

IDAJ CAE
Solution
Conference

Your True Partner for CAE&CFD

ICSC  2015

基于JMAG Designer的调速永磁 同步电机的定子最优斜槽角度计算研究

腾普(常州)精机有限公司

张晃清 熊海芳

Nov. 24th, 2015

本文仅供学习交流，未经授权，谢绝转载和其他用途。

报告内容

- ◆ 报告目的
- ◆ 多截面2D模型介绍
- ◆ 多截面等效斜槽2D电磁计算
- ◆ 斜槽永磁电机3D电磁验算
- ◆ 定子最优扭斜角2D参数化计算
- ◆ 公司介绍

本文仅供学术交流，未经IDAJ Co., Ltd.许可，谢绝转载和其他用途。

报告目的

电机设计斜槽能有效地削弱齿谐波磁场所产生的谐波电动势，从而削弱这些谐波磁场所引起的附加转矩，而降低电磁振动噪音，因此它在各类电机中得到广泛应用。对于电机斜槽的计算，目前普遍采用的是三维有限元法，其最大缺点是计算量极其庞大，并且对计算机配置要求极高。为解决该问题，有文献提出了在二维有限元中采用多截面模型进行电机斜槽分析的方法。

本文利用多截面模型计算方法，借助电磁仿真软件JMAG Designer的参数化运算功能，研究了用多截面模型2D算法替代3D斜槽计算的可行性，然后再在JMAG Designer中对各扭斜角度分别进行参数化计算，最终得出最优的定子扭斜角，从而为带斜槽的永磁电机的结构优化找到一种快捷的计算途径。

多截面2D模型介绍

多截面模型中，整台斜槽电机被看做由若干台直槽电机串联构成，如图1所示。若不考虑电机的端部磁场，每台直槽电机中的磁场分布垂直于电机轴向，矢量磁位仅有轴向分量，那么可以采用2D有限元方法进行分析。这些直槽电机同槽导体电流相等，而整台斜槽电机的感应电势等于所有直槽电机的感应电势之和。

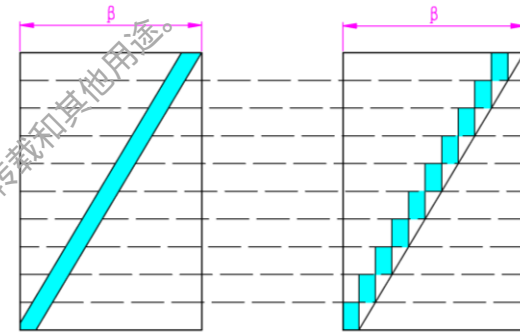


图1 多段直槽代替斜槽的等效模型

多截面模型中，若干台直槽电机串联等效整台斜槽电机的数学描述：

$$\begin{cases} \nabla \times (\nu \nabla \times A_z) + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = J_z \\ E = \frac{d\psi}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \nabla \times (\nu \nabla \times A_{zi}) + \sigma \frac{\partial A_{zi}}{\partial t} = J_{zi} \\ E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \frac{d\psi_i}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

多截面2D模型介绍

k次谐波磁场中, 通电导线受到的电磁力 F_k 和感应电势 E_k 为:

$$\left\{ \begin{aligned} F_k &= \int_{\alpha_k}^{\alpha_k + \beta_k} (B_{mk} \sin \theta) I \frac{L}{\beta_k} d\theta \\ &= \frac{2}{\beta_k} B_{mk} IL \sin(\alpha_k + \frac{\beta_k}{2}) \sin \frac{\beta_k}{2} \\ &= \frac{2}{k\beta} B_{mk} IL \sin(\alpha_k + \frac{k\beta}{2}) \sin \frac{k\beta}{2} \\ E_k &= \int_{\alpha_k}^{\alpha_k + \beta_k} (B_{mk} \sin \theta) v \frac{L}{\beta_k} d\theta \\ &= \frac{2}{\beta_k} B_{mk} Lv \sin(\alpha_k + \frac{\beta_k}{2}) \sin \frac{\beta_k}{2} \\ &= \frac{2}{k\beta} B_{mk} Lv \sin(\alpha_k + \frac{k\beta}{2}) \sin \frac{k\beta}{2} \end{aligned} \right.$$

第i段导线的斜槽角度 k_i 为:

$$k_i = \alpha + \frac{i-1}{n} \beta + \chi \quad (4)$$

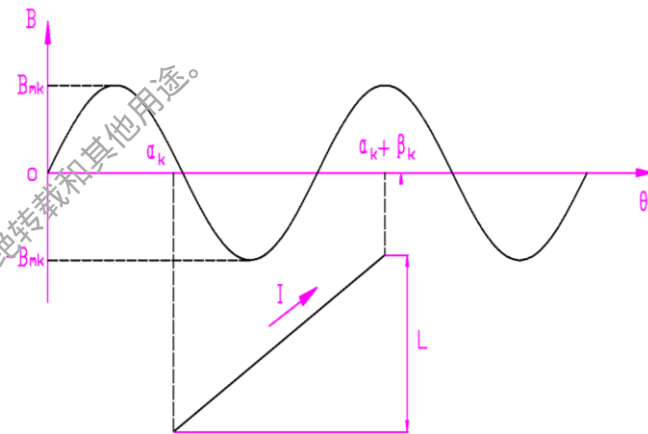


图2 谐波磁场中的通电导线

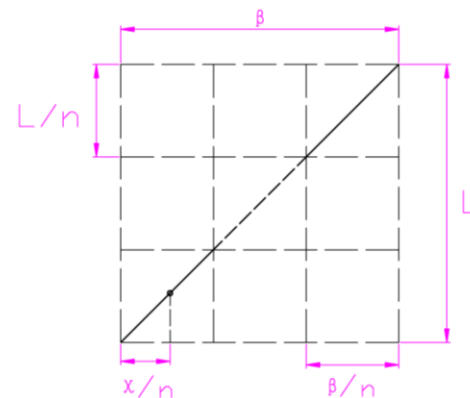


图3 截面位置的选取

多截面2D模型介绍

k次谐波磁场中, 当 β_k 不等于 2π 的整数倍时, 多台直槽电机串联等效计算整台斜槽电机的电磁力 F'_k 和感应电势 E'_k 为:

$$\left\{ \begin{aligned} F'_k &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^i F'_{ki} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^i B_{mk} IL \sin[(\alpha_k + (i-1) \frac{\beta_k}{n}) + \chi_k] \\ &= B_{mk} IL \frac{\sin[(\alpha_k + \frac{k\beta}{2}) + (k\chi - \frac{k\beta}{2n})] \sin \frac{k\beta}{2}}{n \sin \frac{k\beta}{2n}} \\ E'_k &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^i E'_{ki} \\ &= B_{mk} L v \frac{\sin[(\alpha_k + \frac{k\beta}{2}) + (k\chi - \frac{k\beta}{2n})] \sin \frac{k\beta}{2}}{n \sin \frac{k\beta}{2n}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

则 F_k (或 E_k)的相对误差为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{F_k} &= \frac{F'_k - F_k}{F_k} k_i \\ &= \frac{k\beta \sin[(\alpha_k + \frac{k\beta}{2}) + k(\chi - \frac{\beta}{2n})]}{2n \sin(\alpha_k + \frac{k\beta}{2}) \sin \frac{k\beta}{2n}} - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

当 χ 取 $\beta/2n$ 时, 截面位置取在每段导线中点, F_k 和 E_k 的计算精度与 α_k 无关, 上式简化为:

$$\varepsilon_{F_k} = \frac{F'_k - F_k}{F_k} = \left(\frac{\frac{k\beta}{2n}}{\sin \frac{k\beta}{2n}} - 1 \right) \times 100\% \quad (7)$$

多截面等效斜槽2D电磁计算

➤ JMAG二维计算模型

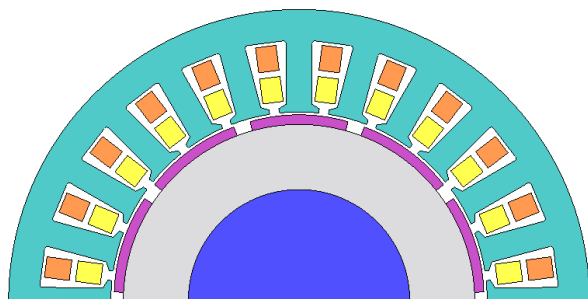


图4 直槽电机参数计算2D半模型

表1 24s_10p_11.7kW型PMSM的主要参数

参数项	参数值
绕组接法	Y
极数	10
工作频率 (Hz)	60
额定转速 (rpm)	720
额定功率 (kW)	11.7
定子铁芯牌号	B50A470
转子铁芯牌号	10#钢
定子槽数	24
定子内、外径 (mm)	136/210
转子内、外径 (mm)	80/134
定、转子叠高 (mm)	220

➤ 初始位置角参数化运算

先将直槽电机的初始位置角定义为“9° - Skew_angle”，假定此时扭斜角为6°，本文将初始位置角分为12等分进行参数化运算，因此这些位置角分别为3°、4°，……，13°，对这些初始位置角下所计算出的电磁转矩求均值，即可得到该扭斜角所对应的计算结果，如图6所示。

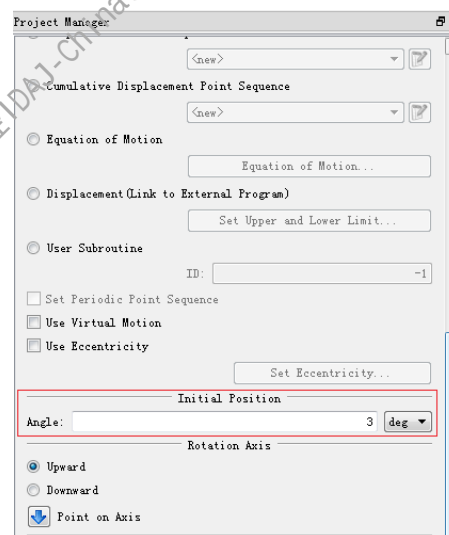


图5 a) JMAG转子初始位置角设置界面

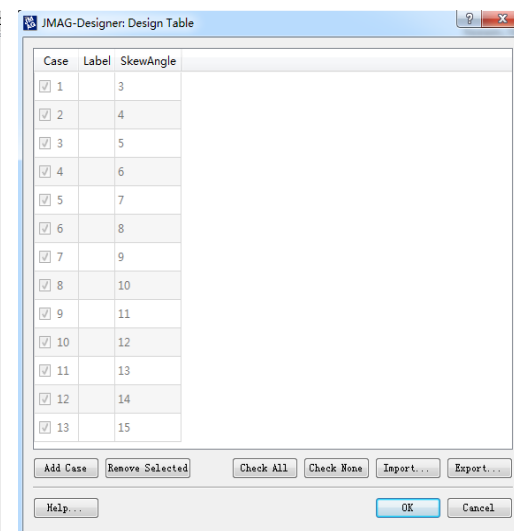


图5 b) JMAG转子初始位置角参数化计算设置界面

多截面等效斜槽2D电磁计算

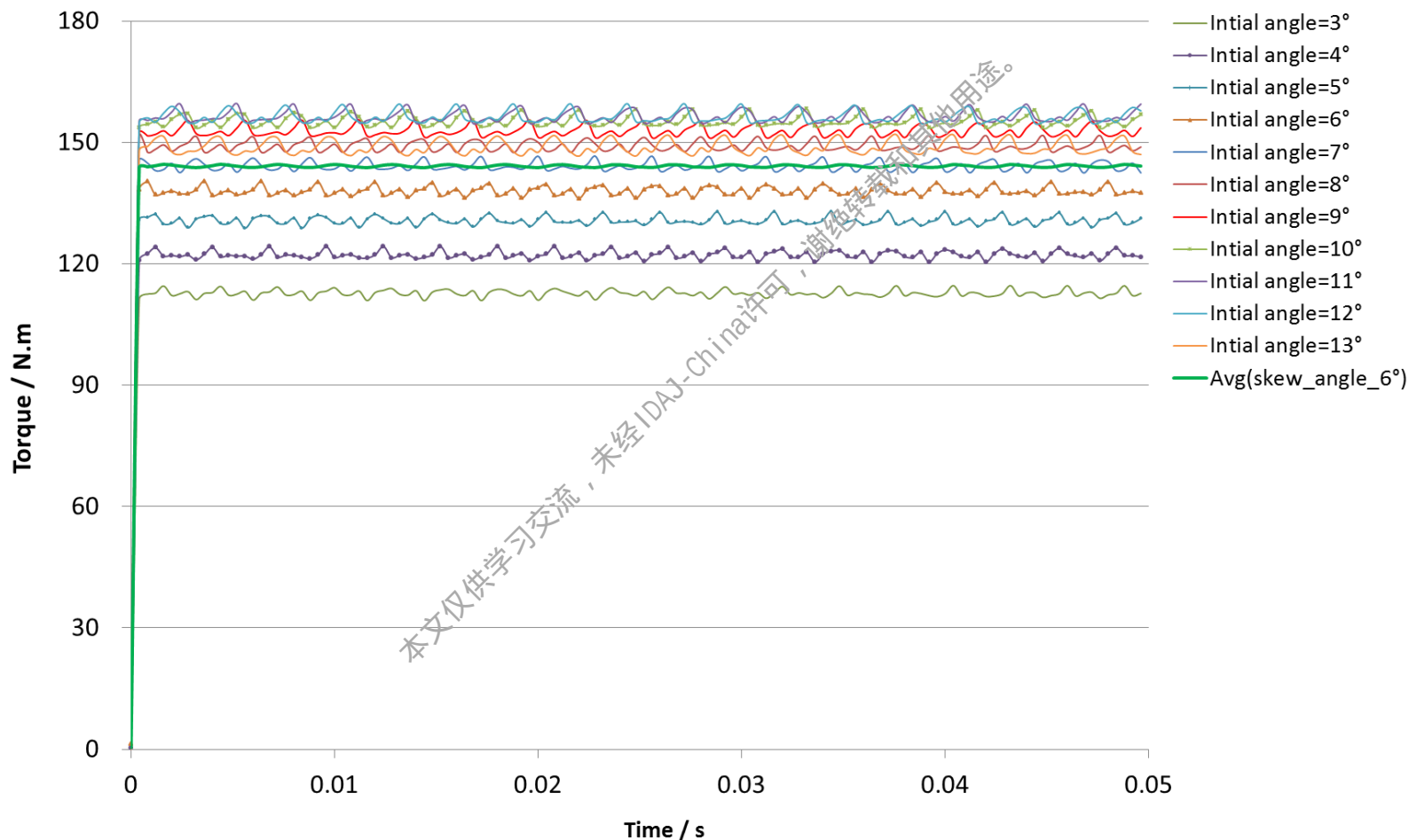


图6 各个初始位置角所对应的转矩曲线与扭斜角为6° 时的转矩曲线

斜槽永磁电机3D电磁验算

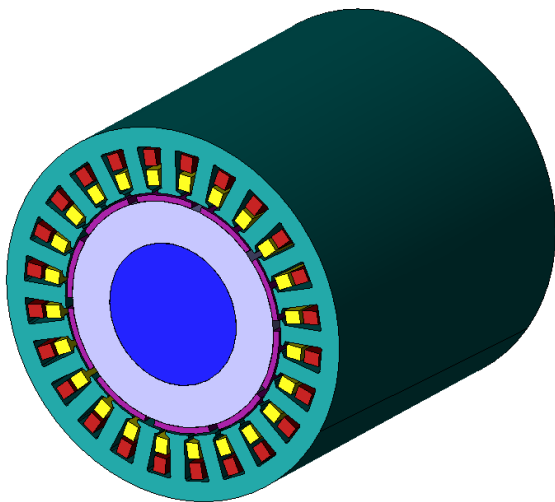


图7 斜槽角为6° 的电机3D全模型

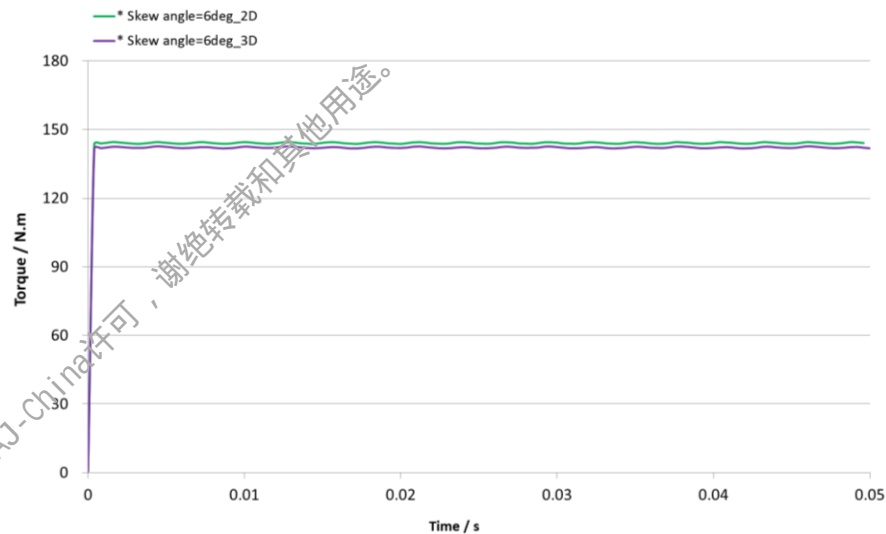


图8 定子扭斜角度为6° 时的2D与3D计算转矩曲线对比

表2 定子扭斜角度为6° 时的2D与3D计算对比

	3D斜槽计算	2D斜槽计算	2D & 3D计算 相差百分比
斜槽角度 (°)	6	6	—
电磁转矩均值 (N.m)	142.154	144.130	1.39%
电磁转矩脉动值 (N.m)	0.948	0.800	-15.68%
计算时间 (h)	24	0.72	33.3倍

定子最优扭斜角2D参数化计算

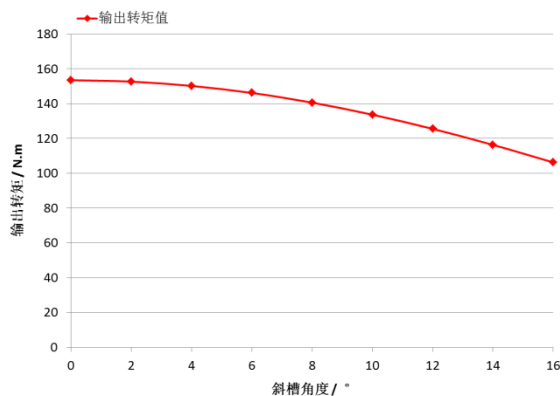


图9 输出转矩-斜槽角度关系图

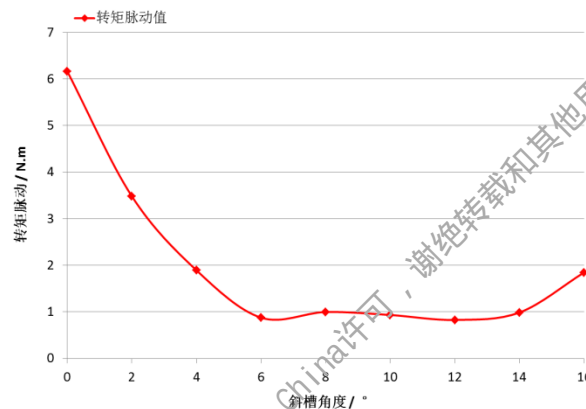


图10 转矩脉动-斜槽角度关系图

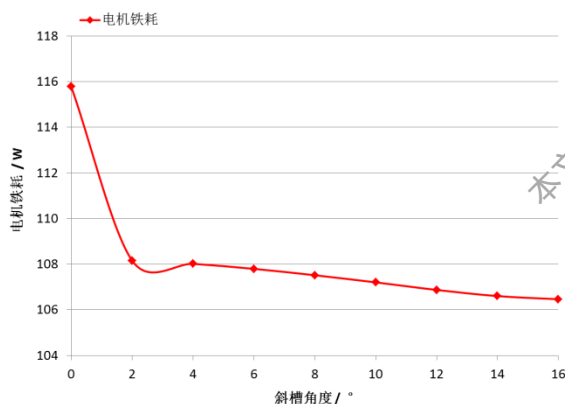


图11 电机铁耗-斜槽角度关系图

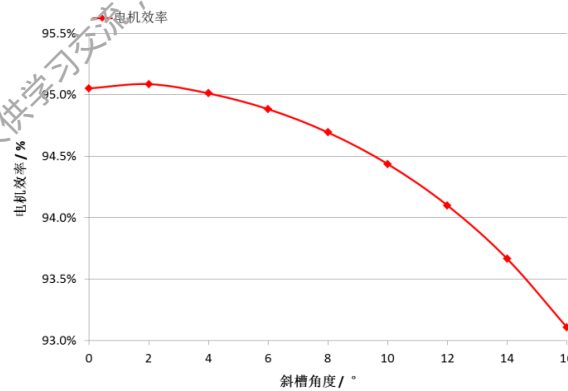


图12 电机效率-斜槽角度关系图

在扭斜角设计方案得出之前，是无法预测该电机的最优扭斜角度的，因此可以选取 0° ， 2° ， 4°， 16° 这些扭斜角度在JMAG中借助二维等效截面法进行参数化计算，并对这些扭斜角度的计算结果进行比较。其输出转矩、转矩脉动、电机铁耗、电机效率和扭斜角度的关系图分别如图9~图12所示。

综合上述结论，当定子扭斜角为 6° 时，其转矩脉动最小，其输出转矩和电机效率有所损失，但损失幅度都不大，因此最终取 6° 为该PMSM的最优扭斜角，

定子最优扭斜角2D参数化计算

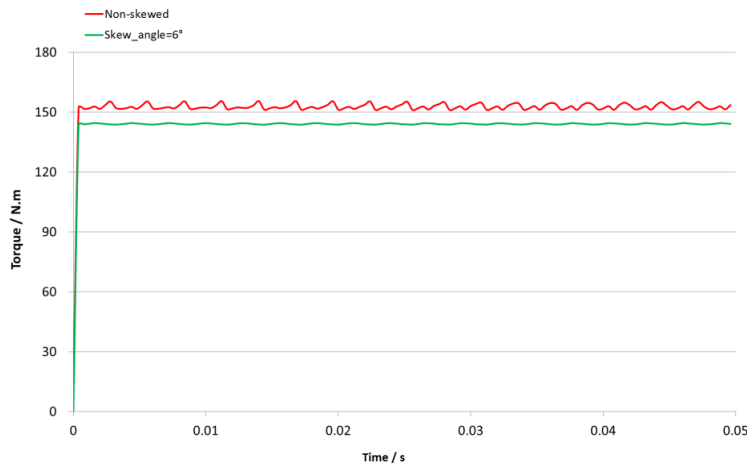


图13 扭斜角为 6° 的斜槽电机和直槽电机的电磁转矩脉动对比

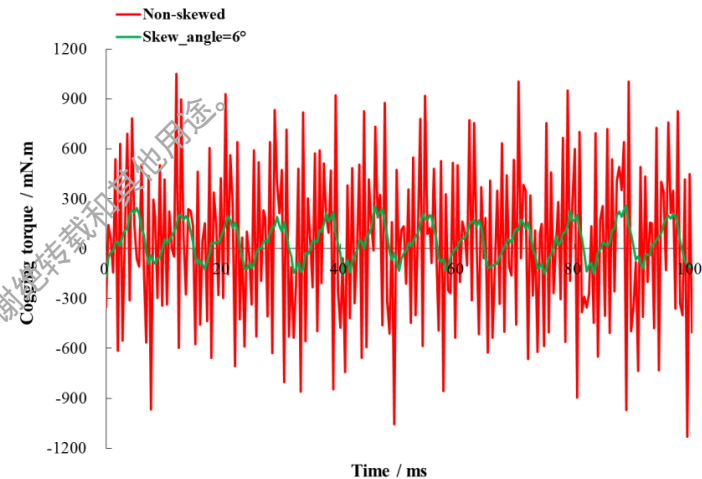
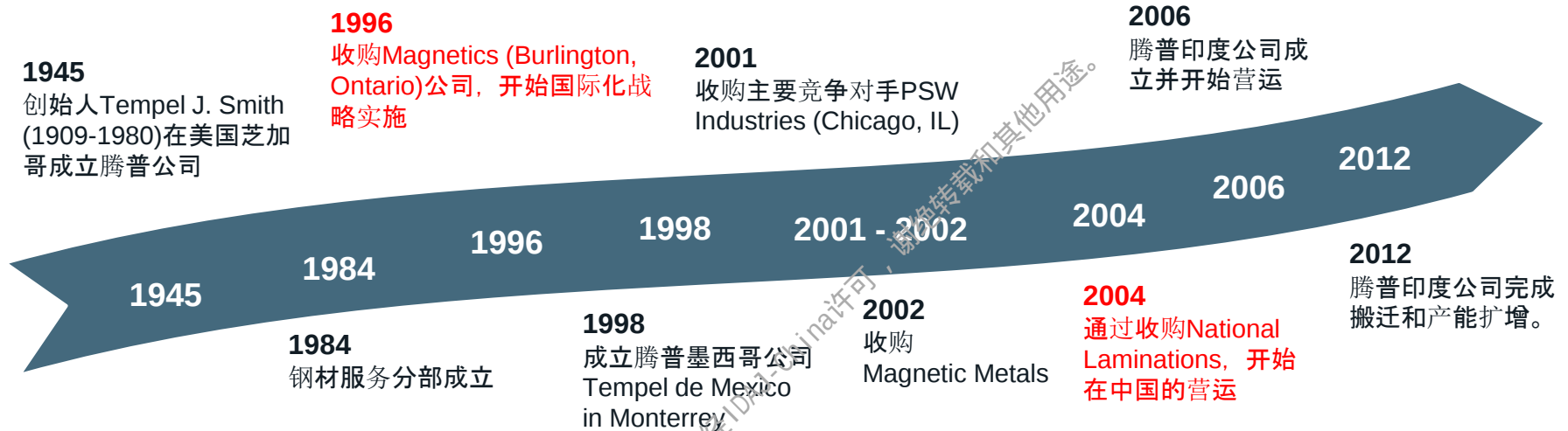


图14 扭斜角为 6° 的斜槽电机和直槽电机的齿槽转矩对比

表3直槽和最优斜槽电机的主要性能对比

参数类型	直槽电机	斜槽电机	前后对比
斜槽角度 ($^\circ$)	0	6	—
电机转速 (rpm)	720	720	—
输入电流 (A)	21.9772	21.977	—
输出转矩 (N.m)	153.481	146.161	-4.769%
输出功率 (kW)	11.571	11.019	-4.769%
输出转矩脉动值(N.m)	6.1631	0.8751	-85.801%
齿槽转矩 (mN.m)	1051.600	260.884	-75.192%
电机铁耗 (W)	115.7766	107.7961	-6.893%
电机铜耗 (W)	270.9984	270.9984	—
风摩损耗 (W)	215.5	215.5	—
额定效率	95.053%	94.883%	-0.170%

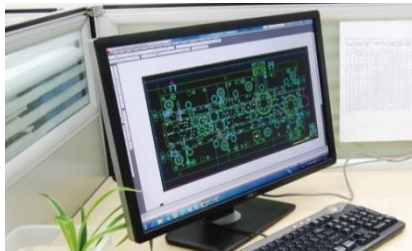
腾普发展史



自1996起, 腾普集团开始国际化发展战略

- 1996: 收购BCL Magnetics – Ontario, Canada (Acquired)
- 1998: 腾普墨西哥成立– Monterrey, Mexico (Greenfield plant)
- 2001: 收购PSW– Chicago, IL (Acquired)
- 2002: 收购Magnetic Metals – U.S., Canada and Mexico (Acquired)
- 2004: 收购National Laminations Company – U.S., Mexico, and China (Acquired)
- 2006: 腾普印度成立– Chennai, India (Greenfield plant)

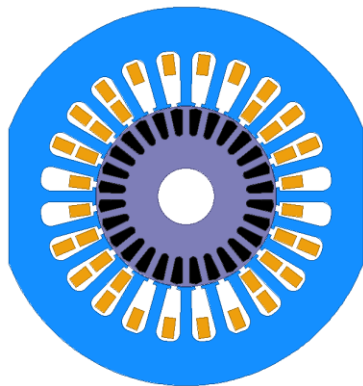
腾普常州简介



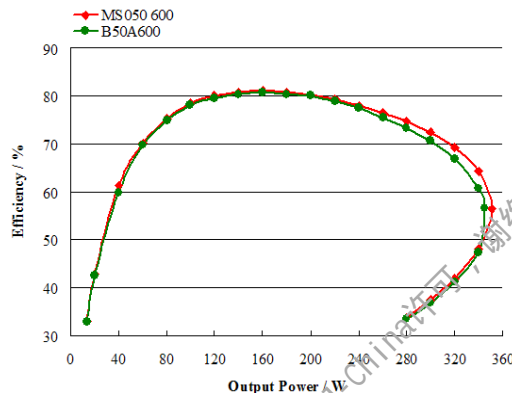
- | | | |
|--------|--------|----------|
| 1 公司全貌 | 5 冲压 | 9 铁芯焊接 |
| 2 模具设计 | 6 退火 | 10 材料实验室 |
| 3 模具加工 | 7 转子压铸 | |
| 4 模具维护 | 8 铁芯装配 | |

工程解决方案

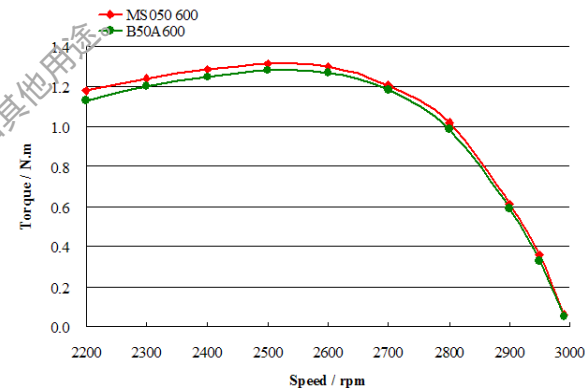
客户案例A—铁芯材料半工艺钢替换同牌号全工艺钢后的电机性能差异对比



电机计算模型

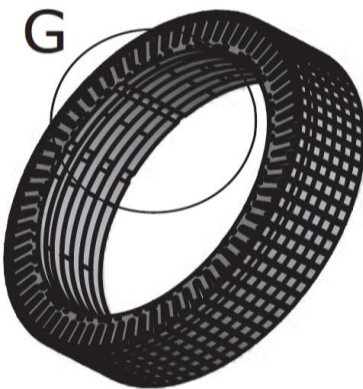


半工艺、全工艺钢的功率-效率曲线对比

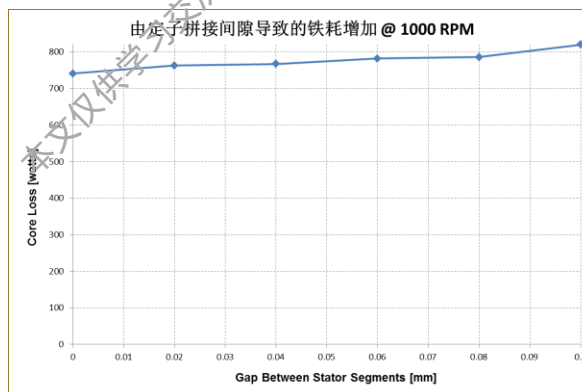


半工艺、全工艺钢的功率-转矩曲线对比

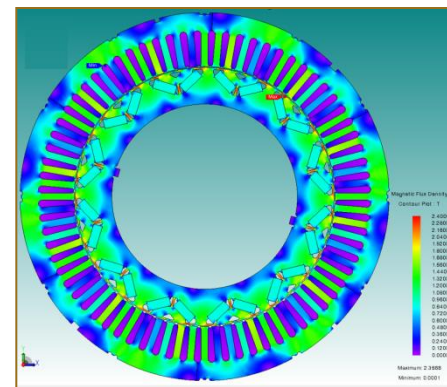
客户案例B—汽车驱动电机铁芯扇形片拼接间隙对电机铁耗的影响分析



拼块定子铁芯模型



铁耗与拼接间隙的关系



电机磁密云图 @ 1000rpm

谢谢大家！

本文仅供学习交流，未经IDAJ China许可，谢绝转载和其他用途。