

# 新型混合动力汽车全数字 电力驱动系统的研究

孙玉坤, 张好明

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏镇江 212013)

[摘要] 混合动力汽车电机要求高效、高功率密度、低脉动转矩,普通电机显示出了其局限性;Halbach 电机是一种新型永磁电机;独特的永磁体结构使其磁极磁场呈单边且正弦分布,在增加气隙磁通密度、削弱转子轭部磁通密度的同时,又可减少磁场谐波,这有利于提高电机的功率密度和效率、减小电机的体积和脉动转矩;基于 MATLAB 的 Halbach 电机设计软件和基于 ANSYS 有限元分析软件极大地减少了样机设计时间;针对 Halbach 电机特点设计了基于 DSP2407A 混合动力汽车全数字电力驱动系统,实验结果证明 Halbach 电机在混合动力系统中有着较大的优越性。

[关键词] 混合动力汽车;电力驱动系统;Halbach 阵列;永磁电机;有限元分析;电机设计

[中图分类号] TM301 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)04-0057-06

## 1 前言

随着汽车工业的不断发展,能源危机以及环境污染问题也越来越严重,这迫使人类开始考虑未来汽车的发展方向。混合动力汽车由于具有节能、环保等优点,是较好的发展方向。图 1 为基于锂电池/超级电容新型混合动力汽车驱动系统原理图: DSP2407A 接受外来传感信号决定汽车的启动、加速、减速、制动等工况。在这个系统当中,电机及其驱动系统是整个电力能量转换的枢纽,由于受空间和能量来回频繁转换的限制,则受到了较高要求:高功率密度以增加电机出力和减小体积,高效以节约能源,低脉动转矩以减小运转噪声和环境污染。

异步电机体积笨重,而且无论低速还是高速,其效率都很难满足高效混合动力系统要求;开关磁阻电机体积和脉动转矩较大,产生较大的噪声污染;传统稀土永磁电机虽然体积较小,低速时效率很高,但在高速运转时受转子涡流损耗影响导致效率大大降

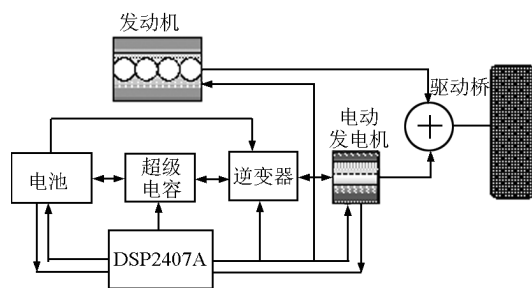


图 1 新型混合动力汽车原理图

Fig. 1 Schematic illustration of new type HEV

低,很难满足系统高速高效要求;在这种情况下,寻求一种新型电机及其驱动系统是非常重要的。

## 2 Halbach 电机及其优点

Halbach 电机是由美国伯克利实验室的著名学者 K. Halbach 提出的一种永磁同步电机<sup>[1-3]</sup>,其结构模型如图 2 所示。

相对于普通永磁同步电机, Halbach 电机具有

[收稿日期] 2007-05-09;修回日期 2007-11-11

[基金项目] 国家自然科学基金(50275067)

[作者简介] 孙玉坤(1958-),男,江苏靖江市人,教授,博士生导师,主要研究方向为特种电机非线性智能控制,混合动力系统的设计控制,电能质量控制技术以及磁悬浮无轴承电机;E-mail:syk@ujs.edu.cn

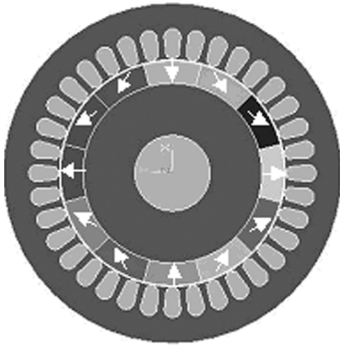


图2 Halbach 电机模型

Fig.2 Halbach motor model

以下优点:

1)气隙磁通密度大。图3是利用ANSYS对图2中四极Halbach阵列做有限元分析后得到的磁场分布图。从有限元分析中看出:磁极磁场呈单边分布,在永磁材料一边大幅度增加的同时,另一边却大幅度的降低。这使得在永磁材料体积不变的条件下,电机气隙磁通密度增大成为可能,有利于增大电机的功率密度,减小电机的体积。

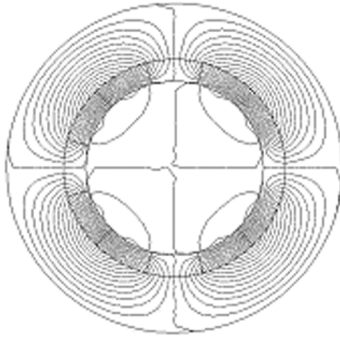


图3 内磁场有限元分析

Fig.3 Finite element analysis of internal field

2)效率高。从图3的磁场有限元分析当中可以看出:相对于普通永磁电机而言, Halbach 电机的磁场几乎不通过转子铁心就可以形成回路,使得电机的转子涡流损耗几乎为零,有利于提高电机的效率。

3)速度高。由于无论在低速或高速条件下转子涡流损耗都几乎为零,这样在保证电机效率的前提下,可极大地提高电机转速从而满足高速系统的要求。

4)正弦磁极磁场。Halbach 电机另一特点就是其磁极磁场呈正弦分布,这一点是由其结构产生的。

由资料[4]知 Halbach 列在柱坐标系下的磁场

可表示为:

$$M = M_r \hat{e}_r + M_\theta \hat{e}_\theta \quad (1)$$

其中:  $M_r = M \cos(p\theta)$ ,  $M_\theta = \pm M \sin(p\theta)$ ,  $p$  为电机的极对数。

如果把每极永磁体均分为  $n$  个无穷小且宽度为  $\Delta\theta$  的永磁体系列,取这  $n$  个永磁体系列的径向分解值,则这些分解值迭加可以组成一个正弦磁场。上述磁场有利于减少电机的磁场谐波和脉动转矩。

### 3 Halbach 电机计算机辅助设计

#### 3.1 样机设计

由于 Halbach 电机永磁体分布的特殊性(混合均布),改变了永磁体的磁场分布,适用于一般永磁同步电机的电磁设计方法已经满足不了它的要求。其设计必须和有限元分析紧密结合起来,采用场路结合的方法<sup>[5]</sup>。在参考普通电机设计的经验参数和插图<sup>[6-8]</sup>基础上,编写了基于 MATALAB 的 Halbach 永磁同步电机设计软件及基于 ANSYS 的 Halbach 电机和普通永磁同步电机有限元分析软件。在分析初步只要输入电机设计相关参数,程序就会自动运行得到电机的模型参数以及有限分析结果,极大地节省了电机设计的时间。表1就是利用上述软件针对混合动力汽车设计的一台样机参数。

表1 样机参数

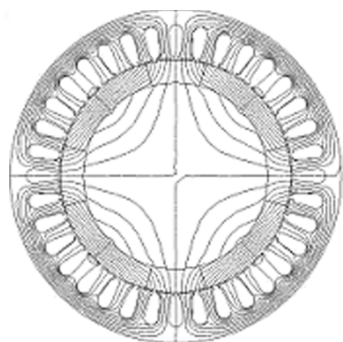
Table 1 Parameters of model motor

参数	数值
电机功率/kW	15
极对数	2
定子外径/mm	260
定子内径/mm	170
气隙长度/mm	1
额定转速/转·min <sup>-1</sup>	1 500
永磁体厚度/mm	12
槽数目	36
每槽导体数	45(2路并绕)
槽满率	0.52
斜槽	无
定子直流电阻/ $\Omega$	0.213
平均气隙磁密/T	0.650
实测转矩/(N·m)	95.5
实测效率/%	97.7
功率因数	0.985 5

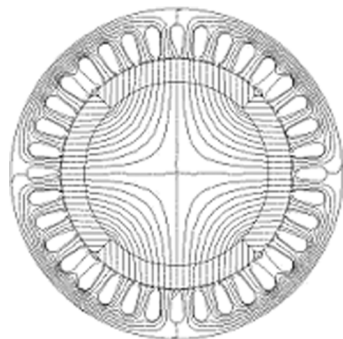
#### 3.2 有限元分析校核

把上述设计的电机参数导入到所设计的 Halbach 电机和普通永磁电机 ANSYS 有限元分析软件

中进行磁场校核,有限元分析结果如图 4(a), 4(b),图 5,图 6 所示。



(a) Halbach 电机



(b) 普通永磁电机

图 4 电机磁场分布

Fig. 4 Distribution of motor's field

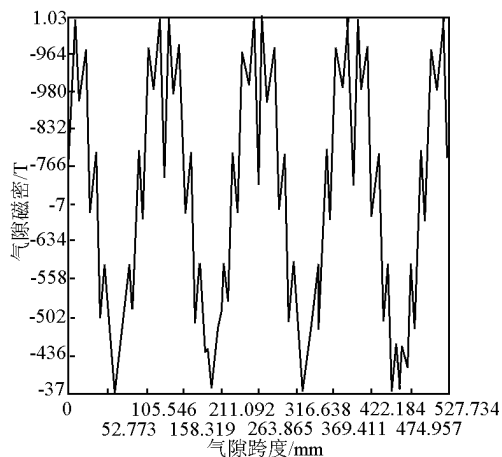


图 5 Halbach 电机气隙磁场分布

Fig. 5 Distribution of Halbach motor's air-gap field

如果忽略端部效应,从 Halbach 电机和普通永磁同步电机的有限元分析结果对比中可以看出:

1) Halbach 电机转子磁场分布密度远远小于普通永磁电机转子磁场分布密度,这有利于减小电机

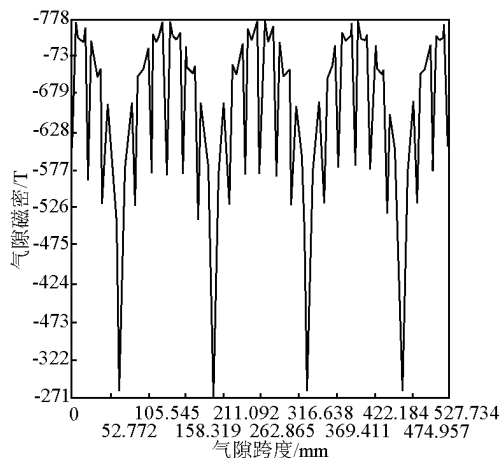


图 6 普通永磁同步电机气隙磁场分布

Fig. 6 Distribution of traditional PM's air-gap field

运转时转子涡流损耗,提高电机的效率。

2) Halbach 电机气隙磁场分布基本体现出了正弦磁场的特征,有利于减少电机的脉动转矩。

3) Halbach 电机气隙磁密相对较大,有利于提高电机的功率密度,减小电机的体积。

4) 各种条件下 Halbach 电机气隙磁通密度大小比较,其有限元分析结果如下:

$$B_{\delta} = B_{g1} \alpha_i = 1.03 \times \frac{2}{\pi} = 0.6560 (\text{T})$$

$$\text{设计值: } B_{sc} = 0.650 (\text{T})$$

$$\Delta = B_{\delta} - B_{sc} = 0.6560 - 0.650 = 0.006$$

式中,  $B_{\delta}$  为有限元分析气隙磁通密度平均值;  $B_{g1}$  为有限元分析气隙磁通密度最大值;  $\alpha_i$  为极弧系数;  $B_{sc}$  为样机磁通密度实际值。

由于有限元采集的是一些离散的数值并有一定的人为因素存在,程序设计结果也是采用近似公式计算得到的,所以和实际值之间存在一定的差值,但是数据相差不大,这说明电机设计软件与有限元分析结果是统一的。

## 4 驱动控制系统设计

### 4.1 驱动系统硬件设计

蓄电池受自身性质影响不允许高倍率放电和充电,这就很难满足汽车短时间内加速和制动要求。超级电容是一种新型储能元件,可以满足短时间大电流充放电要求,但是其功率密度相对较低,很难满足汽车远距离行驶要求。针对这种情况,笔者设计了基于 DSP2407A 全数字新型电力驱动系统,其原

理如图 7 所示,启动加速和制动瞬间采用超级电容提供或接受能量,低速短距离行驶时采用高性能锂离子电池供电,当高速远距离行驶时采用发动机进行驱动,电机根据外来传感信号决定是否对发动机扭矩进行助力。

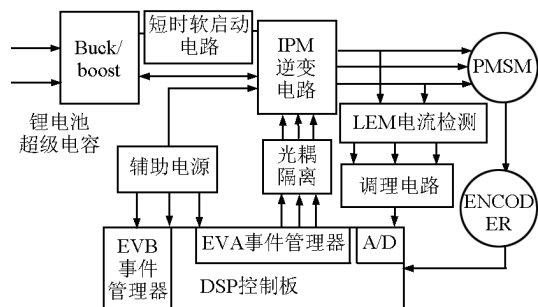


图 7 主电路原理图

Fig. 7 Block diagram of main circuit

为了使前后单元能够实现能量双向流动,提高系统的转换效率,采用零电压多谐振三电平 Buck/Boost 电路对前后电源进行 DC/DC 变换,电路的脉宽调制信号由 DSP2407A 根据前后采样电压比较后生成。经 Boost 电路升压后形成的稳定直流母线电压通过 DC/AC 逆变生成电机需要的三相交流电压,然后在控制策略下驱动 Halbach 永磁同步电机旋转,其中逆变桥采用智能功率模块 IPM,型号为 6MBP50RA120。

#### 4.2 驱动系统软件设计

本设计的软件核心是 TI 公司出品的高性能 16 位定点 DSP 芯片 TMS320F2407A。

TMS320F2407A 具有先进的哈佛总线结构和流水线指令集,运算速度远远快于一般的通用 CPU;芯片本身还集成了多种外设,诸如定时/计数器,A/D 转换器等,使得 TMS320F2407A 具有高速的信号实时处理和控制在功能,非常适合于电机的控制系统,系统的定时中断子程序是整个软件系统的核心,其原理如图 8 所示。

增量式光码盘输出的 A,B 脉冲信号送给 DSP 正交编码电路,不仅可以用来判定电机的转向,而且还作为控制 Buck/Boost 的开关信号。把光码盘每个周期内的 Z 脉冲数目送给 DSP 处理器就可以很准确的测得电机的转速,形成电机转速闭环,进行交流调速实验。

### 5 实验

把设计的 Halbach 样机接入到基于 DSP 2407A

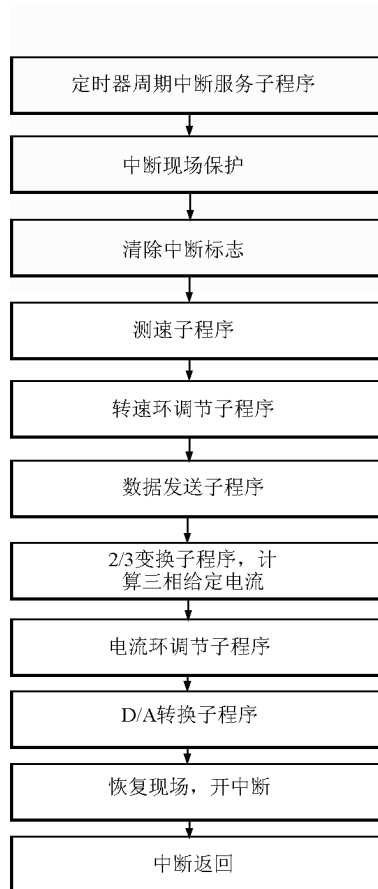


图 8 定时器中断程序

Fig. 8 Interrupt program of timer

的全数字电力驱动系统中进行性能测试实验。

图 9 为 Halbach 电机 A,B,C 三相反馈电流波形。从图中可以看出,三相电流幅值和相位差非常恒定,这说明样机性能良好。

图 10 为 Halbach 电机驱动汽车运转时其 A 相绕组给定电流和跟踪电流变化波形。从图中可以看出,在高速运行时(约为 2 100 rpm)电机 A 相反馈电流能很好地跟踪给定电流,这说明电力调速系统电流环性能良好。

图 11 为电机转速从 500 rpm 到 1 500 rpm 的转速闭环测试波形,从图中可以看出,在额定转速 1 500 rpm(速度在纵坐标上的单位为 500 rpm)时转速误差很小,不足 0.1 rpm,说明调速系统转速闭环性能良好。(转子频率和实际频率误差  $\Delta f$  为  $50.0024 - 50 = 0.0024$ ,  $\Delta n = 60\Delta f/p = 0.06$  rpm)

图 12 波形从上到下分别为普通永磁同步电机驱动汽车运行时速度和力矩电流变化波形。图 13 波形从上到下分别为 Halbach 电机驱动汽车运行时

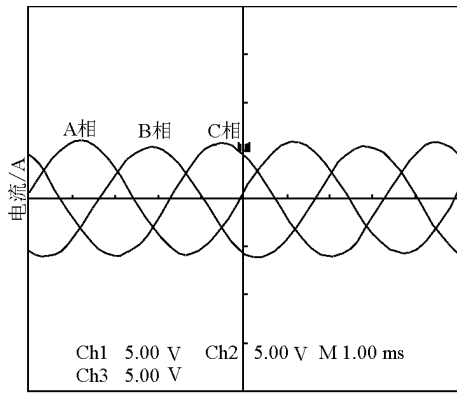


图 9 三相电流波形

Fig. 9 Three phase current waveforms

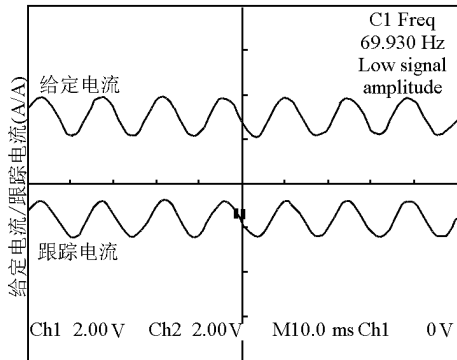


图 10 电流跟踪波形

Fig. 10 Current trace waveforms

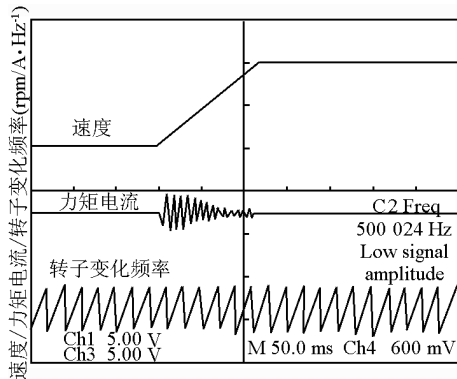


图 11 转速波形

Fig. 11 Speed waveforms

候速度和力矩电流变化波形。

由于本文采用直轴电流  $i_d = 0$  的矢量控制方式,所以力矩与力矩电流成正比,无论普通永磁电机还是 Halbach 电机在正常运转时力矩电流基本上成一条直线,只是在速度阶跃时有一定的震荡。

从图 12 和图 13 两种电机力矩电流波形对比中可以看出:Halbach 电机的力矩电流脉动更小,可以更好地抑制脉动转矩,减少汽车运行时噪声污染。

图 14 中曲线 2 和曲线 1 分别为 Halbach 永磁

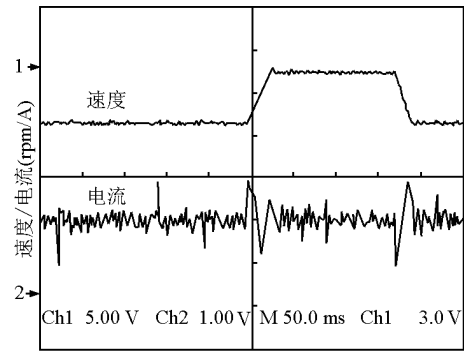


图 12 永磁电机速度 - 电流波形

Fig. 12 Speed - current waveforms of traditional PM

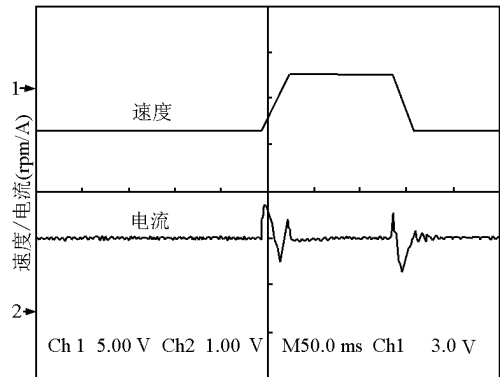


图 13 Halbach 电机速度 - 电流波形

Fig. 13 Speed - current waveforms of Halbach motor

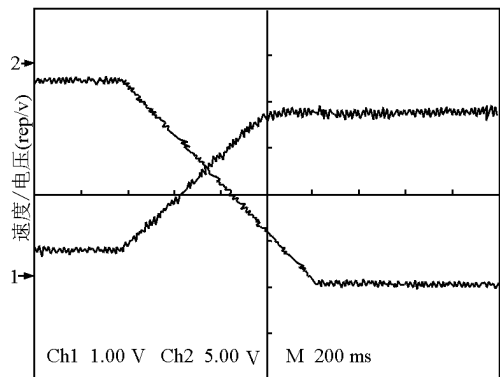


图 14 超级电容电压波形

Fig. 14 Voltage waveform of super - capacitor

同步电机制动时速度和超级电容电压变化波形。从图中可以看出,Buck 电路能很好地工作,超级电容的加入有效地吸收了电机制动时反馈的能量,有利于提高能量的利用率。当超级电容电压达到保护上限时,DSP 会切断 Buck 电路控制信号,同时开启泵升电路,以达到保护母线电压和超级电容的目的。

## 6 结语

1) Halbach 电机是一种新型永磁同步电机。相对于普通永磁同步电机而言, Halbach 电机气隙磁通密度大, 效率高, 有利于提高电机的功率密度和效率, 减小电机在混合动力系统中所占用的体积和损耗。

2) 实验结果证明 Halbach 电机相对于普通永磁电机脉动转矩更小, 笔者设计的全数字电力驱动系统可以使其更好地替代传统永磁电机而用在混合动力调速系统当中, 有利于进一步改善系统的调速性能。

3) 超级电容的加入有效地吸收了汽车制动时回馈的能量, 极大地提高了能源的利用率。

### 参考文献

[1] Halbach K. Design of permanent multiple magnets with oriented

rare earth cobalt material[J]. Nuclear instruments and methods, 1980, (169): 1 - 10

[2] Halbach K. Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1981, (187): 109 - 117

[3] Halbach K. Perturbation effects in segmented rare earth cobalt magnets[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1982, (198): 213 - 215

[4] Zhu Zhiqiang, Xia Z P, Atallah K. Powder alignment system for anisotropic bonded NDFeB Halbach cylinders[J]. IEEE, 2000, 36(5): 3349 - 3352

[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] 李钟明, 刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997

[7] 陈峻峰. 永磁电机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982

[8] 陈益广, 王颖, 沈勇环, 等. 宽调速可控磁通永磁同步电机磁路设计和有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 157 - 161

# Research of full-digital electric-driven system of new type hybrid electric vehicle

Sun Yukun, Zhang Haoming

(School of Electrical and Information Engineering, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

[Abstract] Motor needs high efficiency, high power density and low pulsating torque in hybrid electric vehicle, traditional motors have their limits; Halbach motor is a novel permanent magnet (PM) motor; One-sided and sinusoidal field is produced by special distribution of permanent magnets. The field can increase air-gap flux while decrease rotor-yoke flux and air-gap harmonic, which can improve power density and efficiency, reduce volume and pulsating torque of motor. Halbach motor design software based on MATLAB and finite element analysis software based on ANYAS reduce period of motor design greatly. Full-digital electric-driven system of hybrid electric vehicle based on DSP2407A is designed according to Halbach motor's distinguishing feature. Experiment results prove Halbach motor has much more advantages in the system than traditional permanent magnet motor.

[Key words] hybrid electric vehicle; electric-driven system; Halbach array; PM motor; finite element analysis; motor design