

# Design Method of High Efficiency Direct Drive Motor

Xibin Guo, Qing Zhao, Jing Chen, Fude Wang, Zhaojing Zhang

Beijing Research Institute of Precise Electromechanicals and Controls, Beijing  
Email: guoxibin666@sina.com

Received: May 12<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 31<sup>st</sup>, 2018; published: Jun. 7<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

According to the characteristics of the propulsion, the external load characteristics of the high efficiency motor are analyzed, and the overall design of the propulsion motor is carried out with efficiency as the starting point. From the angle of iron loss, copper loss and harmonic loss, the optimization design of the motor is carried out to reduce the electromagnetic loss, and from the angle of bearing friction loss and rotor friction loss, the optimal design of motor loss reduction is carried out.

## Keywords

Motor, High Efficiency, Propulsion

---

# 高效直驱推进电机设计方法

郭喜彬, 赵青, 陈靛, 王福德, 张兆晶

北京精密机电控制设备研究所, 北京  
Email: guoxibin666@sina.com

收稿日期: 2018年5月12日; 录用日期: 2018年5月31日; 发布日期: 2018年6月7日

---

## 摘要

针对推进特点, 分析高效推进电机的外负载特性; 以效率为出发点, 对推进电机进行总体设计; 从铁损、铜损、谐波损耗角度出发, 对电机进行降低电磁损耗的优化设计; 从轴承摩擦损耗、转子风摩损耗角度出发, 对电机进行降低机械损耗的优化设计。

## 关键词

电机, 高效, 推进

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

永磁电机具有低转速、大扭矩、高效率的特性, 适合用于船舶推进电机[1] [2]。当前主要用来作为船舶推进器的是螺旋桨。螺旋桨主要工作特点是低转速、大扭矩、高效率, 这与永磁电机工作特性很吻合, 所以将它们组合一起是一种最佳搭配。

目前, 世界著名电力推进厂家 ABB 大力发展永磁电机电力推进。目前投入实际使用的单台电力推进功率已高达 5 MW。德国 Brunvoll 和 Voith 公司从 2002 年开始研制永磁电机侧推, 装机功率从 30 kW 到 1650 kW, 推力从 5 kN 到 250 kN。我国已有实船安装 Voith 公司的永磁电机侧推。

本文以中、小功率船舶电力推进系统为应用背景, 对 200 kW 级高效直驱推进电机展开设计, 提出的思路具有很强的通用性。

## 2. 负载特性分析

船舶电力推进系统, 为了提高续航能力, 对推进电机及其控制驱动系统的效率要求极为苛刻[3], 特别是直驱电机, 要求在较宽的转速范围内同时保持较高的效率。

根据船舶推进螺旋桨的负载特性参数关系式

$$\text{推力系数 } K'_p = P / \left[ \rho D^2 (v_p^2 + n^2 D^2) \right] \quad (1)$$

$$\text{转矩系数 } K'_M = M / \left[ \rho D^3 (v_p^2 + n^2 D^2) \right] \quad (2)$$

式中,  $n$  为螺旋桨转速, 单位为 r/s;

$v_p$  为螺旋桨的进速, 单位为 m/s;

$v_s$  为船舶的速度, 单位为 m/s;

$\omega$  为伴流系数;

$D$  为螺旋桨直径, 单位为 m;

$P$  为螺旋桨的推力, 单位为 N;

$M$  为螺旋桨的转矩, 单位为 N·m;

$\rho$  为海水的密度, 单位为  $\text{kg/m}^3$ , 通常取  $1025 \text{ kg/m}^3$ 。

由式(1)~(2), 知船舶的推进速度与推力、转矩均成正比关系。而对于直驱推进电机而言, 螺旋桨的转速与电机的转速相同, 螺旋桨的转矩与电机的转矩呈正比关系, 因此, 推进电机的负载外特性关系可表达为

$$T \propto n^2 \quad (3)$$

式中,  $T$  为电机转矩, 单位为 N·m;

$n$  为电机转速, 单位为 r/min。

即电机的速度越高, 电机的转矩也越大, 又

$$P_M = Tn/9.55 \quad (4)$$

式中,  $P_M$ 为电机输出功率, 单位为 W。

那么, 电机的输出功率

$$P_M \propto n^3 \propto T^2 \quad (5)$$

负载特性曲线与电机本身固有机械特性曲线关系如图 1 所示。

如图 1 所示, 为满足推进系统负载特性式(5)所示的需求, 推进电机的最大工作速度应不大于转折速度  $n_b$ , 这时负载特性曲线只能位于电机的恒转矩区以内。

### 3. 总体设计

如表 1 所示, 为高效直驱推进电机与传统推进装置的对比。

200 kW 级高效直驱推进电机的设计输入指标要求如表 2 所示。

根据表 1 所示技术要求, 推进电机的电磁设计按电机最大转速 60 rpm、最大功率 200 kW 进行电磁设计, 并能满足电机在较宽的转速范围内具有较高的效率值, 电机过载倍数按  $\geq 1.2$  倍设计。

推进电机为高效率电机, 为提高电机功率因数及效率, 电机极槽配合采用分数槽、绕组采用双层叠

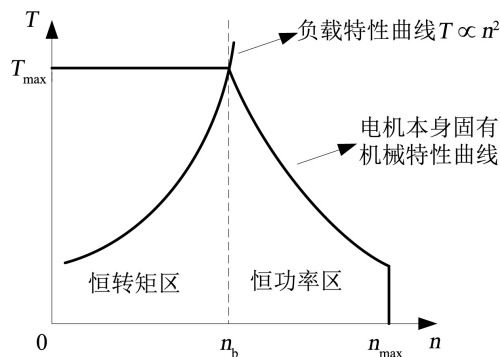


Figure 1. Relation diagram of motor characteristics of mechanical and load

图 1. 电机机械特性与负载特性关系图

Table 1. Comparison between high efficiency direct drive motor and traditional propulsion plant  
表 1. 高效直驱推进电机与传统推进装置的对比

项目	传统推进装置	高效推进电机系统装置
结构工艺	齿轮机械传动, 机构重、加工精度高	仅电磁感应, 无机械传动、重量轻、加工简单
重量	重量大	仅为原机械传动一半
能耗	电机机械加工耗能大、使用能耗大、调节控制慢(控制机械)、费能	电机加工相对机械加工少、使用能耗小、控制方便、灵活(控制电力)节能
造价	造价高	造价节省
环保	油润滑耗油多, 易泄漏污染	水润滑无污染
噪音	机械传动噪音大	电力推进仅水流声
维护成本	成本高, 需对机械电器、管路进行维护	成本低, 仅有电气设备需维护
效率	由于机械传动损失能量, 效率较低	不需要机械传动, 效率高

绕组短距分布方式[4]; 接线采用 Y 接; 针对电压较低, 采取多并联支路数的方式; 为较少谐波损耗和谐波振动, 电机采用斜极的方式。

为了验证设计的正确性, 以及指标的满足情况, 特利用 ansoft 电磁分析软件, 建立推进电机仿真模型。其整体电磁设计三维结构示意图如图 2 所示。

由表 3 可以看出, 经过仿真分析, 高效直驱推进电机满足指标要求。接下来主要介绍仿真过程中采取的优化设计方法。

**Table 2.** Index requirements

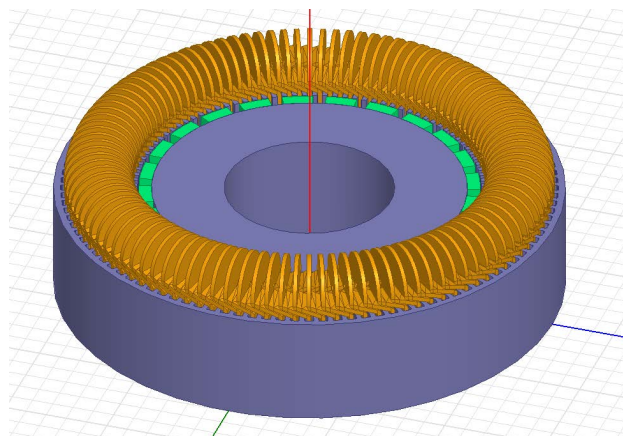
**表 2.** 指标要求

名称	参数
电机外形	1600 × 1600 × 1000 mm
负载 1	转速 36 rpm 功率 46.2 kW 效率 ≥ 92%
负载 2	转速 41 rpm 功率 63.8 kW 效率 ≥ 93%
负载 3	转速 60 rpm 转矩 200 kW 效率 ≥ 95%
工作制	S1
供电电压 $u$	400VDC
过载系数	1.2
冷却方式	水冷
控制方式	SVPWM

**Table 3.** Index requirements

**表 3.** 指标要求

转速(rpm)	36.00	41.00	60.00
频率(Hz)	7.20	8.20	12.00
定子电流(A)	179.70	217.70	465.00
输出功率(kW)	46.20	63.80	200.00
效率	96.98%	96.97%	96.33%
满足指标情况	满足效率 ≥ 92%	满足效率 ≥ 92%	满足效率 ≥ 92%



**Figure 2.** Three dimensional electromagnetic simulation diagram of motor

**图 2.** 电机三维电磁仿真图

## 4. 高效优化设计

效率是电力直驱推进电机的重要考核指标。电机损耗的主要来源可分为电磁损耗和机械损耗[5]，为了使电机能够达到高效率，需要从电磁设计和机械设计两个方面入手，开展高效优化设计。

### 1) 低电磁损耗优化设计

电机的电磁损耗主要有铁耗、铜耗和谐波损耗，其中铁耗包括磁滞损耗和涡流损耗，铜耗是绕组的电流发热损耗，谐波损耗是由于电机高次谐波引起的损耗。

电机的铁耗主要与电机硅钢片参数相关，为了降低电机的铁耗，电机硅钢片的选用至关重要，常用的规格为 50W400、50W310 铁损系数的硅钢片，而该电机则选用铁损更低的 50W290 硅钢片，通过对采用 50W310、50W290 两种硅钢片进行铁耗电磁计算对比计算分析可以得到，采用 50W290 硅钢片比采用 50W310 硅钢片时电机的铁耗减少了约 0.4 kW，有效提高了电机的效率。所采用 50W290 磁力曲线如图 3 所示。

在该推进电机中，电机的转速较低，电气频率较小，铁心损耗较小。而电机的转矩较大，且电压较低，因此电流较大，铜耗成为电机最主要的损耗。为减少铜耗，需尽可能地提高电机槽满率，增大铜线截面积，减少铜线电阻，在绕组电流大小不变的情况下降低绕组电密，从而减少绕组铜耗。因此，在电磁设计时，考虑槽数太少会引起谐波损耗增大，槽数太多会引起铜面积的减小，所以在综合考虑电磁设计的各项参数后，最后选择对 144 槽 32 极和 108 槽 24 极 2 种电磁方案进行对比分析。

如表 4 所示，经分析计算，可以得到当采用 144 槽 32 极时，电机的铜耗约为 8.5 kW；当采用 108 槽 24 极时，电机的铜耗约为 6.2 kW。因此，采用 108 槽 24 极时的电磁铜耗较少，有利于提高电机效率的提升。

另外，电机的绕组跨距如图 4 所示。可看出，该分数槽短距分布绕组的端部跨距很短，可有效减少电机绕组端部过长产生的额外铜损，提高电机效率。

电机的谐波损耗主要源于电机高次谐波引起的损耗，要降低电磁谐波损耗就需要减少高次谐波的产生。由于电机的高次谐波最主要是齿谐波[6]，为了降低和避免齿谐波的产生，电机转子通过采用永磁体

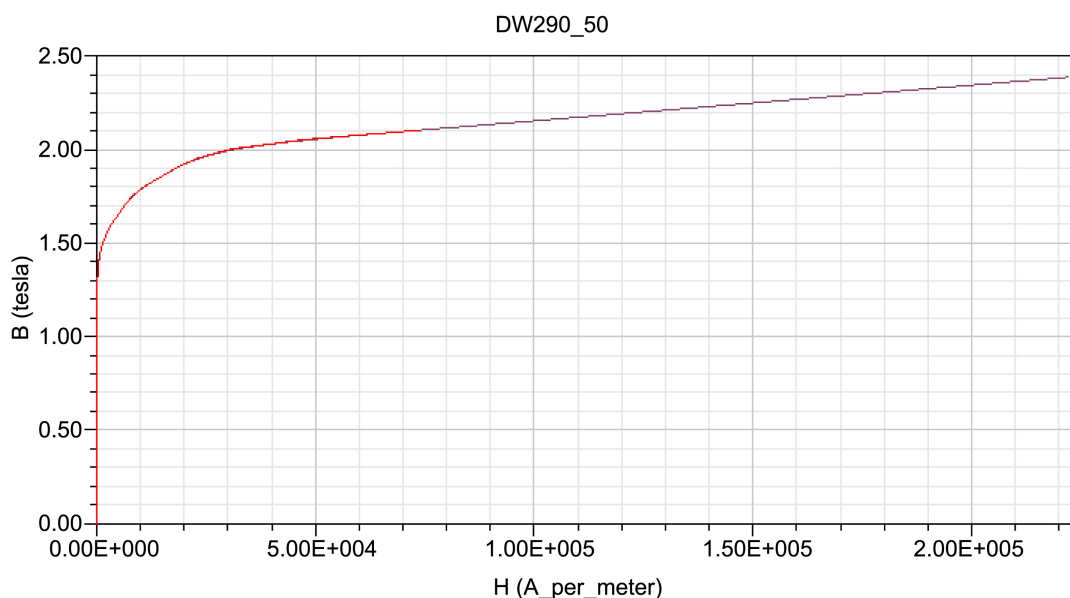
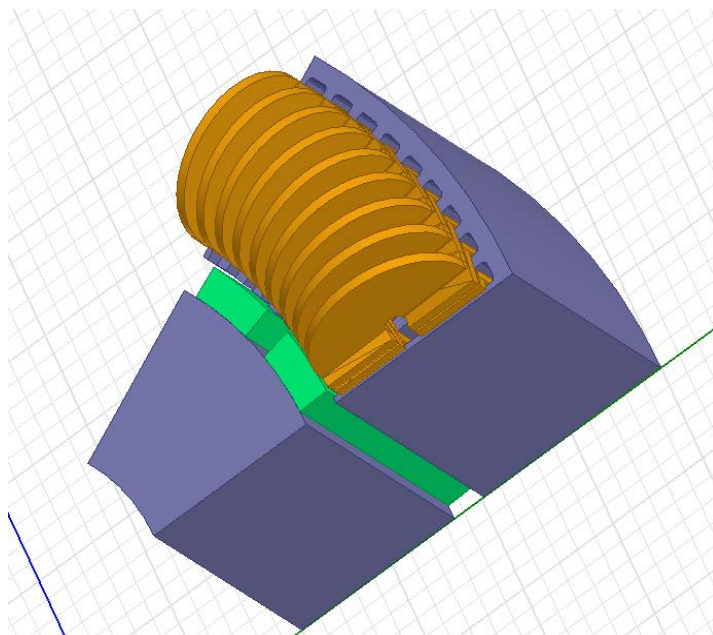


Figure 3. Magnetization curve of 50W290

图 3. 50W290 磁化曲线图



**Figure 4.** Span diagram of motor winding  
**图 4.** 电机绕组跨距图

**Table 4.** Copper loss comparison of two kinds of motor when the speed is 60 rpm  
**表 4.** 转速 60 rpm 时两种电机铜损对比

项目	32 极 144 槽	24 极 108 槽
铜损	8.5 kW	6.2 kW

斜极布置，可以有效地减弱高次齿谐波损耗，通过对永磁体不斜极和斜极进行谐波损耗对比计算分析，其结果如表 5 所示。

当永磁体不斜极时谐波损耗为 0.5 kW，当永磁体采用斜极时谐波损耗为 0.2 kW，因此，采用永磁体斜极布置可以有效提高电机效率(磁密分布见图 5)。

## 2) 低机械损耗优化设计

电机的机械损耗主要包括轴承摩擦损耗、转子风摩擦损耗等。

考虑减振的因素，电机采用滑动轴承。如图 6 所示。滑动轴承摩擦损耗来源于轴承摩擦副的动静之间的摩擦损耗[7]，为了减低轴承摩擦损耗，电机的轴承采用具有一定自润滑功能的复合绝缘材料油润滑滑动轴承，该轴承与一般的滑动轴承相比，其具有更好的自润滑功能，能更高效地形成油膜，降低摩擦力；而且在加工工艺上提高轴颈加工粗糙度要求，轴颈部位采用精细加工工艺，进一步减少转子的机械摩擦损耗；因此，电机运行时该新型轴承的摩擦损耗是一般滑动轴承摩擦损耗的一半左右，可以大大减少轴承带来的摩擦损耗。

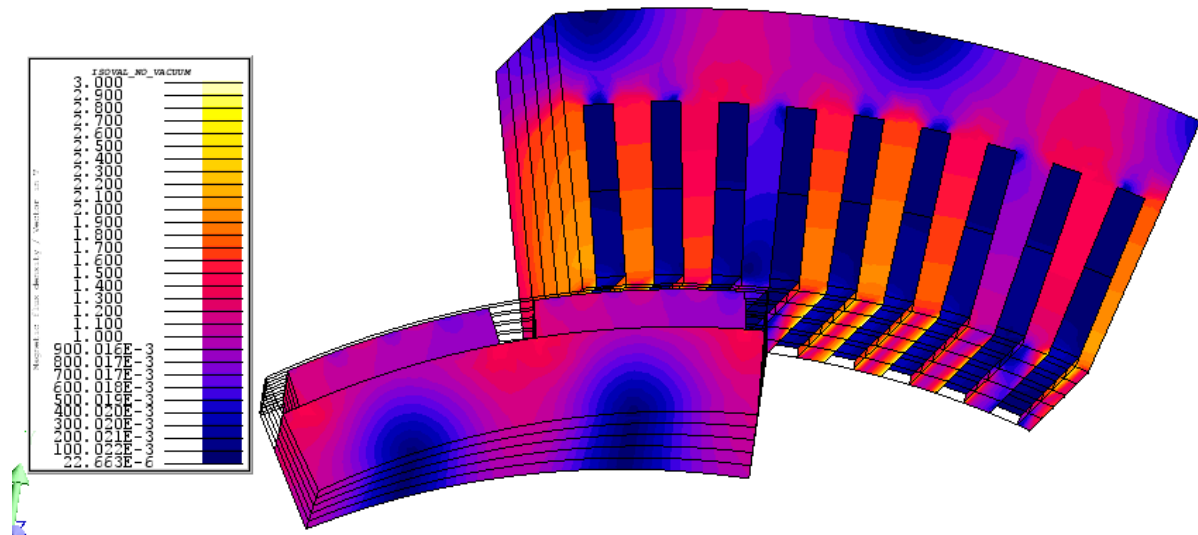
电机的风摩擦损耗是电机损耗的重要方面，为了避免风扇带来的损耗，电机转子采用无风扇结构设计，同时定子铁心采用无通风槽结构设计，结构示意图如图 7 所示。

## 5. 小结

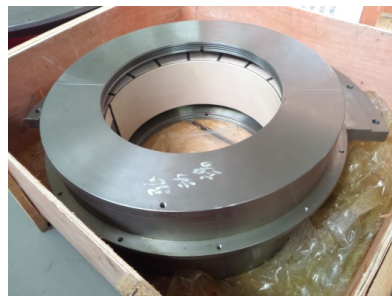
本文提出了一种面向中、小功率船舶的 200 kW 级电力推进高效直驱电机的设计方法。以负载特性为出发点，以高效为落脚点，从铁损、铜损、谐波损耗、轴承摩擦损耗、转子风摩擦损耗等角度出发，对电

**Table 5.** Comparison of harmonic loss of pole and non oblique pole motor  
**表 5.** 斜极与不斜极电机谐波损耗对比

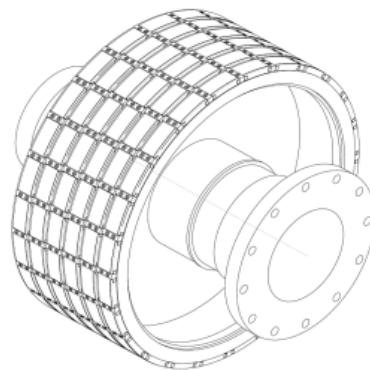
项目	不斜极	斜极
谐波损耗	0.5 kW	0.2 kW



**Figure 5.** Magnetic density distribution diagram of motor  
**图 5.** 电机磁密分布图



**Figure 6.** Sliding bearing  
**图 6.** 滑动轴承



**Figure 7.** Diagram of rotor structure  
**图 7.** 转子结构图

机进行降损优化设计。

### 参考文献

- [1] 高海波, 高孝洪, 陈辉. 船舶电力推进几种典型方式的比较[J]. 航海技术, 2006(6): 54-57.
- [2] 郭焱. 船舶电力推进双三相永磁同步电机驱动控制研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海海事大学, 2006.
- [3] 刘梦觉, 耿鹏, 梁树甜. 螺旋桨负载的仿真数据管理技术分析[J]. 船电技术, 2016, 5(36): 8-11.
- [4] 陈益广, 潘玉玲, 贺鑫. 永磁同步电机分数槽集中绕组磁动势[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 30-36.
- [5] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [6] 许实章. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [7] 曾海景. 考虑圆度误差对滑动轴承转子系统摩擦功率损耗的影响[D]: [硕士学位论文]. 柳州: 广西工学院, 2012.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)