

# 大型汽轮发电机端部绕组电磁力分析

## Analysis of Electromagnetic Force in the End Winding of Giant Turbo-generator

曾冲

重庆大学电气工程学院

**摘要：**汽轮发电机端部故障是导致事故的一个重要原因。文中给出了端部绕组电磁力的计算方法，以一台 1550MW 半速核能发电机为例，通过 JMAG 有限元软件仿真计算得出了发电机定子绕组端部各部分在额定工况下的受力情况。通过分析得出端部绕组受力的组成及其原理。

**关键词：**汽轮发电机；端部绕组；电磁力

**Abstract:** The fault in the end region of turbo-generator causes lots of accident. In this paper, a method for calculating end winding electromagnetic force is specified. To a 1550MW half speed nuclear power generators, for example, electromagnetic force on the end region of stator winding is calculated by JMAG a finite element software. As a result, the composition and the principles is obtained.

**Key words:** turbo-generator; end windings; electromagnetic force

### 0 引言

根据电机运行部门统计，汽轮发电机端部故障导致事故在所有事故中占有相当大的比例，因此发电机端部的合理设计对发电机的运行至关重要。同时由于汽轮发电机端部结构复杂，对其端部的分析以及对其端部结构的优化也是大量科研技术工作者的工作重点和难点。

用全三维有限元模型准确计算分析大型汽轮发电机的端部电磁场以及受力情况，对预防和减少由发电机端部故障引起的事故以及优化发电机端部结构都有着重要意义。

### 1 端部绕组电磁力的计算原理

在对端部定子绕组的振动进行分析计算之前，必须准确地求出端部绕组受到的电动力由洛伦兹力的公式，可以推导出：

$$d\vec{F} = id\vec{l} \times \vec{B}$$

式中  $i$  线圈中通过的电流；  $\vec{B}$  线圈所在处的磁通密度；  $d\vec{F}$  作用于元长度  $d\vec{l}$  上的洛伦兹力。

一般而言，在有限元分析中，每一单元的磁通密度  $\vec{B}$  和电流密度  $\vec{J}$  确定后，单元的洛伦兹力密度由下式确定：

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B}$$

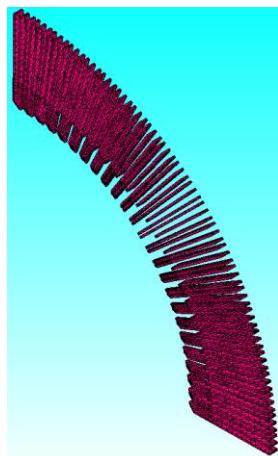
由此物体所受洛伦兹力为：

$$\vec{F} = \int_{Vol} \vec{J} \times \vec{B} dVol$$

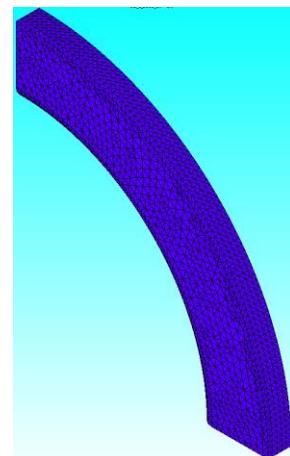
## 2 模型的建立与条件的设置

### 2.1 导入的模型

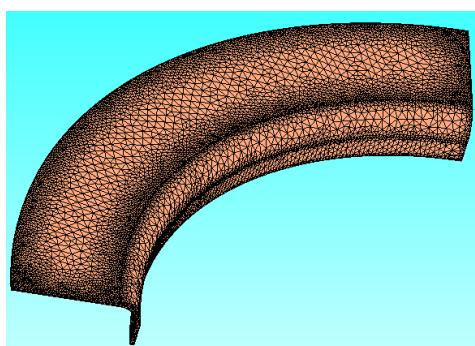
通过 sat 格式将已有的发电机端部几何模型导入 JMAG，并建立有限元计算的剖分模型。剖分后模型如下图所示：



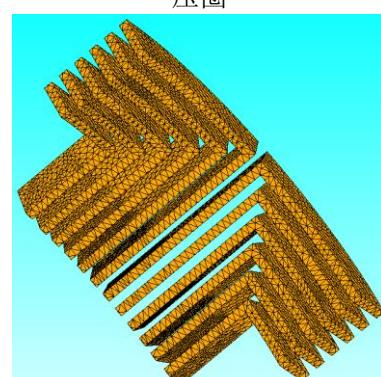
长、短压指



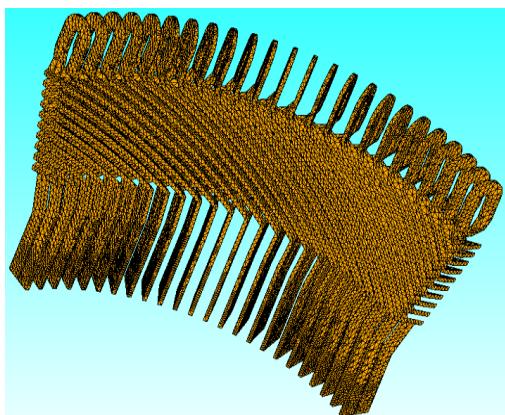
压圈



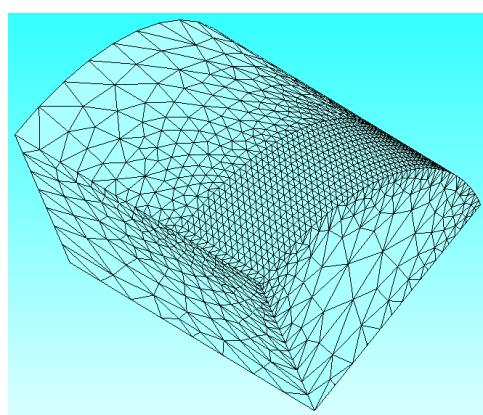
铜屏蔽



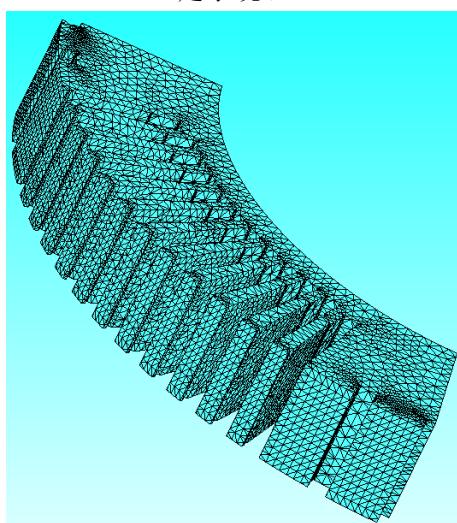
转子绕组



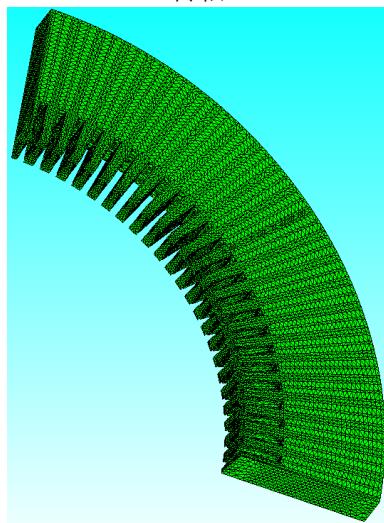
定子绕组



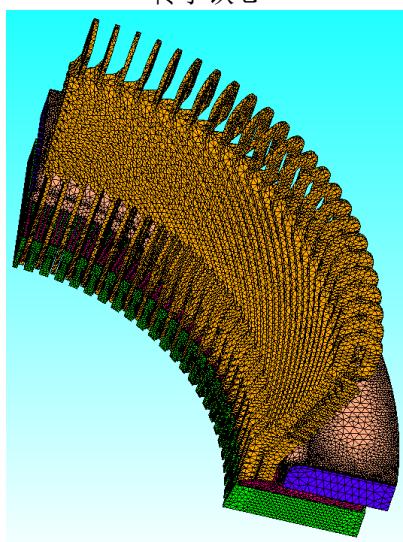
转轴



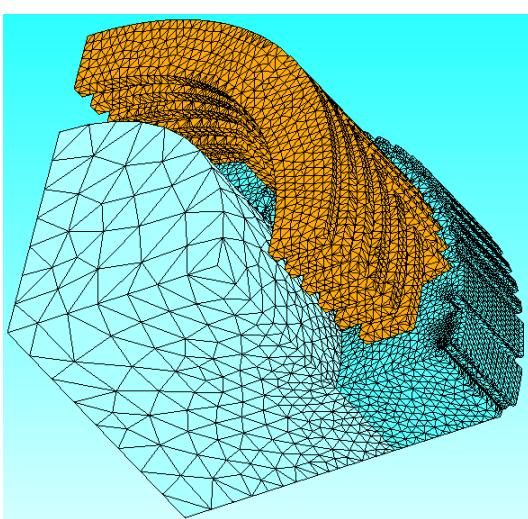
转子铁心



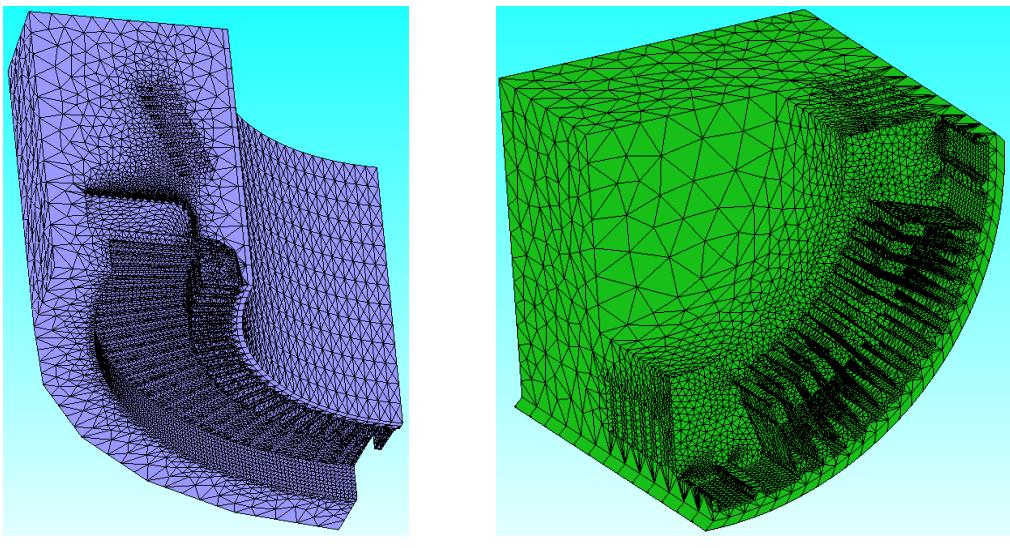
定子铁心



定子端部



转子端部



定子空气包

转子空气包

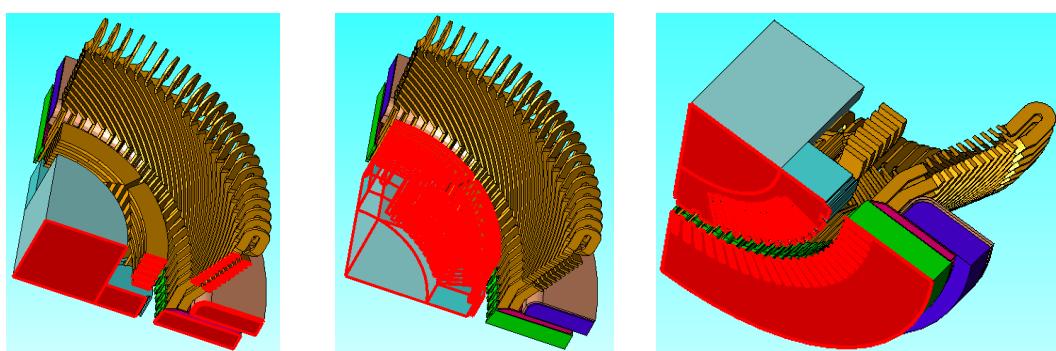
图 1 端部各部分模型剖分图

## 2.2 边界条件的设置

同时为计算设置边界条件如下：

1. 旋转周期性边界条件：半速汽轮发电机，4 极，其他各磁极与该磁极成反周期性重复。
2. 运动条件：半速汽轮发电机，同步转速为 1500rpm，设置转子上所有构件以同步转速运动，并设定转子初始位置角为 52.5 度，以确保初始时刻励磁磁场轴线与定子 A 相绕组轴线重合。
3. 对称边界条件：研究端部电磁场还需要取铁心轴向一定长度来更加准确地反映端部效应，因此形成一个端部截面，由于该截面上磁场分布主要受定转子槽内绕组的影响，因此可将该截面设置成轴向对称边界条件。

各类边界条件的设置情况如下图所示。



旋转周期性边界条件

运动边界条件

对称边界条件

图 2 各类边界条件的设置

### 3 端部绕组的受力分析

#### 3.1 检测点的设置

如图 1 所示, 发电机端部绕组由直线段、渐开线和鼻端组成。由于其结构具有一定的复杂性为了得到全面的结果, 在绕组上设置 31 个检测点如图所示。

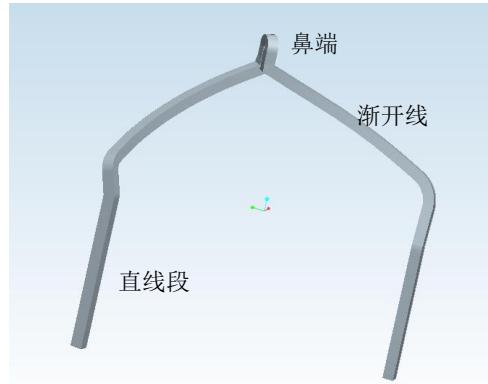


图 3 单根绕组结构示意图

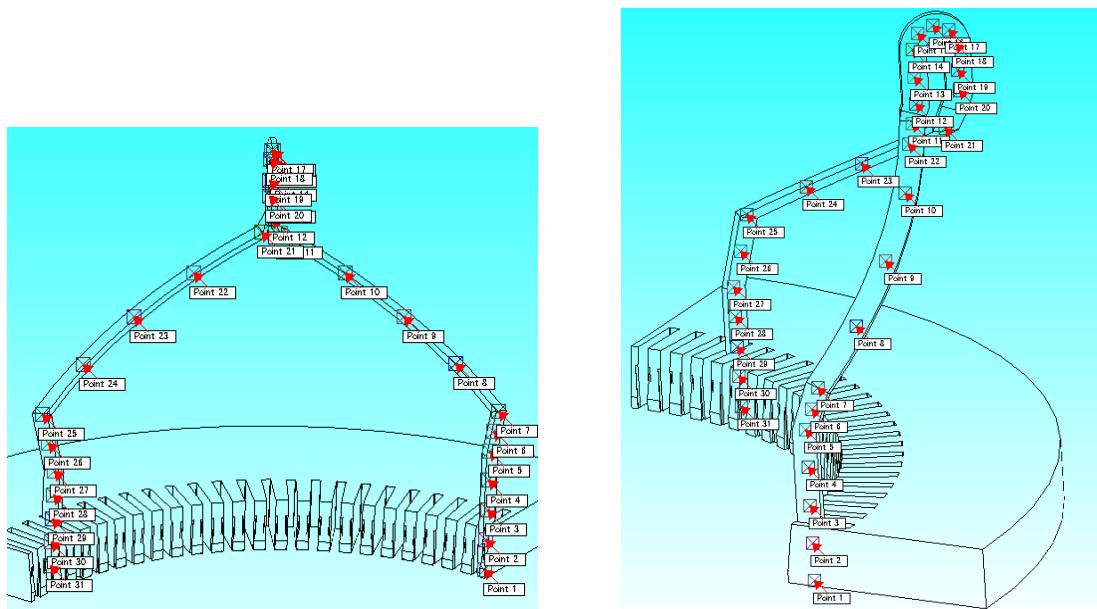


图 4 端部绕组检测点设置

#### 3.2 端部绕组总体受力分析

在额定工况进入稳态后, 20ms 到 60ms 受力的绝对值, 径向分量、周向分量以及轴向分量如下所示:

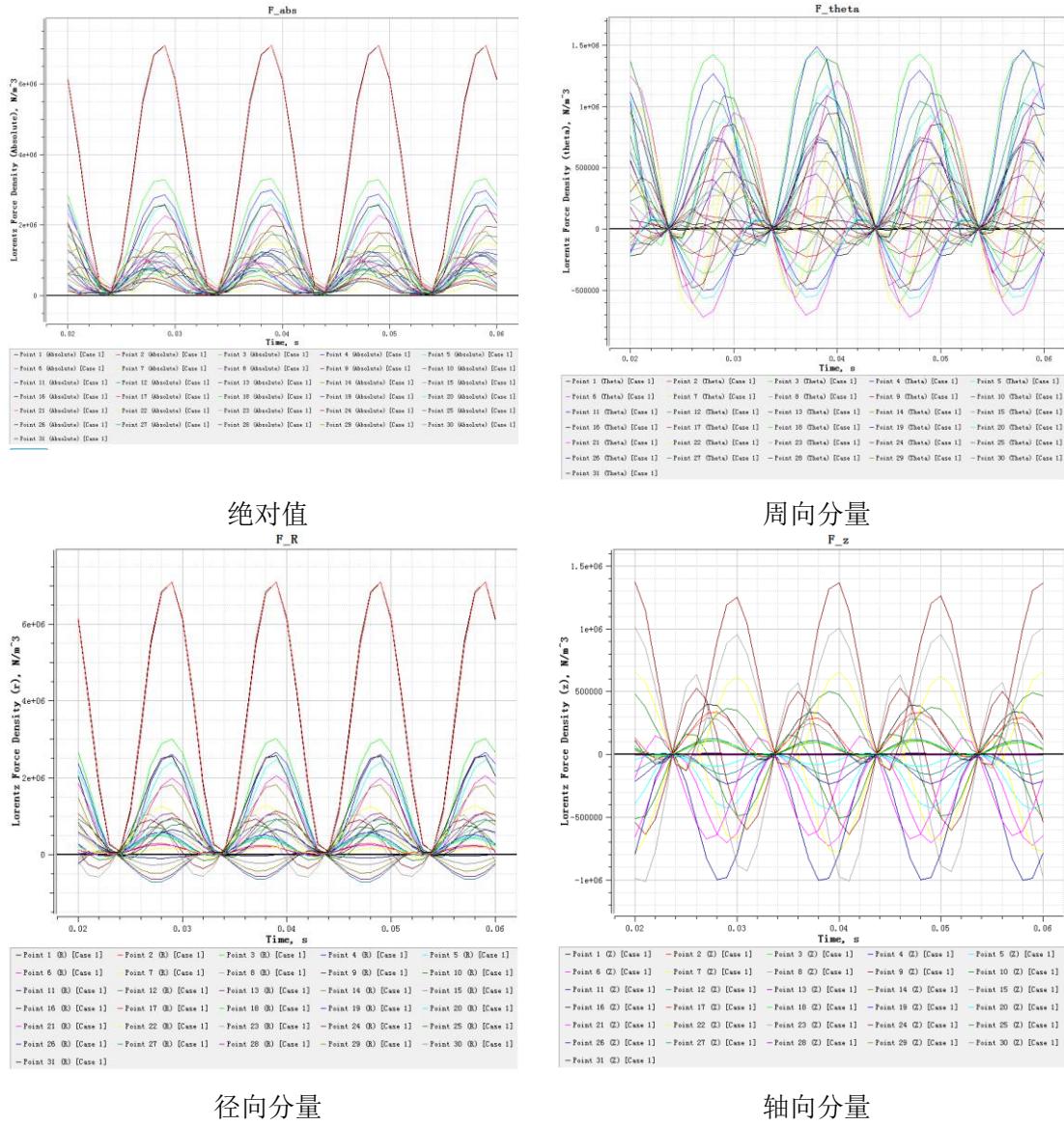


图 5 额定工况端部绕组检测点各受力分量

由上图可以看出，各检测点受力大致呈正弦波形，主要由直流分量和二倍频分量组成。因此在接下来的分析中主要分析直流和二倍频分量，忽略其他谐波分量。为了更加准确和深入的分析，分别在端部绕组的直线段、渐开线和鼻端进行进一步的分析研究。

### 3.3 端部绕组各部分受力分析

#### 3.3.1 直线段受力分析

端部绕组直线段受力具体如下所示：

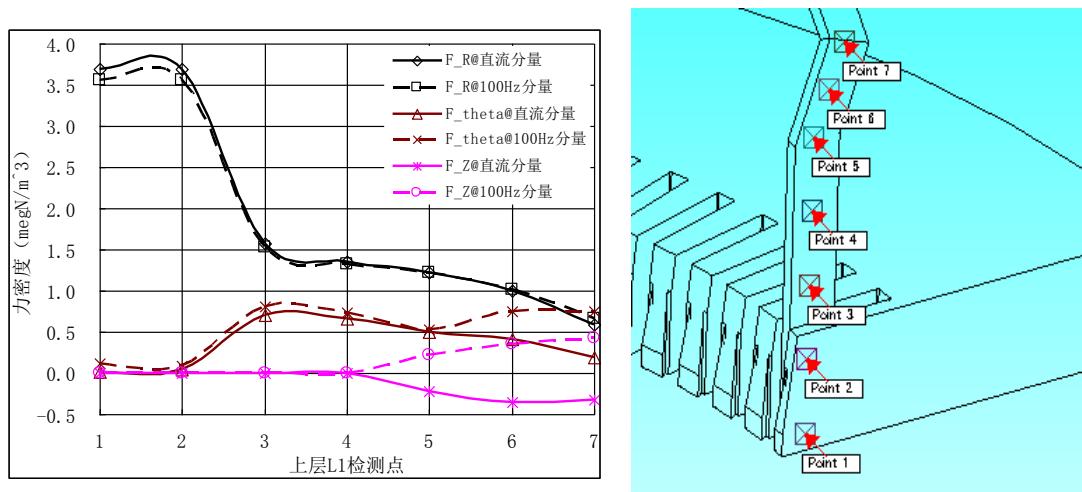


图 6 直线段受力图

可以看出：

- 1) 直线段受力的直流分量与交流分量幅值基本相同；
- 2) 在铁心内部分（1、2号检测点）中主要受到径向力的作用，周向分量相对较小，而轴向分量几乎为0，说明该段线棒在定子铁心槽内对槽底部绝缘会产生较大的压力的同时还有较大的100Hz径向交变的力；该段线棒受定子槽的保护损坏的可能性较小，但周期性交变的径向力对槽内绝缘和槽楔的疲劳是一个考验；
- 3) 随线棒直线段伸出铁心（3、4、5号检测点），由于线棒离开主磁路，进入端部漏磁场，因而受力径向分量迅速减小，周向分量增加，轴向分量开始出现向中间挤压的力；
- 4) 随线棒直线段伸出铁心并进入到过渡段（6、7号检测点），受力径向分量进一步趋于减小，周向分量成为主要成分，轴向分量向中间挤压的力加大。

### 3.3.2 渐开线受力分析

端部绕组渐开线受力具体如下所示：

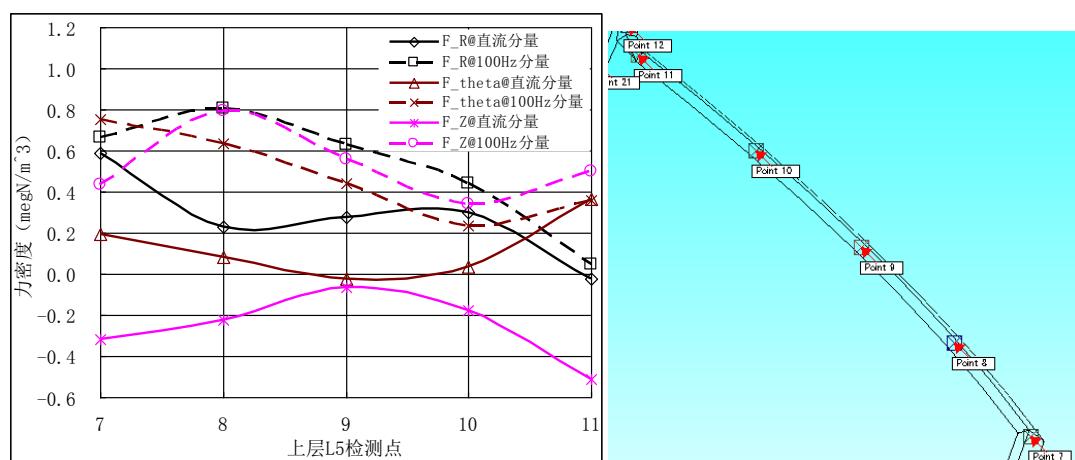


图 7 渐开线受力图

由于渐开线段中电流方向与直线段不同，不再仅沿轴向分布，所以其受力规律也表现出较大差异且更加复杂：

1) 各分量的力中交变分量相对于直流分量较直线段提高, 某些位置交变分量甚至成为主要分量; 上下层线棒渐开线段轴向力直流分量为负值, 表明渐开线段受到轴向压缩的力, 同时也受到轴向压缩和拉伸的交变力;

2) 随着渐开线远离铁心端面, 径向力分量和周向力分量的直流分量趋于减小, 但由于交变分量相对较大, 会使得渐开线段在径向方向受到扩张和压缩的交变力, 需要固定; 轴向力直流分量为负值, 表明渐开线段受到轴向压缩的力, 同时也受到轴向压缩和拉伸的交变力。

### 3.3.3 鼻端受力分析

端部绕组鼻端受力具体如下所示:

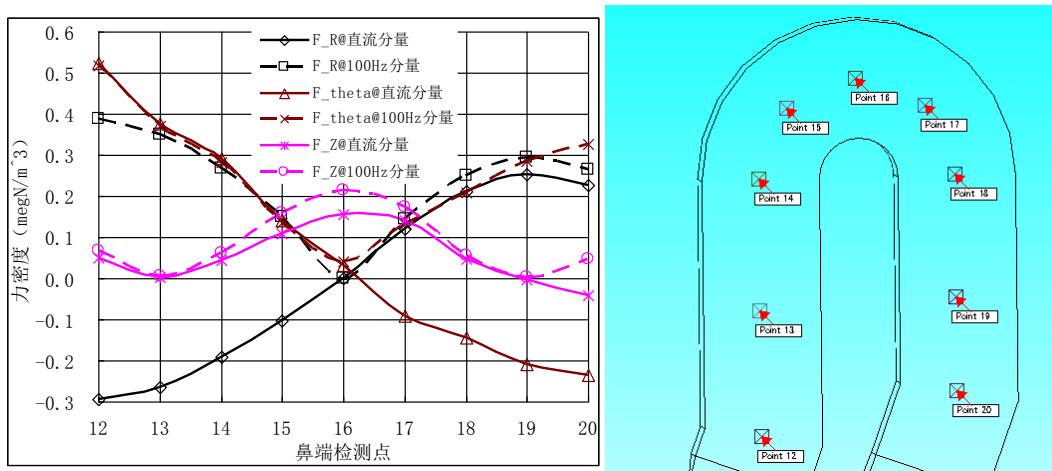


图 8 鼻端受力图

1) 鼻端段受力的直流分量和交变分量规律基本一致, 可表示为各方向受到恒定力和交变力的共同作用;

2) 两侧电流方向相反, 受力呈现一定的对称性, 表明鼻端将受到使其扭曲的力。

## 4 结语

计算结果表明定子绕组端部受力主要由直流分量和 2 倍频分量组成, 其中径向分量大于轴向分量和周向分量。在定子绕组端部各部分中直线段大于渐开线段大于鼻端, 这与端部磁场分布的规律基本一致。

## 5 参考文献

- [1]. 刘明丹与刘念, 发电机端部绕组电动力计算及振动分析. 电力系统自动化, 2005 (15).
- [2]. 任盼秋等, 1150MW 核能发电机定子端部绕组三维建模. 大电机技术, 2012 (04).
- [3]. 汪耕与李希明, 大型汽轮发电机设计、制造与运行. 上海科学技术出版社, 2012.