

电动大巴车用永磁电机转子结构分析*

陈丽香¹, 付鸣达¹, 解志霖¹, 孙宁¹, 徐广人²

(1. 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;

2. 沈阳蓝光驱动技术有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

摘要: 针对大巴车用永磁电动机, 通过有限元法分析了 V 型和 V 一型两种不同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, 仿真不同转子结构的效率云图。通过对比分析不同转子结构的特点, 最终选择出适合电动大巴车用驱动电机的转子磁路采用 V 型结构。

关键词: 电动汽车用电机; 效率云图; 交、直流电感; 转矩-转速曲线

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)04-0105-05

Rotor Structure Analysis of Permanent Magnet Motor for Electric Bus*

CHEN Lixiang¹, FU Mingda¹, XIE Zhilin¹, SUN Ning¹, XU Guangren²

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

2. Shenyang Bluelight Driving Technology Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Abstract: The permanent magnet motor for bus was introduced, V type and V type of two kinds of different rotor structure motor torque, straight axis inductance and the flux weakening capability and iron loss properties were analyzed by the finite element method, the simulation of efficiency map of different rotor structures. By comparing and analyzing the characteristics of different rotor structure, the rotor magnetic circuit structure suitable for electric bus driving was selected.

Key words: electric car motor; efficiency map; quadrature-direct axis inductance; torque-speed curve

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 由于具有高转矩密度、高效率、高功率因数、优良的低速驱动特性和较宽的调速范围, 已经成为了电动汽车主驱动电机的首选机型^[1]。内置式转子内的永磁体受到极靴的保护, 其转子磁路结构的不对称性所产生的磁阻转矩也有助于提高电动机的过载能力和功率密度, 而且易于“弱磁”扩速^[2]。内置式转子永磁体摆放形式多种多样, 常见的有一型、V 型、U 型以及诸多双层结构, 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了 V 型结构, 丰田公司 2008 Lexus LS600H 驱动电机采用了双层 V 一型永磁体结构^[3]。弱磁扩速能力是电动汽车的关键技术之一, 转子磁路结构的不同直接影响电机的永磁磁链和交、直流电感, 进而影响电机的性能。

文献[4]对 5 种不同拓扑结构的 PMSM 进行了比较, “V”字型和永磁体分段的永磁电机要比传统内置式永磁电机有更好的弱磁扩速能力, 通过优化永磁体的形状和位置, 使得 PMSM 的性能进一步提高, 更加适合混合动力驱动。文献[5]利用有限元法分别对一型、V 型和 V 一型结构

* 基金项目: 沈阳市科技计划项目(17-7-2-00)

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。

付鸣达(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机关键技术。

解志霖(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机关键技术。

的性能进行分析, 通过比较选择出适用于电动汽车用的电机转子结构并进行了优化。文献[6]对不同的转子磁路结构进行了分析, 分析了一字型结构、V型结构和U型结构电机的气隙磁密幅值和谐波含量、齿槽转矩、转矩波动。文献[7]使用有限元软件, 对电机的效率云图进行了仿真, 将仿真结果和试验结果进行了对比, 验证了该方法的有效性, 利用该方法仿真电机的效率云图。文献[8]对20 kW电动汽车用永磁电机的电磁设计进行了研究, 分别做出了V型和V一型两种结构的样机, 并完成了试验。

本文针对1台104 kW大巴车用永磁电动机, 对V型结构和V一型结构两种不同结构电机进行分析, 最终选出适合本电机的转子结构。电机的设计指标如表1所示。

表1 电机设计指标

| 电机参数 | 参数值 |
|-----------------------------|-------|
| 电机功率/kW | 104 |
| 额定转速/(r·min ⁻¹) | 1 250 |
| 额定转矩/(N·m) | 795 |
| 峰值功率/kW | 208 |
| 峰值转矩/(N·m) | 1 590 |
| 最大转速/(r·min ⁻¹) | 2 500 |
| 最高效率/% | 95 |

1 PMSM dq轴数学模型

分析正弦波电流控制的调速PMSM最常用的方法就是dq轴数学模型。其不仅可用于分析正弦波PMSM的稳态运行性能, 也可用于分析电动机的瞬态性能。为建立正弦波PMSM的dq轴数学模型, 首先假设: 忽略电动机铁心饱和; 不计电动机中的涡流和磁滞损耗; 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很小, 忽略电机的电阻。

PMSM相量图如图1所示。

电机在dq轴系统下参数可表示为

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

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

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

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

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

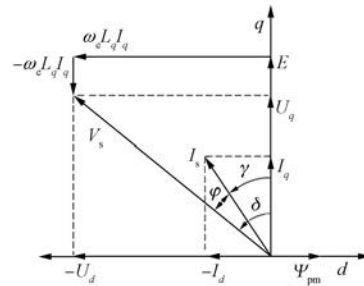


图1 PMSM相量图

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

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

式中: U_d, U_q ——电机在dq轴坐标系电压;

ψ_d, ψ_q ——电机在dq轴坐标系磁链;

I_d, I_q ——电机在dq轴坐标系电流;

L_q, L_d ——电机在dq轴坐标系电感;

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, 电机在dq轴数学模型下的转矩可表示为

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

式中: T ——电磁转矩。

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:

$$\begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix} = C^T L_{ABC} C \quad (9)$$

$$C = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$L_{ABC} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: θ ——永磁体与A相绕组夹角;

L_{ABC} ——电机电感矩阵, 可由Ansoft求得。

2 不同转子结构对电机性能的影响

选择 V 型结构和 V 一型结构两种转子磁路结构进行比较。对比不同转子磁路结构电机的性能和特点,不同转子磁路结构横截面如图 2 所示。

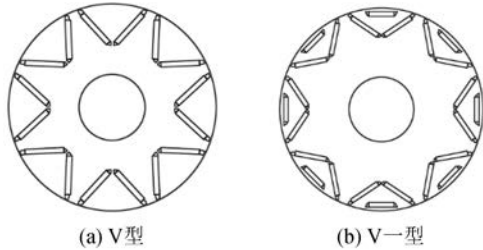


图 2 不同结构电机转子冲片

保证不同结构电机永磁体用量相同,两种不同转子磁路结构的电机除永磁体结构形式外,其余参数都相同,如定子外径、气隙长度等。

2.1 不同转子磁路结构电机的气隙磁密

不同转子结构电机的气隙磁密谐波幅值如图 3 所示,具体数值如表 2 所示。结合图 3 和表 2 可以看出,V 型结构电机的气隙磁密基波幅值要大于 V 一型结构电机的气隙磁密基波幅值,比 V 一型结构高出 18%。两种结构的 5 次谐波幅值相差不多,V 型结构的 3、7、9 次谐波幅值都要比 V 一型结构的高,其中 3 次谐波最为明显。

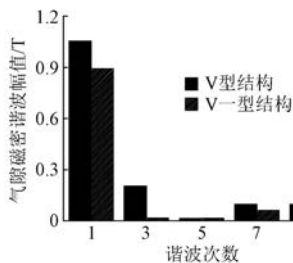


图 3 不同转子结构电机的气隙磁密波形

表 2 不同结构电机气隙磁密谐波幅值

| 谐波次数 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V 型结构/T | 1.053 | 0.205 | 0.015 | 0.098 | 0.097 |
| V 一型结构/T | 0.892 | 0.017 | 0.016 | 0.061 | 0.077 |

2.2 不同转子磁路结构电机的交、直轴电感

两种不同结构电机的直轴电感随电流变化曲线如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,两种结构电机的直轴电

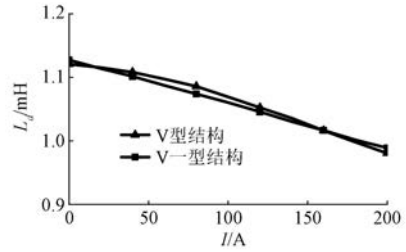


图 4 不同转子结构下直轴电感

感几乎没有差别,两条曲线接近重合。

两种不同结构电机的交轴电感随电流变化曲线如图 5 所示。可以看出 V 型结构电机的交轴电感要低于 V 一型结构电机的交轴电感,当电流为 100 A 时,V 型结构电机的交轴电感为 2.18 mH,V 一型结构的交轴电感为 2.29 mH,V 一型结构的交轴电感比 V 型结构高 5%。

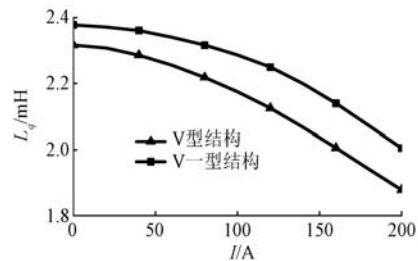


图 5 不同转子结构下交轴电感

2.3 不同转子磁路结构电机的转矩和齿槽转矩

电动汽车电机的运行主要分为两个阶段:恒转矩阶段,电机实行最大转矩电流比控制,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;弱磁阶段,对电机实行弱磁控制。两种不同结构电机在相同电流不同电流控制角下转速的变化曲线如图 6 所示,V 型结构在电流角为 30°时,产生的转矩最大为 882 N·m;V 一型结构在电流角为 36°时产生最大转矩为 818 N·m,比 V 型结构的最大转矩低了 7.3%。

通过仿真不同电流下的最大转矩,得到不同

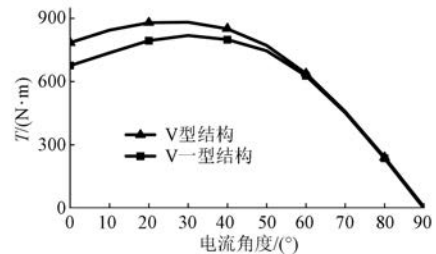


图 6 不同结构电机在不同电流控制角下的转矩

结构电机的转矩-电流曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出在整个电流范围内, V 型结构电机的转矩都要大于 V 一型结构电机的最大转矩, 表明在相同永磁体用量下 V 型结构电机产生转矩的能力强于 V 一型结构电机。

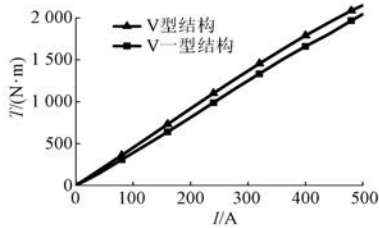


图 7 不同结构电机的转矩-电流曲线

两种结构电机的齿槽转矩如图 8 所示, V 一型结构电机的齿槽转矩的峰值为 31.2 N·m; V 型结构电机齿槽转矩的峰值为 50.5 N·m, 比 V 一型结构电机高 61.8%。

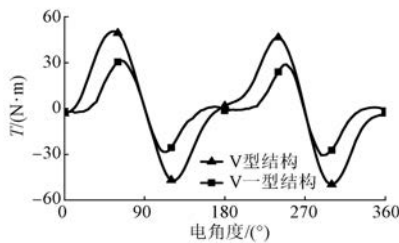


图 8 不同转子结构齿槽转矩

2.4 不同转子磁路结构电机的铁耗

不同结构电机的铁耗随转速变化曲线如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 在任一转速下, V 型结构电机的铁耗都大于 V 一型结构电机的铁耗。

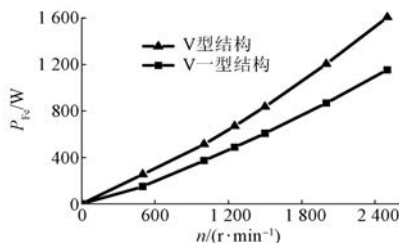


图 9 不同转子结构电机铁耗随转速变化曲线

3 不同转子结构电机的弱磁扩速性能及效率云图

$$\Omega_{\max} = \frac{u_{\lim}}{p(\psi_f - L_d i_{\lim})} \quad (12)$$

式中: Ω_{\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。

电机所能达到的最高转速与逆变器的最大输出电压、电流、电机的直轴电感及永磁磁链有关。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, 导致不同转子磁路结构电机的交直轴电感和永磁磁链不同, 进而影响电机的弱磁扩速能力。

3.1 相同电流下电机的弱磁扩速性能

两种结构电机在相同电流下的转矩-转速曲线如图 10 所示。从图 10 中可以看出, 在恒转矩阶段 V 型结构电机的转矩大于 V 一型结构电机的转矩。随着转速的增加, 电机转矩下降, V 一型结构的最高转速要高于 V 型结构的最高转速, 且转折速度大于 V 型结构, 主要原因是 V 一型结构电机的空载反电动势较低。

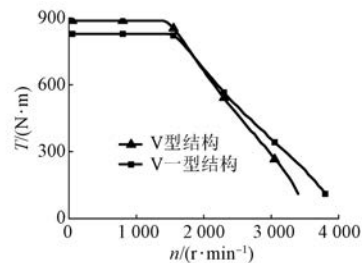


图 10 不同转子结构下电机转矩-转速曲线

两种结构电机在相同电流下的功率-转速曲线如图 11 所示。

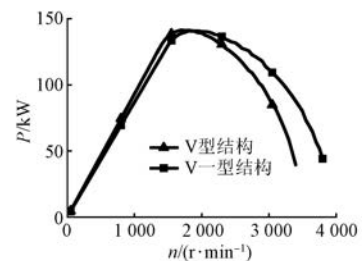


图 11 不同转子结构电机铁耗随转速变化曲线

3.2 不同工况下电机所需电流

(1) 工况 1: 最高转速。V 型结构电机在额定转矩下达到最高转速所需电流为 298 A, V 一型结构电机所需电流为 290 A, 此时两种结构电机的转矩转速曲线如图 12 所示。

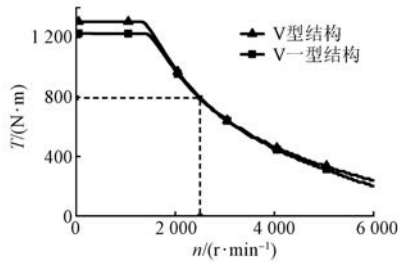


图 12 不同转子结构电机转矩转速曲线

两种结构电机在逆变器允许的电流范围内均能达到最高转速,符合设计要求。

(2) 工况 2: 峰值扭矩。电机的峰值扭矩为 $1\ 590\ \text{N}\cdot\text{m}$, V 型结构电机达到峰值扭矩所需电流为 $364\ \text{A}$, V 一型结构电机达到峰值扭矩所需电流为 $382\ \text{A}$, 比 V 型结构电机高 5%。

3.3 不同转子结构电机的效率云图

不同结构电机的效率云图如图 13 所示。

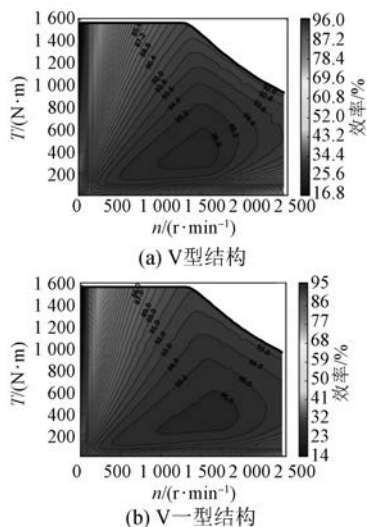


图 13 不同结构电机的效率云图

从图 13 可以看出, V 一型转子结构电机效率大于 96% 的范围要比 V 型结构电机的广, 横跨的转速区间较大。

综上所述, V 一型结构电机的弱磁扩速能力较强, 恒功率范围较广, 损耗小、高效率区间较大, 但其输出转矩的能力较差。大巴车电机对转矩密度要求较高, 在相同电流下, V 型转子结构电机产生的转矩较高, 有利于提升电机的转矩密度, 经过综合考虑, 最终选择 V 型转子结构。

4 结 语

本文主要分析了 V 型转子结构和 V 一型转子结构对电机性能的影响, 主要得出以下结论: (1) 在相同永磁体用量下, V 型结构电机的气隙磁密基波幅值比 V 一型结构电机高, 但气隙磁密谐波幅值大, 电机的铁耗较大。(2) V 型和 V 一型两种结构电机的直轴电感差别不大, 但 V 一型结构的交轴电感比 V 型结构的交轴电感大。(3) V 型结构电机在单位电流下产生的转矩较大, 有利于提高电机的转矩密度, 但齿槽转矩比 V 一型结构电机的大。(4) V 一型结构电机的铁耗较小, 电机的高效率区间范围比 V 型结构电机大。

【参考文献】

- [1] 彭海涛, 何志伟, 余海阔. 电动汽车用永磁同步电机的发展分析[J]. 微电机, 2010, 43(6): 78-81.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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): 20-23.
- [5] 王晓远, 严长伟. 电动汽车用内置式永磁同步电动机转子结构优化[J]. 微特电机, 2014, 42(8): 26-33.
- [6] DLALA E, SOLVESON M, STANTON S. Efficiency map simulations for an interior PM motor with experimental comparison and investigation of magnet size reduction[C] // International Electric Machines & Drives Conference, 2013 IEEE, IEEE, 2013: 23-29.
- [7] GUO L, PARSA L. Effects of magnet shape on torque characteristics of interior permanent magnet machines[C] // Electric Ship Technologies Symposium, 2009 IEEE, IEEE, 2009: 93-97.
- [8] 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): 88-94.

收稿日期: 2017-10-10