就越快。

传输线定理真正优点在于省去了许多不必要的计算。例如在求解未知的线性系统时，我们可以列出方程(18)求解。电路的节点导纳矩阵Y 在式中并没有改变，只是每次迭代对右侧的Vi 进行更新，这便是该方法的一大优点。此外，在电路中非线性求解与线性系统没有关系，实现了线性系统与非线性元件的分离。

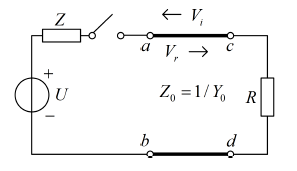
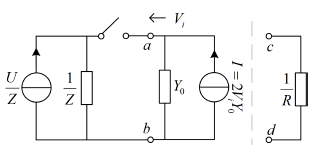
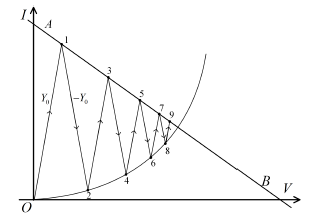
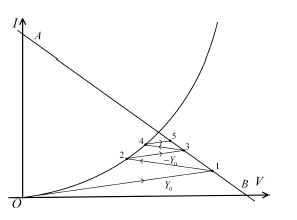
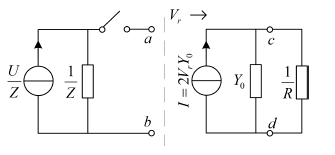


图6 传输线迭代过程

b. 传输线导纳小于电阻导纳真值时

a. 传输线导纳大于电阻导纳真值时

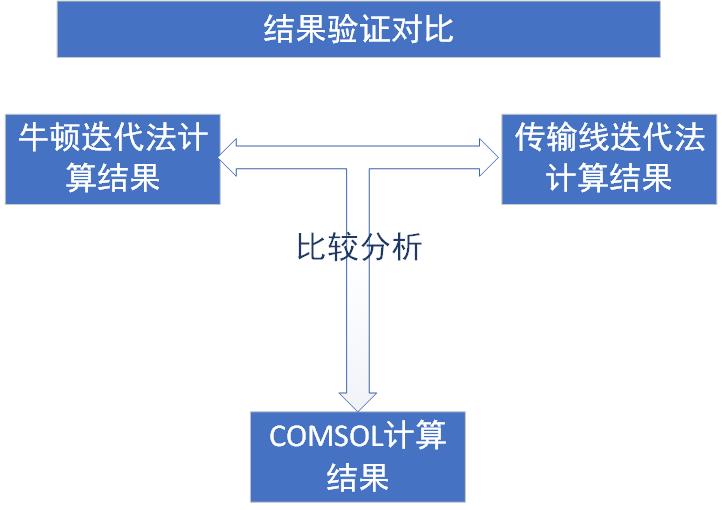
图 4 入射过程中的等效电路

图 3 含传输线的典型非线性电路

图 5 反射过程中的等效电路

1. 应用DD-TLM到有限元

传输线迭代法作为一种不同于牛顿迭代法的非线性迭代方法，它的优点主要在于它能在迭代过程当中保持节点导纳矩阵的不变性，如果采用LU 分解法来进行矩阵的求解，LU 分解就只需要在第一步完成，不需要每一步重新进行分解，这样能够极大地节省时间。此外，它能单独地考虑电路当中每一个非线性元件的迭代，适合采用并行化算法计算所有的非线性元件。

4.4 结果验证对比

首先在不同计算方法间横向进行比较，重点在比较牛顿迭代法和传输线迭代法的计算时间以及求解精度。随后再分别与COMSOL商业软件的计算结果进行比较，比较项目与上一次的相同。结果通过Matlab绘图呈现，以达到结果直观的可视化。

4.5应用DD-TLM进行简单的参数设计

关于电磁吸力的计算可以通过计算包围该物体任意表面上的应力面积分得到，即

其中

5进度安排，预期达到的目标

（1）2017.12.20到2018.01.01 针对题目明确思路，查找与有限元、牛顿迭代法和传输线迭代法相关的文献。

（2）2018.01.01到2018.01.04 总结整理资料准备开题

（3）2018.01.04到2018.04.05 寻找区域分解法和传输线迭代法结合的实现方法，学习C++编程

（4）2018.04.05到2018.04.20 编程实现电器静磁场求解算法，分析比较牛顿迭代法，松弛迭代法，传输线迭代法以及他们和商用软件计算结果的异同

（5）2018.04.20到2018.05.04 学习电磁结构电磁吸力的计算，将其和实测数据进行比较

（6）2018.05.04到2018.06.20 利用DD-TLM方法实现电磁机构的参数设计6课题已具备和所需的条件、经费1) COMSOL仿真软件，该软件是由国外公司开发用于有限元仿真的软件。用于参考，比较所写程序计算结果和商用软件之间的异同；

2) Matlab软件，用于辅助计算；

3) 高性能仿真工作站一台，配备多核CPU以及GPU。

7研究过程中可能遇到的困难和问题，解决的措施

1. 问题：入门编程困难。

解决措施：先通过Matlab实现三种计算方法，再利用C++实现。分网过程借助CMOSOL实现，实现对过程的简化。

1. 问题：文中的一些方案只是设想，并未的到实验验证，只是理论上的公式。

解决措施：在解决实际问题时，参考实际的情况，对于与设想有偏差的问题多查阅资料，深入探究。

8主要参考文献

[1] 龚曙光, 邱爱红, 谢桂兰. 基于有限元分析的零部件优化设计研究与应用.2002年，29（5）：23-28.

[2] 陈永当, 鲍志强, 任慧娟, 王钰鑫.基于SolidWorks Simulation 的产品设计有限元分析.2012年, 22(9):177-180.

[3] 郭志全, 徐燕申, 张学玲. 林汉基于有限元的加工中心立柱结构静、动态设计.2006年, 28(2):287-291.

[4] X. Wu, N. Shu, L. Li, H. Li, H. Peng. Finite Element Analysis of Thermal Problems in Gas-Insulated Power Apparatus with Multiple Species Transport Technique. IEEE Transactions on Magnetics. 2014, 50(2):321-324.

[5] Y. Lefevre, C. Henaux, J. F. Llibre. Magnetic Field Continuity Conditions in Finite-Element Analysis. IEEE Transactions on Magnetics. 2017, 99:1-4.

[6] Sadiku M N O. Numerical Techniques in Electromagnetics[M]//. [S.l.]: CRC Press,2000:134-232.

[7] Elsherbeni A Z, Demir V. The finite-difference time-domain method for electromagnetics with MATLAB simulations[J], 2016.

[8] Madsen N K, Ziolkowski R W. A three-dimensional modified finite volume technique for Maxwell’s equations[J]. Electromagnetics, 1990, 10(1-2):147-161.

[9] Ren D Q, Park T, Mirican B, et al. A Methodology for Performance Modeling and Simulation Validation of Parallel 3-D Finite Element Mesh Refinement with Tetrahedra[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2008, 44(6):1406-1409.

[10] Markall G, Slemmer A, Ham D, et al. Finite element assembly strategies on multi-core and many-core architectures[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2013,71(1):80-97.

[11] Flack T J, Knight R E. On the domain decomposition and transmission line modelling finite element method for time-domain induction motor analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3):1290-1293.

[12] Rischmuller V, Haas M, Kurz S, et al. 3D transient analysis of electromechanical devices using parallel BEM coupled to FEM[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2000, 36(4):1360-1363.

[13] Knight A M. Time-stepped eddy-current analysis of induction machines with transmission line modeling and domain decomposition[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(4):2030-2035.

[14] 颜威利.电气工程电磁场数值分析. 机械工业出版社,2005.

[15] 陈金玉, 杨来侠. 基于 ANSYS WORKBENCH 手机外壳有限元网格划分研究.2008年,1:58-60.

[16] 邓达人, 孟春玲, 冯敏山, 张 刚. 流体动力学网格划分技术在骨骼有限元建模中的应用.2017年, 32(5):442-447.