

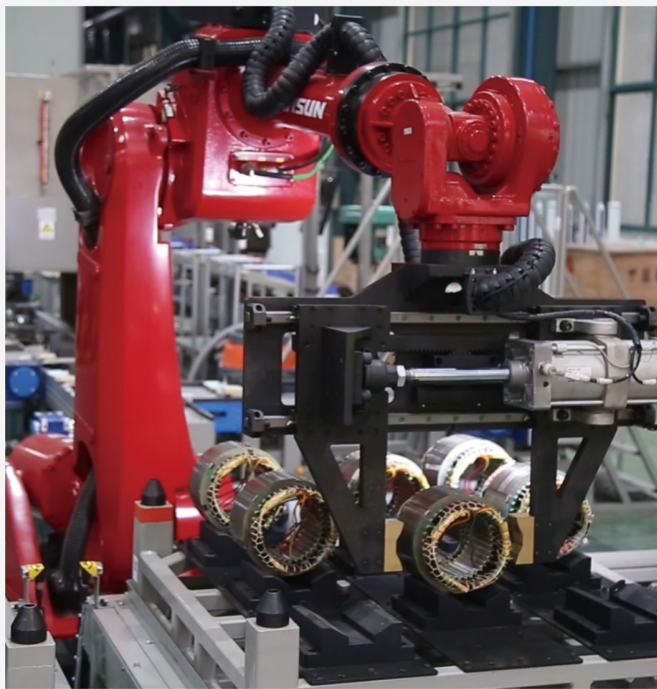
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

王鸿鹄, 周洋.
电机电磁场有限元仿真网格生成方法研究.
电机与控制应用, 2021, 48(11): 33.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

电机电磁场有限元仿真网格生成方法研究^{*}

王鸿鹄, 周 洋

(上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063)

摘 要: 为了完善上海电器科学研究院电机工业互联网云平台的电机协同设计功能, 开发了一款基于有限元法的二维电磁场仿真软件, 实现了电机电磁场的仿真计算。在软件前处理的网格生成环节, 采用了三角形网格剖分, 通过对已有网格算法的总结和研究, 提出了一种适用于电机电磁场仿真的二维网格生成方法, 具有网格剖分适应性强和计算速度快的特点。介绍的电机电磁场计算的网格剖分方法, 已应用于“电机协同设计电磁场有限元仿真软件 EMFTest V1.0”的软件开发中, 验证了网格生成方法的可行性。

关键词: 电机; 电磁场; 有限元; 网格剖分

中图分类号: TM 302 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)11-0033-06

doi: 10.12177/emca.2021.101

Research on Mesh Generation Method of Finite Element Simulation of Motor Electromagnetic Field^{*}

WANG Honghu, ZHOU Yang

(Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: In order to improve the electric machinery collaborative design function of the motor Industry Internet Cloud Platform of SEARI, a two-dimensional electromagnetic field simulation software based on finite element method is developed to realize the simulation calculation of motor electromagnetic field. In the mesh generation part of the software preprocessing, triangular meshing is adopted. Through the summary and research of existing mesh algorithms, a two-dimensional mesh design method suitable for motor electromagnetic field simulation is proposed. It has the characteristics of strong meshing adaptability and fast calculation speed. The meshing method of the motor electromagnetic field calculation introduced has been applied to the software development of “EMFTest V1.0”, which verifies its feasibility.

Key words: motor; electromagnetic field; finite element; meshing

0 引 言

电机是工业和民用设备中最常见的驱动设备, 电机包含发电机和电动机, 中国每年通过发电机提供了全国 90% 以上的发电量, 并有超过总发电量 60% 的电量被电机消耗掉。在工业领域, 电机广泛应用于发电机组、风机、水泵、压缩机和机床等设备中, 为工业设备提供电力和基础动力; 在生

活领域, 电机也被广泛应用于电梯、空调、冰箱等各种设备中, 特别是目前国家大力推广的新能源汽车, 无论其储能方式是锂电池或氢燃料电池, 其最终的驱动设备均是电机。因此对电机产品进行深入的设计和研究具有重要意义。

绝大多数电机为轴向一致结构, 可以通过二维有限元仿真对电机内的电磁场进行计算。与三维有限元仿真相比, 二维有限元仿真的一个明显

收稿日期: 2021-08-23; 收到修改稿日期: 2021-09-13

^{*} 基金项目: 上海市经济和信息化委员会工业互联网创新发展专项资金电机行业标识解析二级节点应用服务平台项目(2020-GYHLW-02006)

作者简介: 王鸿鹄(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为永磁电机、磁阻电机和异步电机关键技术研究与产品开发。

的优势是计算速度快,通常情况下,在达到相近计算精度时,三维仿真的时长一般是二维的几倍甚至十几倍,在相同的计算能力下,三维网格在仿真在计算效率上远低于二维网格,目前二维网格广泛应用于电机的工程设计中,三维网格一般用于轴向不一致电机电磁分析或对某些特定研究方向的电机电磁场仿真中。

有限元仿真应用广泛,除了电磁场领域外,在结构、流体等方面有限元仿真均有广泛应用。模型网格是有限元仿真的基础,网格的生成是一种通用的算法,其中三角形网格是适应性最好的一种,同一组三角形网格往往可以应用于电磁场、结构场、流体场等多种类型的仿真计算中。目前在三角形网格生成的算法方面已经有了很多研究成果:文献[1]提出了一种二维 Delaunay 三角网格的 Bowyer-Watson 自动生成算法;文献[2]提出一种从局部最小值点中跳出的方法,有效提高了网格的质量;文献[3]提出了一种基于三角形删除的简化算法,提高了网格简化效率。在网格孔洞修复^[4]和 Delaunay 生成网格的优化算法等方面^[5-7],很多学者也做了充分的研究。这些研究成果在各种仿真计算中有着广泛和重要的应用前景,但在电机电磁场计算网格的生成方面,很少有针对空气包网格进行优化的方法。

与结构、流体等有限元仿真计算相比,电磁场仿真有一个明显的区别,在结构、流体中的分析区域,相互分离的区域的计算是相互独立的,而在电机电磁场仿真中,具有多种材料结构件,这些结构件彼此分离,但通过磁场连接在一起,所有分离的零部件中有同一个电磁场。这就要求在电磁场仿真中,分离的零部件网格必须通过中间过度网格连接起来,过渡网格的材质为空气,磁导率为真空磁导率,为了描述方便,一般称为空气包。

相较于电机零部件建模,电机的空气包建模有2个难点:(1)空气包中含有多个模型,如果采用布尔运算进行剪裁,会将空气包剪出多个孔洞,由于模型中每个孔洞和空气包模型的参数相关联,会导致空气包数据结构复杂,稳定性不好且数据较多而不宜进行调试;(2)考虑到在瞬态场计算中,每一个时刻电机的转子部分位置均不相同,如果每个时刻均将空气包进行裁剪后再剖分,会增加计算的复杂度,增加计算时间,降低计算的稳

定性。

1 电机网格生成过程

电机零部件为实体物质,零部件对应模型不应有交叉或重叠,剖分过程一般包含初始剖分、加密剖分2个过程。

1.1 初始剖分

首先将某个实体模型转化为多边形,再分割成初始三角形的网格,三角形网格的端点均为模型多边形的顶点。如果多边形为凸多边形,则以任意一点为基点,连接基点和其他多边形端点,即可得到初始三角形网格,如图1(a)所示。如果多边形不是凸多边形,则可以通过“节点切除法”生成初始网格^[8]。在节点切除法中,首先对多边形节点逆时针编号,然后逐个切除多边形中小于 180° 的顶点来生成初始网格。在切除多边形顶点的过程中,切下的三角形应不包含多边形的其他节点,如果包含,则必然可以找到另一个节点,其角度小于 180° 且三角形中不包含其他多边形节点。这种方法适应性很强,不仅可以应用于凸多边形和非凸多边形,而且可应用于中间带孔的模型中,这种情况下首先将多边形外表面节点逆时针排序,孔洞中的节点顺时针排序,然后采用节点切除法即可生成初始网格,如图1(b)所示。

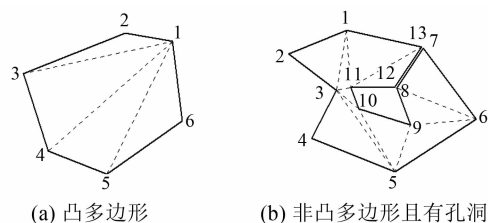


图1 初始网格

从图1中可以看出,孔洞的处理方法与非凸多边形处理方法原理相同,通过这种节点切除法可以生成任意形状的多边形的三角初始网格。因为初始剖分网格的三角形节点均为多边形的端点,所以网格尺寸较大,为了提高有限元计算结果的精度,需要对网格进行加密处理。

1.2 加密剖分

1.2.1 加密节点

对初始网格进行加密,必然要引入新的节点来作为三角形网格的节点。考虑到电机电磁场有

有限元仿真的算法要求网格较为均匀,因此正三角形网格是一种较好的三角形网格,可引如正三角形节点作为加密点。在新节点生成过程中,可以先生成一个节点的集合,集合中所有节点与相邻节点的距离均相等,如图2(a)所示。然后找到并删除不在模型中的节点,即可得到插入的加密节点。以图1(b)的多边形为例,加密节点如图2(b)所示。

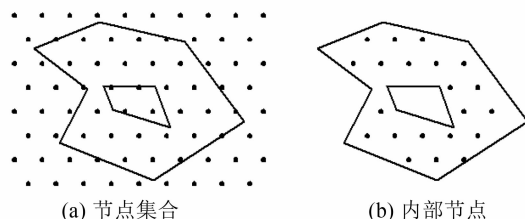


图2 加密节点

1.2.2 Delaunay 三角网格

Delaunay 三角网格^[9]是目前研究最广的一种网格,其核心原则是任何一个节点不在相邻三角形的外接圆内。在电机电磁场有限元仿真中,为了缩短剖分的时间,插入节点的方式为逐点插入式,仅要求当前插入节点不在原网格的相邻三角形的外接圆内,如不满足要求,则将相邻的三角形分解,与新插入点重新生成三角形,直至符合要求。新插入的节点可能在多个相邻三角形的外接圆内,这就需要原三角形网格的连锁分解,下面以图3(a)的初始网格为例进行说明。

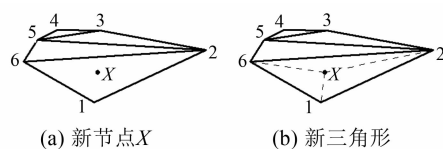


图3 插入新节点

图3中的1~6为初始剖分的三角形节点,也是多边形的端点,图3(a)中的X点为新插入节点,在 $\triangle 1-2-6$ 中,显然 $\triangle 1-2-6$ 的外接圆包含X点,分解 $\triangle 1-2-6$,形成3个新的三角形: $\triangle 1-X-6$ 、 $\triangle 1-2-X$ 、 $\triangle 2-6-X$,如图3(b)所示。此时 $\triangle 2-5-6$ 变成含节点X的 $\triangle 2-6-X$ 相邻三角形,其外接圆包含了点X如图4(a)所示,分解 $\triangle 2-5-6$ 和 $\triangle 2-6-X$,得到了新三角形 $\triangle 2-5-X$ 和 $\triangle 5-6-X$,如图4(b)所示。

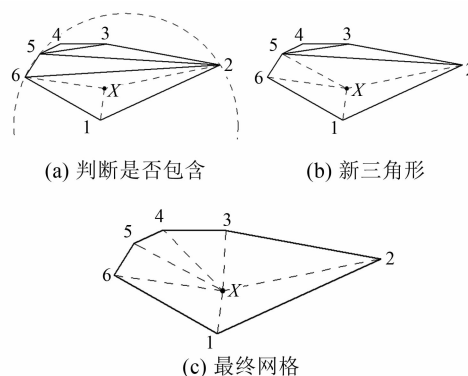


图4 分解与生成三角形

同理依次判断相邻三角形,直至相邻三角形的外接圆不包含X或无相邻三角形,最终得到新的网格剖分如图4(c)所示。这种循环迭代可采用二叉树的前序遍历^[10]来处理,软件实现的过程中,传统的二叉树结构一般采用构建二叉树结构,通过递归来实现,考虑到剖分的计算性质和系统栈的大小,可采用创建栈和人工设定遍历条件的形式,二叉树前序遍历的计算流程如图5所示。

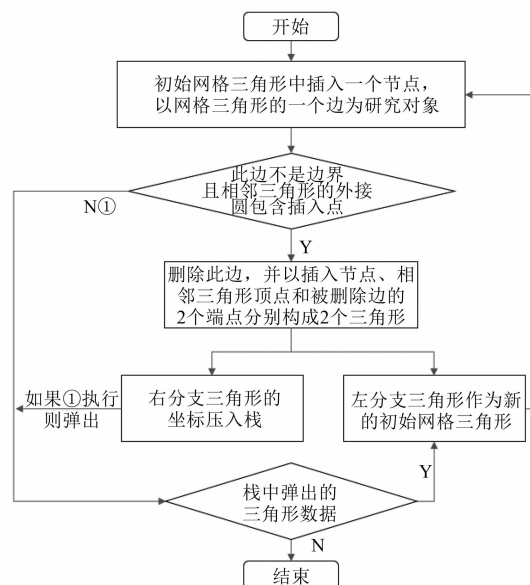


图5 二叉树前序遍历流程

1.2.3 三角形网格的优化

由于插入的三角形节点为正三角形,因此剖分后位于模型中心部分的网格为正三角形,而靠近边界或孔洞部分的三角形的三边长度相差很大,和中心部分网格过渡不均匀,不利于计算结果的精度。为了使各部分网格连贯,在加密剖分后

需要对网格进行优化。网格优化的核心是调整加密节点的位置,可采用下面2种方法进行操作。

(1) 桁架等效优化法。

桁架等效优化法方法将三角形各边等效成组合式桁架结构,其中边界部分为固定结构不能移动,而非边界的三角形的边等效成弹性结构^[11]。以图4(c)为例,图4(c)中线段1-2、2-3、3-4、4-5、5-6、6-1为固定结构,而线段1-X、2-X、3-X、4-X、5-X、6-X为弹性结构,设定弹性结构每个杆的初始长度和弹性系数,则X节点会在弹性杆的合力作用下移动,当X节点达到受力平衡,此时即完成了网格优化。这种优化算法具有思路清晰、效果显著、操作灵活的优点,但计算量稍大。

(2) 形心优化法。

因为插入的三角形节点为正三角形,绝大部分网格的形状质量优秀,所以可以通过形心优化法对节点位置进行调整^[12]。同样以图4(c)为例,找到X共节点的三角形所构成的多边形1-2-3-4-5-6的形心,然后用该形心取代X点的坐标。在生成的网格中,非边界网格节点均应通过此方法进行移动和迭代,迭代公式为

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_j \quad (1)$$

$i \neq j$

式中: N_i 为内部节点 P_i 的个数; P_j 为与节点 P_i 相连接的节点。

这种优化算法简单,计算量小,可以满足电机电磁场仿真的需求。

2 空气包剖分

从上述剖分流程可以看出,零部件是作为一个独立的实体进行剖分的,如果空气包中包含若干个电机零部件,按照上述剖分流程,需要通过布尔运算除去空气包中零部件的部分,把空气包变成一个类似零部件的实体,这样一方面会导致空气包中含有大量的孔洞,各个孔洞和空气包边界的连接处容易出现干涉,计算中容易出现异常;另一方面如果电机有旋转零部件,每次旋转均要进行一次布尔运算,增加了计算量。

为了避免空气包的布尔运算,考虑采用一种空气包直接剖分法,思路是:首先不考虑电机零部件,对空气包进行整体剖分,得到空气包的三角形

初始网格,然后对空气包网格进行加密,最后删除电机零部件对应的空气包网格,即得到了空气包中的网格。此方法可不进行空气包的布尔运算而直接对空气包进行剖分,一方面避免了出现大量孔洞引起异常,另一方面也能够减少计算量提升计算速度。采用该方法编制了软件“电机协同设计电磁场有限元仿真软件 EMFTesT V1.0”,下面结合软件建模功能进行说明。

为了便于说明问题,先采用简易模型加以说明。设定电机某个零部件和电机空气包的模型如图6所示。

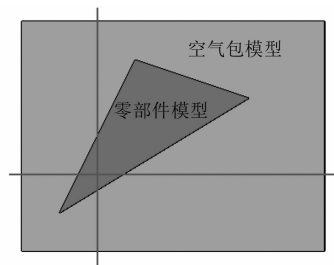


图6 简易模型

以简易模型的结构,按流程对空气包剖分,步骤如下。

(1) 生成空气包的初始网格。

在生成空气包的初始网格时,暂不考虑零部件结构。首先按照空气包网格大小将空气包的边界分段,并按照“节点切除法”生成空气包的初始网格,边界分段和初始网格如图7所示。

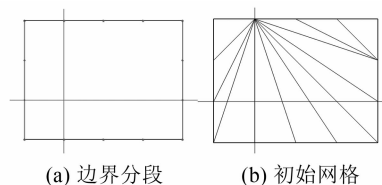


图7 空气包初始网格

“节点切除法”切除的节点顺序可按照需求选择,切除顺序对最终网格加密效果影响不大。

(2) 插入空气包网格加密节点。

在空气包内部插入加密节点,对空气包内部网格加密。插入的加密节点分为2个部分,一部分是空气包内部的零部件边界尺寸分段的节点;另一部分是插入在空气包范围内的且不在零部件范围内的正三角形节点。2部分加密节点如图8所示。

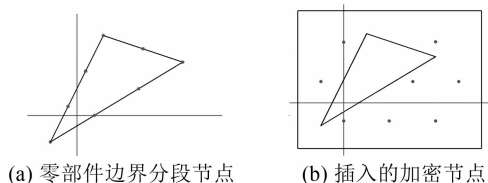


图8 插入的2部分加密节点

(3) 生成空气包加密网格。

以图8中的加密节点插入到图7(b)的空气包初始网格中,通过二叉树算法得到 Delaunay 三角网格如图9(a)所示。

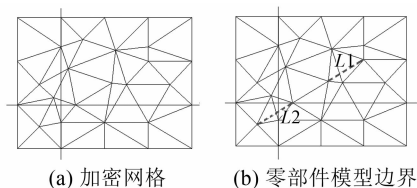


图9 有缺陷的加密网格

可以看出加密后的网格较为均匀,但会出现缺陷,体现为部分网格横跨了空气包和零部件,本例中出现的缺陷网格位置如图9(b)所示, $L1$ 和 $L2$ 线段均为零部件的边界,但这2条线段不是任何三角形网格的边,这显然与事实不符。

(4) 网格修复。

找到所有构成零部件边的分段线段,然后与加密三角形进行对比,找出所有有缺陷的网格。网格修复中,以 $L1$ 处的网格为例,首先应找到边与边界相交的三角形,然后分解相关三角形网格,形成1个包含零部件边的线段端点的新多边形 $a-b-c-d$,如图10(a)所示,最后通过生成初始网格中用到的“节点切除法”,在这个多边形中重新生成三角形网格,切除节点需要包含端部线段的节点 b 和 d ,构成 $\triangle b-d-a$ 和 $\triangle b-c-d$,如图10(b)所示。实际应用中模型结构复杂,修复的多边形包含但不限于四边形,修复方法相同。

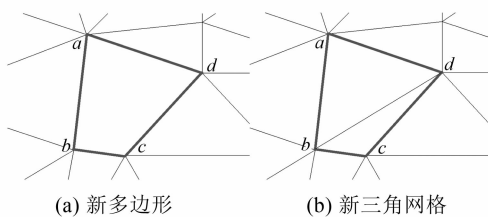


图10 修复后的加密网格

(5) 网格优化。

在加密网格修复完毕后,通过桁架等效优化法或形心优化法对网格的均匀度进行优化,本例中采用的是形心优化法,如图11所示。

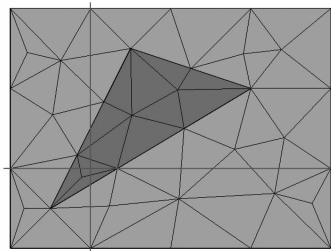


图11 修复后的加密网格

3 电机网格生成实例

为了验证本文采用的网格生成方法能够用于电机的电磁场计算,对电机进行了二维网格剖分,电机模型和多边形模型如图12所示。

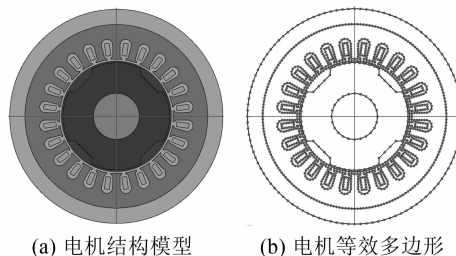


图12 电机模型

对电机进行初始剖分,结果如图13所示。

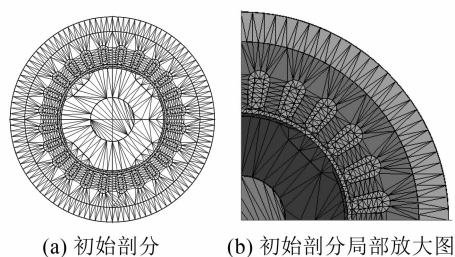


图13 初始剖分

本例模型的空气包包含2部分,一个是包含所有电机零部件的全局空气包,另一个是包含了转子部分的转子空气包。按照本文方法进行网格加密,结果如图14所示。

可以看出电机网格剖分较为均匀,网格过渡平滑,为了验证是否能够进行电磁场仿真,进行电磁场仿真验证,计算结果如图15所示。

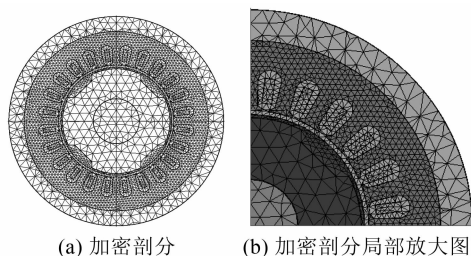


图 14 加密剖分

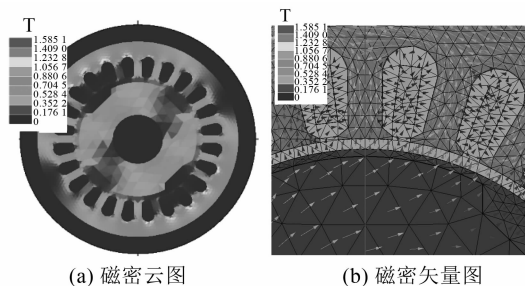


图 15 有限元仿真结果

通过有限元仿真结果可以看出,磁密分布合理,磁密矢量方向符合预期。Maxwell 为 ANSYS 旗下的电磁场仿真软件,在电机行业有较广泛的应用,EMFTest V1.0 和 Maxwell 计算结果的磁感线图对比如图 16 所示,可见相同模型下计算得到的磁通分布基本相同。

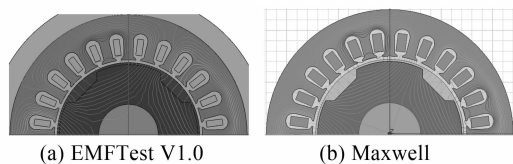


图 16 磁感线图对比

图 17 为 EMFTest V1.0 和 Maxwell 的气隙磁密计算结果对比,波形为 2 款软件的后处理输出波形,可见波形基本一致,平均值均约为 0.42 T。

从上述剖分结果和与其他软件的计算结果对比可以看出,基于本文的网格生产方法适用于电机的电磁场仿真分析。

4 结 语

本文通过对电机电磁场有限元仿真用 2D 网格的特点分析,提出了一种空气包网格直接生成的实用剖分算法,阐述了算法了流程和对空气包的处理方法,并通过计算机编程对剖分方法进行了计算验证。

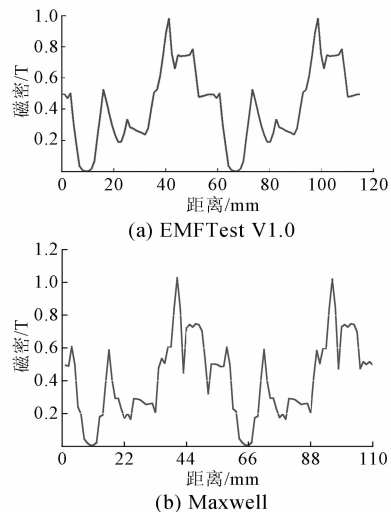


图 17 气隙磁密波形

本文提出的空气包网格生成方法,一方面避免了空气包剖分过程中出现多孔洞的结构,提升了计算的稳定性,另一方面避免了布尔运算,提升了剖分的速度,提高了电机产品的设计效率。

【参考文献】

- [1] 高晓沅. 2D-Delaunay 三角网格的数据结构与遍历[J]. 天津理工大学学报, 2006, 22(2): 66.
- [2] 陈中贵, 曹娟, 杨晨辉. 构造最优 Delaunay 三角剖分的拓扑优化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(12): 1967.
- [3] 闫涛, 姜晓峰, 王昱. 基于三角网格模型简化的研究[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(12): 69.
- [4] 吴晓婧. 三角网格孔洞修补算法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [5] 张晶飞, 李射, 崔向阳. Delaunay 三角剖分的最优化网格节点生成算法研究[J]. 电子设计工程, 2019, 27(9): 10.
- [6] 青文星, 陈伟. Delaunay 三角网生成的改进算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(S1): 226.
- [7] 李建平, 徐猛. 利用点角改进 Delaunay 三角网生长算法[J]. 地理空间信息, 2018, 16(2): 82.
- [8] 何援军. 几何计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [9] 汪嘉业, 王文平, 屠长河, 等. 计算几何及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [10] 殷建平, 徐云, 王刚, 等译. 算法导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [11] PERSSON P. Mesh generation for implicit geometries[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [12] 余红伟. 二维区域网格剖分算法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.