

基于 VBA 的 Maxwell 二次开发在无刷交流励磁机电磁计算中的应用^{*}

姚维康, 徐余法, 黄厚佳, 闫鑫洋
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘要: 针对无刷交流励磁机复杂的结构特点, 将 Maxwell 16.0 作为开发平台, 使用 Visual Basic for Application (VBA) 程序开发语言, 对该电机的建模、添加材料、施加激励、剖分以及后处理进行二次开发。对无刷交流励磁机建模中的定子绕组、磁极、转子槽、电枢绕组实现参数化, 具有一键求解、自动剖分和后处理的自动出图等功能。基于 Excel 的开发平台, 设计可视化界面, 加强人机的信息交互, 减少重复性的步骤, 提高设计人员的效率, 缩短电机的设计周期。

关键词: 无刷交流励磁机; 二次开发; 电磁计算

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)12-0082-06

Application of Maxwell Secondary Development Based on VBA in Electromagnetic Calculation of Brushless AC Exciter^{*}

YAO Weikang, XU Yufa, HUANG Houjia, YAN Xinyang

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In view of the complex structural characteristics of brushless AC exciter, Maxwell 16.0 was used as a development platform and Visual Basic for Applications (VBA) program development language was used to model, add materials, stimulate, split and post-process the motor, performing secondary development. Parametric modeling of stator windings, magnetic poles, rotor slots, and armature windings in the modeling of brushless AC exciter was realized, with the functions of one-key solving, auto-segmentation, and post-processing automatic plotting. Based on Excel's development platform, one could further design a visual interface, strengthen human-computer interaction, reduce repetitive steps, improve the efficiency of designers, and shorten the design cycle of the motor.

Key words: brushless AC exciter; secondary development; electromagnetic calculation

0 引言

无刷交流励磁机是给主发电机提供励磁电流的电枢旋转式的同步发电机。由于没有电刷和滑环, 避免了产生火花, 也减少了损耗^[1], 在大功率发电机上广泛使用。电磁计算在电机的设计中具有重要作用。传统的算法过于依赖经验, 随着数值计算的不断发展, 有限元分析在电磁计算中广泛运用。有限元分析软件主要有 ANSYS、Ansoft

Maxwell 等^[2]。无刷交流励磁机的设计是一个尺寸不断修改、参数不断变动的过程。在进行有限元分析时, 尺寸和参数的变化会带来建模的改动, 不同容量的励磁机有着不同的尺寸, 包括定转子内径、外径, 磁极和绕组的长度、宽度以及有效铁心长度等, 难以实现电机系列化的设计。为了提高无刷励磁机的设计效率和缩短设计周期, 利用 (Visual Basic for Applications, VBA) 对有限元软件 Maxwell 进行二次开发, 对变动的参数和尺寸实现

^{*} 基金项目: 上海市自然科学基金项目 (11ZR1413900); 上海发电厂核心技术重点研究项目 (T-130717001.02); 上海电机学院重点科学项目 (09XKJ01)

作者简介: 姚维康 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机设计和控制。

参数化。文献[3]利用 VB 编程,运用 AutoCAD 对电机冲片进行二次开发的研究,提出参数化方案并给出了实例。文献[4]基于 VB6.0 编程开发语言,将 SolidWorks 2012 作为开发平台,对电机的转子冲片进行三维 CAD 二次开发,实现了三维建模的参数化并总结了实现方法。文献[5]采用 ANSYS 的二次开发语言 APDL 来编写程序,对永磁同步发电机的旋转、剖分、加载和求解实现自动处理并得到发电机的绕组磁链、端电压大小及波形。文献[6]采用 APDL 语言对 ANSYS 进行二次开发,实现开关磁阻电机的自动建模和计算,并分析了不同定转子极弧角度对开关磁阻电机径向力和转矩的影响。文献[7]利用 Visual Basic 为工具,开发基于数据库管理系统的无刷交流励磁机的设计软件,并对一系列电机产品进行了验证,运用有限元软件 Maxwell 对样机进行磁场分析。文献[8]利用 Excel VBA 编写计算程序来驱动 Maxwell 计算汽轮发电机的励磁电流,实现了建模的参数化,还具有一键式建模和求解功能。

目前很少有文献研究基于 VBA 对 Maxwell 16.0 进行二次开发,并对一系列不同容量的无刷交流励磁机实现参数化建模、自动剖分和求解。利用有限元计算电磁场时花费大量时间在建模、添加材料、绕组分相、设置剖分参数等操作,且这些操作具有重复性和易误性。因此,本文通过 Maxwell 二次开发,对整个过程实现参数化,将变量用代码表示,设计可视化界面,只需输入有效参数就能输出相应结果,大大提高设计和生产效率。

1 系统开发原理

Ansoft Maxwell 是国内外应用较为广泛的电磁设计软件,在电机设计、数值计算和电磁计算领域也颇受欢迎。Maxwell 的应用程序接口很丰富,对象的嵌入和链接也十分开放,对设计开发者来说,可以建立专用的参数化系统。Maxwell 有一个特定的优化(Optimetrics)功能^[9],利用该功能,设计者可根据设备正常运行对各灵敏参数的依赖程度加以设置,保证制造过程中参数始终处于容差范围内;利用宏功能,设计者可以在仿真中,对点的位置、材料属性、激励源、边界条件、求解类型和

时间以及频率进行参数分析。

VBA 是一种自动化语言,与 VB 不同的是,VBA 必须“寄生于”其他应用程序,本文所研究的就是 VBA 基于 Excel 开发平台来编写程序的,并且有较好的兼容性。Excel 除了一些基本功能外,在开发程序时,还包括文件编辑、文件处理和格式化在内的各种功能。Maxwell 的每一步操作都能生成对应的命令流,用其自带的录用功能产生 *.vbs 脚本文件^[10],对原来的程序使用 VBA 进行编辑和修改。为了达到参数化,将所有的定量参数都换成命令代码^[11],使其具有通用性。

1.1 系统开发流程设计

Maxwell 二次开发系统流程如图 1 所示。

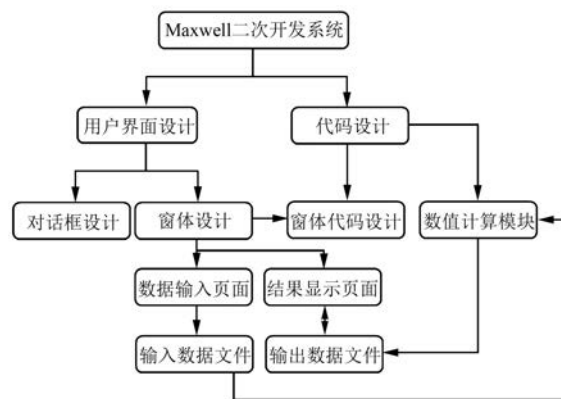


图 1 Maxwell 二次开发系统流程图

2 程序设计

利用 VBA 对 Maxwell 进行二次开发,最重要的就是编写程序。通过正确完整地代码的写入^[12],即可实现对无刷交流励磁机的建模、添加材料、施加激励、建立边界条件和剖分。

2.1 定、转子圆环的程序设计

确定一个圆的图形需要圆心的坐标和圆的半径。首先定义圆心 O 、外圆半径 R_1 和内圆半径 R_2 ,通过下面的代码即可绘制圆,如图 2 所示。

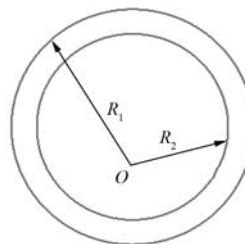


图 2 圆形图绘制

```
oEditor.CreateCircleArray("NAME:Circle
Parameters", "IsCovered:=", True,
"XCenter:=", "0mm", "YCenter:=", "0mm",
"ZCenter:=", "0mm", "Radius:=", "R1",
"WhichAxis:=", "Z", "NumSegments:=", "0")
```

通过下面的代码(布尔减法操作),用外圆减掉内圆得到圆环,如图3所示。

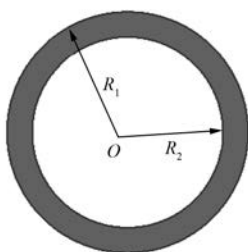


图3 圆环图绘制

```
oEditor.Subtract Array("NAME:Selections",
"BlankParts:=", "Circle1", "Tool Parts:=",
"Circle1_1"),
Array("NAME:SubtractParameters",
"KeepOriginals:=", False)
```

2.2 磁极的程序设计

先确定极面4个点1~4的坐标,再利用软件的镜像功能复制另一边的极面,然后画两段圆弧闭合极身头尾两端,圆弧的绘制需要知道圆弧的半径和圆心,最后利用 Duplicate Around Axis 得到完整的6个磁极。半边磁极图如图4所示。定子铁心图如图5所示。

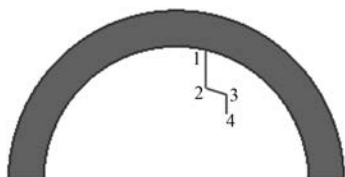


图4 半边磁极图

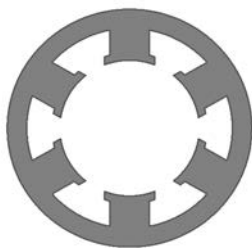


图5 定子铁心图

输入坐标绘制线段程序:

```
oEditor.CreatePolylineArray("NAME:Polyline
Parameters", "IsPolylineCovered:=", True,
"IsPolyline Closed:=", False,
Array("NAME:PolylinePoints",
Array("NAME:PLPoint", "X:=", "Xpoint1",
"Y:=", "Ypoint1", "Z:=", "0mm"),
Array("NAME:PLPoint", "X:=", "Xpoint2",
"Y:=", "Ypoint2", "Z:=", "0mm"),
Array("NAME:PLPoint", "X:=", "Xpoint3",
"Y:=", "Ypoint3", "Z:=", "0mm"),
Array("NAME:PLPoint", "X:=", "Xpoint4",
"Y:=", "Ypoint4", "Z:=", "0mm")))
```

镜像操作程序

```
oEditor.DuplicateMirror Array("NAME:
Selections", "Selections:=", "Polyline8",
"NewPartsModelFlag:=", "Model"),
Array("NAME:DuplicateToMirrorParameters",
"DuplicateMirrorBaseX:=", "0mm",
"DuplicateMirrorBaseY:=", "0mm",
"DuplicateMirrorBaseZ:=", "0mm",
"DuplicateMirrorNormalX:=", "-1mm",
"DuplicateMirrorNormalY:=", "0mm",
"DuplicateMirrorNormalZ:=", "0mm"),
Array("NAME:Options",
"DuplicateAssignments:=", False)
```

沿轴复制程序

```
oEditor.DuplicateAroundAxis Array("NAME:
Selections", "Selections:=", "Polyline10",
"NewPartsModelFlag:=", "Model"),
Array("NAME:DuplicateAroundAxisParameters",
"CreateNewObjects:=", True, "Which
Axis:=", "Z", "AngleStr:=", "60deg", "Num
Clones:=", "6"),
Array("NAME:Options",
"DuplicateAssignments:=", False)
```

2.3 转子槽的程序设计

本文所设计的无刷交流励磁机的转子槽为平底型槽,共54个。通过5~8这4个点来绘制槽的一边,再通过镜像得到一个完整转子槽,利用Maxwell的 Duplicate Around Axis 功能复制得到54个槽,主要运用到 oEditor.CreatePolyline Array、

oEditor. Duplicate Array 和 oEditor. DuplicateAroundAxis Array 3 大函数。转子槽绘制图如图 6 所示。



图 6 转子槽绘制图

2.4 绕组的程序设计

电机的实际绕组在 Maxwell 软件中就是一个矩形导体块。在程序设计时只需要定义起始点 a 的坐标。矩形块的长 d_x 和宽 d_y , 就能绘制出绕组图, 如图 7 所示。

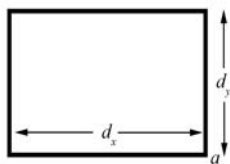


图 7 绕组绘制图

程序如下:

```
oEditor.CreateRectangleArray("NAME:Rectangle  
Parameters", "IsCovered:", False,  
"XStart:=", "Xa" & "mm",  
"YStart:=", "Ya" & "mm",  
"ZStart:=", "0mm", "Width:=", dx & "mm",  
"Height:=", dy & "mm", "WhichAxis:=", "Z")
```

2.5 界面的参数化设计

界面的设计基于 Excel 的开发环境, 建立 Excel VBA 工程, 工程包含创建好的对象、窗体和模块。在 Excel 中编写程序, 通过 Cells 函数^[13]来读取表格内的模型参数, 点击“一键建模”就会驱动 Maxwell 软件完成建模。在 Excel 中建立定子和转子模型参数输入表格, 如表 1、表 2 所示。各个参数对应实际模型的尺寸如图 8、图 9 所示。

模型的参数输入后, 需要对电机进行有限元计算, 包括磁密计算、磁力线计算和剖分等。磁场的参数设置通过创建窗体来实现, 包含添加材料、设置边界条件和运动、剖分参数、求解时间设定。窗体的设计如图 10 所示。

表 1 定子模型参数

参数名称	参数单位
定子轭外径 R_1	mm
定子轭内径 R_2	mm
定子磁极数 N_{poles}	
磁极柄高 h_{p1s}	mm
磁极面高 h_{p0s}	mm
磁极柄宽 b_{p1s}	mm
磁极面宽 b_{p0s}	mm
极面圆弧圆心偏心量 Δh_{p0}	mm
气隙长度 Δ	mm
励磁绕组宽 b_{fls}	mm
励磁绕组高 h_{fls}	mm
励磁绕组对数 N_{wfs}	

表 2 转子模型参数

参数名称	参数单位
转子外径 R_3	mm
转子内径 R_4	mm
转子槽数 N_{slots}	
转子槽高 h_{p1r}	mm
槽口高 h_{p0r}	mm
槽口宽 b_{p0r}	mm
槽楔宽 b_{p1r}	mm
电枢绕组层数 N_{coils}	
电枢绕组宽 b_{clr}	mm
电枢绕组高 h_{clr}	mm
下层绕组底与转子槽底距离 h_0	mm
上下层绕组间距 h_1	mm

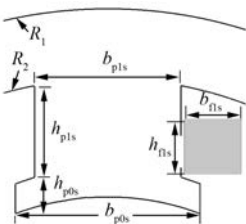


图 8 定子模型尺寸图

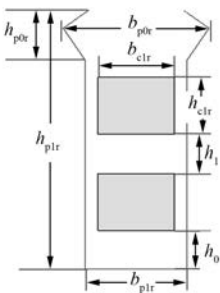


图 9 转子模型尺寸图

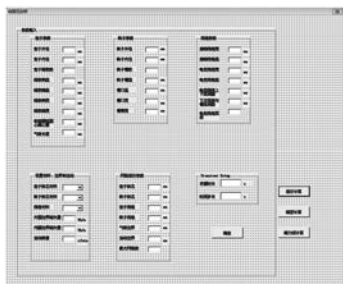


图 10 有限元分析窗体设计图

3 电磁场分析实例

本文对 1 台 $P_N = 28 \text{ kW}$, $p = 6$, $U_N = 100 \text{ V}$, $f_N = 180 \text{ Hz}$, 转子槽数为 54 的无刷交流励磁机空载时进行 2D 的电磁场分析。将电机的尺寸参数输入相应的表格中, 按下“一键建模”, 就能得到电机的仿真模型, 如图 11 所示。



图 11 28 kW 无刷交流励磁机物理模型

同理, 输入求解参数, 点击确定后就会自动运行驱动程序, 驱动 Maxwell 工作。然后点击“剖分计算”“磁密计算”“磁力线计算”就会得到相应的结果, 如图 12、图 13 和图 14 所示。驱动程序如下。



图 12 剖分计算图

```
Sub test()  
Dim oAnsoftApp  
Dim oDesktop
```



图 13 磁密计算图

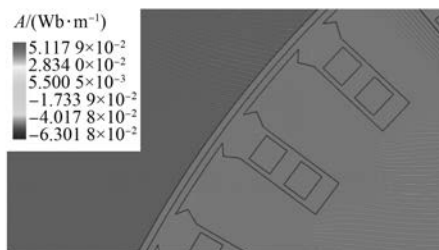


图 14 磁力线计算图

```
Dim oProject  
Dim oDesign  
Dim oEditor  
Dim oModule  
SetoAnsoftApp = CreateObject("AnsoftMaxwell.  
MaxwellScriptInterface")  
SetoDesktop = oAnsoftApp.GetAppDesktop()  
oDesktop.RestoreWindow  
SetoProject = oDesktop.NewProject  
oProject.InsertDesign "Maxwell2D",  
"Maxwell2DDesign1", "Magnetostatic", ""  
SetoDesign = oProject.SetActiveDesign  
("Maxwell2DDesign1")  
SetoEditor = oDesign.  
SetActiveEditor("3DModeler")  
End sub
```

4 结 语

通过引入参数化建模, 基于 VBA 对 Maxwell 进行二次开发, 实现了专业软件的通用化, 非电机设计专业人员也可通过此系统进行电机的建模和电磁场的分析, 降低了专业有限元软件的使用门槛, 进而提高了电机设计的质量和效率。从系统运行结果来看可以得到以下结论。

(1) 对 Ansoft Maxwell 二次开发和参数化建模, 减少了整个电机设计的周期, 同时降低了错误

率。应用 VBA 语言编写程序,对于不同电机的建模和分析,只需修改电机尺寸参数和求解参数,即可实现一键建模和自动计算的功能。

(2) 本文对电机的剖分和磁场进行了一键式分析,对电机设计和优化有一定的帮助。基于此分析,后面的任务亦可对空载端电压、空载特性曲线和额定负载工况进行研究分析,也可编写程序设计界面实现参数化绘图的功能。此外,可以基于 Excel VBA 对其他专业领域的软件进行二次开发,软件和编程的基本思想可以借鉴,具有继承性和共享性。

【参考文献】

- [1] 薛守栋.无刷励磁机的优化设计计算研究[D].济南:山东大学,2006.
- [2] 甄文欢.电励磁无刷同步电机的设计与有限元分析[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [3] 杨亚,蒋丽萍,王健.基于 VB 的电机冲片 CAD 图形的二次开发[J].微特电机,2011,39(11): 30-33.
- [4] 赵永正,严世洪,黄成勇.基于 VB 的 SolidWorks 二次开发在电机结构设计中的运用[J].大电机技术,2014(7): 265-267.
- [5] 王丽华.基于 ANSYS 二次开发的永磁同步发电机电磁场分析[J].电气技术,2008(8): 40-42.
- [6] 沈磊,吴建华.基于 ANSYS 的开关磁阻电动机径向力计算及二次开发[J].微电机,2007,40(9): 23-25.
- [7] 何东霞,黄守道,高剑.无刷交流励磁机电磁设计软件开发及有限元分析[J].微特电机,2006,34(2): 8-10.
- [8] 罗玉东,徐余法,陈亚新,等.基于 Excel VBA 驱动 Maxwell 的汽轮发电机励磁电流计算[J].电机与控制应用,2016,43(11): 61-66.
- [9] 刘慧娟,上官明珠,张颖超,等.Ansoft Maxwell 13 电机电磁场实例分析[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [10] 温嘉斌,李玉平.基于 VB 与 Ansoft 混合编程的开关磁阻电机设计与仿真[J].防爆电机,2014,49(1): 25-28.
- [11] 李进才.基于 Ansoft 与 Workbench 协同仿真的 1 200 MW 级发电机负序能力分析[D].上海:上海电机学院,2015.
- [12] HUO FY, LI W L, WANG L K, et al. Numerical calculation and analysis of three-dimensional transient electromagnetic field in the end region of large water-hydrogen cooled turbogenerator[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 188-195.
- [13] WANG L, HUO F, LI W, et al. Influence of metal screen materials on 3-D electromagnetic field and eddy current loss in the end region of turbogenerator[J].IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(2): 939-945.

收稿日期: 2018-08-27

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发刊,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。