

南京理工大学泰州科技学院

毕业设计说明书(论文)

作者: 张兰红 学号: 1901050147

学院(系): 电子电气工程学院

专业: 电气工程及其自动化

题目: 无刷直流电机的电磁特性研究

指导者: 余剑 讲师

评阅者: 孙正风 讲师

2023 年 5 月

毕业设计说明书（论文）中文摘要

无刷直流电动机是一种集电子技术和控制理论为一体的机电一体化电机。这种电机是在原有电机的基础上，以霍尔元件等一类的位置传感器来替代整流片和电刷片，并以电子方式替代机械方式进行整流的，这种电机称为无刷 DC 电机。由于普通的直流电动机采用了电刷来实现机械换相，因此会产生电磁干扰、噪音大、电刷的损失也会导致电动机的可靠性较低等缺陷；为解决上述问题，研制出一种新型的无刷式直流电机。

本文从电机本体出发，从电机的工作机理出发，建立了电机的数学模型。在模拟计算过程中，着重考虑了绕组电流、换向交错角和电磁效率等因素的影响。

关键词： PMSBDC 电机，开关角度，交迭角度. 在本次毕业设计中，本文重点阐述了在研究无刷直流电动机的电磁特性时应注意的问题，并简单说明了利用有限元方法进行电磁特性分析的意义

关键词 无刷直流电机 电磁特性 Maxwell

毕业设计说明书（论文）外文摘要

Title	Research on Electromagnetic Characteristics of Brushless DC Motor
--------------	--

Abstract

Brushless DC motor is a kind of mechatronics motor integrating electronic technology and control theory. This kind of motor is based on the original motor, with a position sensor such as Hall element to replace the rectifier and brush, and electronically replace the mechanical rectification, this motor is called brushless DC motor. Since ordinary DC motors use brushes to achieve mechanical commutation, electromagnetic interference, noise, and loss of brushes will also lead to defects such as low reliability of the motor; In order to solve the above problems, a new type of brushless DC motor was developed.

Starting from the motor body and the working mechanism of the motor, this paper establishes the mathematical model of the motor. In the simulation calculation, the influence of winding current, commutation intersection angle and electromagnetic efficiency is considered. Keywords: PMSBDC motor, switching angle, overlapping angle. In this graduation project, this paper focuses on the problems that should be paid attention to when studying the electromagnetic characteristics of brushless DC motors, and briefly explains the significance of using the finite element method for electromagnetic characteristic analysis

Keywords Brushless DC Motor Electromagnetic Characteristics

Maxwell

目 录

1 绪论 1

1.1 论文的背景及意义 1

1.2 国内外发展现状 1

1.3 本文主要研究内容 2

2 无刷电机的基本结构与工作特性 4

2.1 无刷直流电机的基本结构 4

2.2 无刷直流电机的工作原理 4

2.3 无刷直流电机的工作特性分析 4

3 无刷直流电机仿真模型设计 6

3.1 有限元法的原理 6

3.2 无刷直流电机的有限元建模仿真 6

4 无刷直流电机的电磁特性仿真分析 13

4.1 电机的静态分析 14

4.2 电机的瞬态分析 18

4.3 电机性能参数分析 20

4.4 齿槽转矩 22

5 总结与展望 22

5.1 课题总结 22

5.2 展望 22

结束语 23

致 谢 24

参 考 文 献 25

1 绪论

1.1 论文的背景及意义

由于直流有刷电机机械换相所造成的缺陷，因此，为了解决这些缺陷，所以用电子换相代替了机械换相的一种同步电机，被叫做直流无刷电机；它是机电集成产品。与有刷直流电机相比，无刷直流电机属于相对的类型。无刷直流电机采用由位置传感器、逆变器及其驱动和控制电路所组成的设备，取电刷和换向器，因此，它的设计思路主要来自于普通的永磁有刷直流电机^[1]。

无刷直流电机的研究正蓬勃发展。是什么原因导致了 BLDC 的增长速度如此之快？可以从以下几个方面来看：首先，电机本身的性质，是随着半导体电子技术发展而出现的一种电机，是与现代电子技术相结合的产物。在很多方面都有很好的应用。第二个是推广国际上 IE3 能源效率水平，也就是 IE3 能源效率水平是当前世界上最好的。第三，它得到了政府的高度关注，研发出了一种新的高性能的 BLDC 电动机。第四，由于生产成本的降低，生产成本的提高，导致生产成本的逐步降低。

在 1970 之后，随着电力电子技术的快速发展，这使得无刷直流电机的驱动控制电路的稳定性和可靠性得到了极大的提升，而在这个时候，所采用的电力电子器件大多为晶闸管^[2]。由于多种电机的发展，加上对电机机理和制造技术的深入研究，无刷直流电机的前景逐渐看好。陆续出现了钕铁硼、铁氧体等多种磁能密度高矫顽力永磁、磁能密度材料，这些都使得直流无刷电动机能不再受到电励磁的约束，因此，各种高性能的直流无刷电动机能被大量地用于我们的生活之中^[3,4]。

该新型 PMSC 除了拥有高的转速和高的机械性能之外，还拥有以下优点：(1) 由于没有激磁损耗，利用永磁铁来形成气隙磁场，因此，该电机的作效率更高。(2) 具有尺寸小巧、构造简便、高效等优点。(3) 因为该电动机是采用电子整流的，因此没有电刷，因此维护成本大为降低^[5-6]。由于其具有上述优势，所以其被广泛地研究和应用。本文重点介绍了 BLDC 电动机的电磁性能。

1.2 国内外发展现状

由于有刷直流电机具有良好的转矩控制性能，从诞生之日起，它就开始在工业和农业中得到了广泛的应用，并一直占据着运动控制的主要地位。然而，目前的电流马达存在着机械换相问题，这使得其在许多应用场合都受到了影响。长期以来，人们一

直在寻找替代有刷直流电动机机械式换相设备的方法。据资料显示，从 2019 年开始，直流无刷电机占据了绝对的优势，市场规模达到了 163 亿美金左右，并且在未来将会持续增长。预计到 2027 年，无刷直流电动机的市场将会翻番。

1.2.1 国外发展现状

从市场走势上来说，亚洲因日本为首而快速发展。日本与中国是目前亚洲最大的无刷电动机制造大国，其中日本因其在技术上的优势，已在世界许多区域与国家设立了工厂，制造了大量的高档无刷电动机。至于欧洲，因为发展的时间比较长，像德国和瑞士这样的欧洲很多国家都拥有比较重要的技术，所以当世界对无刷电动机的要求越来越高的时候，欧洲的份额还会继续增长，甚至是稳步增长。德国，瑞典等几家著名企业，在这方面也有很高的造诣，在国际上处于领先地位。

亚洲是最大的，占到了 46.94%，紧随其后的是美国，占到了 21.08%。

1.2.2 国内发展现状

在国内，BLDC 技术刚刚起步，但是由于其技术的不断成熟和不断的改进，BLDC 技术已经取得了长足的进步。二十世纪七十年代初，国内开展了对直流无刷电动机的研究，国内多为各大高校、研究机构。但受其自身零部件生产技术的制约，国内在 BLDC 电动机方面还算不上是技术大国。在国内，无刷 DC 电动机已经应用于航空航天，家电，电动汽车；等多个领域都有了广泛的应用，并在许多地区已经形成了初步的产业链。同时，由于中国已经是世界上最大的永磁材料和无刷电动机的主要生产国，因此，在未来几年内，中国也将会是最大的无刷电动机制造商。并在科技方面持续推动产业的发展。

中国 BLDC 电动机产业发展面临着产业结构不合理，产业集中，产业结构不合理等问题。与发达国家相比，技术密集的生产具有很大差距。工业能耗高，环境污染大。总体规模偏小，技术创新能力较弱，等等。

1.3 本文主要研究内容

本论文的重点是对无刷直流电机的基本工作原理和结构进行了学习和研究，与此同时，还对电机的电磁特性进行了研究，并利用软件 Ansoft Maxwell 进行了仿真，最终对电机模型的分析^[7]。

- (1) 研究 BLDC 的电磁场特征及 BLDC 电动机的工作机理。
- (2) 用 Ansoft Maxwell 软件进行电动机模拟建模
- (3) 对电动机进行稳定运行的研究

(4) 对电动机进行暂态特性的研究

2 无刷直流电机的基本结构与工作特性

这一章节的重点是对刷直流电机的基本结构、工作原理和工作特性进行了阐述，同时对电机各个场之间的关系进行了阐述，为后续的电机仿真模型和电磁特性曲线分析奠定了基础。

2.1 无刷直流电机的基本结构

本文介绍了一种新型的无刷式直流电动机，并对其进行了实验研究。

电机主体在构造上与 PMSM 相似，是其可以进行机电能量转化的关键所在，其设计对整体系统起着关键的影响。采用了一种新型的定位系统，用于取代传统的机械式换向装置，该装置将检测到的定位信息通过一个逻辑装置进行处理，生成一个切换信号。该驱动和控制电路中的电源切换元件依次启动，将电力从 DC 端转化为机械能，从而保证了稳定的工作^[8]。

2.2 无刷直流电机的工作原理

无刷直流电动机的电子换相是利用一种半导体开关装置来完成的，简单来说，就是用一种电子开关装置来取代接触型整流器和电刷。其特点是稳定性好、噪声小。

与 BDC（BDC）电机相似，BDC（BDC）也有其特有的反电势波形。根据洛伦兹力原理，将带电的导线放入一个电场中，将产生一个作用力。由于这种反作用，这些磁体会承受相同和相反的力量。在 BLDC 电动机中，当永磁铁处于移动状态时，负载导线处于固定状态。当定子线绕被供电后，就会变为一个电磁铁，从而在空气间隙内形成一个均质磁场。尽管供电为 DC，该切换器会形成阶梯状的 AC 电压。在磁场作用下，电机在永磁体和磁体的共同作用下，不断地转动。当线圈切换到高，低信号时，对应线圈为北极，南极加载电流。由于该转子的北极、南极都与定子的磁极对齐，使得该转子产生自旋效应。

2.3 无刷直流电机的工作特性分析

2.3.1 启动特性

启动时，由于反电动势是零，所以电枢电流为：

$$I = \frac{U_d - 2\Delta U}{2R} \quad (2.1)$$

2.3.2 机械特性

这个特性代表了无数直流电机在拥有常量直流 U 时，电机 n 与电磁 T 间的一种关系，电机的机械特性方程式

$$n = \frac{15}{Bl \pi R' W_{\phi}} (U - RI - L \frac{dI}{dt}) \quad (2.2)$$

整理得：

$$n = \frac{30}{\pi} \frac{K_T U_d - 2RT_e}{k_e K_T} \quad (2.3)$$

其中， K_T 为电机的转矩系数； K_e 为电机的感应电动势系数； U_d 为线电压。

3 无刷直流电机仿真模型设计

目前常用的无刷式 DC 电动机的结构分析方法主要是采用磁场分析和有限单元分析两种方法。由于该方法具有直观形象的特点，在这类电动机的设计中常采用。其主要特征是精确地进行数值模拟。这一章将以无刷直流电机的基本性能为依据，对有限元法进行理解，并利用仿真软件 Maxwell 在 2 D 平面上建立电机的仿真模型，为电磁特性仿真分析提供模板。

3.1 有限元法的原理及其相关分析软件

3.1.1 有限元法的基本原理

在有限元方法中，将一个连续的区域离散为若干个网格组成的集合，通过对网格内各个网格内的逼近函数进行分段，得到网格内的边界条件，并用网格内的积分内插函数来表达边界条件下的边界条件。最终，将一类无穷自由度的连续问题转化为一类有限自由度的离散问题^[9]。

3.2 无刷直流电机的有限元建模仿真

3.2.1 电机与相关电路基础参数设置

表 3.1 电机基础参数

参数名称	参数值
机器类型	无刷永磁直流电机
级数	4
转子位置	内齿轮转子
摩擦系数	12W
风阻损耗	0W
参考转速	1500rpm
控制类型	直流电
电路类型	星形

表 3.2 电路主要参数

参数名称	参数值
触发器超前角	0deg
触发脉冲宽度	120deg
晶体管压降	2V
二极管压降	2V

3.2.2 主要尺寸计算

电机的基本尺寸的公式如下：

$$\frac{D_a^2 l_a n_N}{P'} = \frac{6.1 \times 10^8}{a_i A B_\delta k_w k_\phi} \tag{3.1}$$

功率 P'可由下式确定：

$$P' = \left(\frac{1 + 2\eta}{3\eta}\right) P_N \tag{3.2}$$

3.2.3 气隙长度、相数、极数以及槽数的选择

通常，在电动机中，气隙的大小是电动机在定、转子间气隙的大小，它是电动机的主要磁通，因而对电动机的磁性有很大的影响。由于气隙过大，激励电流增加，降低了系统的功率因子。如果空气间隙太小，则会产生摩擦效应。电动机的空气间隙通常为 0.2-2.0 毫米。该尺寸为 0.6 毫米。

线圈的相位数目为二相位、三相位等。从控制系统的观点来看，多出一相不仅会提高系统的运行费用，还会使系统的可靠性下降。在实际生产中，对电枢线圈的相数可作多种选择。该方案选用了三相线圈。

在特定的条件下，增大极对数，可以减小定子的磁通量，减小定子的轭架及底座，从而更好地实现换流。这个方案选择了 4 个等级。

马达定子上的槽数就是槽号。在此项设计中，使用了 24 条沟槽。

3.2.4 定子结构及参数设置

(1)所述的定子磁芯：

电机中固定的那一段叫做定子，它一般包括定子铁芯、电枢绕组和电机底座。由于定子在转动时会产生一定的自旋场，因此通常采用叠层的硅钢结构来降低电机的磁滞损失和涡流。

利用 仿真软件建立了定子模型，并进行了详细的参数设定。

表 3.3 定子基础参数

参数名称	参数值
定子外径	120mm
定子内径	75mm
定子长度	65mm
定子冲片堆叠系数	0.95
定子冲片钢材料类型	M19_24G
定子槽数	24
定子槽类型（2 号槽型代表梨型槽）	2
齿开缝高度（Hs0）	0.5mm
斜槽高度（Hs1）	1mm
槽体深度（Hs2	8.2mm
齿开缝宽带（Bs0）	2.5mm
槽楔最大宽度（Bs1）	5.6mm
槽体底部宽度（Bs2）	7.6mm

得到的电机的定子模板如图 3.1（a）和图 3.1（b）所示。在上表中，为了能够减小高次谐波的影响，我们设置的定子槽数为 24。

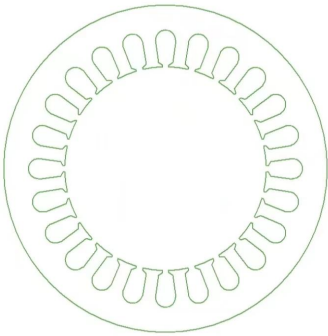
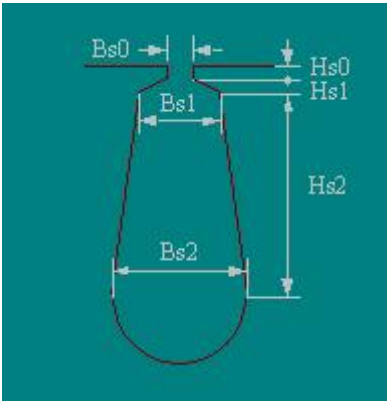


图 3.1 （a）电机定子



（b）定子槽形尺寸参数

（2）定子绕组：

在电动机中，定子绕组是一个关键部件。该电机是利用剪切场来实现电磁力，进而实现电磁力的输出。

参数如表3.4所示。

表 3.4 定子绕组基础参数

参数名称	参数值
缠绕层数（双层）	2
绕组缠绕类型	全线圈
平行分支（并联路数）	1
每槽导线数	50
线圈节距	5
匝数	1
绕线	0
线圈尺寸	0mm

这一次的设计采用了两级整圈线圈。这些参数与定子的设定是互相对应的，在安装完成后，我们得到的定子绕组模型具体如下：

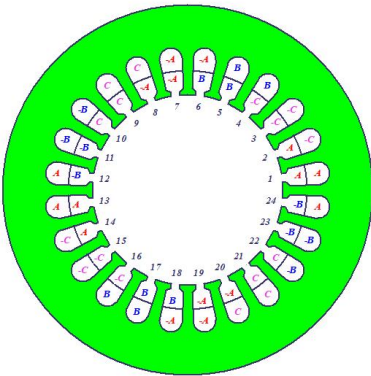


图 3.2 定子绕组示意图

3.2.5 转子结构及参数设置

电机可以在电机中形成主要的磁铁，永磁体，以及支持元件等。马达的转子可以分为两类，一类是内转子，另一类是外转子。第一种方法是利用电动机的中心铁心作

为旋转主体，来实现对电动机的力矩和电能的输入。第二种方法，就是将电动机的外壳当成旋转主体，这种方法可以在任何情况下使用^[10]。

该转子由一个 FEM 软件产生，其参数与表 3.5 中的图解以及 3.3 中的（b）相对应

表 3.5 转子基础参数

参数名称	参数值
转子外径	74mm
转子内径	26mm
转子长度	65mm
转子钢材料类型	M19_24G
转子堆叠系数	0.95
转子类型（1 号型为外凸型）	1
极弧尺寸	0.65
极偏移量	0mm
极硅钢片材料类型	XG196/96
磁体厚度	3.5mm

设置后，可以得到电机转子部分的2D模板图如图3.1（a）所示。

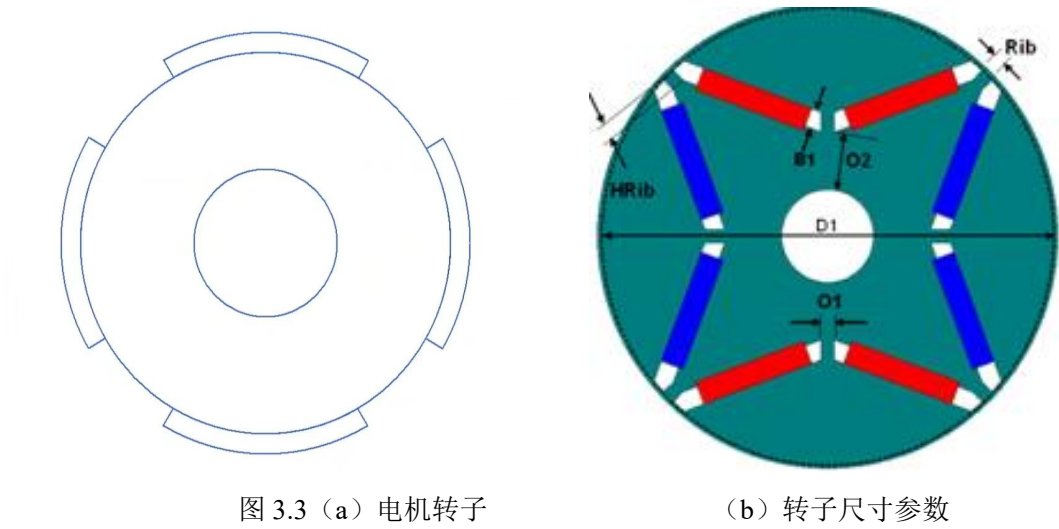


图 3.3（a）电机转子

（b）转子尺寸参数

此时基本就完成了电机的二维平面设计如图 3.4 所示。

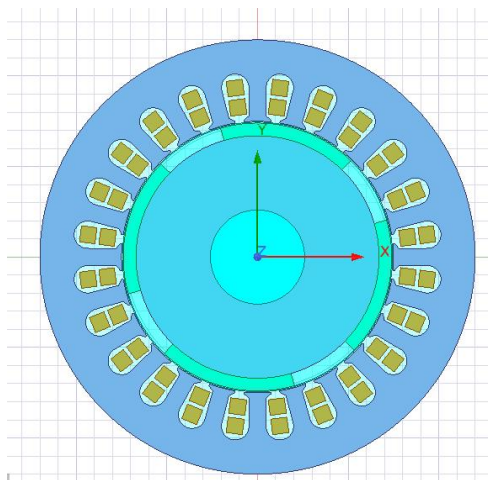


图 3.4 电机基本模型

3.2.6 边界条件设置

在使用有限元方法来解决电机磁场问题的时候，要尽可能地减小计算的区域，在计算过程中，要设置矢量磁位边界条件、气球边界条件、主从边界边界条件等。

在此基础上，将定子的外直径和转子的内直径分别设定为两个分界面，见图 3.5。

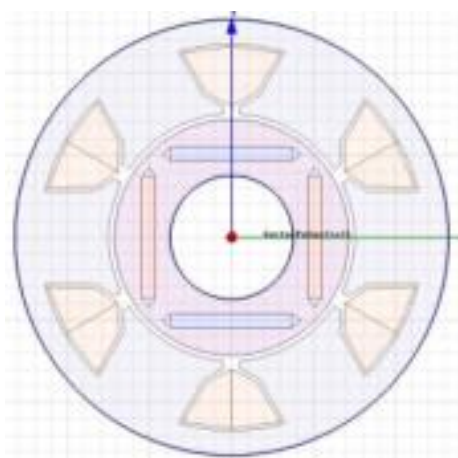


图3.5 边界条件设置

3.2.7 外电路设置

使用Maxwell，设定电动机线圈及二极管的电压源及它们的值，使得回路双相导电，两个相位之间的导电 T 为 120° ；各 T 具有 6 种状态^[11]，其中，在图 3.6 中，显示了一个永磁无刷 DC 电动机的控制电路。

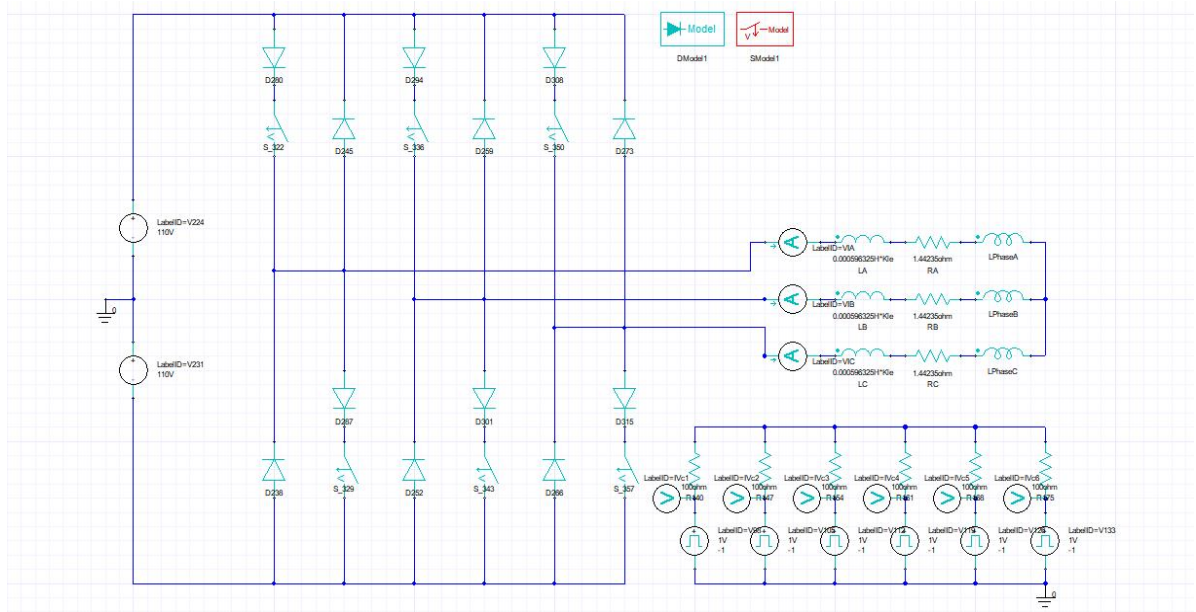


图3.6 永磁无刷直流电机控制电路图

4 无刷直流电机的电磁特性仿真分析

本章重点介绍了运用 FEM 软件，对电动机在各种工况下的特性进行了研究

4.1 电机的静态分析

在这种情况下,电压源与电流源均为恒定的情况下,电场与磁场彼此不受影响,称为静力场。这一设计使用了静磁场模拟分析来验证无刷直流电动机的设计与需要的匹配度,其静态模拟的结果在图 4.1 和 4.2 中显示出来

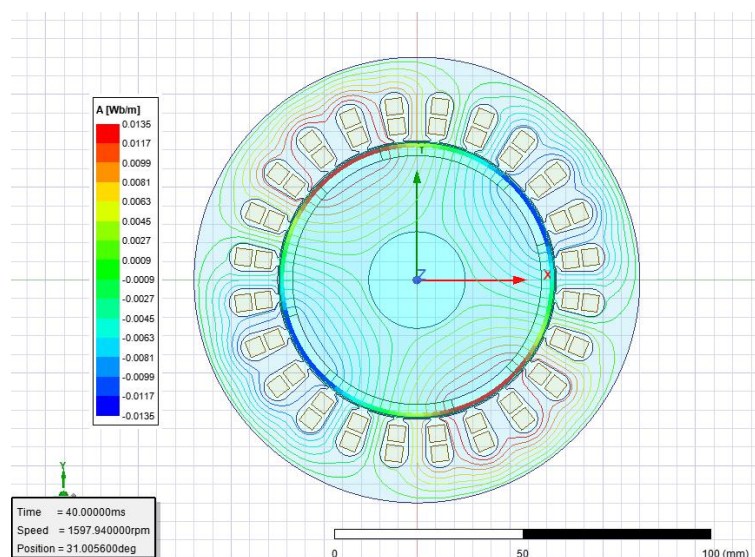


图4.1 无刷直流电机的磁力线分布

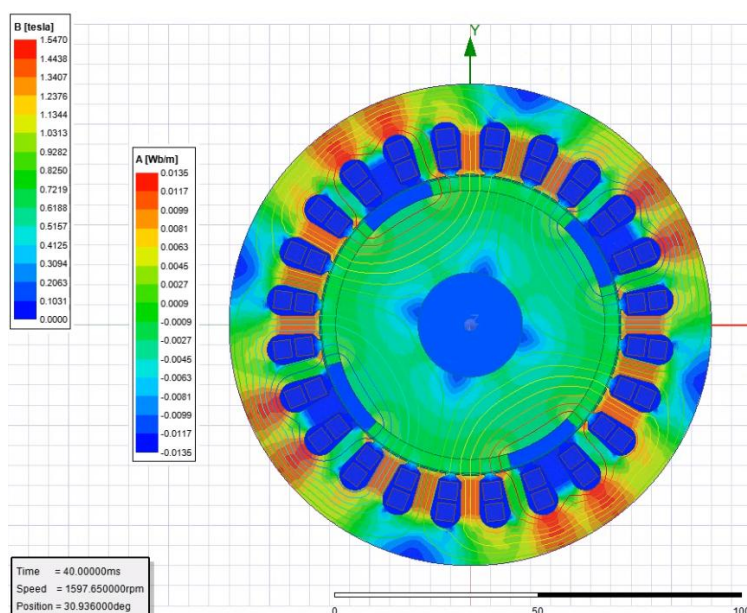


图4.2 无刷直流电机的磁通密度云图分布

磁通密度波形曲线的结果如图4.3所示。

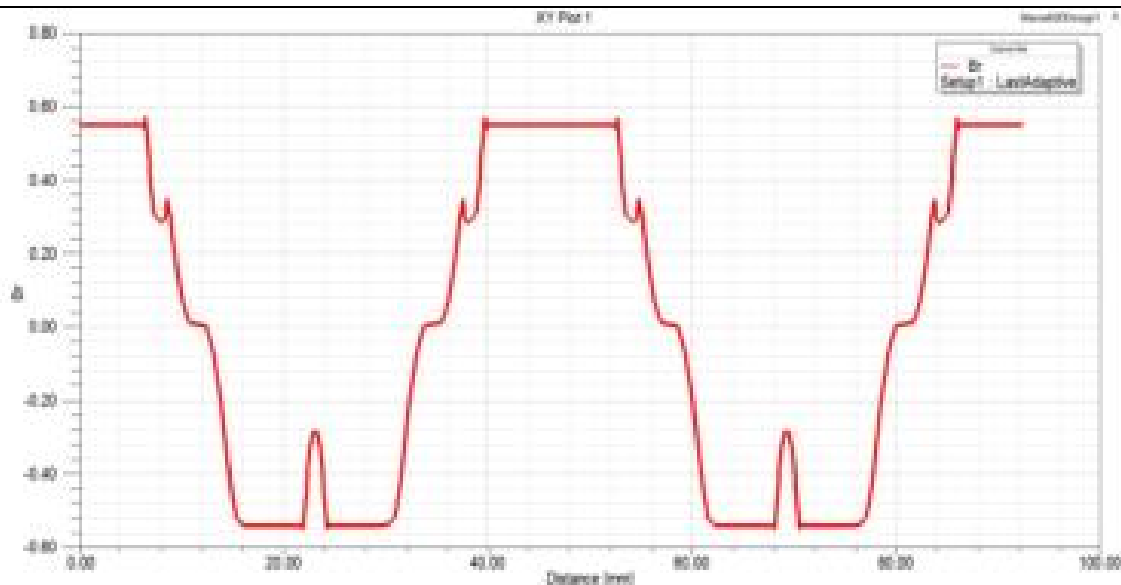


图4.3 无刷直流电机的气隙磁密分布波形

4.2 电机的瞬态分析

暂态场的计算包括力学、电场和流体热耦合等多种因素，是一种动态的动态计算方法。这些因素之间存在着一种线性和非线性的相互作用。暂态磁场的过程和稳态磁场的过程差不多，都是建立模型，定义参数，解决问题，然后再进行最后的处理^[12]。

对该系统进行了暂态模拟，包括有负荷和有负荷两种情形。

4.2.1 空载瞬态分析

本部分重点讨论了无负载时的电磁模拟问题。在直流电动机工作时，有两种模式：正转和反向转。对几种不同工况下的转矩，感应反电动势，绕组磁场的计算结果进行了初步的数值模拟。

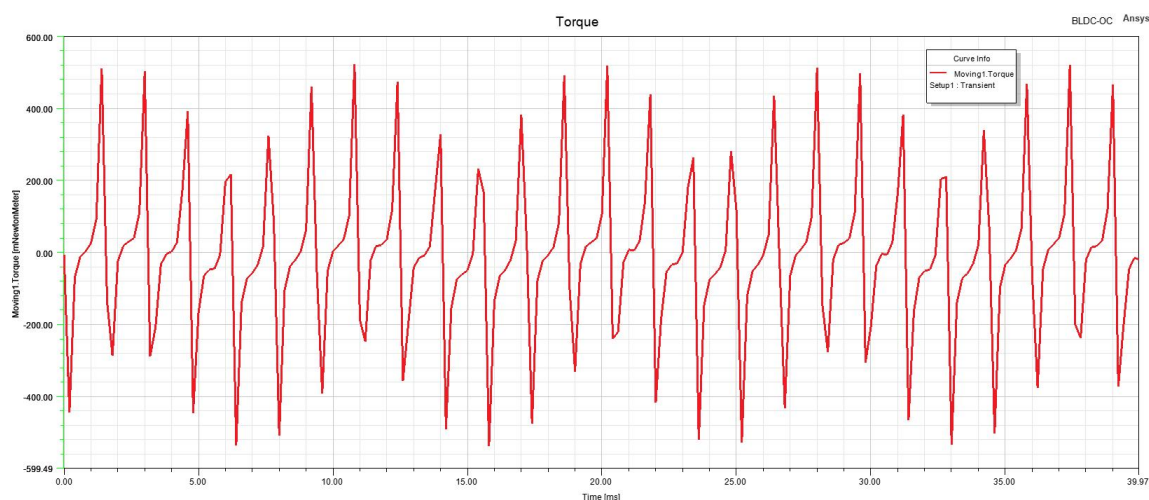


图 4.4 空载时的磁组力矩随时间变化曲线

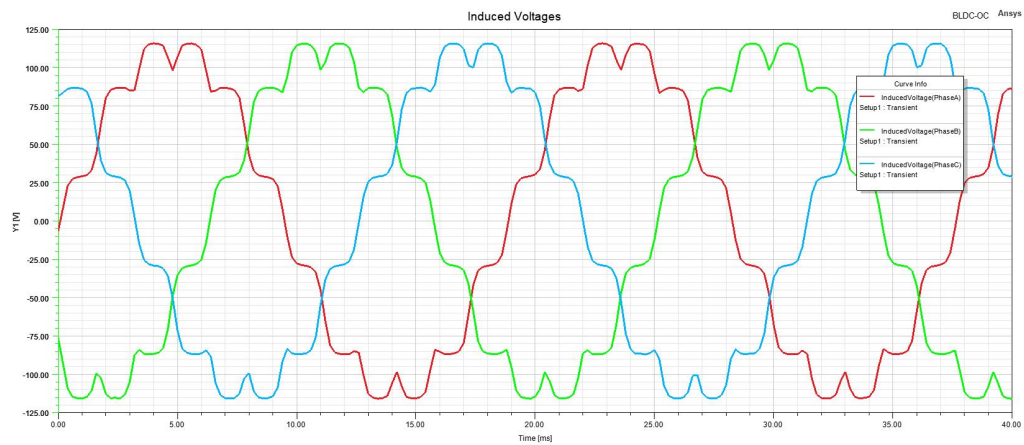


图 4.5 空载时的绕组感应反电动势随时间变化曲线

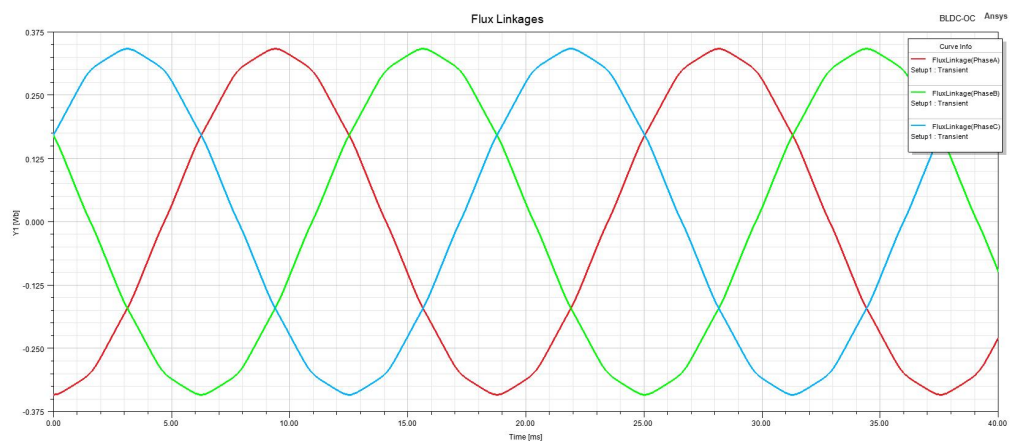


图 4.6 空载时的绕组磁链随时间变化曲线

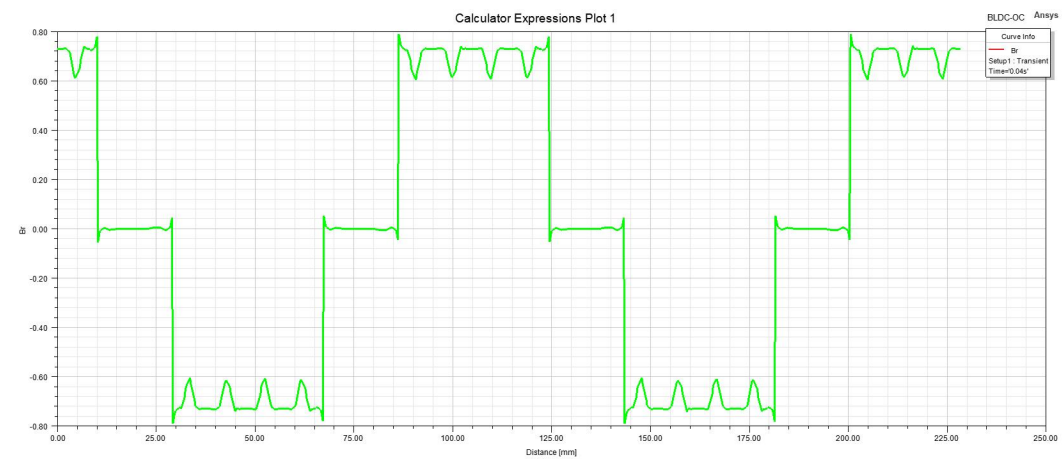


图 4.7 空载时的径向气隙磁密随时间变化曲线

从图 4.4 可以看出，在空载启动时，无刷直流电机，形成的磁阻力矩表现出一定的周期波动，略带小幅度的起伏。从图 4.5 可以看出：反电位的波形基本为正弦波，

与正弦波相似。图 4.6：线圈的磁场通量，接近于正弦波。图 4.7 所示：这条曲线有一个正、负的数值，它的数值与永久磁铁的负极处的空气间隙的磁密度相一致，它的数值取决于定子的狭缝的尺寸。

4.2.2 负载瞬态分析

与前一部分相一致，本部分将讨论加载条件下的电磁模拟。在这种情况下，需要增加一个电源电源，并且在设定电枢线圈时，需要考虑到，在模拟中，线圈的名字必须和外电路的名字一样，以保证线路的负载是准确的。

通过仿真软件进行了多次分析得出：电磁转矩、绕组电流、绕组磁通等随时间变化的参数曲线，分别为图 4.8、图 4.9、图 4.10 和图 4.11。

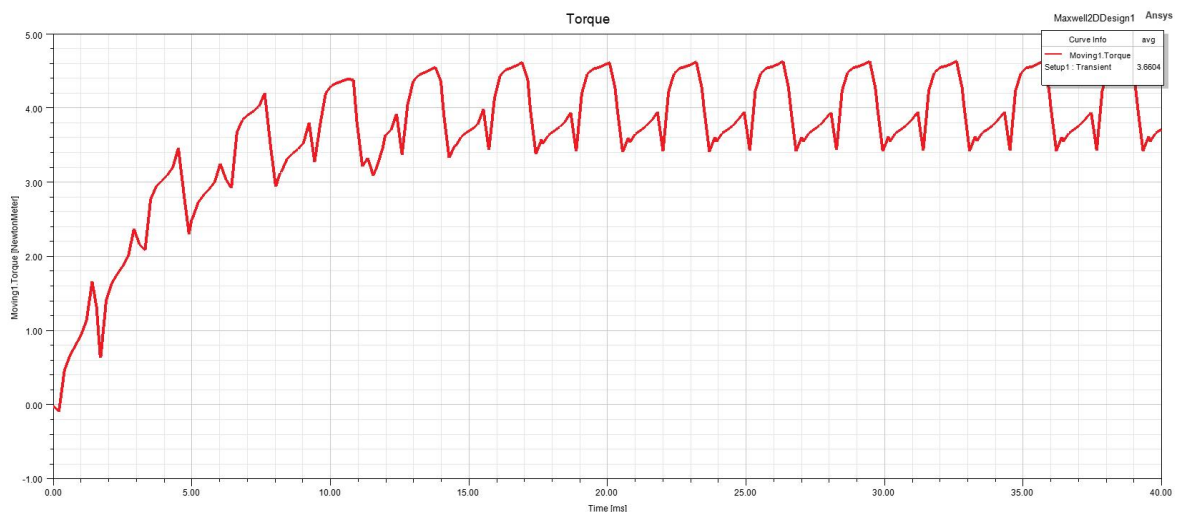


图4.8 负载下电机稳态运行时的转矩随时间变化曲线

在图4.8中，选取一个分段，以获得其表面的区域的数值，由此获得输入电磁转矩的 average 值。选择范围为机械角度与极对数乘积值1个T的倍数区域，在该选择区域中，伴随着换相和转矩波动的联动响应，见图4.8，得出了电磁转矩的平均值为 3.6604 mN.m。

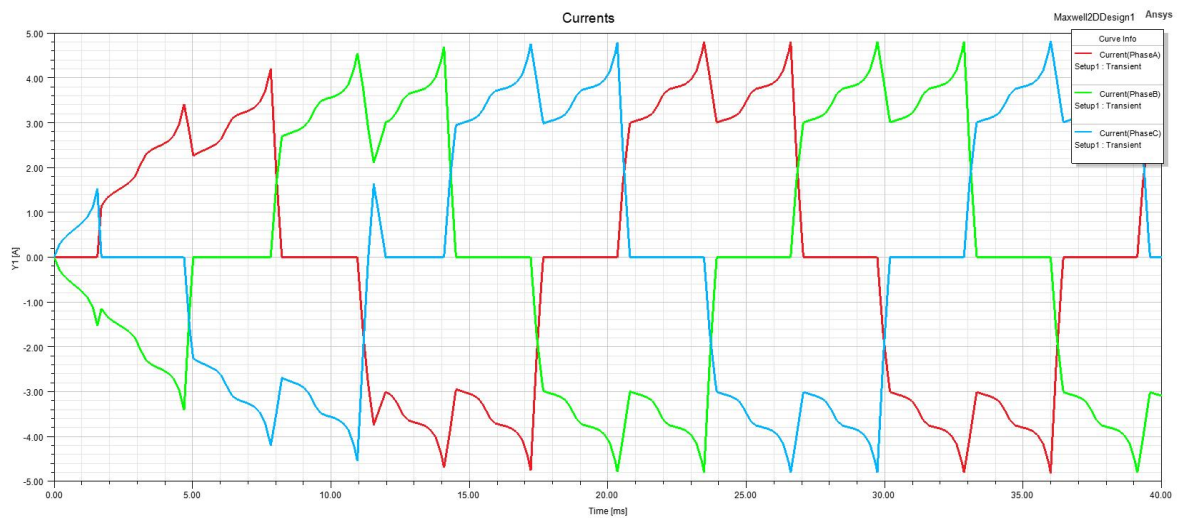


图4.9 负载下电机稳态运行时的绕组相电流随时间变化曲线

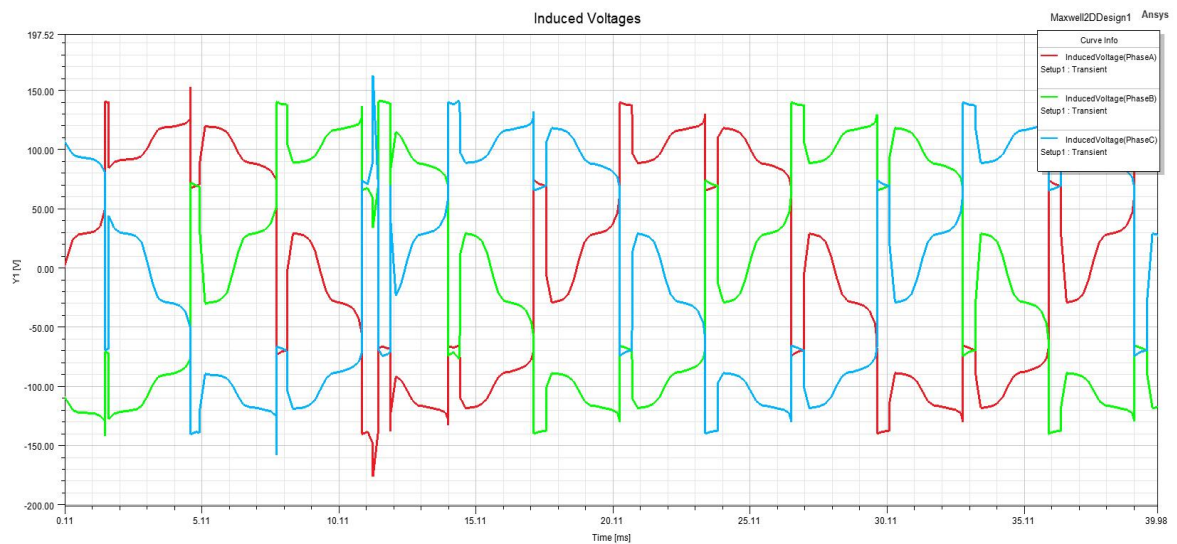


图4.10 负载下电机稳态运行时的绕组感应反电动势随时间变化曲线

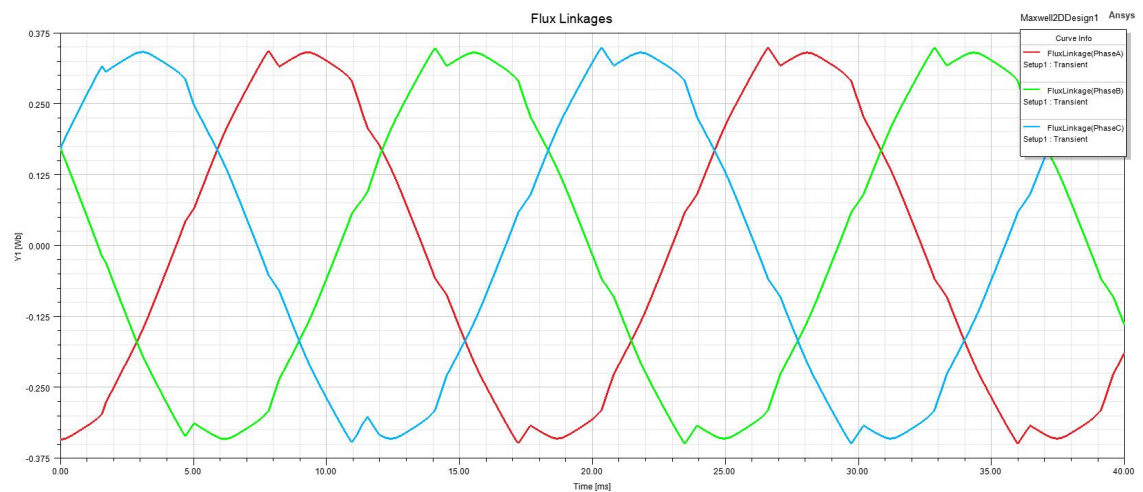


图4.11 负载下电机稳态运行时的绕组磁链随时间变化曲线

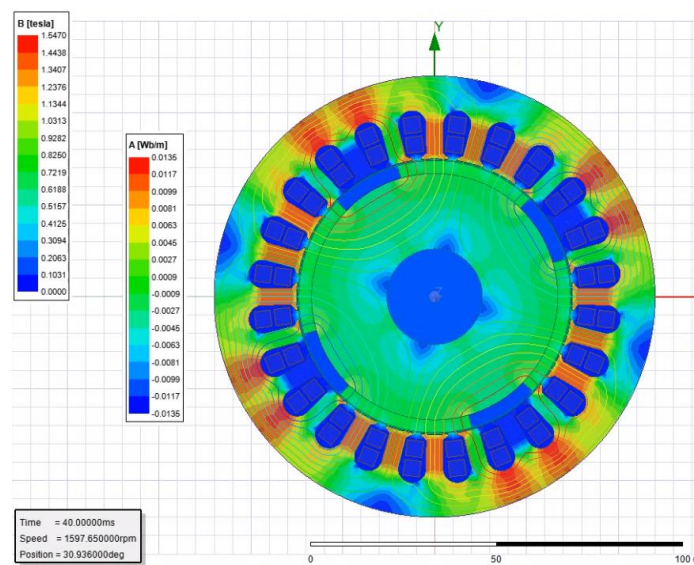


图 4.12 负载起动下 0.003s 时刻电机磁力线与磁通密度分布图

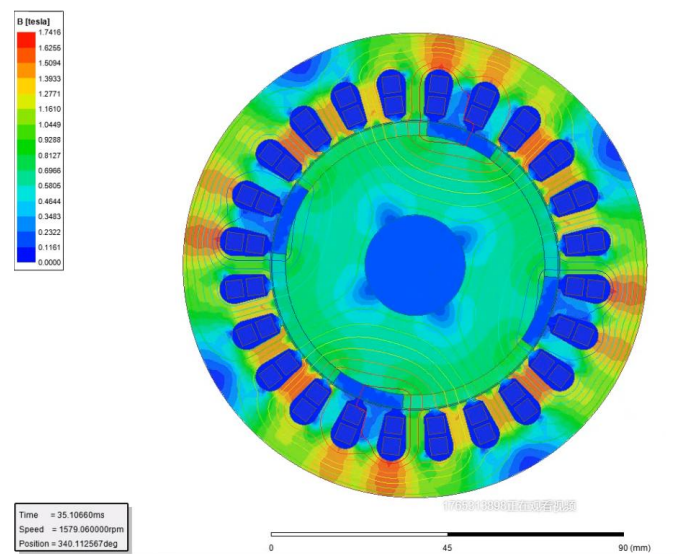


图 4.13 负载起动下 0.035s 时刻电机磁力线与磁通密度分布图

4.3 电机性能参数分析

4.3.1 反电动势

在无刷式直流电动机中，当转子以某一速度转动时，由定子所产生的电势量被称为“逆电势”，也被称为“感生电势”。当反电位已知时，通过模拟，可以获得相应的磁链变化，电流波形等信息。

逆动势：

$$E = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (4.1)$$

正常情况下，实际中的气隙磁密波形不能构成良好的梯形波，也与多个因素相关^[14]，上式可化成：

$$E = - \frac{d\Psi}{dt} \cdot \frac{da}{dt} = - \frac{d\Psi}{da} \omega \quad (4.2)$$

若 da 够小，则可化为：

$$E = - \frac{\Delta\Psi}{\Delta\theta} \omega = K_E \omega \quad (4.3)$$

式中， θ 为转子转动角；

$\Delta\theta$ ：相邻两位置的角度差；

Ψ ：电机角速度；

$\Delta\Psi$ ：相邻两位置磁链差；

K_E ：反电动势系数。

某线圈磁通量可用下式表示：

$$\Phi = BS = \frac{AZ_a - AZ_b}{\tau} \cdot \tau l_{ef} = (AZ_a - AZ_b) l_{ef} \quad (4.4)$$

AZ_a ：平均磁场向量；

AZ_b ：平均磁场向量；

l_{ef} ：定子铁芯沿轴方向的尺寸。

磁通链 Ψ ：

$$\Psi = W\Phi = W(AZ_a - AZ_b) l_{ef} \quad (4.5)$$

磁链差：

$$\Delta\Psi = \Psi_i - \Psi_{i+1} \quad (4.6)$$

4.3.2 绕组电感

在电动机中，电感是一项很关键的指标，它的作用体现了电动机的阻力。可以采用磁场矢量法、感应电势法等多种方法对该问题进行研究，在该问题中，常用的是磁链法^[15]。

电感为：

$$L = \frac{\Delta \Psi}{\Delta i} = \frac{\Psi_{i+\Delta i} - \Psi_i}{\Delta i} \quad (4.7)$$

因为：

$$\Psi = W \times B \times S \quad (4.8)$$

其中：

$$B = \frac{AZ_a - AZ_b}{\tau} \quad (4.9)$$

$$S = \tau \times l_{ef} \quad (4.10)$$

式中：W 为每相串联匝数；

AZ_a ：绕组电流输入端的平均磁矢量；

AZ_b ：绕组电流输出端的平均磁矢量；

l_{ef} ：定子铁心的轴向长度。

可得 A 相与 B 相绕组之间的互感是：

$$M(\theta) = \frac{\Delta \Psi_{ab}}{\Delta i_a} \quad (4.11)$$

式中： $\Delta \Psi_{ab}$ 是电机中 A 相电流产生的与电机中 B 相绕组交链的磁链。

4.4 齿槽转矩

由于定子齿壁和永磁体之间的相互作用，会产生齿槽力矩，从而导致了电动机的扭矩曲线的起伏，从而导致了电动机的噪音和振动。对永磁电动机的运转有很大的影响^[16]。因此，本文对如何降低该永磁电动机的齿槽力矩进行了研究。

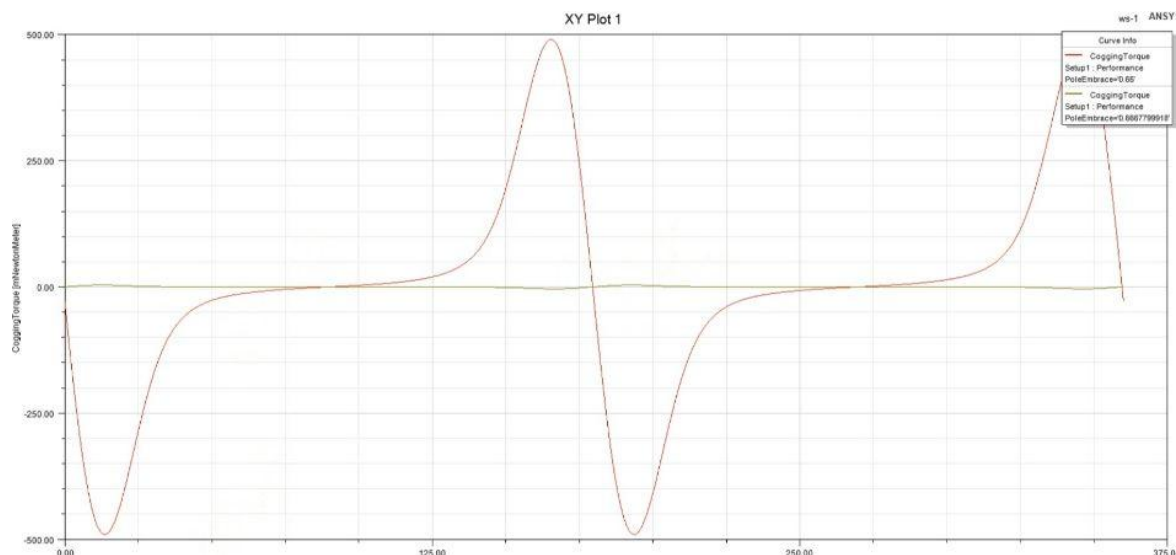


图 4.14 电机的齿槽转矩曲线图

4.3.2 削弱齿槽转矩的有效措施

在永磁电动机中，因转子永久磁铁、定子有狭缝，经常会发生狭缝转矩，这将对电动机的工作特性造成很大的影响，如：引起振动、噪音等；因此，减小齿槽转矩就成为了必须做的工作。下面是一些常用的 BLDCM 的减小齿槽力矩的办法。

第一种：定子坡道或片式坡道。这是一种最有效地抑制齿槽转矩的方式，它是一种在转子转动过程中，减弱磁路磁阻的改变，从而减小齿槽转矩的方式^[17]。在一般工作中，为排除大部分的沟道所引起的谐波，沟道倾斜角应选择一定的沟道间距。

第二种：对狭缝的开孔进行优化。结果表明，在一定条件下，定子铁心齿轮的开孔尺寸对齿轮的开孔转矩有较大的影响，且与开孔尺寸成正比。尽管可以使用闭口槽，但是这会给绕组安装带来很大的难度，还会提高槽口漏抗，对电机的电磁转矩的输出造成一定的影响。

5. 总结与展望

5.1 课题总结

无刷直流电动机是一种永磁同步电动机。作为一种集电子和电机于一体的高科技产品，它具有体积小、重量轻、节能、噪音低等特点。在各个方面都有广泛的使用。本论文针对该系统的特点，进行了一套完整的模拟设计与理论分析。

(1)对无刷直流电机的产生、发展和有关性能作了简单的阐述。本文通过查阅相关资料，对该领域的研究进展进行了讨论。然后，将它展开。

(2)从电动机的基本构造入手，对电动机的工作机理及特点进行了说明，并对电动机各部分进行了说明，以便于对电动机进行模拟建模及对其进行电磁学特征的研究与分析。

(3)对 BLDC 电动机进行模拟建模，重点阐述了 BLDC 电动机的有限单元方法和相应的计算程序。首先，在磁路理论基础上，采用麦克斯韦模型与模拟方法，实现对电动机基础参数的设定与调节，主要内容有：相关电路参数、主转子与静子相关参数的设定，以及永磁体的优化等。

(4)建立了发动机的数学模型后，利用 FEM 对其稳态及动态性能进行了数值模拟，得到了其在无载荷情况下的多个参量随时间的演变规律。再对照曲线图，对其进行相应的分析与计算，以保证其满足额定性能的基础要求，使其具有较强的响应能力和较强的工作能力。

(5)建立了 BLDC 电动机的齿轮力矩模型，并对其进行了数值模拟，提出了减小或减小齿轮力矩的相应对策，例如：调整极弧系数，增加槽缝宽度，在定子上增设辅助槽缝等。

5.2 展望

毕业设计是每一位大学生的必修课，也是他们一生中唯一的一次学习机会。

在这样一个千载难逢的机遇面前，我要考验自己的能力与潜能，争取以最大的努力来结束我美丽的校园生涯。

毕业设计与我们平常学习的基础课和专业课都不一样，这是一个项目，需要运用到许多综合性的知识，最主要的目的是让我感受到做科研的全过程。毕业设计是最关键的一步，也是最能将自己的理论应用于实际的一步。

结束语

电机学是一门重要的基础学科，且电动机也广泛应用于我们的日常生活中。它们的存在不仅促进了社会的发展，也给人们的生活带来了极大的便利。我这次的毕业设计是关于研究无刷直流电机的电磁特性。通过这段时间的学习和设计，我获得了很多专业知识，开阔了视野。

我很荣幸能在完成大学生涯结束前得到余剑老师的指导和帮助。他有着相较于我们有着更为高远的思想觉悟，谦逊的品质与细致严谨的学术作风，这是我将来的学习与工作中的榜样。在本次的毕业设计中，我虽然翻阅了不少教材与文献和请教了同学并进行了多次仿真的模拟研究，但仍有诸多问题与困难。于是我多次请教了于老师的帮忙，他十分耐心地讲解和进行仿真步骤的相关操作。在历经重重困难后，我终于解决了问题。余老师严谨的态度与钻研的精神，在这个过程中也对我有深远的影响。临近毕业之际，非常感谢他的尽心帮助，使我一步一步的前进，每一步都在不断的总结，不断的改进，不断的走向胜利！

致 谢

行文至此，思绪万千，我即将告别我的本科时代。从规划、实验及撰写，我最终完成了无刷直流电机的电磁特性研究的毕业设计的各项相关任务。在这个毕业设计的进行过程中，我通过网上资料查阅和搜索到了许多有关电机仿真设计及其特性分析的参考文献，正好也复习了过去曾学习过的部分专业课程，这一段时间感觉收获颇丰。

“桃李不言，下自成蹊。”首先我要感谢我的指导老师，从以前教授我们电分和继保等专业课程到现在指导我的毕业设计的这个过程中予了我莫大的帮助。其次还要感谢其次要感谢各位授课老师这四年中的帮助与照顾，才使我度过了这受益匪浅的四年，承蒙教诲，心存感激。如为人和蔼的牛老师、治学严谨的孙老师、幽默风趣的李老师等等，不仅是他们在课堂上对我的敦敦教诲，从中学到了有用的专业知识，而且在平时课余生活中给我的各种建议与帮助，也获得了宝贵的为人处世的经验。毕业之际，也祝各位老师未来能工作顺利，事业有成，身体健康，为我们的学校继续培养出更多的优秀专业人才。

“树高千尺不忘根深沃土。”父亲是我最不能忘也不敢忘的人，感谢我的父亲 20 多年来对我无微不至的照顾与支持，让我站在他们的肩膀上，见识到了他们所没有见过的繁华，希望他长乐久安。

写进千山，落笔是你。感谢杨晓兰同学的出现，给我原本灰色的天空添了一抹色彩。感谢你三年来对我的包容与付出，你是我对美好未来的期待和向往。乍见之欢，久处亦怦然。

最后，感谢从繁忙的工作中挤出时间审阅本人论文的各位老师！

参 考 文 献

- [1] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [2] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [3] 李烨, 严欣平. 永磁无刷直流电机技术发展水平与应用前景[J]. 微电机, 2001, 34(1): 31-33
- [4] 耿连发, 吴延忠, 田立坚, 赵丹群. 钕铁硼永磁材料在电机设计中应注意的问题[J]. 电工技术杂志. 1997, 5(1): 25—27
- [5] 冀溥, 宋伟, 杨玉波. 永磁无刷直流电动机应用概况[J]. 电机技术, 2003, 5(4): 32-36.
- [6] 王季秩. 无刷电机的现在与将来[J]. 微特电机, 1999, 27(5): 23-24.
- [7] 彭峰, 谷爱昱, 梁德志, 罗志伟, 温晓阳. 基于 Ansoft 的永磁无刷直流电机的设计与仿真[J]. 防爆电机, 2015, 7(6): 8-10.
- [8] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [9] 杨勇. 永磁无刷直流电机的仿真研究[J]. 电器工业, 2018, 2(3): 78-84.
- [10] 叶金虎. 现代无刷直流永磁电动机的原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [11] 肖胜宇, 高明世, 张凯. 基于 Ansoft 的永磁同步电机退磁仿真分析[J]. 日用电器, 2021, 3(6): 15-18.
- [12] 张存山, 范瑜. 永磁无刷电机的电磁设计参数研究[J]. 北京交通大学学报, 2004, 28(5): 99-102
- [13] 秦新燕, 肖鹏程. 基于 Ansoft 的电机设计及瞬态分析[J]. 湖北第二师范学院学报, 2011, 12(2): 89-92
- [14] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅等. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [15] 李发海, 朱东起. 电机学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 赵博, 张洪亮等. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012
- [17] 夏加宽, 于冰. 定子齿开槽对永磁电机齿槽转矩的影响[J]. 微电机, 2010, 6(7): 13-16
- [18] W. Leonlm VControl ofElectrical Drives, Berlin, Spring-Verlag, 1985.