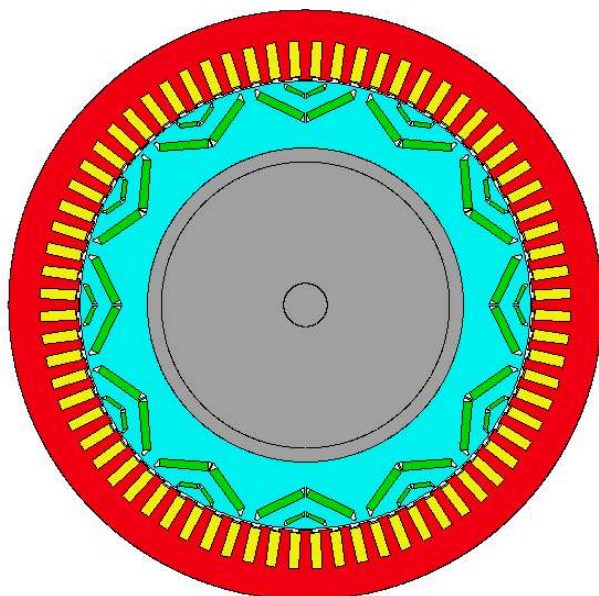


基于 Motor-CAD 的 PWM 谐波引起的扁铜线交流损耗计算

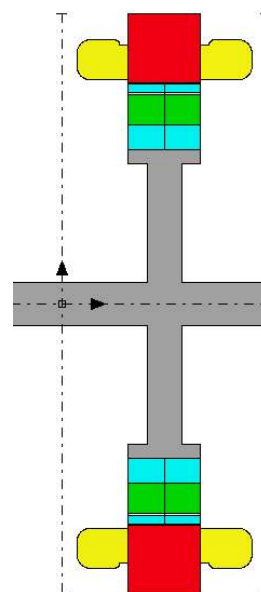
何彪 王少勃

车用永磁电机功率密度大，热负荷趋于极限。因此对电机损耗计算精度要求越来越高，尤其是绕组损耗。通常情况下，电机设计工程师仅计算直流电阻引起的损耗，然而由于导线的集肤效应、邻近效应以及电流谐波等都会增大电机的绕组损耗，且这三方面是相互作用的。

本文以雪弗兰 Volt 电机为例，在 Motor-CAD 软件环境下计及集肤效应、邻近效应以及 PWM 电流谐波对电机的绕组损耗进行计算并与不考虑 PWM 电流谐波的损耗对比。下图所示为电机的径向、切向结构图。



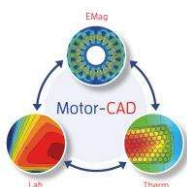
径向尺寸



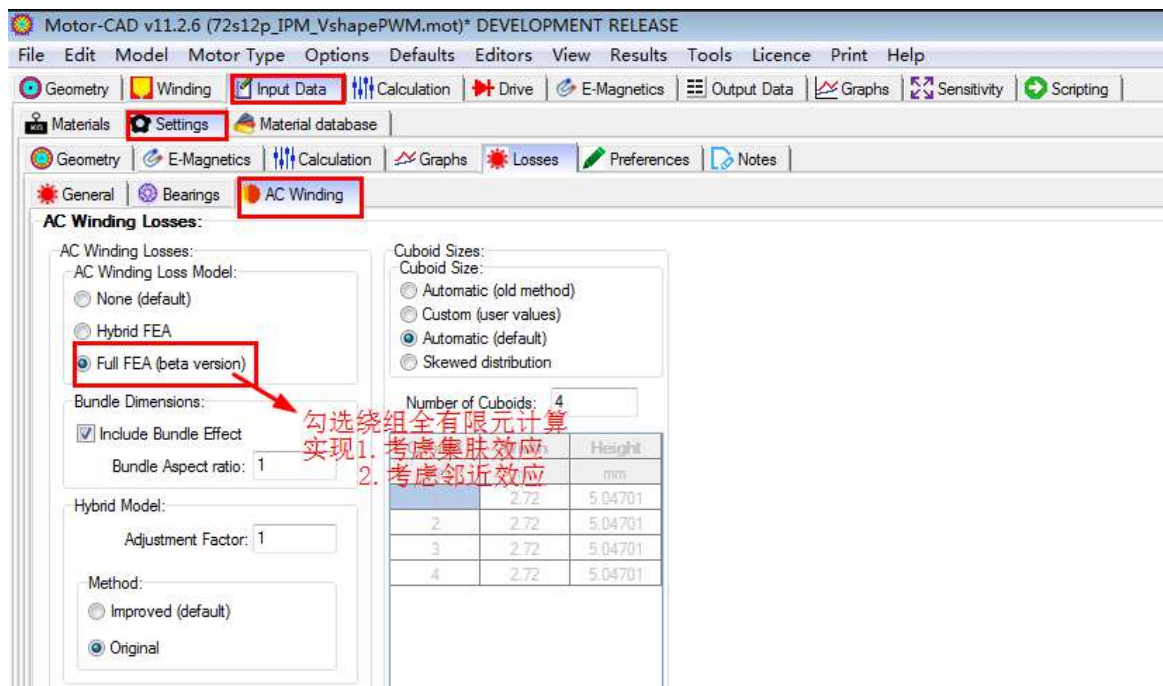
轴向尺寸

计及集肤效应、邻近效应以及 PWM 电流谐波的车用永磁同步电机绕组损耗计算设置如下所示：

选择设置选项的 AC Winding 中的 Full FEA，此选项选择后，绕组导线在计算过程中将自动剖分加密，自动考虑电流基波和 PWM 高次谐波引起的交流铜损问题。设置非常简便，设置完毕即可进行计算。

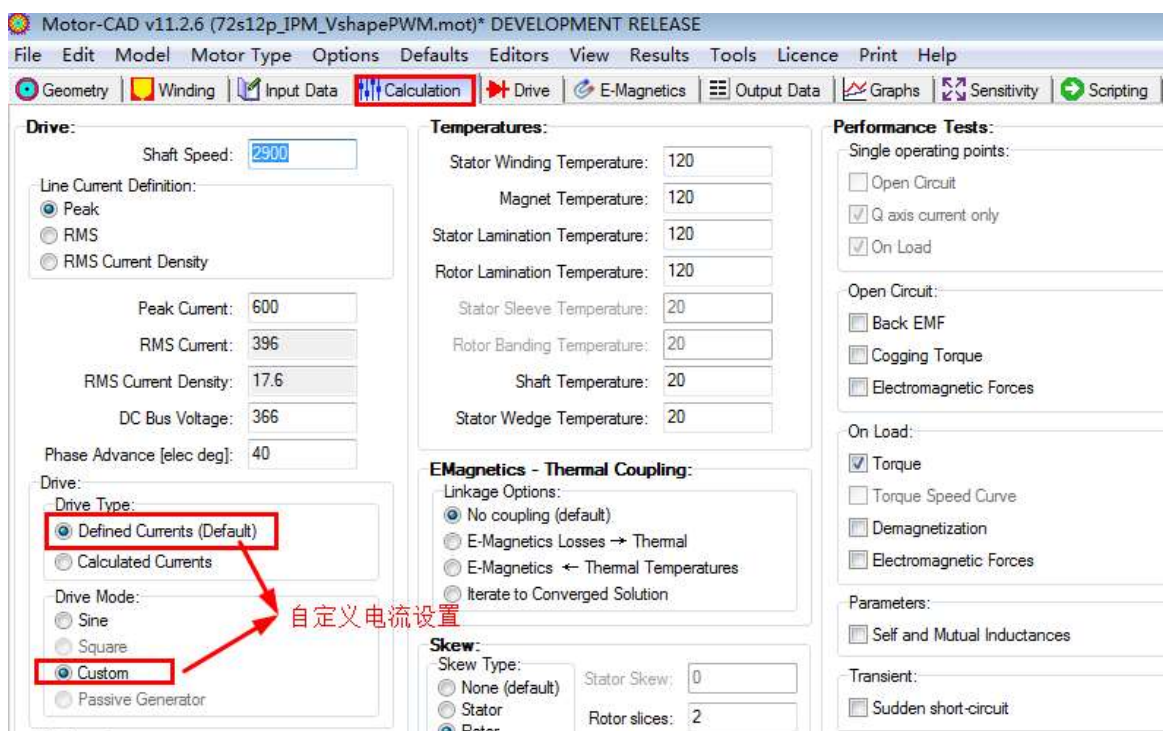


北京天源博通科技有限公司
Motor-CAD&MANATEE 技术团队
北京海淀区复兴路 65 号电信实业大厦 812 室
电话:010-68221702

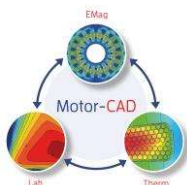


考虑交流损耗计算

设置完毕后，载入具有 PWM 高次谐波的电流源波形，具体步骤如下：



电流自定义设置

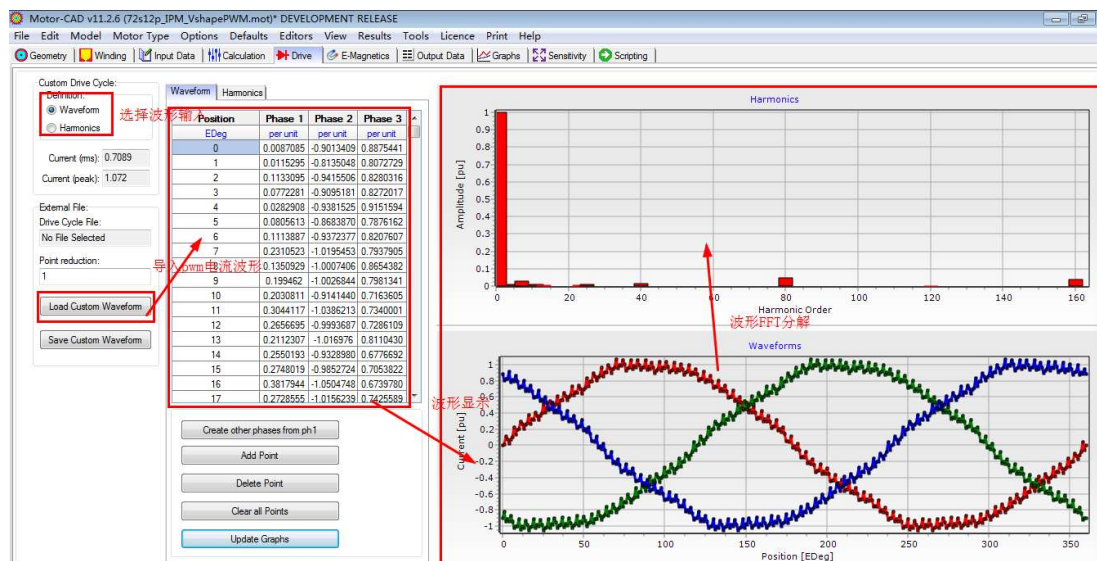


北京天源博通科技有限公司

Motor-CAD&MANATEE 技术团队

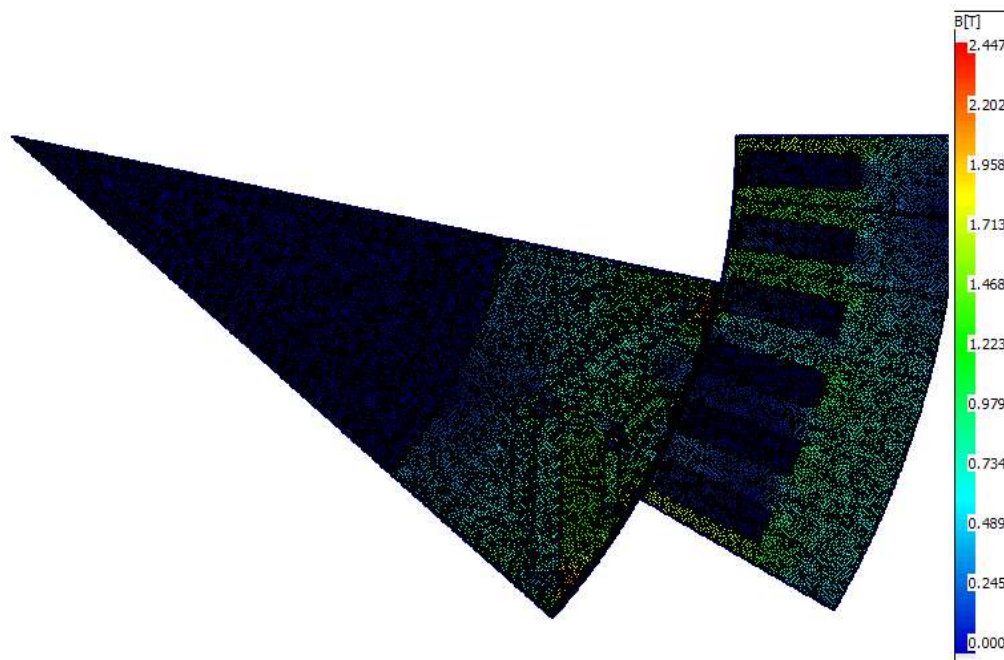
北京海淀区复兴路 65 号电信实业大厦 812 室

电话:010-68221702

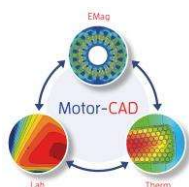


PWM 电流波形导入

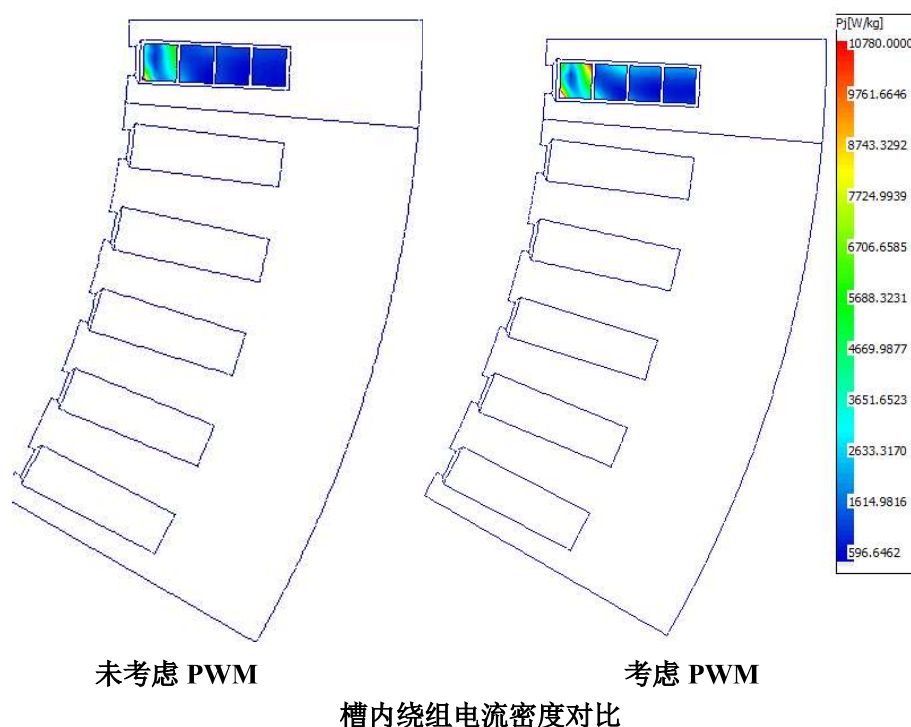
至此，计及集肤效应、邻近效应以及 PWM 电流谐波的车用永磁同步电机绕组损耗计算设置完成，下图为考虑 PWM 谐波电流和不考虑 PWM 谐波电流的损耗密度对比图。从图中可知，由于集肤效应、邻接效应引起的绕组损耗主要集中在槽口绕组上，且分布于导线的边缘、靠近槽内的部分损耗密度更大；考虑 PWM 谐波后，导线边缘损耗密度更大。



自动化加密网格



北京天源博通科技有限公司
Motor-CAD&MANATEE 技术团队
北京海淀区复兴路 65 号电信实业大厦 812 室
电话:010-68221702



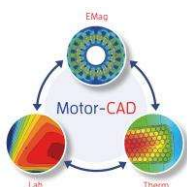
下表所示为考虑 PWM 谐波电流和不考虑 PWM 谐波电流绕组损耗对比。从结果可知，考虑 PWM 谐波后，定子直流电阻损耗有微小的增大，交流铜耗有明显的增大。

工况	2900rpm@383N.m—I _{rms} : 424.3/40°			
损耗类型	绕组直流损耗		绕组交流损耗	
损耗源	基波	基波+PWM 谐波	基波	基波+PWM 谐波
铜耗/W	6687	6725	2154	2860

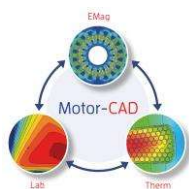
结论:

1. Motor-CAD 在计算过程中可以充分考虑了电源的基波和谐波电流引起的集肤效应和临近效应交流损耗，而且设置非常简单，只需选择绕组损耗有限元分析计算即可，无需复杂的设置及操作。

2. 由于集肤效应、邻接效应引起的绕组损耗主要集中在槽口绕组上，且分布于导线的边缘、靠近槽内的部分损耗密度更大；考虑 PWM 谐波后，导线边缘损耗密度更大。



3. 考虑 PWM 谐波后，定子直流电阻损耗有微小的增大，交流铜耗有明显的增大。



北京天源博通科技有限公司
Motor-CAD&MANATEE 技术团队
北京海淀区复兴路 65 号电信实业大厦 812 室
电话:010-68221702