

新能源汽车用永磁电机转子结构分析

陈丽香, 潘敬涛, 孙 宁

(沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 针对新能源汽车用永磁电机, 通过有限元法分析了 V 型、V 一型、双弧型、U 一型 4 种不同转子结构电机的交直流电感、电磁转矩、磁阻转矩等性能, 分析了不同转子结构的弱磁扩速能力及影响弱磁扩速能力的因素, 仿真给出了不同转子结构的效率云图。通过综合分析, 得出不同转子结构的特点, 总结了不同转子结构所适用的新能源汽车用驱动电机的类型。

关键词: 永磁同步电机; 新能源汽车用电机; 交直流电感; 弱磁扩速

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)02-0114-06

Rotor Structure Analysis of Permanent Magnet Motor for New Energy Automobile

CHEN Lixiang, PAN Jingtao, SUN Ning

(National Engineering Research Center for REPM Electrical Machine, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The permanent magnet motor for new energy automobile was introduced. The quadrature-direct axis inductance, electromagnetic torque and magnetic resistance torque properties were analyzed by finite element method for four kinds of motors with different rotor structures: “V” type, “V—” type, double-arc type, and “U—” type. The flux weakening capability and the factors influencing flux weakening capability were analyzed, and the efficiency maps of different rotor structures were given by simulation. By comparing and analyzing the characteristics of different rotor structures, it was concluded that different rotor magnetic circuit structures were suitable for different new energy automobile applications.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); new energy automobile motor; quadrature-direct axis inductance; flux weakening

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、转矩密度高、效率高、功率因数高、高效率区间覆盖宽、振动噪声低、动态响应快和控制系统相对简单等优点,在新能源汽车驱动电机行业应用广泛^[1-2]。按照永磁体在转子上所处位置的不同分类,PMSM一般可分为3种转子磁路结构:表面式、内置式和爪极式。这3种转子磁路结构中内置式转子磁路结构应用较为广泛,内置式转子的永磁体

包含在转子的内部,转子磁路不对称所产生的磁阻转矩可以提高电动机的过载能力和功率密度,而且比较容易实现弱磁扩速^[3]。由于其具有良好的特性,内置式转子磁路结构 PMSM 成为汽车驱动电机的主要选择,其中丰田 Prius 2003 驱动电机永磁体采用一型结构,Prius 2004 和 Prius 2010 驱动电机永磁体采用 V 型结构,Prius 2015 驱动电机采用 V 一型转子磁路结构,丰田公司 2008 Lexus LS600H 驱动电机采用了双层 V 一型永磁体结构,宝马公司的宝马 Active E 驱动电机采用

作者简介: 陈丽香(1973—),女,硕士,高级工程师,研究方向为永磁电机设计及关键技术。

潘敬涛(1992—),男,硕士研究生,研究方向为永磁电机关键技术。

孙 宁(1980—),男,硕士,工程师,研究方向为永磁电机设计及关键技术。

双层一型永磁体结构^[4-6]。

新能源汽车比较注重电机的弱磁扩速性能和转矩输出能力。转子永磁体由于不同的摆放位置和不同的形状而组合成了多种多样的磁路结构,不同的转子磁路结构其电机的性能特点也有所不同,想要设计出适合新能源汽车用的 PMSM 就需要了解不同转子磁路结构电机的性能特点。文献[7]分析比较了 5 种不同转子磁路结构永磁电机的弱磁扩速能力,分析表明传统内置式结构的永磁电机要比 V 型结构和分段一型结构永磁电机的弱磁扩速能力差,为了得到更好的电机性能,对永磁体的形状和位置进行了优化,使得 PMSM 更适合混合动力驱动。文献[8]分析比较了多层一型转子结构和多层 U(V)型转子结构的性能特点,从分析结果可知转矩输出能力更强的是多层 U(V)型结构电机并且这种结构电机的转矩脉动率低。文献[9]对电动汽车用永磁电机的电磁设计进行了研究分析,分别制出了 V 型和 V 一型两种结构的 20 kW 电动汽车用永磁电机的样机,并完成了这两种转子结构电机的试验。文献[10]对 V 型和 V 一型两种不同转子磁路结构电机进行了分析,通过有限元法分析了两种转子结构电机的转矩、交直流电感、弱磁扩速能力及铁耗等性能并仿真了两种转子磁路结构的效率云图。文献[11]制作了 100 kW 新能源汽车驱动用 V 型转子磁路结构 PMSM 的样机,通过 ANSYS Maxwell 对电机性能特点进行了电磁场仿真分析,并对样机进行了试验,然后将试验数据与电磁场仿真计算结果进行对比分析。文献[12]针对气隙磁密幅值、谐波含量、齿槽转矩和转矩波动等方面,分析了一型、V 型和 U 型 3 种磁路结构电机。文献[13]对内置 V 型转子磁路结构电机的交直流电感进行了分析。文献[14]分析了高功率密度电机在设计时需要考虑的若干问题,对 V 型和一型转子磁路结构电机进行分析比较,得出 V 型转子磁路结构更适合用于高功率密度汽车电机的结论。

本文针对 1 台峰值功率 158 kW 的新能源汽车用永磁电机,对 V 型、V 一型、U 一型和双弧型 4 种不同转子磁路结构电机进行分析,并通过分析总结了不同转子结构所适用的新能源汽车用驱动电机的类型。

1 PMSM dq 轴数学模型

PMSM dq 轴数学模型不但可以分析调速 PMSM 稳态运行特性,也可以对电动机的瞬态运行特性进行分析。在建立电机的 dq 轴数学模型时,首先作如下假设:(1)忽略电动机铁心饱和;(2)不计电动机中的涡流和磁滞损耗;(3)电动机的电流为对称的三相正弦波电流。

由于电动机的相电阻较小,故忽略电机的电阻。其相量图如图 1 所示。

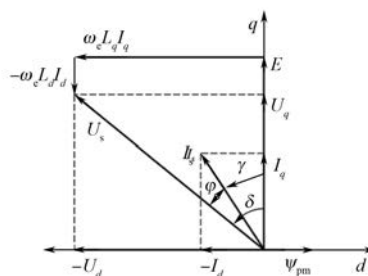


图 1 PMSM 相量图

电机在 dq 轴系统下参数可表示为

$$U_d = -\omega_e \psi_g \quad (1)$$

$$U_g = \omega_e \psi_d \quad (2)$$

$$\psi_d = \psi_{\text{pm}} + L_d I_d \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q I_q \quad (4)$$

$$I_d = -I_s \sin \gamma \quad (5)$$

$$I_q = I_s \cos \gamma \quad (6)$$

$$\psi_{\text{pm}} = \frac{E}{\omega_e} \quad (7)$$

式中: U_d 、 U_q —— d 、 q 轴电压;

 ψ_d, ψ_q —— d, q 轴磁链; I_d, I_q —— d, q 轴电流; L_d, L_q —— d, q 轴电感;

ω_e ——电角速度；

ψ_{pm} ——永磁体产生的磁链;

 I_s ——定子电流的有效值;

γ ——电流控制角。

通常认为电机的电磁转矩为永磁转矩和磁阻转矩之和,在 dq 轴数学模型下电机的转矩可表示为

$$T = T_p + T_c = \frac{3}{2}p[\psi_{pm}I_q + (L_d - L_q)I_dI_q] \quad (8)$$

$$T_p = \frac{3}{2} p \psi_{pm} I_q \tag{9}$$

$$T_c = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) I_d I_q \tag{10}$$

式中： T 、 T_p 、 T_c ——电磁转矩、永磁转矩、磁阻转矩；
 p ——极对数。

在电机设计中，交直流电感的计算十分重要。在 dq 轴数学模型下交直流电感的计算方法如下：

$$\begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix} = C^T L_{ABC} C \tag{11}$$

$$C = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$L_{ABC} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中： θ ——永磁体与 A 相绕组夹角；
 L_{ABC} ——电机电感矩阵。

2 不同转子磁路结构电机的性能特点

选择 V 型、V 一型、U 一型和双弧型 4 种不同转子磁路结构进行比较。4 种转子磁路结构的电机除永磁体结构形式不同外，其余参数都相同，如定子参数、永磁体用量、气隙长度等。分析不同转子磁路结构电机的性能特点，不同转子结构空载磁力线分布如图 2 所示。

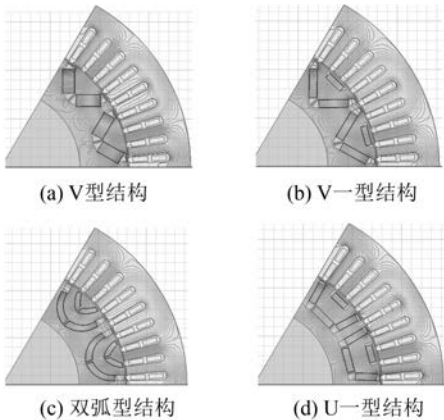


图 2 不同转子结构空载磁力线分布图

2.1 不同转子磁路结构电机的转矩

新能源汽车电机的运行主要分为 2 个阶段：（1）恒转矩阶段。电机的控制方式为最大转矩电流比控制方式，在该阶段需要寻找合适的电流角，使电机在相同电流下产生的转矩最大。（2）弱磁阶段。为了满足电机对转速的需求，对电机实行弱磁控制。

4 种转子磁路结构电机在相同电流 175 A 和不同电流控制角下转速的变化曲线如图 3 所示。4 种转子磁路结构电机产生最大转矩对应的电流控制角如表 1 所示。在相同电流下 U 一型结构产生的转矩最大，V 一型结构产生的转矩最小。

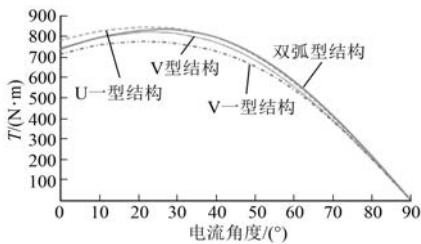


图 3 不同转子结构电机的电流控制角-转矩曲线

表 1 不同转子磁路结构电机电流控制角及转矩

转子结构	V 型	V 一型	双弧型	U 一型
最大转矩电流控制角/(°)	23	26	26	22
转矩/(N·m)	824	777	837	847

2.2 不同工况下电机所需电流

4 种转子磁路结构电机达到额定转矩和过载峰值转矩时所需电流如表 2 所示。

表 2 不同转子磁路结构电机不同工况所需电流 A

转子结构	V 型	V 一型	弧型	U 一型
额定转矩电流	170.7	180.6	168.2	165.8
峰值转矩电流	423.8	447.9	416.4	413.2

由表 2 可知，当达到额定转矩时 U 一型结构电机所需电流最小，为 165.8 A，V 一型结构电机所需电流最大，为 180.6 A，比 U 一型高 8.93%；当达到峰值转矩时 U 一型结构电机所需电流最小，为 413.2 A，V 一型结构电机所需电流最大，为

447.9 A, 比 U 一型高 8.40%。

新能源汽车对电机的过载能力有一定要求。通过仿真不同电流下的最大转矩, 可得不同转子磁路结构电机的转矩-电流曲线如图 4 所示。

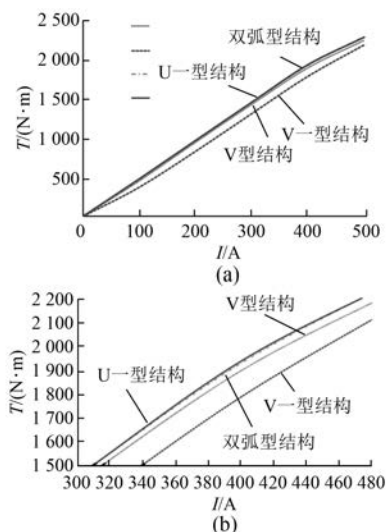


图 4 不同转子磁路结构电机的转矩-电流曲线

从图 4 可以看出, 永磁体用量相同的情况下在整个电流范围内, 4 种转子磁路结构电机产生转矩的能力由强到弱依次为: U 一型、双弧型、V 型、V 一型。

2.3 不同转子磁路结构电机的交直流电感

电机的电磁转矩由永磁转矩和磁阻转矩组成。一般情况下磁阻转矩占电磁转矩的比重越大, 电机的弱磁扩速性能就越好。交直流电感比越大则凸极率越大, 其他条件相同时电机的凸极率越大, 电机磁阻转矩在转矩中的比重就越大。

$$\rho = \frac{L_q}{L_d} \quad (14)$$

$$\Omega_{\max} = \frac{u_{\lim}}{p(\psi_f - L_d i_{\lim})} \quad (15)$$

式中: ρ ——凸极率;

$\Omega_{\max}$ ——电机的最大转速;

$u_{\lim}$ 、 $i_{\lim}$ ——逆变器输出电压和电流的极限值;

ψ_f ——电机的永磁磁链。

逆变器的最大输出电压、电流、电机的直轴电感及永磁磁链决定了电机所能达到的最高转速。不同的转子磁路结构由于永磁体的摆放形式及其

他因素的影响, 导致电机的交直流电感和永磁磁链不同, 电机所能达到的最高转速也就不同。4 种转子磁路结构电机在相同电流下的交、直轴磁力线分布如图 5 和图 6 所示。

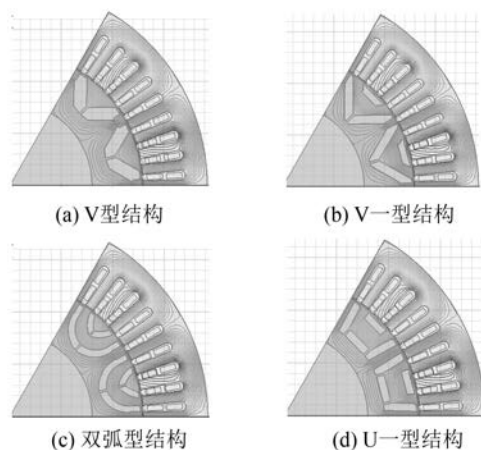


图 5 不同转子结构电机交轴磁力线分布图

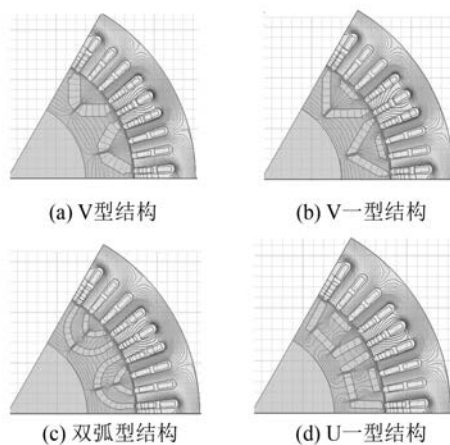


图 6 不同转子结构电机直轴磁力线分布图

由图 5 可知, 交轴电流产生的磁通从定子进入转子时会受到转子槽末端的阻挡, 双弧型结构转子对交轴电流产生的磁通阻挡最小, 交轴磁力线进入转子的部分较多, L_q 较大。由图 6 可知, 直轴电流产生的磁通从定子进入转子时很难通过永磁体槽, 主要从转子表面的隔磁桥和转子内部的加强筋通过, U 一型结构直轴磁力线进入转子的部分较多, L_d 较大。交直流电感具体数值如表 3 所示。

4 种转子磁路结构电机的交轴电感随电流变化曲线如图 7 所示。

表 3 不同转子磁路结构电机交直流电感 mH

转子结构	V 型	V 一型	双弧型	U 一型
L_q	1.439	1.447	1.526	1.467
L_d	0.755	0.832	0.797	0.864

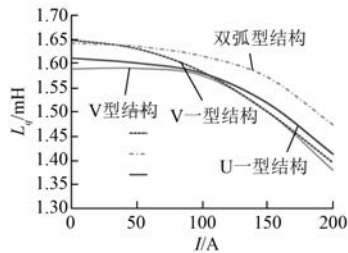


图 7 不同转子结构电机交轴电感-电流曲线

从图 7 可以看出,随着电流的增大交轴电感明显减小,双弧型结构电机的交轴电感较大,V 型结构电机的交轴电感较小。

4 种转子磁路结构电机的直轴电感随电流变化曲线如图 8 所示。

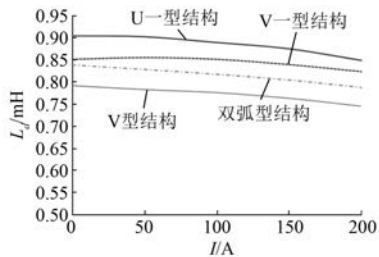


图 8 不同转子结构电机直轴电感-电流曲线

从图 8 可以看出,随着电流的增大直轴电感变化较小,U 一型结构电机的直轴电感较大,V 型结构电机的直轴电感较小。

2.4 不同转子磁路结构电机的磁阻转矩

电机的弱磁扩速能力与磁阻转矩密切相关。一般情况下磁阻转矩占电磁转矩的比重越大,电机的弱磁扩速性能就越好,电机所能达到的转速越高。4 种转子磁路结构电机在额定电流下的磁阻转矩如表 4 所示。由表 4 可知,在额定电流下双弧型结构电机磁阻转矩最大,U 一型结构电机的磁阻转矩最小。

2.5 不同转子磁路结构电机的弱磁扩速能力

4 种转子磁路结构电机在额定电流下的转矩-转速曲线如图 9 所示。

表 4 不同结构电机在电流为 175 A 时的转矩性能

转子结构	V 型	V 一型	双弧型	U 一型
ρ	1.914	1.727	1.927	1.698
磁阻转矩 / (N·m)	118	122	145	102
电磁转矩 / (N·m)	802	802	802	802
磁阻转矩 占比/%	14.7	15.2	18.1	12.7

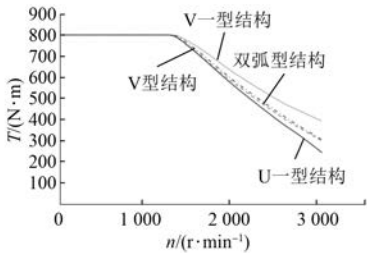


图 9 不同转子磁路结构电机转速-转矩曲线

从图 9 可以看出,随着转速的增加,电机转矩下降。V 一型结构电机的转矩下降得最慢,弱磁扩速能力最强;U 一型结构电机的转矩下降得最快,弱磁扩速能力最差;V 型结构和双弧型结构电机转矩-转速曲线十分接近,弱磁扩速能力相差不大。

4 种转子磁路结构电机在额定电流下的功率-转速曲线如图 10 所示。

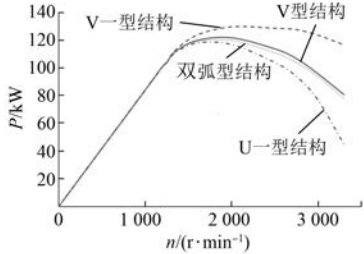


图 10 不同转子磁路结构电机功率-转速曲线

从图 10 可知,V 一型结构电机恒功率区域较宽,U 一型结构电机恒功率区域较窄,V 型结构电机和双弧型结构电机恒功率区域接近。

2.6 不同转子磁路结构电机的效率云图

不同转子磁路结构电机的效率云图如图 11 所示。

从图 11 可以看出,V 一型转子结构电机高效区间范围较大,高效区间横跨的转速区间较大;U

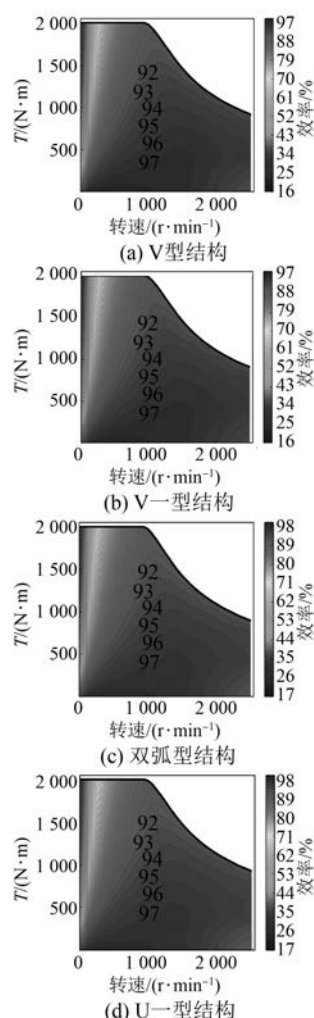


图 11 不同转子磁路结构电机效率云图

一型转子结构电机高效区间范围较小,高效区间横跨的转速区间较小。

3 结 语

本文分析了 4 种不同转子磁路结构的电机特性,通过分析得出以下结论:V 一型转子结构电机弱磁扩速能力最强,恒功率范围最大,高效率区间最大,但其输出转矩的能力最差;U 一型转子结构电机的弱磁扩速能力最弱,恒功率范围最小,高效率区间最小,但其输出转矩的能力最强;V 型和双弧型转子结构的弱磁扩速性能和转矩输出能力比较平衡,双弧型结构比 V 型结构输出转矩能力强但成本较高。新能源汽车用驱动电机应用场合不同,对电机的性能要求也不同。对转矩密度要求较高的新能源汽车电机可以选择 U 一型结构电

机;对弱磁扩速能力要求较高的新能源汽车电机可以选择 V 一型电机;需要兼顾转矩密度和弱磁扩速性能的新能源汽车电机可以选择 V 型和双弧型结构电机。

【参考文献】

- [1] KIM K C, LEE J, KIM H J, et al. Multiobjective optimal design for interior permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1780.
- [2] 李周清,李婷婷,纪小庄.电动汽车用永磁同步电机的选型研究[J].微特电机,2015,43(6): 50.
- [3] 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.
- [4] BURRESS T A, COOMER C L, CAMPBELL S L, et al. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system [R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2011.
- [5] 严蓓兰.新能源汽车电机发展趋势及测试评价研究[J].电机与控制应用,2018,45(6): 109.
- [6] 解志霖.电动大巴车用永磁电机设计[D].沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [7] 王艾萌,卢伟甫.五种拓扑结构的永磁同步电动机性能分析与比较[J].微特电机,2010,38(4): 20.
- [8] 李新华,阮波,徐竟成.电动大巴永磁辅助磁阻同步电动机仿真分析[J].微特电机,2014,42(3): 1.
- [9] 刘奇林,沈启平.车用高功率密度永磁同步电机设计及试验研究[J].电机与控制应用,2016,43(1): 88.
- [10] 陈丽香,付鸣达,解志霖.电动大巴车用永磁电机转子结构分析[J].电机与控制应用,2018,45(4): 105.
- [11] 胡天召,李祥成,黄新宇.电动汽车驱动用永磁同步电机结构分析[J].防爆电机,2018,53(2): 23.
- [12] DLALA E, SOLVESON M, STANTON S. Efficiency map simulations for an interior PM motor with experimental comparison and investigation of magnet size reduction[C]//2013 IEEE, International Electric Machines & Drives Conference, 2013: 23.
- [13] 符荣,窦满峰.电动汽车驱动用内置式永磁同步电机直交轴电感产生计算与实验研究[J].电工技术学报,2014,29(11): 30.
- [14] 王晓远,高鹏,赵玉双.电动汽车用高功率密度电机关键技术[J].电工技术学报,2015,30(6): 53.

收稿日期: 2018-08-30