



中山大学
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

电机与拖动技术



电机与拖动技术

课程小作业实验报告

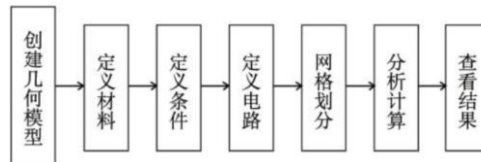
基于 JMAG 的三相永磁同步电机 仿真与分析

姓 名	张瑞程
学 号	22354189
院 系	智能工程学院
专 业	智能科学与技术
指导教师	魏亮亮

2024 年 11 月

1. MAG 仿真软件

本次实验仿真使用 JMAG 软件进行完成。JMAG 软件是一款专门针对电机电磁场仿真分析的软件，由日本 JSOL 公司开发。与其他电机仿真软件 Flux、MotorSolve、Ansys 和 Ansoft 相比，JMAG 具有丰富的材料属性库以及高速精准的计算分析能力。其仿真的基本流程流程如下：



1. 建立模型： Geometry Editor 、JMAG-Express、 CAD 导入完成建模。
2. 定义材料： 将物理属性附加到模型的相应部分，确保模型的物理特性与实际情况相符。
3. 定义条件： 主要包括电机的运动方式、线圈的电流方向以及边界条件。
4. 定义电路： 设置电机电路的连接方式和电路的控制方向。
5. 网格划分： 对建立的模型进行划分，以便进行有限元计算。
6. 分析计算： 计算机对电机模型进行计算处理。
7. 查看结果： 最后一步是查看电机仿真参数的分析结果。

在后续的应用中，我将在 JMAG 有限元仿真软件环境下，搭建多个三相永磁同步电机模型，并进行仿真分析，并可视化分析电机的磁场分布、基本原理、空载性能以及负载特性等。

2. 实验内容

(1) 基本原理分析： 参考基本模型参数，搭建双层整距绕组 4 极表贴式三相永磁同步电机模型 ($p=3$)，进行仿真分析，分析电机的磁场分布、基本原理、空载反电势和转矩、转矩脉动等。

(2) 极对数对比： 参考基本模型参数，搭建双层集中绕组表贴式三相永磁同步电机，分别设计 4、8、10 极的电机模型进行仿真，对比分析各电机的空载反电势、转矩和转矩脉等性能。

3. 相关知识

三相永磁同步电机是一种高性能的电机，因其高效率、高功率密度、精确控制和可靠运行的特点，在工业自动化、家用电器、电动汽车等多领域有广泛应用。

1) 结构： 永磁同步电动机一般由：定子，转子，端盖等部件组成。定子绕组，围绕着定子铁芯进行环绕，通过控制定子绕组的输入电流的频率，可以控制磁场旋转频率，进而控制转速。转子上面放

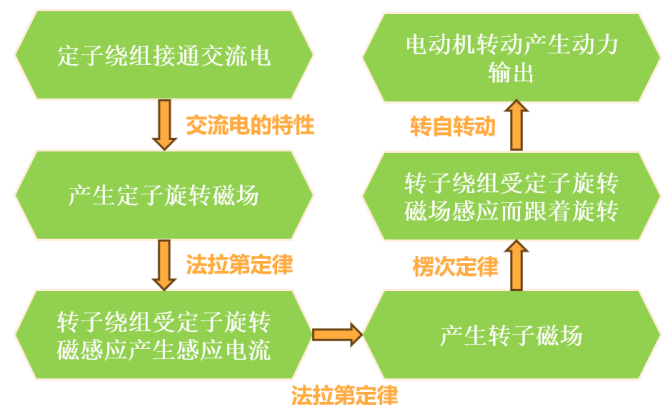
有永磁体，根据永磁体的摆放位置不同，分为内嵌式永磁转子、表贴式永磁转子。本次仿真采用的是表贴式永磁同步电机

2) 工作原理: 永磁同步电动机不能直接通过三相交流电起动，因转子惯量大，磁场旋转太快，静止的转子根本无法跟随磁场启动旋转。其主流的同步方式分为两种：一种是通过变频调速器控制电机达到同步，一种是通过异步起动方式来达到同步。

变频调速器方式: 永磁同步电动机的电源采用变频调速器提供，启动时变频器输出频率从 0 开始连续上升到工作频率，电机转速则跟随变频器输出频率同步上升。

异步起动方式: 在不需要调速的场合直接使用三相交流电供电的方法是在永磁转子上加装笼型绕组。静止时，给定子绕组通入三相交流电，产生定子旋转磁场；定子旋转磁场相当于转子旋转，在笼型绕组内产生感应电流，形成转子旋转磁场。这两个磁场相互作用，产生转矩，使转子由静止开始转动。

在刚开始转动的时候，转子旋转磁场的转速与定子旋转磁场的转速不等，这样会产生交变转矩。当转子旋转磁场几乎与定子旋转磁场同步时，转子绕组不产生感应电流，转子上只有永磁体产生磁场，产生驱动转矩。

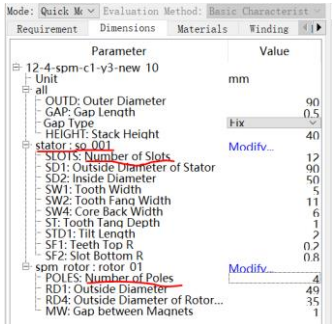


所以，转子绕组来实现一个启动，启动完成后，转子绕组不再起作用，由永磁体和定子绕组的磁场相互作用，产生力矩。

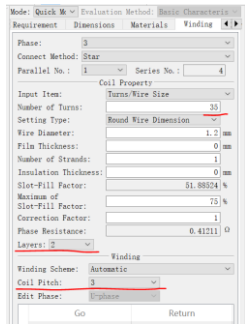
4. 基本原理分析

4.1. 搭建双层整距绕组

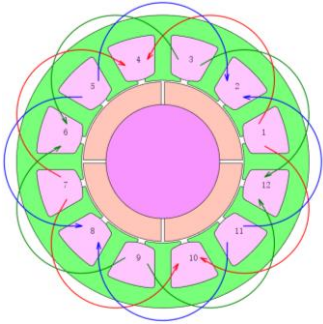
本实验采用 JMAG-Express 直接创建需要的电机模型——双层整距绕组 4 极表贴式三相永磁同步电机模型 ($P=4$, $y=3$)，按照老师提供的教程视频设计好参数，便可直接导入 JMAG-Designer 进行仿真。



结构参数



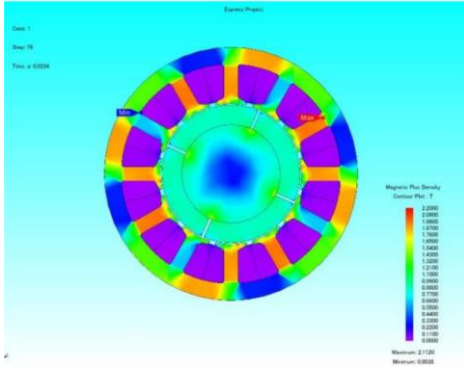
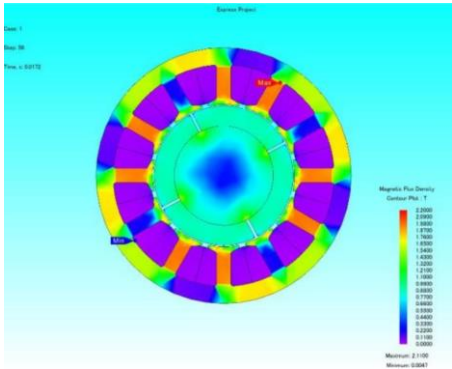
绕组参数



绕组结构

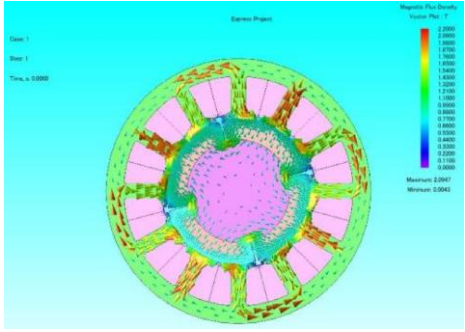
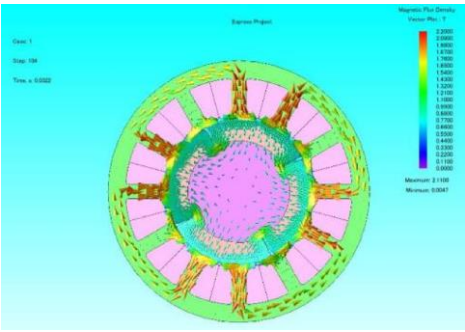
4.2. 磁场分布分析

1) 磁通密度分布图: 以下两幅图展示的是电机模型的磁通密度分布图，它是用于分析电机内部磁场强弱分布情况的一种可视化工具。这种图可以用来详细查看电机的磁场强度和分布。图中，不同的颜色代表了不同的磁通密度级别，其中深色表示磁通密度较低的区域，而亮色表示磁通密度较高的区域。"Max"和"Min"标签分别指出了磁通密度的最大值和最小值的位置。



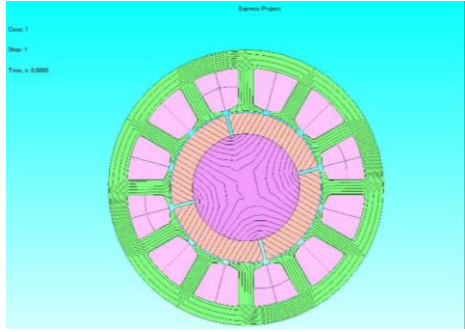
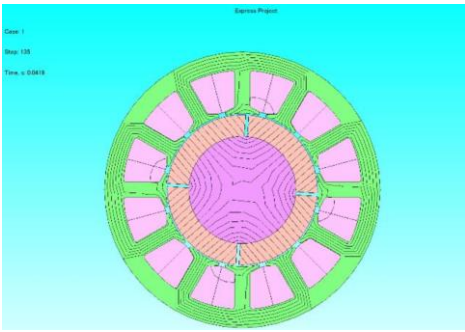
我们可以观察到，定子绕组表明附近磁通较强但存在周期性变化，而转子铁芯处磁通较弱。在永磁同步电机中，转子带有永磁体，当它旋转时，转子磁场的空间位置也随之变化。因此，固定在定子上的感应线圈会经历磁通量的周期性变化，这在上图中体现为磁通密度最大值和最小值在电机截面上位置的周期性变动。

2) 磁通密度矢量图: 以下两幅图展示的是磁通密度的矢量图，它们在不同的仿真时间点捕捉了电机内部磁场的瞬态分布。磁通密度矢量图通过箭头的方向和长度来表示磁场的方向和相对大小。箭头指向磁场方向，颜色反映了磁通密度的大小。



根据磁通密度矢量图，我们可以观察和评估磁场如何随着电机转子的旋转而变化，并追寻磁场的方向和轨迹。图中电机主要存在三条磁路，每条磁路大致包括 2 个定子绕组，其强弱变化具有周期性。由于转子上永磁体的运动，电机内的磁通排列和磁通流动会随着时间发生周期性变化，这在图中体现为箭头的运动具有周期性的规律。

3) 磁通密度等高图：以下两幅图是磁通密度的等高线图，显示了在不同仿真时间点的永磁同步电机内部磁场分布。等高线图是一种常用的方法来表示场分布的变化，其中连续的线条代表磁通密度在电机截面上的等值线。线条越密集表示磁通密度变化越大，即磁场梯度越高。



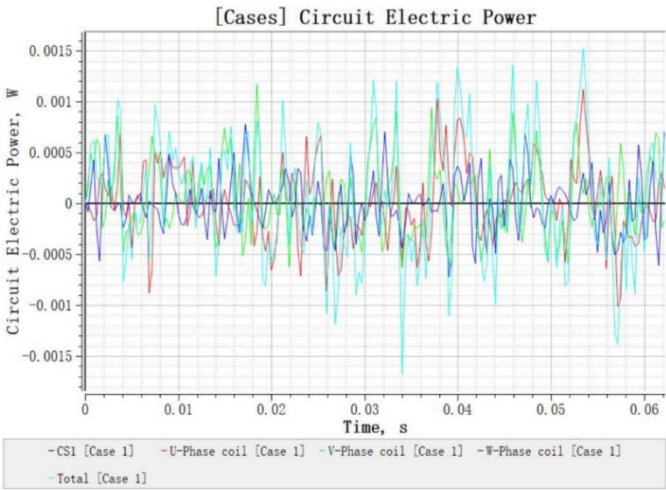
我们可以观察到，定子绕组表明附近等高线最密集，磁通最强，而转子铁芯处等高线较稀疏，磁通较弱。由于转子上的永磁体相对于定子的位置变化，磁通密度在电机内部的分布发生了周期性的变化，这种变化是由转子旋转引起的磁场的相对运动造成的。在图中表现为等高线条的周期性变化。

4.3. 空载性能分析

1) 空载电功率：下图展示的是三相电路的电功率随时间的变化，每个相位（U-Phase, V-Phase, W-Phase）的功率以及总功率（Total）被绘制在同一张图上。电功率波动表明在不同时刻，每个相位上的功率输出不是恒定的，这是由于电机内部磁场变化导致的电动势变化所致。

接下来进行数值分析，U 相、V 相、W 相的平均功率分别为 0.0000135W，0.0000506W，0.0000101W，总功率的平均值为 0.000540W，V 相的功率相比于 U 相和 W 相较高，这是由于电机某些部分的不均匀性，由于数值都很小，此误差可忽略不计。

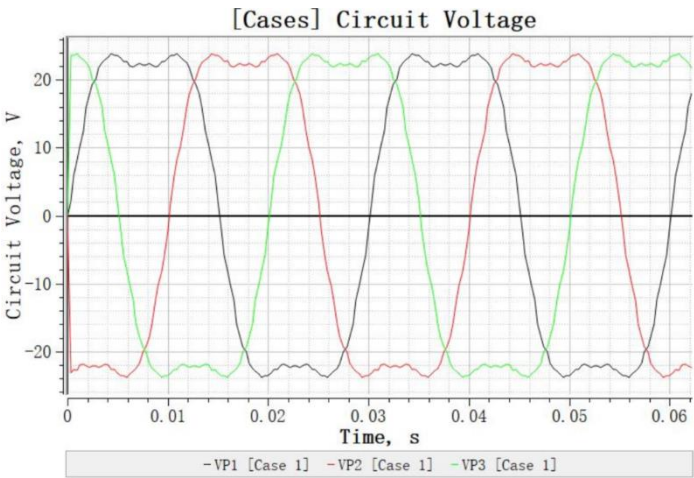
三个相位的标准差分别为 0.00037、0.00036、0.00027，总功率的标准差为 0.00060。标准差描述了电动势值围绕平均值的分散程度，相对较小的标准差意味着数值比较集中。这些数据表明功率



的波动在各相位间存在差异，但这些波动相对较小，说明在空载条件下各相的电动势相对稳定，总体功率波动较大是由各相位波动的综合效果导致。这些波动的存在可能来源于供电源的小幅波动或者电机内部磁场的微小不均匀性，总体来说数值均符合预期。

2/ 空载反电势: 在空载条件下，反电势是电机内部磁场与转子转速相互作用的直接结果。下图展示了三相电路在空载条件下的电压波形。每条曲线代表一个相（U 相、V 相和 W 相）的瞬时电压，呈现出了类似正弦波的形状。这些波形即为电机绕组两端的空载反电势。

由图可知，电压峰值大约为 22 伏特，这与电机设计的电磁特性和绕组的线圈匝数有关。电压波形接近正弦波，这说明磁场分布相对均匀，电机设计良好。三相电压呈 120 度相位差，这是三相交流电系统的典型特征，表明电机的相位匹配正确。波形较为稳定，没有明显的扭曲或峰值变化，表明电机在空载条件下运行平稳，没有显著的电磁干扰或谐波问题。波形周期性表明电机运行在稳定的频率下，与电源供电的频率相匹配。

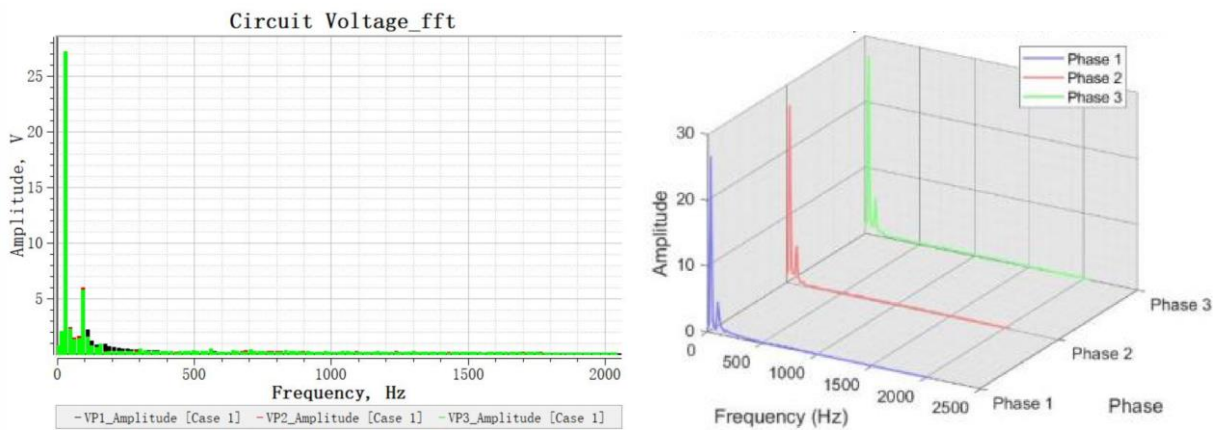


3/ 反电势谐波:

通过傅里叶变换（FT）将时域的电压信号转换成频域表示，我们可以获取反电势的频谱信息和其

中的谐波成分。空载反电势的时间函数 $E(t)$ 的 FT 为： $E(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$ 。FT 结果给出了各个频率分量的幅值和相位信息，从而揭示了空载反电势中包含的谐波分量。

下图（左）为电机反电势的频谱分析图，图中主要的峰值出现在低频区，这对应于电机的基波频率，即电机的基本运行频率。在基波频率下，三相（U、V、W）的振幅几乎是一致的，这表明电机的基本电动势分布均匀，且相互之间的平衡良好。由于在二维平面中绘制三相反电势谐波存在较强的重叠现象，本实验使用 MATLAB 绘制了三维三相反电势谐波图（下图（右））。

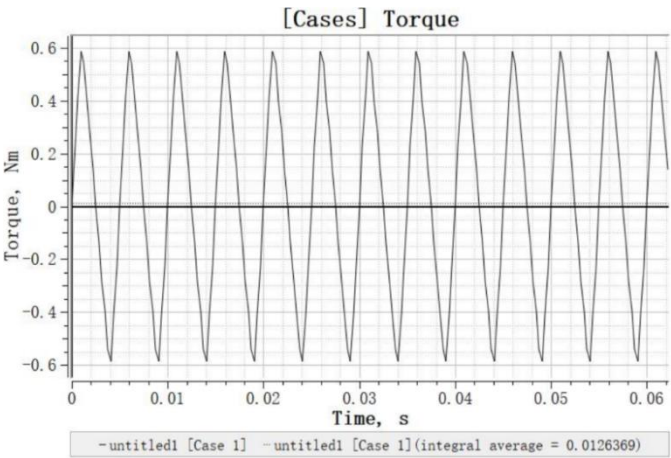


从图中可以看到，在基波之外还存在一些较小的峰值，这些额外的峰值代表了谐波成分。在空载条件下，理想情况是只有基波存在，谐波很小或不存在，因为谐波可以引起额外的损耗和可能的电磁干扰。然而，几乎所有实际的电机都会有一定程度的谐波，它们的存在可能是由于电机设计中的非理想因素，如磁路的不对称性、绕组分布的不均匀性等。

4) 转矩分析:

右图展示了电机转矩随时间的变化情况。转矩波形呈现出明显的周期性变化，这表明电机在运行中产生了转矩脉动。这些脉动通常是由电机内部磁场分布不均或者电流波形中的谐波引起的。理想的电机转矩应当是平滑且连续的，但实际上，由于设计和制造的影响，转矩波动几乎总会存在。

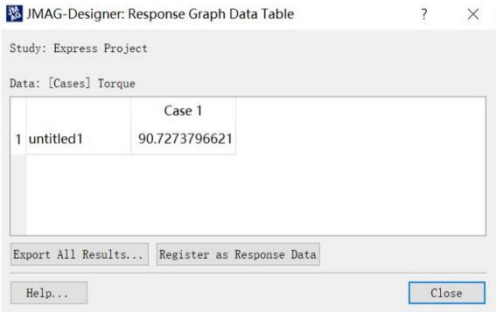
从图中还可以看到，转矩在正负两方向上波动，平均值约为 0.0126369 牛顿米。转矩的这种波动会导致电机运行时产生额外的噪声和振动，影响机械设备的稳定性和电机的效率。在电机设计和测试中，通常希望最小化转矩脉动，以提高电机的运行平滑性和可靠性。在空载条件下，理想的电机应该表现出极低的转矩，因为没有外部负载抵抗电机的旋转。此转矩波形图中的积分平均值接近于 0 Nm，意味着在空载条件下，电机的平均输出转矩非常小。这表明电机没有负载时几乎不消耗机械能，这是空载性能良好的一个标志。



5) 转矩脉动分析:

由计算可得图中数值，电机的空载转矩脉动为 90.73，这是一个较大的数值。在实际应用中，高的空载转矩脉动可能会导致电机运行效率低下，增加不必要的能量消耗，甚至可能引起电机结构的损伤。说明要尽量避免电机的空载运行，以减少对电机的损耗。

事实上，高的空载转矩脉动可能表明存在设计上的问题，如转子和定子之间的不对中、气隙的不均匀性，或者永磁体的磁场分布不均匀。此外，电源供电的不稳定性、电机控制系统的不准确也可能导致高的转矩波动读数。



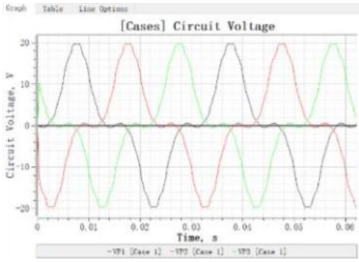
5. 极对数对比

5.1. 模型构建

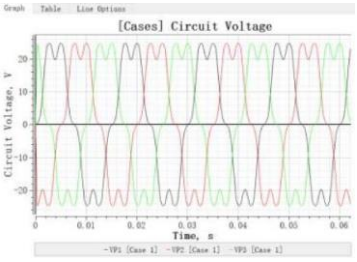
此部分同 4.1. 中搭建双层整距绕组 4 极表贴式三相永磁同步电机模型，只需修改电机级数，导出 4 极、8 极和 10 极的电机模型进行仿真。

5.2. 空载反电势

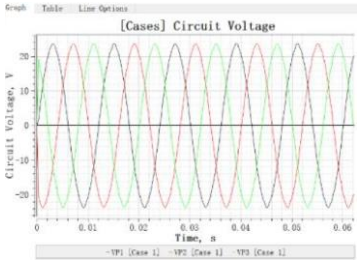
三种极数下的空载反电势图如下所示：



P = 4



P = 8



P = 10

- 1) 频率：**随着极数的增加，反电动势波形的频率也增加。这是因为在单位时间内，转子上的磁极通过固定点的次数增多。这可以从波形中一个完整周期的数量增加中看出，即 8 极和 10 极的波形在同一时间内有更多的周期。
- 2) 幅度：**随着极数的增加，反电动势的峰值增大。在相同的转速下，极数的增加意味着单位时间内更多的磁极通过同一位置。因此，磁场的变化率更大，导致反电动势的峰值电压增加。
- 3) 平滑程度：**更高极数的电机反电动势波形更加平滑，这表明谐波内容有所降低。这是因为随着极数的增加，电机的基波频率增高，从而影响了谐波分量。
- 4) 相位：**随着极数的增加，相邻波形之间的相位差变小。在三相电机中，每个相的电压波形通常是 120 度相位差。但是，当极数增加时，每个相的电压波形可能会更加紧密地排列，从而减小了相位差。

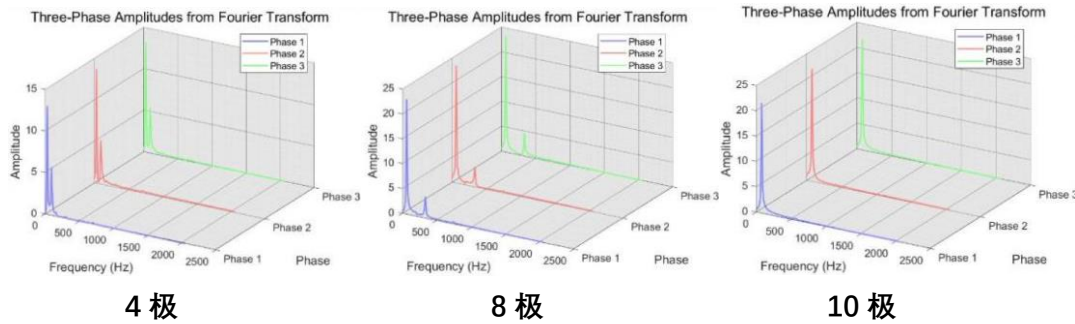
5.3. 反电势谐波

与 4.3.相同，本实验分别绘制出三种级数下的三维反电势谐波图。并统计了三种电机极数下，最大幅度谐波的频率和振幅的具体数值，如下表所示：

电机级数	基波频率	基波振幅 U	基波振幅 V	基波振幅 W
4	32.16 Hz	13.06 V	13.78 V	13.28 V
8	64.32 Hz	23.17 V	23.65 V	23.36 V
10	80.40 Hz	21.78 V	22.24 V	21.80 V

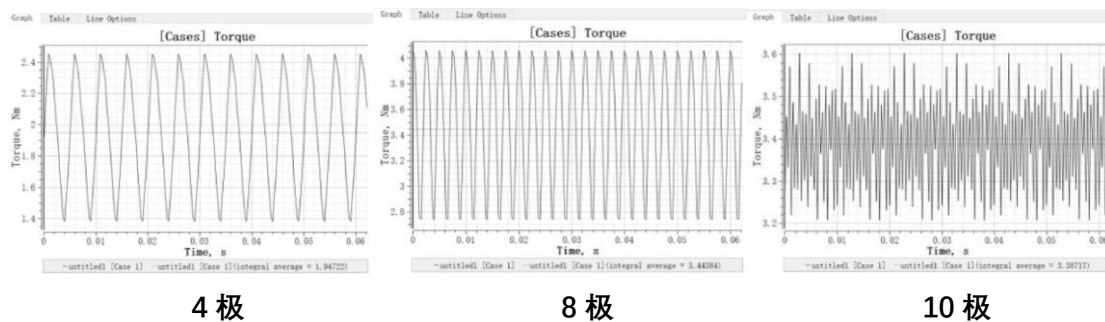
由表可知，极数从 4 极翻倍到 8 极时，谐波频率也随之翻倍，而从 8 极增加到 10 极时，谐波频率的提高并不完全与极数增加成正比，这可能与 10 极电机独特的设计特性有关。但是还是可以大致得出结论：**基波频率与电机极对数正相关。**

值得注意的是，8 极电机在其基波上的最大幅度振幅高于 10 极电机，这可能与绕组分布、磁体设计以及其他结构细节有关，这些因素都会影响谐波的生成。



5.4. 转矩

通过仿真得到负载时（电枢电流峰值为 10A）的转矩图如下：



1/ 描述分析：4 极电机的转矩波动范围较小，大约在 1.6 到 2.4 牛米之间，波形整体较为规则，振幅变化不大，显示出较好的平滑度。周期性明显，且转矩波峰值较为一致。转矩平均值为 1.95，显著小于其余两个。8 极电机的转矩波动范围最大，从大约 2.8 到 4 牛米不等，波形的振幅较大，表现出较高的波动性。尽管波形仍保持周期性，但峰值间的差异略微增大，没有 4 极电机那么平滑。转矩平均值为 3.44。10 极电机的转矩波动范围最小，大约在 3.2 到 3.6 牛米之间。波形密集，幅度变化明显，波形光滑程度最差。转矩平均值为 3.39，相较 8 极略微减小。

从这些观察中可以看出，随着电机极数的增加，转矩的平均值总体有所提升，但同时伴随着转矩波动性的增加，8 极电机中，转矩的波动范围最大，4 极次之，10 极最小。对于峰值，则是 8 极大于 10 极大于 4 极。

2/ 原理分析：对于 4 极电机，其波动较小和平均转矩较低是因为较少的极数导致磁场分布较为简单，磁链的变化较为平稳，从而在电机转子旋转过程中产生的转矩较为均匀。简单的磁场分布有助于减少转矩波动，使得输出转矩更加平滑。8 极电机显示出最大的转矩波动范围，这是因为更多的极数导致磁场在空间分布上更加复杂，每个极产生的磁通量变化更快，这在转子旋转时会引起较大的转矩波动。此外，由于每个极的影响区域较小，转矩的瞬间差异也会更大，这在波形图上体现为较大的振幅波动。

而对于 10 极电机，虽然极数更多，但其转矩波动范围却比 8 极电机小。这可能是因为随着极数的进一步增加，磁场分布在空间上更为紧密，导致单个极引起的磁通量变化对整体转矩的影响相对减小，进而减少了转矩波动。

5.5. 转矩脉动

对三种电机转矩波动数据进行计算可得到以下数据：

电机级数	4	8	10
转矩脉冲	0.54855	0.38329	0.11668

1/ 描述分析：分析数据可以发现，电机的极数和转矩脉动之间存在显著的关系。当电机的极数从 4 增加到 8 时，转矩脉动从 0.54855 减小到 0.38329。而当极数继续增加到 10 时，转矩脉动进一步显著减小到 0.11668。

2/ 原理分析：这表明随着极数的增加，电机转矩的稳定性在提高，脉动幅度在减小。其原因是高极数的电机在设计上更容易实现磁场的均匀分布，从而在转子旋转过程中产生的转矩波动减少。此外，高极数电机的磁通变化更为细腻丝滑，每个极对应的转矩贡献更为均匀，导致整体转矩输出更平稳。因此，10 极电机的稳定性最好，8 极次之，4 极最差。

6. 实验心得

在这次三相永磁同步电机的深入分析实验中，我发现磁场强度和分布对电机效能具有决定性影响。通过对不同绕组结构和极数的模型进行比较，我发现细微的设计变化能显著影响反电势波形和谐波组成。这一发现让我认识到，精细设计在提升电机效率和降低噪音方面的重要性。

在分析空载性能时，我学习了如何利用反电势波形评估电机效率，波形的平滑度和幅度与电机运行效率直接相关。此外，通过谐波分析，我能够评估电机的噪音水平因为谐波大小和分布与噪音紧密相关。在研究负载性能时，对转矩和转矩脉动的分析帮助我理解了力矩的产生方式以及不同设计参数对电机动力性能和稳定性的影响。

这次实验不仅增强了我的技术技能，也深化了我对电机工作原理的理解，为我未来的学习和职业发展奠定了坚实的基础。