

# 48 V i-BSG 混合动力汽车电机设计与测试验证

胡勇<sup>1</sup>, 刘和平<sup>2</sup>, 邓晗<sup>1</sup>, 何志城<sup>1</sup>, 庞昌胜<sup>1</sup>

(1. 绵阳新华内燃机股份有限公司, 四川 绵阳 621000; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400030)

**摘要:** 48 V i-BSG(带传动的智能一体化起动/发电机)电机是汽车混合动力系统的核心零部件。电机具有起动、发电以及能量回收、动力辅助的功能,因此提升发动机低速区域的性能可以获得较好的排放与油耗指标。为了获得电机优良的性能指标,采用电磁学仿真软件,对电机的电磁结构进行优化设计。阐述了电机工作模式以及相应的控制策略。最后进行工程样机的制造和测试验证,结果表明电机性能达到设计指标。与法雷奥公司同类产品进行对比分析得出,在具备相同性能条件下,所设计电机有体积小、低成本等优点,为推向市场应用奠定了坚实的基础。

**关键词:** 混合动力汽车; 48 V i-BSG 电机; 电磁设计; 优化; 测试验证; 低成本

**中图分类号:** TM 346<sup>+.2</sup> **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)04-0097-06

**doi:** 10.12177/emca.2019.187

## Design and Test Verification of the 48 V i-BSG Motor for Hybrid Vehicle

HU Yong<sup>1</sup>, LIU Heping<sup>2</sup>, DENG Han<sup>1</sup>, HE Zhicheng<sup>1</sup>, PANG Changsheng<sup>1</sup>

(1. Mianyang Xinhua IC. Engine Co., Ltd., Mianyang 621000, China;

2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** 48 V i-BSG(intelligent belt driven starter generator) motor is one of the core parts in hybrid vehicle system. It has comprehensive functions of starting, generating, energy recovering and power assisting. Therefore, it can improve performance of low speed region of engine, which makes vehicle get better performance of emission and better fuel economy. In order to achieve excellent performance indicators, the design of motor's electromagnetism is optimized with the finite element software. The motor working model and control strategy are expounded in detail. A motor prototype is manufactured and successfully passes the test verification. The results of experiment show that the motor can realize the design objectives. Compared with Valeo's motor, it has the advantages of small volume and low cost, which lays a solid foundation for marketing.

**Key words:** hybrid vehicle; 48 V i-BSG motor; electromagnetism design; optimization; test verification; low cost

## 0 引言

随着 2020 年国家第六阶段机动车污染物排放标准的发布实施,国家强制要求汽车燃油消耗达 5 L/100 km。48 V i-BSG 电机轻混系统是实现该排放目标的技术路线之一,更由于在技术经济性方面的突出表现,使其成为 2025 年 4 L/100 km

目标的主流节能技术<sup>[1]</sup>。

目前,各大汽车零部件巨头博世、法雷奥等相继推出采用永磁同步方案的 48 V 电机轻混系统,并逐步推向市场<sup>[2]</sup>。2017 年 7 月,全新一代搭载 48 V 电机轻混系统的奥迪 A8 正式发布,该系统使全新 A8 功率提升了 16 马力,扭矩提升了 60 N·m,同时在 NEDC 工况测试下,新车油耗将

收稿日期: 2019-12-20; 收到修改稿日期: 2020-02-28

作者简介: 胡勇(1975—),男,硕士,高级工程师,研究方向为汽车电子控制、电动汽车电机驱动系统。

刘和平(1958—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电机拖动、电动汽车电机驱动、整车动力匹配。

有 0.7 L/100 km 的下降。新 A8 吹响了欧洲车企进军 48 V 混动市场的号角<sup>[3]</sup>。

本文所述的 48 V i-BSG 电机是交流异步感应电机,具有坚固耐用、成本低、调速性能好、转速高、体积小等优点,比永磁同步电机更能实现弱磁控制,高速时依然有较高的功率。控制器失效后没有制动作用,对发动机各传动部件起到很好的防护作用。因此,能很好实现混合动力汽车对电机的各项要求,为汽车节能减排提供一条经济可行的技术途径。

### 1 48 V i-BSG 电机的设计指标

根据某国际知名汽车零部件供应商要求,48 V i-BSG 电机在汽车上需要具有以下功能:(1)起停功能;(2)发电功能;(3)转矩辅助功能;(4)能量回收功能。性能参数指标如表 1 所示。

表 1 性能参数指标

参数名称	参数值	参数名称	参数值
工作电压/V	36~52	工作温度/℃	-40~120
效率/%	>82	起动扭矩/(N·m)	>50
额定功率/kW	>4	峰值功率	>10 kW@5 s
发电额定功率/kW	>4.5	发电峰值功率	>12 kW@5 s
最高转速/(r·min <sup>-1</sup> )	18 000	散热形式	风冷

## 2 48 V i-BSG 电机结构优化设计及仿真优化

### 2.1 电机结构初步设计

通过分析研究功能与参数指标,确定电机为四极交流异步感应变频调速电机,采用铸铝端环转子确保高速电机低涡流损耗<sup>[4]</sup>,定子绕组为双层叠绕。为了达到结构紧凑以及用户需求即直接安装在原有发电机位置的目的,比对电机型谱图<sup>[5]</sup>初步选取铁心冲片三圆。定子冲片内外径、转子冲片内径及铁心长度如表 2 所示。

表 2 电机初始尺寸

参数名称	参数值
定子内径/mm	56
定子外径/mm	146
转子外径/mm	55
转子内径/mm	30
铁心长度/mm	50

图 1 所示为电机初步方案设计图。由前后端盖、定子、转子、矢量控制器及铝基散热器等组成,矢量控制器与电机设计为一体。

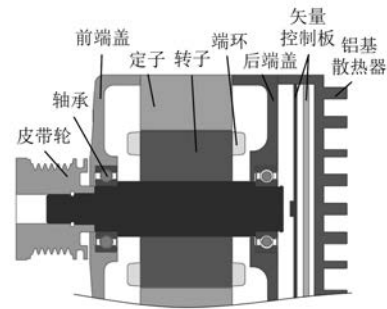


图 1 电机初始结构

### 2.2 电磁仿真验证及优化

电机的电磁设计是保证电机性能充分发挥的关键步骤之一,利用电磁场有限元分析软件进行仿真优化设计是提升电机电磁设计能力的一条有效途径<sup>[6]</sup>。

把表 2 的设计数据导入到仿真软件中进行仿真,计算结果如图 2~图 4 所示。

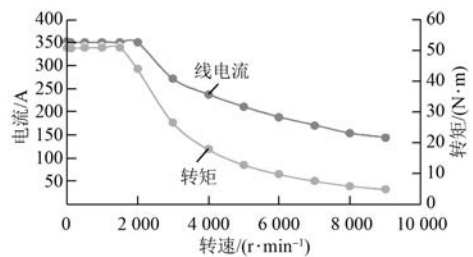


图 2 电流转矩曲线

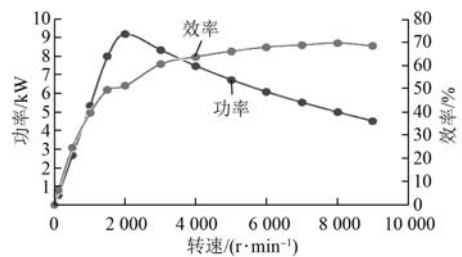


图 3 功率效率曲线

仿真计算结果表明,电机最大转矩为 48 N·m,峰值功率为 9 kW,尚未达到设计指标要求。尤其是电机最高效率仅有 68%,远远低于设计目标。图 4 的磁通密度显示最大磁饱和密度为

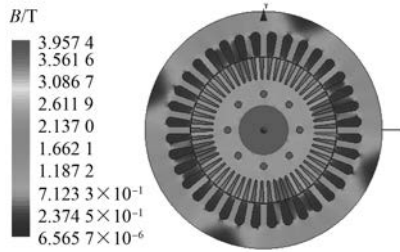


图4 磁通密度

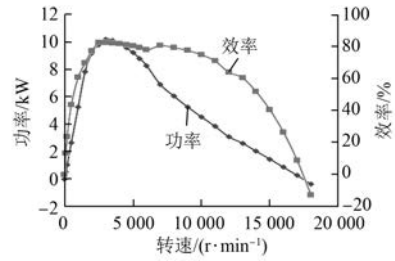


图6 优化后功率效率曲线

3.95 T,电机磁路饱和程度较高,空载电流会急剧增加,容易造成电机过热损坏,缩短使用寿命。因此,需对初步设计的电机尺寸方案进行调整优化,以满足设计要求。

根据仿真计算结果以及变频电机设计的一些特殊要求,重新对电机的三圆尺寸进行了确定,并反复在仿真软件中仿真计算,确定电机最终三圆尺寸如表3所示。

表3 电机最终三圆尺寸

参数名称	参数值
定子内径/mm	90
定子外径/mm	146
转子外径/mm	89
转子内径/mm	30
铁心长度/mm	80

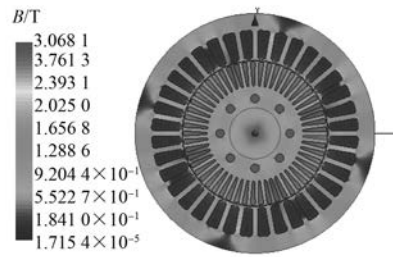


图7 优化后磁通密度

优化后的仿真结果如图5、图6、图7所示。

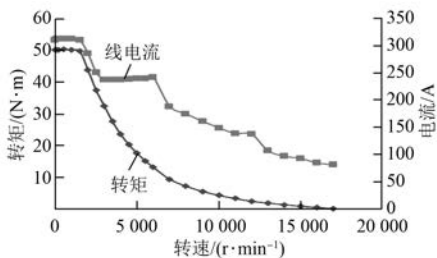


图5 优化后电流转矩曲线

仿真计算结果表明,电机最大转矩为50.5 N·m,峰值功率为10.6 kW,电机最大效率提升到85%。图7的磁通密度显示最大磁饱和密度为3.06 T,电机磁路饱和程度减轻,满足变频电机的要求。

### 2.3 机械结构优化设计

根据电机电磁计算的结果,定子铁心的长度从50 mm增加到80 mm,但长度的增加直接导致

电机在原有发电机的安装位置安装,在发动机上需要做大的改动,这是用户所不允许的。

图8所示为优化后的电机机械结构示意图。

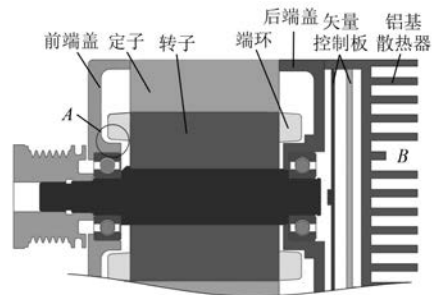


图8 优化后的电机机械结构示意图

为了控制电机总长,避免与发动机干涉,新的结构设计有两处亮点:

(1) 图8中A处,电机前后轴承位置深入到转子端环内部,使电机定子铁心长度增长不会影响电机总长度。

(2) 在不超出电机总长度的约束尺寸下,增长了铝基板散热筋的高度,如图8中B处,使其散热面积增大,有效减轻了矢量控制器 Mosfet 开关管的热负荷,提升了电路可靠性与寿命。

### 2.4 电机散热结构设计

48 V i-BSG 电机工作在密闭的发动机舱,且频繁的起停,热负荷较重,因此电机的散热设计不

能按常规结构进行设计。该设计方案取消定子外壳,利用定子的外圆异形设计出散热筋,如图9所示。



图9 定子外形

定子芯片每10片叠加为一组,厚度为3.5 mm,压装定子时,每相邻一组定子芯片旋转90°进行压装,最终形成的结构在定子表面就会突出相应的散热筋。图10所示为定子每隔3.5 mm的剖面,黑色区域为空气间隙。

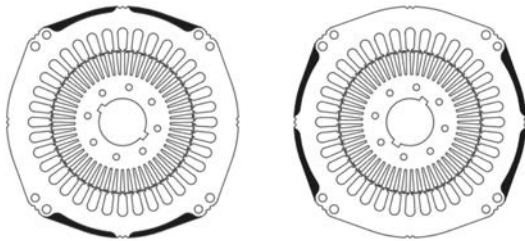


图10 叠片组装

### 3 48 V i-BSG 电机软硬件设计

#### 3.1 软硬件设计

48 V i-BSG 电机软硬件采用以下几个亮点设计:

- (1) 采用TI公司高性能32位数字处理器。
- (2) 采用Mosfet 24管并联技术,承受大电流,高开关频率,可靠保障电机空间矢量脉宽调制(SVPWM)调速控制。
- (3) 磁环加霍尔电流检测技术,实现低成本、高精度、高可靠性。
- (4) 设计电机三相过流、母线过流的硬件保护。
- (5) 无传感控制技术,当编码器失效后,可通过数字信号处理器算法实现电机转速的获取。
- (6) 采用特定的定子磁链观测器设计,应用到转矩控制中<sup>[7]</sup>。

#### 3.2 48 V i-BSG 电机工作模式与软件控制策略

整车控制器VCU根据发动机及整车的状态,指令电机进入相应的工作模式执行相应的动作。因此,电机需具备以下4种工作模式。

(1) 空运行模式。该模式下电机不执行任何动作输出,只等待VCU指令,类似于发动机的怠速状态。

(2) 起动模式。为了获得优良的起动性能与舒适性,需要快速起动且平顺切换发动机动力。起动过程分为起动爬坡与转速稳定2个阶段。起动模式控制参数如表4所示。

表4 起动模式控制参数

参数名称	参数值
起动最终速度/(r·min <sup>-1</sup> )	3 000
起动速度斜率/(r·min <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	4 000~8 000
稳定速度时间/ms	1 500
起动扭矩限制/(N·m)	55

起动最终速度值保证拖动发动机转速达到约1 100 r/min(电机与曲轴传动比为2.7)。起动速度斜率保证起动过程的快速性。稳定速度期间发动机喷油器工作,平稳切换动力。起动扭矩限制是防止过大的起动扭矩损坏发动机。

(3) 发电模式。发电是i-BSG电机一个主要的功能。电机处于发电状态时需注意发电电压在合理范围。由于在发电状态电机要获取发动机由机械能转换成的电能,实质对发动机有制动作用,在模式转换过程中需平滑过渡,以免突然增加的负载损坏发动机附件轮系系统以及影响舒适性。需要通过正负斜坡函数平滑地切入与退出,负载渐进变化。发电模式控制参数如表5所示。

表5 发电模式控制参数

参数名称	参数值
发电电压设定值/V	20~52
发电速度范围/(r·min <sup>-1</sup> )	1 500~18 000
负斜坡函数斜率设定值/(N·m·s <sup>-1</sup> )	-1 200~0
正斜坡函数斜率设定值/(N·m·s <sup>-1</sup> )	0~1 200
发电扭矩限定值/(N·m)	-35

(4) 转矩辅助模式。该模式与发电模式有相同的要求,切入与退出要平滑过渡。转矩辅助模式分为2个转速段,0~1 500 r/min阶段只有助力发动机工作;1 500~12 000 r/min阶段不但有助

力发动机,还有再生制动的辅助,因此会产生负转矩。各阶段的软件参数设定如表6、表7所示。

表6 转矩辅助模式控制参数

参数名称	参数值
电压范围/V	24~52
转矩设定/(N·m)	0~55
正斜坡函数斜率设定值/(N·m·s <sup>-1</sup> )	0~1 500

表7 转矩辅助模式控制参数

参数名称	参数值
电压范围/V	36~52
转矩设定/(N·m)	-40~40
正斜坡函数斜率设定值/(N·m·s <sup>-1</sup> )	0~1 500
负斜坡函数斜率设定值/(N·m·s <sup>-1</sup> )	-1 500~0

## 4 48 V i-BSG 电机样机试制与测试

### 4.1 电机样机

电机样机严格按照前述优化设计方案进行加工制造,制造过程中对定转子冲片、转子浇铸进行开模,确保各关键零部件尺寸及性能。

图11所示为电机工程样机整机及相关零部件图。

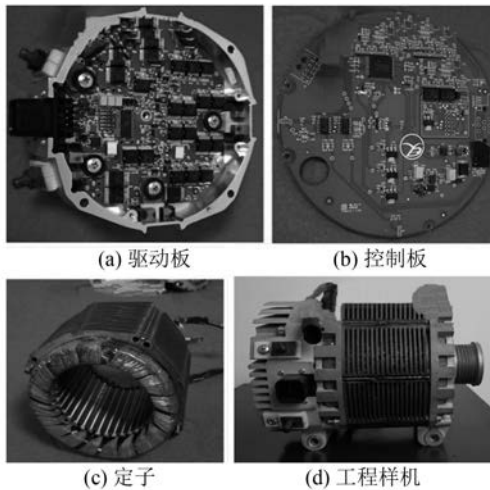


图11 工程样机及零部件

### 4.2 试验

测试验证均在自行设计的综合测试台上进行,如图12所示。15 kW电机(峰值功率45 kW)测试时施加负载,2个控制器共48 V直流母线,形成电动和发电能量闭环。测试均参照GB T 18488.2—2015《电动汽车用驱动电机系统第2部分:试验方法》。

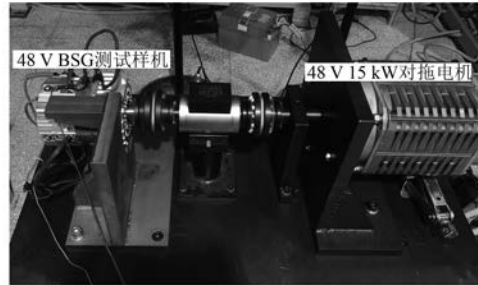


图12 测试台

BSG电机额定电动特性曲线如图13所示。由图13可以看出,电机额定最大功率在6 300 r/min时达到5.4 kW,最大效率点在转速为3 400 r/min时,系统效率为79%。控制器效率约为95%,测算出电机效率约为83.2%,电机额定功率>4 kW,电机效率>82%,满足设计指标。

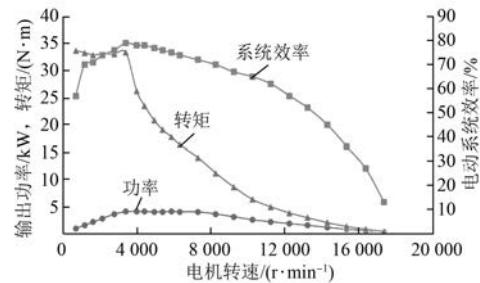


图13 额定电动特性曲线

图14所示为电机电动峰值特性曲线。由图14可以看出,电机峰值输出功率在2 000 r/min附近达到峰值10.24 kW,电动峰值输出功率>10 kW,满足设计指标。

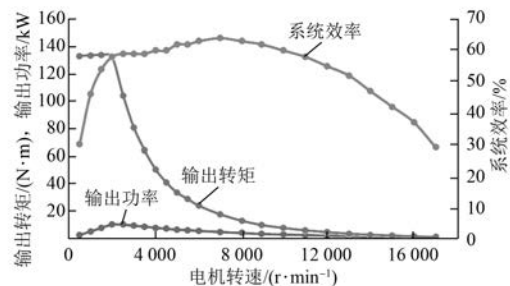


图14 峰值电动特性曲线

图15所示为电机额定发电特性曲线。由图15可以看出,电机最大效率点在转速为4 300 r/min时,系统效率为79.65%。控制器效率约95%,测算出电机效率约为83.8%。电机在3 000~15 000 r/min,发电功率基本维持在额定功

率 4.5 kW 附近,具有较好的发电能力。电机额定发电功率为 4.5 kW,发电效率>82%,满足设计指标。

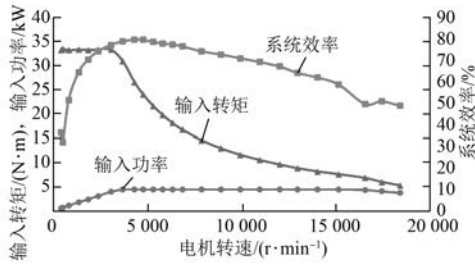


图 15 额定发电特性曲线

图 16 所示为电机峰值发电特性曲线。由图 16 可以看出,电机峰值发电功率在 4 000 r/min 时达 12.2 kW,电机发电峰值功率满足设计指标。

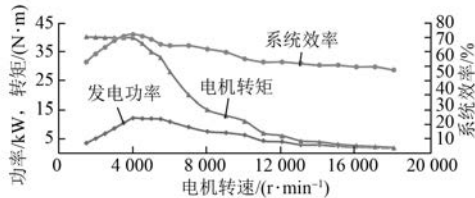


图 16 峰值发电特性曲线

图 17 所示为电机堵转特性曲线。由图 17 可以看出,电机最大扭矩对应频率点为 9 Hz,其值为 51.85 N·m,大于设计指标 50 N·m,此时机械出力可高达 140 N·m,保证发动机平稳快速起动以及短时动力辅助。

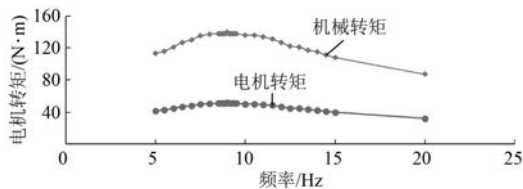


图 17 堵转特性曲线

### 4.3 与法雷奥 48 V i-BSG 电机性能对比

法雷奥 48 V i-BSG 电机采用永磁爪极结构。本文设计的 48 V i-BSG 电机与法雷奥电机的性能参数对比如表 8 所示。

由表 8 数据对比可看出,在性能参数相当的情况下,本文所设计产品尺寸小,利于发动机安装布置,且采用无稀土材料电机结构,成本低,利于市场推广。

表 8 性能参数对比

参数名称	新华	法雷奥
尺寸/mm	Ø155×181	Ø155×189
质量/kg	11.0	10.5
额定功率/kW	4	4
峰值功率/kW	10	10
最大扭矩/(N·m)	50.5	55
最高转速/(r·min <sup>-1</sup> )	18 000	18 000

## 5 结 语

本文根据客户提出的技术要求,设计出采用交流异步方案的 48 V i-BSG 电机。设计及测试结果表明:

- (1) 工程样机均能达到技术参数指标,并具有起停、发电、转矩辅助、再生制动等功能。
- (2) 电磁软件的分析计算,有效提高了电机电磁结构设计的效率与准确性,设计方法可行。
- (3) 电机在高转速时依然有较高功率,12 000 r/min 时有接近 2 kW 的功率输出。
- (4) 该项目电机和控制器的设计技术对新能源电机及电控的设计具有较好的指导价值。

### 【参考文献】

- [1] 大陆集团.大势所趋,顺势而为,48 V 中混系统将成为汽车的标准配置[J].汽车零部件,2015(12): 87.
- [2] 搜狐网:法雷奥将 48 V 进行到底,目标中国市场第一[DB/OL].[https://www.sohu.com/a/258478517\\_352084](https://www.sohu.com/a/258478517_352084),2018-10-19/2019-12-20.
- [3] 汽车江湖:配备 48 V 混动系统全新奥迪 A8 于 11 日首发[DB/OL].<http://www.qc188.com/news/201707/8285.html>,2017-07-11/2019-12-20.
- [4] 梁艳萍,李伟,王泽宇,等.高速感应电机转子涡流损耗的计算方法及影响因素[J].电机与控制学报,2019,23(5): 42.
- [5] 杨万青,陈兴卫.电机实用设计技术[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [6] 刘慧娟.Ansoft Maxwell 13 电机电磁场实例分析[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [7] 潘月斗,陈涛,陈泽平.感应电机 Super-twisting 算法定子磁链观测器设计[J].电机与控制学报,2016,20(5): 60.