



ICSC 2019

Core Competence Enhanced by MBD



IDAJ CAE Solution Conference

基于丰田普锐斯2017发夹式电机 考虑谐波的绕组交流损耗分析(2D和3D)

IDAJ中国—电磁技术部 陈天赠

一、概述

一、概述

- ✓ 永磁电机的主要功率损耗部件是铁芯，磁钢和绕组。Hair-Pin电机在高速时有较大的绕组涡流损耗，特别是发生在绕组端部的损耗。发生在端部绕组区域中的磁力线模式不同于铁芯中的绕组长度内的磁力线模式。
- ✓ 这些损耗可以通过直流和涡流损耗来定义，直流绕组损耗很容易通过绕组的电路分析来计算，并且是算术计算。涡流损耗分量是由于导体相互靠近产生的磁场的各种影响而引起的。这通常是通过创建原型和对线圈部件进行繁琐的测量来估计的。这将使设计工作流程既昂贵又耗时。
- ✓ 然而，通过在JMAG中将线圈创建三维模型并进行3D的有限元分析，可以相对快速和经济地分析涡流损耗。

二、交流损耗概述

二、交流损耗概述

通常导体中的集肤效应（也称趋肤效应）和邻近效应都是同时存在的，集肤效应与邻近效应统称涡流效应，同时集肤效应和邻近效应引起的损耗定义为涡流损耗，涡流损耗和直流铜损耗统称为交流损耗：

$$P_{ac}(\text{交流损耗}) = P_{dc}(\text{直流损耗}) + P_{sk}(\text{趋肤损耗}) + P_{pr}(\text{邻近损耗}) = P_{dc}(\text{直流损耗}) + P_{eddy}(\text{涡流损耗})$$

- 为描述导体趋肤效应与邻近效应的严重程度，定义导线交流铜耗与直流铜耗之比为系数 k ：

$$k = \frac{P_{ac}}{P_{dc}}$$

二、交流损耗概述

- 定子槽内的导体在基波漏磁通和谐波漏磁通作用下产生涡流（eddy current），因电机转速高、频率高，导体内的涡流较大，不可忽略。

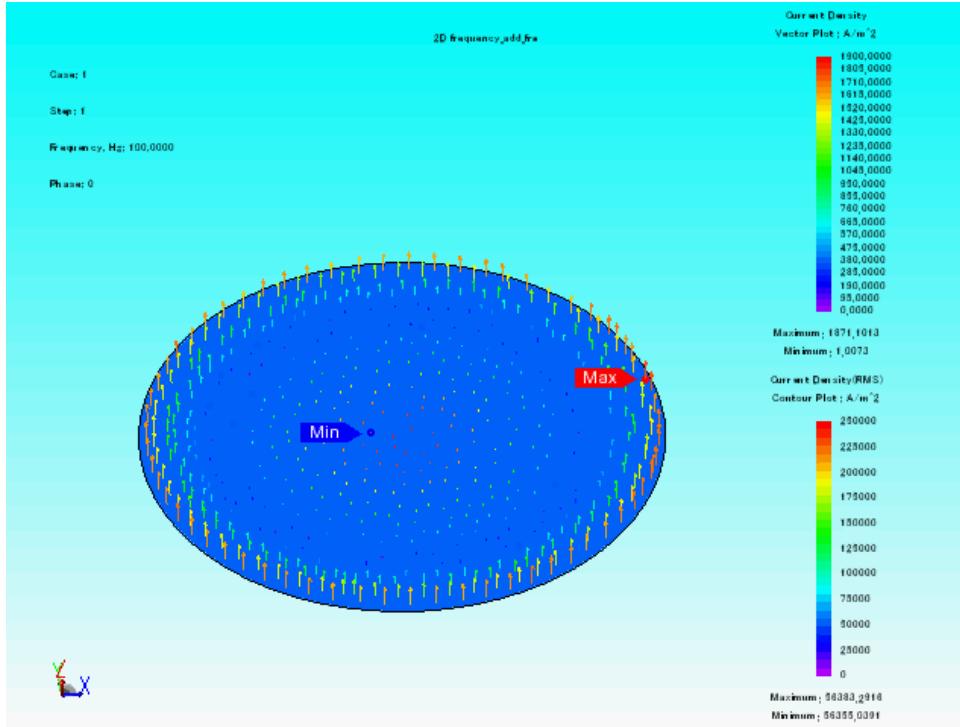
- 产生定子涡流的磁通有三部分：
 - ✓ 电机的基频磁通。
 - ✓ 定子开槽、铁心饱和及转子运动产生的高频谐波磁场，常称为内部谐波。
 - ✓ PWM逆变器产生的高频谐波，常称为外部谐波。

三、导线交流损耗分析

三、导线交流损耗分析

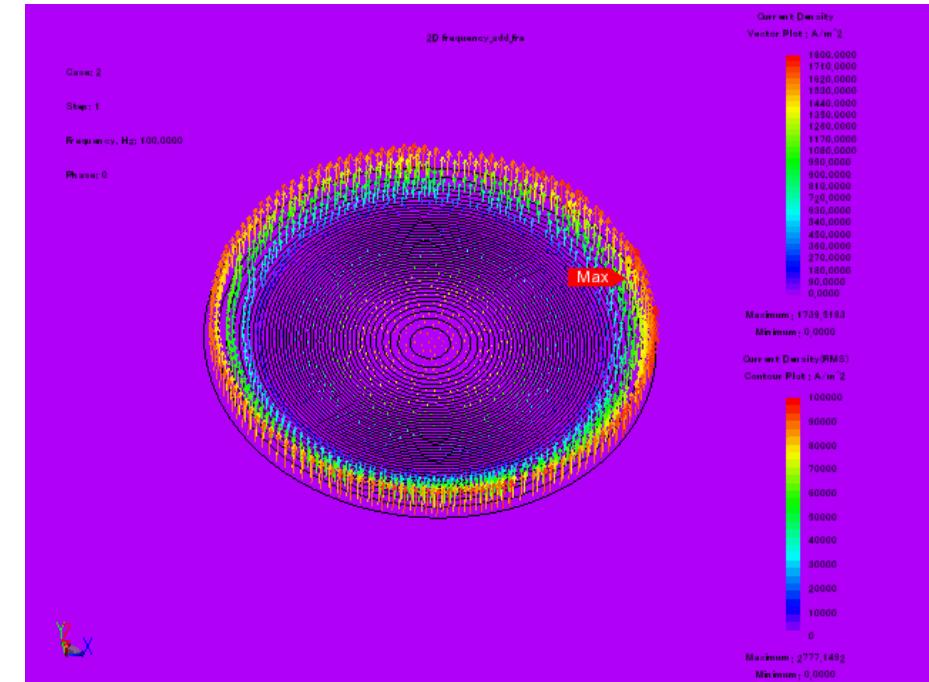
1、集肤效应

- 高速和PWM引起的高频分量。
 - 集肤效应增加了损耗。

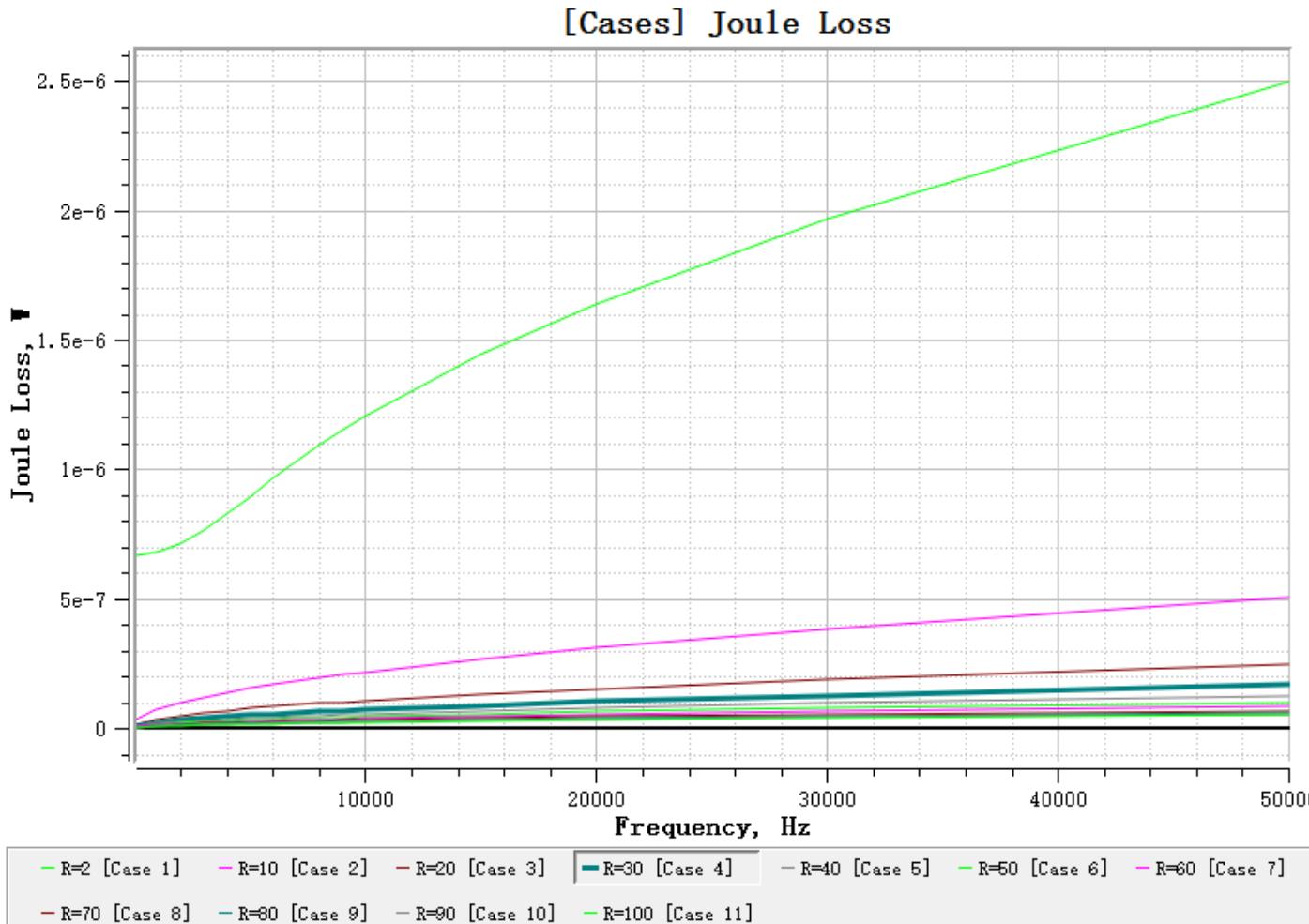


• 图1 电流密度和频率关系云图

- ✓ 左图为交流电流施加于单根导线，从图1可以看出较高的频率如高速会导致集肤效应加强并增加损耗。



三、导线交流损耗分析



✓ 从左图可以看出，随着频率增加，总铜损耗增加。图中不同曲线表示不同的导体半径。

•图2 焦耳损耗和频率关系云图

三、导线交流损耗分析

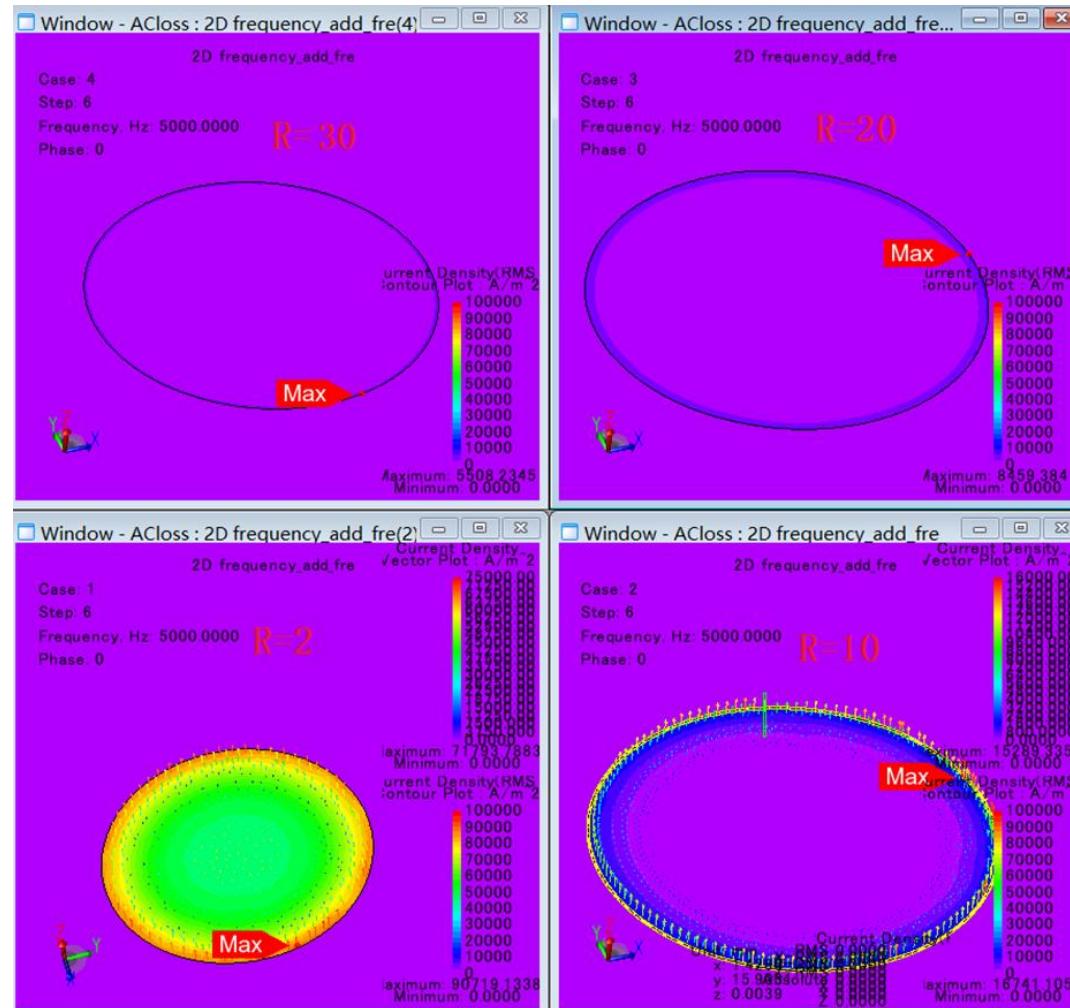
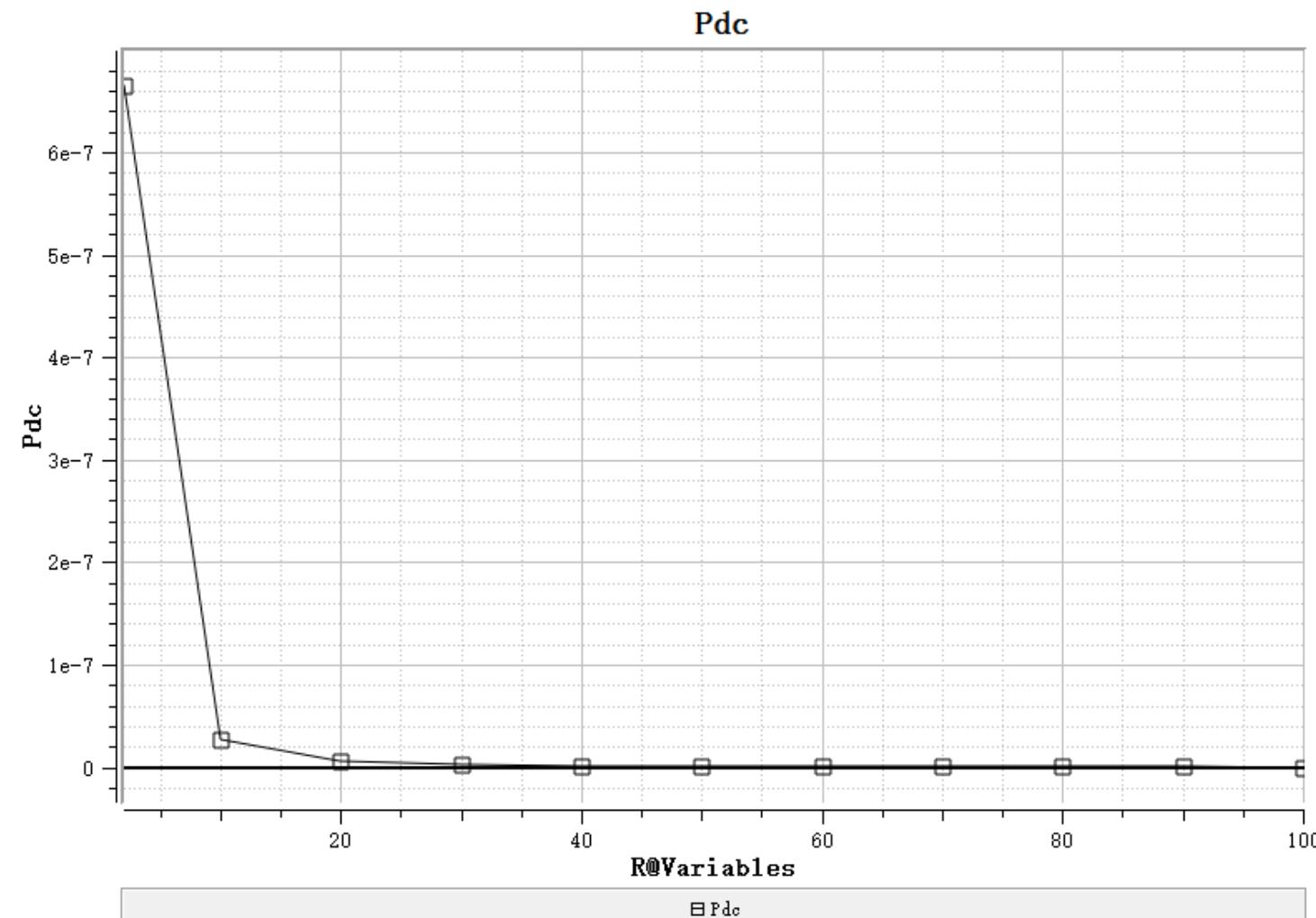


图3 电流密度和导体大小关系云图

✓ 从左图可以看出，导体变大，集肤效应加强。

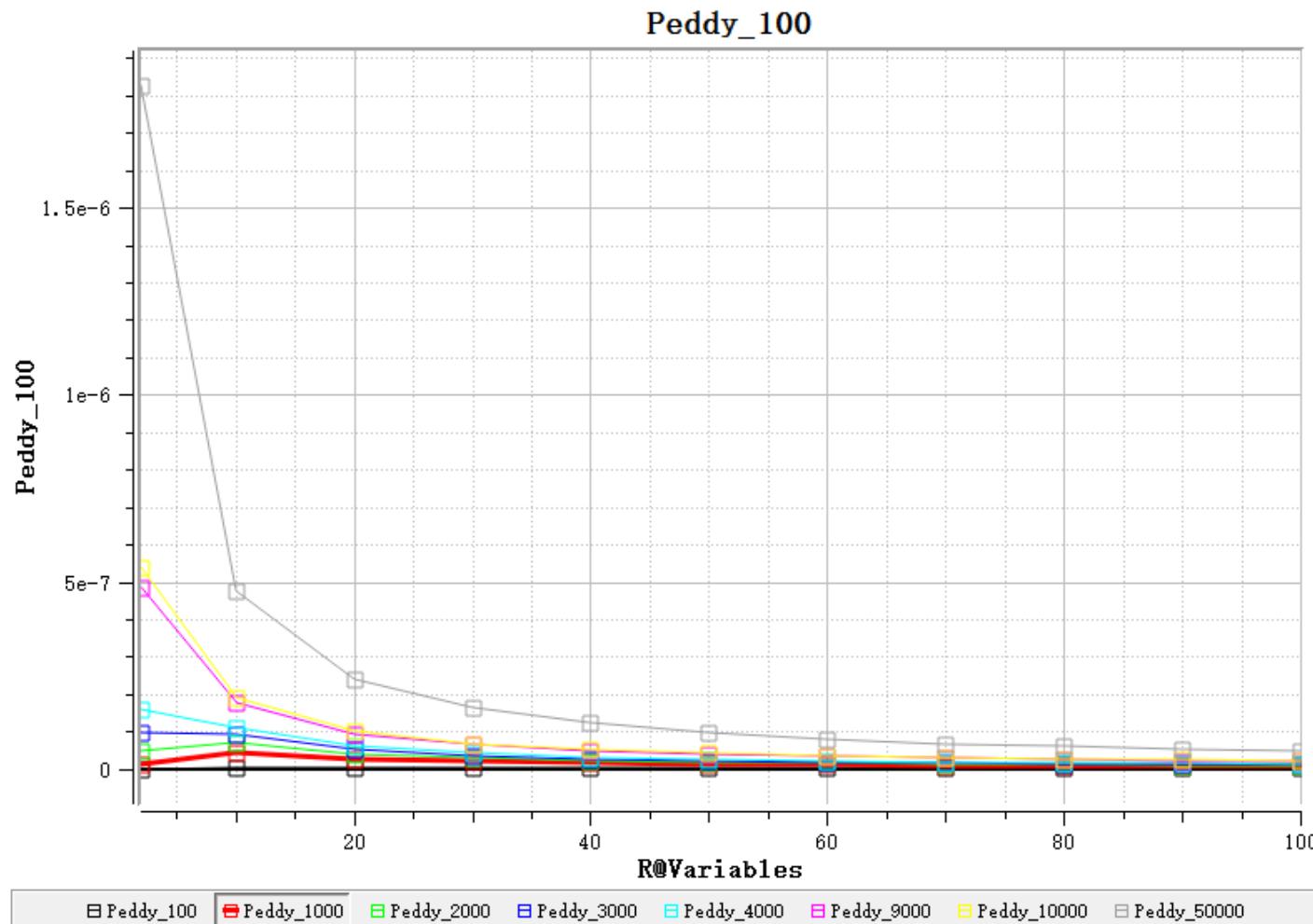
三、导线交流损耗分析



•图4 直流损耗和导体大小关系云图

✓ 从左图可以看出，导体变大，直流损耗越小，而且根据公式，它和导体半径平方成反比。

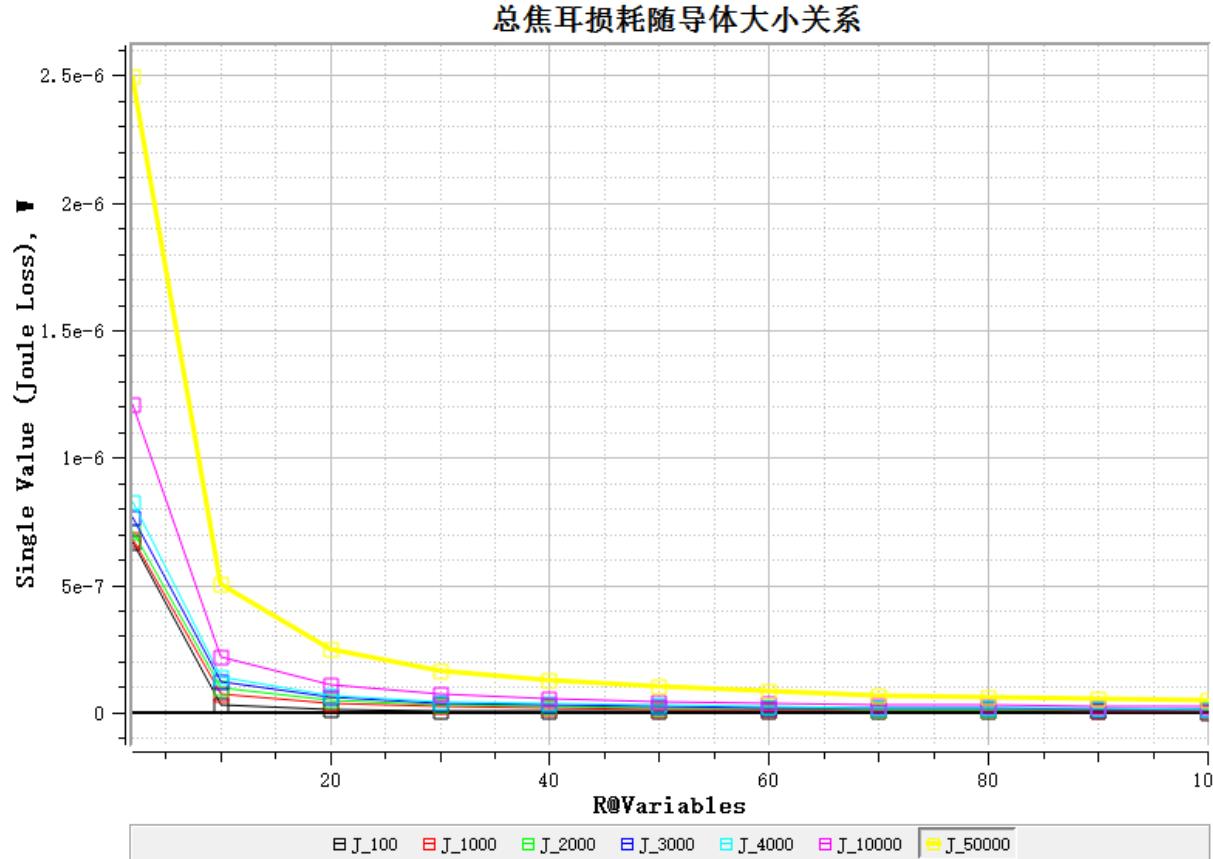
三、导线交流损耗分析



✓ 从左图可以看出，导体变大，在频率较低且半径较小时涡流损耗增大，而在频率较高时，随着导体变大，涡流损耗减小。

• 图5 涡流损耗和导体大小关系云图

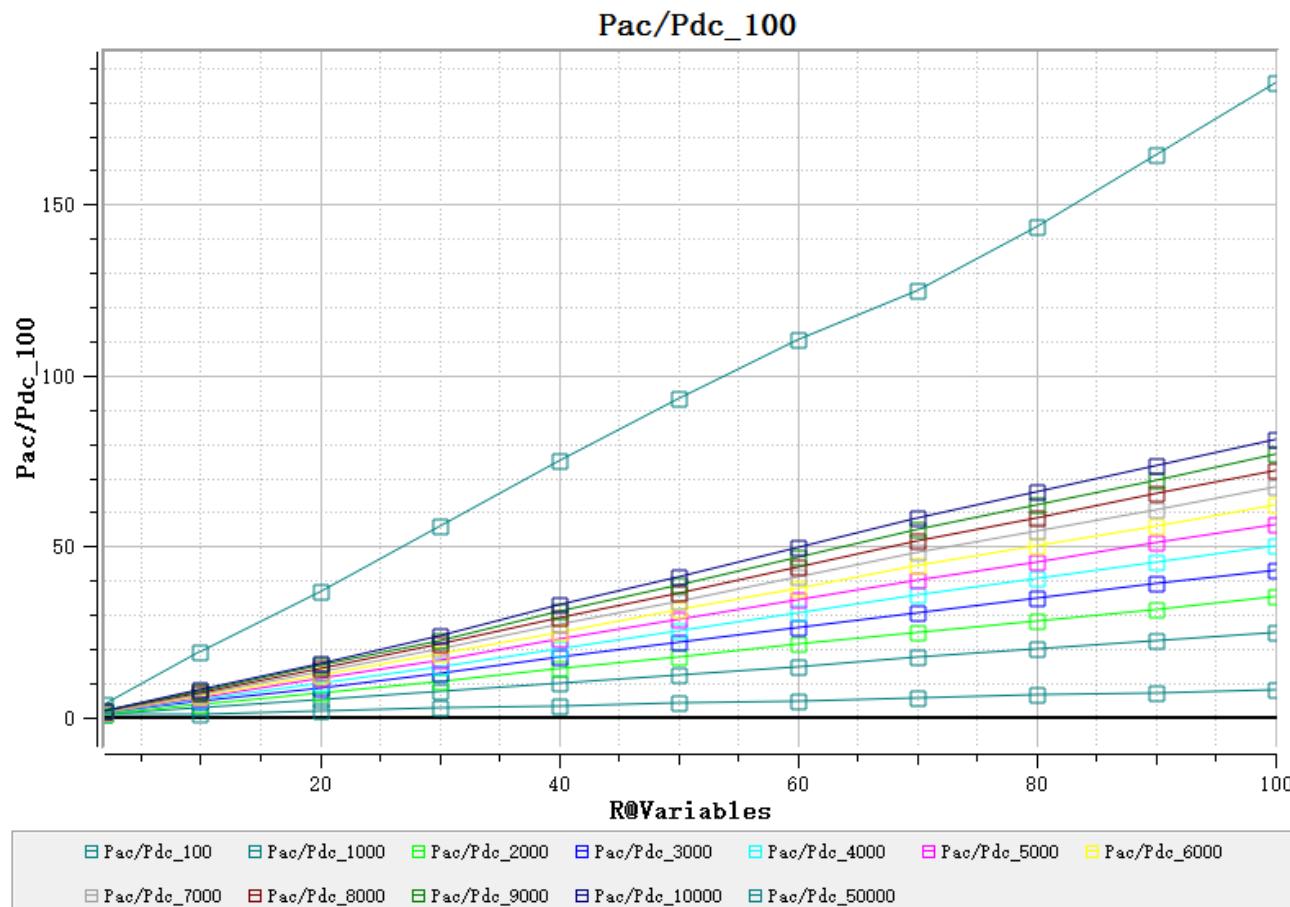
三、导线交流损耗分析



- ✓ 从左图可以看出，导体变大，总焦耳损耗减小。左图不同曲线为不同频率的曲线。

图6 总焦耳损耗和导体大小关系云图

三、导线交流损耗分析



✓ 从左图可以看出，随着导体增加，Pac/Pdc系数变大，可见导体越大，集肤现象加强。从图4和图6可知，导体变大，直流损耗和交流损耗均变小，但是直流损耗减低的更多，所以Pac/Pdc系数变大。

• 图7 Pac/Pdc和导体大小关系云图

三、导线交流损耗分析

2、邻近效应

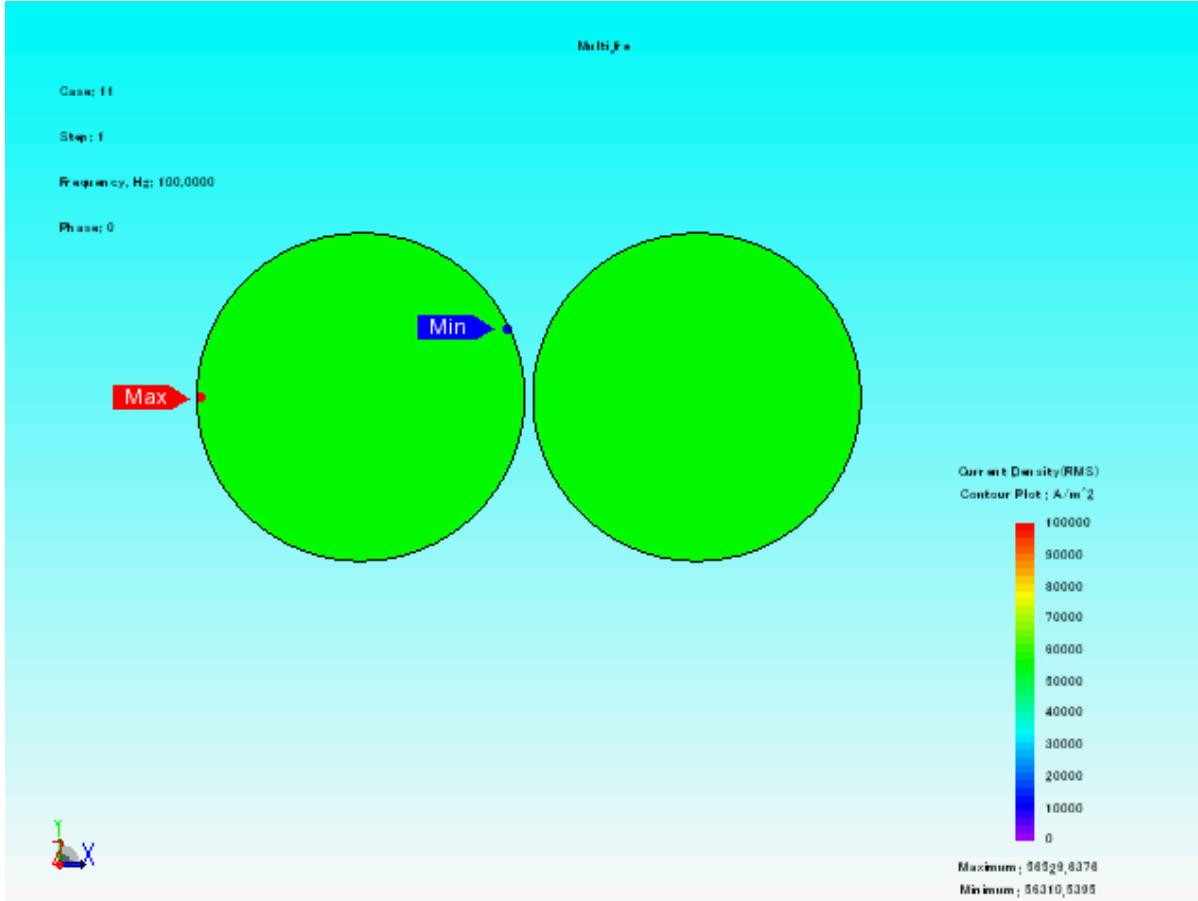


图8 电流密度和频率关系云图

✓ 从图8可以看出较高的频率如高速会导致邻近效应加强并增加损耗。

三、导线交流损耗分析

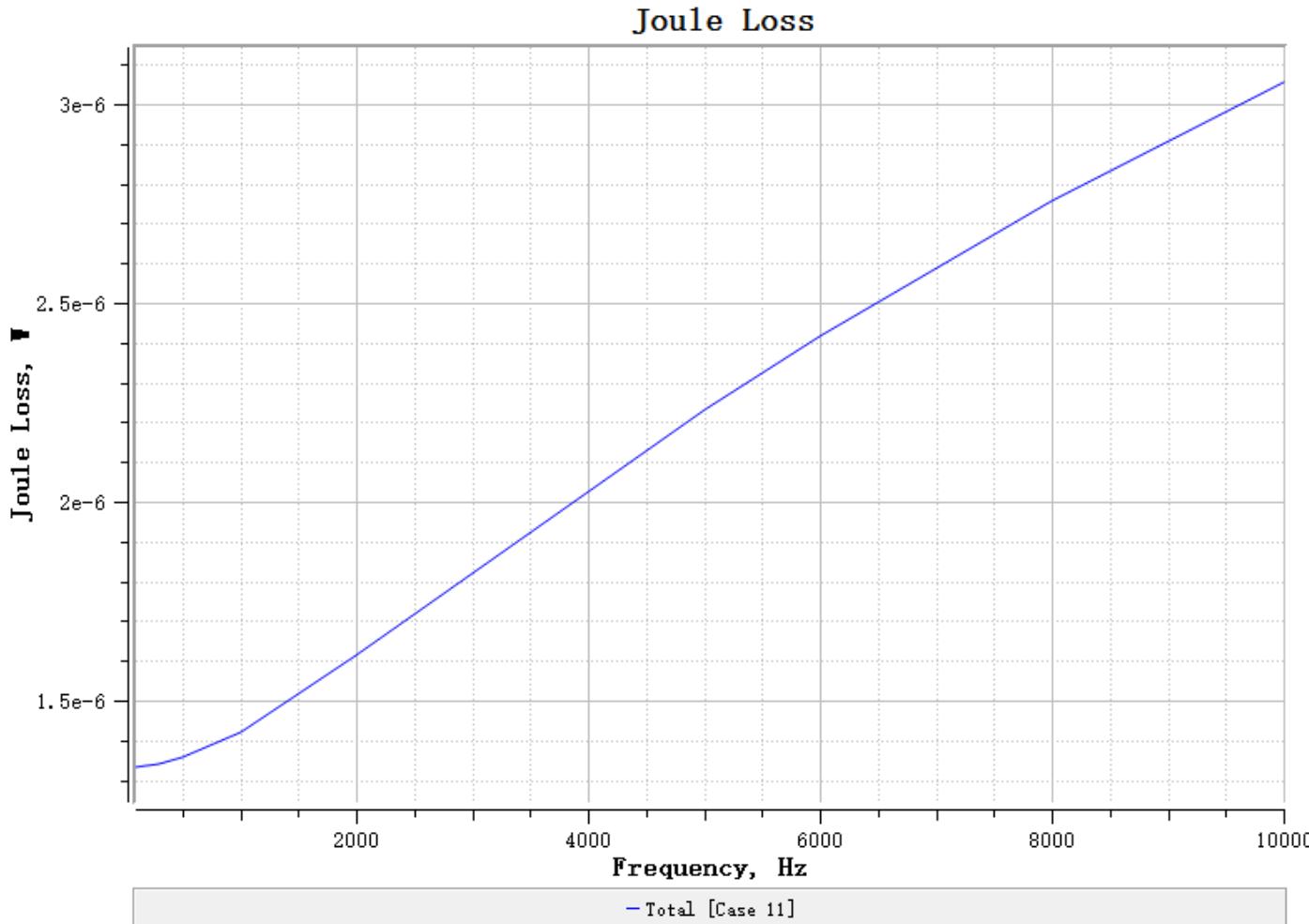
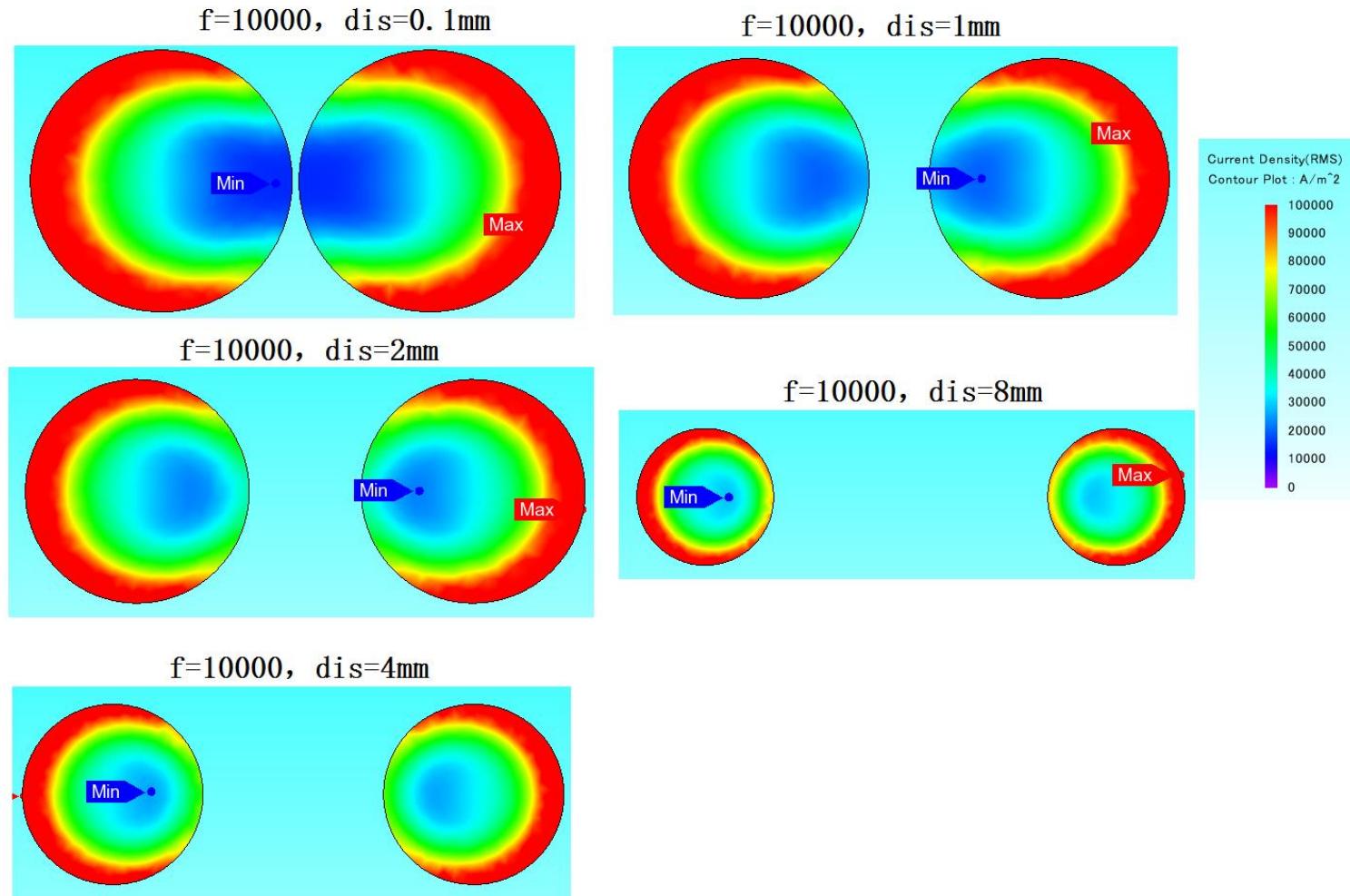


图9 焦耳损耗和频率关系云图

- ✓ 从左图可以看出，随着频率增加，焦耳损耗增加。

三、导线交流损耗分析



✓ 从左图可以看出，两根导体距离变大，临近效应减弱。

图10 $R=2\text{mm}$ 时电流密度和导体距离关系云图

三、导线交流损耗分析

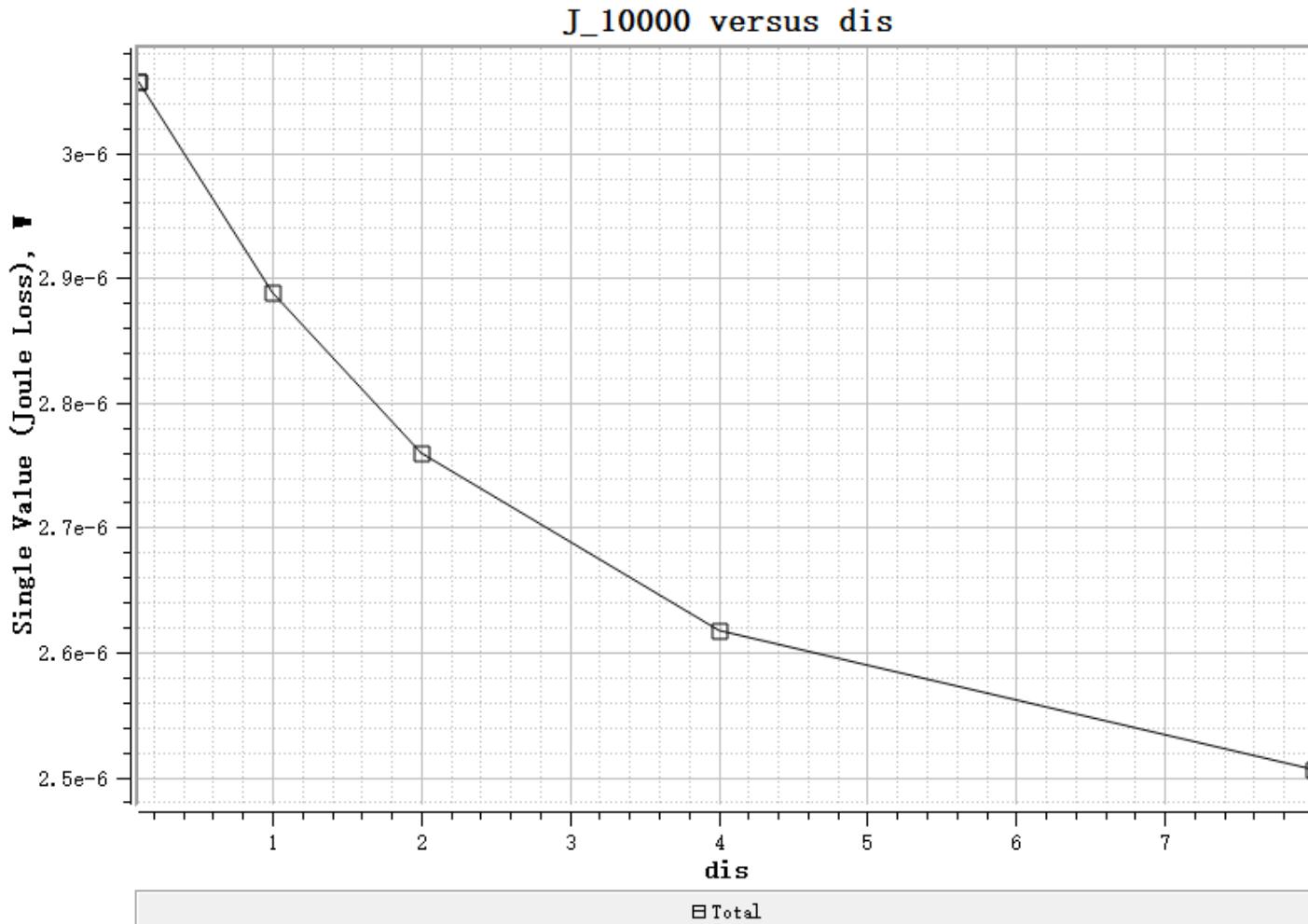


图11 R=2mm时焦耳总损耗和导体距离曲线图

- ✓ 从左图可以看出，两根导体距离变大，焦耳总损耗越小。

三、导线交流损耗分析

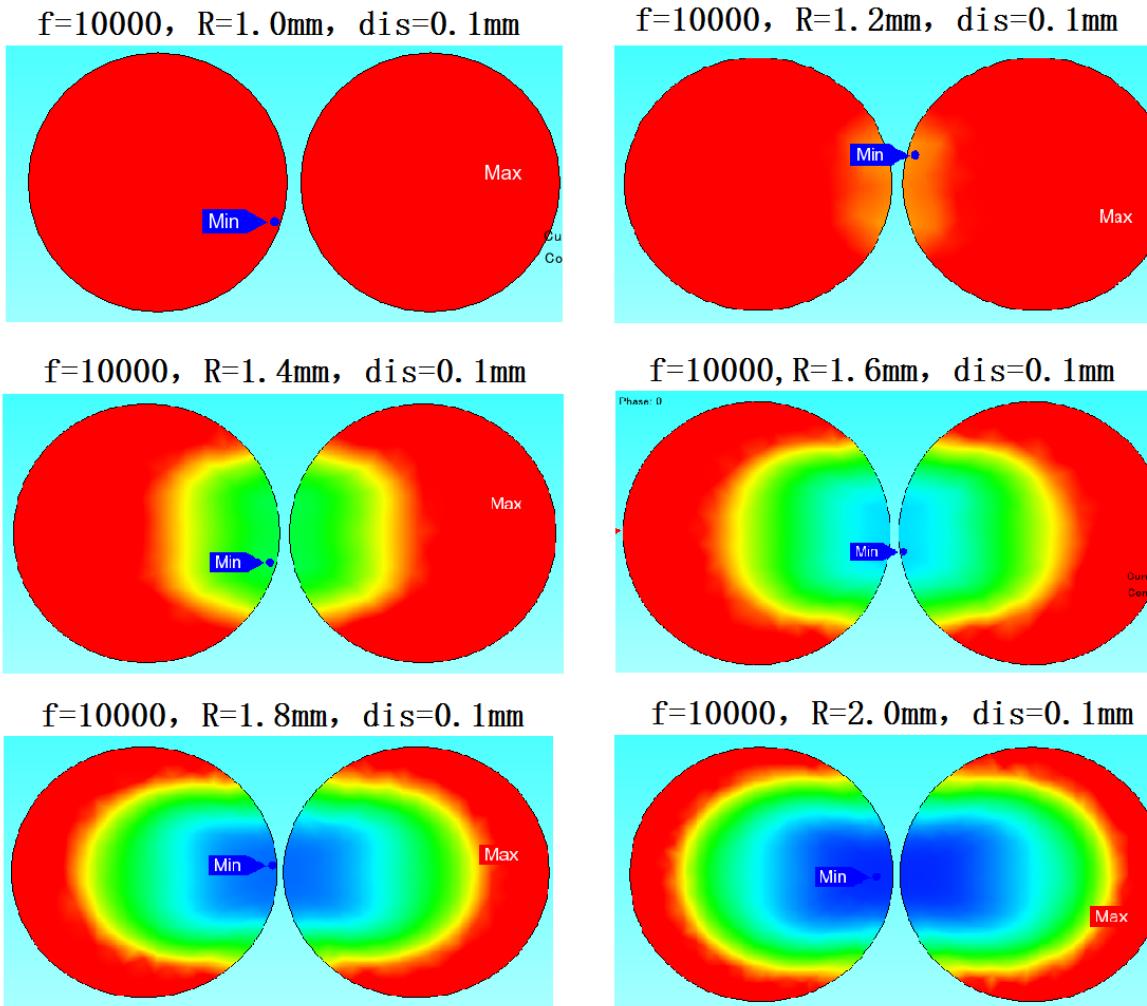


图12 $dis=0.1\text{mm}$ 时临近效应和导体距离曲线图

✓ 从左图可以看出，两根导体变大，则临近效应加强。

三、导线交流损耗分析

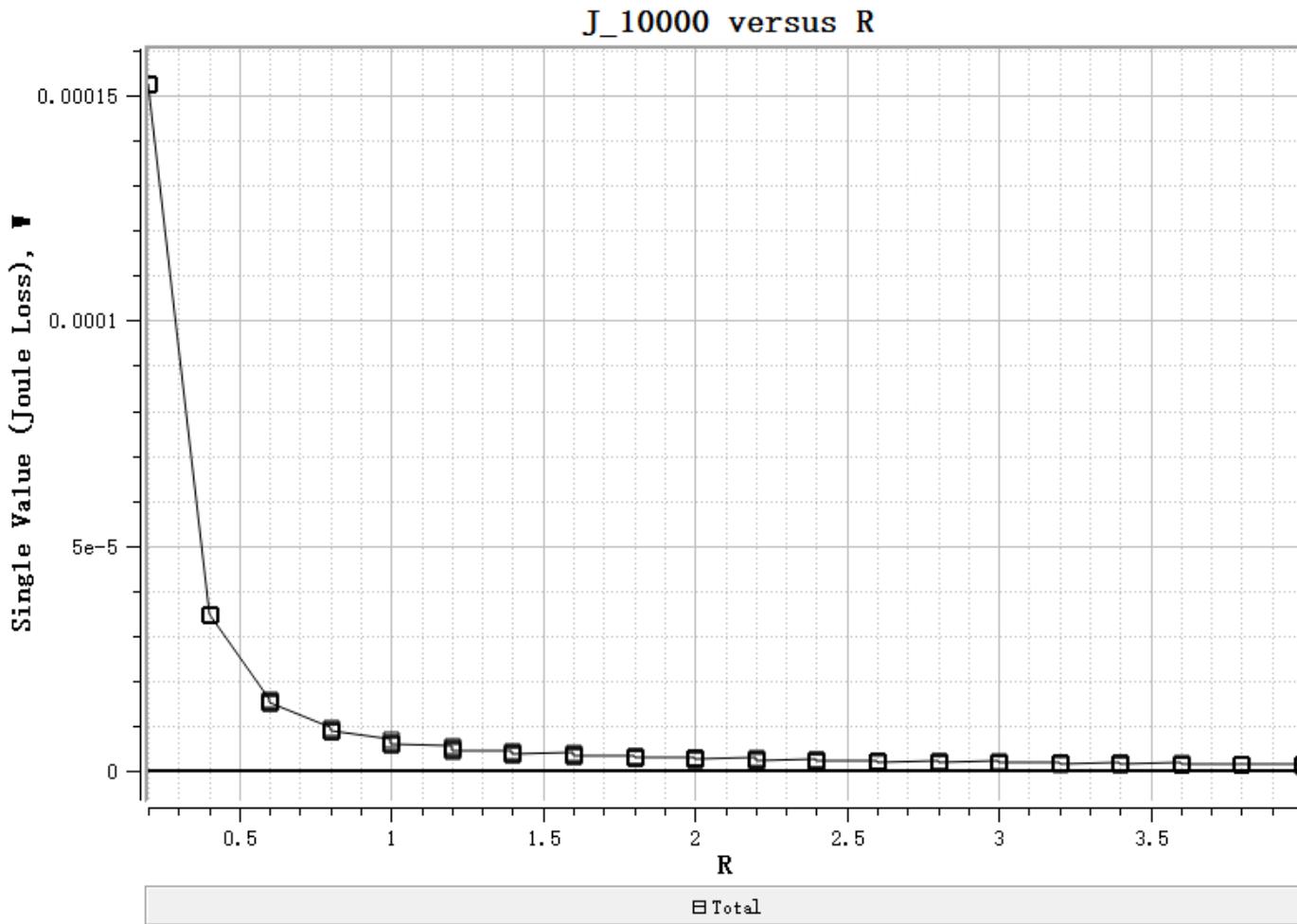


图13 R=2mm时焦耳总损耗和导体距离曲线图

- ✓ 从左图可以看出，两根导体半径变大，焦耳总损耗越小。

三、导线交流损耗分析

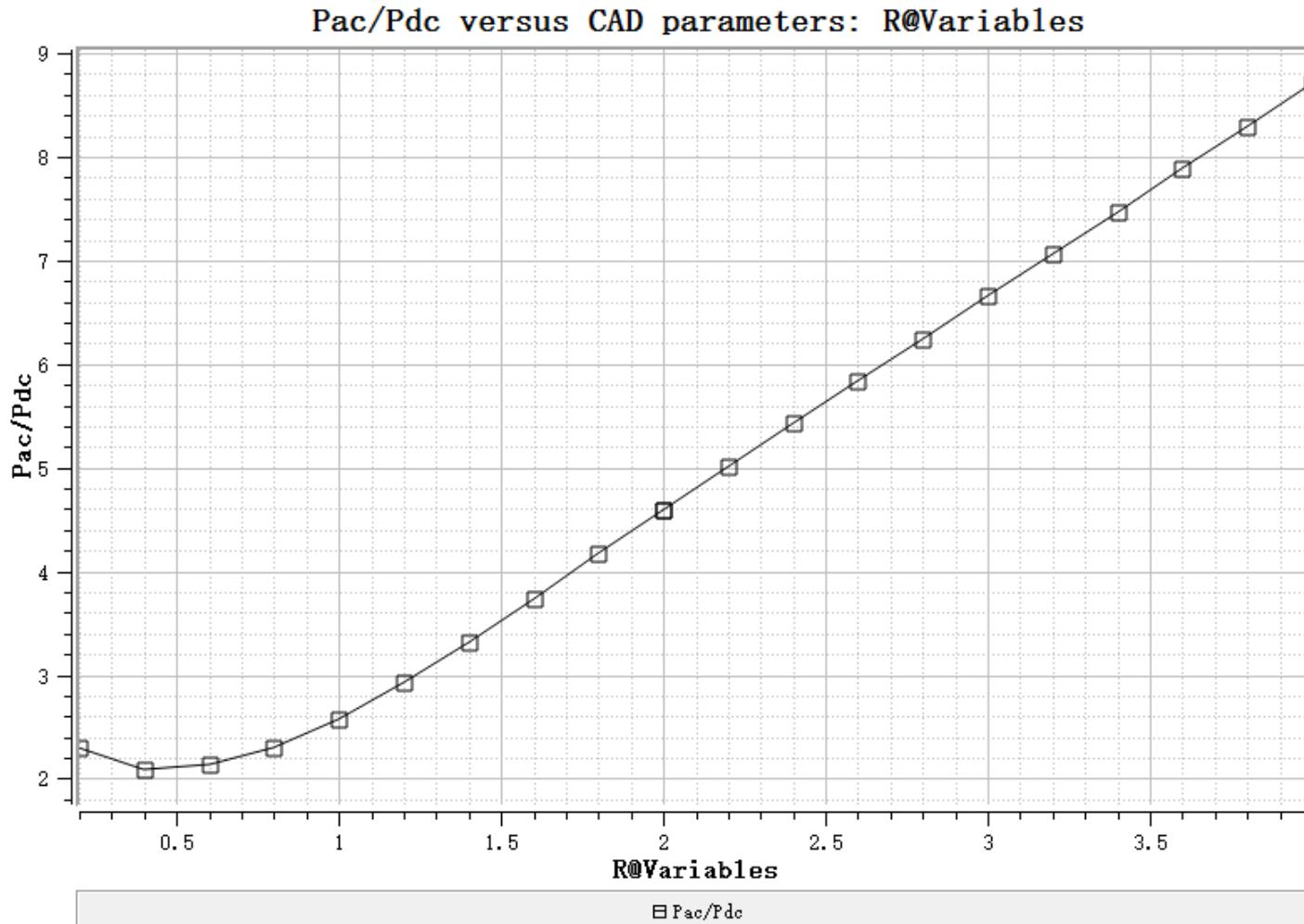


图14 R=2mm时焦耳总损耗和导体距离曲线图

- ✓ 从左图可以看出，当导体半径在1.0以上（从图12可以看出一般导体小于1.0mm，临近效应几乎没有），随着导体增加，Pac/Pdc增大，进一步说明导体越大，临近效应加强。

四、普锐斯2017年电机案例分析

四、普锐斯2017年电机案例分析

1、丰田普锐斯2017电机模型和参数

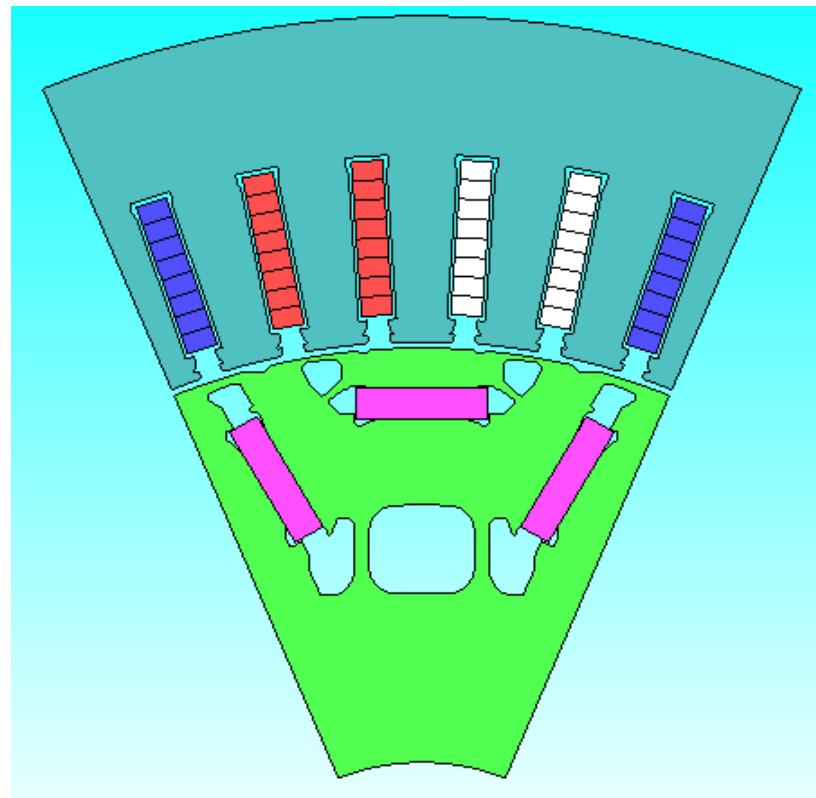


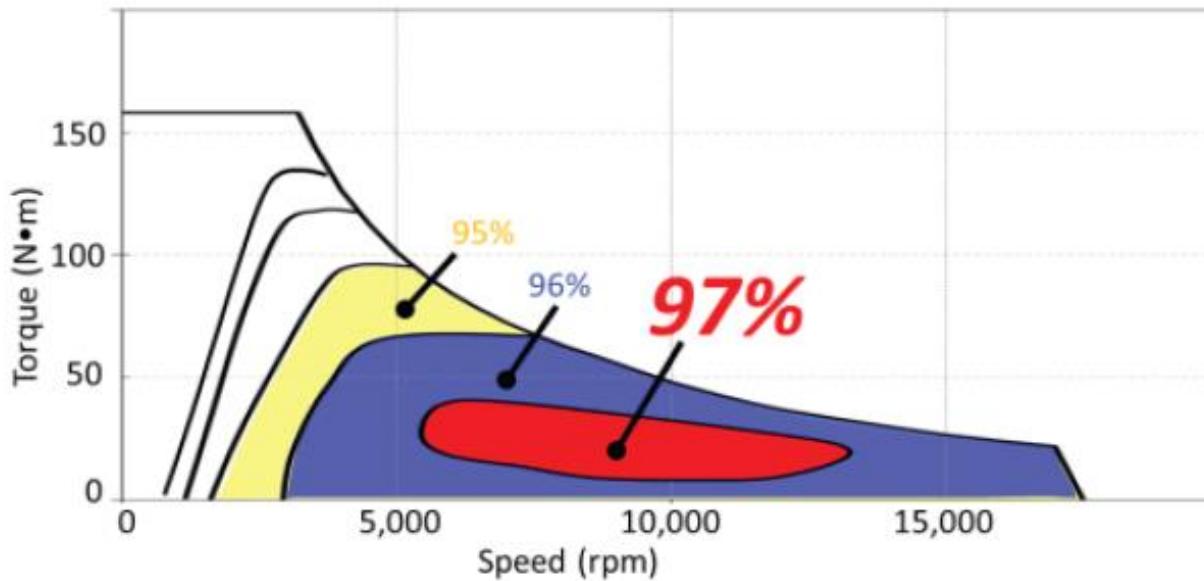
图15 丰田Prius 2017电机模型

主要参数/单位	数值
极数/槽数	8/48
定子外径/ mm	215
转子外径/ mm	140.5
气隙长度/ mm	0.7
铁心长度/ mm	61

✓ 左图为丰田普锐斯第四代电机的JMAG模型。
同时表中给出了该电机的基本结构尺寸。

四、普锐斯2017年电机案例分析

2、4个重要工况点



工况	转速	转矩	功率
爬坡点	1000	168	17.6
峰值功率点	3015	168	53.0
高效点	6000	40	25.1
高速点	17000	15	26.7

图16 丰田Prius 2017电机模型

- ✓ 假定丰田普锐斯的4个重要工况点数据如上表所示，主要包括爬坡点、峰值功率点、高效点和高速点，效率MAP设置时包含了这4个重要的工况。

四、普锐斯2017年电机案例分析

3、正弦波电流供电的2D模型交直流铜损计算

	转给定速	给定转矩	计算转矩	直流电阻Rdc	直流铜损耗Pdc	交流铜损耗Pac	Pac/Pdc
爬坡点	1000	168	168.75	0.048	4856.39	4893.83	1.01
峰值功率点	3015	168	168.48	0.048	4856.39	5185.05	1.07
高效点	6000	40	39.98	0.048	344.23	448.30	1.30
高速点	17000	15	14.99	0.048	194.70	650.21	3.34
对比点	1000	15	14.99	0.048	194.70	196.35	1.01

- ✓ 直流铜损Pdc为根据 $I^2 R$ 计算或者将软件使用FEM Coil条件计算得到的铜损耗。
- ✓ 交流铜损耗Pac为考虑扁线涡流损耗时的总铜损耗。
- ✓ 使用Pac/Pdc分析扁线电机涡流损耗的严重程度。
- ✓ 从上面可以看出低速时, 如1000rpm和3015rpm, 几乎都是直流铜损, 随着转速升高, Pac/Pdc系数增加, 扁线电机的涡流损耗加剧。甚至在17000rpm时交流铜损达到直流铜损的3.34倍。

四、普锐斯2017年电机案例分析

3、正弦波电流供电的2D模型交直流铜损计算

	转给定速	给定转矩	计算转矩	直流电阻Rdc	直流铜损耗Pdc	交流铜损耗Pac	Pac/Pdc
高速点	17000	15	14.99	0.048	194.70	650.21	3.34
对比点	1000	15	14.99	0.048	194.70	196.35	1.01

- ✓ 上表两个工况转矩一样，即给定的电流幅值和相位一样，因此直流铜损是一样的。
- ✓ 一样负载情况下，转速升高，涡流损耗增加，交流总铜损17000rpm是1000rpm的3.31倍左右。

四、普锐斯2017年电机案例分析

3、正弦波电流供电的2D模型交直流铜损计算

	转给定速	给定转矩	计算转矩	直流电阻Rdc	直流铜损耗Pdc	交流铜损耗Pac	Pac/Pdc
爬坡点	1000	168	168.75	0.048	4856.39	4893.83	1.01
对比点	1000	15	14.99	0.048	194.70	196.35	1.01

- ✓ 上表两个工况转速一样，转矩不同，因此直流铜损不同，但是Pac/Pdc是一样。因此认为两者集肤效应和邻近效应效果是一样。

四、普锐斯2017年电机案例分析

4、PWM谐波电流供电的2D模型交直流铜损计算

	转给定速	给定转矩	计算转矩	直流电阻Rdc	直流铜损耗Pdc	交流铜损耗Pac	Pac/Pdc
爬坡点	1000	168	168.75	0.048	4904.95	4994.71	1.02
峰值功率点	3015	168	168.48	0.048	4905.23	5545.90	1.13
高效点	6000	40	39.98	0.048	347.71	567.14	1.63
高速点	17000	15	14.99	0.048	196.64	740.16	3.76
对比点	1000	15	14.99	0.048	196.64	207.70	1.06

- ✓ 本分析是在电流中加入了10Khz谐波的PWM电流波形。
- ✓ 与正弦电流的情况一样，含PWM谐波的分析也是随着转速升高，涡流损耗的占比逐渐增大。当转速达到高速点时，总铜损耗可达到直流铜损的3.76倍，因此需要关注高速带来的涡流损耗增加。

四、普锐斯2017年电机案例分析

4、PWM谐波电流供电的2D模型交直流铜损计算

	直流电阻Rdc	直流铜损耗Pdc_正弦波电流	直流铜损耗Pdc_PWM电流	直流铜损增量
爬坡点	0.048	4856.39	4904.95	48.56
峰值功率点	0.048	4856.39	4905.23	48.56
高效点	0.048	344.23	347.71	3.44
高速点	0.048	194.70	196.64	1.95
对比点	0.048	194.70	196.64	1.95

- ✓ 通过对比正弦波电流和PWM谐波电流的直流铜损，可知PWM谐波下直流铜损有所增加，原因是谐波同样产生了直流铜损。

四、普锐斯2017年电机案例分析

4、PWM谐波电流供电的2D模型交直流铜损计算

	交流铜损耗 Pac_正弦波电 流	交流铜损耗Pac_含 10Khz的PWM电流	交流铜损耗增量	涡流铜损耗增量	Pac/Pdc_正弦波电 流	Pac/Pdc_含 10Khz的PWM电 流
爬坡点	4893.83	4994.71	100.88	52.32	1.01	1.02
峰值功 率点	5185.05	5545.90	360.85	312.29	1.07	1.13
高效点	448.30	567.14	118.84	115.39	1.30	1.63
高速点	650.21	740.16	89.95	88.00	3.34	3.76
对比点	196.35	207.70	11.35	9.41	1.01	1.06

- ✓ PWM谐波电流比正弦波电流的总铜损增加，包含了直流铜损增加和涡流损耗的增加。因此PWM谐波会加剧扁线中的涡流效应。

四、普锐斯2017年电机案例分析

4、PWM谐波电流供电的2D模型交直流铜损计算

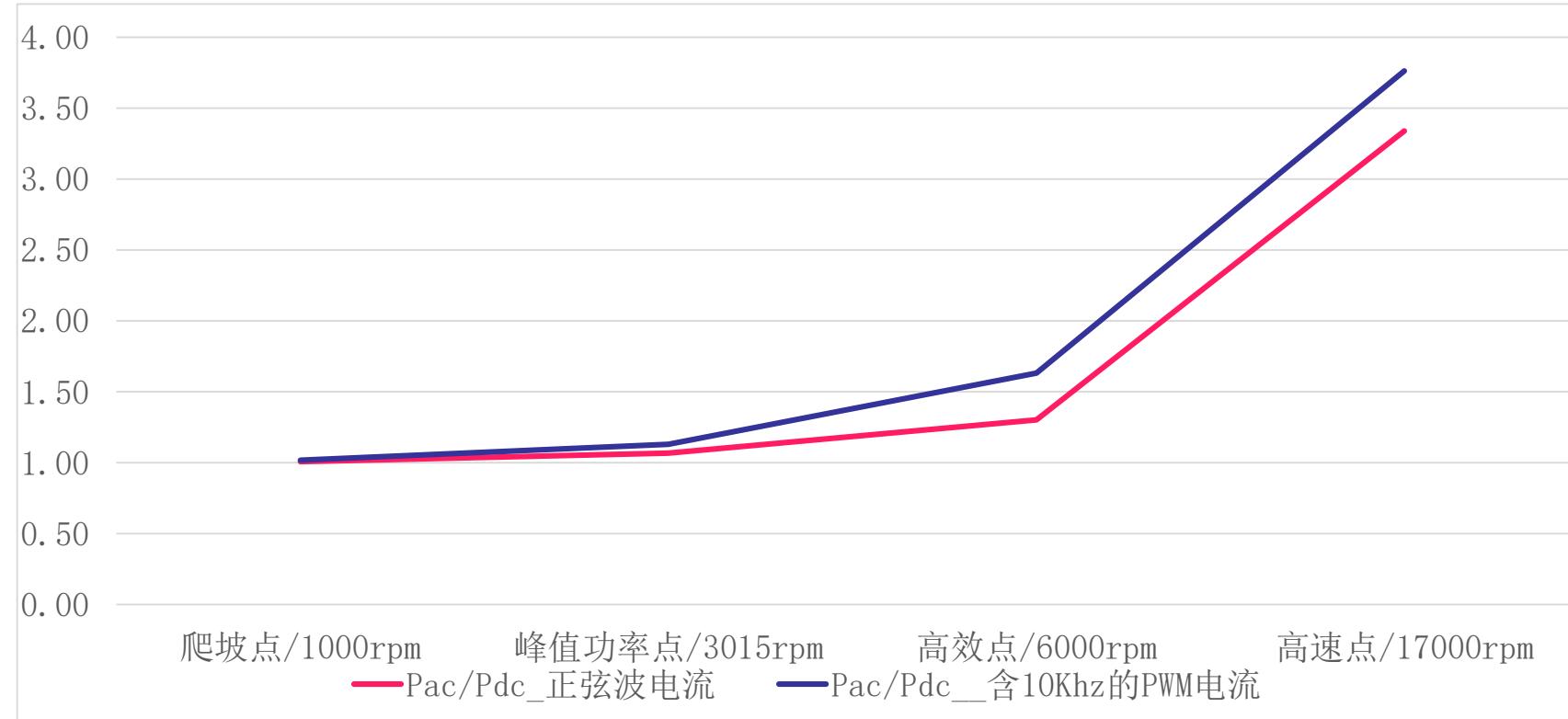


图17 丰田Prius 2017电机模型

- ✓ 从上图很明显能够看出随着转速升高，无论通入的是正弦波还是具有PWM谐波的电流，涡流损耗的占比在不断提高，PWM谐波电流对涡流损耗的影响更大。

四、普锐斯2017年电机案例分析

5、PWM谐波电流供电的3D模型交直流铜损计算

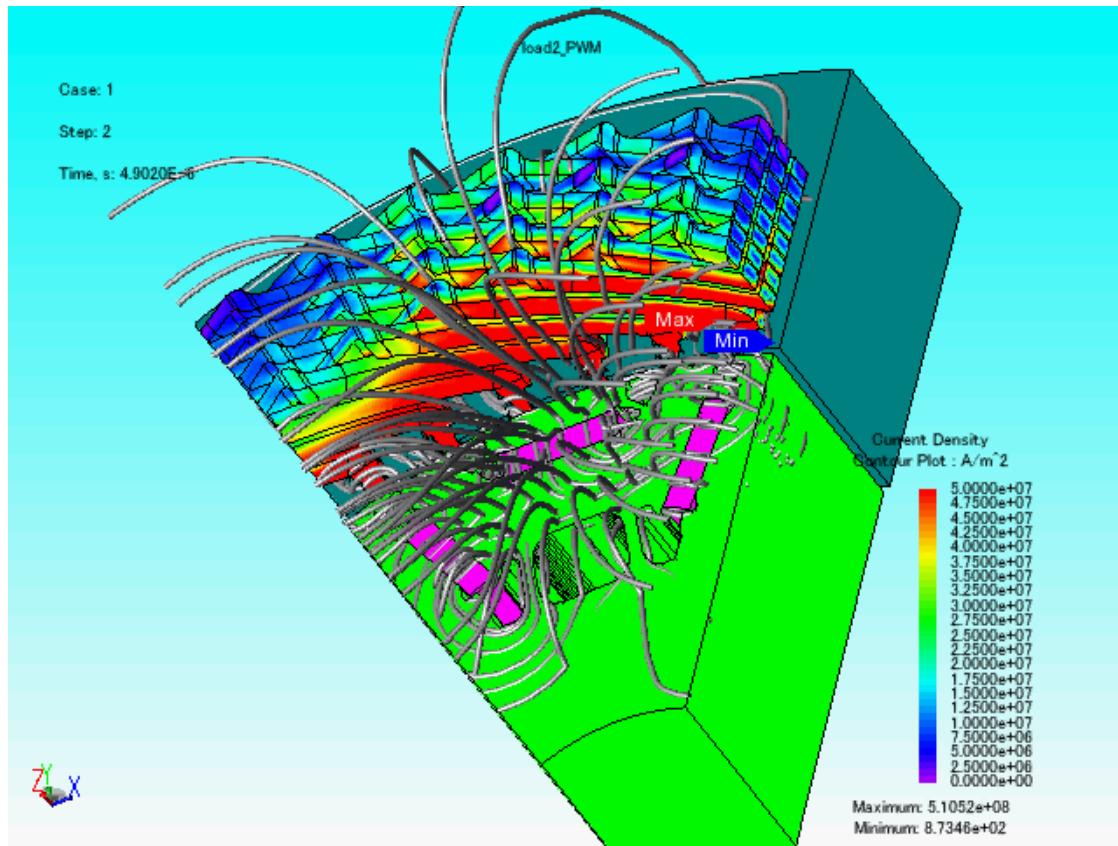


图18 丰田Prius 2017电机3D磁力线和电流密度云图

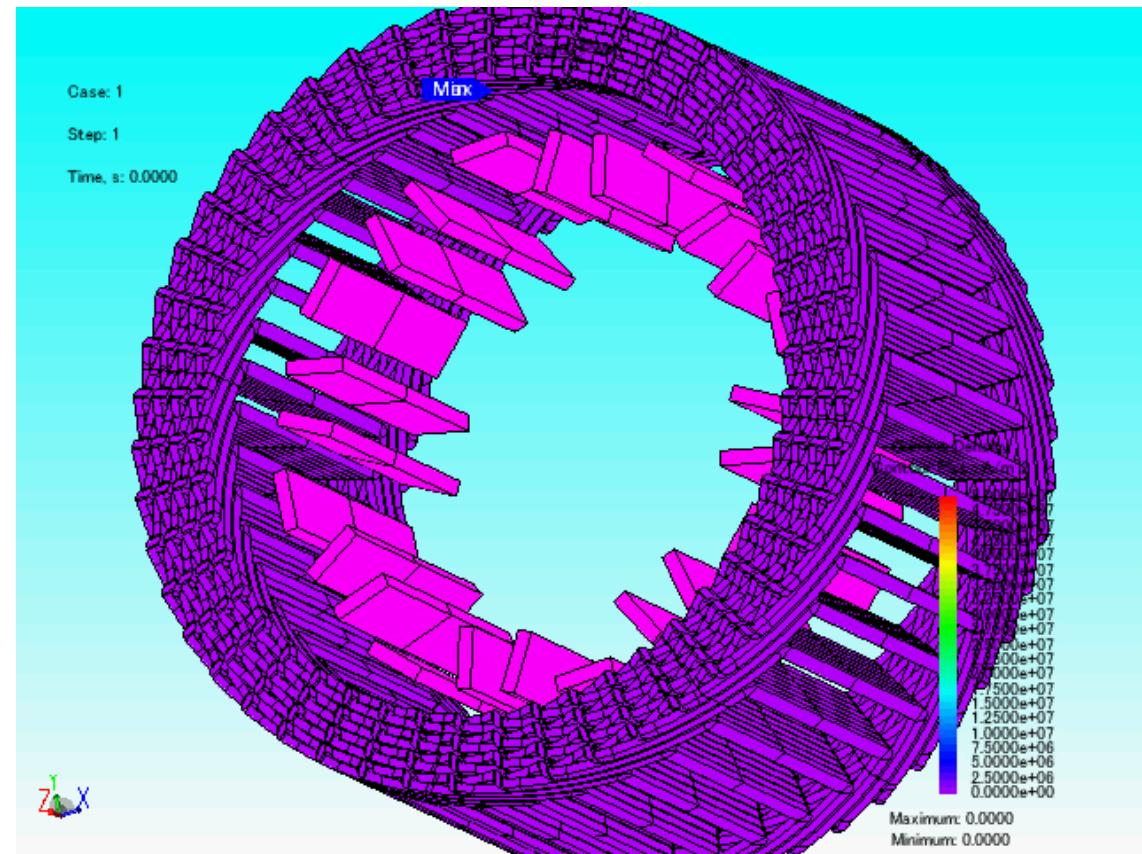


图19 丰田Prius 2017电机全模型电流密度云图

四、普锐斯2017年电机案例分析

5、PWM谐波电流供电的3D模型交直流铜损计算

	给定转矩	转给定速	直流铜损-2D	直流铜损-3D	交流铜损-2D	交流铜损-3D	Pac/Pdc-2D	Pac/Pdc-3D
高速点	15	17000	196.64	196.64	740.16	907.42	3.76	4.61

- ✓ 3D的交流损耗占比比2D的交流损耗占比高了0.85，3D增加的交流铜损占输入功率的0.6%，因此不能忽略端部的涡流效应。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

1、扁线长宽比和交流损耗的关系

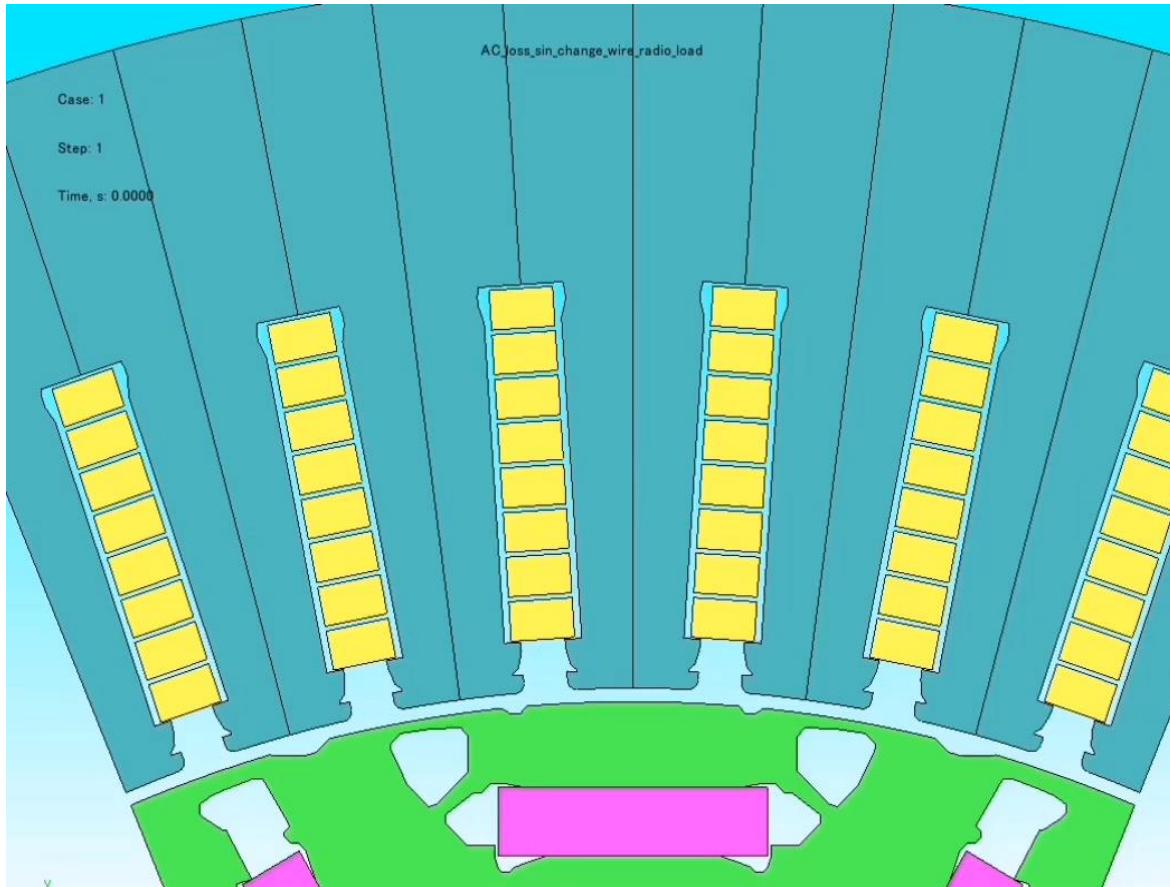


图20 矩形线长宽比变化图

- ✓ 本分析在长宽比变化过程，确保矩形线和槽四周的边的距离不变。
- ✓ 本分析确保矩形线面积不变。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

1、扁线长宽比和交流损耗的关系

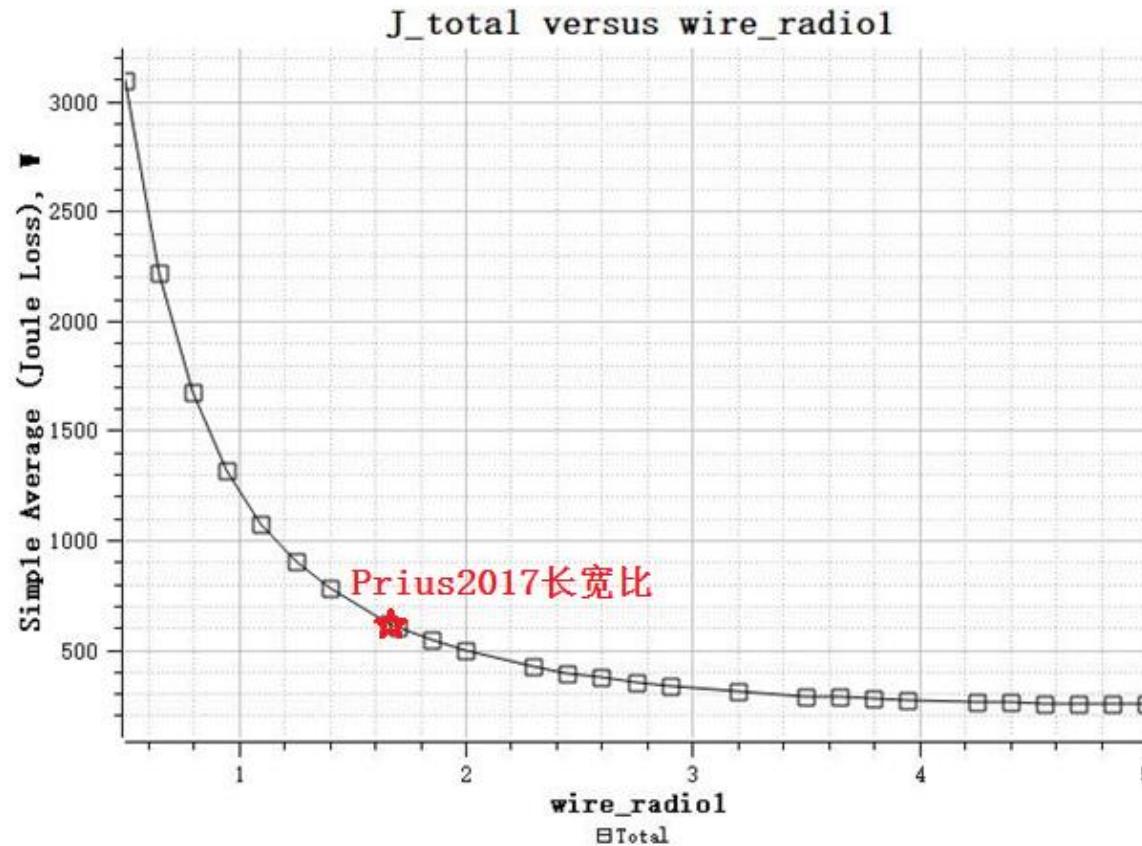


图 21 总的铜损和矩形线长宽比系数关系曲线

- ✓ 本分析为了确保在长宽比系数变化时，定子齿部和轭部尺寸也在变换，它们将影响饱和度，因此本分析将定子材料设置linear_10000，即磁导率为10000，保证导磁，减小磁饱和对长宽比分析的干扰。
- ✓ 从左图可以看出，随着长宽比增加，总的铜损减小，即涡流损耗减小。
- ✓ 左图标定了Prius2017方案的长宽比，可见它选择的长宽比已经使涡流损耗比较低了。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

1、扁线长宽比和交流损耗的关系

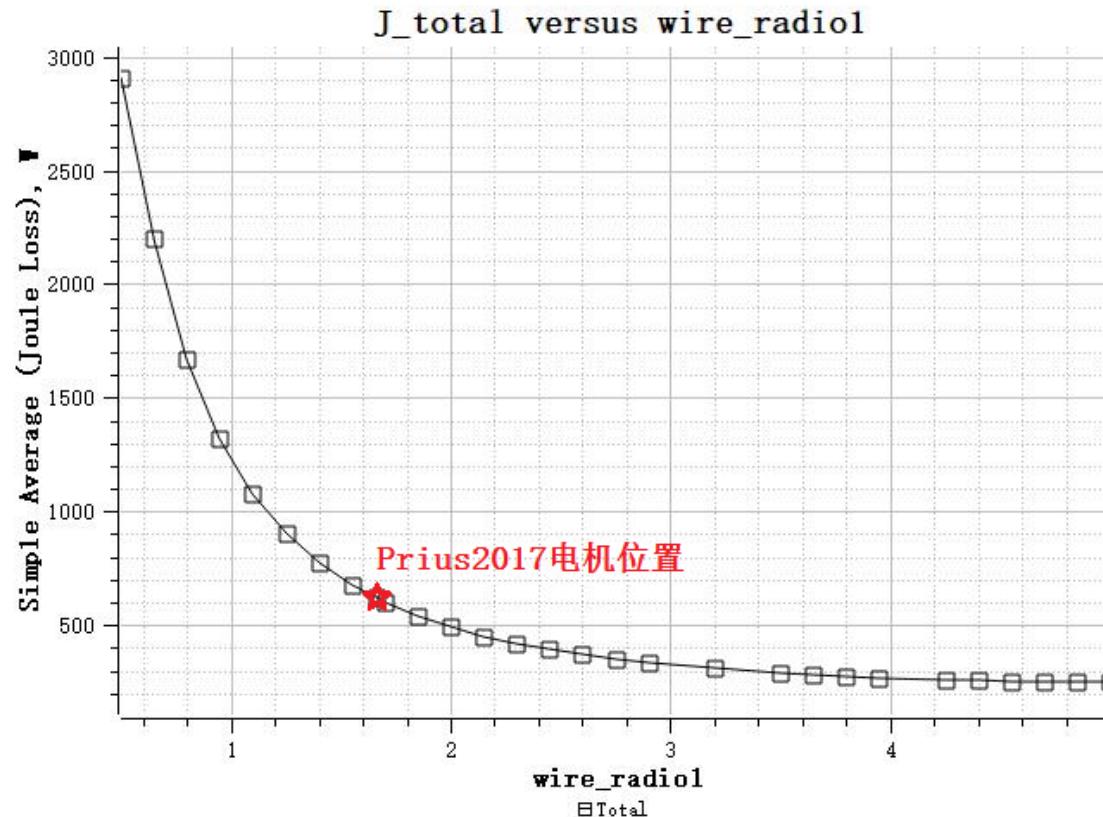


图22 总的铜损和矩形线长宽比系数关系曲线

- ✓ 本分析为采用正常BH曲线的电磁钢板，它的趋势和采用linear_10000是一样的。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

2、常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系

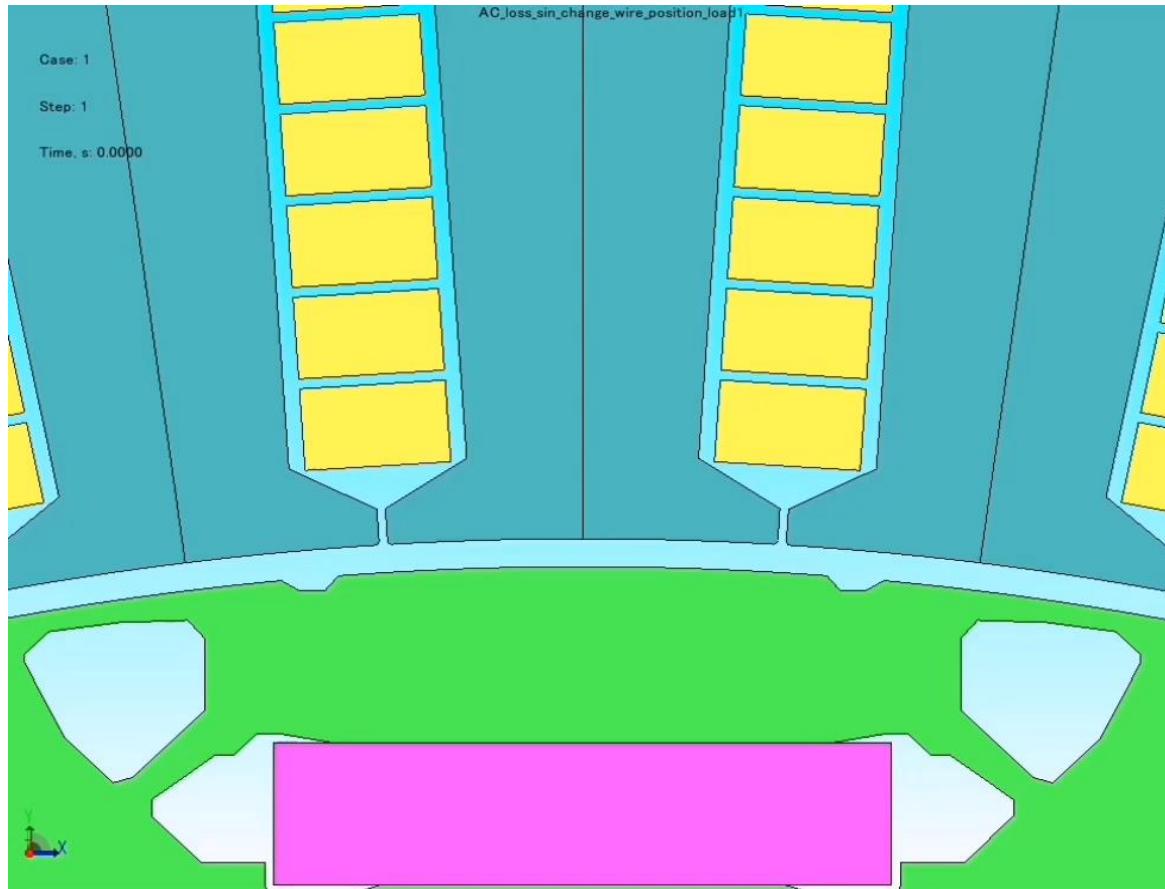


图23 常用槽口宽高变化图

- ✓ 当槽口高度和宽度变化时，导线位置和大小均保持不变。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

2、常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系

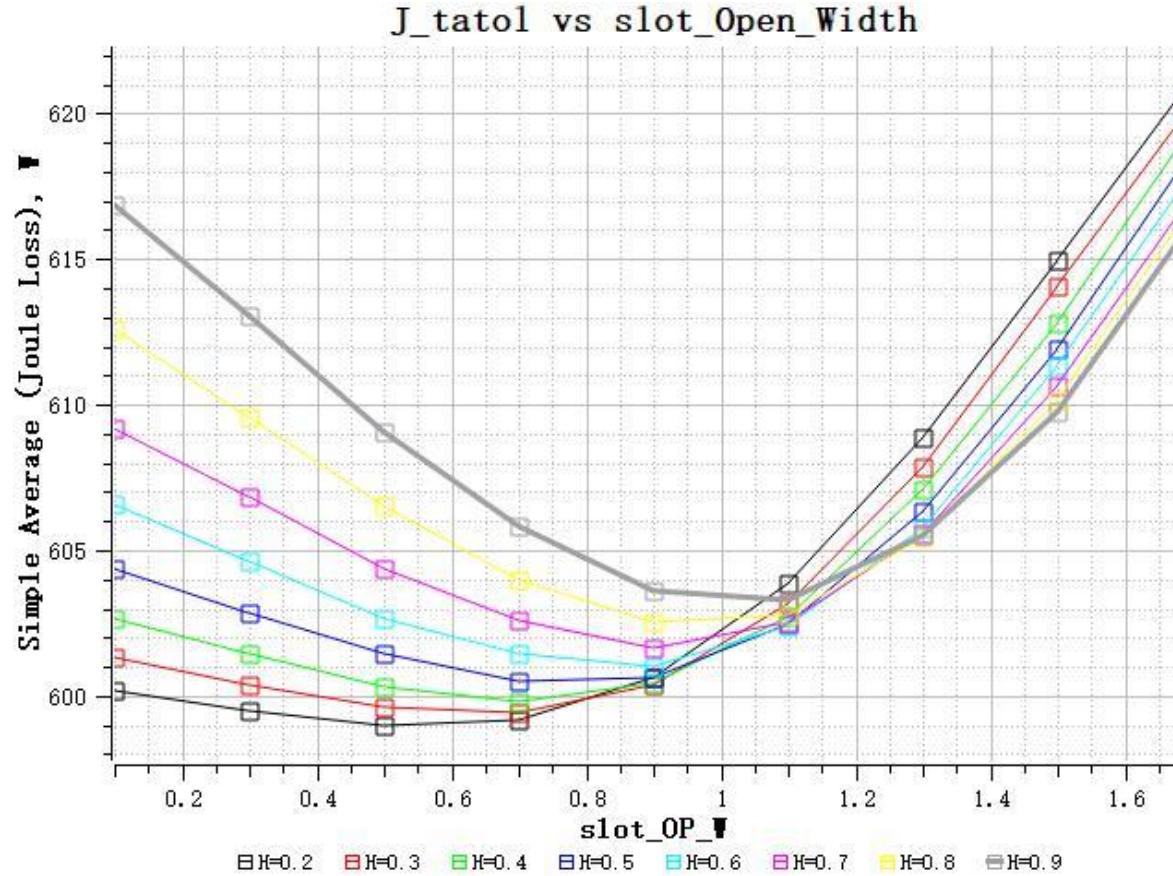
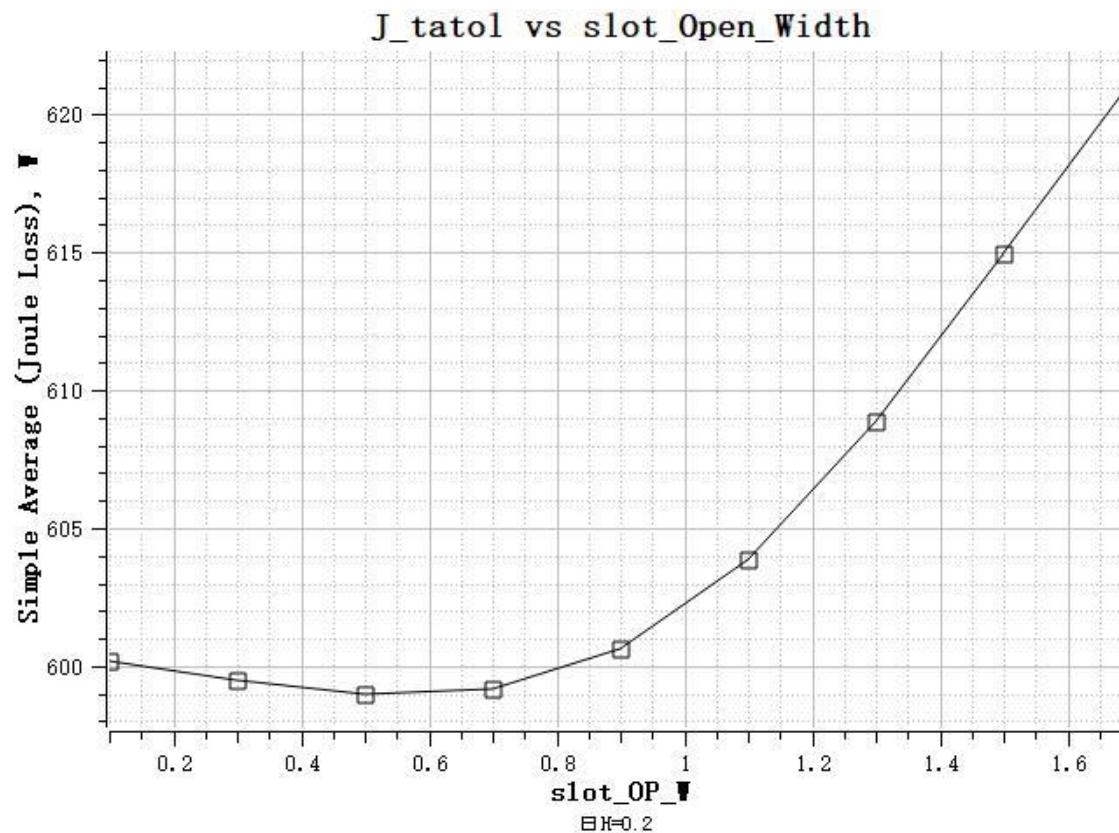


图24 总的铜损和槽口宽度的关系（不同曲线对应不同槽口高度）

- ✓ 本分析为排除当槽口尺寸变化时磁通饱和度的影响，将定子铁心设置为linear_10000，这样便于分析槽口尺寸对涡流损耗的影响。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

2、常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系



➤ 定子铁心设置为linear_1000。

图25 总的铜损和槽口宽度的关系 (H=0.2mm)

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

2、常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系

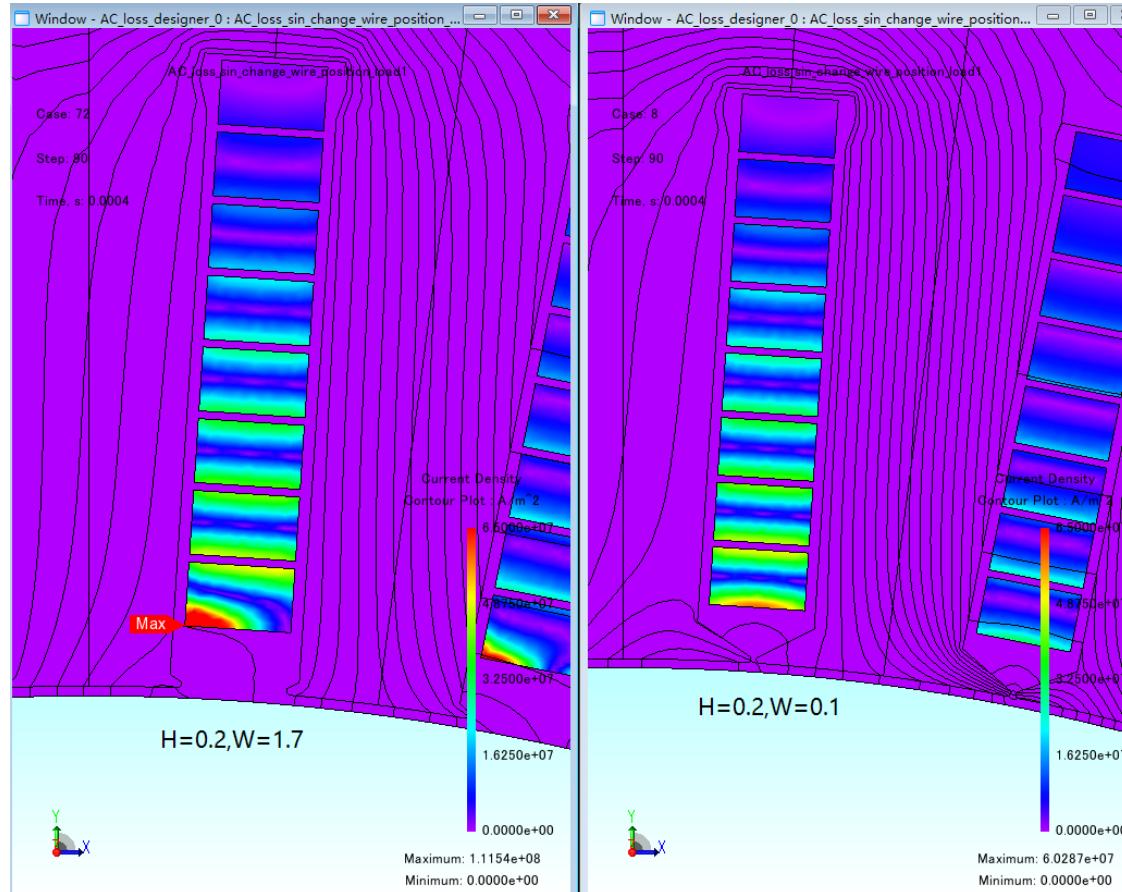


图26 槽口宽度不同的漏磁和电流密度云图 (H=0.2mm)

- ✓ 低槽口高度时，主要以渗透漏磁影响为主，因此槽口变宽，会增大渗透漏磁，从而加大了涡流效应。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

2、常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系

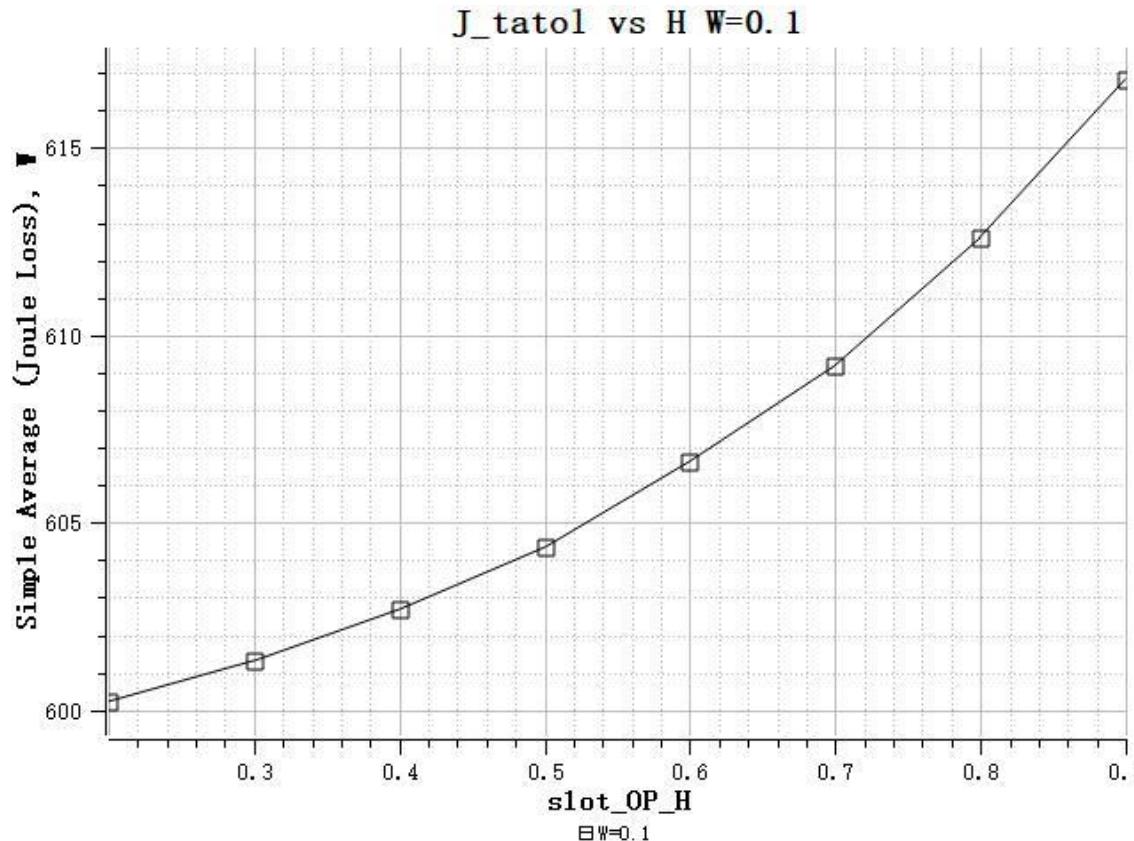


图27 总的铜损和槽口高度的关系 (W=0.1mm)

- ✓ 定子铁心设置为linear_10000。
- ✓ 当槽口宽度比较窄时，总铜损随着槽口高度增加而变大。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

2、常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系

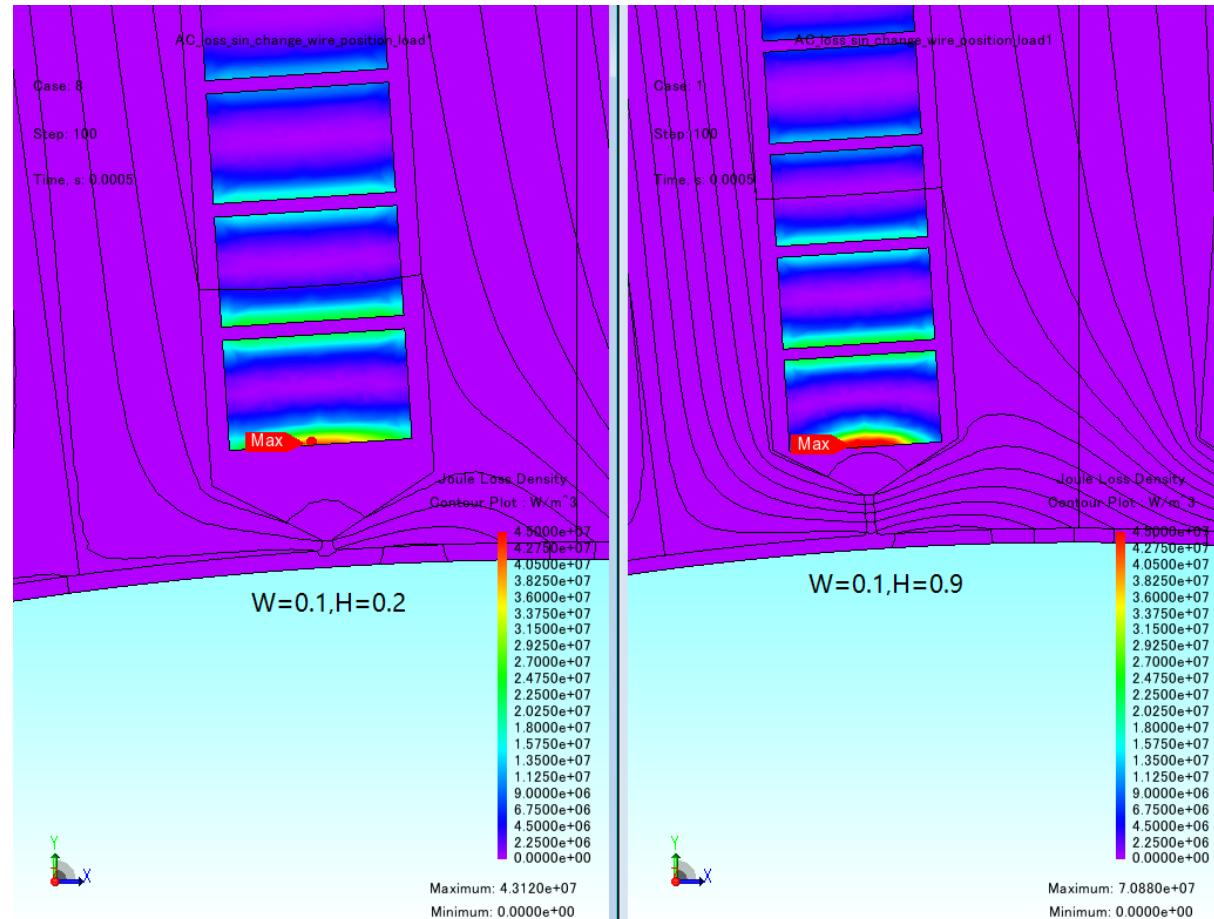


图28 窄槽口时，低槽高和高槽高的磁力线走向和焦耳损耗密度云图

- ✓ 从左图可以看出，当槽口比较窄以槽漏磁影响为主，因此槽口变高，漏磁加大，导致集肤效应增加，涡流损耗增大。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

2、常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系

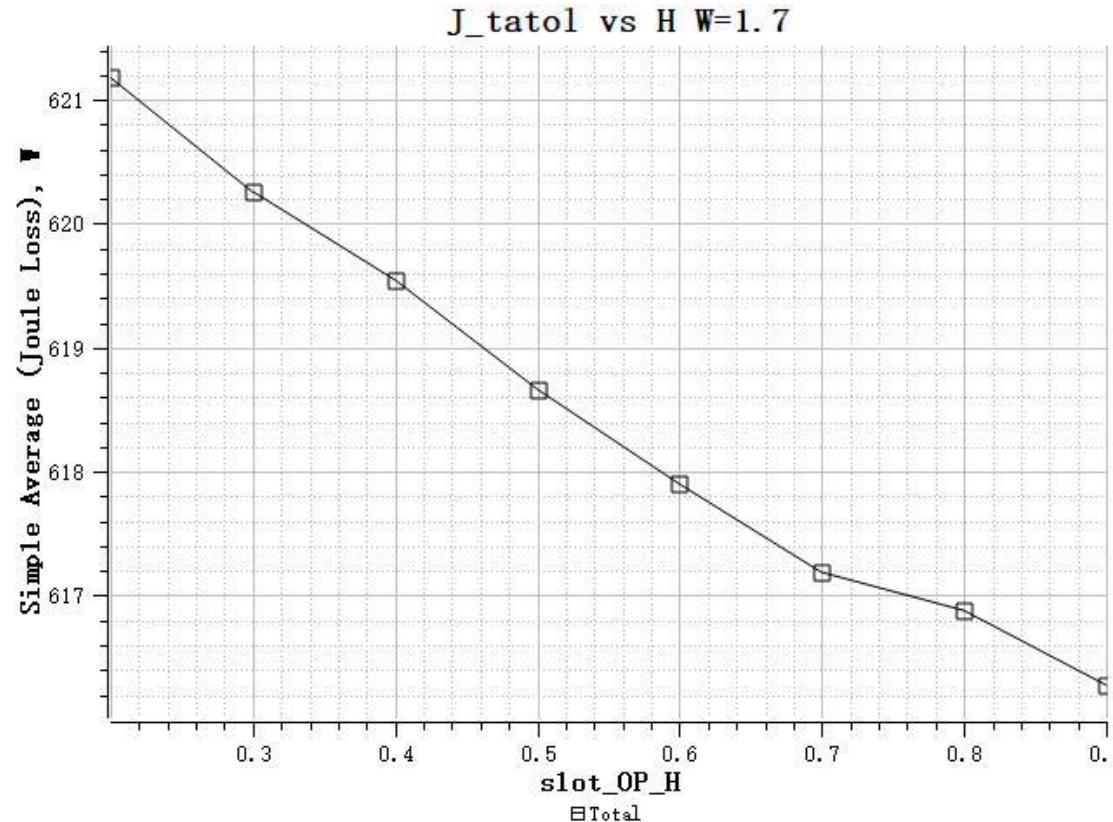
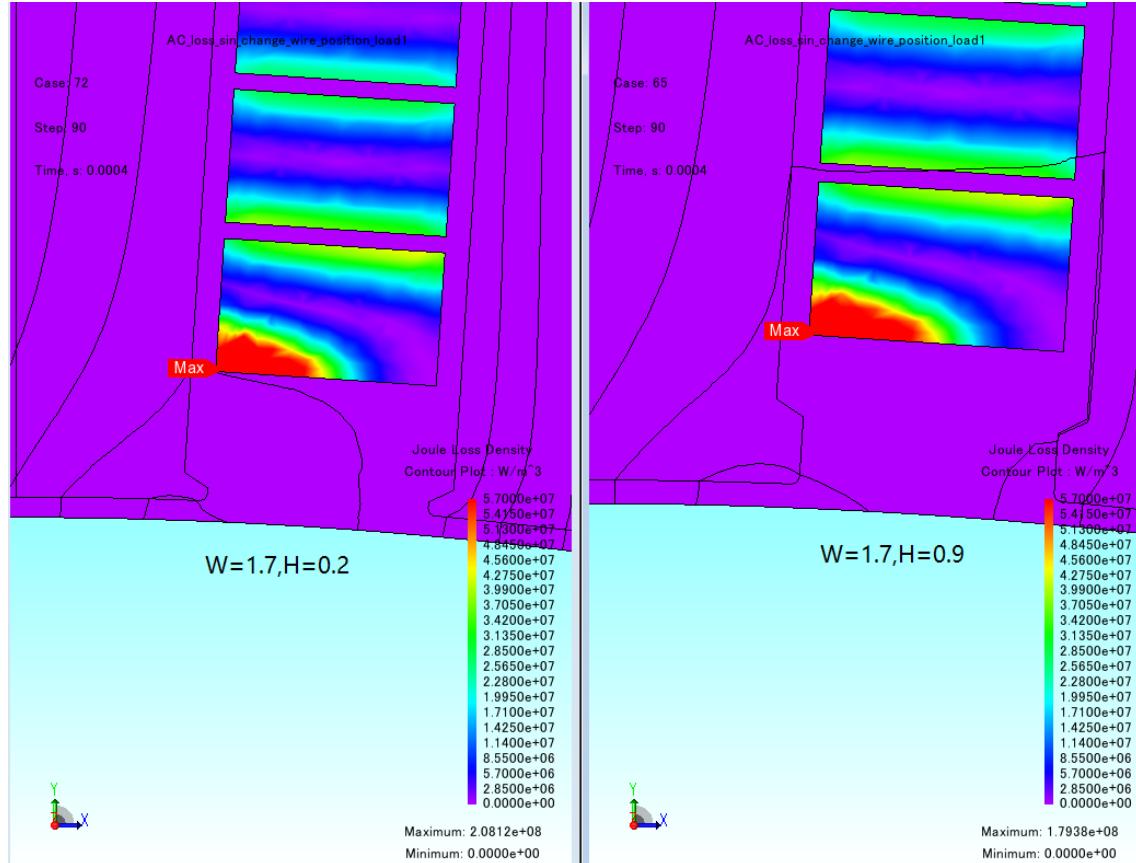


图29 总的铜损和槽口高度的关系 (W=1.7mm)

- ✓ 定子铁心设置为linear_10000。
- ✓ 当槽口宽度比较宽时，焦耳损耗随着槽口高度增加而减小。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

2、常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系

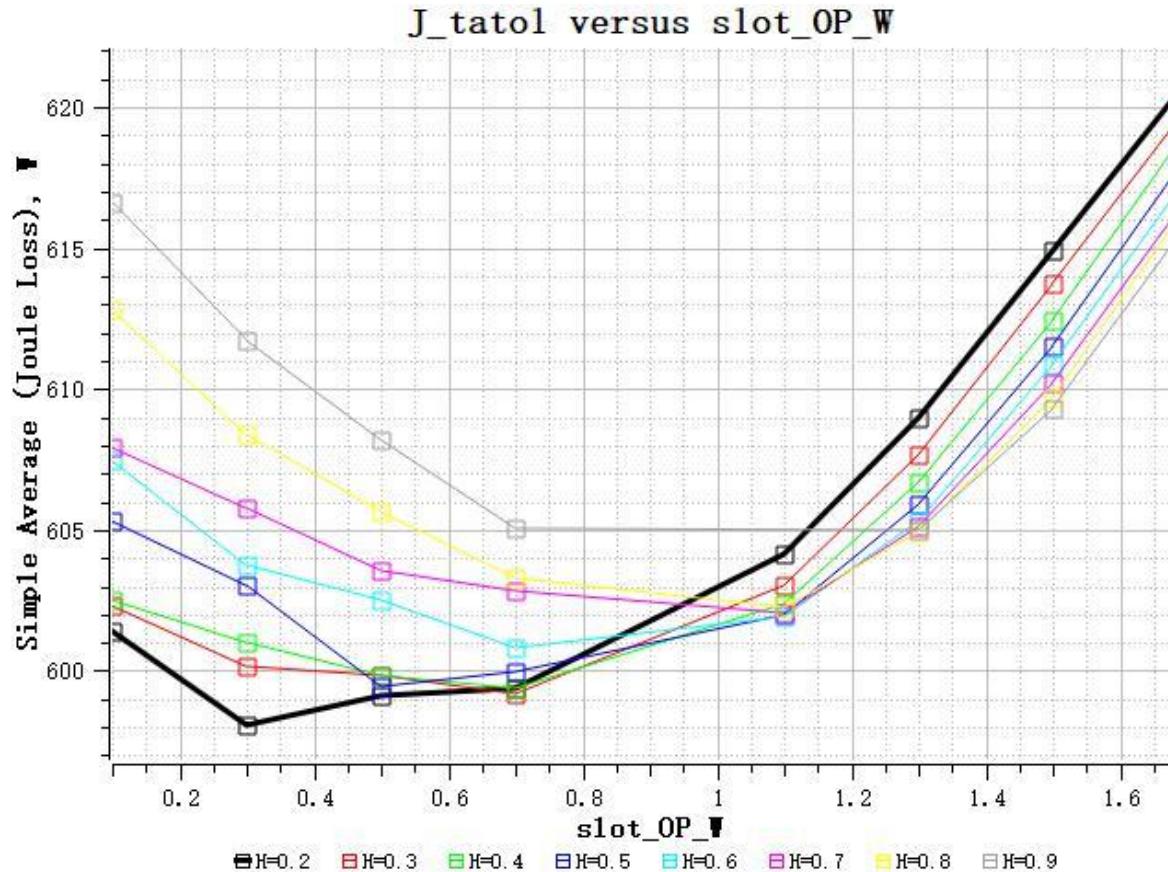


- ✓ 如左图所示，槽口比较宽时，以渗透磁通影响为主，来至气隙磁通容易穿入槽内导体，当槽比较高的时候，部分欲进入槽内的磁力线容易被旁路到齿部，因此总铜损较小。

图30 宽槽口时，小槽高和大槽高的磁力线走向和焦耳损耗密度云图

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

2、常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系



- ✓ 本分析定子为BH曲线的普通电磁钢板。
- ✓ 它的趋势和高磁导钢板时一致的。

图31 总的铜损和槽口宽度的关系（不同曲线对应不同槽口高度）

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

3、Prius2017电机的槽口宽高和交流损耗的关系

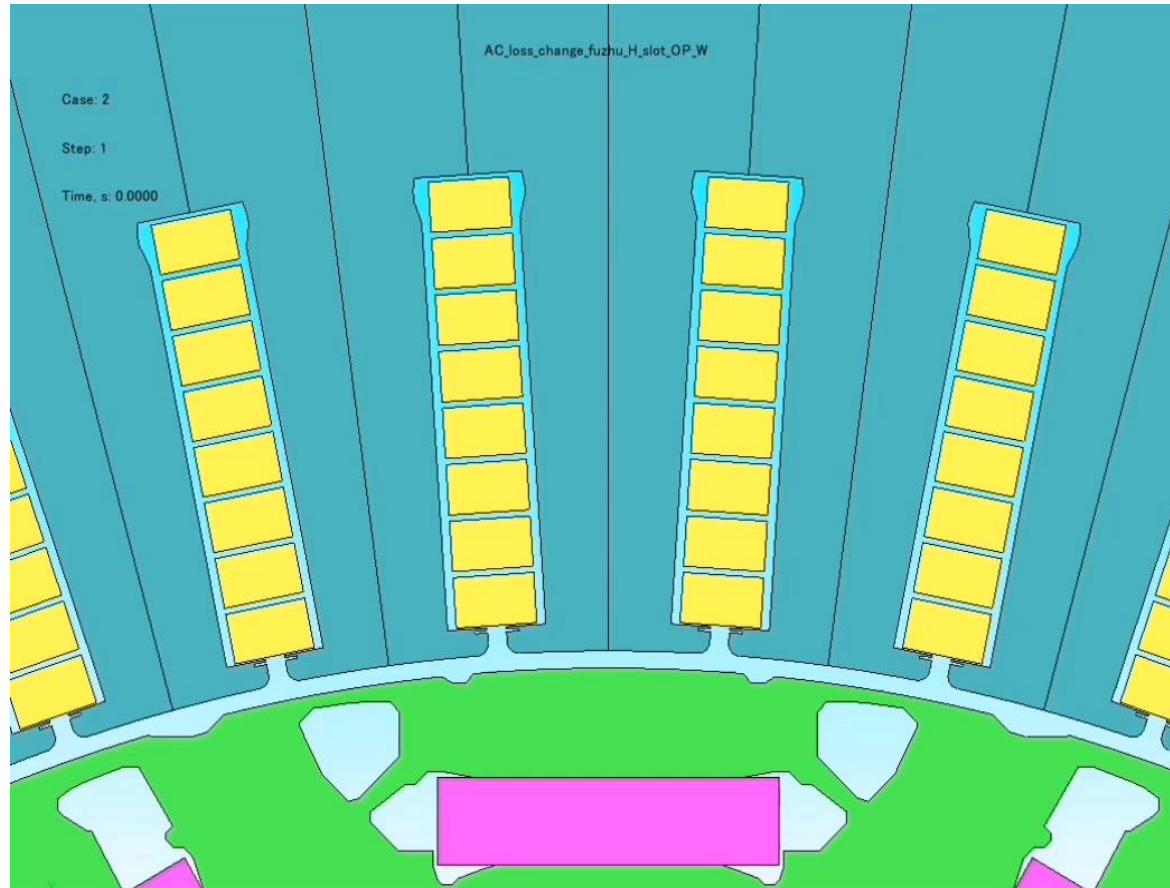
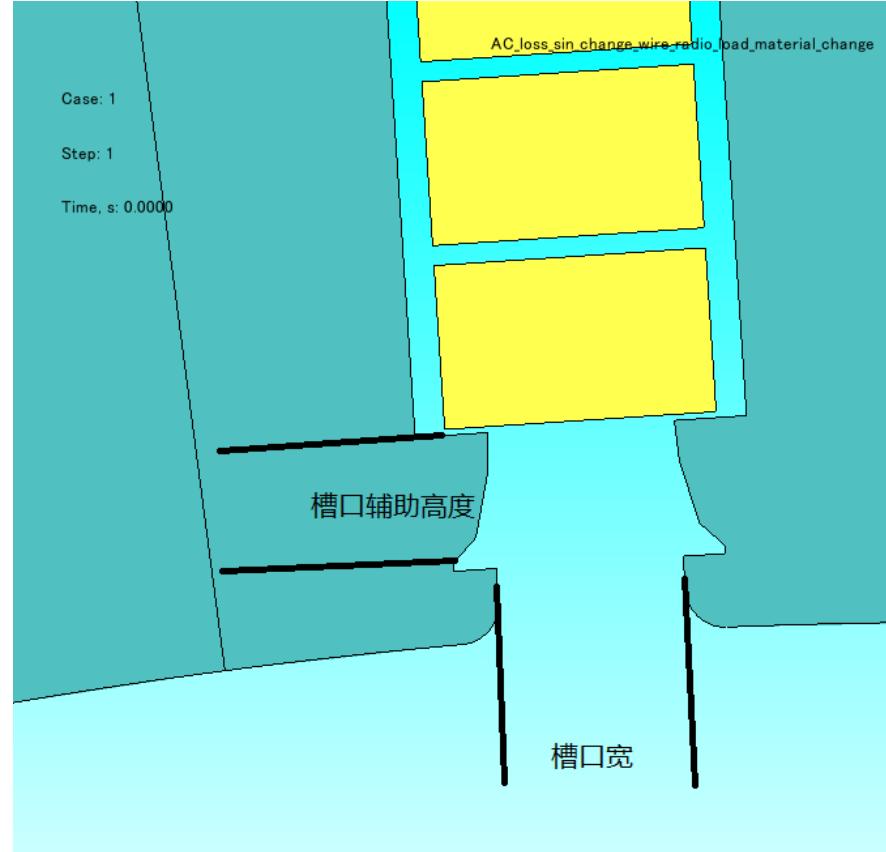


图32 槽口辅助高度和槽宽变化图

- ✓ 本分析为当槽口辅助高度改变时，导体位置整体移动，即确保导体距离槽内4个边的距离不变。

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

3、Prius2017电机的槽口宽高和交流损耗的关系

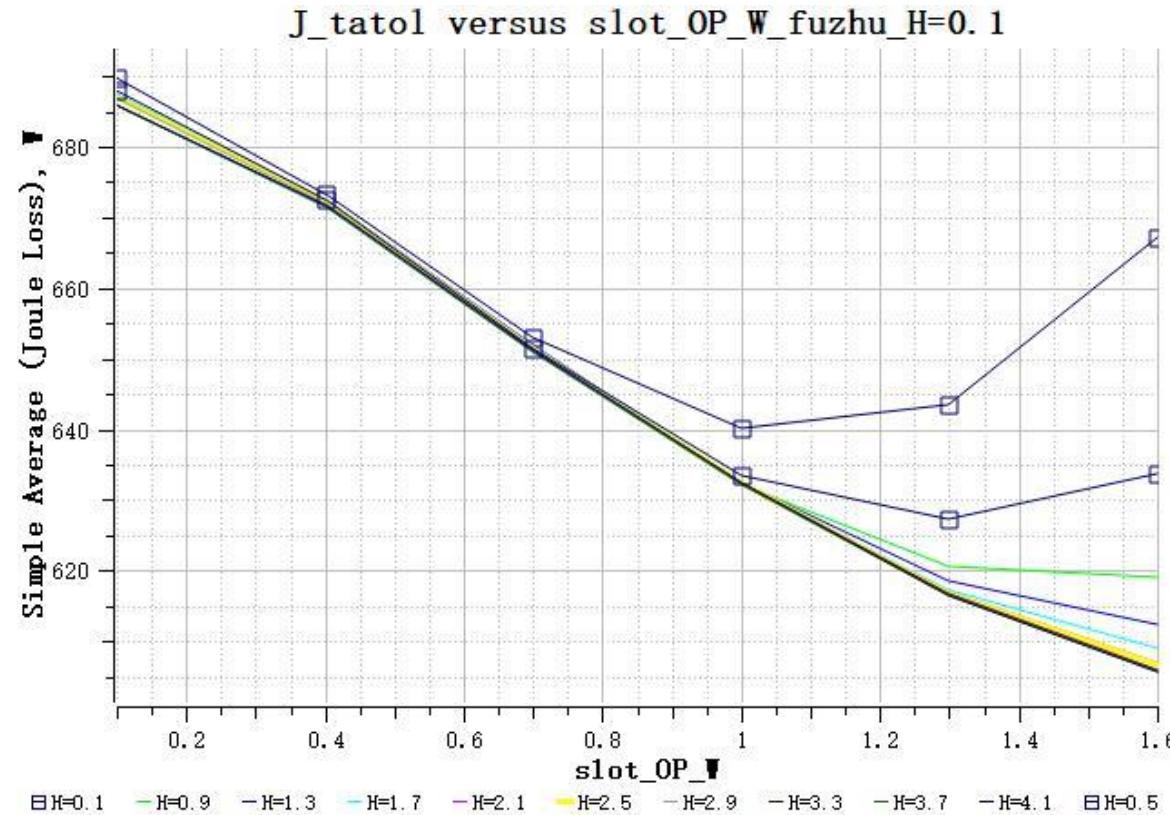


- ✓ 左图为槽口宽和槽口辅助高度的示意图。以下内容主要以此作为设计变量，来探讨它们对涡流效应的影响。

图33 设计尺寸说明

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

3、Prius2017电机的槽口宽高和交流损耗的关系

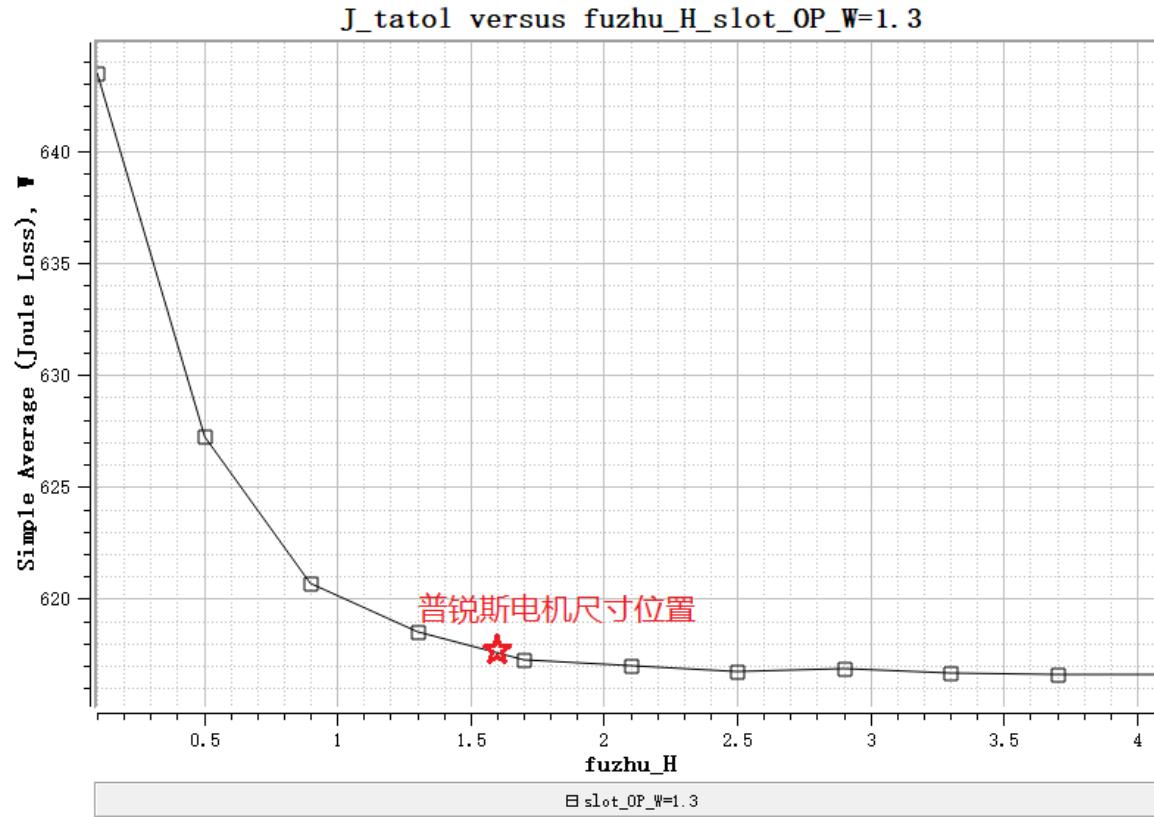


- ✓ 定子铁芯采用liear_10000材料。
- ✓ 从左图可以看出，当槽口辅助高度为0.1时，总焦耳损耗和槽口宽度不成单调关系。
- ✓ 当槽口辅助高度等于或高于0.5时，槽口宽度越大，总焦耳损耗减小。

图34 总的铜损和槽口宽度的关系（不同曲线对应不同槽口辅助高度）

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

3、Prius2017电机的槽口宽高和交流损耗的关系

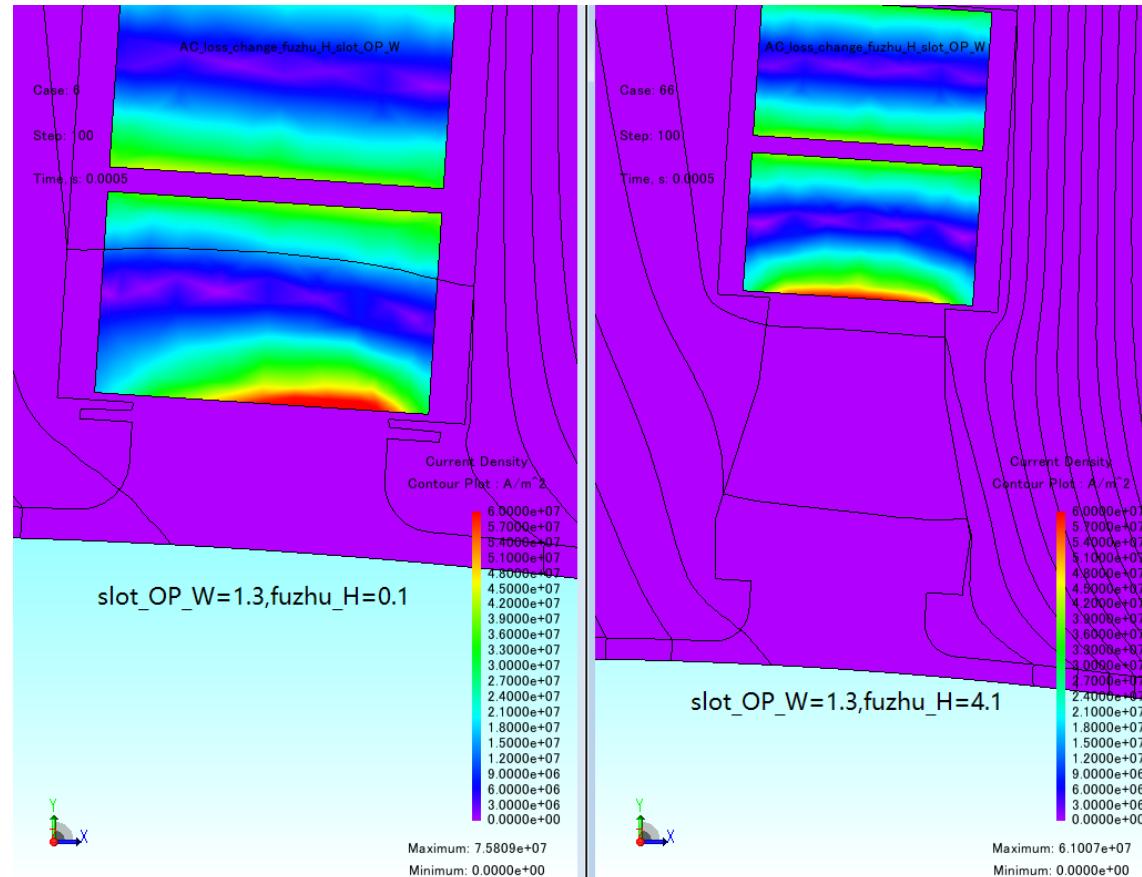


- ✓ 从左图可以看出，当槽口宽为1.3mm，即与普锐斯电机槽口宽尺寸接近时，随着槽口辅助高度增加，焦耳损耗减小。
- ✓ 从图中标定出普锐斯电机槽口辅助高度的位置，发现它的设计位置已经使焦耳损耗处于较低位置了。

图35 总焦耳损耗随槽口辅助高度变化曲线（槽口宽=1.3）

五、减小扁线电机涡流损耗的方法探讨

3、Prius2017电机的槽口宽高和交流损耗的关系



- ✓ 从左图可以看出，当槽口宽为1.3mm，即与普锐斯电机槽口宽尺寸接近时，主要以渗透磁通影响涡流效应，槽口增加，欲穿入槽内的磁力线将会被旁路到齿部，因此渗透漏磁小，焦耳损耗小。

图36 槽口辅助高度不同时磁力线和电流密度云图（槽口宽=1.3）

六、小结

- 1、较高的频率如高速会导致集肤效应加强并增加损耗。
- 2、随着导体增加, P_{ac}/P_{dc} 系数变大, 可见导体越大, 集肤现象加强。
- 3、随着频率增加, 邻近效应增强, 焦耳损耗增加。
- 4、两根导体半径变大, 则临近效应加强。
- 5、本文对比了正弦波和PWM谐波电流对扁线涡流损耗的影响, 得出无论通入的是正弦波还是具有PWM谐波的电流, 随着转速的升高, 涡流损耗的占比在不断提高, PWM谐波电流对涡流损耗的影响更大, P_{ac}/P_{dc} 将达到3.76倍, 因此需要注意扁线电机在高速时的涡流损耗问题。
- 6、本文分析了矩形导体长宽比和总焦耳损耗的关系, 分析得到随着长宽比增加, 总的铜损减小, 即涡流损耗减小。同时得到了Prius2017方案的长宽比已经使涡流损耗比较低了。
- 7、本文分析常用槽口形状的宽高和交流损耗的关系, 具体结论不再赘述。
- 8、本文分析了Prius2017方案槽口辅助高度和总焦耳损耗关系, 得出随着槽口辅助高度增加, 总焦耳损耗减小, 同时分析出Prius2017方案选择的槽口辅助高度已经时总焦耳损耗较低了。
- 9、后续我们将分析扁线方案、圆线方案涡流效应对比, 分别探讨它们涡流效应随转速的关系曲线。

艾迪捷信息科技(上海)有限公司



扫一扫，关注艾迪捷
第一时间获得更多产品介绍/成功案例/市场活动

联系我们

——软件试用/报价/技术培训/专题活动

- 网站: <https://www.idaj.cn/>
- 邮箱: idaj.marketing@idaj.cn
- 电话: 021-50588290; 010-65881497