

# 不同导体层数发卡电机的设计与仿真

## Design and Simulation of Hairpin Winding Motors on Different Conductor Layers

马永志

(北京国家新能源汽车技术创新中心有限公司, 北京 100176)

Ma Yongzhi

Beijing National New Energy Automotive Technology Innovation Center Co., Ltd, Beijing 100176

**摘要** 本文主要设计了两种不同层数的发卡绕组电机并仿真计算了发卡绕组的损耗。随着电机高速化的趋势, 发卡绕组的交流铜耗表现得尤其明显。交流铜耗将影响电机效率和温升。本文主要介绍了交流损耗的基本原理, 设计了4层、8层发卡绕组电机。通过电磁仿真软件 Jmag 仿真计算扁线电机铜耗电机效率 MAP 等。通过分析对比得知, 4层绕组电机的绕组损耗较大, 而且层与层之间的损耗差别很大, 这将导致温升过高烧毁电机, 最后选择了工艺成本较高的8层绕组方案。

**关键词** 扁线绕组; 绕组损耗; 仿真分析; 对比

**Abstract** This work aims to design two different layers of hairpin winding and simulate the loss of the hairpin winding. Because of the high speed of motors, the AC loss of hairpin winding is especially obvious, which affects the efficiency and temperature rise of motors. In this paper, the basic principle of AC loss is introduced, and two different layers winding with 4-layer and 8-layer are designed. Through the simulation analysis with JMAG software, the AC loss of hairpin winding and efficiency MAP was simulated. Through contrastive analysis, it was found that the winding loss of 4-layer winding motor is much larger, and the loss difference between layers is very big, which will cause the temperature rise to too high and damage the motor. Finally, the 8-layer winding motor scheme is chosen.

**Key words:** hairpin winding; winding loss; simulation analysis; comparison

新能源汽车作为一种节能和环保的交通方工具, 越来越受到广大消费者的认可。随着用户对更强动力性、更长续航里程的追求, 对作为电动车“心脏”的驱动电机有着越来越高的要求。为了达到电机更高性能和更宽高效率区间, 扁线电机逐渐被开发和应用起来。

相对于圆线电机, 扁线电机有如下优势: (1) 槽满率高, 绕组端部短, 直流电阻小, 故铜耗小, 功率密度大, 效率高; (2) 扁线导体间的接触面积较大, 利于散热降低温升, 提供功率密度; (3) 扁线绕组更适合直接油冷, 直接油冷更有利于提高散热能力, 提高功率密度延长寿命。但扁线电机也有其自身劣势: (1) 在较高转速下, 扁线绕组的交流电

阻增大, 使得绕组交流损耗增大, 且扁线导体间的损耗差异较大, 个别导体过高的损耗会烧毁绕组; (2) 扁线绕组的成型和嵌线工艺比较复杂, 需要精确的模具和工艺设备。导体层数越多, 工艺越复杂, 成本越高。

目前行业内扁线导体层数逐渐从4层增加到6层, 8层甚至更多。随着扁线导体层数的增多, 通过理论公式计算扁线绕组损耗已达不到精度要求。只有通过精确的仿真计算绕组损耗, 获得电机效率 MAP, 新能源整车的性能才能得到精确的计算和仿真。同一电机模型不同扁线导体层数的绕组损耗差别多少, 选择几层导体更合适, 显得尤为重要。

# 1 绕组交流损耗原理

对于多股线并绕的圆线绕组损耗，只需考虑它的直流铜耗，即： $P_{cu}=I^2 \cdot R \cdot 3$ 。由于扁线在高频下的特性，扁线铜耗需要考虑它的交流损耗。交流损耗由集肤效应和临近效应引起的。

当交变电流流过导体时，导体周围产生的交变磁场在导体中产生感应电流，使得导体中的电流分布不均匀，趋近于外表面，这种现象称为集肤效应，也称趋肤效应<sup>[1]</sup>。集肤效应深度有如下公式：

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi u_0 u_c f}} \quad (1)$$

$\delta$  为集肤深度， $\rho$  为导体电阻率， $u_0$  为真空磁导率， $u_c$  为导体相对磁导率， $f$  为频率， $d$  为导体直径。

集肤效应可以用下图形象表示：

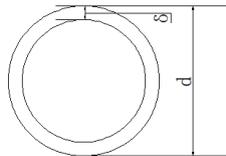


图1 集肤效应示意图

临近效应为两个相邻近的导体同时流过交变电流，每个导体不仅存在于自身的电磁场，也存在于相邻导体产生的电磁场中。当邻近的导体通入相同方向交流电流时，电流会集中到导体的最远侧；当邻近的导体通入相反方向交流电流时，电流会集中到两导体的邻近侧<sup>[2]</sup>，以上两种情况都会导致导体的有效面积减小，电阻增加。

由于电机绕组的交流损耗不仅与导体的尺寸有关，还与槽型尺寸、导体所在的位置、电流谐波频率等很多因素有关，因此很难用解析的方法准确计算。

# 2 扁线绕组设计及仿真

基于一款纯电动车的电机参数如下，

表 1. 电机参数

参数	值
额定功率 (kW)	80
额定力矩 (Nm)	150
直流电压(V)	400
最大电流(A)	450
额定转速 rpm)	5100
最大转速(rpm)	12000
最大效率 (%)	≥96
峰值力矩 (Nm)	220
峰值功率 (kW)	160

电机模型如下，永磁同步电机，定子 48 槽，转子 8 极，V 一磁钢布置形式，定子槽为矩形。

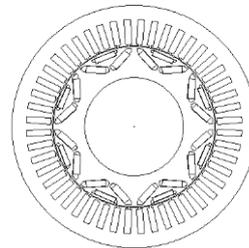


图2 电机模型

设计扁线绕组两种方案：4 层、8 层，即 4 层绕组方案为每个定子槽内有 4 个相同尺寸的导体，8 层绕组方案同理。三相绕组的槽内分布如下图，红色导体表示 U 相，黄色导体表示 V 相，蓝色导体表示 W 相。

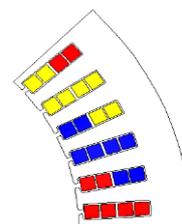


图3 4层绕组分布

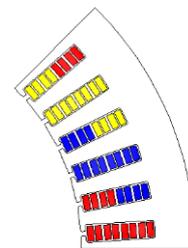


图4 8层绕组分布

### 3 交流损耗仿真分析

目前，市场上针对电机的仿真软件很多，有 Ansoft、JMAG、Flux 等。其中，JMAG 软件是日本 JSOL 公司研发的一款针对电磁场研究分析的软件，主要应用于各种电机的仿真设计与电磁设备的磁场分析，与同类型软件相比，具有良好的工作界面、庞大的材料属性库、精确且高速的分析计算以及开放的接口界面等优势<sup>[3]</sup>。

应用电磁仿真软件 JMAG，进行电机电磁仿真计算。最精确的仿真是建立真实的电机三维模型进行分析计算，但三维仿真需要很高的电脑配置和较长的仿真时间，这对于时间紧迫的项目来说，往往不大实用<sup>[4]</sup>。本文在二维仿真的基础上，考虑了绕组端部损耗，也能实现较准确的精度。

为节省仿真时间且可以得到同样的仿真精度，采用 1/8 模型。

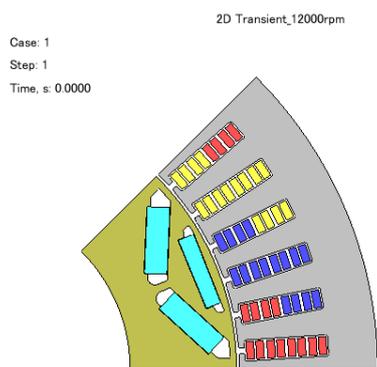


图 5 1 / 8 模型

为了对比不同导体层的损耗，依次标示从槽顶到槽底的导体为 1、2、3、.....，如下图所示。

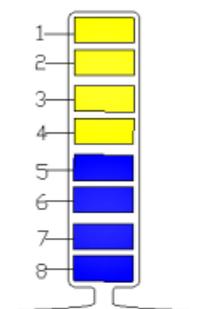


图 6 不同导体层的标号

电机模型的网格剖分如下图所示，气隙周围网格的放大图如下：

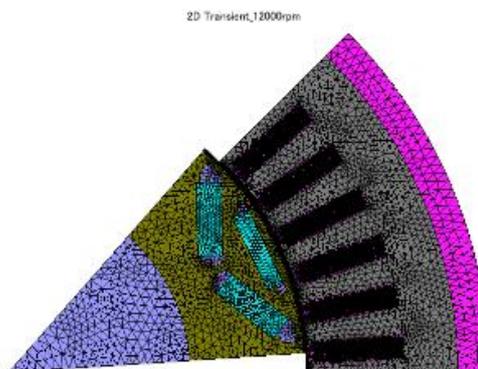


图 7 网格剖分

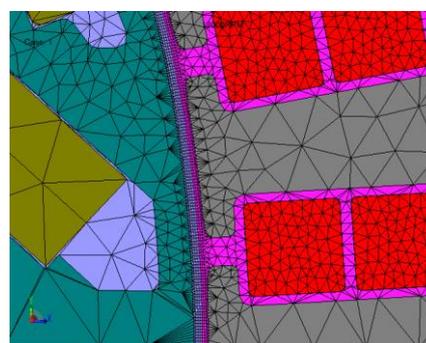


图 8 气隙周围网格剖分

电机采用星型连接，电路图连接如下：

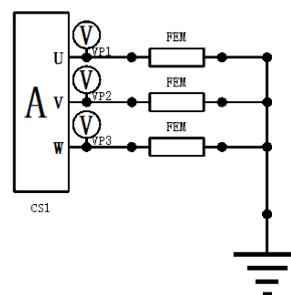


图 9 电路图

最高转速 12000rpm 下的绕组损耗云图如下：

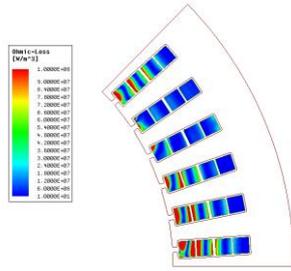


图 10 4 层绕组损耗云图

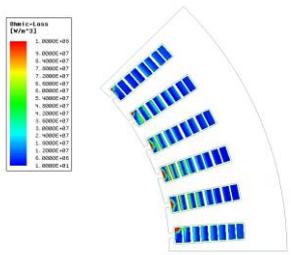


图 11 8 层绕组损耗云图

从图中可以看到槽内导体的损耗分布不均，靠近气隙的损耗最大，因为气隙处的磁密最大。随着距离气隙的逐渐增大，损耗逐渐降低。

最高转速 12000rpm 下每相绕组的每层导体的损耗整理如下：

表 2. 4 层绕组导体损耗

Layer	Loss		
	U	V	W
1	143.6	142.9	143.7
2	526.2	547.5	536.0
3	1202.8	1263.5	1257.3
4	2762.8	2728.5	2723.7

表 3. 8 层绕组导体损耗

Layer	Loss		
	U	V	W
1	64.9	65.9	66
2	72.8	73.7	73.7
3	90.5	91.4	91.1
4	118	118.9	118.2
5	150.6	152.2	151.5
6	192.5	194.5	192.8
7	268.8	271.4	267.4
8	543.8	547	537.5

可见，4 层绕组的损耗比 8 层绕组大。对于 UVW 三相，每相在每层的导体损耗很接近，说明绕组分相布置均匀、合理。对每相绕组来说，随着层号的增大，导体损耗成倍数逐渐增大，即：随着与气隙距离逐渐减小，损耗逐渐增大。其中，4 层绕组的第 4 层导体损耗过大，会造成过温甚至有烧毁绕组的危险。

通过仿真与整理，不同转速下 4 层绕组和 8 层绕组的铜耗对比如下：



图 12 铜耗对比

可见，在 0~2400rpm 转速范围内，4 层绕组的铜耗较小，在转速  $\geq 2400$ rpm 后，4 层绕组的铜耗超过了 8 层绕组，而且随着转速的升高，铜耗差距越来越大。

#### 4 电机效率 MAP

通过全转速的仿真分别得到 4 层绕组、8 层绕组电机效率 MAP 图如下：

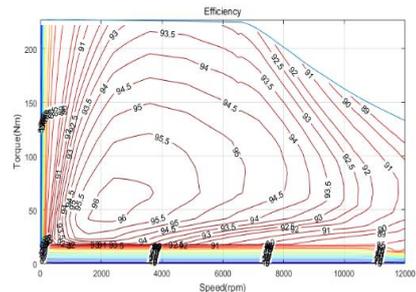


图 13 4 层绕组效率 MAP

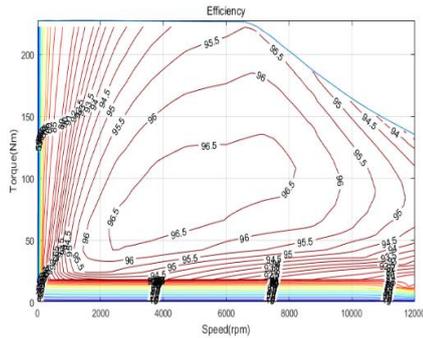


图 14 8 层绕组效率 MAP

通过对比可知，8 层绕组电机的最大效率为 96.5%，4 层绕组电机为 96%，且 8 层绕组电机的高效率区域面积占比较大。这是因为，在转速  $\geq 2400\text{rpm}$  范围内，8 层绕组的铜耗比 4 层绕组的小，而且随着转速的升高，铜耗差距越来越大。

## 5 结论

(1) 介绍了交流损耗基本原理，包括集肤效应和邻近效应原理。在一款永磁同步电机模型上，设计了 4 层、8 层两种扁线绕组方案，通过仿真分析得出两种电机不同转速下的绕组损耗，并进行对比分析。

(2) 仿真分析两电机方案效率 MAP 图，8 层绕组电机最高效率 96.5%，4 层绕组最高效率 96%，8 层绕组的高效区偏高速区位置，且高效区占比大。

(3) 通过综合考量，8 层扁线电机效率、高效区占比均比 4 层电机略高，但 8 层绕组的工艺成本较高，可 4 层绕组在高转速下的铜耗过大且层间分布不均，超过电机的散热能力甚至有烧毁电机的风险，所以，最终选择工艺成本较高的 8 层扁线绕组方案。

(4) 本文介绍了不同层数扁线电机的绕组分布、铜耗计算、铜耗分布、效率 MAP 图等，这对扁线电机的设计，尤其对相似尺寸性能的扁线铜耗大小、铜耗分布规律、效率 MAP 图等均有较大的参考意义。

## 参考文献

- [1] 夏雪, 黄允凯, 彭飞等. 高速电机绕组交流铜耗的计算与测量[J]. 微电机, 第 52 卷 第 12 期 2019-12.
- [2] 邹继斌, 江善林, 梁维燕. 考虑邻近效应的高速永磁无刷电机交流损耗[J]. 电机与控制学报, 第 14 卷 第 5 期 2010-05.
- [3] 赵龙涛, 尹延杰, 窦钟森. 基于 JMAG 软件的高速永磁电机的研究与设计[J]. 电工电气, 2014 No. 2.
- [4] 姜华. 扁铜线电机交流损耗的计算方法[J]. 微特电机, 2019, 47(12)