

「电动机」

现代电动汽车永磁同步电动机设计与分析

文/沈阳工业大学电气工程学院 白山 于松建

介绍当前汽车对驱动电动机的特殊要求及永磁同步电动机作为驱动电动机的优势,分析永磁同步电动机研发现状及其在当前电动汽车上的应用,电动汽车用电动机驱动系统已经成为行业关注的重点和研究热点。目前电动汽车用永磁电动机应该具有高效率、宽调速范围、高过载能力、结构坚固、体积小和重量轻等特点,这对电动汽车用永磁电动机的设计提出了新的挑战,设计了一款纯电动汽车用、额定功率为 35 kW 永磁同步电动机,运用有限元计算软件 Ansoft,采用场路结合设计的方法对电磁负荷、转子结构、绕组形式以及尺寸等做了合理设计。经过多轮优化,最终确定电动机的结构尺寸,以及电磁参数与性能。

电动汽车是一种包含驱动电动机、车载电源、功率转化器在内,基于电力电子驱动和控制,并能够满足相关道路安全法规的交通车辆,满足当今社会对汽车的高效率、零排放等要求。由于稀土永磁材料的价格昂贵,所以合理设计永磁电动机的工作点,使永磁材料在满足电动机性能的前提下使用永磁材料最少成了关键。优化设计选择永磁体的体积作为目标函数,永磁体的形状尺寸作为变量。在约束条件中,电抗参数、定子齿部和轭部磁密、定子电密、起动电流以及槽满率等在一定范围内,而效率、功率因数等则要求大于某给定值。

永磁同步电动机由于永磁体的存在,并且永磁磁路和电枢磁路使用同一磁路结构,在实际应用中经常出现磁路饱和和交叉饱和等问题。另外,电抗参数的准确计算关系到电动机在各种工况下的出力计算,并且电抗作为电动机和变频器的接口参数,它的计算关系到控制系统的性能计算。所以在研究永磁同步电动机时,准确计算直交轴电感是十分重要的。宽的调速范围是电动汽车用电动机性能的重要问题之一,宽的调速范围需要电动机具有强的弱磁能力。齿槽转矩影响电

动机的起动性能和电动机停转时的位置,通过优化永磁体的布置可降低电动机的定位转矩。

本文通过有限元分析软件优化此电动机尺寸和参数来满足电动汽车的运行要求展开。以电动汽车用永磁同步电动机的大起动转矩、高的调速比、低噪声等一系列问题的解决为目标。

变频永磁同步电动机基本理论

电动汽车的性能发挥和采用的驱动系统性能息息相关,此电动机要求调速比大于3。由于电源的限制了转矩输出,不能像燃油汽车有很高的转矩输出,要求最大转矩倍数大于2。由于电动汽车提供空间的限制,电动机总长不能超过650 mm,直径不能超过400 mm。工作电流限定为额定的1.5倍,最少可持续运行1 min。

电动汽车和燃油汽车的结构基本相似,它们的车体、转向及制动系统基本相同,它们的主要区别是动力源不同。燃油汽车是通过内燃机中燃油混合气的燃烧做功推动汽车行进的,纯电动汽车电能由蓄电池提供,车辆通过电力驱动系统来驱动行驶,在系统中增加回馈系统后,具有能量的再生能力。电动汽车不靠烧油,所以不存在

燃油车的耗油考核。永磁同步电动机具有节能效果好、起动转矩和最大转矩倍数都比较大、低速直接驱动以及高功率密度的优点,机械结构与普通感应电动机基本相似,也分为定子、转子、机壳、端盖及机座等部件,但不同的是转子铁心有固定磁极。

电动机设计

永磁电动机的设计主要包括:永磁体的布置、定转子的尺寸确定、绕组结构、参数计算及齿槽转矩计算等。本文采用的是6极36槽的极槽配合。

1. 定子内径的选取

首先确定最大输出转矩 $T_{em\max}$,来推导电动机的主要尺寸。

$$T_{em\max} = \frac{\sqrt{2}}{4} B_{g1} L_{ef} D_{i1}^2 A \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中, $A = \frac{m N I_1 K_{\phi}}{p \tau_1}$, A 为线负荷, B_{g1} 为气隙磁密

基波幅值, T , L_{ef} 为电枢计算长度, mm; D_{i1} 为定子内径, mm; m 为相数; N 为每相绕组匝数; I_1 为相电流, A; τ_1 为极距; p 为极对数。

$$D_{i1}^2 L_{ef} = \frac{4\sqrt{2} T_{em\max} \times 10^{-4}}{B_{g1} A \pi} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得到定子内径,定子冲片如图所示。

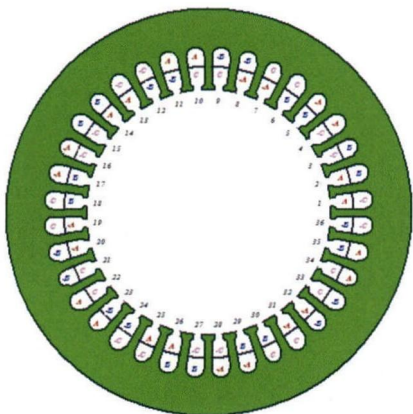


图1 定子铁心

永磁同步电动机气隙磁场中的谐波较多,电势谐波也多,为避免环流电动机采用Y联结。为了优化电动机的谐波,可采用分数槽、斜槽或斜极。由于电动汽车的功率不是很大,并且电动机的噪声主要由齿槽引起,所以通常采用散绕组、

半开口槽形。这样一来,电动汽车的噪声可有一定的降低。

2. 永磁同步电动机转子结构设计

根据永磁体在转子的位置,它们可以分为表面式、内置式,内置式再分包括内置径向式和内置切向式。转子磁路结构选择的原则:当电动机的最高转速不是很高时,可以采用表贴式永磁电动机的转子磁路结构,一般情况下采用内置式转子磁路结构。

表贴式永磁电动机其弱磁调速范围很小,基本运行在恒励磁状态,相应的电动机运行在恒转矩区域。在电动汽车用永磁电动机的设计中要充分考虑到电动机弱磁扩速性能,采用内置式转子结构,并且电动机转子应设计成V形或U形,这样永磁体被牢牢地镶嵌在转子铁心内部,这样适用于高速运行场合。

电动机的转子空间一般很有限,由于既要安放足够的永磁体以提供必需的气隙磁密和改善磁场波形,又要使转子有足够的强度和刚度便于制造,所以在有限的转子空间内需要对磁极结构等进行创新和优化设计,需要在大量的设计和优化的基础上总结出设计准则。

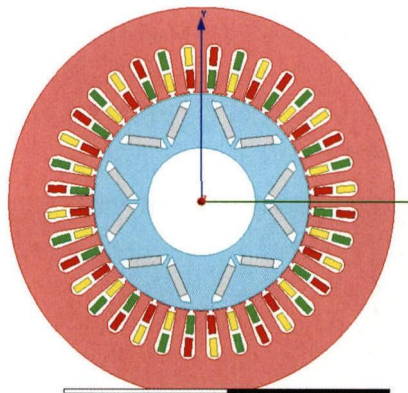


图2 永磁体的结构

3. 永磁体体积的估算

一般设计电动机时,首先通过电动机功率、转矩及本来确定电动机的主要尺寸。由于稀土永磁的价格昂贵,所以在设计电动机时准确估算永磁体体积十分重要。

$$V_m = 51 \frac{P_N \sigma_0 K_{ad} K_{Fd}}{f K_u K_p C(BH)_{\max}} \times 10^6 \quad (3)$$

式中, σ_0 为漏磁系数, P_N 为电动机的额定容量, kW; K_u 为电压系数; K_p 为气隙磁通的波形系数; K_{ad} 为直轴电枢磁势折算到转子磁势折算系数; K_{Fd}

发电机短路时每对极的磁钢磁势为直轴电枢磁势的倍数； B 为磁通密度，T； H 为磁场强度，A/m。

4. 气隙的确定

在定子结构和转子结构基本确定后，接着确定气隙，一般按以下经验公式选取：

$$\delta = \frac{4.7D_{in}}{\sqrt{p}} \times 10^{-2} \quad (4)$$

式中， D_{in} 为定子内径，mm； p 为极对数。

通过以上的计算，确定电动机的基本尺寸和绕组数据如表所示。

表

参数	数值
定子外径/mm	360
转子外径/mm	200
气隙/mm	1
转子铁长/mm	305
转子磁钢	V形
电动机极数/极	6
定子槽数	36
并联支路数	6
绕组匝数	6

电磁性能计算与有限元验证

大型电气设备的研发对电磁场的计算提出了很高的要求，促进了基于Maxwell方程的有限元法在电气设备研发中的应用。计算机性能的不提高为电磁场分析软件的商业化创造了条件。永磁电动机模型如图3所示。

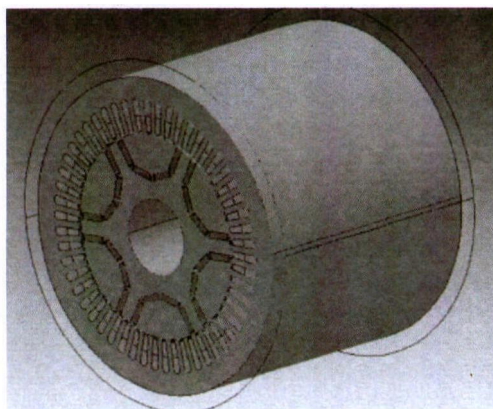


图3 永磁电动机模型

运用有限元分析软件Maxwell对样机进行计算，可得到额定负载下的磁密分布图，如图4所示；气隙磁通密度分布图，如图5所示；反电动势波形图，如图6所示。

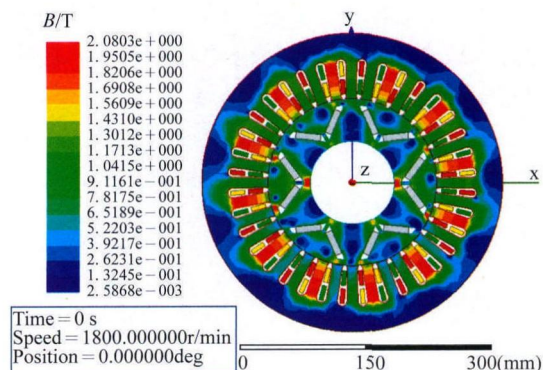


图4 额定负载下的磁密分布图

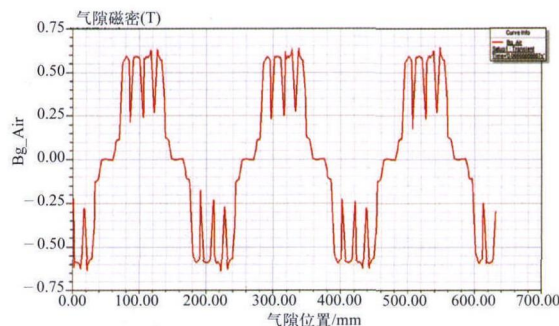


图5 气隙磁通密度分布图

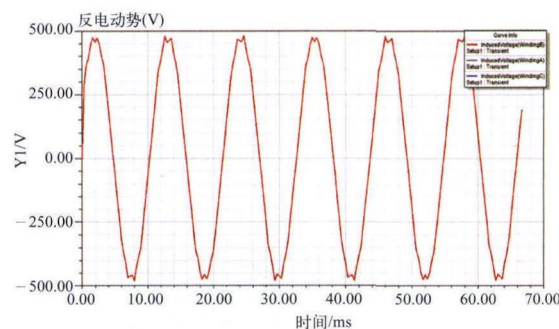


图6 反电动势

永磁同步电动机的磁场分布计算是电动机参数计算的基础，气隙磁场的分布、漏磁系数的计算为后续的电动机优化提供了技术基础。

结束语

本文根据变频永磁同步电动机理论得出了电动汽车永磁同步电动机的设计方案，通过有限元分析解决了设计中遇到的一些问题。同时，也通过有限元分析软件Maxwell对设计的电动汽车永磁电动机进行了计算，证实了设计的合理性。EA

(收稿日期：2016.05.30)

(编辑：白文亭)