



*Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*  
*Center for More-Electric-Aircraft Power System*



# 分布绕组内置式永磁同步电机电磁力分析

张佳敏 姜文颖 张卓然 张震

南京航空航天大学

- 研究背景
- 电磁力谐波分析
  - 气隙磁密
  - 电磁力
- 有限元仿真分析
- 结论

- 研究背景
- 电磁力谐波分析
  - 气隙磁密
  - 电磁力
- 有限元仿真分析
- 结论

## □ 电动汽车



Toyota Camry

8极48槽 IPMSM

## □ 永磁电机

- ✓ 高效率
- ✓ 高功率密度
- ✓ 快速动态响应
- ✓ ...

## □ 振动噪声 (NVH)

- ✓ 机械振动噪声
- ✓ 空气动力振动噪声
- ✓ 电磁振动噪声



径向电磁力

- 研究背景
- 电磁力谐波分析
  - 气隙磁密
  - 电磁力
- 有限元仿真分析
- 结论

## □ 径向气隙磁密

- 径向气隙磁密公式

$$B_r(\theta, t) = f(\theta, t) \Lambda(\theta, t)$$

$f(\theta, t)$  为磁动势 (MMF),  $\Lambda(\theta, t)$  为气隙磁导。

- 永磁电机的气隙磁密由永磁体产生的磁场以及电枢绕组产生的磁场相互作用而成

$$f(\theta, t) = f_{PM}(\theta, t) + f_{AM}(\theta, t)$$

$$f_{PM}(\theta, t) = \sum_{\mu} F_{\mu} \cos(\mu\omega t - \mu p\theta - \phi_{\mu}) \quad \mu = 2k+1, k \text{ 为自然数}$$

$$f_{AM}(\theta, t) = \sum_{\nu} F_{\nu} \cos(\omega t - \nu p\theta - \phi_{\nu}) \quad \nu = 6k+1, k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

其中正负号代表旋转方向

## □ 径向气隙磁密

- 对于永磁同步电机，磁导的计算公式如下（齿槽效应以及凸极效应考虑在内）

$$\Lambda(\theta, t) = \Lambda_0 \left\{ 1 + \frac{\sum \Lambda_{k_s} \cos(k_s Z_s \theta)}{\Lambda_0} \right\} \left\{ 1 + \frac{\sum \Lambda_{k_r} \cos[k_r Z_r (\theta - \frac{\omega}{p} t)]}{\Lambda_0} \right\}$$

$$\approx \Lambda_0 + \sum \Lambda_{k_s} \cos(k_s Z_s \theta) + \sum \Lambda_{k_r} \cos[k_r Z_r (\theta - \frac{\omega}{p} t)]$$

- 径向气隙磁密

$$\begin{aligned} B_r(\theta, t) &= (a) + (b) + (c) + (d) + (e) + (f) \\ &= \Lambda_0 \sum F_\mu \cos(\mu \omega t - \mu p \theta - \phi_\mu) + \Lambda_0 \sum F_\nu \cos(\omega t - \nu p \theta - \phi_\nu) \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum \sum F_\mu \Lambda_{k_s} \cos[\mu \omega t - (\mu p \pm k_s Z_s) \theta - \phi_\mu] \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum \sum F_\nu \Lambda_{k_s} \cos[\omega t - (\nu p \pm k_s Z_s) \theta - \phi_\nu] \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum \sum F_\mu \Lambda_{k_r} \cos[(\mu \pm \frac{k_r Z_r}{p}) \omega t - (\mu p \pm k_r Z_r) \theta - \phi_\mu] \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum \sum F_\nu \Lambda_{k_r} \cos[(1 \pm \frac{k_r Z_r}{p}) \omega t - (\nu p \pm k_r Z_r) \theta - \phi_\nu] \end{aligned}$$

## □ 径向气隙磁密

Item	Spatial harmonic	Temporal harmonic	Electrical angular velocity	Amplitude
a	$\mu p$	$\mu f$	$\omega$	$\Lambda_0 \sum F_\mu$
b	$\nu p$	$f$	$\omega/\nu$	$\Lambda_0 \sum F_\nu$
c	$\mu p \pm k_r Z_r$	$\mu f$	$\frac{\mu p}{\mu p \pm k_r Z_r} \omega$	$\frac{\sum \sum F_\mu \Lambda_k}{2}$
d	$\nu p \pm k_r Z_r$	$f$	$\frac{p}{\nu p \pm k_r Z_r} \omega$	$\frac{\sum \sum F_\nu \Lambda_k}{2}$
e	$\mu p \pm k_r Z_r$	$(\mu \pm k_r Z_r / p) f$	$\omega$	$\frac{\sum \sum F_\mu \Lambda_k}{2}$
f	$\nu p \pm k_r Z_r$	$(1 \pm k_r Z_r / p) f$	$\frac{p \pm k_r Z_r}{\nu p \pm k_r Z_r} \omega$	$\frac{\sum \sum F_\nu \Lambda_k}{2}$

- ✓ 空间谐波与极槽配比有关---  
 $A_p + B_Z$ ;
- ✓ 时间谐波与转子谐波次数 $\mu$ 及  
永磁槽 $Z_r$ 有关;
- ✓ 负载的气隙磁密空间谐波次  
数与空载相同, 只是对应的  
幅值有所增加。

$$\mu = 2k + 1, k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\nu = 6k + 1, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

对于8极48槽电机  
正弦电流激励下

- 空间谐波--- $4, 12, 20, 28, \dots, 4k, k = 1, 3, 5, 7, \dots$
- 时间谐波--- $f_0, 3f_0, 5f_0, 7f_0, \dots, kf_0, k = 1, 3, 5, 7, \dots$

## □ 径向电磁力

麦克斯韦张量法

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \approx \frac{1}{2\mu_0} B_r^2$$

- 空间谐波次数与 $\mu, \nu, p, Z_s, Z_r$ 相关
- 表格中的 $k$ 代表 $k_s$  (or  $k_r$ )的相互作用, 如 $k_{s1}+k_{s2}$  (or  $k_{r1}-k_{r2}$ )。

对于8极48槽电机  
正弦电流激励下

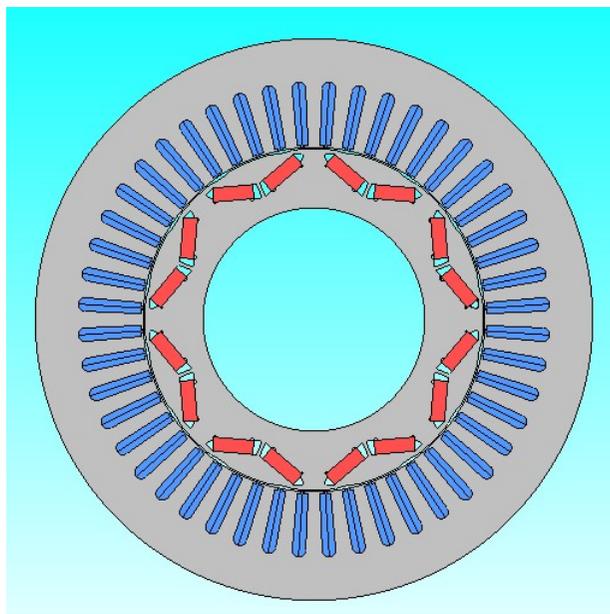
- 空间谐波--- $0, 8, 16, 24, 32, \dots, 8k$ ,  
 $k=1, 2, 3, 4, \dots$
- 时间谐波— $0, 2f_0, 4f_0, 6f_0, 8f_0, \dots, 2kf_0$ ,  
 $k=1, 2, 3, 4, \dots$

	Mode	Temporal harmonic	Amplitude	Origin
1)	$(\mu \pm \mu_2)p$	$(\mu \pm \mu_2)f$	$\Lambda_0^2 \sum \sum F_\mu F_\nu / 4\mu_0$	$a^2/2\mu_0$
2)	$(\mu \pm \mu_2)p + kZ_s$	$(\mu \pm \mu_2)f$	$\frac{\sum \sum \sum \sum F_\mu F_\nu \Lambda_{k_s} \Lambda_{k_r}}{16\mu_0}$	$c^2/2\mu_0$
		$2f$	$\frac{\Lambda_0 \sum \sum \sum F_\mu F_\nu \Lambda_{k_s}}{4\mu_0}$	$ac/\mu_0$
		0		
3)	$(\mu \pm \mu_2)p + kZ_s$	$[(\mu \pm \mu_2) + \frac{kZ_s}{p}]f$	$\frac{\sum \sum \sum \sum F_\mu F_\nu \Lambda_{k_s} \Lambda_{k_r}}{16\mu_0}$	$e^2/2\mu_0$
			$\sum \sum \sum F_\mu F_\nu \Lambda_{k_s} / 4\mu_0$	$ae/\mu_0$
4)	$(\mu_1 + \mu_2)p$	$2f$	$\Lambda_0^2 \sum \sum F_{\mu_1} F_{\mu_2} / 4\mu_0$	$b^2/2\mu_0$
	$(\mu_1 - \mu_2)p$	0		
5)	$(\mu_1 + \mu_2)p + kZ_s$	$2f$	$\frac{\sum \sum \sum \sum F_{\mu_1} F_{\mu_2} \Lambda_{k_s} \Lambda_{k_r}}{16\mu_0}$	$d^2/2\mu_0$
	$(\mu_1 - \mu_2)p + kZ_s$	0		
	$(\mu_1 + \mu_2)p + kZ_s$	$2f$	$\frac{\Lambda_0 \sum \sum \sum F_{\mu_1} F_{\mu_2} \Lambda_{k_s}}{4\mu_0}$	$bd/\mu_0$
	$(\mu_1 - \mu_2)p + kZ_s$	0		
6)	$(\mu_1 + \mu_2)p + kZ_s$	$[2 + kZ_s/p]f$	$\frac{\sum \sum \sum \sum F_{\mu_1} F_{\mu_2} \Lambda_{k_s} \Lambda_{k_r}}{16\mu_0}$	$f^2/2\mu_0$
	$(\mu_1 - \mu_2)p + kZ_s$	$kZ_s f/p$		
	$(\mu_1 + \mu_2)p + kZ_s$	$[2 + kZ_s/p]f$	$\frac{\Lambda_0 \sum \sum \sum F_{\mu_1} F_{\mu_2} \Lambda_{k_s}}{4\mu_0}$	$bf/\mu_0$
	$(\mu_1 - \mu_2)p + kZ_s$	$kZ_s f/p$		
7)	$(\mu \pm \nu)p$	$(\mu \pm \nu)f$	$\Lambda_0^2 \sum \sum F_\mu F_\nu / 2\mu_0$	$ab/\mu_0$
8)	$(\mu \pm \nu)p + kZ_s$	$(\mu \pm \nu)f$	$\Lambda_0 \sum \sum \sum F_\mu F_\nu \Lambda_{k_s} / 4\mu_0$	$ad/\mu_0$
			$\frac{\sum \sum \sum \sum F_\mu F_\nu \Lambda_{k_s} \Lambda_{k_r}}{8\mu_0}$	$bc/\mu_0$
9)	$(\mu \pm \nu)p + kZ_s$	$[(\mu \pm \nu) + \frac{kZ_s}{p}]f$	$\Lambda_0 \sum \sum \sum F_\mu F_\nu \Lambda_{k_s} / 4\mu_0$	$af/\mu_0$
			$\frac{\sum \sum \sum \sum F_\mu F_\nu \Lambda_{k_s} \Lambda_{k_r}}{8\mu_0}$	$be/\mu_0$

where  $\mu = 2k + 1, k = 0, 1, 2, \dots, \nu = 6k + 1, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

- 研究背景
- 电磁力谐波分析
  - 气隙磁密
  - 电磁力
- 有限元仿真分析
- 结论

## □ Camry 2007

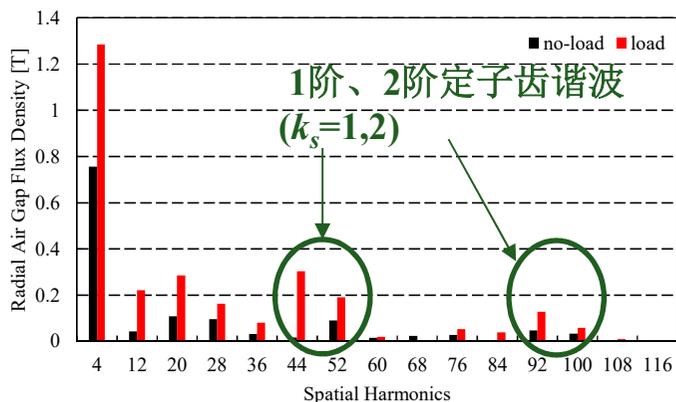
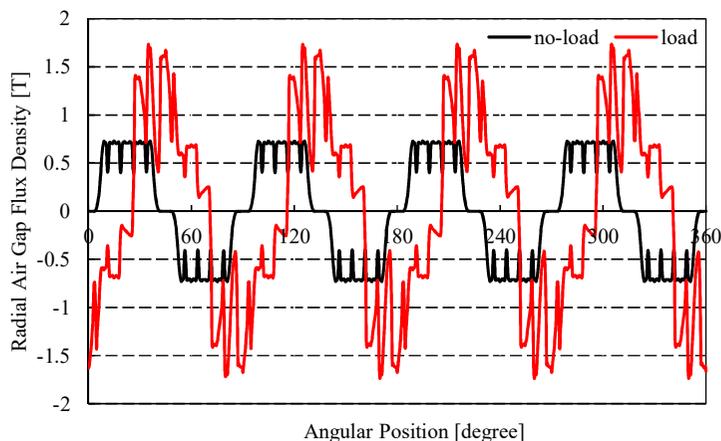


主要参数/单位	数值
极数/槽数	8/48
定子外径/ mm	264
定子内径/ mm	161.93
气隙长度/ mm	0.73
铁心长度/ mm	60.7

### 额定工况

- 转速 : 2000rpm;
- 电流: 255Amax;
- 转矩: 210Nm.

## □ 径向气隙磁密



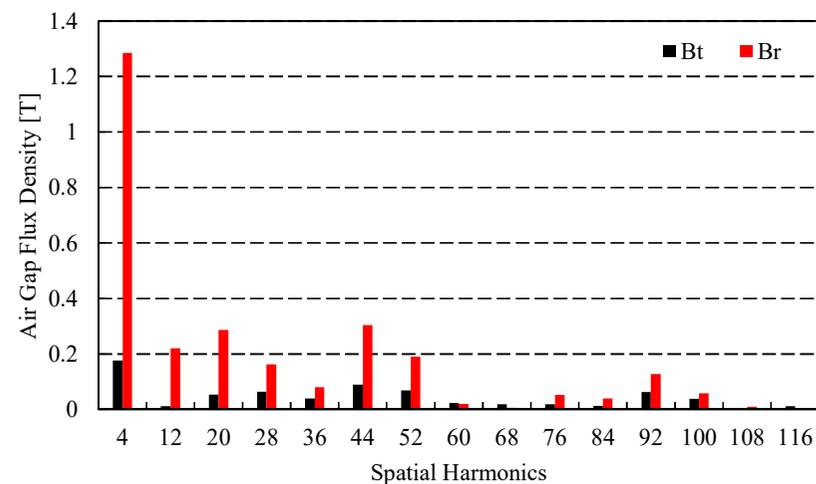
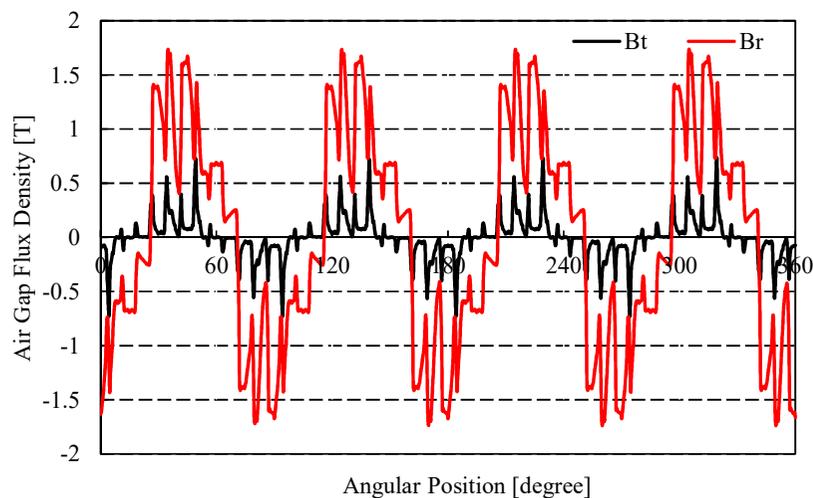
径向气隙磁密波形及对应的谐波分布（机械角度90度）

对于8极48槽电机  
正弦电流激励下

- 空间谐波---  
 $4, 12, 20, 28, \dots, 4k, k=1, 3, 5, 7, \dots$

- ✓ 气隙磁密主要的空间谐波次数为  $4, 12, 20, \dots, pk, k=1, 3, 5, \dots$ ，仿真结果与理论计算结果相符；
- ✓ 负载的气隙磁密空间谐波次数与空载相同，只是对应的幅值有所增加。

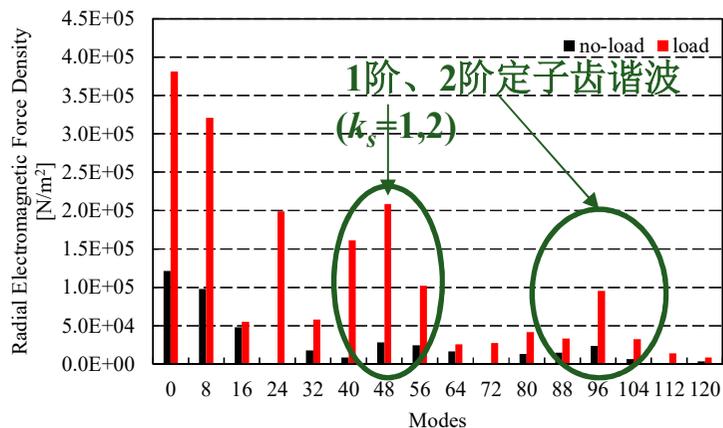
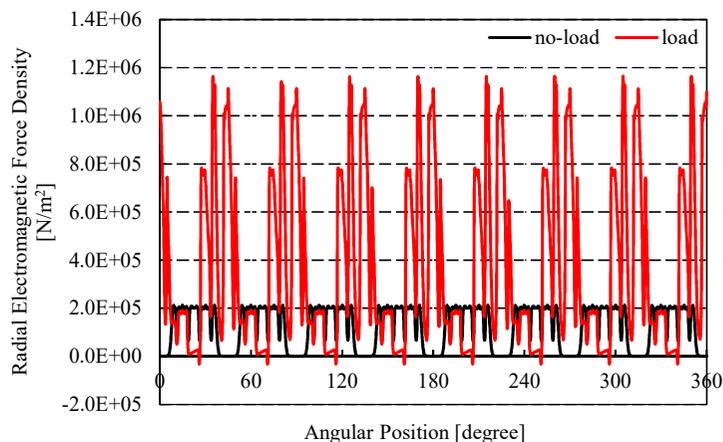
## □ 径向气隙磁密



径切向气隙磁密波形及对应谐波分布对比（额定工况下，机械角度90度）

- ✓ 气隙磁密的切向含量远小于径向含量
- ✓ 为了提高数据的准确性，仿真计算时，将气隙磁密的切向分量也考虑在内。

## □ 径向电磁力密度



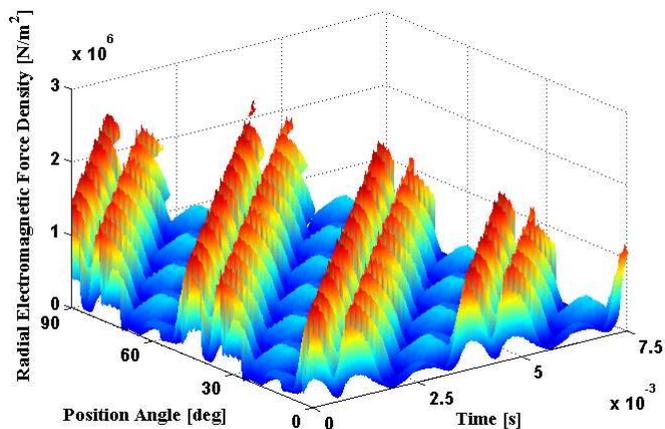
径向气隙磁密波形及对应的谐波分布对比

对于8极48槽电机  
正弦电流激励下

- 空间谐波--- $0,8,16,24,32,\dots,8k$ ,  
 $k=1,2,3,4,\dots$

- ✓ 电磁力主要的空间谐波次数为  
 $0,8,16,24,\dots,2pk$ ,  $k=0,1,2,3,\dots$ , 仿真结果与理论计算结果相符;
- ✓ 负载的气隙磁密空间谐波次数与空载相同, 只是对应的幅值有所增加。

## □ 径向电磁力密度

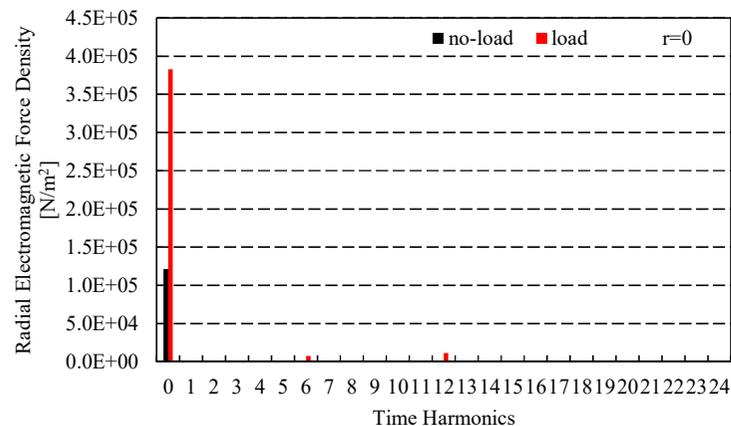


额定情况下径向电磁力密度时间空间  
3维分布图

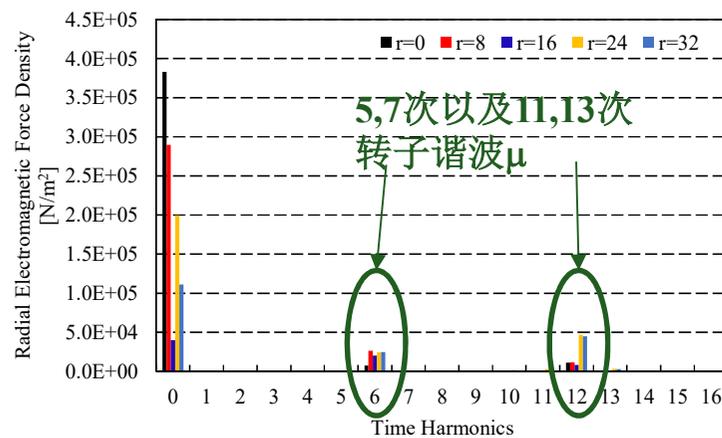
对于8极48槽电机  
正弦电流激励下

- 时间谐波— $0, 2f_0, 4f_0, 6f_0, 8f_0, \dots, 2kf_0$ ,  
 $k=1, 2, 3, 4, \dots$

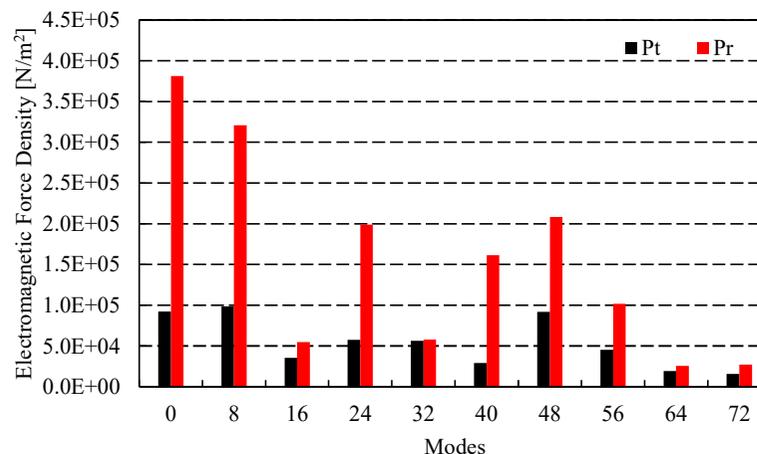
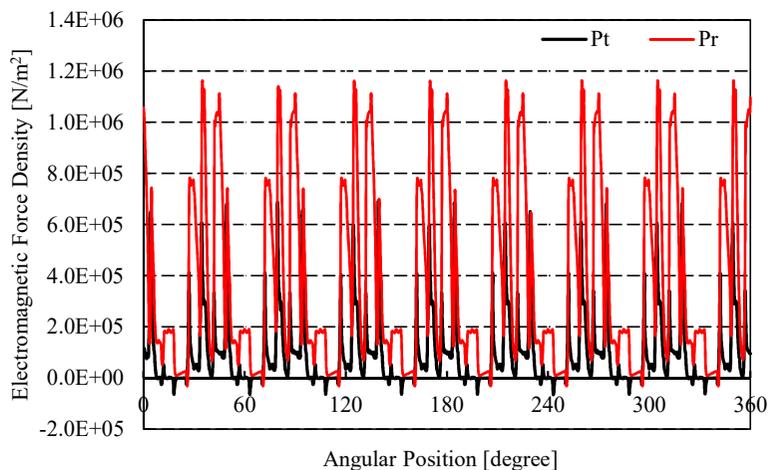
### • 阶数 $r=0$



### • 阶数 $r=0, 8, 16, 24, 32$



## □ 径向电磁力密度



径切向电磁力密度及对应谐波分布对比（额定工况下，机械角度90度）

- ✓ 径切向的空间谐波数完全相同；
- ✓ 用同样的方法计算切向电磁力，则会发现对应的时间谐波规律也大致相同。

- 研究背景
- 电磁力谐波分析
  - 气隙磁密
  - 电磁力
- 有限元仿真分析
- 结论

- ✓ 对于永磁同步电机，负载的气隙磁密空间谐波次数与空载相同，只是对应的幅值有增加。这个结论可延伸到永磁同步电机的电磁力上，无论是径向电磁力还是切向电磁力。
- ✓ 对于极对数、定子槽数、永磁体槽数的最大公约数等于极对数的电机，即 $GCD(p, Z_s, Z_p) = p$ ，对应的气隙磁密空间谐波数为 $kp$ ， $k=1,3,5,7\dots$ ，同样，该类型下电机的电磁力空间谐波次数为 $2np$ ， $n=0,1,2,3\dots$ ，我们需要关注低次空间谐波，他们往往对应着较大的谐波幅值。
- ✓ 定转子齿谐波及转子谐波在电磁力幅值上有很大的影响，如果不采取措施削减，其对应电机的电磁力频谱图上会出现一定范围的幅值上升现象，这就解释了常见定子斜极，转子斜槽，优化转子铁心结构等方法对降低电磁力，减小转矩脉动的有效性。

谢谢!

南京航空航天大学  
多电飞机电气系统工信部重点实验室  
高效电机与能量变换技术课题组

***Nanjing University of Aeronautics and Astronautics***  
***High Efficiency Machine and Energy Conversion Group (HEMEC)***