

ENGINEERING  
TOMORROW

*Danfoss*

# 电机技术最新进展 及压缩机电机展望

丹佛斯（天津）有限公司

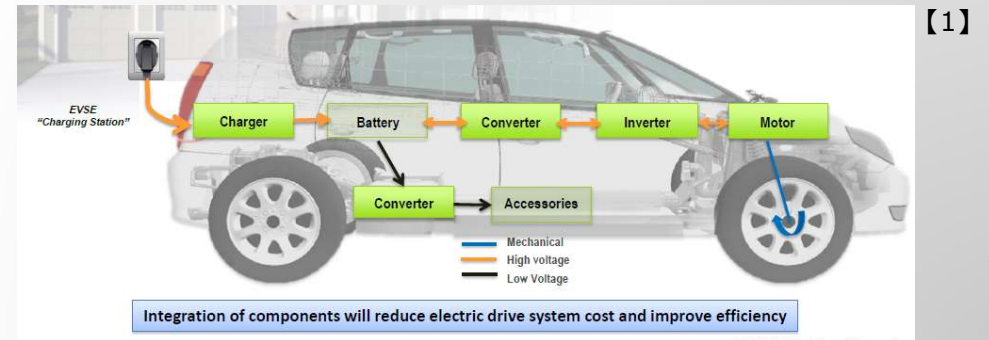
电机电子研发总工，姚丽



# 电机 - 古老而又年轻行业

- 120年的历史
- 主要理论：法拉第定理，楞次定律，麦克斯韦方程；
- 电机耗能占美国电网的67%【16】；
- 主要为单相感应电机，三相感应电机，直流电机，步进电机，直流无刷电机，开关磁阻电机等等，以及变频电机系统；
- 主要传统应用领域冶金，电力，石化，煤炭，矿山，建材，造纸，市政，水利，造船等；
- 最重要的，HVAC行业；

- 近年来，随着全球电气化，数字化的趋势，以及更严格的能耗要求；电机行业焕发了新活力；
- 新能源车行业作为电机及电力电子方向的主要驱动之一，各种新技术,新工艺更是层出不穷；



# 当前电机技术

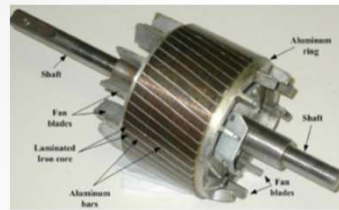
## 定速电机



感应电机【17】



感应电机(绕线式)【16】



感应电机(鼠笼式)【16】



感应电机 (铜转子)【18】



异步起永磁同步电机【17】

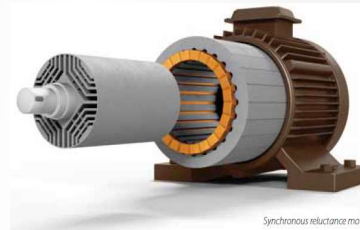
## 变频驱动电机



永磁同步电机 (内嵌式)【17】



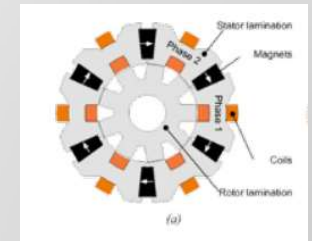
永磁同步电机 (表贴式)【17】



同步磁阻电机【17】



开关磁阻电机 (Photo Nidec)



开关磁链电机【19】

# 电机发展趋势



## 趋势

### 电机本体设计

- 高效;
- 低成本;
- 高功率密度;
- 高可靠性;
- 针对应用选择最合适的电机, 及相应的优化设计;

### 系统集成

- 和控制器及控制算法优化;
- 智能化: 自我诊断, 自我保护, 远程调控等;

Table 8. Current Status and 2025 Technical Targets for Power Electronics and Electric Motors

	On-road Status	2015 R&D Target	2025 R&D Target	2025 vs. On-road	2025 vs. 2015
Power Electronics					
Cost, \$/kW	10	5	2.7	-67%	-34%
Power density, kW/L	18	12	100	+455%	+733%
Electric Motors					
Cost, \$/kW	8	7	3.3	-59%	-53%
Power density, kW/L	9	5	50	+455%	+900%

【8】

# 电机研发趋势

## 新材料

- 电工钢
  - 低损耗电工钢(高硅含量>6%);
  - 软磁复合材料(SMC);
  - 硅晶材料;
- 永磁体
  - 无、少稀土材料永磁体;
  - 优化减少永磁体用量;
- 铜线
  - 超级铜线 (UCC);

## 电机设计、拓扑结构

- 新电机种类
  - 盘式电机、轴向电机;
  - 新型抗退磁永磁电机;
  - 其他新的拓扑结构电机;
- 少永磁体
  - 同步磁阻电机;
  - 永磁体辅助同步磁阻电机;
- 高速化
- 系统优化, 电力电子和控制, 电机高度集成

## 建模及仿真

- 材料的高级建模 - 材料热物理属性, 电工钢损耗, 永磁体特性等;
- 为了提高功率密度机性能的电机冷却研究;
- 多物理场仿真;

## 先进制造

- 发卡型绕组;
- 冲压工艺影响;
- 浸漆工艺;
- 电工钢生产;

# 新材料 - 低损耗电工钢

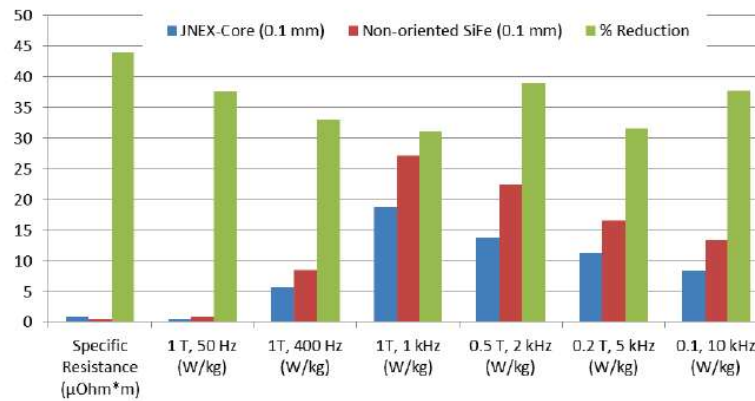
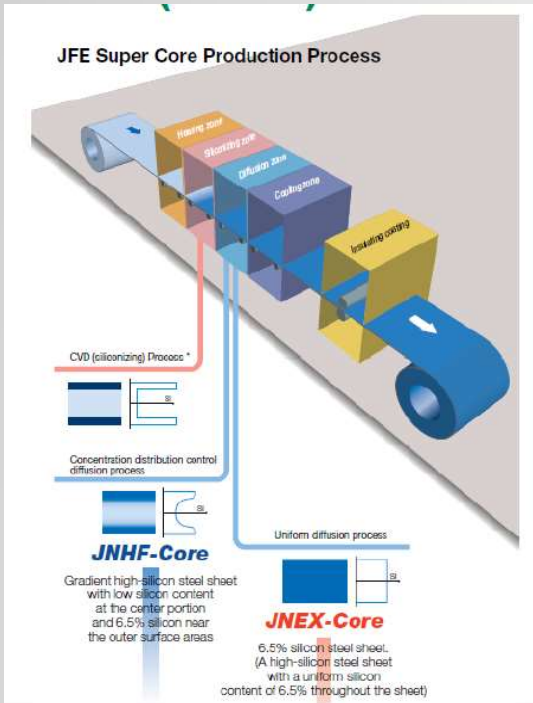


Figure 2: Comparison of electrical steel core losses: 6.5% Si vs 3% Si.

【4】

- 高硅含量电工钢;
- 高电阻率以减少涡流、磁滞损耗;
- 硅含量 6.5% vs. 传统电工钢2-3% 硅含量;
- 生产过程需要考虑高硅含量导致的过脆问题;
- 已商业化;
- 价格偏高, 制造过程由于CVD过程, 需消耗大量能量;
- 新的生产工艺正在研发;

# 新材料 - 超级铜线 (UCC)

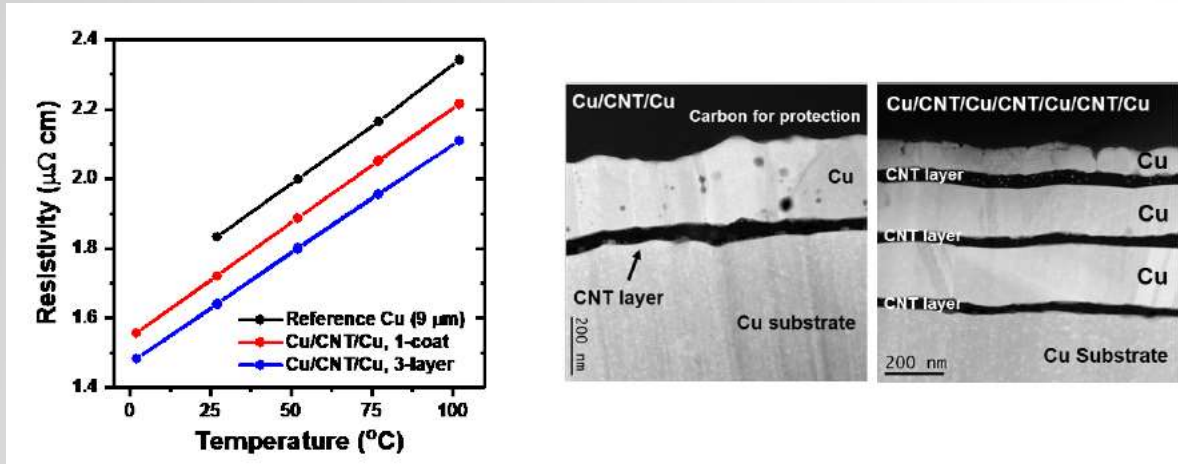


Table I.6.1 Comparison of the Properties of Single Walled CNTs versus Cu

	Cu	CNT
Electrical Conductivity	59.6 MS/m	100 MS/m
Thermal Conductivity	400 W/m-K	4000 W/m-K
Current Density	10 <sup>6</sup> A/cm <sup>2</sup>	10 <sup>8</sup> A/cm <sup>2</sup>

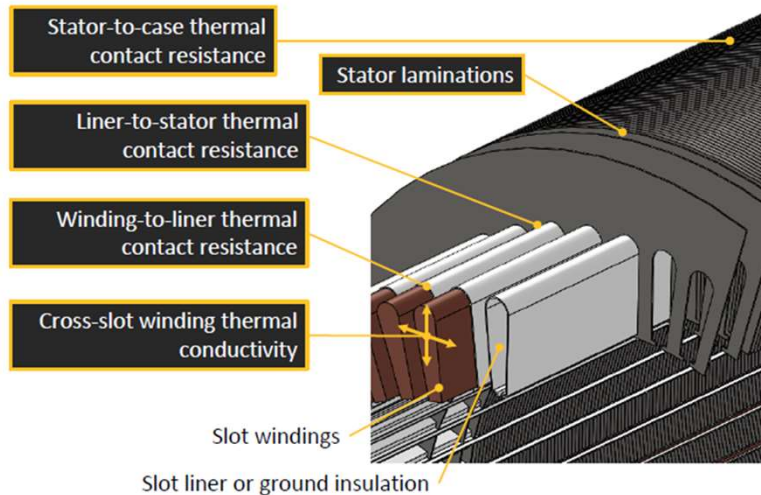
【5】

- 超级铜线使用碳纳米管技术 (CNT) ;
- 在铜材料上覆盖碳纳米管技术,
  - 提高电导率, 降低电阻率,
  - 提高热传导率;
  - 增加电流密度;
- 生产制造工艺存在挑战;
- 微观结构上碳纳米管的特性以及和CU材料的结合与宏观材料特性之间的关系仍待进一步的研究和理解;

# 建模及仿真 – 热管理

## Approach: Material Thermal Characterization

- Material and interface thermal resistance impact heat transfer



【3】

- 电机本体各材料之间热传递建模 – 接触热阻
  - 定子与壳体间;
  - 槽绝缘纸与定子之间;
  - 绕组与绝缘纸之间;
  - 槽内各铜线之间;
- 电机本体材料接触热阻 – 测量研究
  - 单片电工钢以及叠压成型之后

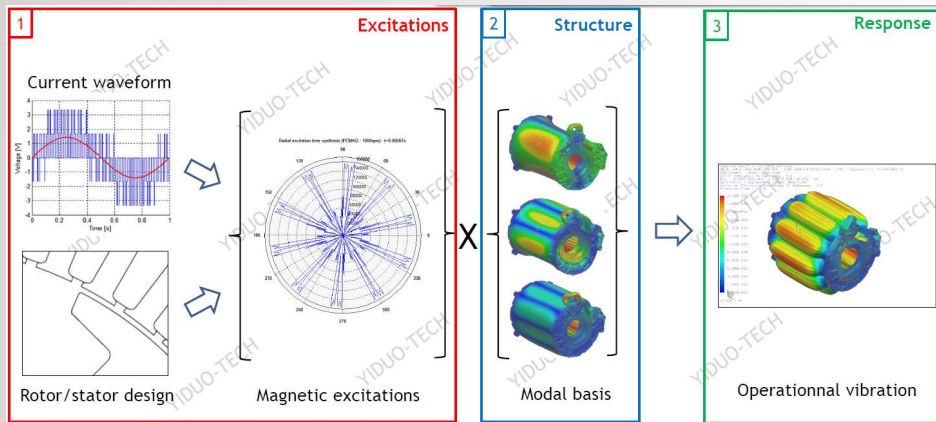
由此:

- 通过优化冷却设计来改善热传导, 从而提高电机功率密度;
- 绕线结构的优化及选择;
- 通过温度分析, 优化电机寿命;



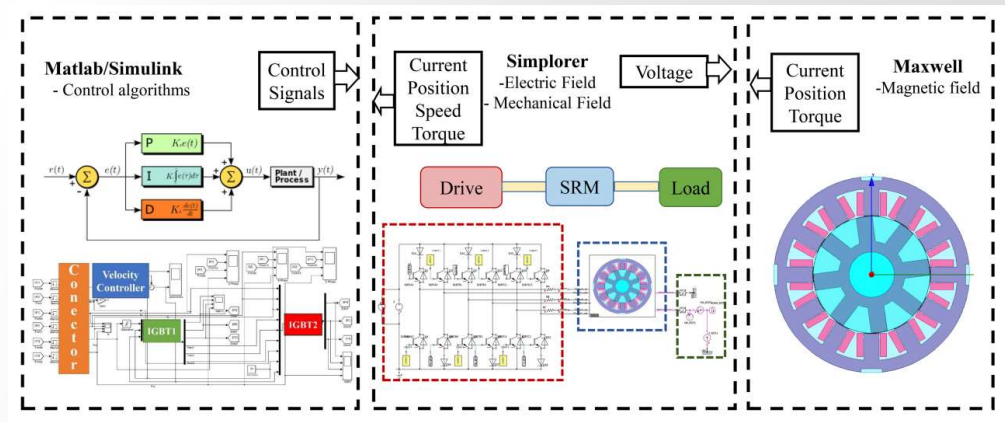
# 建模及仿真 - 多物理场仿真

- 电磁与引起振动噪音的谐波响应的联合仿真



【8】

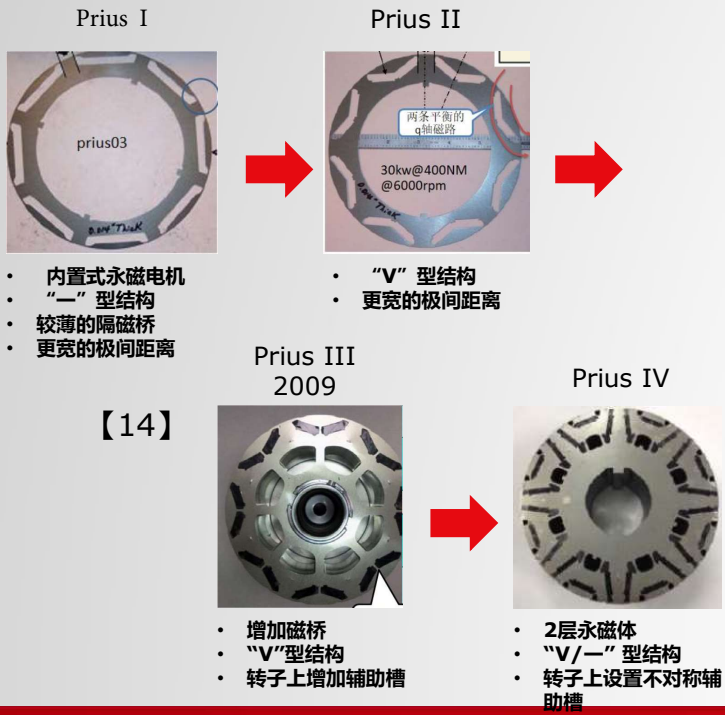
- 电机与控制算法的联合仿真



【9】

# 电机设计

## 永磁体辅助同步磁阻电机 (Prius)



电机转速高速化

降低永磁体用量  
提高电机功率密度  
逐步提高电机效率

## 普锐斯永磁电机基本数据:

	Prius I	Prius II	Prius III	Prius IV
上市时间	2002	2004	2010	2017
功率/kW	33	50	60	53
最大转速/rpm	6000	6000	13500	17000
最大转矩/N.m	350	400	207	163
电压/V	274	500	650	600
磁极结构	—	V	V	V/—
定子外径/mm	269	269	264	215
转子外径/mm	161.8	161.8	161.8	140.5
铁芯高度/mm	88	84	50.5	61
气隙/mm	0.8	0.73	0.73	*
永磁体重量/kg	*	1.768	1.232	1.0472
电机槽数/极数	48/8	48/8	48/8	48/8
功率密度	0.77	1.1	1.6	1.7
电机效率/%	92.5	94	96	97

# 电机设计

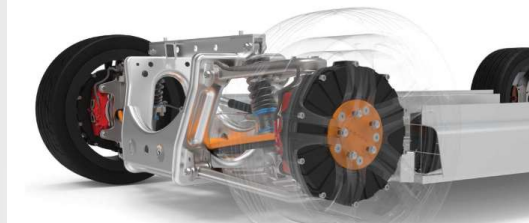
- Axial Flux Motors [10~11]



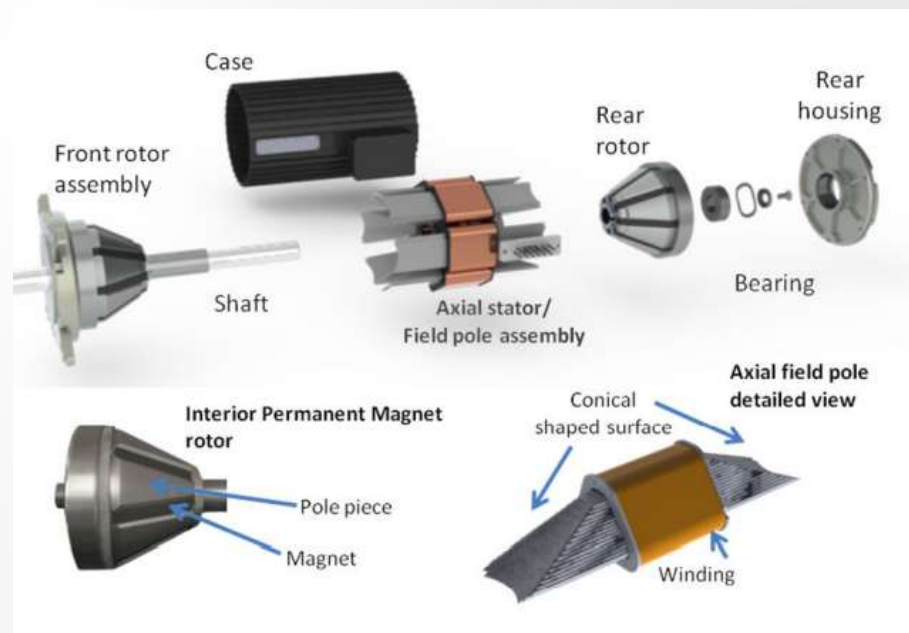
**YASA**



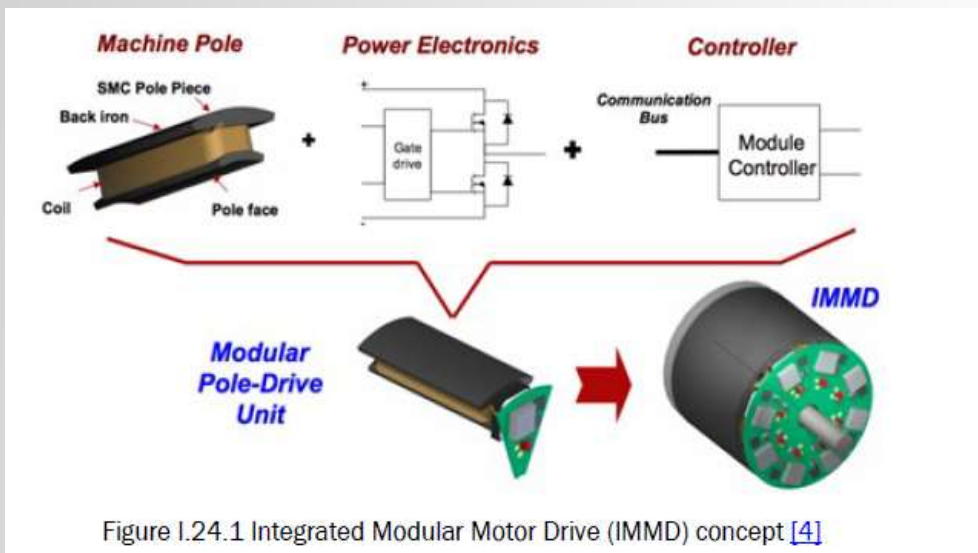
**MAGNAX**



- NovaTorque [20]



# 系统集成



## 优点

- 减少质量、体积;
- 变频器与电机之间无需电缆;
- 变频器与电机模块化;
- 适用于多相电机;

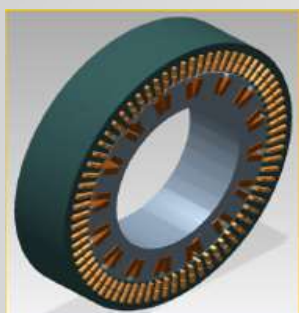
## 挑战

- 热管理: 由于电机的温度非常高 (180C) , 需要为驱动器设计专门的冷却系统振动
- 电磁干扰: 需要屏蔽电机电磁场对驱动器的干扰

【7】

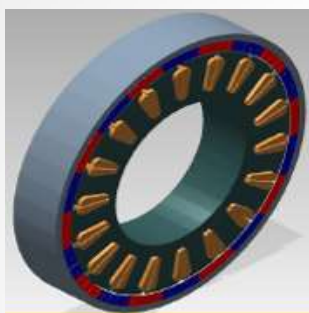
# 根据应用选择最适合的电机设计

## ▪ 无重稀土永磁高速驱动电机设计研究【5】



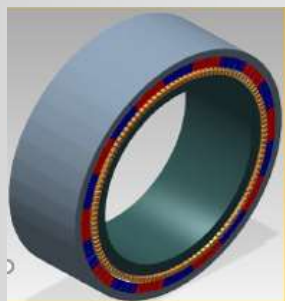
### 电机1 绕线转子同步电机

- 72槽, 16极;
- 分布式绕组;
- 无永磁体, 无退磁风险;
- 设计分数槽减少转矩脉动;



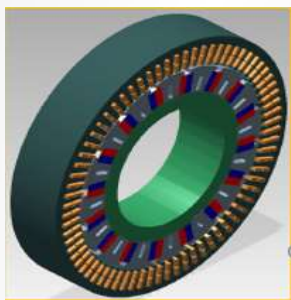
### 电机2 外转子表面式永磁电机

- 18槽, 20极;
- 集中式绕组;
- 外转子: 气隙半径极大化提高转矩密度;
- Halbach磁石;
- 高d轴电感, 宽弱磁区间;
- 低转矩脉动;



### 电机3 外转子无槽永磁电机

- 120槽, 20极;
- 分布式绕组;
- 外转子: 气隙半径极大化提高转矩密度;
- Halbach磁石;
- 无槽电机: 极低转矩脉动;



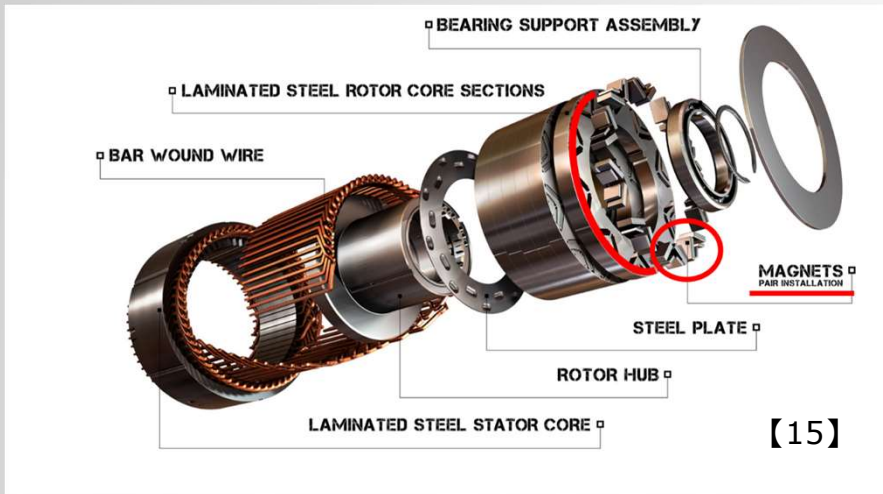
### 电机4 无Dy切向式永磁电机

- 72槽, 16极;
- 分布式绕组;
- 永磁体切向埋入, 减少退磁风险;
- 磁阻辅助提高转矩;

- 电机2功率密度最高, 但它的机械装配与轴承系统很复杂。
- 电机4 的功率密度略低于电机2, 它具有传统的轴承系统。但它的转子复杂, 20,000转/分运行时可能具有可靠性风险;
- 电机1 的功率密度尚可接受, 功率密度低于电机2, 4。它的效率尚可接受但偏低。主要优势在于低成本。
- 电机3的电感很低, 不适合于运行速度范围较宽的应用。

# 先进工艺

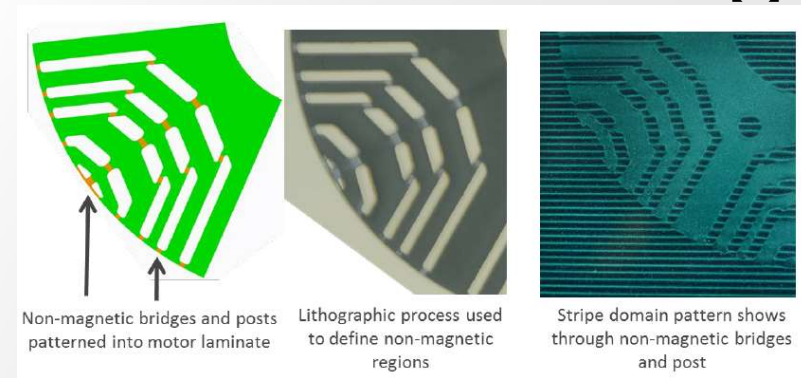
## ▪ 发卡电机



- 发卡电机，定子绕组使用预成型的方铜线，增加槽满率；

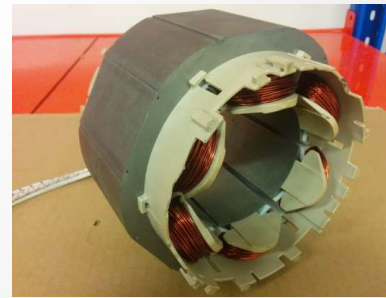
## ▪ 优化同步磁阻电机

【5】



- 通过工艺过程控制可相变的软磁材料，以优化电机设计，达成降低成本，减少或不使用稀土永磁材料；
- 这种设计既保持了最优的磁路设计，同时又保证了转子冲片的机械特性；

# 压缩机电机



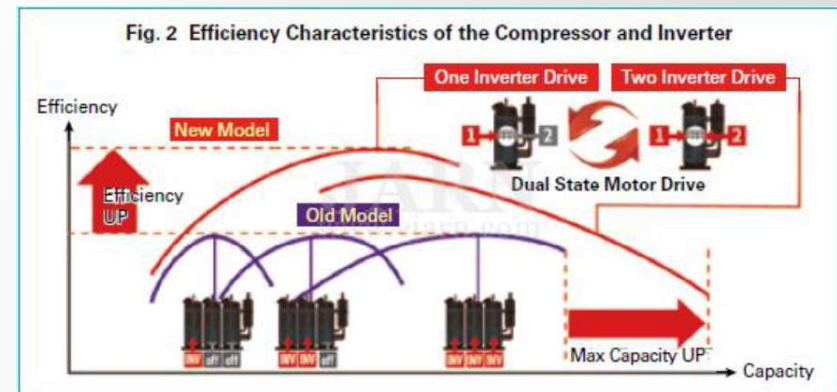
- 定速压缩机，绝大部分
  - 单相，三相鼠笼式感应电机；

- 变频电机
  - 大部分内嵌式永磁同步电机（方波、正弦波驱动）；
  - 分布式或者集中式绕组；

## 压缩机电机展望

- 高性能
  - 能源节约/碳中和;
  - 与压缩机及系统越来越高的性能要求匹配;
  - 电机冷却优化设计;
- 低成本
  - 原材料的上涨, 包括硅钢/永磁体/铜等;
  - 国内及全球市场日益增长的成本;
- 高功率密度
  - 利用日益先进的软件, 做更专业的设计和优化;
  - 在机械部件允许的条件下更高的转速;
- 变频应用
  - 电子器件及控制器的发展, 得益于低成本低损耗高冷却能力的日益普及;

- Another feature of Toshiba Carrier's compressor is the adoption of a driving system for an **open-connection motor** using a **dual-state inverter**, the world's first for air conditioning use.
- The newly developed triple-rotary compressor drives one compressor with two inverters, and achieves both large-capacity and high-efficiency operation by using dual-state motor drive technology that switches from one inverter drive to two inverter drive according to the load.
- This achieves higher efficiency over the entire operating range, compared with the case in which multiple small-capacity compressors were used in conventional VRF models. It is the world's first application of Classified as Business this technology to air conditioning compressors.



【21】





**ENGINEERING  
TOMORROW**

# References

1. *Overview of the DOE Advanced Power Electronics and Electric Motor R&D Program*, Susan Rogers, Steven Boyd, Vehicle Technologies Office, June 17<sup>th</sup> 2014.
2. Electrical and electronic technical team roadmap, vehicle technology office, 2017.
3. *Advanced Power Electronics and Electric Motor*, Susan Rogers, Vehicle Technology Program, 2011.
4. Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Motors Program, Burak Ozpineci, November 2014.
5. Electrification Annual progress report, vehicle technology office, 2019
6. *Electric Motor R&D*, John M. Miller, Oak Ridge National Laboratory, 2013 U.S. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program and Vehicle Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting;
7. *Electric motor thermal management*, PI: Kevin Bennion; National Renewable Energy Laboratory, June 19, 2018, DOE Vehicle Technologies Office 2018 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Project ID: ELT075.
8. Noise of electric power train from VibraTec
9. Simulation of Switched Reluctance Motor Drive System Based on Multi-Physics Modeling Method, IEEE, 2017
10. <https://spectrum.ieee.org/transportation/alternative-transportation/this-insideout-motor-for-evs-is-power-dense-and-finally-practical>

# References

11. <https://www.autocar.co.uk/car-news/technology/under-skin-why-hybrid-makers-love-biscuit-tin>
12. Electrification Annual progress report, vehicle technology office, 2018
13. Rotor Design of a LSSyRM with Respect to IM for Industrial Applications, IEEE, 2018
14. “电机产品技术前哨”公共号
15. Novel Manufacturing Technologies for High Power Induction and Permanent Magnet Electric Motors, GLENN J GRANT, DAVID CATALINI, KEN ROSS, PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY, BLAIR CARLSON, JOHN AGAPIOU, ROBERT SZYMANSKI, GENERAL MOTORS RESEARCH AND DEVELOPMENT, 2016 DOE VEHICLE TECHNOLOGIES PROGRAM ANNUAL MERIT REVIEW AND PEER EVALUATION MEETING, JUNE 9, 2016, WASHINGTON, DC.
16. Recent advances in electric machine design and operation, Jim Hendershot, IEEE Miami section energy systems research laboratory, March 22, 2013
17. Motor technologies for higher efficiency in applications, an overview of trends and applications. Danfoss drives. [www.Danfoss.com/drives](http://www.Danfoss.com/drives)
18. Premium efficiency motor selection and application guide, a handbook for industry, Department of Energy, U.S.A
19. QM Power, [www.qmpower.com](http://www.qmpower.com), [The Future of Motor Technology - QM Power Kansas City](#)
20. [Microsoft Word - NovaTorque Report\\_FINAL3 \(smud.org\)](#)
21. JARN compressor issue, march, 2020.