

# 基于转速耦合的适配功率电机动力性能分析计算<sup>\*</sup>

关玉明, 李 曾, 郜云鹏, 崔 佳, 赵 越  
(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300000)

**摘 要:** 适配功率电机是一种适用于城市重载电动汽车的新型驱动电机, 具有转速耦合的特点。以 6 极适配功率电机为研究对象, 阐述了适配功率电机设计原理及适用工况, 运用电磁场理论及电机学理论知识, 对适配功率电机动力输出性能进行对比分析计算, 计算得出同一转速下减匝工作状态更能节约车载有限电能, 并运用仿真分析软件进行验证。同时研究结果表明, 与满匝工作状态相比, 适配功率电机工作在减匝状态的机械特性更硬。最后, 通过样机试验例证了以上理论计算与仿真分析的正确性, 证明该电机设计模型是可行的。

**关键词:** 适配功率电机; 转速耦合; 机械特性; 电磁场理论; 仿真分析; 样机试验

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)09-0022-07

## Dynamic Characteristics Analysis and Calculation of Adaptive Power Motor Based on Speed Coupling<sup>\*</sup>

GUAN Yuming, LI Zeng, XI Yunpeng, CUI Jia, ZHAO Yue

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** Adaptive power motor is a new type of driving motor, which is suitable for urban heavy load electric vehicle, and has the characteristics of speed coupling. For a 6 poles adaptive power motor, the design principle and the suitable operating mode were described. By using electromagnetic theory and motor learning theory knowledge, the power output performance of the adaptive power motor was analyzed and calculated, concluding that the reduced turn working condition under the same speed could save more electric energy on the vehicle, which was verified by the simulation analysis software. At the same time, the results showed that, compared with the full turn working state, the mechanical characteristics of the adaptive power motor operating in the state of reduced turn was more hard. Finally, the correctness of the theoretical calculation and the simulation analysis was proved by the prototype test, which proved that the design model of the motor was feasible.

**Key words:** adaptive power motor; speed coupling; mechanical characteristics; electromagnetic theory; simulation analysis; prototype test

## 0 引 言

在全球能源与环境问题备受关注的大环境下, 电动汽车因具有噪声低、能源利用率高、零尾气排放等特点成为我国重点支持的节能减排措施之一<sup>[1-2]</sup>。目前我国电动汽车在其关键技术领域已经取得突破性进展, 电动汽车商业化发展日趋成熟。我国政府十分重视电动汽车的发展, 国家

《节能与新能源汽车产业规划》明确规定把纯电动汽车作为汽车产业的主要战略发展方向, 可见电动汽车在我国具有很好的发展前景, 也定会成为 21 世纪主要的绿色新能源交通工具<sup>[3]</sup>。

本文围绕城市道路上的重载型电动汽车, 提出了一种适用于城市重载电动汽车的适配功率电机。该电机根据电动汽车的行驶工况输出不同的功率以实现电动汽车的转速耦合, 在保证为城市

<sup>\*</sup> 基金项目: 融合 TRIZ 的产品全流程专利规避创新设计机理研究(51605135)

作者简介: 关玉明(1957—), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为机电一体化成套设备及关键部件。

李 曾(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市重载电动汽车用适配功率电机及其控制、电机试验。

重载电动汽车提供足够动力的前提下,显著提高电动汽车的速度,实现车载有限电能的充分利用。针对该适配功率电机,本文将解析法和有限元法相结合,对其物理结构及机械特性进行了阐述,从电机电磁场的角度对该电机的动力输出性能进行对比分析和计算,并运用仿真软件建立电机模型对适配功率电机进行仿真分析,对研究结果进行对比验证。最后,通过电机试验平台对样机进行试验,验证理论分析的正确性及该电机的可行性。

## 1 适配功率电机

### 1.1 电机结构

适配功率电机的原型结构为永磁直流电机,因此其工作原理与传统直流电机工作原理类似:转子电枢绕组通电后产生磁场,与定子永磁体相互作用并推动转子旋转。其不同点在于适配功率电机的结构存在两组换向装置且可以单独工作,由于各组换向装置所连接的电枢线圈匝数不同,使得驱动电机输出不同的转矩<sup>[4]</sup>。即通过改变电枢绕组的匝数  $N$  来改变电机的固有机机械特性,从而输出不同转矩。

传统永磁直流电机的机械特性硬度是固定的<sup>[5]</sup>。永磁直流电机机械特性表达式如下:

$$n = \frac{60a}{pN} \cdot \frac{U}{\phi} - \frac{120\pi a}{p^2 N^2} \cdot \frac{R_a}{\phi^2} T \quad (1)$$

式中:  $n$ ——电机转速;

$a$ ——并联支路数;

$p$ ——电机极对数;

$N$ ——电枢线圈匝数;

$U$ ——电机端电压;

$\phi$ ——磁通;

$R_a$ ——电机电阻;

$T$ ——电机电磁转矩。

现改变电枢绕组的匝数  $N$ , 由式(1)可得适配功率电机机械特性表达式如下:

$$\begin{cases} n = \frac{60a}{pN_m} \cdot \frac{U}{\phi} - \frac{120\pi a}{p^2 N_m^2} \cdot \frac{R_m}{\phi^2} T, & n \leq n_e \\ n = \frac{60a}{pN_j} \cdot \frac{U}{\phi} - \frac{120\pi a}{p^2 N_j^2} \cdot \frac{R_j}{\phi^2} T, & n > n_e \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $n_e$ ——适配功率电机转速耦合点;

$N_m$ ——满匝电枢线圈匝数;

$N_j$ ——减匝电枢线圈匝数;

$R_m$ ——满匝电机总电阻;

$R_j$ ——减匝电机总电阻。

由式(2)可知,在转速  $n_e$  以下,由  $N_m$  匝数组成的电枢绕组工作;在转速  $n_e$  以上,由  $N_j$  匝数组成的电枢绕组工作。因此,适配功率电机通过改变不同匝数电枢绕组的工作状态,实现不同转矩-转速的输出。该电机的整体结构图如图1所示。

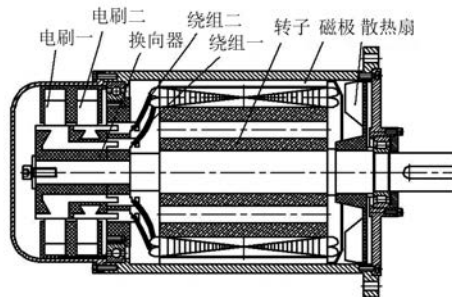


图1 电机结构图

### 1.2 转速耦合

适配功率电机通过电机控制器接收的速度信号,在指定的转速点改变接入的电枢绕组,使电机表现出不同的机械特性,达到更宽范围改变电机转速的目的。这一过程即为适配功率电机转速耦合的特点。

对于式(2),  $N_m > N_j$ , 在其他条件不变的前提下,电枢线圈匝数由  $N_m$  转换为  $N_j$ , 可以提高电机的最高转速。在电动汽车启动时,由  $N_m$  匝数组成的电枢绕组接入电路,提供较大转矩,克服阻力转矩保证电动汽车启动;当适配功率电机的转速达到  $n_e$  后,通过电机控制器转换为由  $N_j$  匝数组成的电枢绕组,从而使电机以较低的电压达到较高的转速,实现适配功率电机的转速耦合过程。由式(2)可知,适配功率电机的转速耦合使该电机表现出低速动力强劲、动力补充、提高转速等特点。该特点也正是其适用于城市重载电动汽车的关键所在。

## 2 电磁功率计算

电磁功率由转子电枢电流与定子磁场磁通相互作用而产生<sup>[6]</sup>。从物理本质看,电机磁场是机械系统和电系统联系的媒介,是电磁功率产生的根源<sup>[7]</sup>。因此,利用麦克斯韦理论从磁场的角度对适配功率电机的电磁功率进行研究。

由麦克斯韦方程式(3)可知

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (3)$$

麦克斯韦电磁场理论认为电场和磁场可相互转化,实现电能到机械能的转化<sup>[8]</sup>。在电磁能量传递的过程中,电机的电磁能量主要是气隙中的磁场储能,因此,可通过对气隙电磁功率的计算来衡量适配功率电机的电磁功率输出<sup>[9]</sup>。假设电机气隙中的电场只存在轴向分量  $E_z$ , 磁场则只存在径向分量  $H_r$  和周向分量  $H_\theta$ , 因此,在单位时间内,穿过与能流方向相垂直的单位面积上的能量为<sup>[10]</sup>

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = E_z \mathbf{I}_z \times (H_r \mathbf{I}_r + H_\theta \mathbf{I}_\theta) = -E_z H_\theta \mathbf{I}_r + E_z H_r \mathbf{I}_\theta \quad (4)$$

即电机气隙径向电磁能量流和周向电磁能量流的大小为

$$S_r = -E_z H_\theta \quad (5)$$

$$S_\theta = E_z H_r \quad (6)$$

其中式(6)的  $S_\theta$  分量在气隙中周向循环流动,不参与能量转换,因此对  $S_r$  分量着重进行研究。式(5)中:

$$E_z = vB_r = \Omega r \mu_0 H_r = \mu_0 \frac{\omega}{p} r H_r \quad (7)$$

其中:  $\omega = 2\pi f$

式中:  $\Omega$ ——磁场的机械角速度;

$r$ ——电机轴心到计算点的径向距离,如图2所示;

$p$ ——极对数,  $p=3$ 。

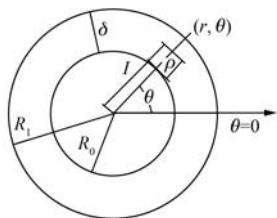


图2 适配功率电机极坐标系

将式(7)代入式(5):

$$S_r = -\mu_0 \frac{\omega}{p} r H_r H_\theta \quad (8)$$

由式(8)可知,欲实现适配功率电机的动力输出,要求径向分量  $H_r$  和周向分量  $H_\theta$  均不为零。

由电机电磁场理论,电机带负载转动时,  $H_r$  和  $H_\theta$  由定子永磁极和转子电枢电流的磁动势  $F_1$ 、 $F_2$  (均为基波磁动势幅值) 共同提供。磁场强度各分量的表达式如下<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} H_{rd} = -\frac{F_1 p}{R_1} \frac{1 + \left(\frac{R_0}{r}\right)^{2p}}{1 - \left(\frac{R_0}{R_1}\right)^{2p}} \left(\frac{r}{R_1}\right)^{p-1} \sin(p\theta) \\ H_{\theta d} = -\frac{F_1 p}{R_1} \frac{1 - \left(\frac{R_0}{r}\right)^{2p}}{1 - \left(\frac{R_0}{R_1}\right)^{2p}} \left(\frac{r}{R_1}\right)^{p-1} \cos(p\theta) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} H_{rz} = -\frac{F_2 p}{R_0} \frac{1 + \left(\frac{R_1}{r}\right)^{2p}}{1 - \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^{2p}} \left(\frac{r}{R_0}\right)^{p-1} \sin[p(\theta + \varphi)] \\ H_{\theta z} = -\frac{F_2 p}{R_0} \frac{1 - \left(\frac{R_1}{r}\right)^{2p}}{1 - \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^{2p}} \left(\frac{r}{R_0}\right)^{p-1} \cos[p(\theta + \varphi)] \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\varphi$  为磁动势基波间空间相位差;其余各量含义如图2所示。其中式(9)为定子磁动势提供,式(10)为转子磁动势提供。

根据磁路的欧姆定律<sup>[12]</sup>,转子电枢电流产生磁动势为

$$F_2 = Hl = Ni \quad (11)$$

由式(11)可知,当适配功率电机由满匝工作状态转换为减匝工作状态,满匝工作时磁动势  $F_{2m}$  大于减匝工作时磁动势  $F_{2j}$ , 即

$$F_{2m} > F_{2j} \quad (12)$$

另外,当由满匝工作状态转换为减匝工作状态时,相关参数的变化如表1所示。

表1 参数变化

| 工作状态       | 满匝         |   | 减匝         |
|------------|------------|---|------------|
| 绕组匝数       | $N_m$      | > | $N_j$      |
| 转子半径       | $R_{0m}$   | > | $R_{0j}$   |
| 气隙宽度       | $\delta_m$ | < | $\delta_j$ |
| 计算点到转子边界距离 | $\rho_m$   | < | $\rho_j$   |

对于适配功率电机,结合式(9)、式(10)可得

$$\begin{pmatrix} H_{rm} \\ H_{\theta m} \\ H_{rj} \\ H_{\theta j} \end{pmatrix} = -\frac{3F_1}{R_1} \left(\frac{r}{R_1}\right)^2 \begin{pmatrix} \frac{1 + \left(\frac{R_{0m}}{r}\right)^6}{1 - \left(\frac{R_{0m}}{R_1}\right)^6} \sin(3\theta) \\ \frac{1 - \left(\frac{R_{0m}}{r}\right)^6}{1 - \left(\frac{R_{0m}}{R_1}\right)^6} \cos(3\theta) \\ \frac{1 + \left(\frac{R_{0j}}{r}\right)^6}{1 - \left(\frac{R_{0j}}{R_1}\right)^6} \sin(3\theta) \\ \frac{1 - \left(\frac{R_{0j}}{r}\right)^6}{1 - \left(\frac{R_{0j}}{R_1}\right)^6} \cos(3\theta) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{3F_{2m}}{R_{0m}} \frac{1 + \left(\frac{R_1}{r}\right)^6}{1 - \left(\frac{R_1}{R_{0m}}\right)^6} \left(\frac{r}{R_{0m}}\right)^2 \sin[3(\theta + \varphi)] \\ -\frac{3F_{2m}}{R_{0m}} \frac{1 - \left(\frac{R_1}{r}\right)^6}{1 - \left(\frac{R_1}{R_{0m}}\right)^6} \left(\frac{r}{R_{0m}}\right)^2 \cos[3(\theta + \varphi)] \\ -\frac{3F_{2j}}{R_{0j}} \frac{1 + \left(\frac{R_1}{r}\right)^6}{1 - \left(\frac{R_1}{R_{0j}}\right)^6} \left(\frac{r}{R_{0j}}\right)^2 \sin[3(\theta + \varphi)] \\ -\frac{3F_{2j}}{R_{0j}} \frac{1 - \left(\frac{R_1}{r}\right)^6}{1 - \left(\frac{R_1}{R_{0j}}\right)^6} \left(\frac{r}{R_{0j}}\right)^2 \cos[3(\theta + \varphi)] \end{pmatrix} \quad (13)$$

如图 2 所示, 由于  $\rho \leq \delta \ll R_0 < R_1$ , 因此  $\rho$ 、 $(\delta - \rho)$ 、 $\delta$ 、 $\rho^2$ 、 $(\delta - \rho)^2$ 、 $\delta^2$  和  $r$ 、 $R_0$ 、 $R_1$ 、 $r^2$ 、 $R_0^2$ 、 $R_1^2$  相比可以忽略, 化简式(13):

$$\begin{pmatrix} H_{rm} \\ H_{\theta m} \\ H_{rj} \\ H_{\theta j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{F_1 R_{0m} r}{R_1^2 \delta_m} \sin(3\theta) + \frac{F_{2m} R_1 r}{R_{0m}^2 \delta_m} \sin[3(\theta + \varphi)] \\ -\frac{3F_1 \rho_m r}{R_1^2 \delta_m} \cos(3\theta) - \frac{3F_{2m} (\delta_m - \rho_m) r}{R_{0m}^2 \delta_m} \cos[3(\theta + \varphi)] \\ -\frac{F_1 R_{0j} r}{R_1^2 \delta_j} \sin(3\theta) + \frac{F_{2j} R_1 r}{R_{0j}^2 \delta_j} \sin[3(\theta + \varphi)] \\ -\frac{3F_1 \rho_j r}{R_1^2 \delta_j} \cos(3\theta) - \frac{3F_{2j} (\delta_j - \rho_j) r}{R_{0j}^2 \delta_j} \cos[3(\theta + \varphi)] \end{pmatrix} \quad (14)$$

将式(14)代入式(8), 并化简可得到满匝工 作状态和减匝工作状态的径向电磁能量流

$$\begin{cases} S_{rm} = \frac{\mu_0 \omega r^3}{2\delta_m^2} \left\{ -\frac{F_1^2 R_{0m} \rho_m}{R_1^4} \sin(6\theta) - \frac{F_1 F_{2m} (\delta_m - \rho_m)}{R_1^2 R_{0m}} [\sin(6\theta + 3\varphi) - \sin(3\varphi)] + \right. \\ \left. \frac{F_1 F_{2m} \rho_m}{R_{0m}^2 R_1} [\sin(3\varphi) + \sin(6\theta + 3\varphi)] + \frac{F_{2m}^2 R_1 (\delta_m - \rho_m)}{R_{0m}^4} \sin(6\theta + 6\varphi) \right\} \\ S_{rj} = \frac{\mu_0 \omega r^3}{2\delta_j^2} \left\{ -\frac{F_1^2 R_{0j} \rho_j}{R_1^4} \sin(6\theta) - \frac{F_1 F_{2j} (\delta_j - \rho_j)}{R_1^2 R_{0j}} [\sin(6\theta + 3\varphi) - \sin(3\varphi)] + \right. \\ \left. \frac{F_1 F_{2j} \rho_j}{R_{0j}^2 R_1} [\sin(3\varphi) + \sin(6\theta + 3\varphi)] + \frac{F_{2j}^2 R_1 (\delta_j - \rho_j)}{R_{0j}^4} \sin(6\theta + 6\varphi) \right\} \end{cases} \quad (15)$$

结合电磁功率计算公式

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^l S_r r d\theta dz. \quad (16)$$

式中:  $l$ ——电枢铁心长度。

将式(15)代入式(16), 求得适配功率电机在

满匝工作状态电磁功率为

$$P_m = \frac{F_{2m}}{\delta_m^2} \left( \frac{2}{R_1 r} - \frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{r^2} \right) \pi \mu_0 \omega r^4 l F_1 \sin(3\varphi) +$$

$$\frac{F_{2m}}{\delta_m} \frac{\pi \mu_0 \omega r^2 l}{R_1} F_1 \sin(3\varphi)$$

(17)

减匝工作状态电磁功率为

$$P_j = \frac{F_{2j}}{\delta_j^2} \left( \frac{2}{R_1 r} - \frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{r^2} \right) \pi \mu_0 \omega r^4 l F_1 \sin(3\varphi) + \frac{F_{2j}}{\delta_j} \frac{\pi \mu_0 \omega r^2 l}{R_1} F_1 \sin(3\varphi)$$

(18)

由式(12)、式(17)、式(18)以及表1可得

$$P_m > P_j$$

(19)

由以上计算及式(19)得出,对于适配功率电机,在同一速度下相比于满匝工作状态时电机输出的电磁功率,减匝工作状态时电机输出的电磁功率更低。虽然满匝工作状态能提供城市重载电动汽车更强劲的动力,但当负载较小可以直接在减匝状态起动,或者当减匝工作状态足以提供相应速度动力时,及时进行转速耦合均可以节约车载有限电能,提高城市重载电动汽车单次充电后的工作能力。

3 电机仿真分析

适配功率电机结构参数如表2所示。

表2 电机结构参数

| 参数名称      | 参数值   |
|-----------|-------|
| 定子外径/mm   | 190   |
| 定子内径/mm   | 168   |
| 定子长度/mm   | 330   |
| 磁极极对数     | 3     |
| 磁极径向长度/mm | 8     |
| 磁极轴向长度/mm | 152   |
| 极弧系数      | 0.7   |
| 槽数        | 30    |
| 电枢直径/mm   | 150   |
| 电枢长度/mm   | 152   |
| 换向片外径/mm  | 138   |
| 换向片内径/mm  | 98/60 |

适配功率电机的定子外套材料采用铸钢,永磁体材料采用钕铁硼永磁材料,建立适配功率电机模型如图3所示。

3.1 电磁功率

运用仿真分析软件 Ansys Maxwell 对适配功

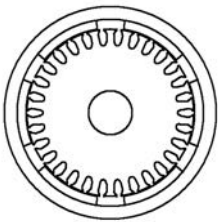


图3 适配功率电机模型

率电机工作参数进行仿真运算,适配功率电机在额定工况下,电磁功率随转速的变化情况如图4所示。

|    | $n/(r \cdot \min^{-1})$ | $P/kW$<br>Setup1: Performance |
|----|-------------------------|-------------------------------|
| 17 | 282.270000              | 3.950406                      |
| 18 | 299.912000              | 4.075088                      |
| 19 | 317.553000              | 4.185313                      |
| 20 | 335.195000              | 4.281067                      |
| 21 | 352.834000              | 4.362336                      |
| 22 | 370.479000              | 4.429109                      |
| 23 | 388.121000              | 4.481371                      |
| 24 | 405.763000              | 4.519110                      |
| 25 | 423.404000              | 4.542312                      |
| 26 | 441.046000              | 4.550964                      |

(a) 满匝工作状态

|    | $n/(r \cdot \min^{-1})$ | $P/kW$<br>Setup1: Performance |
|----|-------------------------|-------------------------------|
| 11 | 276.562000              | 2.583398                      |
| 12 | 304.218000              | 2.771420                      |
| 13 | 331.875000              | 2.946617                      |
| 14 | 359.531000              | 3.108978                      |
| 15 | 387.187000              | 3.258493                      |
| 16 | 414.843000              | 3.395152                      |
| 17 | 442.499000              | 3.518945                      |
| 18 | 470.156000              | 3.629861                      |
| 19 | 497.812000              | 3.727891                      |
| 20 | 525.468000              | 3.813024                      |

(b) 减匝工作状态

图4 电磁功率-转速变化

对比图4所示电磁功率随转速的变化趋势可知,相同速度下减匝工作状态电磁功率输出要小于满匝工作状态电磁功率输出。与前文对电磁功率理论计算结果式(19)相符,说明该适配功率电机电磁功率的理论分析方法是正确的。值得指出的是,当转速为400 r/min时,减匝工作状态电磁功率3.32 kW比满匝工作状态(4.51 kW)低26.39%,说明该适配功率电机具有较强的实用性。

3.2 电磁转矩

根据适配功率电机机械特性表达式(2)可知,电磁转矩是衡量电机动力性能的重要指标<sup>[13]</sup>。当适配功率电机工作在恒功率阶段时,在转速耦合点完成转速耦合过程,可为城市重载电动汽车提供更强的电磁转矩,使得城市重载电动

汽车获得更高转速。

对该适配功率电机电磁转矩运算结果如图 5 所示。

|    | $n/(r \cdot \min^{-1})$ | $T/(N \cdot m)$<br>Setup1: Performance |
|----|-------------------------|----------------------------------------|
| 32 | 546.897000              | 75.022130                              |
| 33 | 564.539000              | 71.094996                              |
| 34 | 582.181000              | 67.165484                              |
| 35 | 599.823000              | 63.233594                              |
| 36 | 617.465000              | 59.299327                              |
| 37 | 635.107000              | 55.362682                              |
| 38 | 652.749000              | 51.423660                              |
| 39 | 670.390000              | 47.482260                              |
| 40 | 588.032000              | 43.538482                              |
| 41 | 705.674000              | 39.592326                              |

(a) 满匝工作状态

|    | $n/(r \cdot \min^{-1})$ | $T/(N \cdot m)$<br>Setup1: Performance |
|----|-------------------------|----------------------------------------|
| 20 | 525.468000              | 69.293846                              |
| 21 | 553.124000              | 67.076090                              |
| 22 | 580.780000              | 64.857165                              |
| 23 | 608.437000              | 62.637072                              |
| 24 | 636.093000              | 60.415810                              |
| 25 | 663.749000              | 58.193380                              |
| 26 | 691.405000              | 55.969781                              |
| 27 | 719.062000              | 53.745013                              |
| 28 | 746.718000              | 51.519077                              |
| 29 | 774.374000              | 49.291972                              |

(b) 减匝工作状态

图 5 电磁转矩-转速变化

当该电机转速  $n = 580 \text{ r/min}$  时,图 5(a) 满匝工作状态输出电磁转矩  $T_{m1} = 67.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,图 5(b) 减匝工作状态输出电磁转矩  $T_{j1} = 64.9 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,即  $T_{m1} > T_{j1}$ ,该电机工作在满匝状态能为城市重载电动汽车提供更大的动力;当该电机转速  $n = 690 \text{ r/min}$  时,图 5(a) 满匝工作状态输出电磁转矩  $T_{m2} = 42.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,图 5(b) 减匝工作状态输出电磁转矩  $T_{j2} = 56.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,即  $T_{m2} < T_{j2}$ ,该电机工作在减匝状态能为城市重载电动汽车提供更大的动力。因此,在适当速度完成适配功率电机的转速耦合过程可实现该电机更强动力输出,同时也验证了该电机的整体设计比较合理。

运用 MATLAB 软件对仿真结果进行处理,获得满匝工作状态和减匝工作状态的转矩-转速对比曲线图,如图 6 所示。由图 6 可以看出,  $n = 600 \text{ r/min}$  为适配功率电机转速耦合点。在该转速之后,适配功率电机不同工作状态下输出电磁转矩的相对大小发生变化,验证了该电机的机械特性原理式(2),在该转速下对电机进行转速耦合有利于机电能量转化。

为了便于描述机械特性,引进机械特性硬度公式<sup>[14]</sup>:

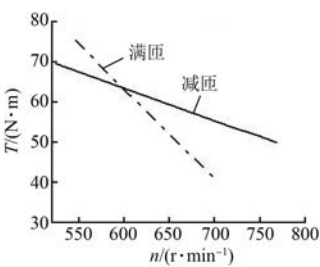


图 6 转矩-转速对比图

$$\beta = \frac{dT}{dn} = \frac{\Delta T}{\Delta n} \tag{20}$$

对比图 6 曲线,与满匝工作状态的机械特性硬度相比,减匝工作状态的机械特性更硬,负载稳定性更好,有利于适配功率电机获得更长加速时间,输出更高转速<sup>[15]</sup>。

4 样机试验

加工制作适配功率电机样机如图 7 所示。



图 7 适配功率电机样机

为验证所述设计及分析的合理性,搭建适配功率电机试验平台如图 8 所示。试验平台设备主要包括适配功率电机样机、样机控制器、模拟电动汽车制动装置、电动汽车电机测试系统、测功机、直流电源等。



图 8 适配功率电机试验平台

由于城市重载电动汽车一般载重较大,故以满匝模式起动适配功率电机,保证电机输出足够电磁转矩来起动电动汽车。在额定条件下,以满匝工作状态起动,调整样机控制器使该样机运行

在 400、580 r/min;当样机运行在 600 r/min 时,将样机切换到减匝工作状态并运行在690 r/min,记录电机相关数据如表 3 所示。

表 3 样机试验数据

| 转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 电磁功率/kW | 电磁转矩/(N·m) |
|---------------------------|---------|------------|
| 400                       | 4.63    | 104.6      |
| 580                       | 4.27    | 64.4       |
| 690                       | 3.92    | 52.7       |

与上述仿真结果相比可知,当该电机以满匝工作状态工作在 400 r/min 时,试验结果和仿真分析结果相比高出了 2.66%。这是由于电机运行开始动力输出不稳,所以造成电磁功率波动。需要说明的是,电机在该转速下输出电磁转矩为 104.6 N·m,提供了足够大的动力转矩实现城市重载电动汽车起动,与仿真结果相符。从电磁转矩的角度来看,当电机稳定工作时,其输出电磁转矩相比于仿真数据误差约 5%,且低于仿真所得电磁转矩,这是因适配功率电机试验平台摩擦、发热等损耗原因引起的。

5 结 语

本文提出了一种具有转速耦合特点的适配功率电机,主要适用于城市重载电动汽车。通过对该电机的动力性能进行理论计算、仿真分析及试验验证,证明该电机的整体结构及功能设计比较合理,能够完成预期的动力输出目标。同一转速下,适配功率电机工作在减匝状态更有利于节约车载电能,提高电能利用率。该计算结果在仿真中也得到了证明。适配功率电机仿真动力输出特性与试验所测数据的变化规律一致,由于试验平台摩擦、发热等因素的影响,试验数据要略低于仿真数据。适配功率电机具有两种机械特性硬度:电机工作在满匝状态,输出电磁转矩较大,特性较软;电机工作在减匝状态,输出电磁转矩较小,特

性较硬。

根据上述结论可知,该适配功率电机设计模型是可行且比较成功的,同时也为电机动力性能方面的研究提供了必要的技术与数据支持。

【参 考 文 献】

[ 1 ] 庄幸,姜克隽.我国纯电动汽车发展路线图的研究[J].汽车工程,2012,2(34): 91-97.

[ 2 ] 高赐威,吴茜.电动汽车换电模式研究综述[J].电网技术,2013,4(37): 891-898.

[ 3 ] 高宏超.电动城市客车动力系统性能试验研究[D].广州:华南理工大学,2012.

[ 4 ] 程明,张淦,花为.定子永磁型无刷电机系统及其关键技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(29): 5204-5220.

[ 5 ] 王春,赵宜静.他励直流电动机反接制动探析[J].机电一体化,2013(3): 83-85.

[ 6 ] 周元芳.同步发电机电磁功率的物理本质[J].广西大学学报(自然科学版),1987(2): 148-151.

[ 7 ] 曾和清.凸极式永磁同步电机电磁功率和电磁转矩[J].邵阳高专学报,1997,10(4): 311-321.

[ 8 ] 陈宜生,杨晓龙.对麦克斯韦方程组的理解[J].物理通报,2011(10): 2-6.

[ 9 ] 黄国治,傅丰礼.中小旋转电机设计手册[M].北京:中国电力出版社,2014.

[ 10 ] 陈丕璋,严烈通,姚若萍.电机电磁场理论与计算[M].北京:科学出版社,1986.

[ 11 ] 胡之光.电机电磁场的分析与计算[M].北京:机械工业出版社,1982.

[ 12 ] STEPHEN D U. Fitzgerald & Kingsley's electric machinery[M].北京:电子工业出版社,2013.

[ 13 ] 汤蕴璆.电机学[M].北京:机械工业出版社,2011.

[ 14 ] 张健滔,李朝东,何晓菁.卧板式直线超声电机的特性分析模型[J].中国电机工程学报,2012,32(18): 137-144.

[ 15 ] 胡勤丰,严仰光.永磁式双凸极电机机械特性[J].电工技术学报,2007,22(3): 6-12.

收稿日期: 2017 -03 -06