



止於至善

高速永磁电机设计与分析技术

黄允凯

东南大学电气工程学院

huangyk@seu.edu.cn, 13815881694



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

高速电机定义

两极实心转子，15kr/min, 4MW，
用于驱动天然气管道压缩机



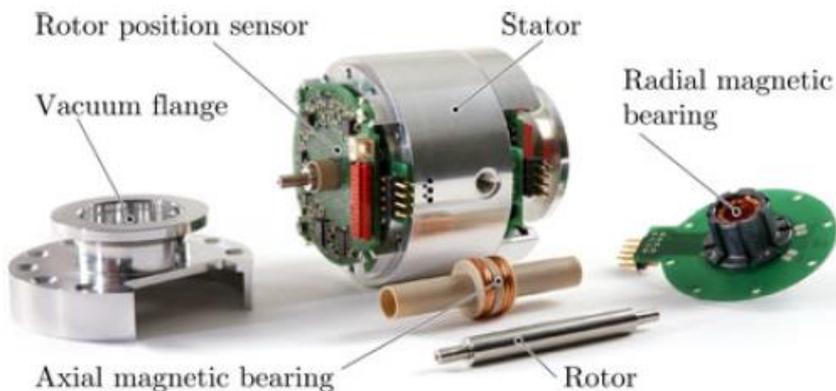
来源：Siemens AG

$$V_{tip} = 240 \text{ m/s}$$

转子表面线速度

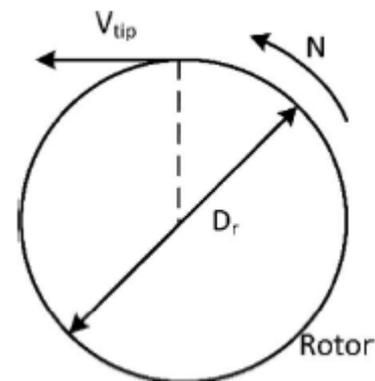
$$V_{tip} = 2\pi \frac{N}{60} \frac{D_r}{2}$$

两极永磁转子，500kr/min, 300W，
用于激光扫描装置



来源：ETH

$$V_{tip} = 191 \text{ m/s}$$

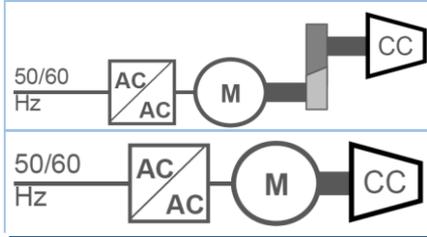


**转速10 kr/min以上或
转子表面线速度在100 m/s以上
的电机称作高速电机**

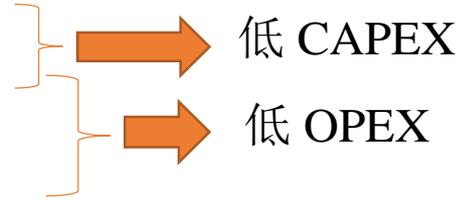


优势与应用

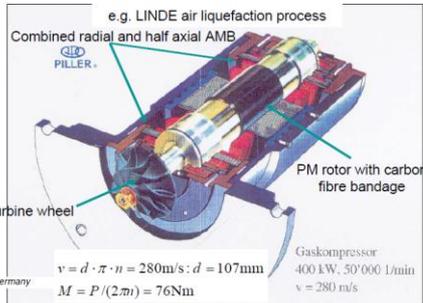
优势



- 体积小，功率密度高
- 无齿轮，故障率低
- 节能，效率高
- 噪声、泄露低

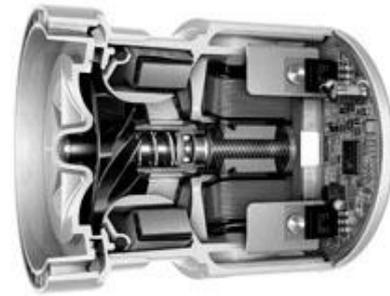


应用



天然气应用:

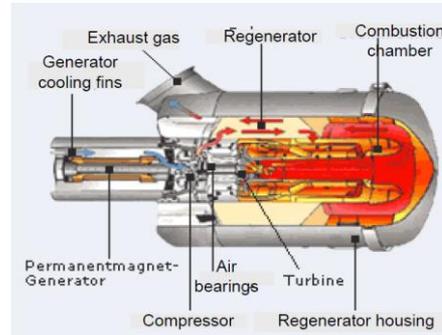
- 天然气压缩
- 余压发电
- LNG



生活应用:

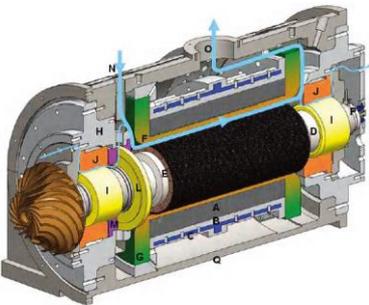
- 干手机
- 吸尘器
- 按摩仪

1.4kW, 90 kr/min干手机(Dyson)



其它应用:

- 航空发电机
- 直接能量武器
- 微燃气轮机



640kW, 10kr/min, 鼓风机(Nidec-asi)

工业应用:

- 电主轴
- 空气压缩机和鼓风机
- 飞轮储能

ABB



国科发资〔2017〕294号附件1

“新能源汽车” 重点专项 2018 年度项目申报指南

2.5 一体化驱动电机系统研制（重大共性关键技术类）

研究内容：突破高速减速器设计、齿轮加工与研磨、轴类精密加工、铸造壳体技术难关；研究高速驱动电机与减速器结构集成、润滑与冷却系统、NVH 技术；掌握电驱动总成批量制造生产工艺与高效检测等产业化技术；开发出新一代高性能电驱动总成产品。

考核指标：驱动电机及高速减速器的最高转速 ≥ 15000 转/分，电驱动总成匹配额定功率 40-80kW，比功率 ≥ 1.8 kW/kg（峰值功

国科发资〔2017〕294号附件5

“煤炭清洁高效利用和新型节能技术” 重点专项 2018 年度项目申报指南

5.2 电机及电机系统的高效节能技术（共性关键技术类）

研究内容：研究电机及电机系统的仿真分析与优化设计新技术；研究电机及电机系统节能的智能化控制技术；研发特种高效电机（如超高速电机、高性能永磁伺服电机等）；研究电机系统的一体化、轻量化、低能耗、高可靠性技术，并形成应用示范。

国科发资〔2017〕294号附件11

“智能电网技术与装备”重点专项 2018 年度项目申报指南

5.3MW 级先进飞轮储能关键技术研究（共性关键技术类）

研究内容：针对电网对短时高频次的储能技术需求，研究先进飞轮储能单机及阵列技术。具体包括：研究飞轮本体技术；研制低损耗高速电机及控制系统；研究高可靠性大承载力轴承系统技术；研究飞轮储能阵列的控制技术；飞轮阵列系统的集成应用技术。

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

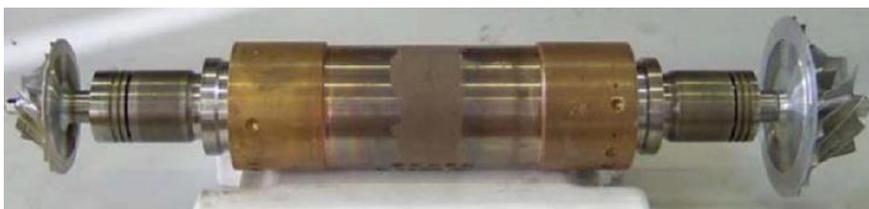


电机类型

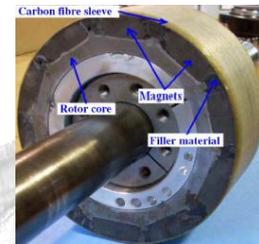
电机类型	优点	缺点
异步电机	易起动 易制造、低成本 不需位置传感器	气隙较小 功率因数较低 高频驱动时转子损耗大
永磁电机	气隙较大 功率因数高，效率高 结构多样	转子强度较低 需位置传感器 高速运行时需要弱磁控制
开关磁阻电机	转子结构简单 转子损耗低	气隙较小 功率因数较低 风耗及噪声较大 需要位置传感器
交流换向器电机	无需电力电子器件	需要电刷，有火花 转子结构复杂



10kW, 80kr/min叠片转子(Cummins)



300kW, 60kr/min 覆铜实心转子(Sundyne)



碳纤维绑扎永磁转子



电机类型



V_{tip} (m/s)	转子外径 (mm)	转子类型	功率 (kW)	转数 (kr/min)
367	70	实心含涂层	60	100
342	109	实心含涂层	300	60
290	-	叠片	2000	15
283	90	实心含涂层	60	60
250	-	叠片	8000	12
236	90	实心鼠笼	50	50
204	325	实心切缝	8000	12
193	330	实心鼠笼	2610	11.16
185	118	叠片	100	30
182	348	叠片	6000	10

V_{tip} (m/s)	转子外径 (mm)	转子类型	护套材料	功率 (kW)	转数 (kr/min)
294	47	表贴	钛合金	22	120
288	25	表贴	碳纤维	2	220
261	10	表贴	钛合金	1	500
233	89.4	内嵌	SiFe*	11	50
230	22	表贴	钛合金	2	200
201	16	表贴	铬镍铁合金	5	240
200	-	表贴	碳纤维	1100	30
192	24.5	表贴	玻璃纤维	1.5	150
188	30	表贴	铬镍铁合金	5	120
175	83.6	表贴	碳纤维	40	40

*高强度硅钢片

数据来源: David Gerada, High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments, IEEE TIE VOL. 61, NO. 6, JUNE 2014

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

永磁体性能:

性能参数	NdFeB	SmCo
剩磁密度 B_r/T	1.03~1.30	0.82~1.16
矫顽力 $H_c/(kA/m)$	875~1990	493~1590
B_r 温度系数/(%/K)	-0.11~-0.13	-0.03~-0.04
H_c 温度系数/(%/K)	-0.55~-0.65	-0.15~-0.30
居里温度/ $^{\circ}C$	320	800
最高工作温度 $T_{wmax}/^{\circ}C$	80~220	250~350
抗压强度 $s_{c,max}/MPa$	1100	800
抗挠强度 $s_{b,max}/MPa$	250	150
抗拉强度 $s_{t,max}/MPa$	75	35
密度 $r/(g/cm^3)$	7.3~7.5	8.2~8.4
热导率 $k/(W/(m\cdot K))$	6.2	11
电阻率 $\rho_r/(\mu\Omega\cdot m)$	1.1~1.7	0.86

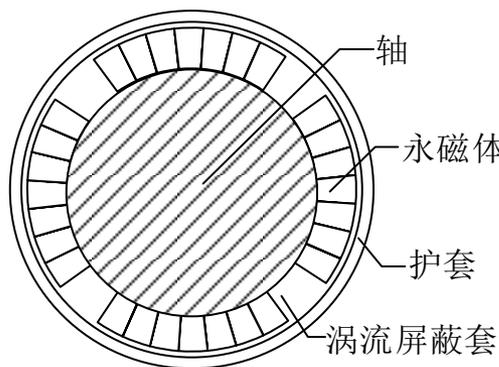
特点:

- 脆性材料：抗压不抗拉，易受离心力影响
- 磁性能受温度影响较大
- 不耐高温
- 密度高：离心力大
- 导电：易产生涡流损耗



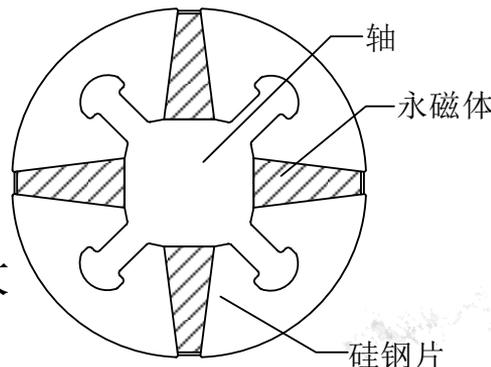
永磁体必须被妥善保护!

表贴式结构:



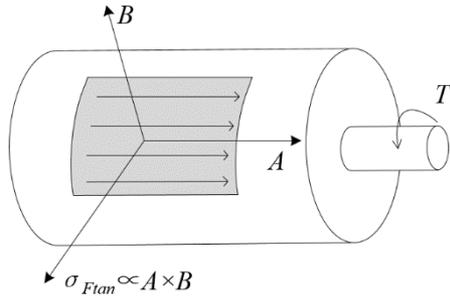
- 加工方便
- 结构健壮
- 等效气隙大
- 表面涡流损耗大

内嵌式结构:



- 可利用磁阻转矩
- 涡流损耗低
- 硅钢片强度有限

电磁 (AB)



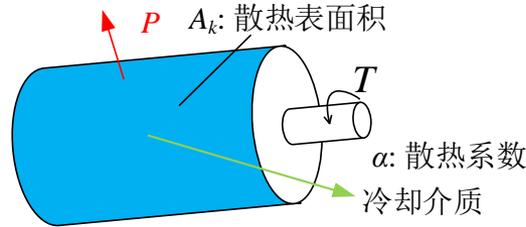
$$\sigma_{Ftan} = AB$$

$$\begin{aligned} T &= \sigma_{Ftan} (\pi D_r L_{stk}) \frac{D_r}{2} \\ &= 2\sigma_{Ftan} \pi \frac{D_r^2}{4} L_{stk} \\ &= 2\sigma_{Ftan} V_r \end{aligned}$$

$$P = T\omega$$

转子体积由电机的转矩 T 、电负荷 A 、磁负荷 B 共同确定；电机功率 P 及电磁负荷 AB 确定时，转速越高，体积越小。

散热 (C, Cooling)



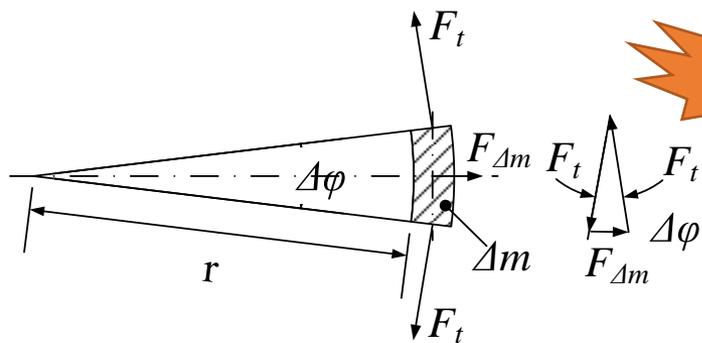
热源：

- 铁耗（涡流为主）： $P_{Fe} \sim V_{Fe} f_s^2 B^2$
- 欧姆铜耗： $P_{Cu,s} \sim V_{Cu} J^2 \sim V_{Cu} A J$
- 涡流铜耗： $P_{ad,s} \sim V_{Cu} J^2 f_s^2$
- 风摩损耗： $P_w \sim D_r L_{stk} v^{2.8}$
- 转子涡流损耗

$$\begin{aligned} P_{de} &= (P_{Cu,s} + P_{ad,s} + k_1 P_{Fe} + k_2 P_w) \\ &= \alpha A_k \Delta T_{Cu} \end{aligned}$$

- 损耗由 A 、 B 、 J 以及电机体积决定
- 散热方式一定的前提下，绕组温升限定了损耗，从而限制了 A 、 B 、 J 的取值。





$$F_t \approx \frac{F_{\Delta m}}{\Delta \varphi} = \rho L_{stk} \Delta r \cdot r \cdot \omega^2$$

$$\sigma_t = \frac{F_t}{\Delta r L_{stk}} = \rho r^2 \omega^2 = \rho v^2$$

- 转子应力与表面线速度正相关，
 $>100 \text{ m/s}$ 称为高速电机
- 转速一定时，转子最大可用外径受材料许用应力限制

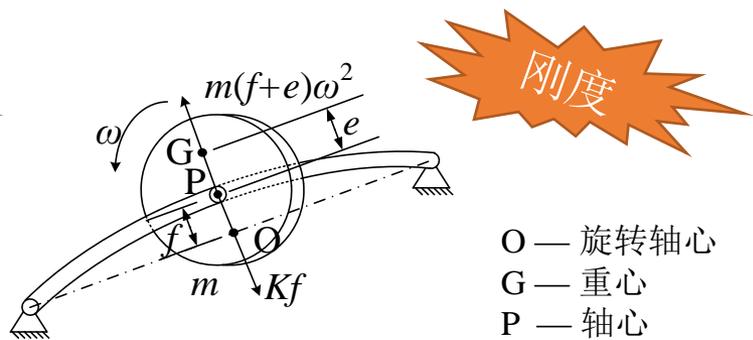
示例：

硅钢片许用应力 $R_{p,0.2} = \sigma_{0.2} = 350 \text{ MPa}$ ，密度 7850 kg/m^3

可知硅钢薄壳最大表面线速度为 $v=211 \text{ m/s}$

若直径为 1.3 m ，则对应的转速为 $n=3000 \text{ r/min}$

若直径为 90 mm ，则对应的转速为 $n=45000 \text{ r/min}$



O — 旋转轴心
 G — 重心
 P — 轴心

轴的偏心弹性力需与转子偏心离心力平衡：

$$m(f + e)\omega^2 = Kf$$

则有

$$\omega_{cr} = \sqrt{\frac{K}{m}} \propto \frac{D_r}{L_{stk}}$$

$$\lambda_{max} = \frac{L_{stk}}{D_r}$$

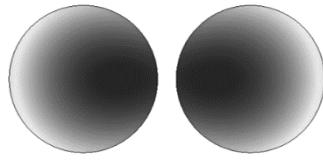
- 转子最大长径比受临界转速限制



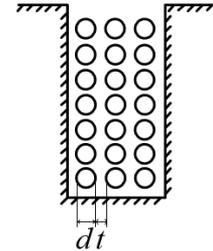
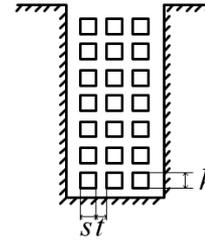
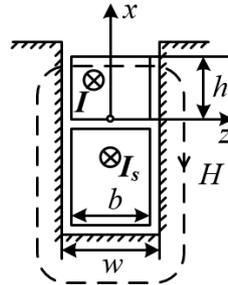
损耗计算：铜耗



集肤效应



临近效应



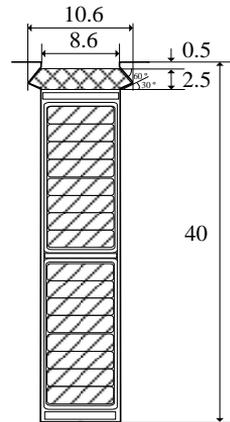
$$K_s K_p = \phi(\xi) + \left[\frac{m^2 - 1}{3} - \frac{m^2}{4} \sin^2 \frac{\gamma}{2} \right] \psi(\xi)$$

$$\xi = \frac{h}{\delta'}$$

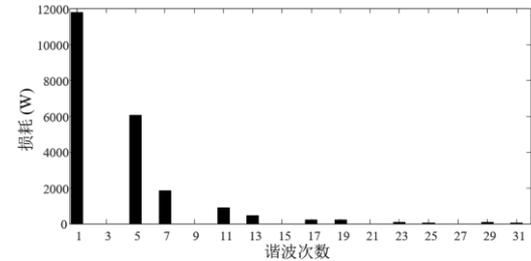
$$\delta' = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma \eta}}$$



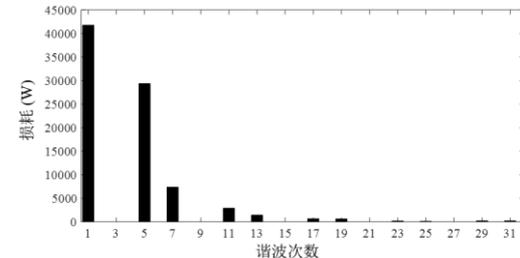
- 双层短距绕组优于单层绕组
- 减小导体高度，并结合换位处理，可显著降低交流铜耗
- 导体尺寸、数量、相位一致时，层数越少，铜耗越小→导体要尽可能靠近槽底



某2 MW高速
永磁发电机



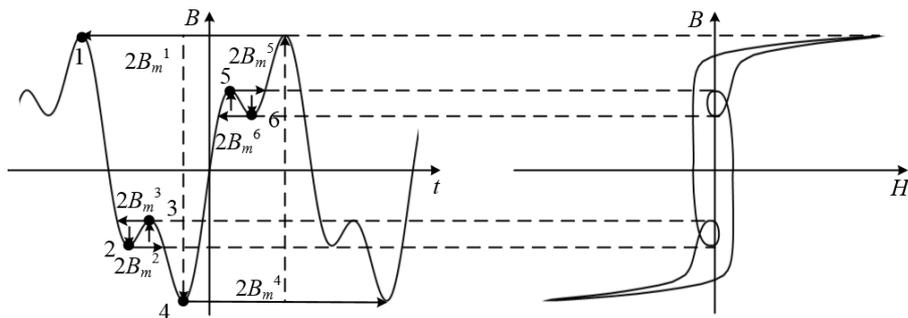
换位



不换位



损耗计算：铁耗



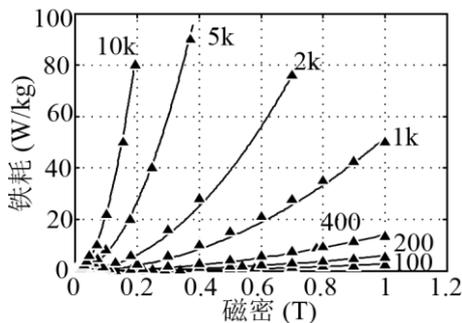
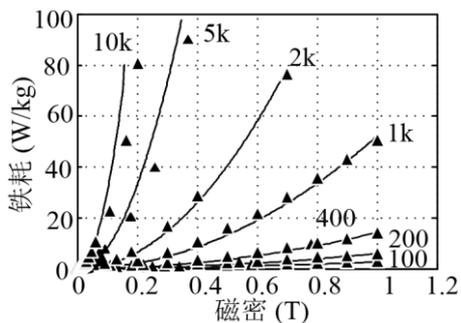
高速PWM影响:

- 局部小磁滞回环
- 磁密谐波
- 集肤效应

铁耗模型:

$$P_{Fe} = K_h f B_m^h + K_e(\mu, f) f^2 B_m^2$$

忽略异常损耗分量, 考虑集肤效应



固定涡流系数 vs. 可变涡流系数

计算方法:

磁滞:

基于波形

$$P_{he} = K_h \rho f V_e \times \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^{N_{pr}} B_{mr^j}^2 + \sum_{j=1}^{N_{p\theta}} B_{m\theta^j}^2 \right)$$

涡流:

基于频域

$$P_{ee} = \sum_n K_e(f) \rho (nf)^2 (B_{mr,n}^2 + B_{m\theta,n}^2) V_e$$



损耗计算：转子损耗

来源：

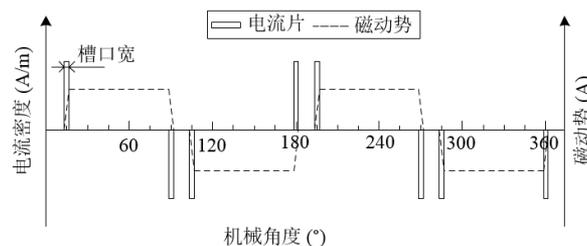
1. 电枢磁动势谐波

$$J_{f/bmn}(\phi, t) = \frac{1}{2R} m I_n F_m \cos(m\phi \mp n\omega_e t + \beta_m \mp \alpha_n) \times [1 + 2 \cos(m/p \mp n) \times \frac{2\pi}{3}]$$

可写为：

$$\mathbf{J} = A e^{j(m\theta - \omega t)}; \quad \omega = (-m/p \pm n)\omega_e$$

相对于转子、位于定子内径处的边界条件



m/p	n							
	1	5	7	11	13	17	19	
1	0	-6	6	-12	12	-18	18	
5	-6	0	-12	6	-18	12	-24	
7	-6	-12	0	-18	6	-24	12	
11	-12	-6	-18	0	-24	6	-30	
13	-12	-18	-6	-24	0	-30	6	
17	-18	-12	-24	-6	-30	0	6	
19	-18	-24	-12	-30	-6	-36	0	

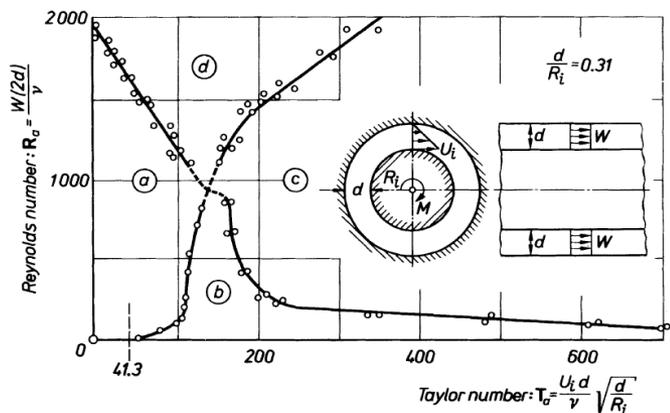
红色正向；
黑色反向

2. 槽口

增大气隙，降低槽齿效应



损耗计算：机械损耗

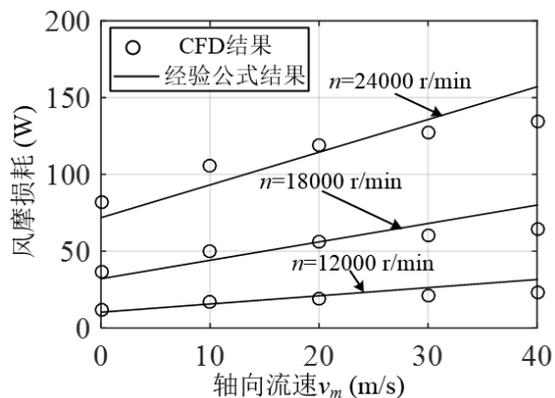
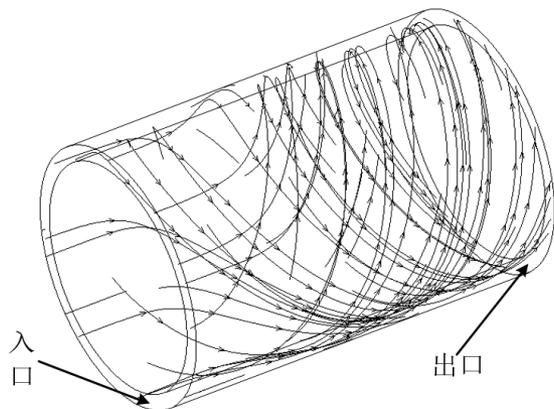


采用无量纲数确定气流状态：

$$Re_\delta = \frac{\rho u_t d}{\mu}; \quad Re_a = \frac{\rho v_a 2g}{\mu} \quad Ta = Re_\delta^2 \frac{2g}{D_r} = \frac{\rho^2 \omega^2 D_r g^3}{2\mu^2}$$

根据气流状态确定损耗系数：

$$P_{\rho w1} = \frac{1}{16} k C_f \pi \rho_{air} \omega^3 D_r^4 l_r \quad P_{\rho w2} = \frac{1}{64} C_M \rho_{air} \omega^3 (D_{r1}^5 - D_{r2}^5)$$



采用CFD验证经验公式结果



损耗计算：结果对比



		正弦驱动			BLDC驱动		六脉波驱动
		16 kHz	12 kHz	4.8 kHz	PWM	PAM	
铜耗		852.1	873.4	934.3	1280.3	1106.2	838.8
铁耗		900.6	931.7	988.7	1276.2	1108.1	1052.9
转子涡流损耗	护套	100.2	116.3	284.5	974.3	695.7	156.1
	永磁体	14.7	17.5	104.7	351.0	247.4	43.2
	轴	2.5	1.9	16.1	59.4	50.7	7.0

- BLDC模式下各项损耗均为最高
- 涡流损耗集中于护套内

气隙长度	铜耗	铁耗	转子涡流损耗			总损耗
			护套	永磁	轴	
1.5 mm	679.3	1131.7	1232.4	45.1	6.3	3094.8
3.0 mm	749.8	1030.1	407.2	25.3	2.8	2215.2
4.5 mm	818.8	991.2	191.4	17.4	2.3	2021.1
6.0 mm	873.4	931.7	116.3	17.5	1.9	1940.8

- 随气隙增大，铁耗、转子涡流损耗降低，铜耗增大
- 高速电机需选用较大气隙

140 kW, 24 kr/min电机损耗计算结果



散热

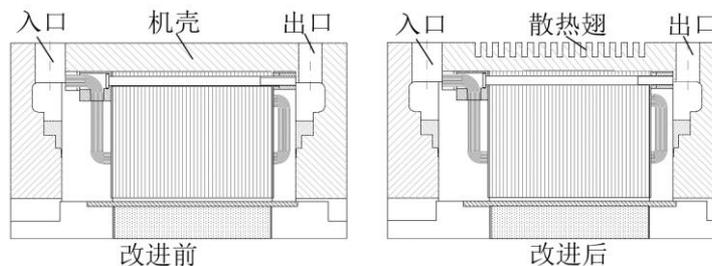
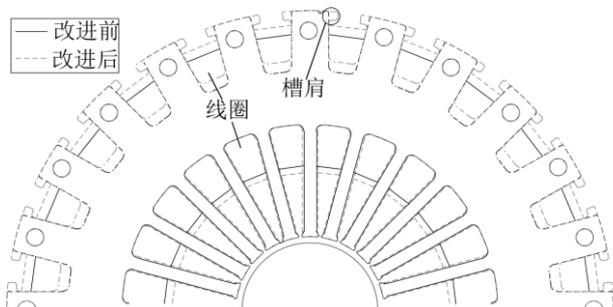
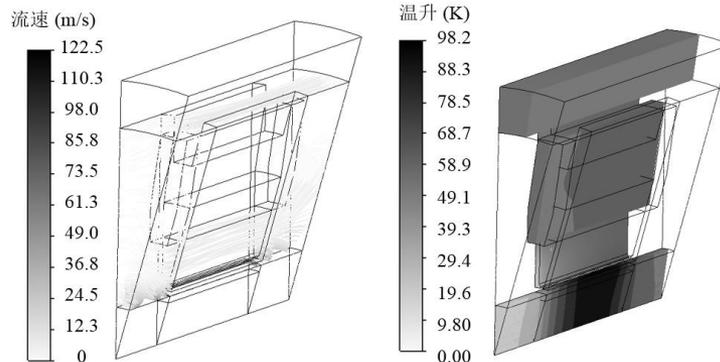
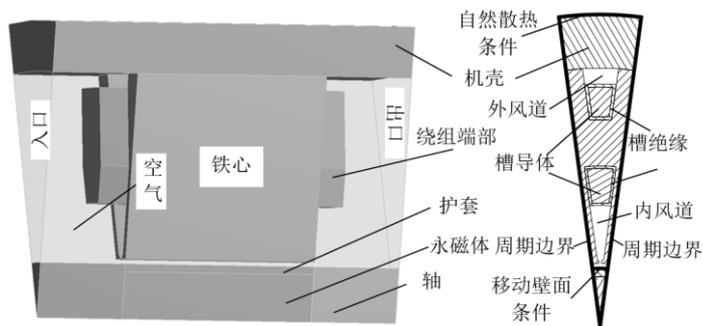


散热介质	特性
油	可以直接冷却定转子，流量有限，转子温度分布不均
水/乙二醇	机壳冷却，转子无法顾及，转子发热可能影响轴承寿命 转子温度分布不均，通常要和风冷一起使用来保证转子散热
空气	定转子一起冷却，低成本，单位体积的散热能力较弱 恶劣环境中需要进行过滤

冷却方式	可用电流密度 (A/mm ²)	优势	劣势
散热翅/器/自然冷却	1.5-5	简单、成本低	散热能力差
强迫风冷	3-8	便捷、简单	噪声、体积增大
定子水套或油套	10-15	定子散热能力强	直径和重量增大
空心导体直接液冷	30	定子导体散热能力强	体积重量增大 用于小电机时成本过高
端部喷油冷却	> 28	绕组散热能力强 体积小	冷却油可能会进入气隙， 造成污染，增大损耗

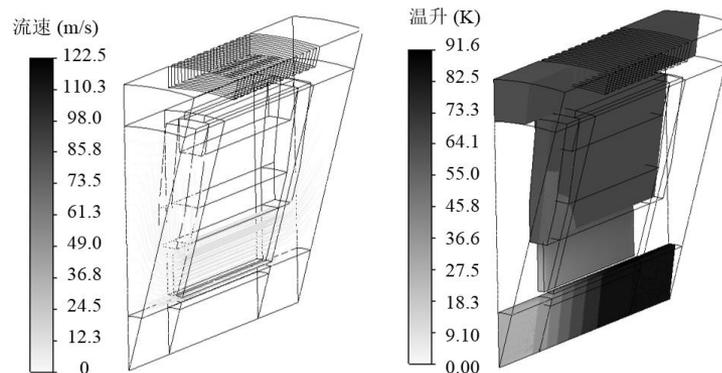


温升计算：CFD法电机结构优化

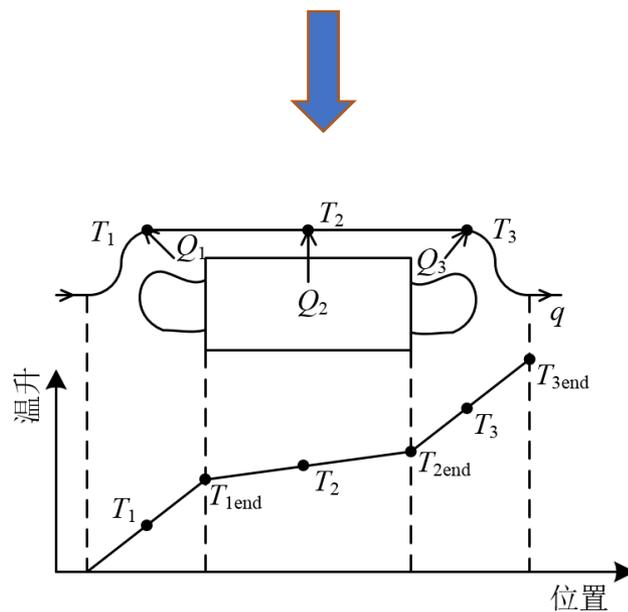
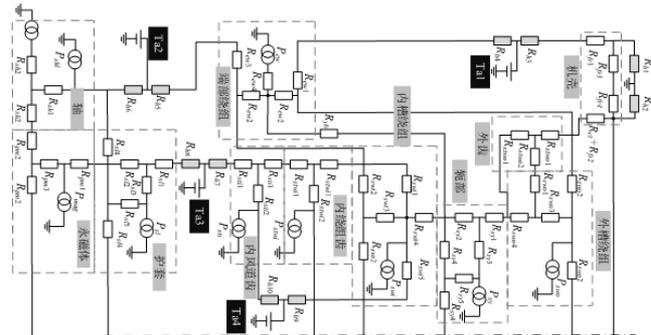
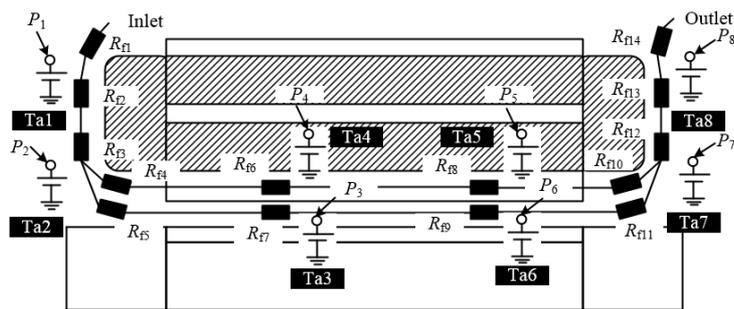
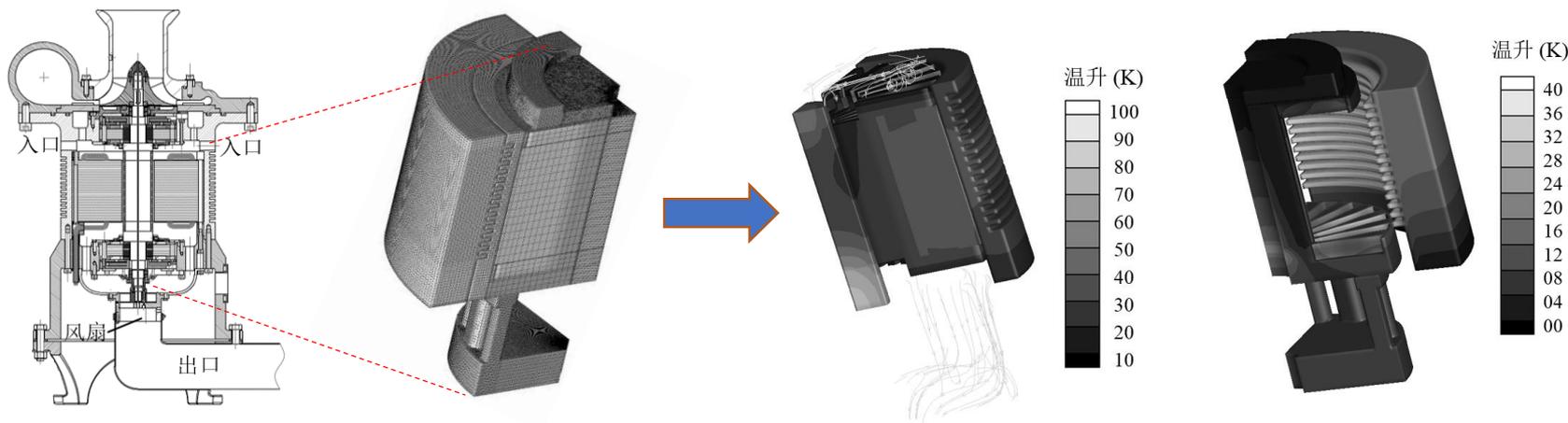


针对转子散热：

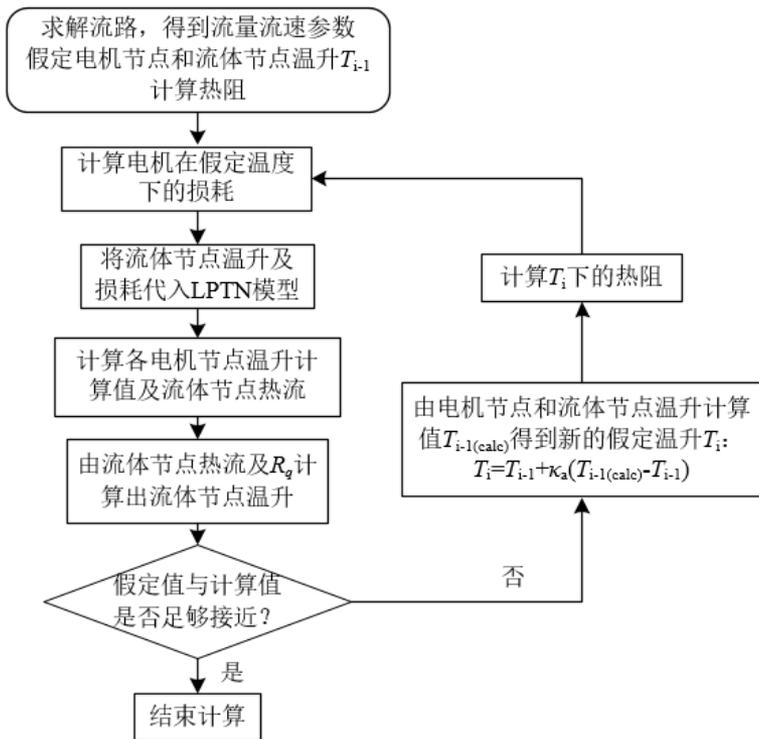
- 去除外风道，使更多气流吹拂转子
- 增大轭部高度，缩小内槽面积
- 增加散热翅，补偿定子冷却



温升计算：CFD模型与LPTN等效



温升计算：LPTN求解与结果对比



	4 m ³ /min	10 m ³ /min
内绕组平均	56.0	43.4
外绕组平均	67.0	46.1
护套平均	53.9	40.3
永磁平均	52.3	38.6
内齿平均	48.6	27.7
外齿平均	61.7	41.3
轭部平均	62.2	41.6

CFD结果

	4 m ³ /min	10 m ³ /min
内绕组平均	60.1	41.0
外绕组平均	64.3	47.1
护套平均	58.1	37.6
永磁平均	59.2	39.1
内齿平均	47.3	26.8
外齿平均	62.1	43.4
轭部平均	63.0	43.8

LPTN结果

	CFD	LPTN
建模准备	4 h	≤ 5 min
计算求解	47 min	20 s



1. LPTN计算结果与CFD较为接近
2. LPTN建模、计算时间较短



单独使转子温升提高10%的参数变化量：

参数	[%]	参数	[%]
开关频率	-65	冷却流量	-39
气隙长度	-21	护套电导率	+285
永磁体矫顽力	-25	护套热导率	-97

结论：

降低转子温升的有效措施：

- 采用大气隙
- 使用高矫顽力永磁体
- 提高冷却流量
- 提高开关频率

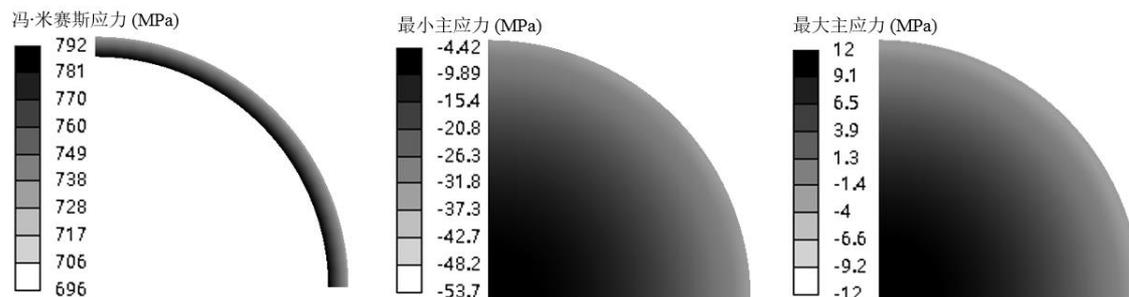


判断标准:

- 材料类型不同，标准不同：塑性材料与脆性材料；各向同性与各向异性
- 接触压力大于0
- 不发生移位
- 防止疲劳失效

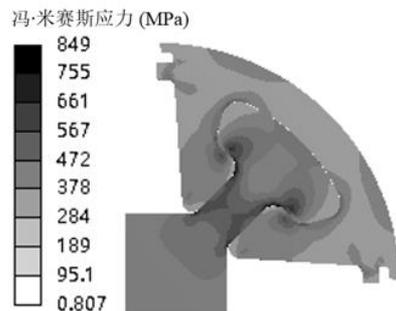
计算方法:

解析法：一系列假设，采用应力集中系数修正→SPM下可保证精度
有限元：直接建模、处理接触问题→适用于IPM分析



SPM:

冷态、超速时看护套
热态、超速看永磁



IPM:

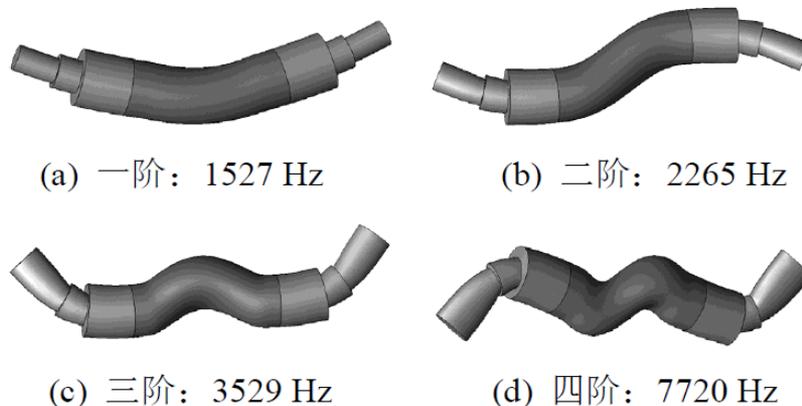
冷态、超速时看轴
热态、超速看硅钢片

结论:

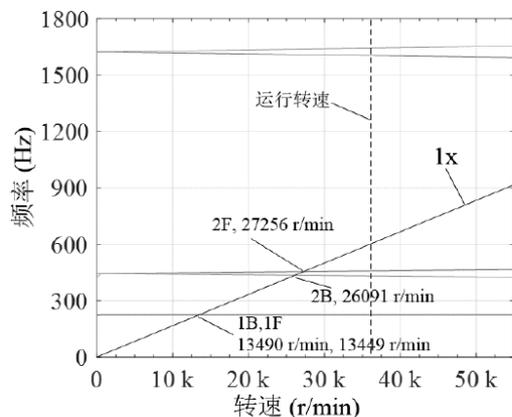
- IPM结构安全裕量小
- IPM中硅钢片易疲劳



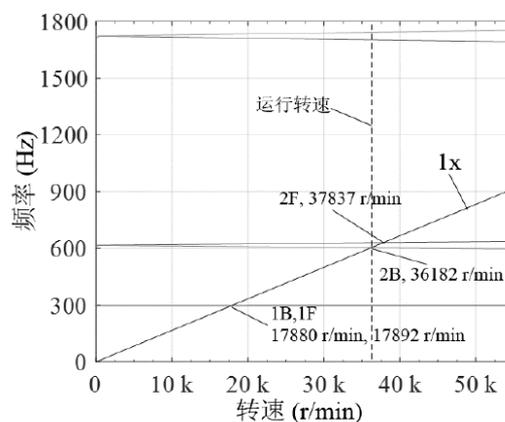
自由-自由状态:



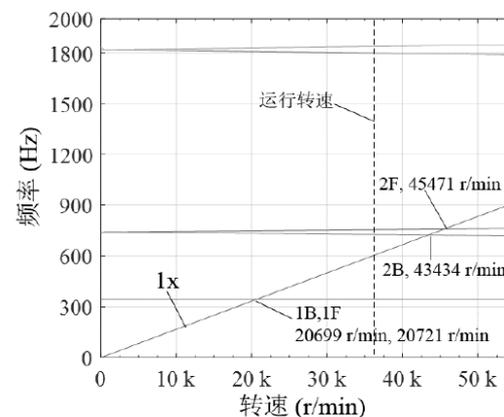
磁悬浮支承状态:



(a) $k_b = 1e7$ N/m



(b) $k_b = 2e7$ N/m

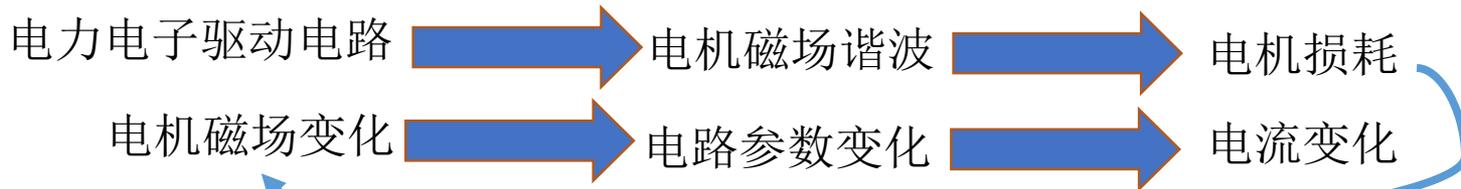


(c) $k_b = 3e7$ N/m

调节磁悬浮轴承刚度可避开临界转速。

7. 多物理场耦合与综合设计：耦合因素

电路-磁场：



磁场-温度场-流场：



$$\rho = \rho_{20}[1 + \alpha(T - 20)]$$

SmCo: -0.03%/K

NdFeB: -0.11%/K

$$h_R = \frac{\sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}$$

$$G_r = \beta g \Delta T \rho^2 L^3 / \mu^2$$

温度场-应力场：



$$\sigma_{\Delta T} = E\varepsilon = E\alpha\Delta T$$



多物理场耦合与综合设计：计算方法



电路模型

输出量：定子电流

解析法	PWM生成、外部电路等效
数值法	电路仿真工具
	直接与电磁场模型耦合

电磁模型

输出量：磁场时空分布、电机损耗

解析法	绕组函数、磁导表达式
半解析法	保角变换子域模型
数值法	非线性有限元模型 (FEM)

流体模型

输出量：流速、传热系数

解析法		分离变量法
网络法	流网络	热网络
数值法	流固耦合的计算流体力学数值 (CFD) 模型	

温升模型

输出量：温度

应力模型

输出量：应力

解析法	壳模型
数值法	结构 FEM

解析法：计算速度快，普适性及精度有限

数值法：普适性好，结构准确

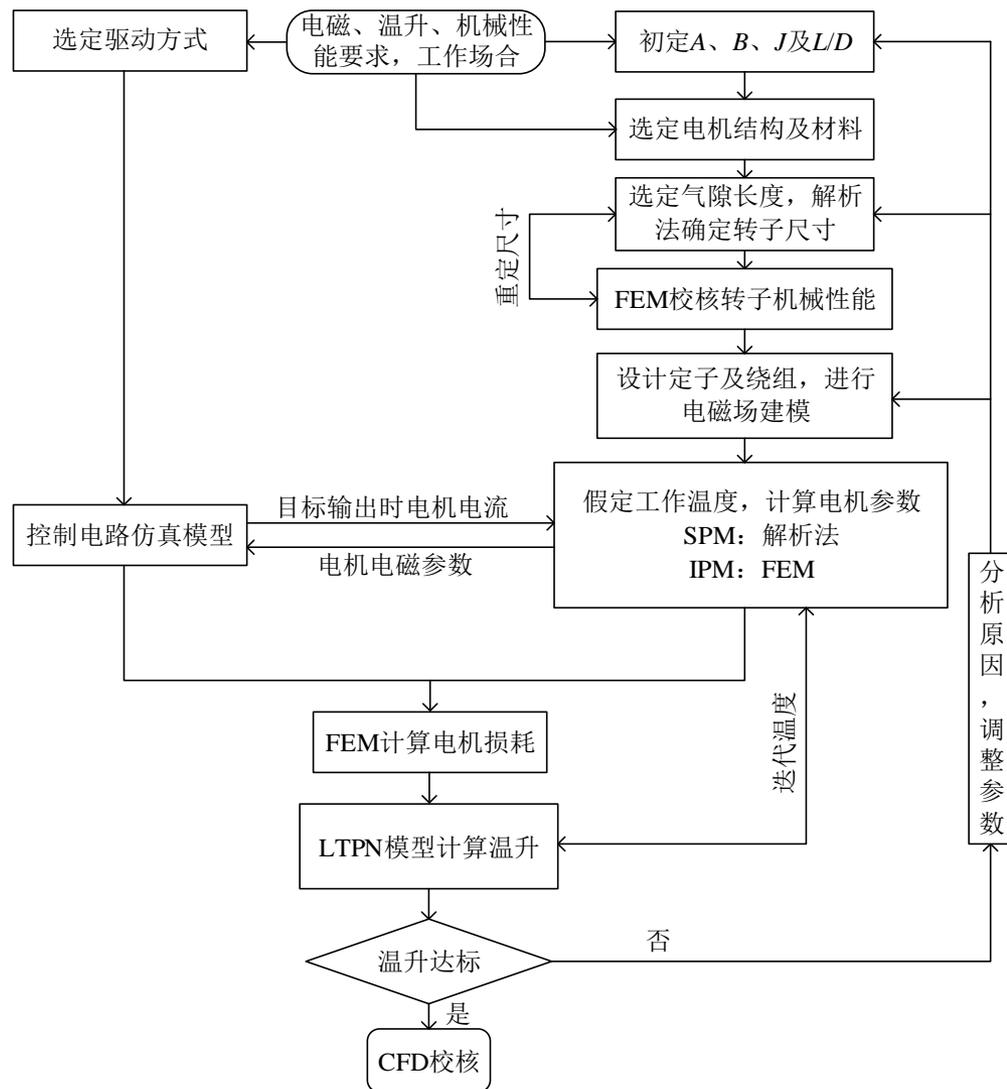
- FEM: 计算速度快，建模方便
- CFD: 结果精确，但计算速度慢，建模耗时

直接耦合：方程复杂、求解缓慢

间接耦合：相互迭代，求解方便



多物理场耦合与综合设计：综合设计

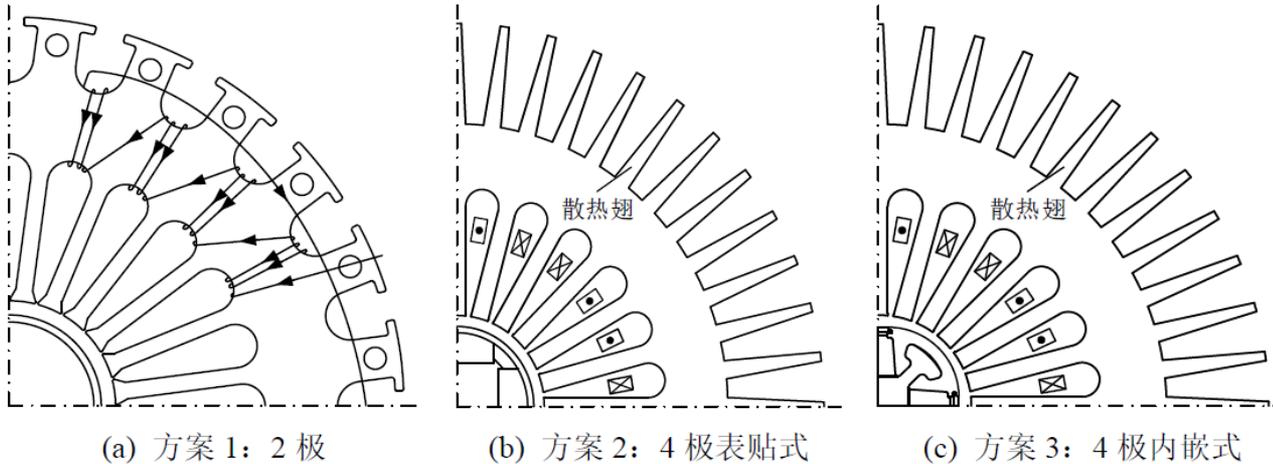


- 电、磁、热间接耦合
- 先解析后数值、先定关键参数再确定细节
- 结合MATLAB Simulink等成熟商业软件
- 降低计算时间, 提高设计效率



案例1

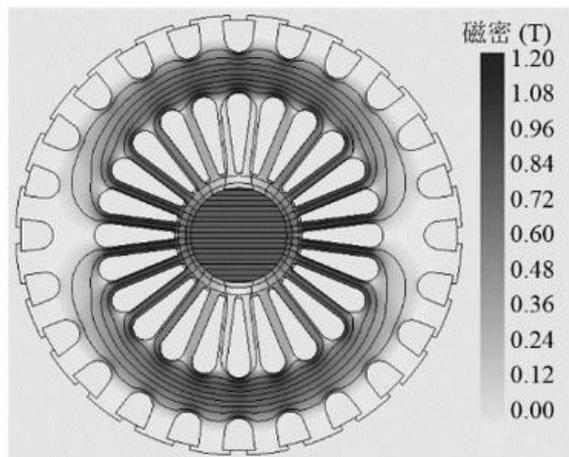
针对140 kW、24 kr/min电机的三种设计方案：



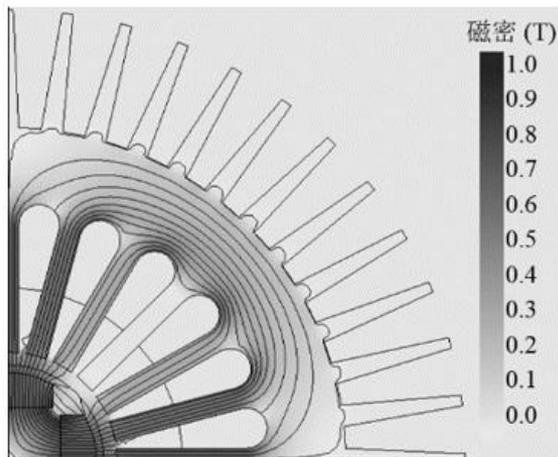
- 相同外径
- 相同转子外形尺寸
- 相同材料
- 相同驱动方式：12 kHz开关频率正弦波驱动
- 相同定子电流密度
- 开路内风冷，冷却风量一致



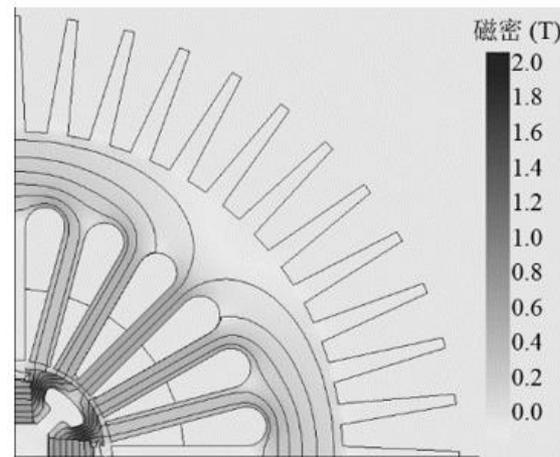
案例1



(a) 2 极

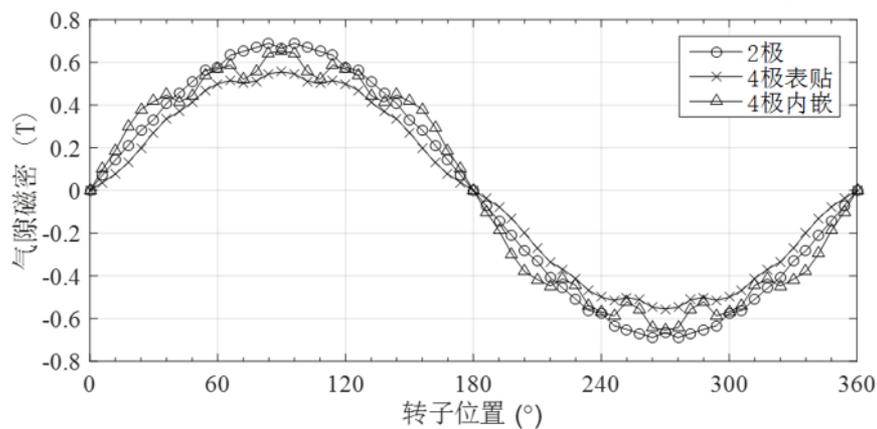


(b) 4 极 SPM

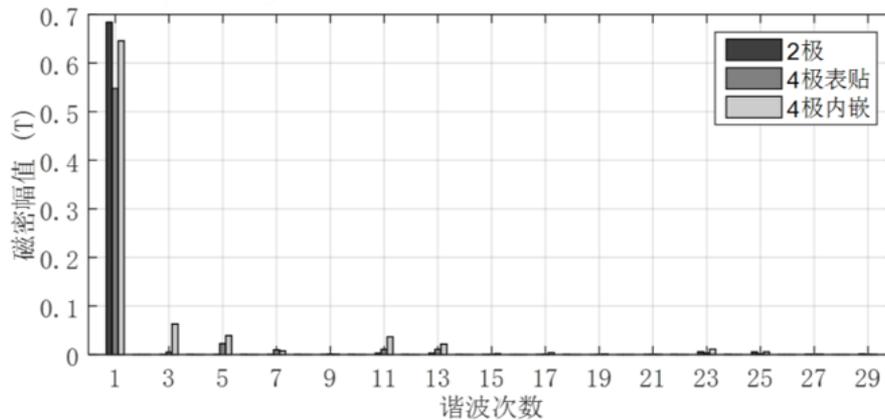


(c) 4 极 IPM

三种方案的空载磁场分布



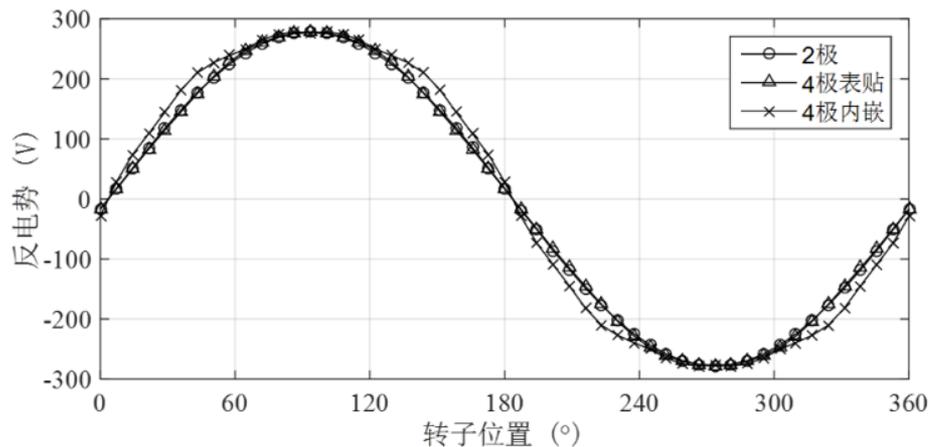
气隙磁密波形



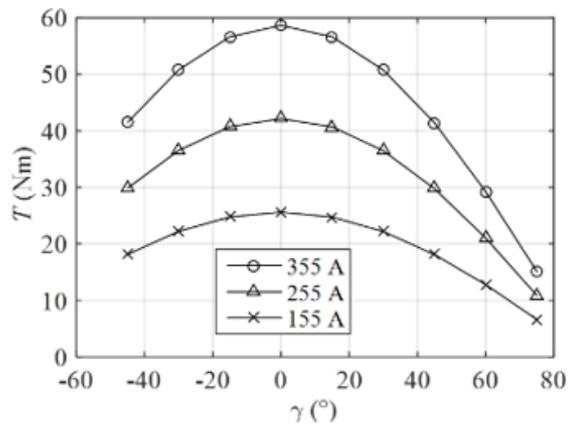
气隙磁密谐波频谱



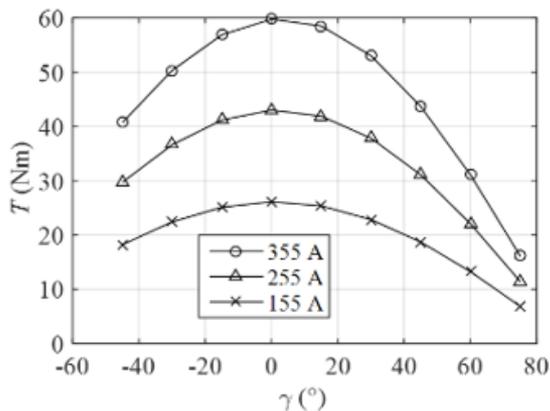
案例1



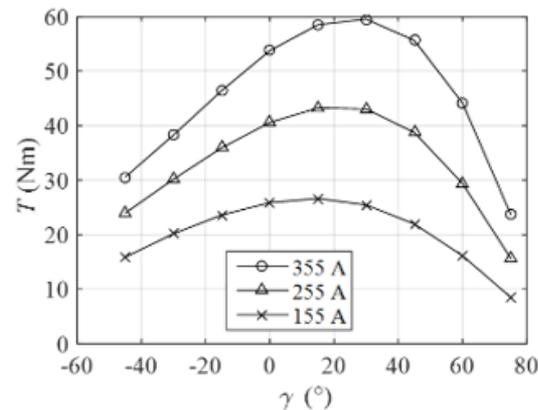
反电势波形



(a) 2 极



(b) 4 极表贴

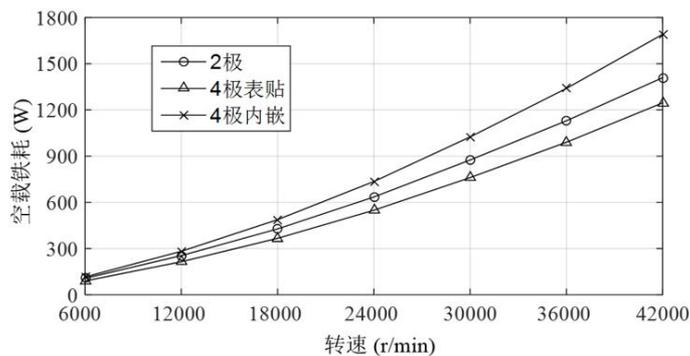


(c) 4 极内嵌

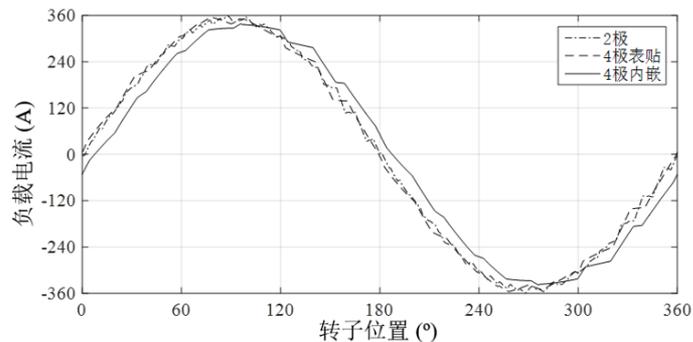
三种电机的 T - γ 特性



案例1



不同转速下三种电机方案的空载铁耗对比



负载电流波形

机械:

强度: 2极 > 4极表贴 > 4极内嵌 刚度: 4极表贴 > 2极 > 4极内嵌

损耗:

	2极	4极SPM	4极IPM
定子铜耗	1056.5 W	873.4 W	694.4 W
定子铁耗	876.3 W	931.7 W	2703.3 W
转子电磁损耗	135.9 W	135.7 W	197.8 W

温升:

	2极	4极SPM	4极IPM
绕组温升	78.5 K	47.2 K	69.1 K
转子温升	51.5 K	48.0 K	53.3 K

成本:

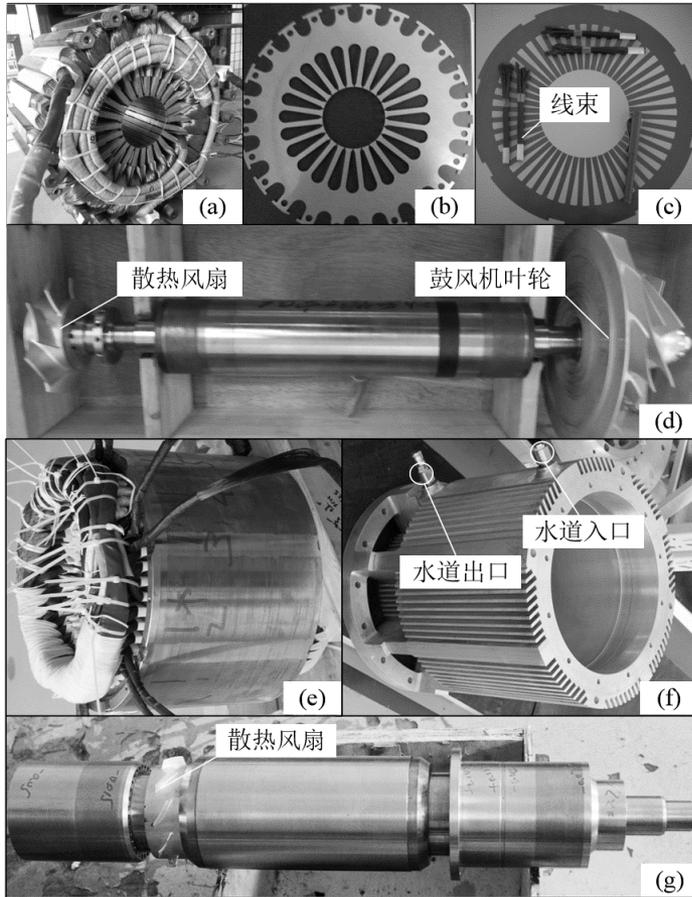
	2极	4极SPM	4极IPM
漆包线成本	1456	986	905
硅钢片成本	1474	1254	1320
护套成本	335	246	-
永磁体成本	1400	675	400
合计	4665	3161	2625

结论:

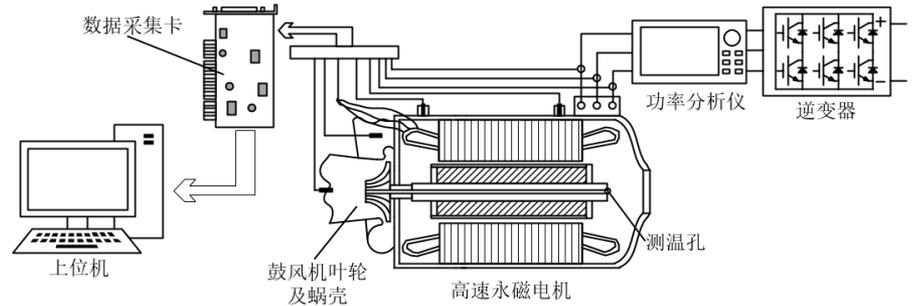
- 4极SPM综合性能最优
- IPM成本最低, 但可靠性、损耗与温升性能差



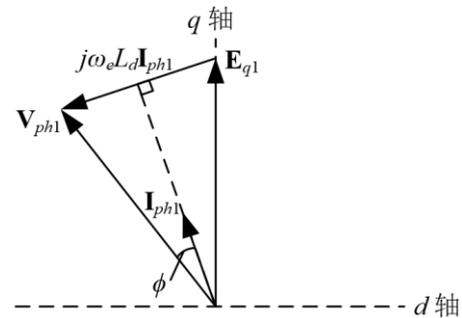
案例1



样机照片



实验系统



$$(\omega_e L_d I_{ph1} - V_{ph1} \sin \phi)^2 + (V_{ph1} \cos \phi)^2 = E_{q1}^2 = (k_E \omega / \sqrt{3})^2$$

测试方法



案例1

75 kW

	电感 (μH)		反电势系数 Vs/rad	电磁转矩 Nm
	L_d	L_q		
试验值	206		0.112	19.6
计算值	197.0	197.0	0.114	20.1

140 kW

	电感 (μH)		反电势系数 Vs/rad	电磁转矩 Nm
	L_d	L_q		
试验值	194.0		0.191	55.0
计算值	185.2	185.2	0.193	55.7

300 kW

	电感 (μH)		反电势系数 Vs/rad	电磁转矩 Nm
	L_d	L_q		
试验值	78.9		0.234	152.5
计算值	76.4	75.6	0.231	150.9

温升

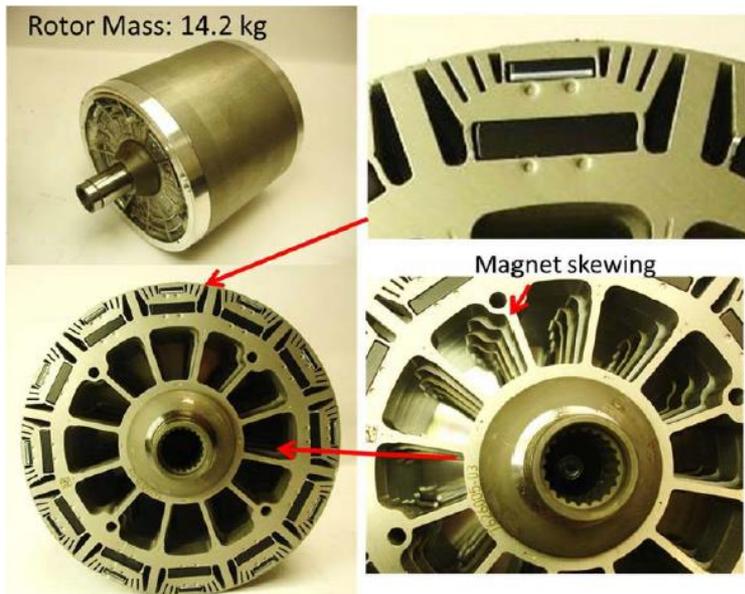
		75 kW	140 kW	300 kW
绕组	实测值	47.1	77.4	44.3
	计算值	48.3	78.5	45.7
转子	实测值	39.1	48.3	36.1
	计算值	42.0	51.5	34.4

- 电磁参数计算值与实测值非常接近
- 电机定子温升计算满足精度要求
- 转子温升在安全范围内
- 仍无有效的转子实际温升测量方法，停机后测得的值为平均值



案例2

2016 BMW i3 motor



参数	BMW i3	参数	BMW i3
额定功率/峰值功率	75kW/125kW	额定/最高转速	4775/11400rpm
额定功率密度（有效部分重量）	2.14kW/kg	峰值功率密（有效部分重量）	3.57kW/kg
有效部分重量	35kg	峰值转矩	250Nm
直流母线电压	250-400V	冷却方式	定子液冷
转子部分重量（转轴+转子叠片+永磁体）	14.2kg	定子有效部分重量（叠片+绕组）	20.8kg

参数	BMW i3	参数	BMW i3
极数	12	槽数	72
绕组层数	1	绕组形式	同心式绕组
并绕根数	12	节距	5/7
并联支路数	6	匝数	9
定子叠片外径	242.1mm	定子叠片内径	180mm
转子叠片外径/转子外径	178.6mm	转子叠片内径	60.8mm
气隙厚度	0.7mm	电枢轴向长度	132.3mm
内层永磁体尺寸（长*宽）	24*6mm	外层永磁体尺寸（长*宽）	13.5*3mm
电机的气隙转矩密度	75.427kNm/m ³	永磁体用量	2.49kg

BMW未披露具体的设计参数，数据来源于美国橡树岭国家实验室对其拆解报告。

FY2016 Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Electric Drive



表 1 BMWi3驱动电机与HSPMM驱动电机性能对比

参数	BMWi3	HSPMM	参数	BMWi3	HSPMM
额定功率/峰值功率	75kW/125kW	75kW/125kW	额定/最高转速	4775/11400rpm	18000/36000rpm
额定功率密度（有效部分重量）	2.14kW/kg	2.91kW/kg	峰值功率密（有效部分重量）	3.57kW/kg	4.85kW/kg
有效部分重量	35kg	25.78kg	峰值扭矩	250Nm	65.5Nm
直流母线电压	250-400V	540V	冷却方式	定子液冷	定子液冷
转子部分重量（转轴+转子叠片+永磁体）	14.2kg	6.46kg	定子有效部分重量（叠片+绕组）	20.8kg	19.32kg

1. HSPMM——高速永磁同步电机；
2. 有效部分重量包括：定转子铁心、永磁体、绕组及转轴；
3. HSPMM后带减速箱，变比4:1，重量约为4kg



表 2 BMWi3驱动电机与HSPMM驱动电机结构尺寸对比

参数	BMWi3	HSPMM	参数	BMWi3	HSPMM
极数	12	4	槽数	72	36
绕组层数	1	2	绕组形式	同心式绕组	叠绕组
并绕根数	12	14	节距	5/7	8
并联支路数	6	4	匝数	9	5
定子叠片外径	242.1mm	190mm	定子叠片内径	180mm	102mm
转子叠片外径/转子外径	178.6mm	98mm	转子叠片内径	60.8mm	40mm
气隙厚度	0.7mm	2mm	电枢轴向长度	132.3mm	125mm
内层永磁体尺寸（长*宽）	24*6mm	无	外层永磁体尺寸（长*宽）	13.5*3mm	9mm
电机的气隙转矩密度	75.427kNm/m ³	70.91kNm/m ³	永磁体用量	2.49kg	1.82kg



案例2

BMWi3仿真分析有效部分材料:

定转子叠片: 蒂森克虏伯 (ThyssenKrupp) M330-35, 叠压系数98%;

永磁材料: 烧结钕铁硼, Arnold N40SH;

绕组: 21AWG, 国标 (0.724mm)

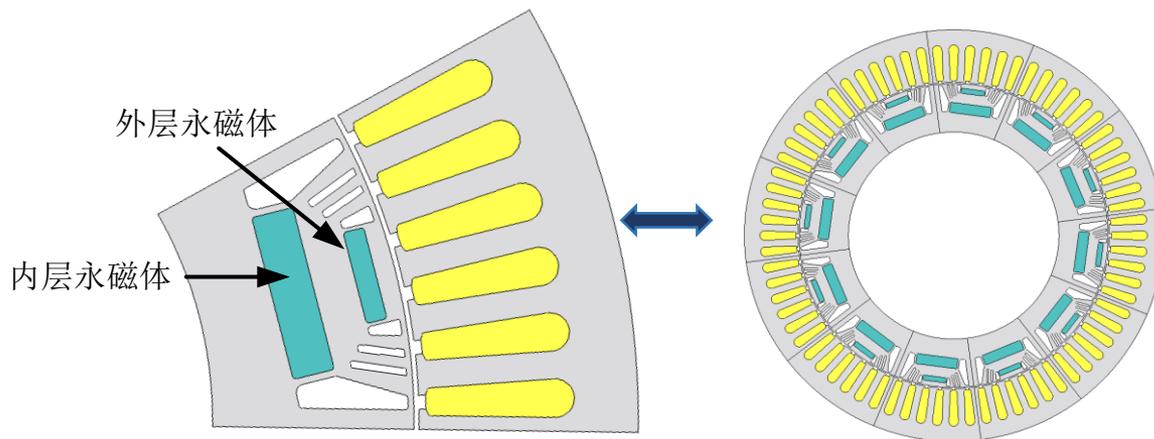


图 1 BMWi3电机结构

HSPMM仿真分析有效部分材料:

定转子叠片: 宝钢WTG200 叠压系数98%;

永磁材料: 烧结钕铁硼, Arnold N42UH;

绕组: 0.85mm裸导线

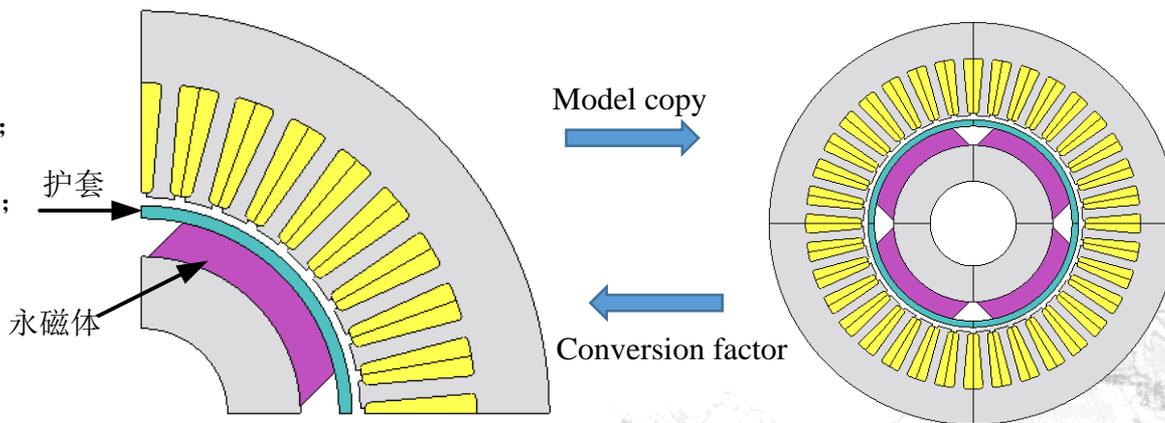


图 2 HSPMM电机结构



Jmag软件剖分功能中的“Add size control”使剖分更合理，计算准确性更高

Part---控制2D或3D中面或部件的剖分尺寸

Edge—控制2D或3D中边的剖分尺寸

Vertex—控制某端点附近的剖分尺寸

Skin Mesh—计及集肤效应时集肤深度剖分

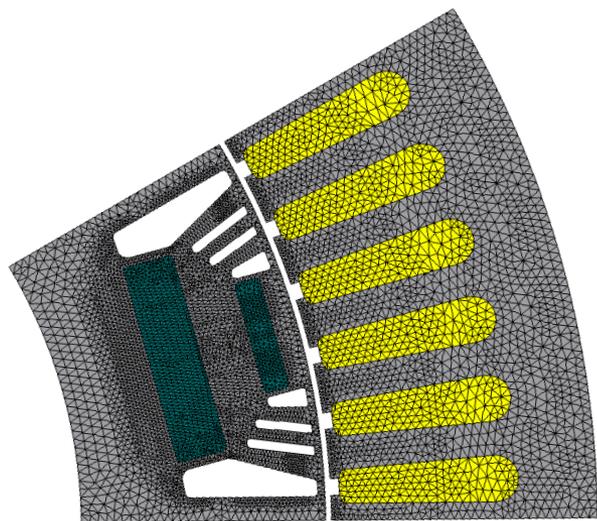


图3 BMWi3电机计算过程中的剖分

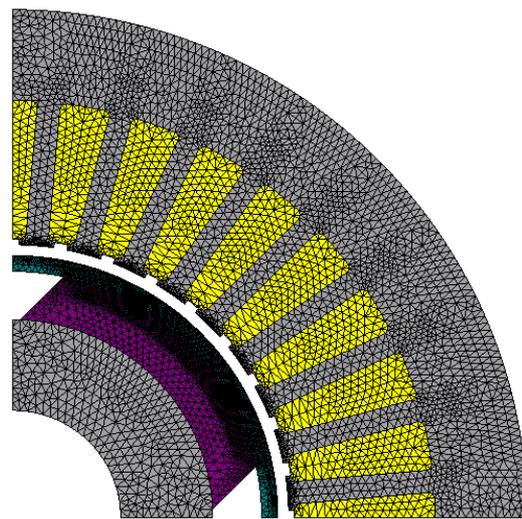


图4 HSPMM电机计算过程中的剖分

空载特性分析比较

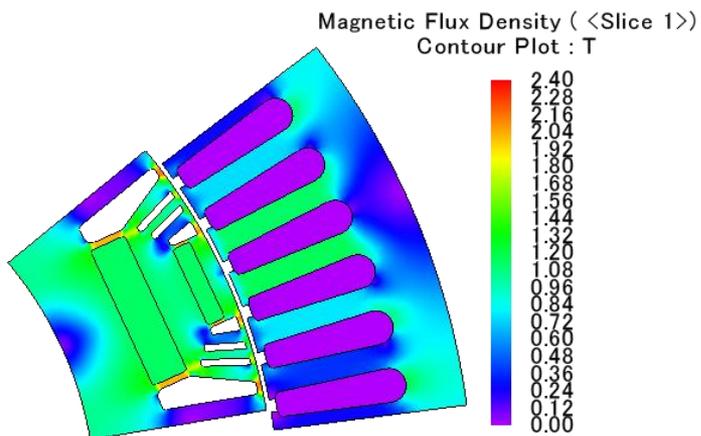


图5 BMWi3空载磁密分布云图

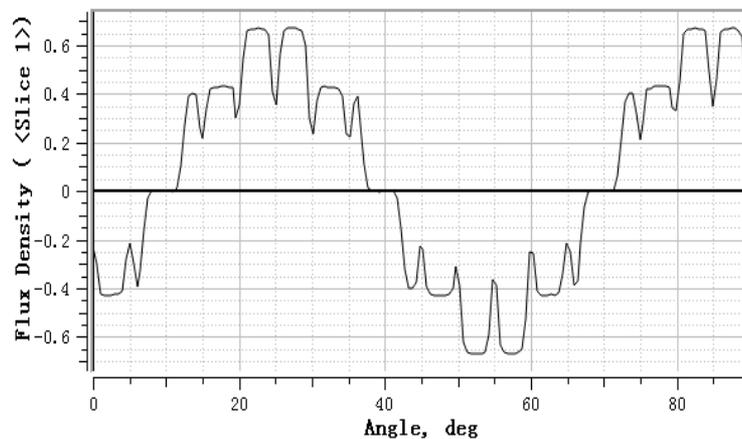


图6 BMWi3气隙中间径向磁密分布

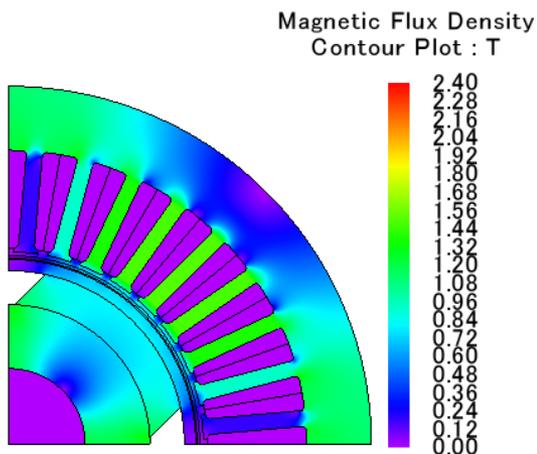


图7 HSPMM空载磁密分布云图

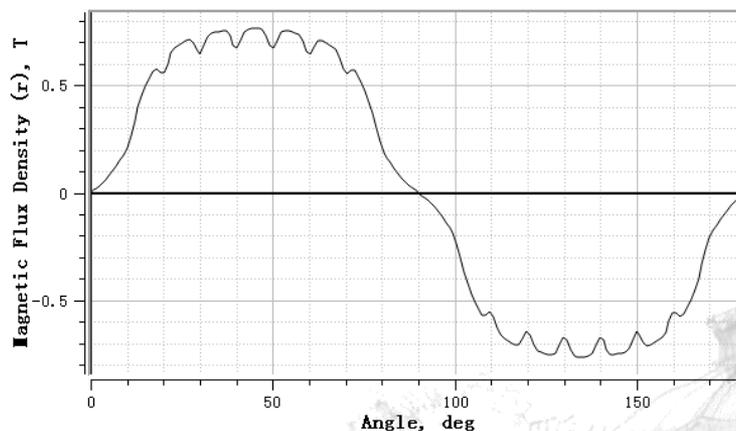


图8 HSPMM气隙中间径向磁密分布



空载特性分析比较

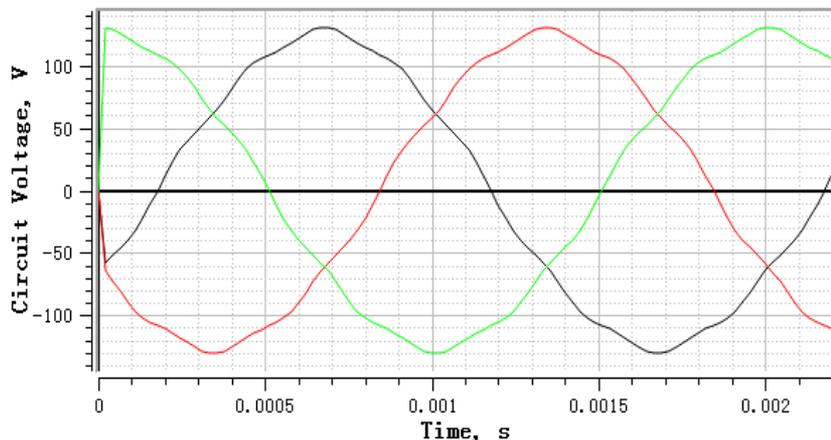


图9 BMWi3空载反电势波形 (5000rpm)

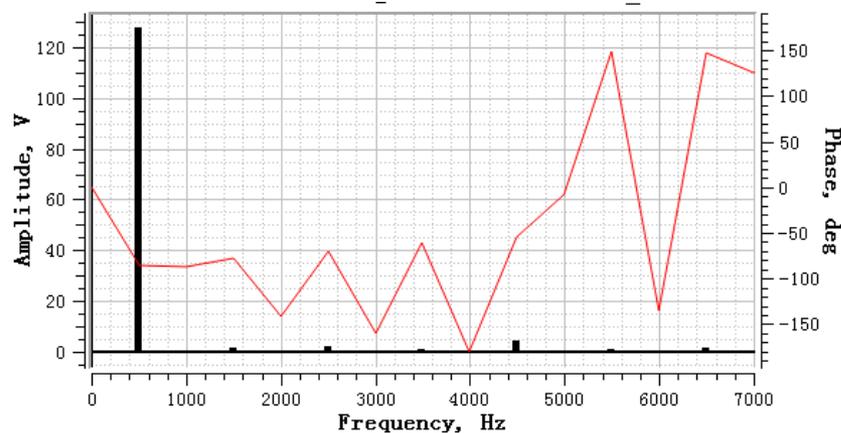


图10 BMWi3空载反电势波形傅立叶分析

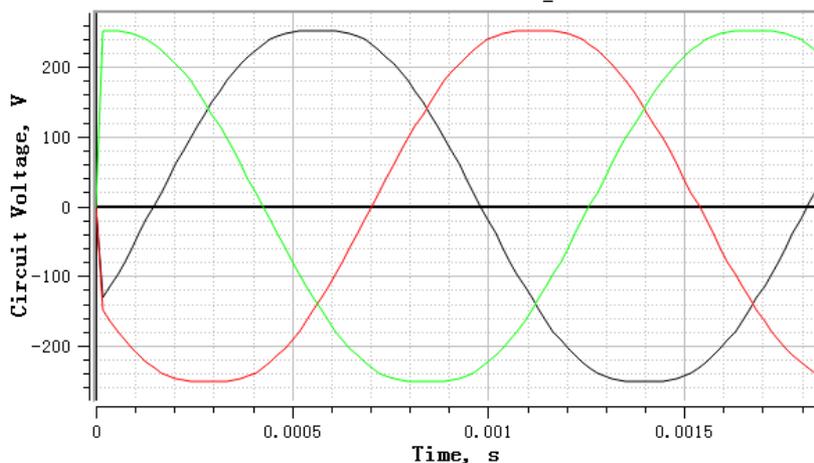


图11 HSPMM空载反电势波形 (18000rpm)

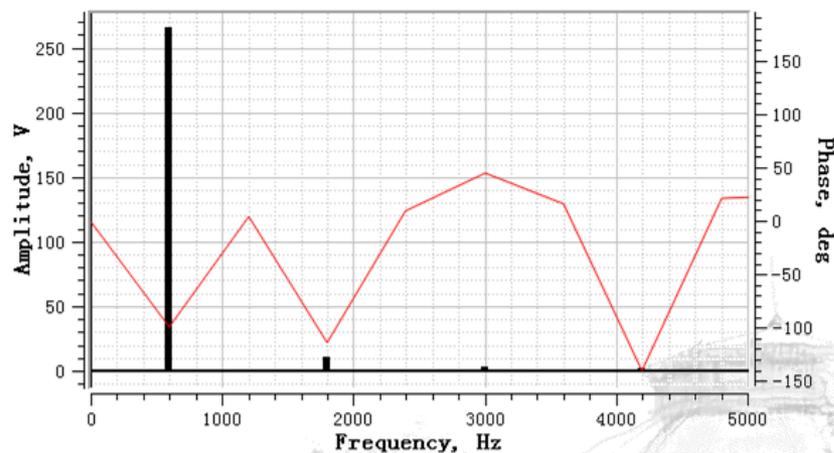


图12 HSPMM空载反电势波形的傅立叶分析



负载工作点的性能分析

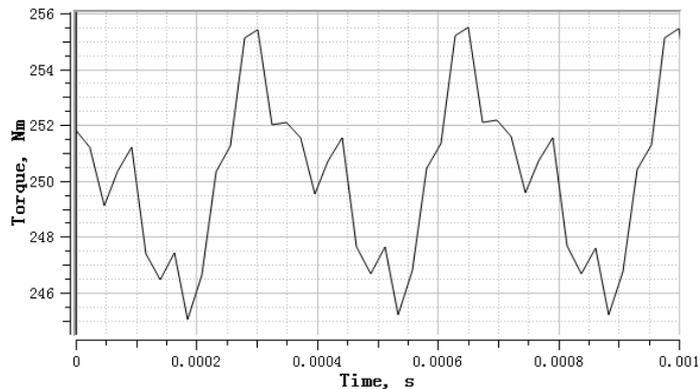


图 19 BMWi3负载工作点输出转矩曲线（转矩波动3.94%）

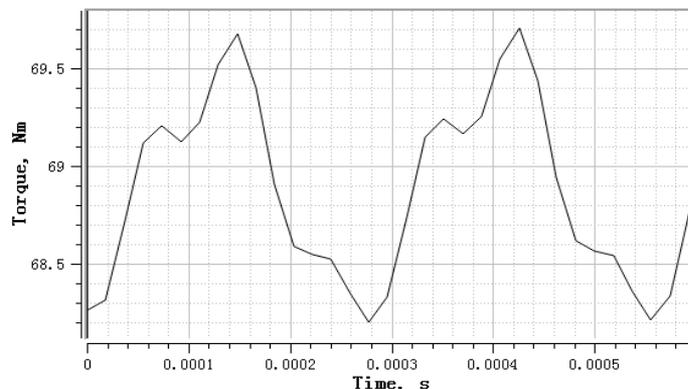


图 20 HSPMM负载工作点输出转矩曲线（转矩波动2.18%）

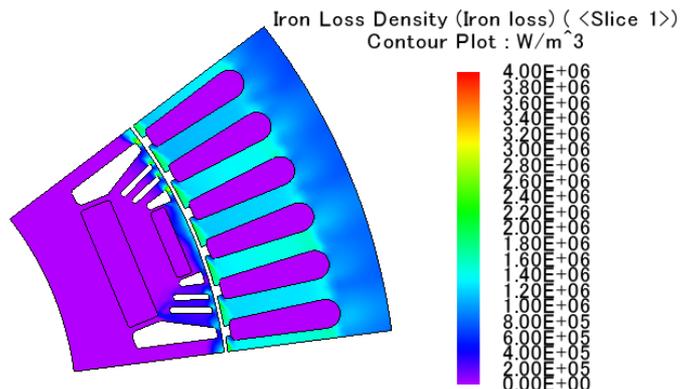


图 21 BMWi3 定转子铁损耗分布（转子137.27W，定子1708.89W）

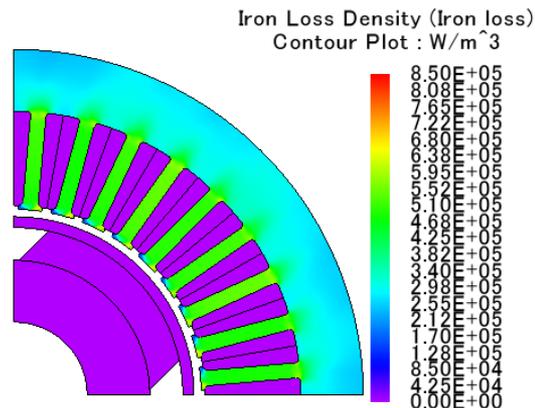


图 22 定转子铁损耗分布（转子0.08W，定子611.39W）

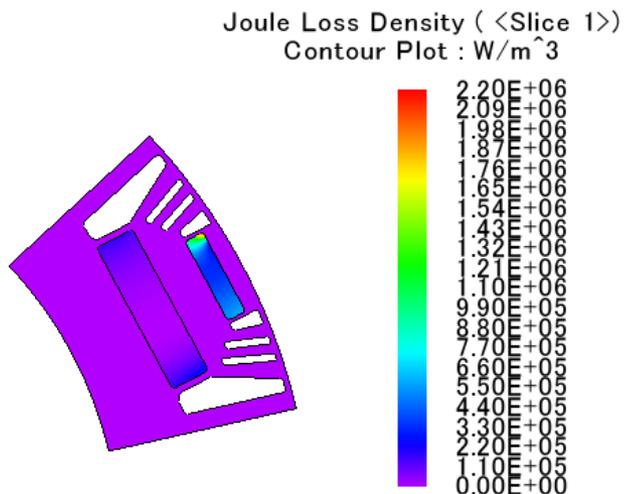


图 23 BMWi3永磁体中涡流损耗分布

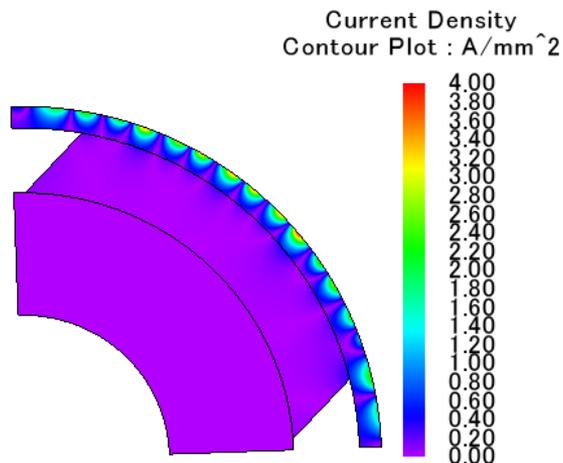


图 24 HSPMM永磁体及护套中涡流损耗分布

表 3 BMWi3与HSPMM损耗分布对比

	绕组铜耗 (W)	定子铁心铁耗 (W)	转子铁心铁耗 (W)	永磁体涡流损耗 (W)	护套损 耗 (W)	总损耗 (W)
BMWi3	2590.5	1708.89	137.27	外57.13/内18.08	无	4511.87
HSPMM	1610.5	611.39	0.08	4.82	158.20	2384.99

驱动电机转矩特性对比分析

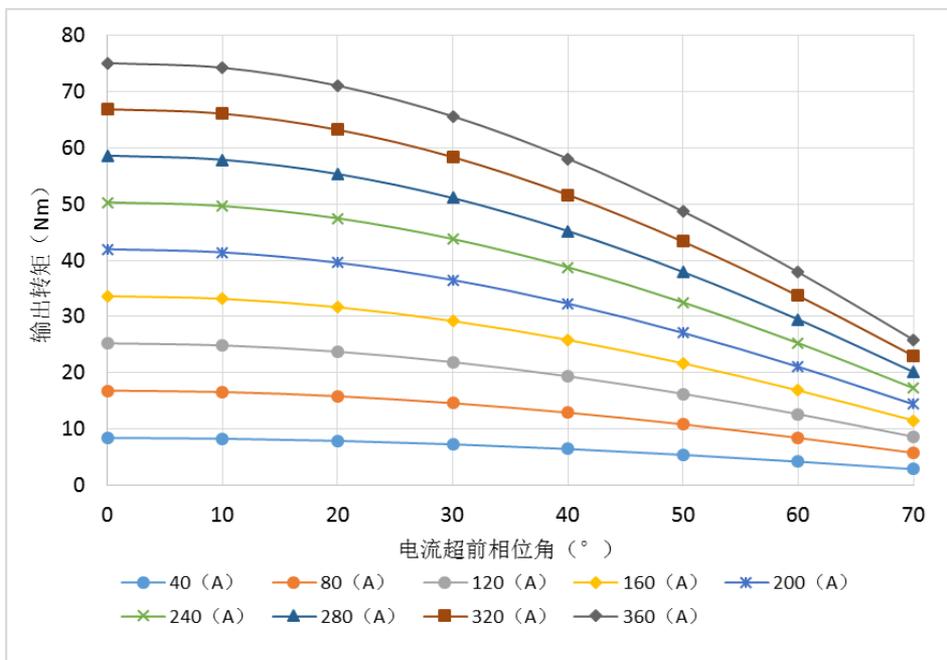
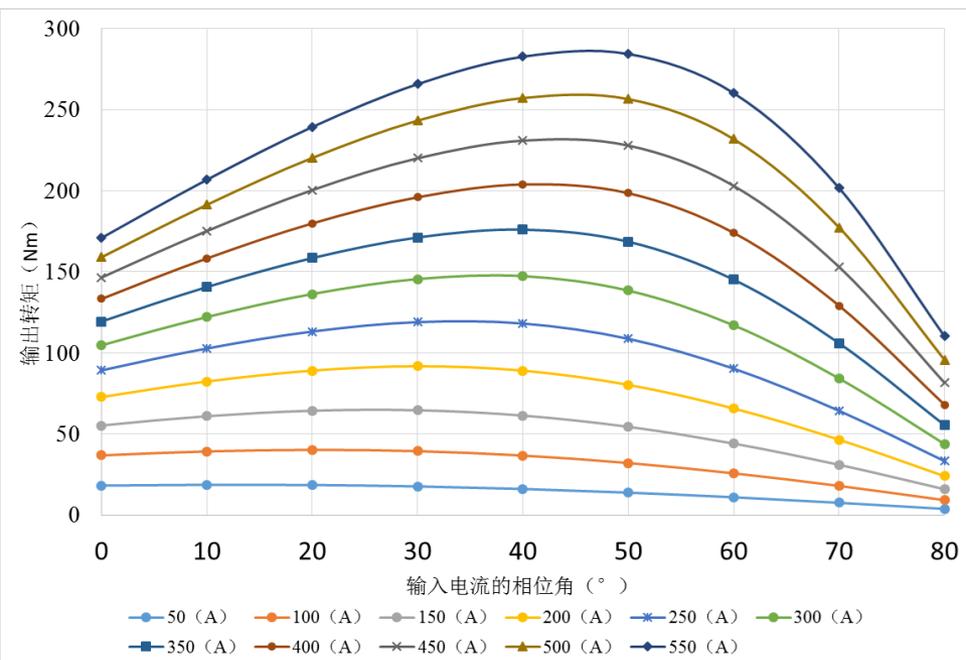


图 27 BMWi3驱动电机输出转矩与电流及相角关系

图 28 HSPMM驱动电机输出转矩与电流及相角的关系

案例2

在整个工作范围内的效率map图（JMAG RT计算得到数据）

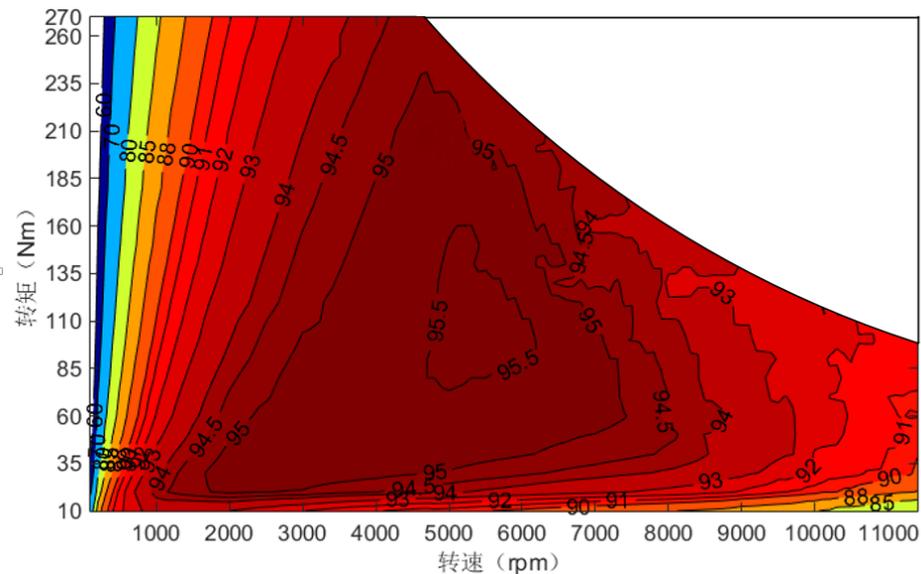


图 29 BMWi3计及绕组铜耗及定子铁耗的效率图

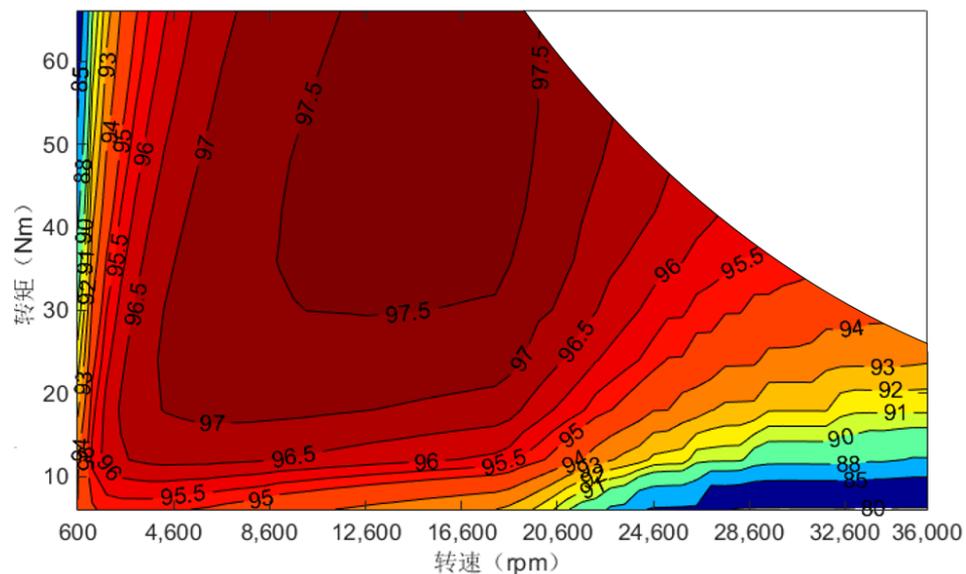


图 30 HSPMM计及绕组铜耗及定子铁耗的效率图

高速永磁同步电机转子上的涡流损耗与风摩擦损耗远大于中低速电机，实际效率应在上图基础上减小约1.5%。



BMWi3电机设计特点分析

1. 磁阻转矩分量较高，对提高转矩密度和功率密度有益；
2. 为减少漏磁转子结构复杂，气隙磁密波形较差，电机转矩波动大；
3. 为了抑制转矩波动及齿槽转矩，转子采用分段斜极，降低了电机转矩输出能力；
4. 采用同心式绕组减小绕组端部，简化了嵌线工艺；但槽满率较低，电枢磁势波形较差；
5. 转子外径及隔磁桥宽度较大，漏磁较多，降低了永磁体的利用率；
6. 选用较多极数提高了转矩密度，但磁场基频较大（最高1140Hz），铁耗很高；
7. 极数较多导致槽数增加，降低了电负荷，削弱了多极数对转矩的提升作用。

HSPMM电机设计特点分析

1. 总损耗相较BMWi3电机大幅减少，损耗密度基本接近，可以采用相同的冷却方式，但温升会有所升高；
2. 体积减小，结构强度增加，方便与减速器、控制器集成；
3. 永磁体及铁心材料用量减少，有利于降低成本。



双积分政策

- 纯电动乘用车： $0.012 \times R + 0.8$

- ▶ 积分高，续航里程决定积分。续航350公里可最多的5个积分；
- ▶ 基础设施缺乏，不好卖，特别是在2-3线城市；
- ▶ 成本高。

- 插电混动乘用车：2积分

- ▶ 相对好卖，基础设施依赖性不强，相当一部分人从不插电；
- ▶ 续航要求低(50km 以上)，成本低。

- 燃料电池汽车： $0.16 \times P$ ，P为额定功率，上限5个积分

- ▶ 技术难度大，基础设施更加匮乏；
- ▶ 难以普及，基本在选项之外。



• 生产新能源汽车

- ▶ 政策引导，北京、上海的牌照制度，强制消费者购买新能源车；
- ▶ 政策扶持退坡，补贴减少；
- ▶ 很难打入无限牌政策的城市；
- ▶ 可作为技术储备和品牌支撑少量生产，随时应对政策变化；

• 降低燃油车油耗

- ▶ 减少新能源车生产需求
- ▶ 至2020年，1.43-2.00 吨车型燃油消耗量为5.3-6.2 L/100km；
- ▶ 通过动力系统电气化，可以将油耗将至4.2-5.3 L/100km。（参考主流混动车型）



案例3



低

电气化程度

高



电动、废气
双涡轮增压

变速箱电动辅
助换挡装置

低压轻混系统

- 单级变速插电及纯电驱动
- 使用多挡变速箱的电驱动系统

降低燃油车油耗

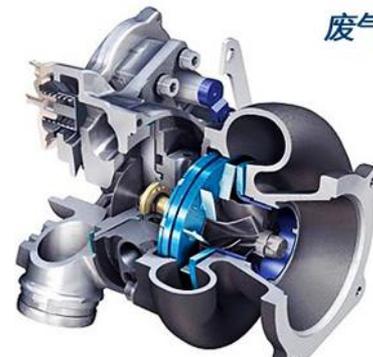
提高新能源车续航
里程及动力性能



• 废气涡轮

- 技术成熟
- 使用废气涡轮有利于降低发动机排量和油耗指标；
- 废气涡轮在低速时不能使用，导致发动机低速扭矩不足；
- 废气涡轮介入前后车辆动力性能有明显不同，存在涡轮迟滞；
- 废气涡轮介入过早，不利于提高燃油效率。

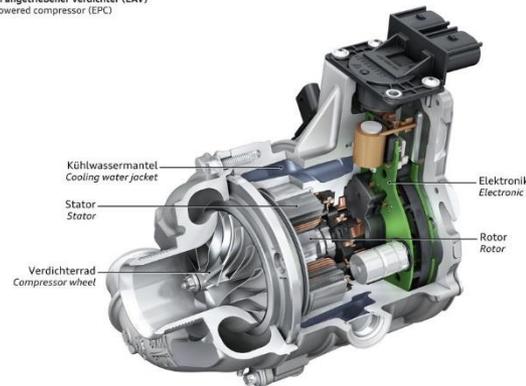
废气涡轮增压器



• 电动涡轮

- 低速时帮助发动机进气；
- 提高低速扭矩；
- 降低怠速；
- 没有涡轮迟滞，动力更平顺；
- 比机械增压损耗低；
- 奔驰、奥迪高端车型均开始装备。

Audi SQ7 TDI
Elektrisch angetriebener Verdichter (EAV)
Electric powered compressor (EPC)
05/16



案例3

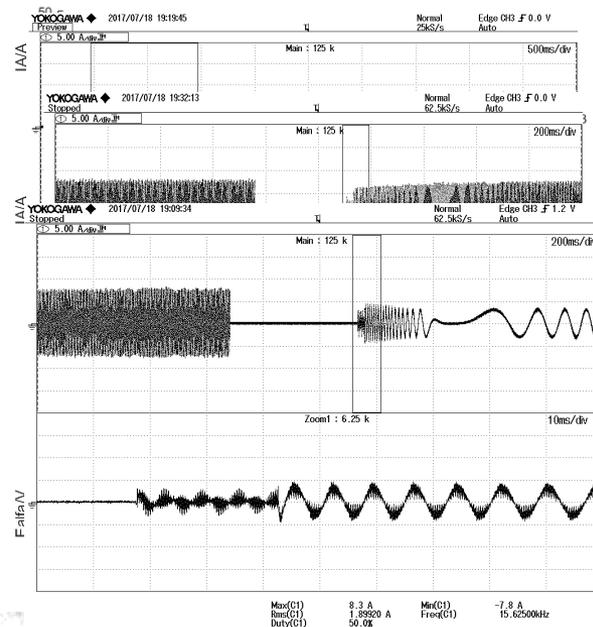
• 技术需求

- 奥迪SQ7 V8发动机 电动涡轮功率7kw;
- 奔驰S600及CLS级M256 V6发动机, 电动涡轮功率 5 kW;
- 目前在研的L4发动机电动涡轮, 功率在2.0-3.0 kW左右, 最大转速在50,000 RPM 至70,000 RPM左右。

• 提供高速永磁电机设计及其驱动技术解决方案



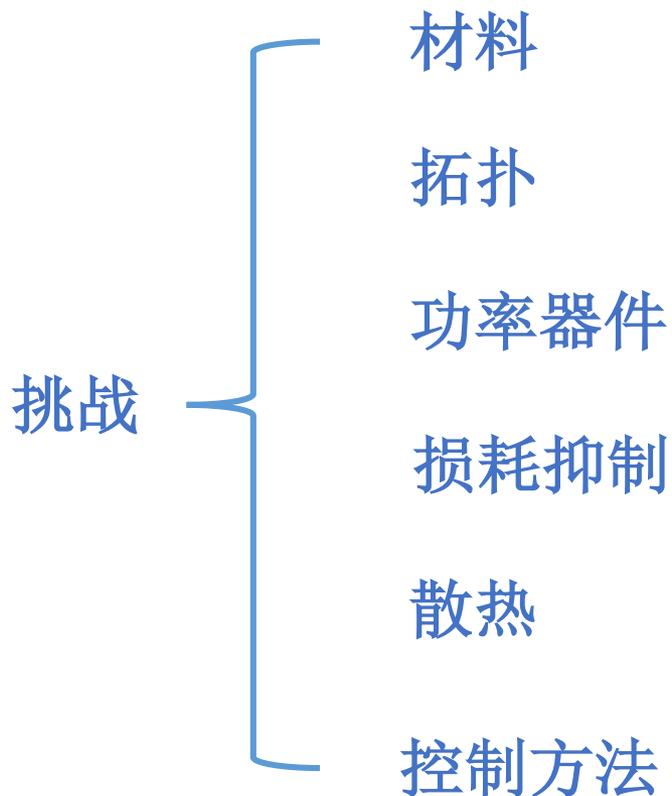
- ✓ 48V母线高速电机实验平台
- ✓ 可在10 kHz开关频率下控制电机以 100,000 RPM 稳运行
- ✓ 无位置传感器控制
- ✓ 在任何情况（零速、正转、反转）下均可快速启动



800W, 100,000RPM 风扇测试结果
反转启动



更大功率——几MW、十几MW
极高转速——几百kr/min



- 1、由于体积小，功率密度大，有越来越多的应用场合，例如全电化交通工具、军工等；
- 2、主要设计难点在于损耗、热和机械（结构、强度和模态）；
- 3、多场耦合的综合设计与优化方法；
- 4、朝大型化（更大功率）、小型或微型化（更高转速）发展，需要材料、器件、控制技术等多方面支持；
- 5、还有非常重要的轴承技术，本报告未涉及；
- 6、进入门槛高，拥有成套技术的单位较少。

感谢各位专家，请批评指正！

