ICSC 2019

Core Competence Enhanced by MBD

IDAJ CAE Solution Conference

电磁振动仿真及案例分析

IDAJ中国—电磁技术部　陈天赠

目录

一、序

二、电磁激振力

三、电磁场解析和振动解析的耦合方法

四、JMAG振动噪音案例分析

五、电机结构优化

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

表示符号及单位

物理量	符号	单位
磁通密度	$\boldsymbol{B}$	T
电通量密度	$\boldsymbol{D}$	C/m^2
电流密度	$\boldsymbol{J}$	A/m^2
电荷密度	ρ	C/m^3
电流	I	A
磁场	$\boldsymbol{H}$	A/m
磁极	m	Wb
磁化	$\boldsymbol{M}$	T
麦克斯韦应力张量	$\boldsymbol{T}$	Pa

物理量	符号	单位
电场	$\boldsymbol{E}$	V/m
电磁力	$\boldsymbol{F}$	N
应力	σ	Pa
磁导率	μ	H/m
真空中磁导率	μ_0	H/m
电介质常数	ε	
应变	ε'	
应力应变矩阵	$[E']$	Pa
节点力	f_i	N

物理量	符号	单位
杨氏率	E	Pa
泊松比	ν	

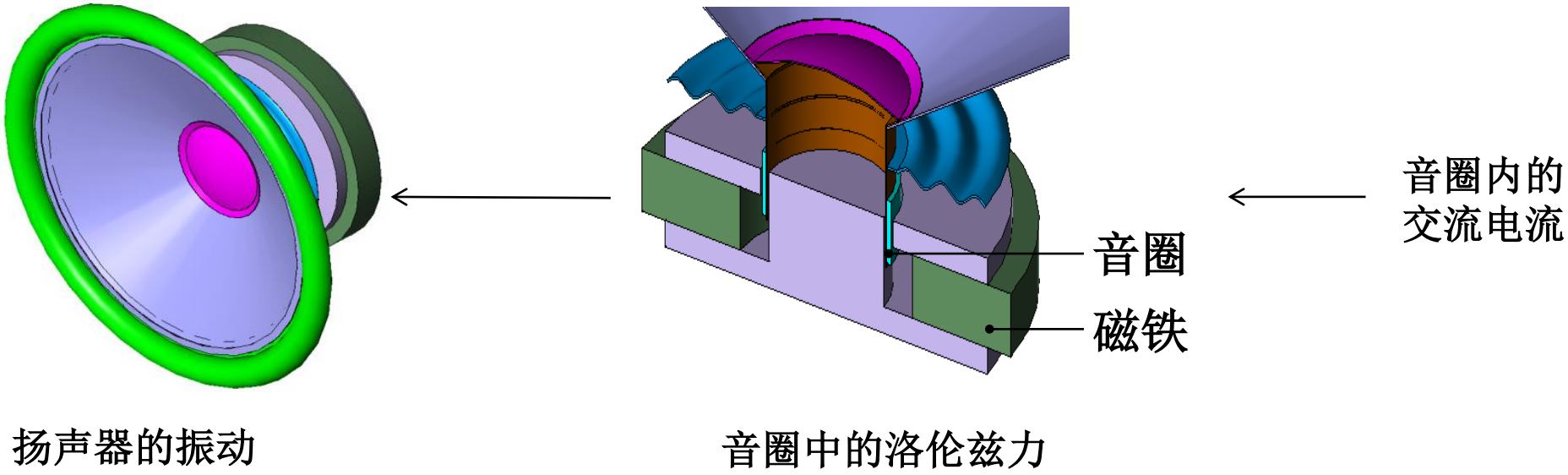
Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

1. 序

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

由洛伦兹力产生的振动[1]

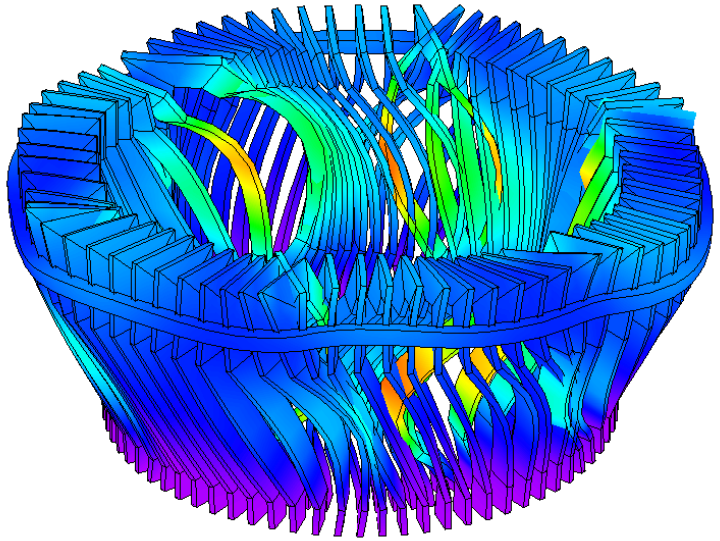
扬声器通过音圈(VoiceCoil)的振动来发声。
线圈的洛伦兹力使得它和磁石相互吸引、排斥最终导致线圈振动。



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

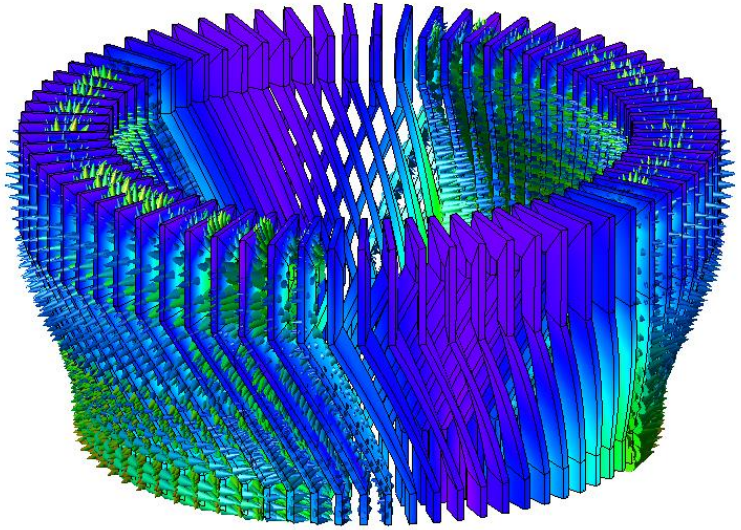
由洛伦兹力产生的振动[2][3][4]

大型发电机的线圈端部会因为线圈间的电流产生洛伦兹力。



线圈端部的振动
（加速度分布）

←



线圈端部的洛伦兹力
（磁通密度，洛伦兹力）

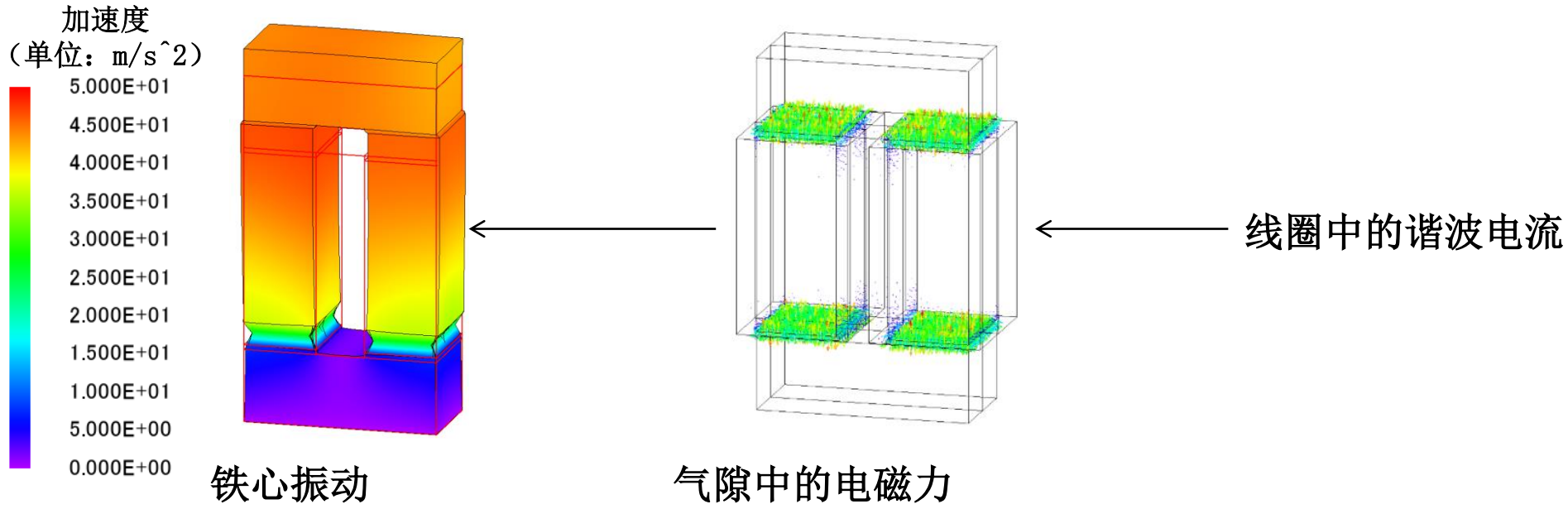
← 定子线圈中通电

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

由谐波电流的波动而引起的铁心振动[5][6][7]

电抗器因铁心的电磁力而产生振动。

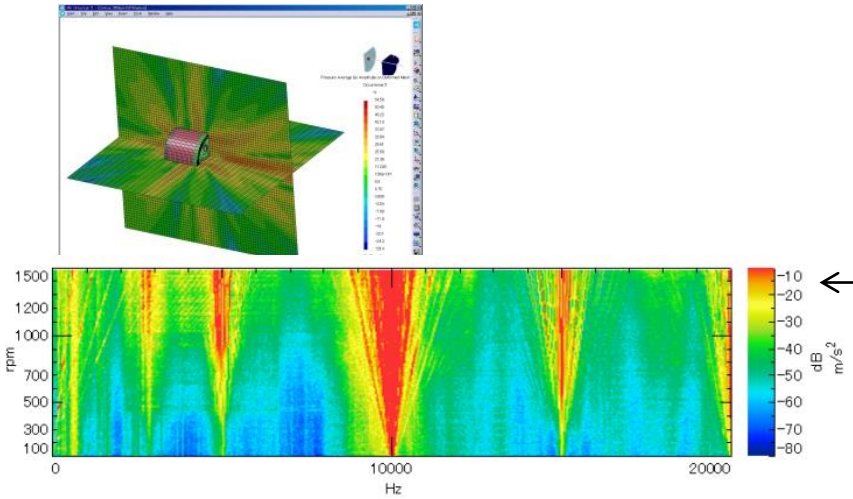
振动是由于谐波电流引起的气隙之间电磁力的反复吸引和排斥而发生的。



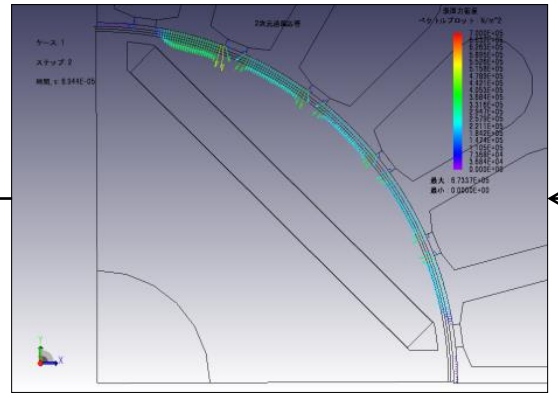
Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

由谐波电流的波动而引起的铁心振动[8][9][10]

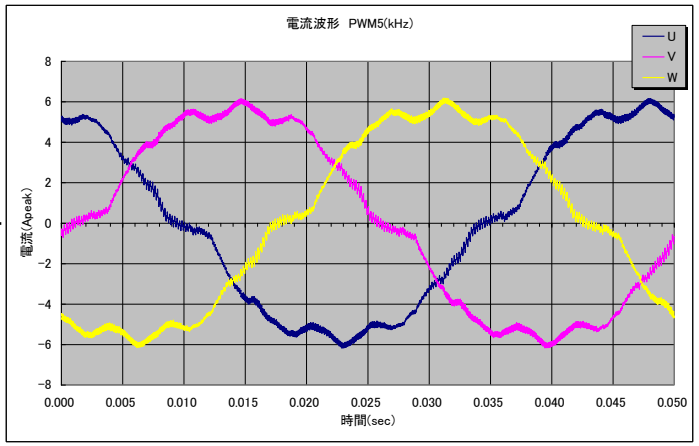
电机的PWM驱动时的振动。
电流的谐波分量产生的激振力的谐波。
即便不产生共振，也会产生载波频率倍数的振动。



载波频率倍数的振动



齿部的谐波激振力

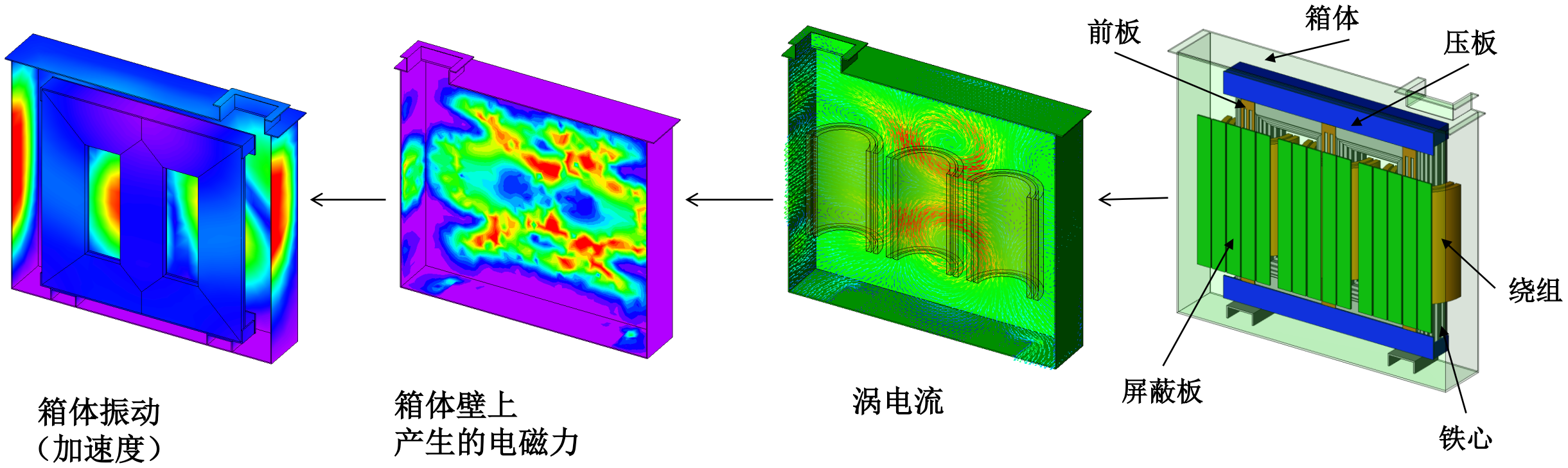


PWM的载波成分

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

变压器油箱的振动[11]

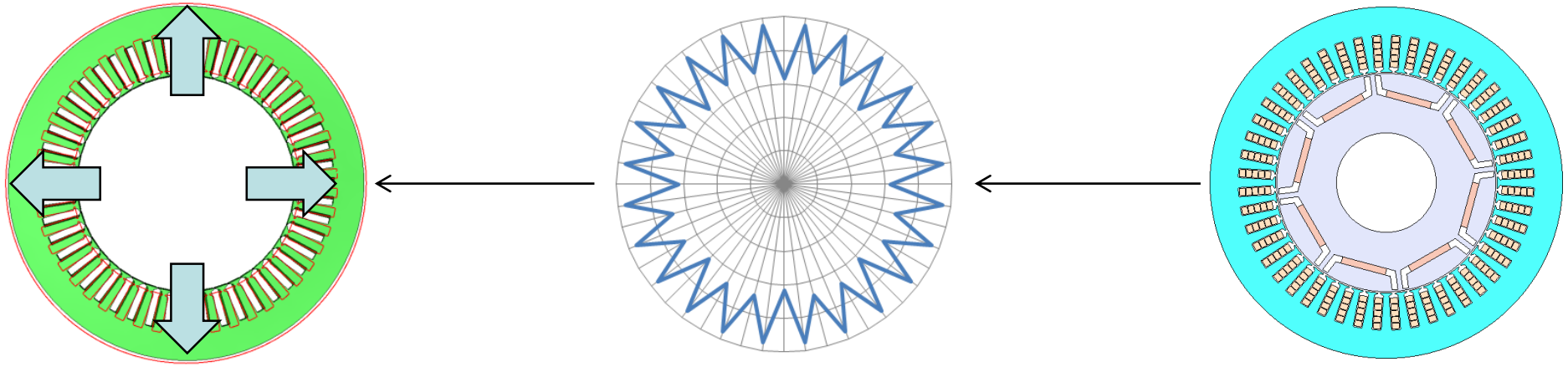
大型变压器箱体会因漏磁通产生涡电流。
涡电流产生电磁力引起箱体振动。



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

齿槽谐波产生的振动[12][13][14][15][16][17][18][19][20]

电机由于定子存在齿和槽，导致气隙中的磁阻不均匀， 从而存在和齿槽数相关的谐波。沿齿的电磁力的径向分量会与定子的呼吸模态引起共振产生激烈的振动。

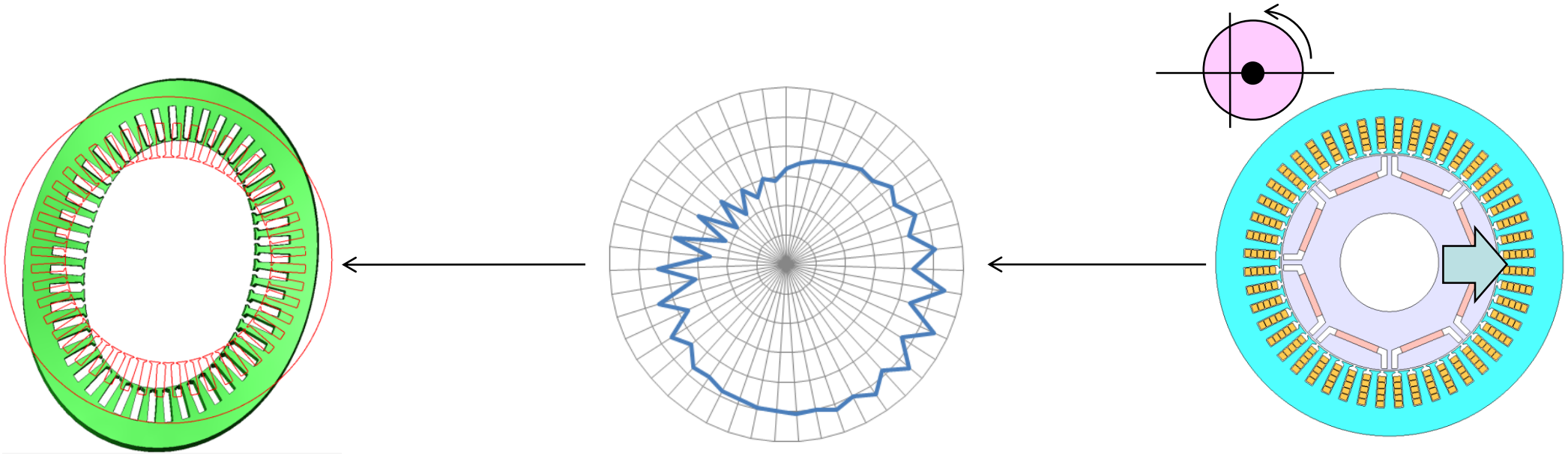


呼吸模态　　电磁力空间分布　　电磁力齿槽谐波

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

偏心[21]

由于转子的偏心导致气隙间的磁阻产生不平衡。
不平衡的磁阻导致齿部激振力的增加，产生低次成分，导致振动。

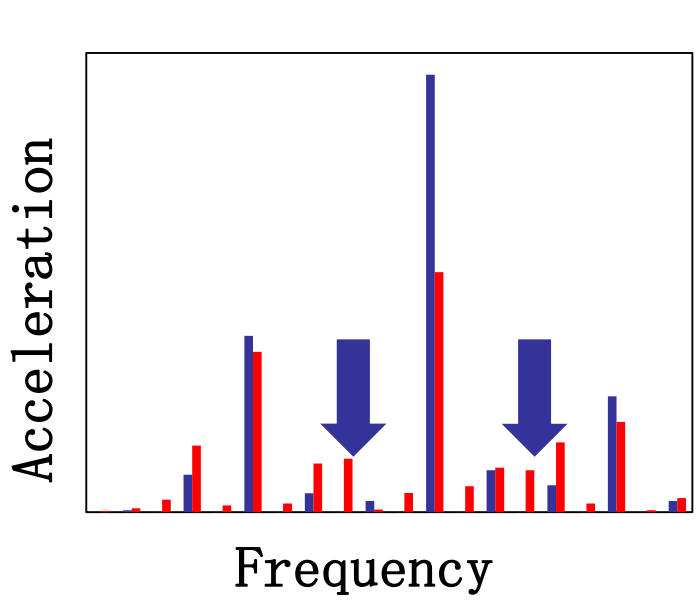


引起振动　　偏心的定子激振力的空间力型　　转子偏心

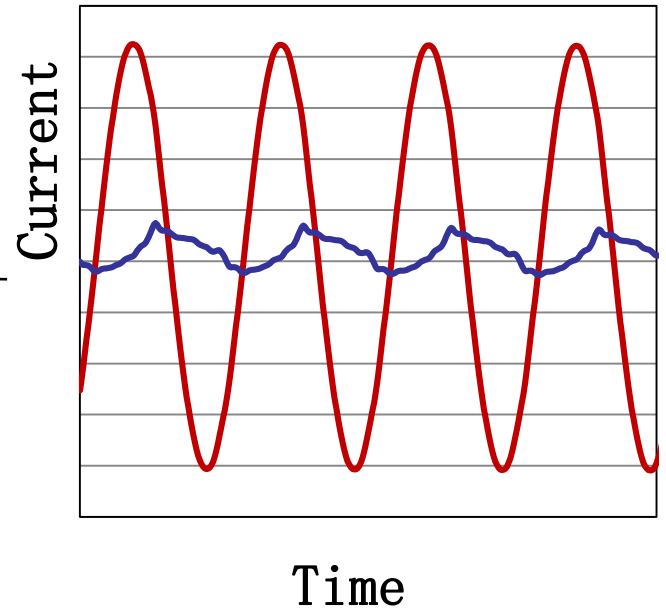
Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

电流的不平衡引起的振动[22][23]

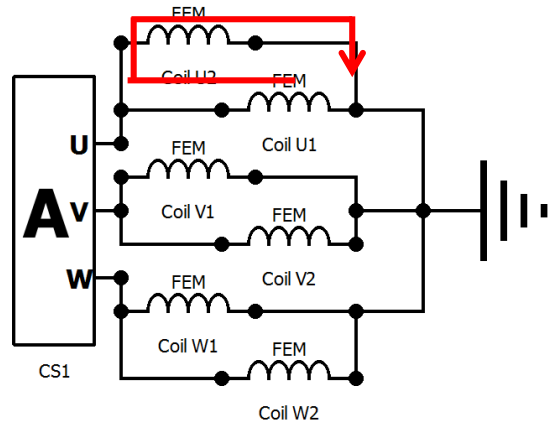
电机的电路并联时，因偏心引起循环电流
因循环电流引起新的振动成分



加速度
环流：有（红）、无（蓝）



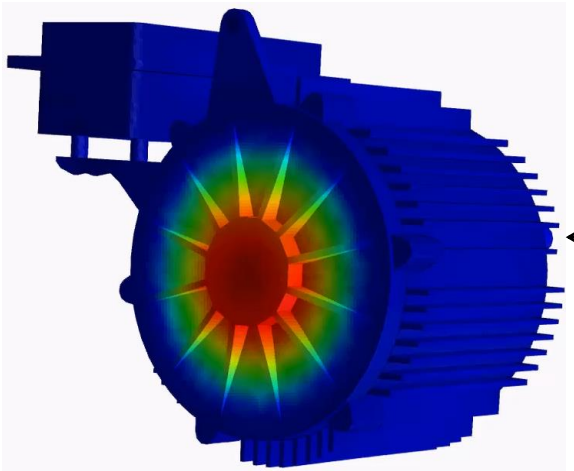
相电流（红）、环流（蓝）



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

扭矩波动引起的系统振动

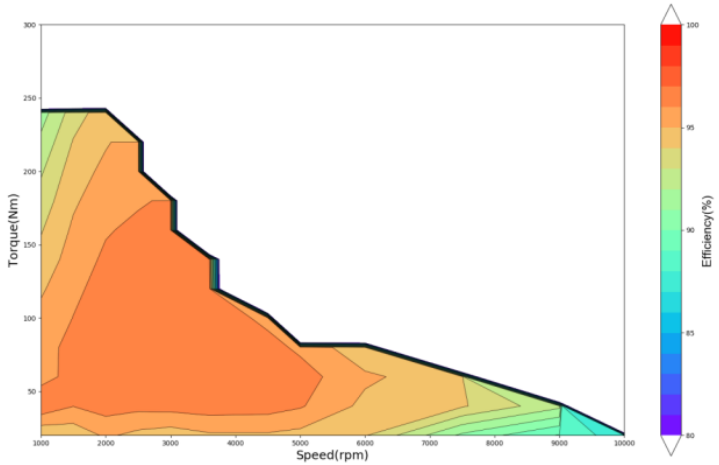
EV的动力总成的振动源之一是电机的振动。
通过轴传递的扭矩波动和通过外壳上传递定子振动导致整个动力传动系统的振动。

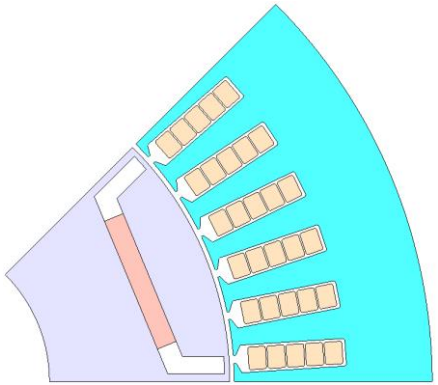


齿轮箱的振动

扭矩波动

齿部激振力



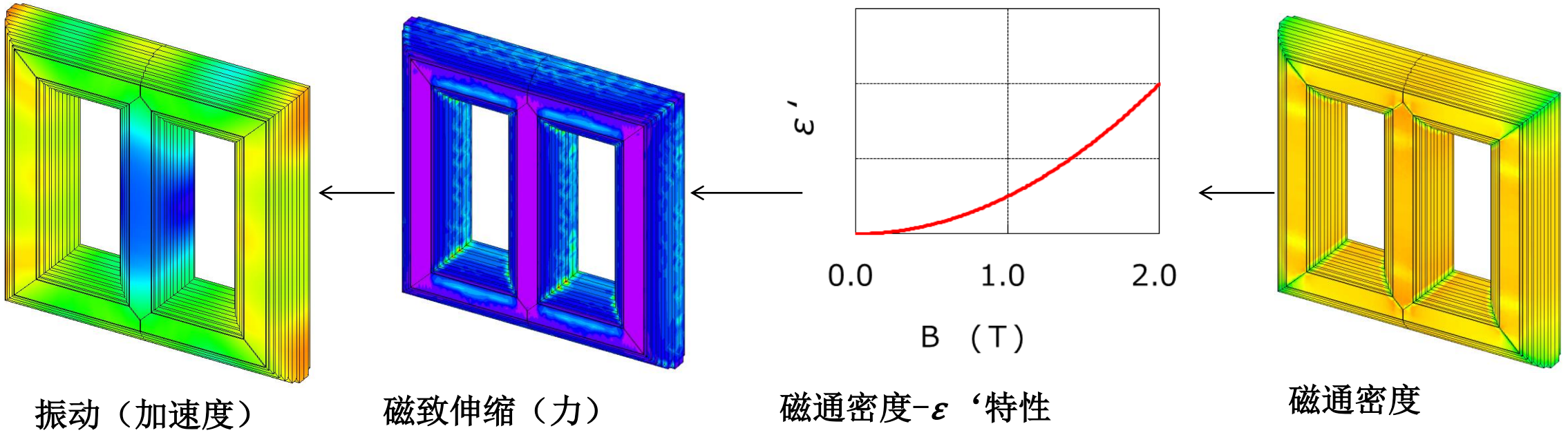


行驶范围的激振力

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

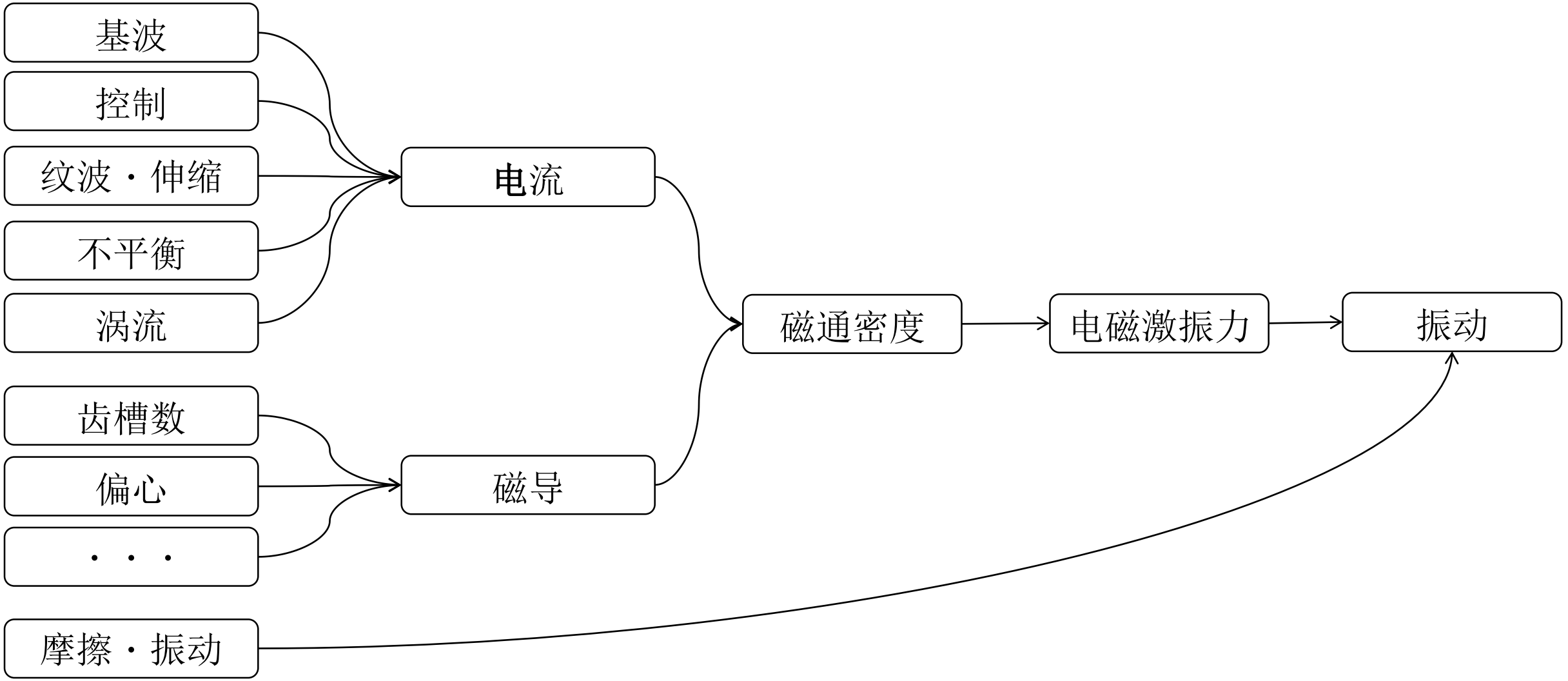
磁致伸缩引起的振动[24][25][26]

变压器和电抗器虽然不像电机那样由运动产生电磁力，但是仍会受到磁致伸缩的影响。铁心处因磁通密度的变化产生振动。



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

电磁振动发生的原理



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

二、电磁激振力

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

激振的原因和种类

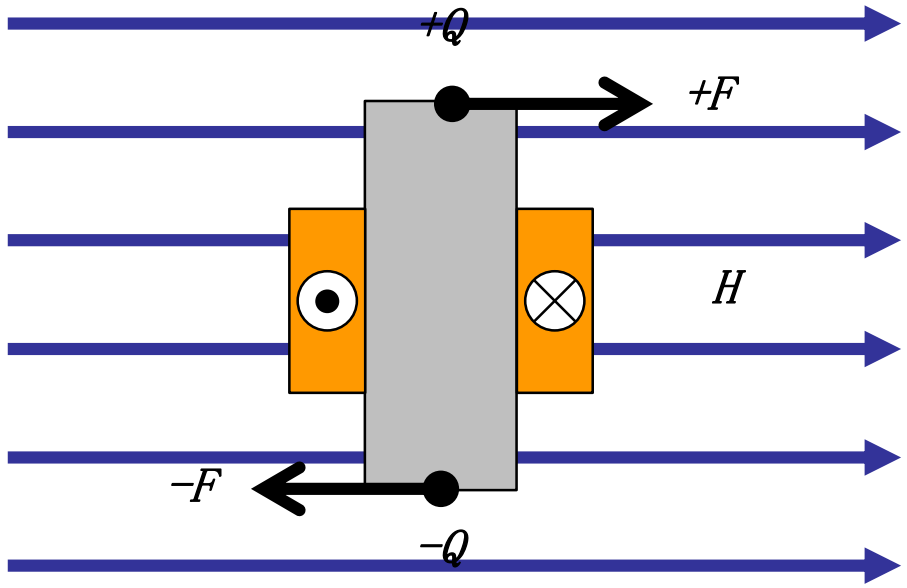
原因		概要	主要出现的位置
电磁力	磁性材料产生的力	作用于铁心、磁铁。 特别是在和空气的边界处很大。	• 电机气隙 • 电抗器气隙
	电流产生的力	线圈中的电流和铁心，磁铁，屏蔽层（shield）中产生的涡流。	• 变压器屏蔽板 • 电感线圈 • 电机端部线圈
磁致伸缩		磁场通过铁心，使其产生伸缩。这种现象主要发生在各向异性的电磁钢板材料中。	• 变压器铁心

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

电磁力：磁性材料产生的力

磁极受到磁场的力。

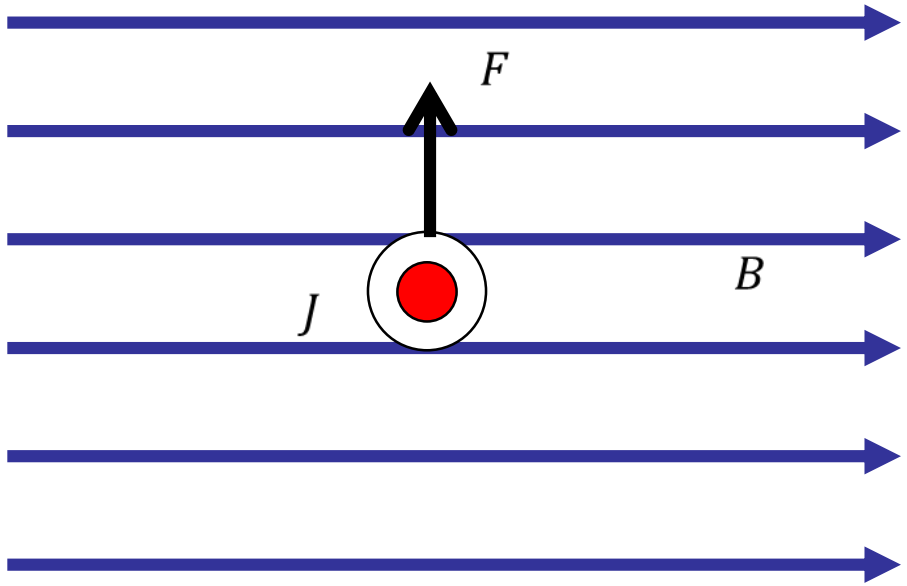
- 磁极将形成在磁力线扭曲的地方。因此与空气的边界面处产生巨大的力。



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

电磁力：电流产生的力

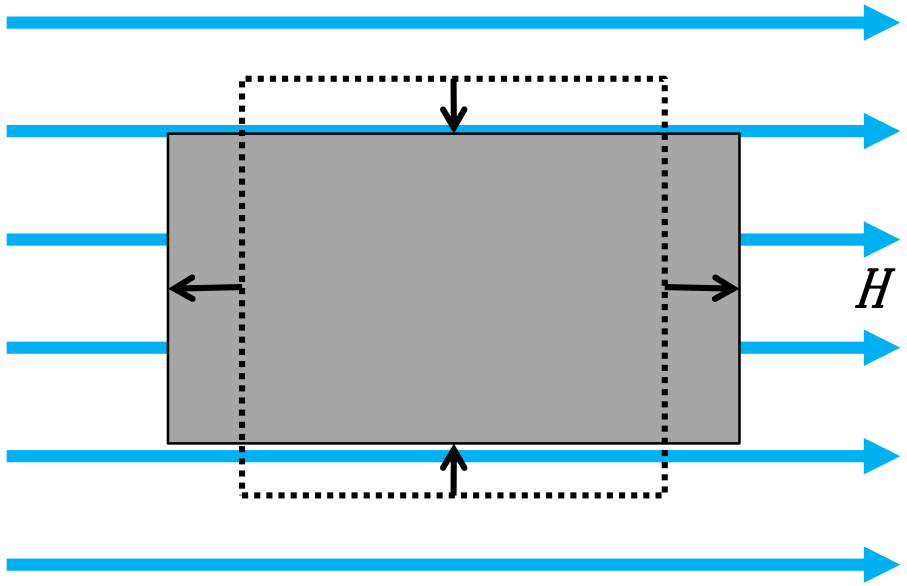
在图中B处放置电流，在垂直于电流方向和B方向产生力（洛伦茨力）。



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

磁致伸缩

当磁场施加到磁性材料上时，随着磁化强度的增长会发生微变形（应变）。



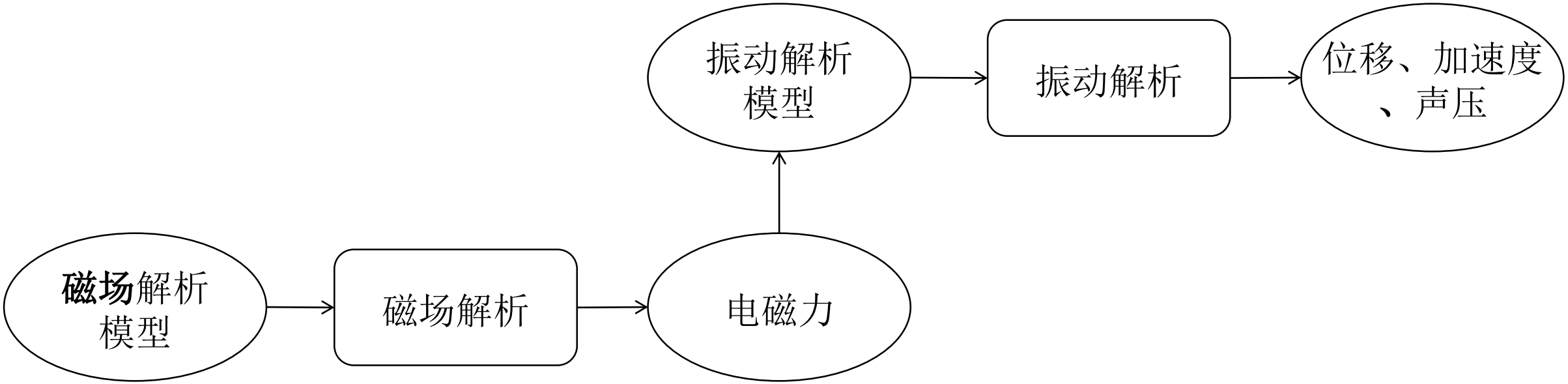
Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

三、电磁场解析和振动解析的耦合方法

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

耦合解析框架流程图

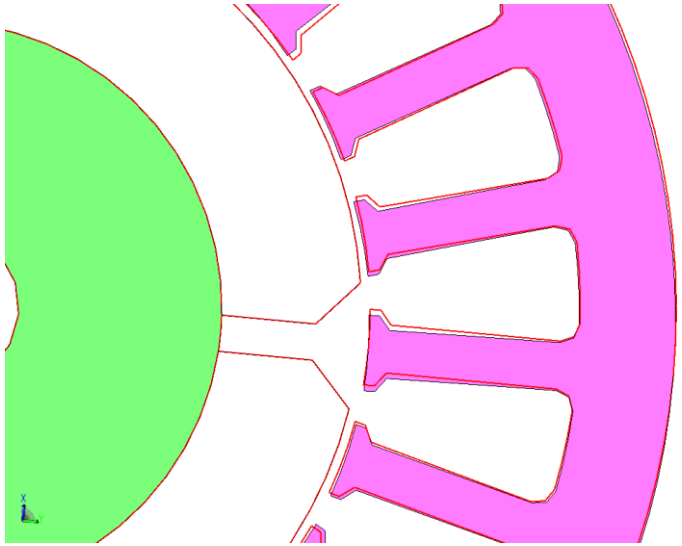
如果振动产生的位移不影响磁场，则通过电磁力进行单方向耦合。
磁场解析和振动解析通常需要因方法，维度的不同需要进行电磁力的转换。



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

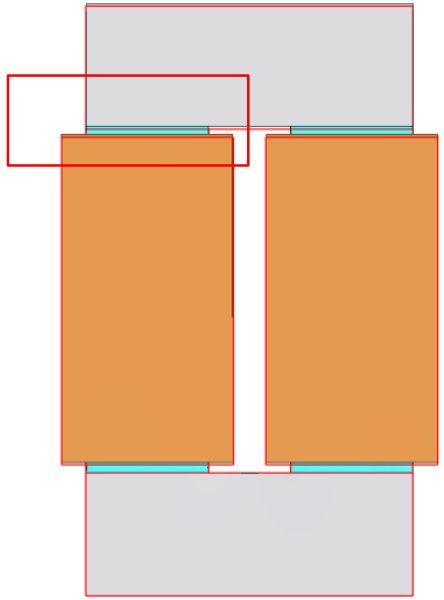
关于单方向耦合的有效性

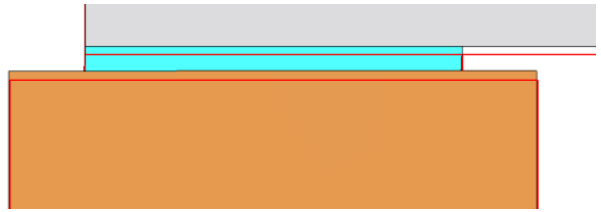
与气隙长度和磁路长度相比，由振动引起的位移/变形通常很小，并且几乎不影响磁路。



气隙长0.5(mm)　　最大位移6e-6(mm)

电机





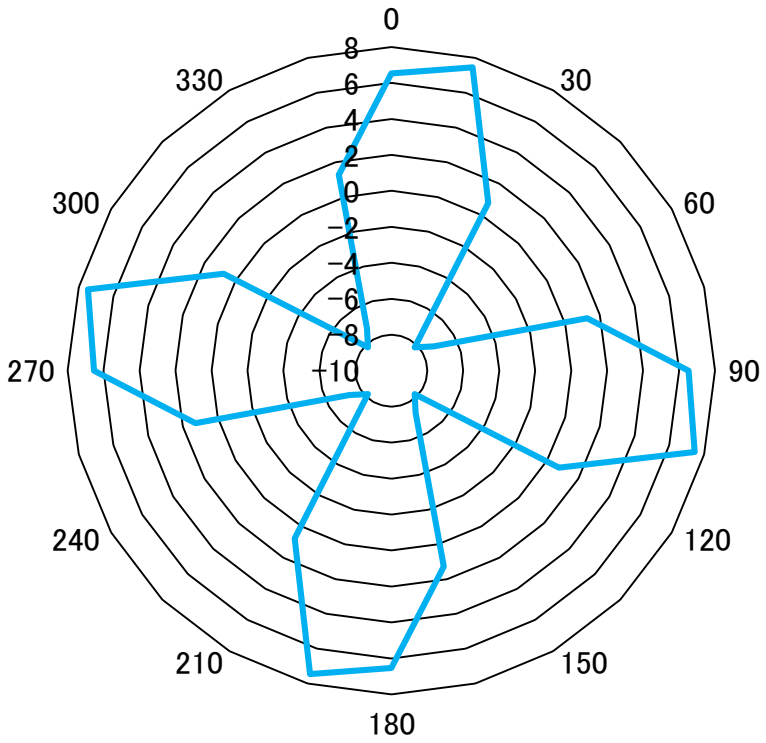
气隙长0.1(mm)　　最大位移9.8e-6(mm)

电抗器

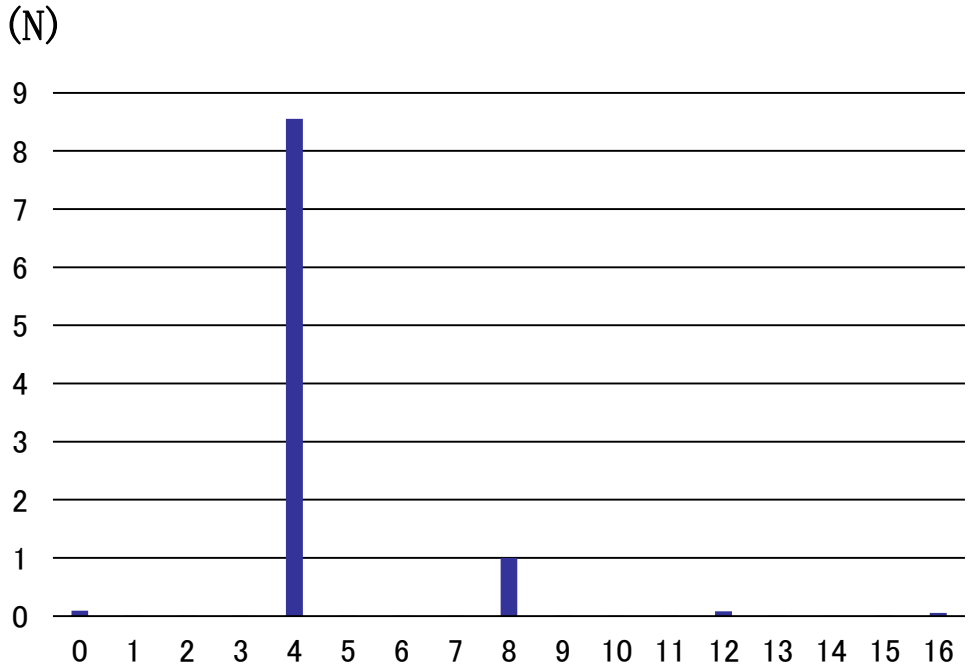
Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

只进行磁场解析的激振力评价

通过将激振力进行空间展开，可以确认各个共振模态的影响程度。



激振力的空间力型

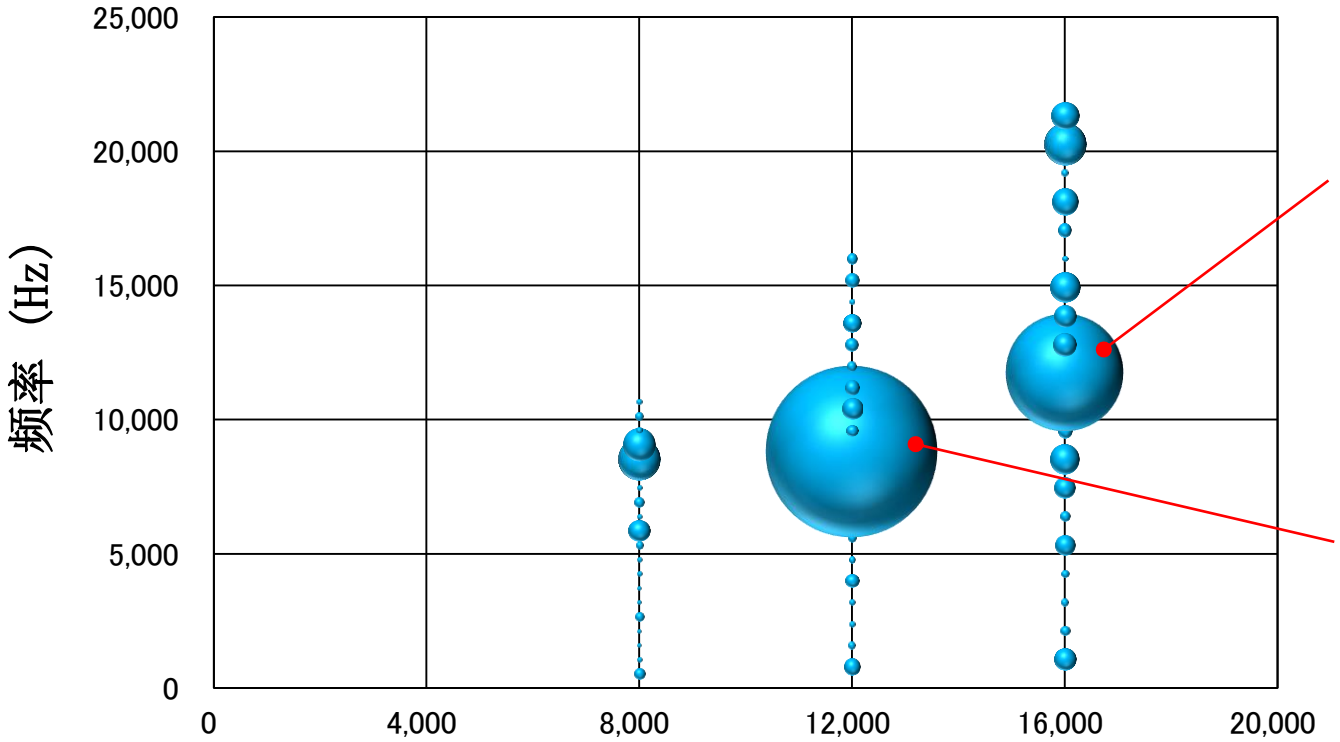


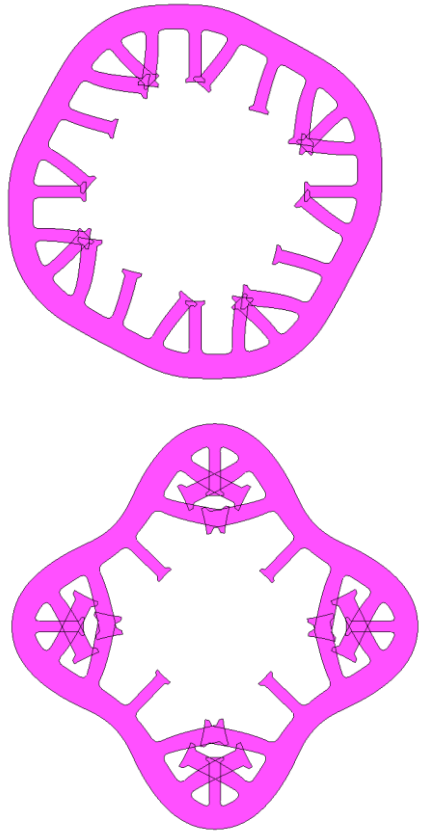
空间模态的次数

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

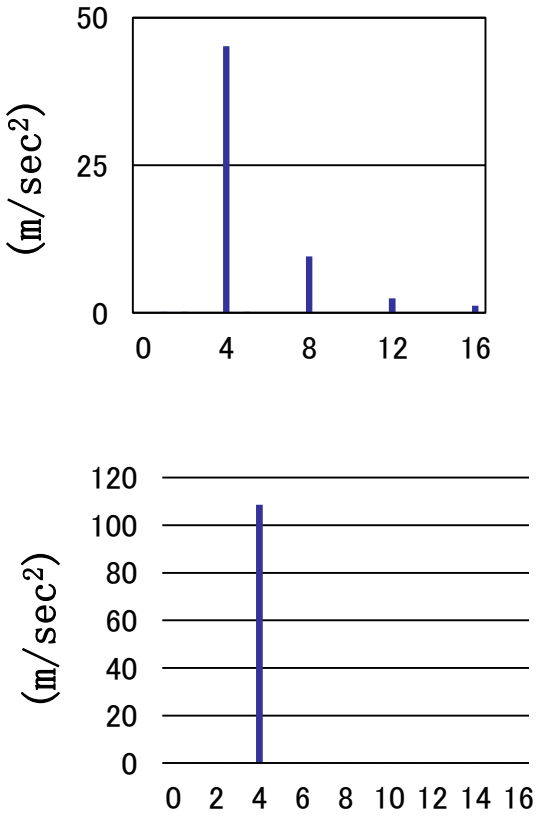
振动解析的结果

强共振处的频率的振动模态和激振力的空间模态一致。





振动模态



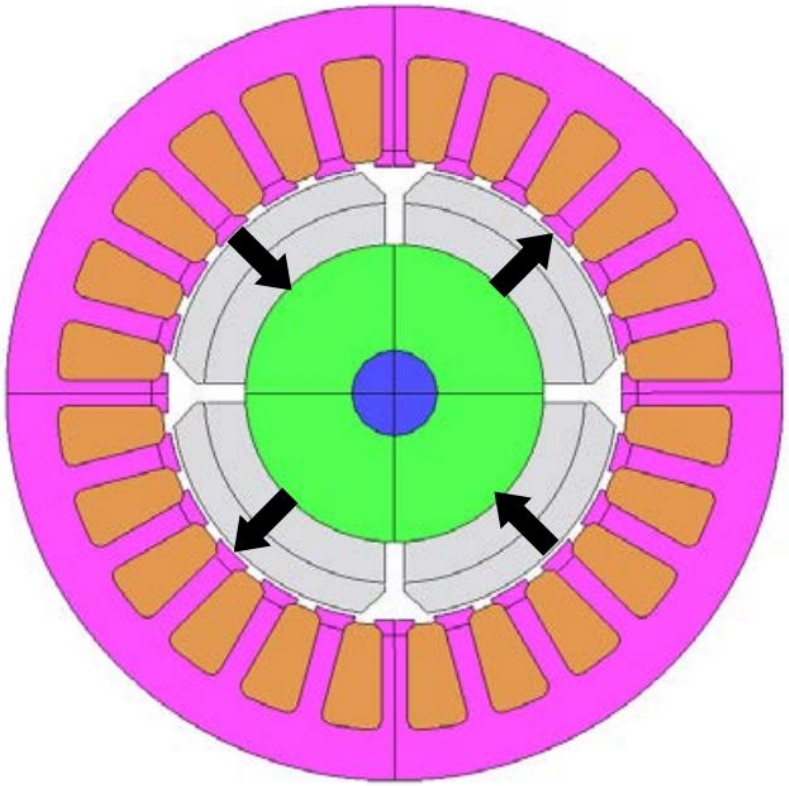
空间模态阶数

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

四、JMAG振动噪音案例分析

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

1、分析模型和规格参数



24S4P电机

主要参数/单位	数值
极数/槽数	4/24
定子外径/ mm	81.6
转子外径/ mm	31.4
气隙长度/ mm	0.5
铁心长度/ mm	45

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

2、模态分析

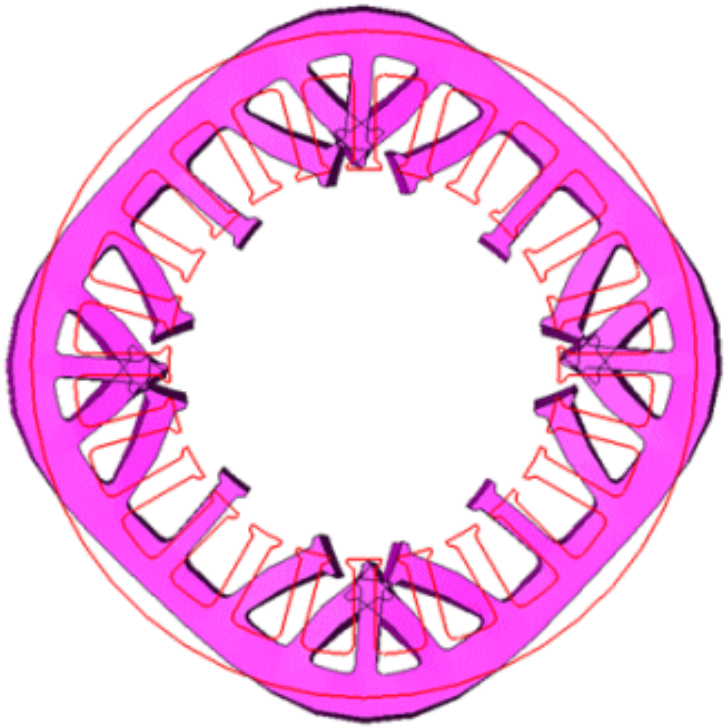


Fig. 1 Eigenmode of the Square Form Mode

Table 1. Eigenfrequencies

Eigenmode	Orders	Eigenfrequency
spatial 4th-order	42, 43	10.8 kHz

- 在本文档中，重点关注空间四阶模态。根据模态分析结果，找到每种振动模式的模态频率，如上表所示。

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

3、Campbell分析

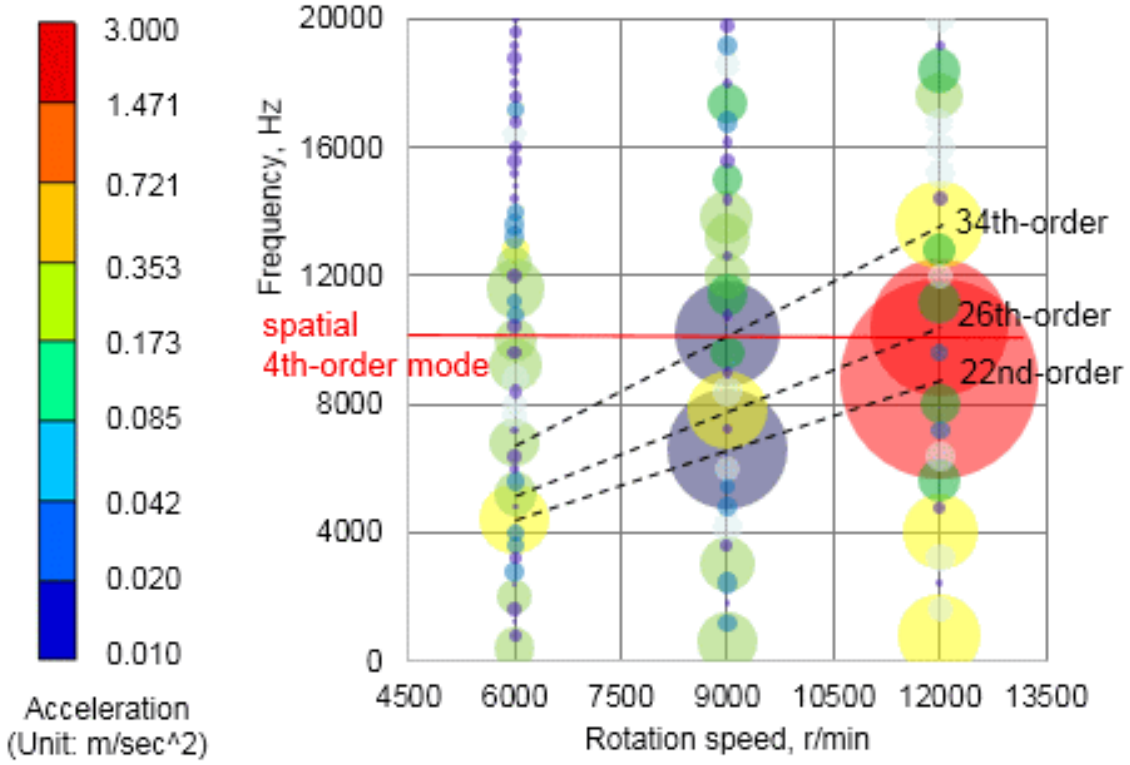
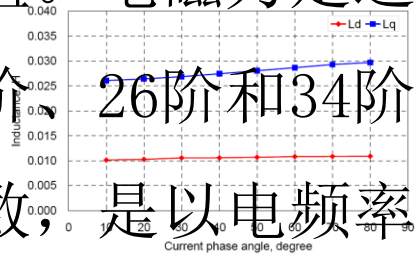


Fig. 4. Eigenmodes Dependent on Electromagnetic Force Order and Number of Poles

- 从Campbell图中可以看到一些特别大的加速度值。电磁力是这些振动的激振力，分别为22阶、26阶和34阶（这里的阶次是指电磁力次数，是以电频率为基频的）。



- 同时可以看出转速升高，加速度增大，这是由于电磁力22阶、26阶和34阶频率接近4阶模态的固有频率。这就会导致电磁力的特定频率分量与某些模态发生强烈共振。

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

4、确认共振频率下的振动模式

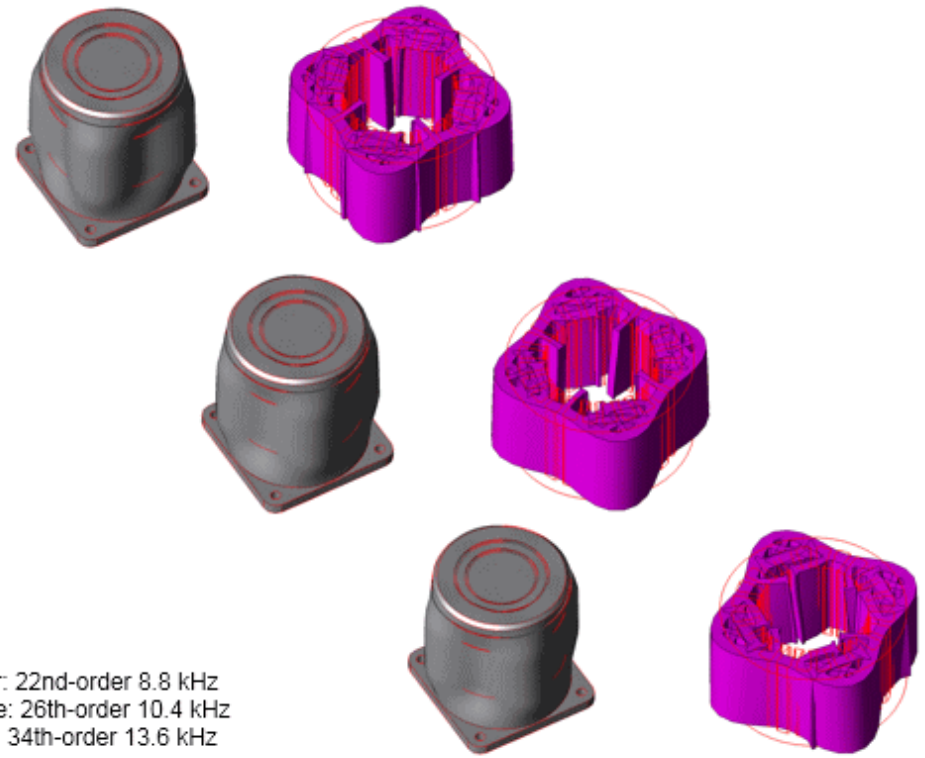
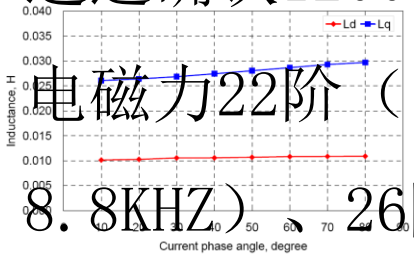


Fig. 5. Resonance Vibration Modes at 12,000 r/min

- 通过确认12000rpm工况下，产生共振的电磁力22阶（即对应加速度频率8.8KHZ）、26阶（即对应加速度频率10.4KHZ）、34阶（即对应加速度频率13.6KHZ）的振动模式，发现均为4阶的模态。



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

5、绘制对比共振阶次的加速度和径向电磁力的雷达图

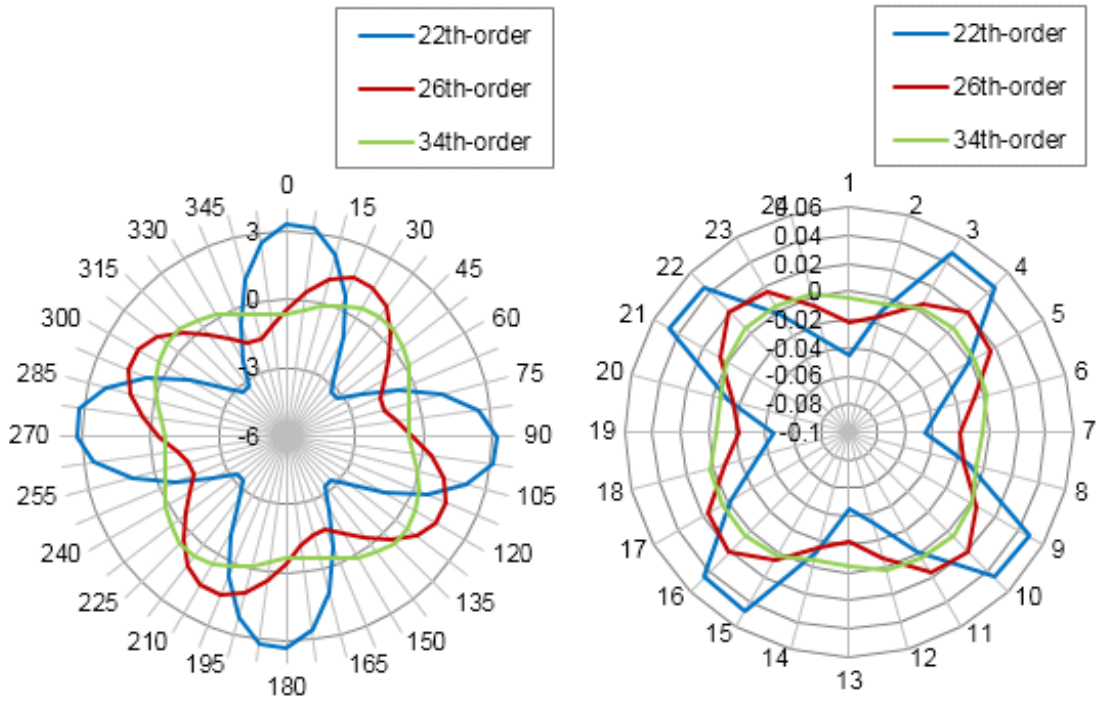
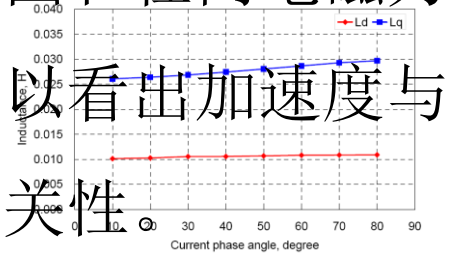


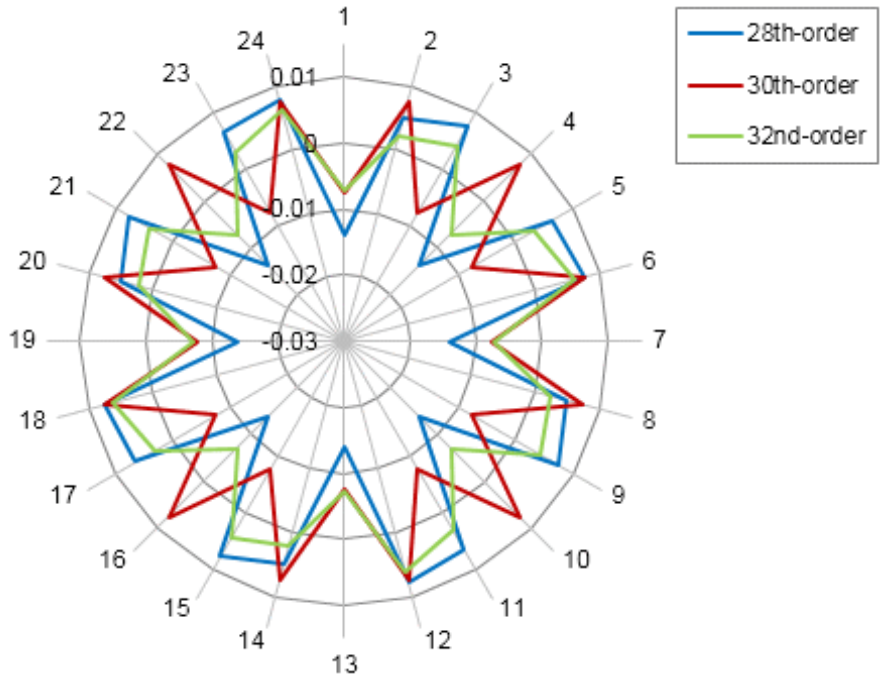
Fig. 6. Spatial 4th-Order Mode Vibration and Electromagnetic Force

- 绘制相位0度处的圆柱坐标R分量雷达图和径向电磁力空间分布的雷达图，可以看出加速度与电磁力之间有很强的相关性。



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

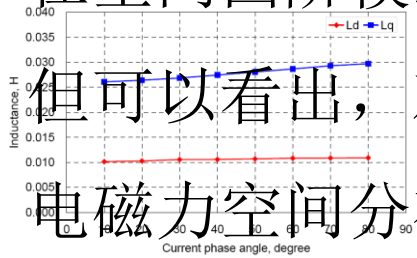
6、绘制共振频率附近其他阶次的电磁力雷达图



(Unit: N)
The 28th- and 32nd-order electromagnetic forces are in spatial 8th-order mode, and the 30th-order electromagnetic force is in spatial 12th-order mode.

Fig. 7. Spatial Non-4th-Order Electromagnetic Force

- 在空间四阶模态频率附近的频率分量，但可以看出，对于28阶和32阶，对应的电磁力空间分布为8阶数，对于30阶，对应的电磁力空间分布为12阶数，都不是4阶模态，因此振动比较小。

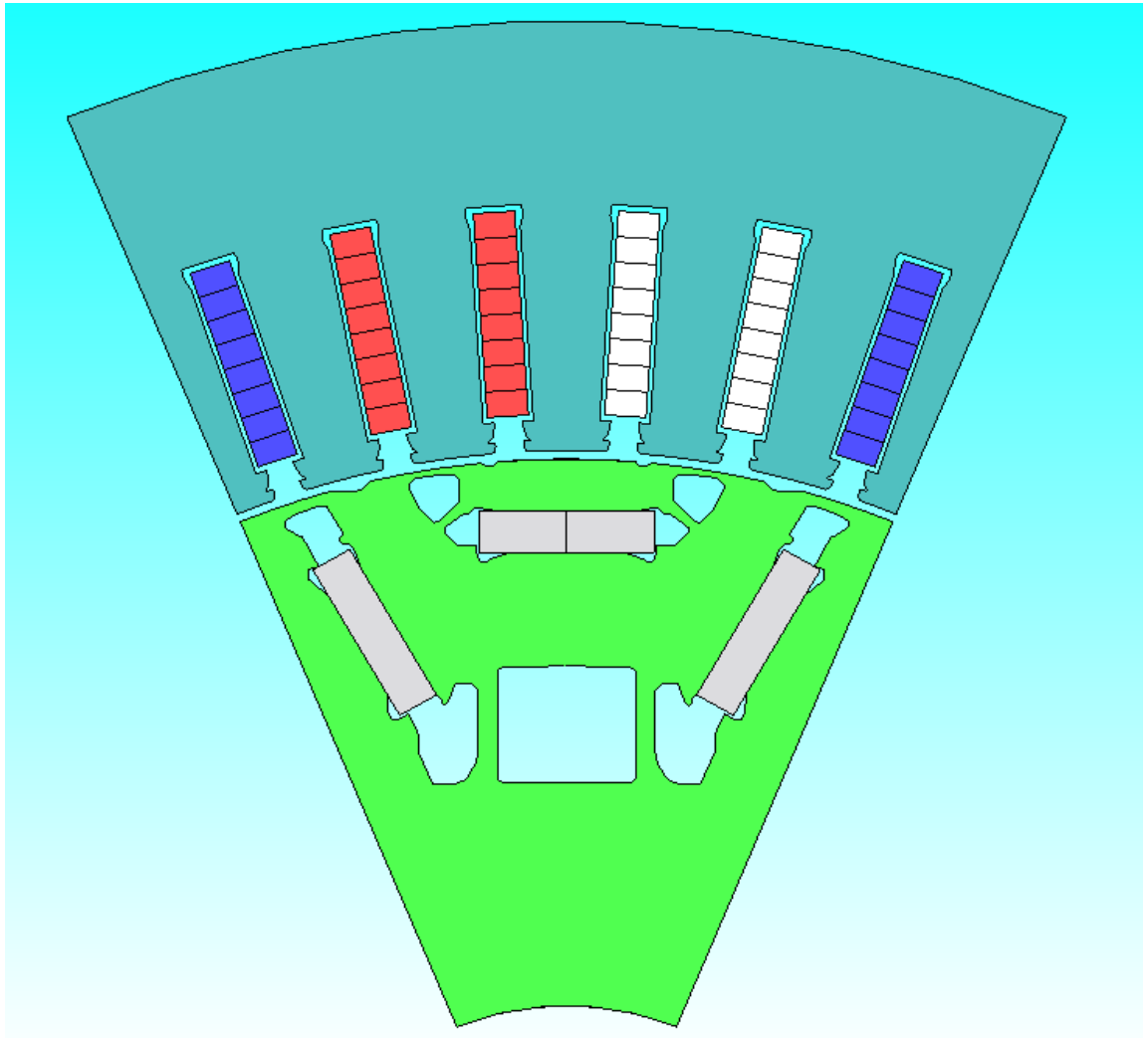


Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

五、电机结构优化

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

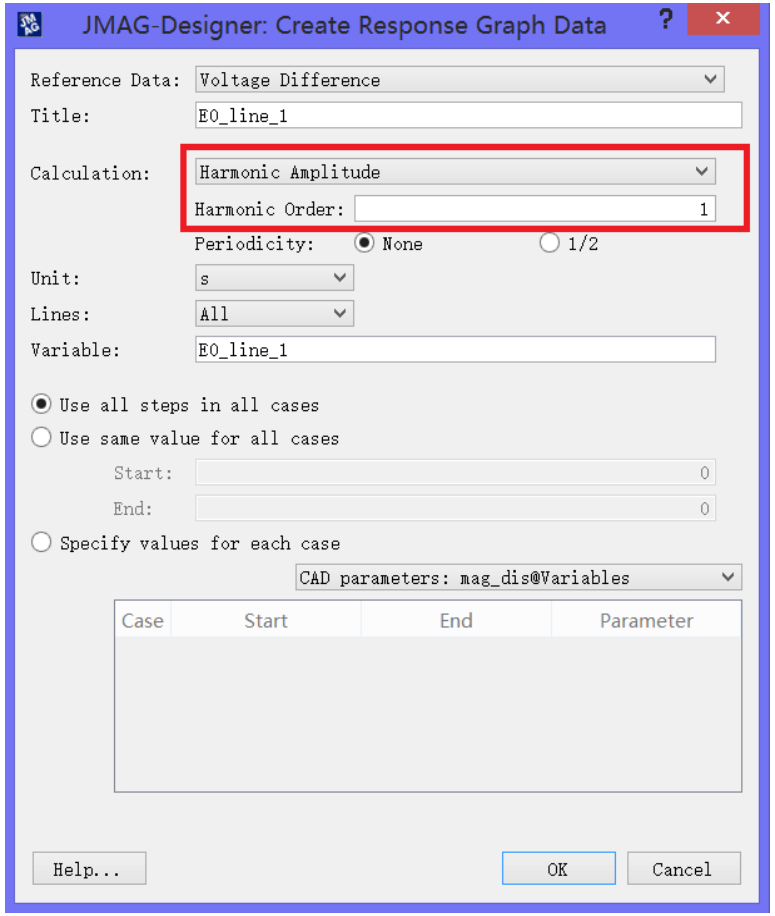
1、设计思路



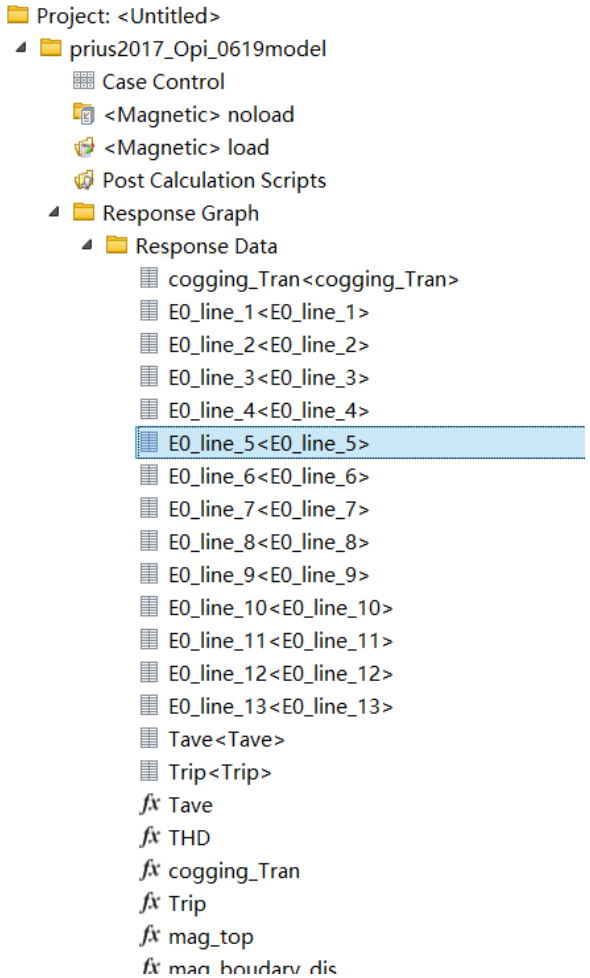
- 通过通用的几何约束对转子外表面的孔大小、深度和位置进行参数化。
- 通过JMAG的直接建模功能可以非常方便对磁铁V形夹角、径向位置，周向位置进行参数化。
- 可以通过创建组将齿槽转矩、转矩脉动、转矩平均值、感应电动势的THD、齿部某个次数的电磁力等作为优化目标。

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

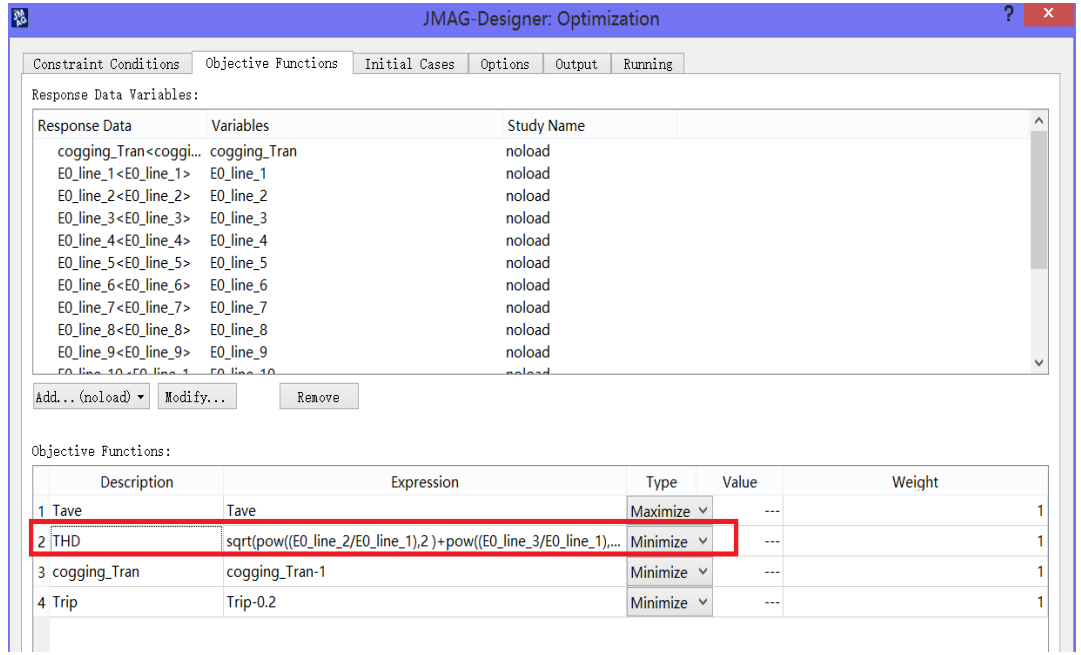
2、THD创建



设置感应电动势谐波幅值



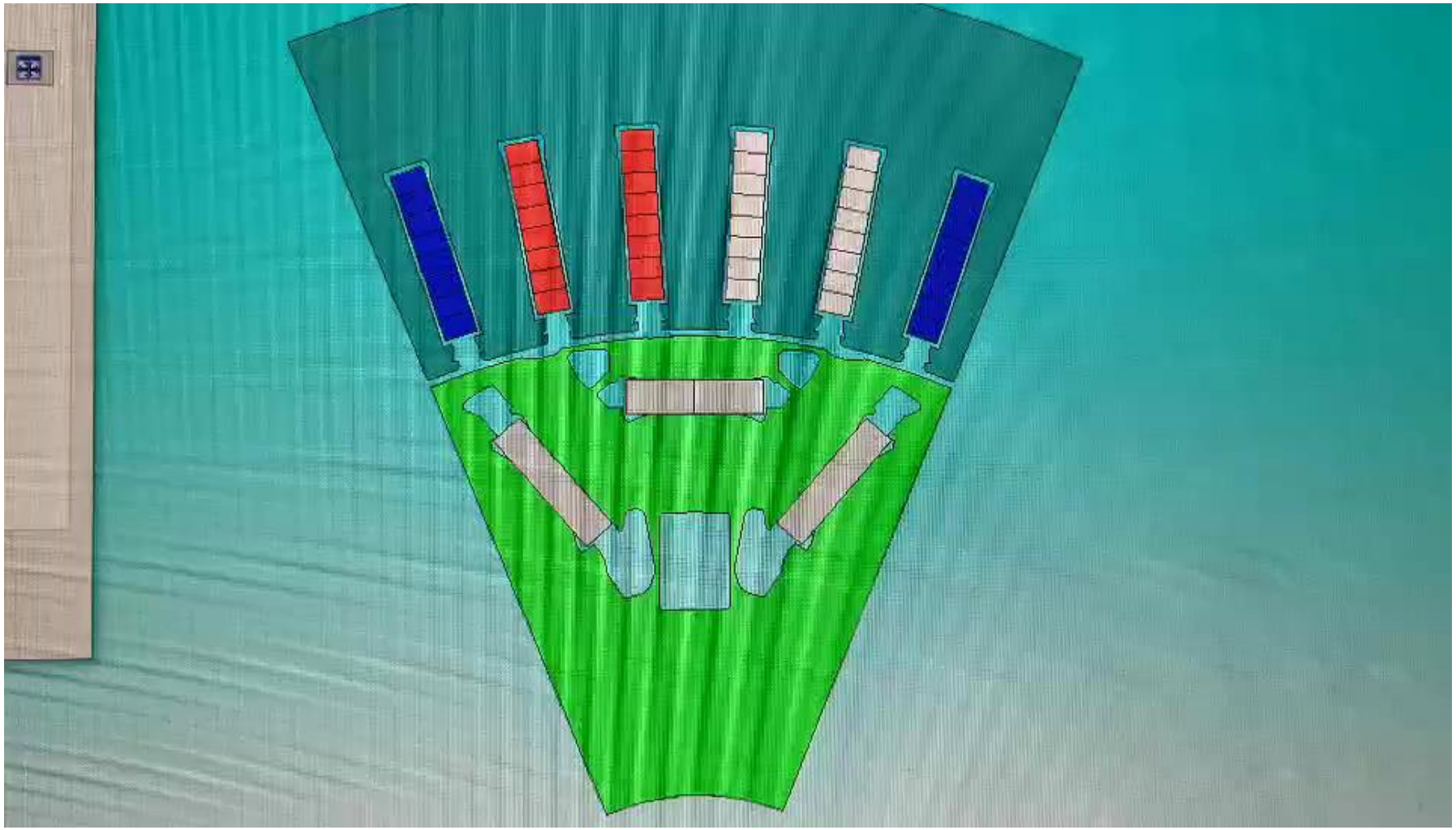
创建优化分析组



感应电动势的THD表达式创建

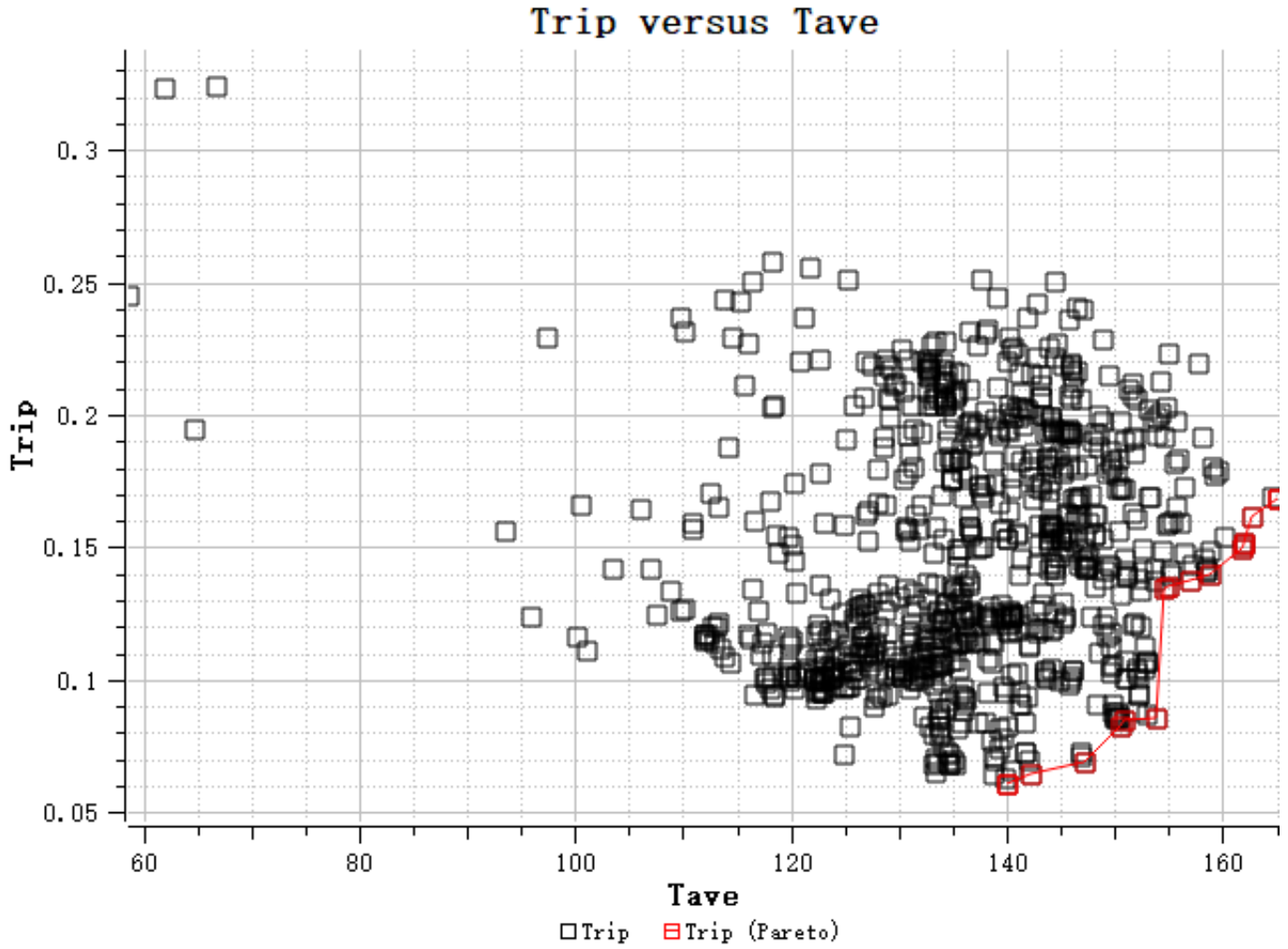
Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

3、运行过程



Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

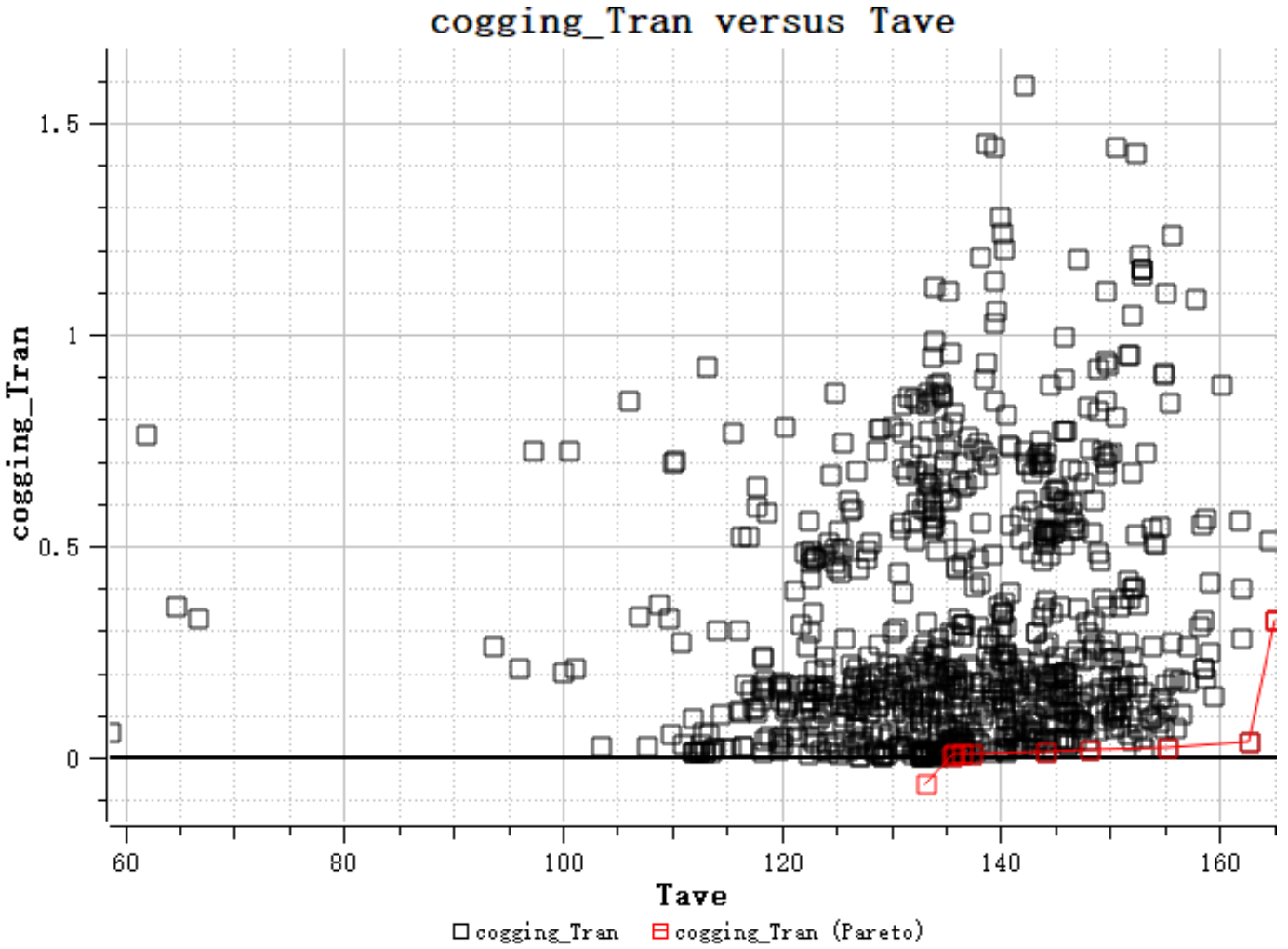
4、优化结果



转矩脉动-平均转矩的帕累托前沿

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

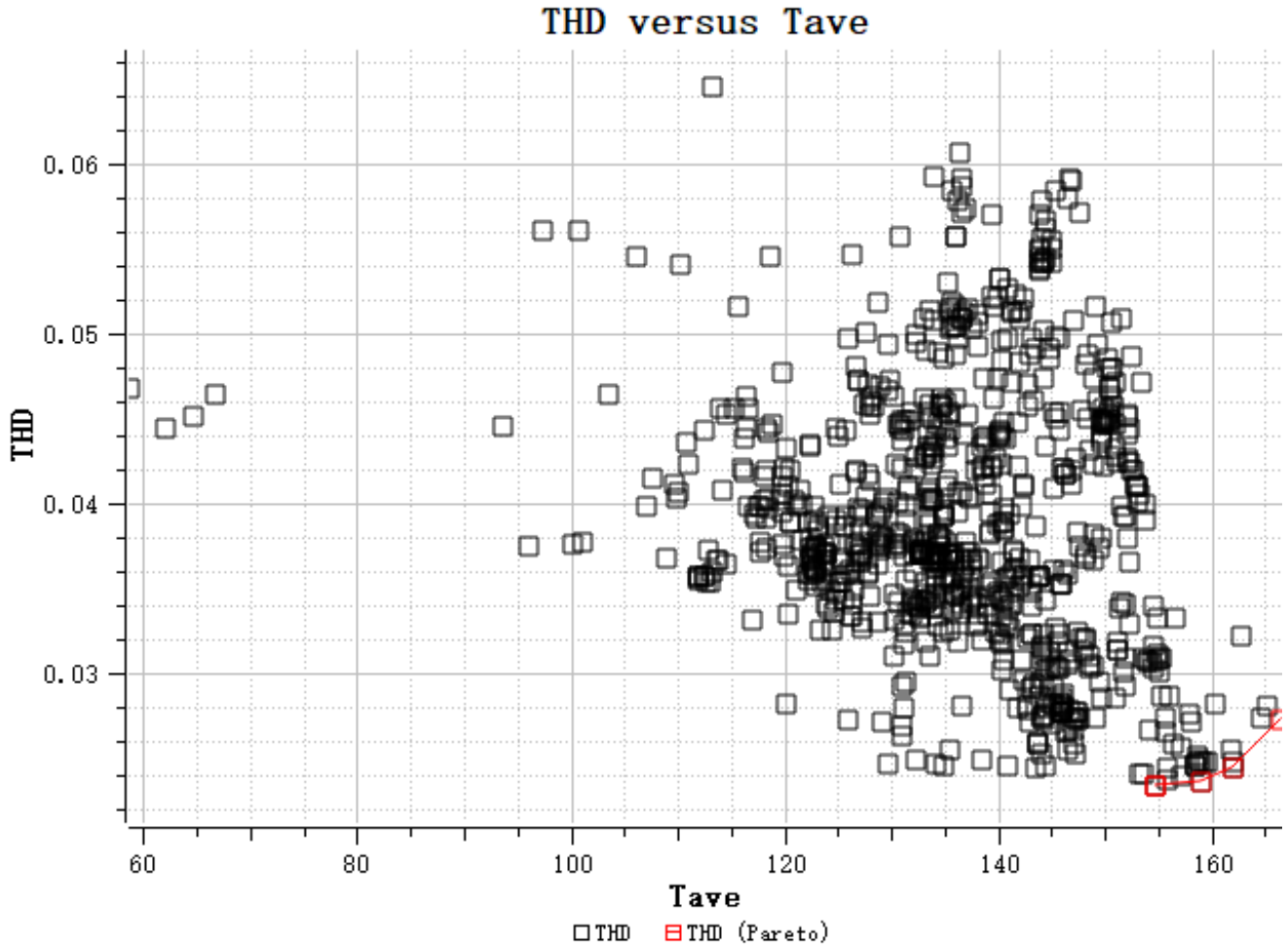
4、优化结果



齿槽转矩-平均转矩的帕累托前沿

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

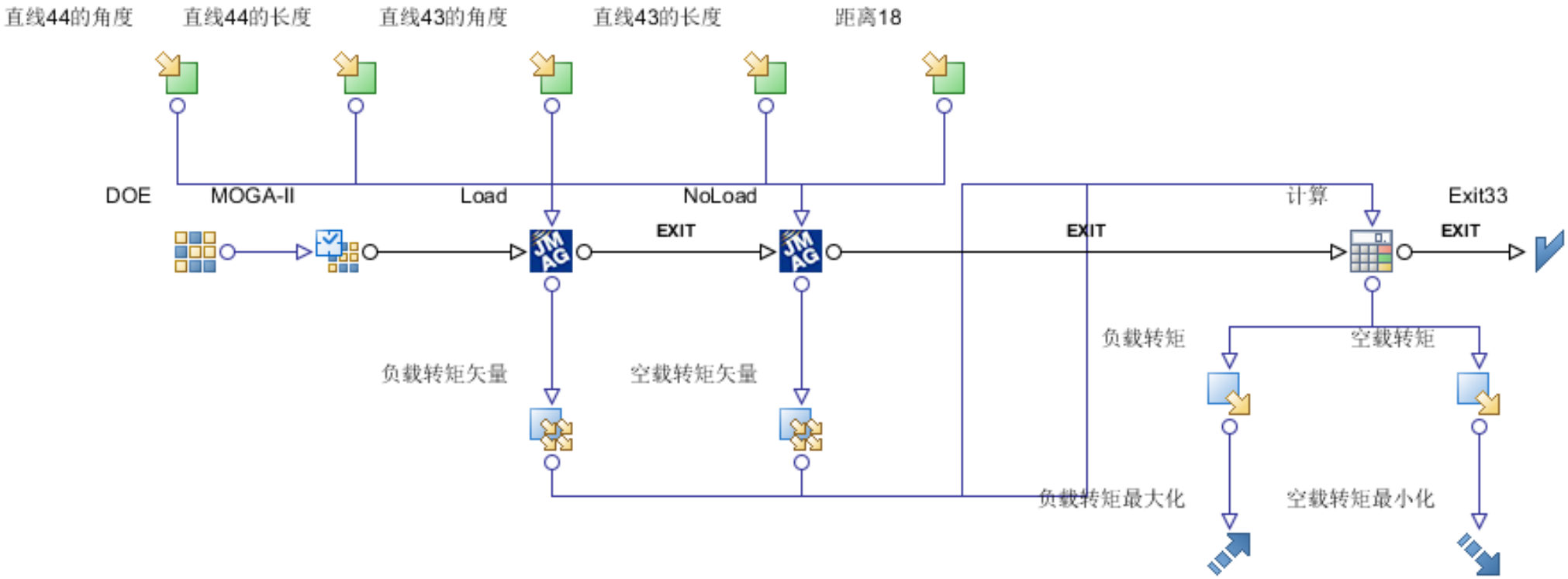
4、优化结果



线感应电动势THD-平均转矩的帕累托前沿

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

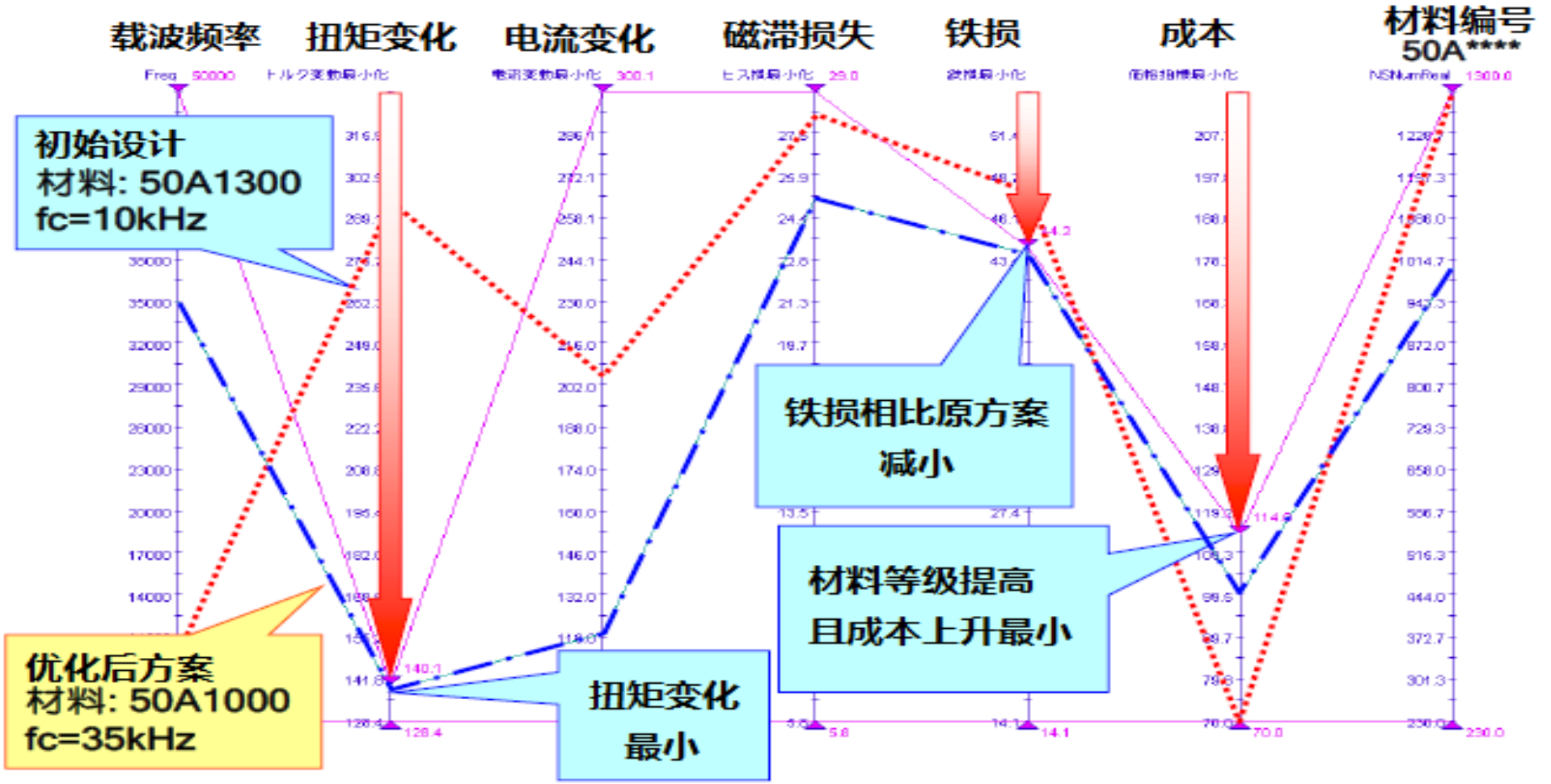
5、JMAG+modeFrontier优化



Modefronter+JMAG实现多目标优化的解决方案

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

5、JMAG+modeFrontier优化



基于需要可以过滤掉不需要的设计

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

艾迪捷信息科技(上海)有限公司

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

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

Copyright © IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.