

ANSYS®



ANSYS中国技术大会
中国·上海

车用非晶态合金永磁电机优化设计及开发

李琦 副研究员

中国科学院电工研究所
高功率密度电气驱动及电动汽车技术研究部

一、引言

电机节能工程

电机耗电占全社会用电量的比重达到60%以上
平均效率比国际先进水平低2-5个百分点

电动汽车

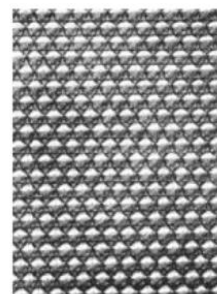
越来越严苛的电驱系统技术指标

高效率

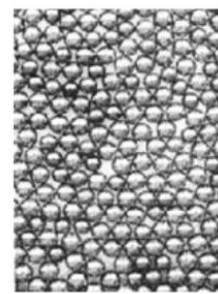
非晶态合金电机

一、引言

- 制备非晶态合金采用的正是一种快速凝固的工艺。将处于熔融状态的高温钢水喷射到高速旋转的冷却辊上。钢水以每秒百万度的速度迅速冷却，仅用千分之一秒的时间就将 1300°C 的钢水降到 200°C 以下，形成非晶带材。

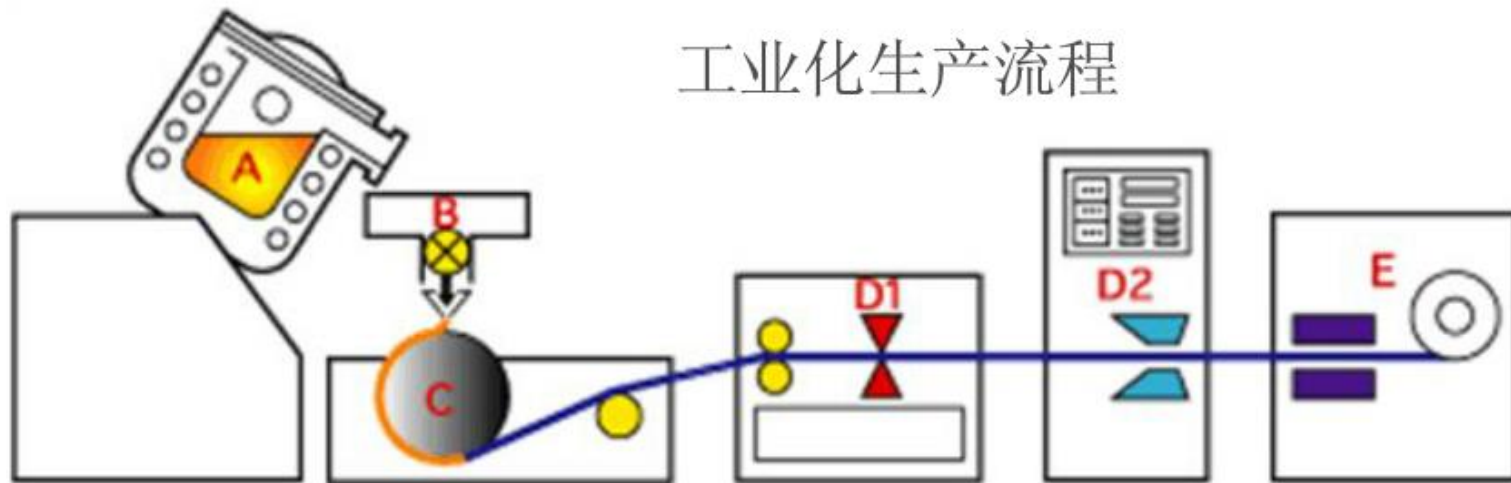


晶态



非晶态

- 最大的非晶态合金生产商：
日立、安泰科技

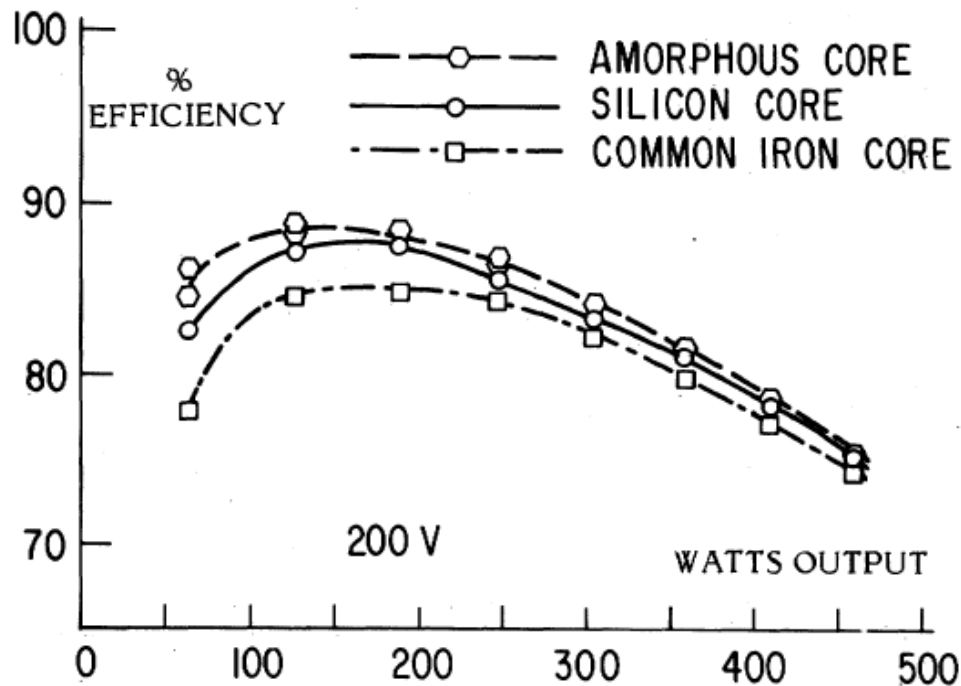
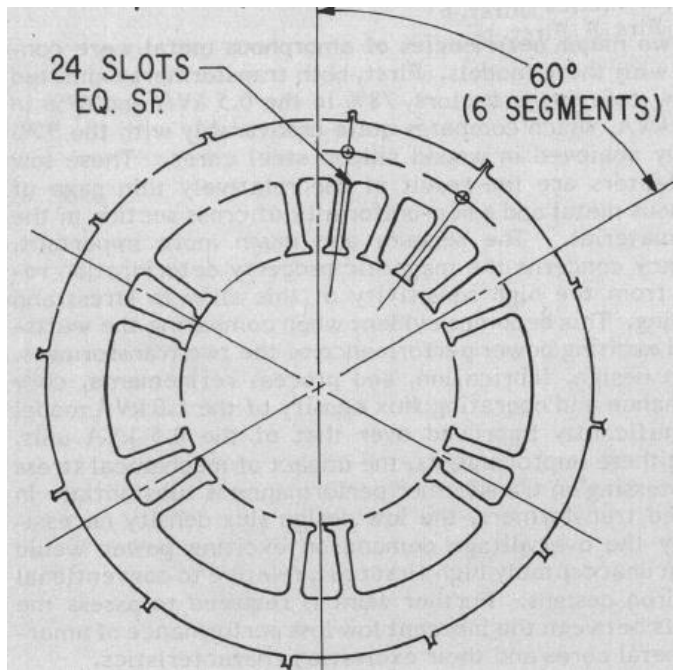


一、引言

性能指标	铁基非晶合金	硅钢
饱和磁密 (T)	1.58	2.03
最大磁导率 (Gs/Os)	450000	40000
铁损 (w/kg)	50Hz, P ₁₃ =0.185	50Hz, P ₁₃ =1.828
叠片系数	>0.8	>0.95
厚度 (μm)	30	350
电阻率 (Ωμ.cm)	130	0.45
维氏硬度 (HV)	900	181

- ✓ 铁损约 **1/10**
- ✓ 饱和磁密 **3/4**
- ✓ 硬度 **5倍**

二、非晶合金电机研究现状



美国通用电气研发的非晶合金电机

- 首次尝试了非晶材料在电机上的应用
- 证明了非晶材料能显著降低定子铁损

加工难度大

二、非晶合金电机研究现状

- 非晶材料经叠压、浸漆固化、切割后直流磁性能衰减，饱和磁密由1.56T下降至1.30T

退火制度	无磁场处理	加纵磁	加横磁	先纵磁后横磁	先横磁后纵磁
μ_i	2270	2380	8480	12040	2110
μ_m	60230	172300	11710	19160	19313
B_s / T	1.56	1.61	1.60	1.61	1.61
B_r / T	0.69	1.42	0.06	0.11	1.22
$H_c / A \cdot m^{-1}$	5.63	5.80	3.59	3.90	2.65

卷绕环形非晶带材在不同退火工序下的直流磁化性能

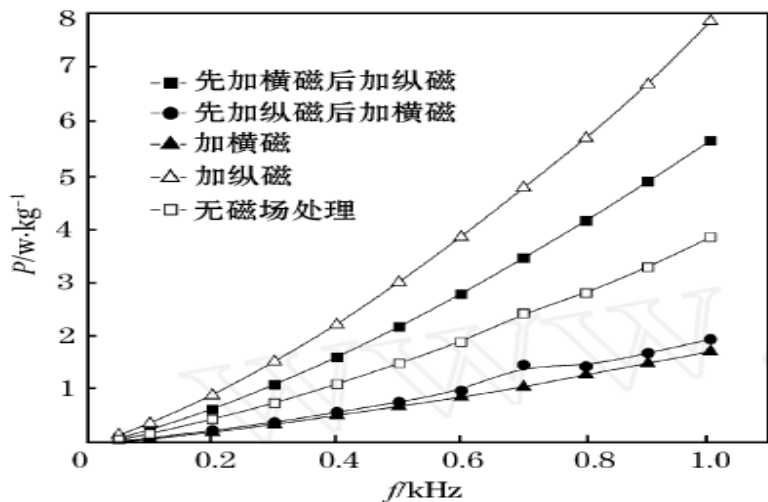
材料 \ 性能	$B_{2500A/m} / T$	B_r / T	$H_c / (A \cdot m^{-1})$	μ_i	μ_m
非晶定子铁心	1.30	0.286	27.91	1911	4915
硅钢定子铁心	1.54	0.399	52.36	575	3242

注：硅钢定子铁心所用硅钢片牌号为 DR255, 厚度为 0.35 mm。

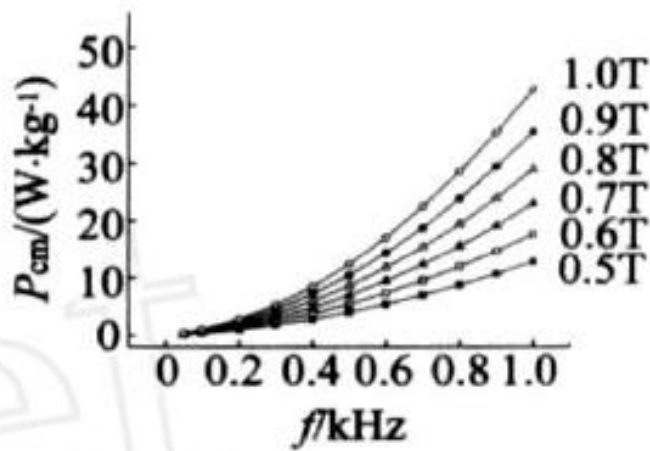
经过叠压、浸漆固化、切割后的成型定子铁芯的直流磁化性能

二、非晶合金电机研究现状

- 非晶材料经叠压、浸漆固化、切割后直流磁性能衰减，1KHZ，1T时非晶铁损从1.7w/kg~7.87w/kg上升至42w/kg



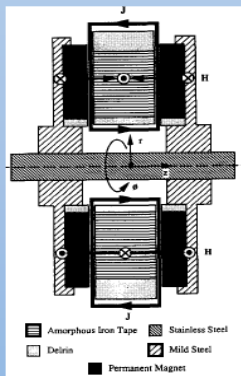
卷制非晶带材在不同退火处理下的铁损曲线



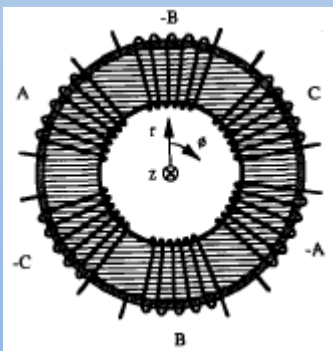
经叠压、浸漆固化、切割成型的非晶定子铁芯铁损曲线

二、非晶合金电机研究现状

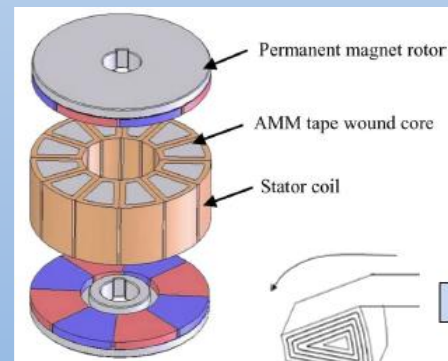
非晶电机新结构和新工艺的尝试



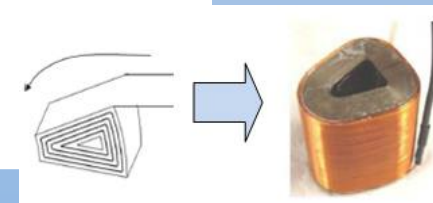
卷绕非晶定子铁芯



水切割工艺

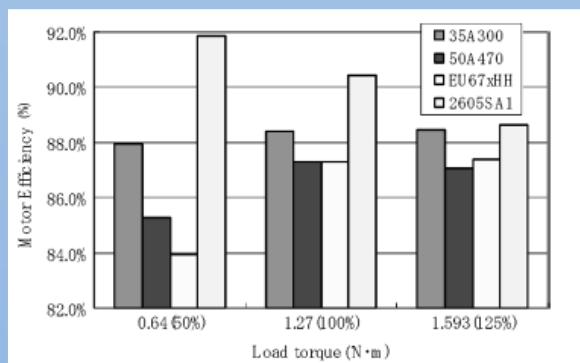
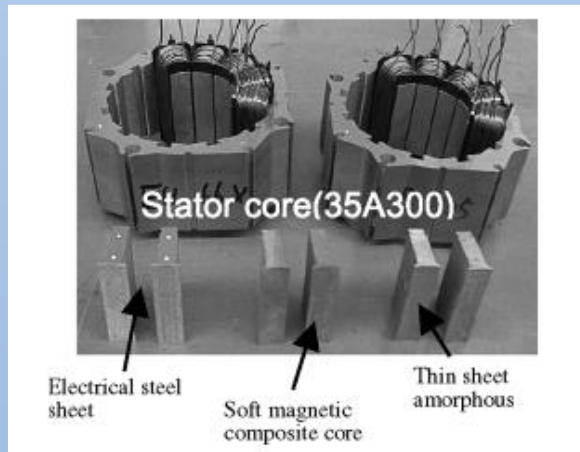


卷绕非晶定子单元

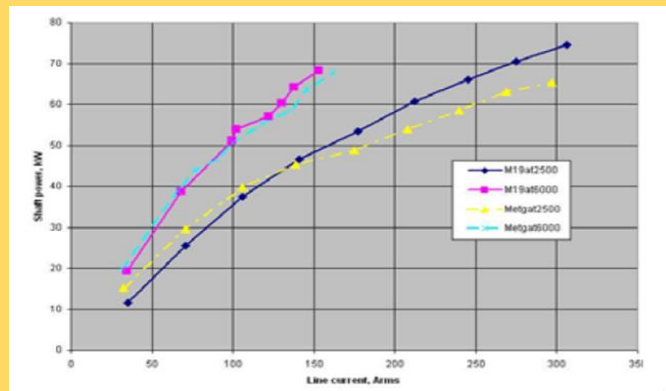
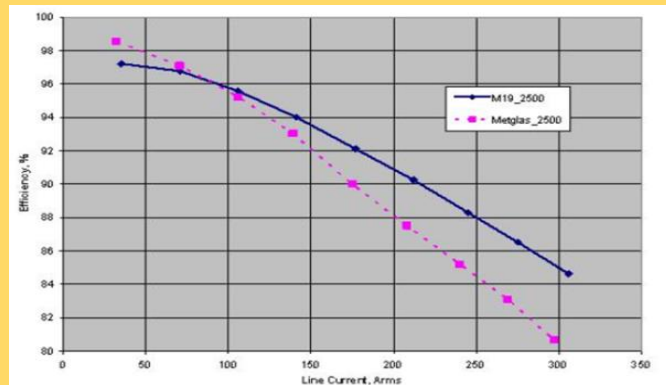


二、非晶合金电机研究现状

日立公司的学者们对比不同定子齿材料的电机性能



2008年美国橡树岭国家实验室对比了相同尺寸的硅钢电机和非晶电机性能



简单的进行非晶材料替换并不一定能够提升电机效率，甚至会导致电机输出功率不足等更加严重的问题

二、非晶合金电机研究现状

美国LE公司采用轴向磁通结构和水切割的工艺，成功的开发了多款商用非晶电机。

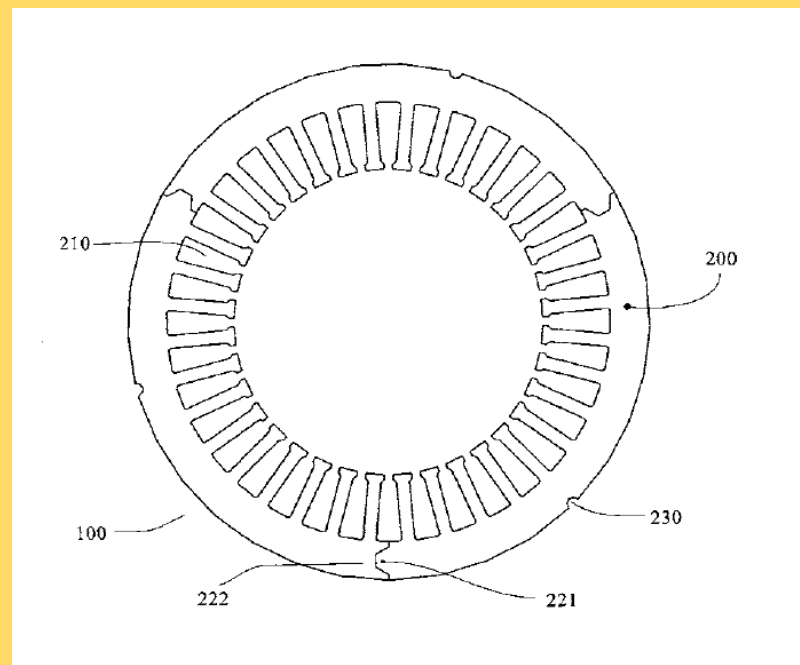
MOTOR EFFICIENCY RATE OF 95% OR BETTER



	M22B2	M32B2	M40B2
额定转矩 (Nm)	75	190	220
额定功率 (kW)	8	25	45
重量 (kg)	24.5	51	95
功率密度 (kW/kg)	0.33	0.49	0.47
过载比	1.83	1.92	/

现有商用化非晶电机难以兼顾功率密度和效率，需要进行非晶电机的优化设计

深圳华任兴公司研发了径向磁场非晶电机加工工艺，成功开发了多款商用径向非晶电机。



该方法解决了径向电机非晶定子铁芯受带材宽度限制的缺点

三、非晶永磁电机优化设计及开发

✓ 目标

✓ 优化方向


✓ 优化方法

✓ 验证


三、非晶永磁电机优化设计及开发

- 基准电机：中科深江ev620 驱动电机
- 有效体积：减小30%
- 额定效率：>96%





20kw电驱系统



- 机电接口标准化
- 结构紧凑,易于同减速器匹配
- 电机扭矩大、功率稳定
- 电机转速可调范围宽
- 适用于A级及部分B级车,能满足复杂的动力需求

相关参数：

额定 / 峰值功率 (kw)	20 / 43
额定 / 峰值扭矩 (Nm)	76@1小时以上 / 165@3分钟
转速 (rpm)	0~2500, 恒转矩区 2500~7000, 恒功率区
标称供电电压 (Vdc)	320
供电电压范围 (Vdc)	300~380
最高系统效率	<92%
冷却方式	强迫液冷
电机外形尺寸 (mm)	Φ238×243
电机重量 (kg)	52
控制器外形尺寸 (mm)	370×265×185
控制器重量 (kg)	12

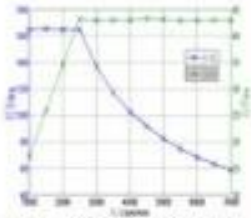


图1——20kw电驱系统外特性曲线

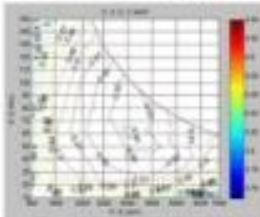
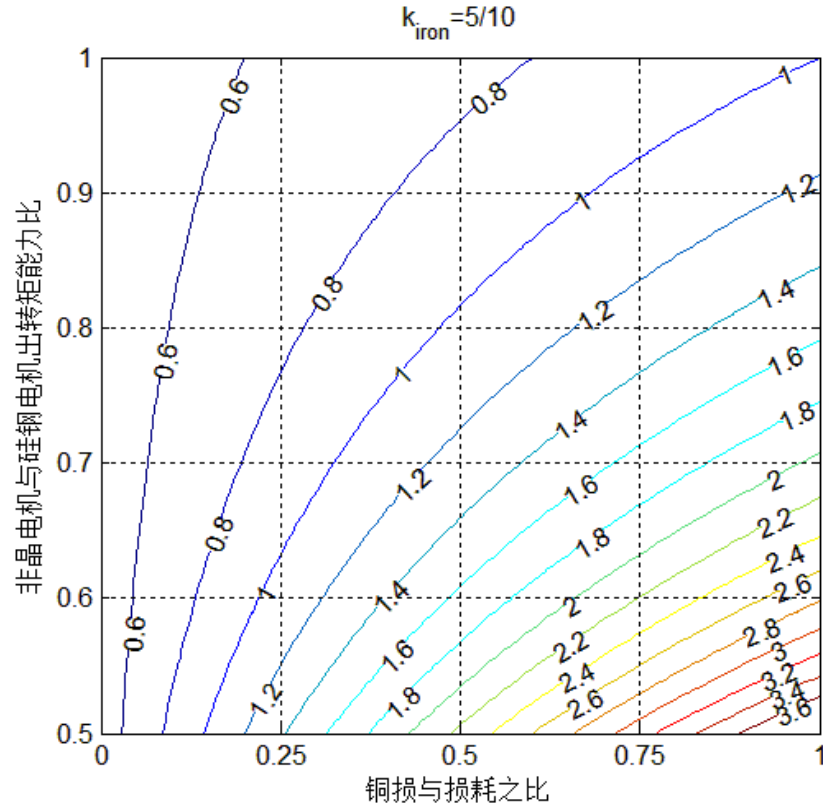
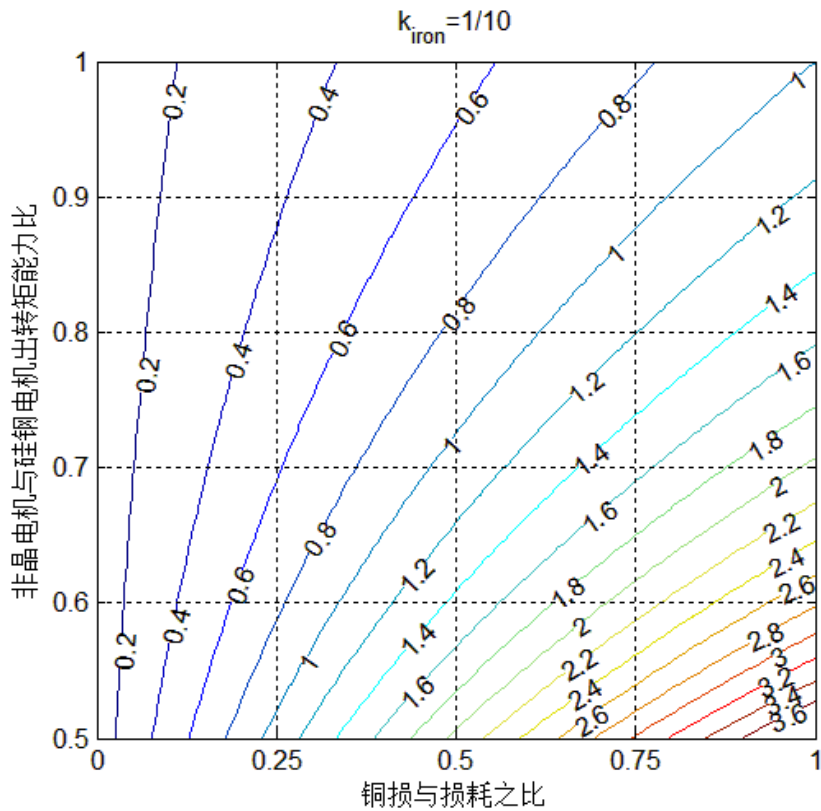


图2——20kw电驱系统效率MAP图

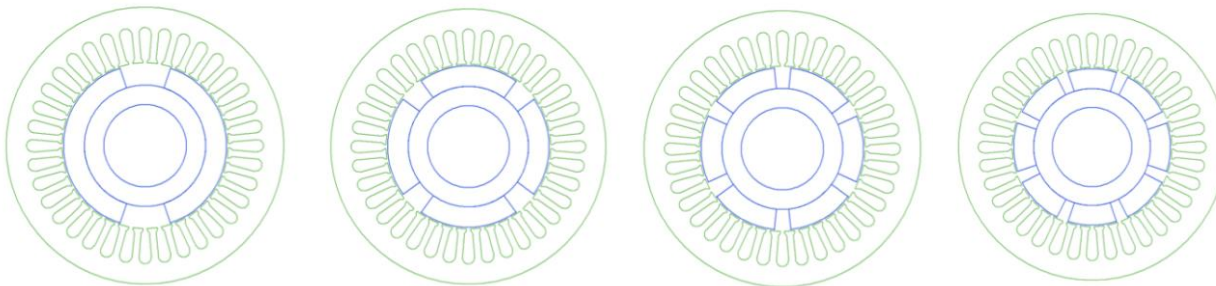
三、非晶永磁电机优化设计及开发

- 直接采用非晶材料代替硅钢后，由于非晶材料的饱和磁密低，电机出转矩能力下降，铜损上升，铁损降低。
- 假设非晶电机与硅钢电机铁损之比为 k_{iron}
- 假设非晶电机与硅钢电机出转矩能力之比为 kt ，则两者铜损比正比于 kt^2



三、非晶永磁电机优化设计及开发

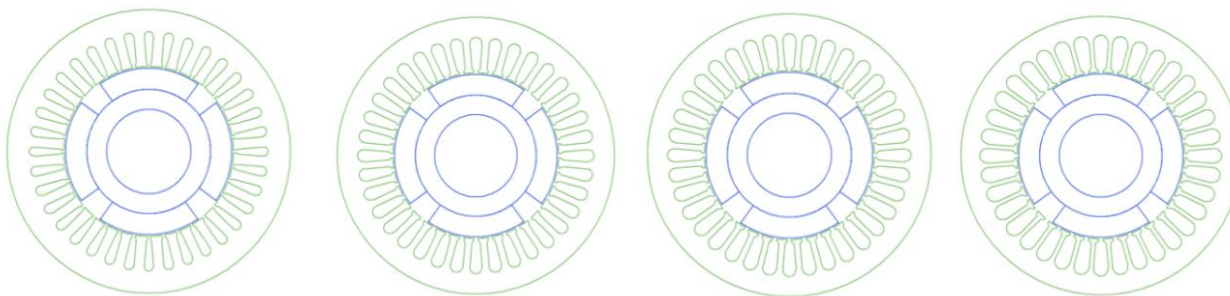
More poles, shorter end winding, less copper loss



减少铁损

优化

减少铜损



Thinner teeth, more space for windings, less copper loss

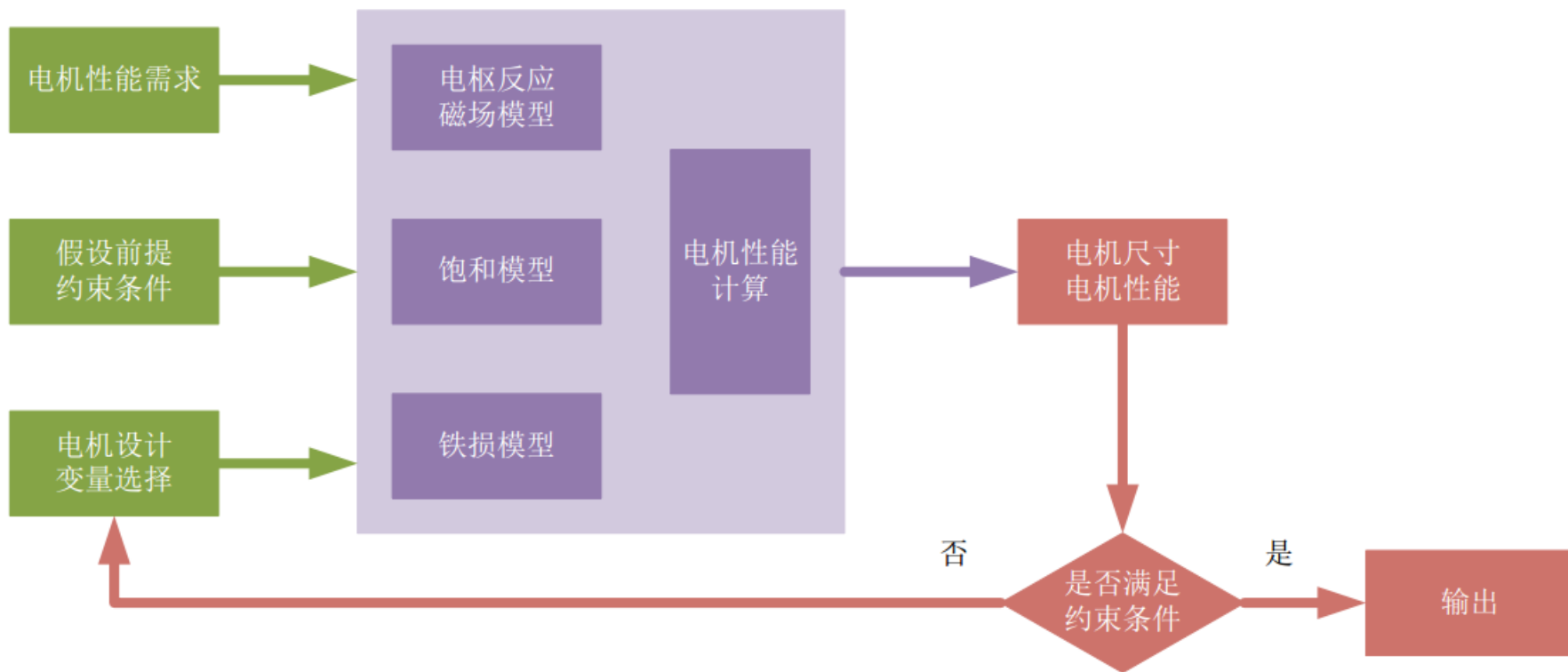
三、非晶永磁电机优化设计及开发

电机优化过程作如下约束：

- ✓ 电机运行工况相同；
- ✓ 电机单位外表面的最大散热能力为 0.0193 w/mm^2 ；
- ✓ 空载气隙磁密基波 $B_{m1} = 1 \text{ T}$ ；
- ✓ 电机定子外径不变；
- ✓ 电机相电流有效值小于 150 Arms ；
- ✓ 电机轭部高度不小于 9 mm 。由于非晶带材宽度限制，非晶定子铁芯采用花瓣拼接的方式，拼接处位于定子轭部。而非晶材料易脆，因此电机轭部高度不宜过小。

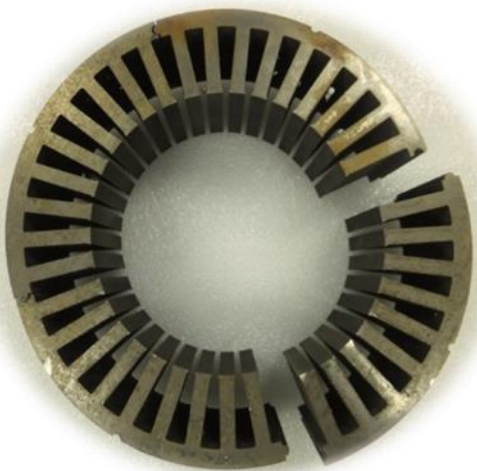
三、非晶永磁电机优化设计及开发

➤ 电机优化过程

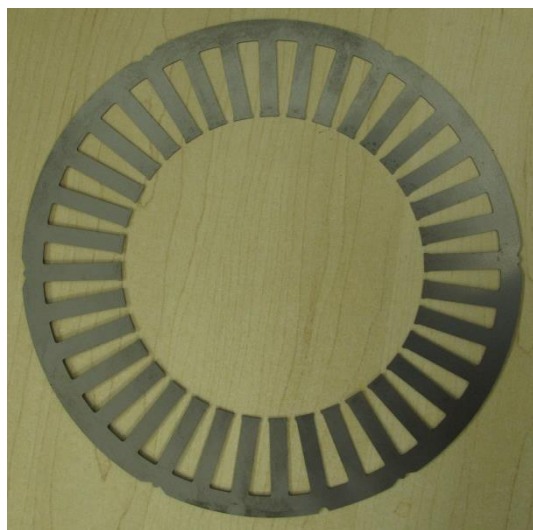


三、非晶永磁电机优化设计及开发

	非晶电机	硅钢对比电机	基准电机
每对极槽数		6	12
极数		12	6
定子外径	210	210	210
铁芯长度	65	65	95
定子材料	2605SA1	B35A300	B35A300



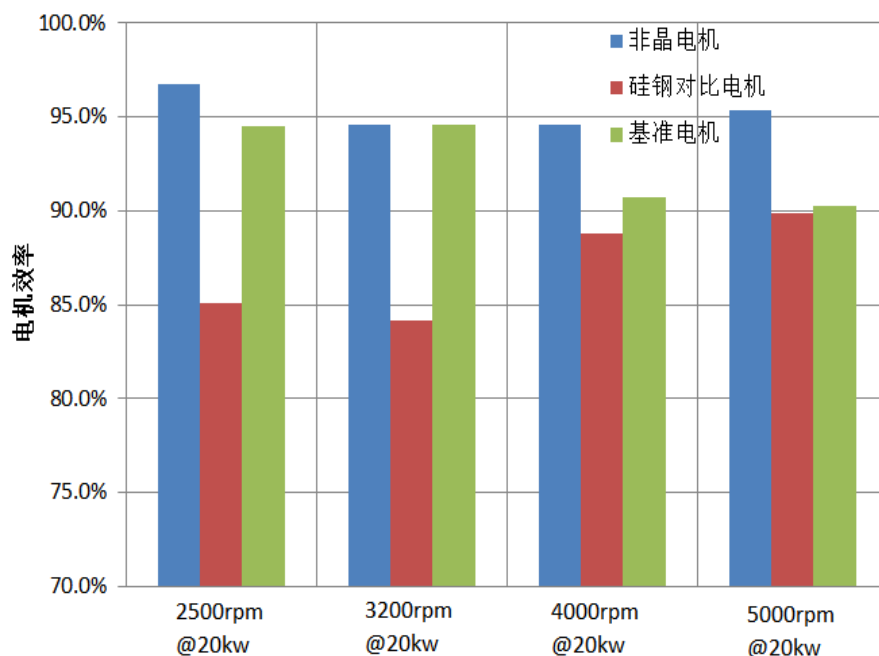
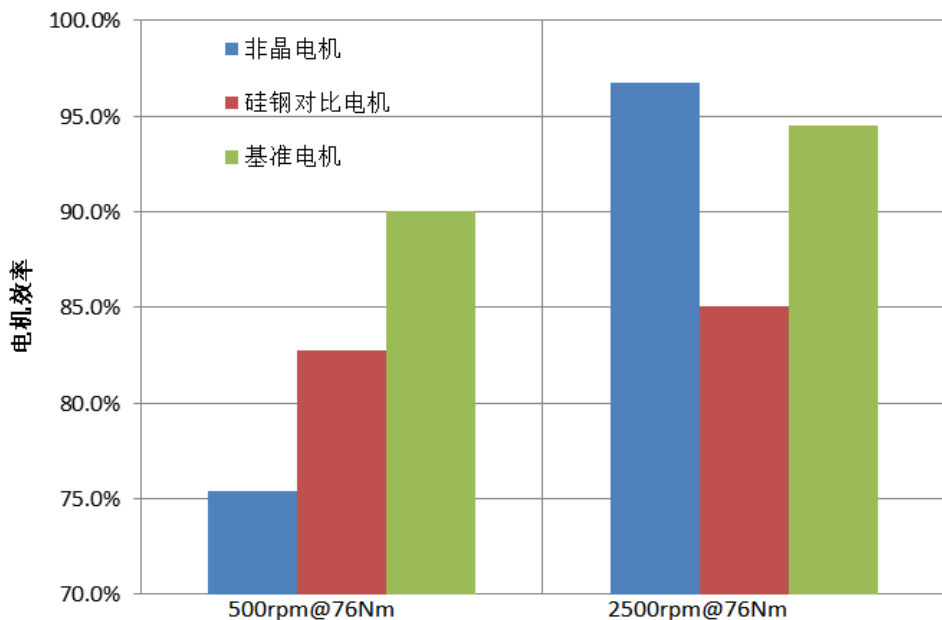
非晶定子叠块



硅钢对比电机定子冲片

三、非晶永磁电机优化设计及开发

非晶电机 > 基准电机 > 硅钢对比电机



三、非晶永磁电机优化设计及开发

	非晶电机	基准电机	
铁芯长 mm	65	95	↓ 31%
额定点效率	96.7%	94.3%	↑ 2.4个百分点
电机总重 kg	22	37 (铝壳版)	↓ 40%
效率≥95%区域	12%	5.6%	↑ 1倍

四、机遇与挑战

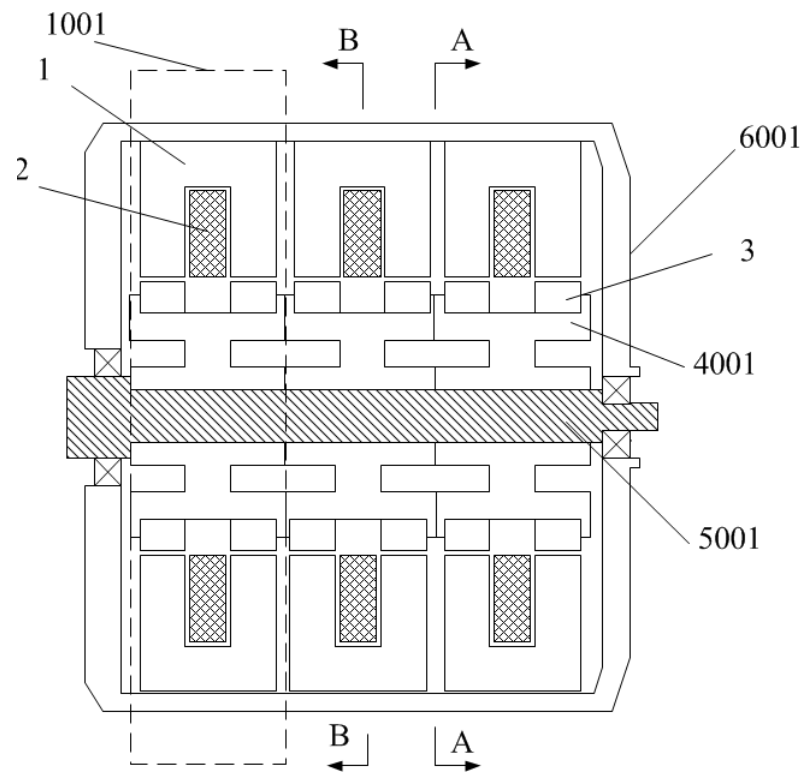
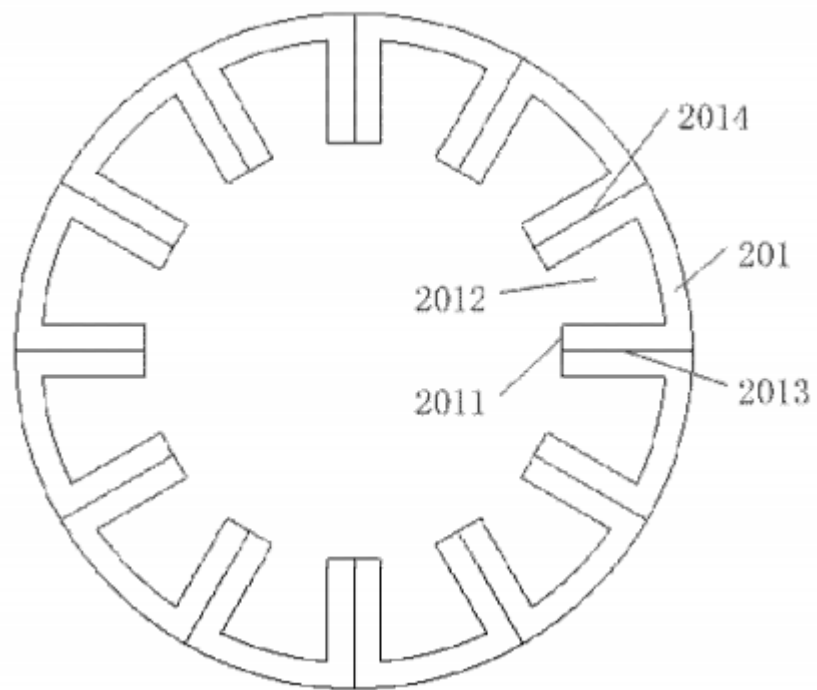
■ 机遇

- ✓ 安泰牵头的非晶合金产业联盟
- ✓ 政府资助

■ 挑战

- ✓ 高硅钢(6.5%Si)、取向硅钢
 - 硅钢的铁损 $1/3 \sim 1/4$
 - 高饱和磁密
- ✓ 大型化、新结构

四、机遇与挑战



ANSYS®



ANSYS
ONVERGENCE
CONFERENCES

2016

ANSYS中国技术大会
中国·上海

感谢聆听