文章编号: 1674-8085(2020)04-0071-06

SR 电机对轮毂驱动电动汽车垂向振动的影响

*丁 芳,王 波,张钱斌

(安徽机电职业技术学院汽车与轨道学院,安徽,芜湖 241002)

摘 要:针对 SR 电机对轮毂驱动电动汽车行驶平顺性的影响,本文首先建立了开关磁阻(SR)电机的转矩波动方程,并根据电机的矢量控制原理,利用 Sim Power System Toolbox 模块库,搭建了电机模型;然后利用 Matlab/Simulink 软件,搭建了基于电机模型的机-电耦合振动仿真模型,并进行受轮毂电机转矩波动干扰的车辆垂向动力学模拟仿真。研究结果表明:附加轮毂电机后,车身振动和车轮动载荷都会变大;说明此类汽车工程化应 用之前,需要优化悬架,以适应轮毂电机的转矩波动。

关键词: 电动汽车; 轮毂驱动; 开关磁阻电机; 振动分析

中图分类号: TP 276 文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2020.04.014

EFFECT OF SR MOTOR ON VERTICAL VIBRATION OF IN-WHEEL MOTOR DRIVE ELECTRIC VEHICLE

*DING Fang, WANG Bo, ZHANG qian-bin

(Collede of Automobile and Rail, Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu, Anhui 241002, China)

Abstract: In order to study the influence of SR motor on the ride comfort of hub drive electric vehicle, in this paper, firstly, the torque fluctuation equation of switched reluctance (SR) motor is established, and according to the vector control principle of motor, the motor simulation model is built by Sim Power System Toolbox, then using MATLAB/Simulink software, the mechanical-electrical coupling vibration simulation model is built based on the motor model, and the vertical dynamic simulation of the vehicle disturbed by the wheel motor torque fluctuation is carried out. The results show that the vibration of the body and the dynamic load of the wheel will increase after the wheel hub motor is added, which indicates that the suspension needs to be optimized to adapt to the torque fluctuation of the wheel hub motor before the application of this kind of automobile.

Key words: electric vehicle; hub drive; switched reluctance motor; vibration analysis

轮毂电机是指将金属轮毂和驱动装置合为 一体的驱动电机,也就是说,它将驱动装置、传 动装置以及制动装置一起合并到轮毂中,俗称"电 动轮",也叫作轮式电机^[1],其内部包含了轴承、定 子和转子、小型逆变器等。电动汽车采用轮毂电 机驱动,对驱动电机的尺寸、结构和性能等方面 的要求会更高^[2]。首先,驱动电机须密度更高、 质量更轻;同时为节省车内空间、降低整车负载, 要求驱动电机的功率密度和转矩密度较高^[3]。其 次,车辆行驶时要经过变速、停车、爬坡起动等 多种复杂工况,要求电机还应具有调速范围广、 动态响应快、可控性高的特点^[4]。根据上述要求,

收稿日期: 2020-05-07; 修改日期: 2020-05-13

基金项目:安徽高校自然科学研究项目(KJ2019A1154);安徽省省级高水平专业(2018ylzy187);安徽省省级教学创新团队(2019cxtd087)

作者简介:*丁 芳(1986-),女,安徽芜湖人,讲师,硕士,主要从事汽车振动分析、新能源汽车研究(E-mail:ahjd2659@163.com); 王 波(1980-),女,安徽芜湖人,副教授,硕士,主要从事新能源汽车技术研究(E-mail:ahjdwbo@126.com); 张钱斌(1980-),男,安徽芜湖人,副教授,硕士,主要从事轮毂驱动电机研究(E-mail:ahjdzqb@ahcme.edu.cn).

结合各种现有电机的启动性能、额定运行点峰值效率、恒功率速度范围等方面考虑,优先选用开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)作为电动汽车的轮毂驱动电机^[5]。因此,本文选择轮毂驱动电动汽车作为研究对象,并仿真分析开关磁阻电机转矩波动对其垂向振动的影响,以论证轮毂驱动电动汽车工程化应用的可行性。

1 SR 电机转矩波动动力学模型

SR 电机的内部主要结构为定子和转子,定子 和转子都有铁芯,铁芯所用材料均为硅钢片。在 定子铁芯的内表面和转子铁芯的外表面都均匀分 布有凸齿(也称凸极)和凹槽,因此也称为双凸 极结构^[6]。定子铁芯上的每一个凸极均分布有集 中绕组,每一相绕组分布在处于径向相对位置的 两个凸极上,构成一对磁极。SR 电机的定子和转 子极数可以有很多种搭配,电机也可以根据定子 铁芯上的绕组数目不同构成不同相数,且单相和 两相的 SR 电机不能够自启动,只有三相及以上 的 SR 电机具备自启动功能^[7]。常见的有以下几种 形式: 6/4 极, 8/6 极, 10/8 极,分别为三相、四 相、五相电机。对于有自启动、四象限运行要求 的驱动场合,应优先选择表 1 中所示的定子和转 子磁极数目组合方案。

表1 常见定、转子极数组合方案

Table 1 Common pole number combination scheme of stator and rotor

相数	3	4	5	6	7	8	9
定子极数 Ns	6	8	10	12	14	16	18
转子极数 Nr	4	6	8	10	12	14	16
步距角	30°	15°	9°	6°	4.28°	3.21°	2.5°

对表中的组合方案进行分析,可得到如下结 论:定子绕组的相数越多,转子每转动一次的步 距角越小,可以减少转矩的脉动;但相数越多, SR 电机主开关器件数量也会增多,结构也更复 杂,增加了制造成本^[8]。综合这两点,定、转子 极数组合方案为 8/6 极的四相 SR 电机应用较多。 图 1 是 8/6 极结构的四相 SR 电机的结构及电路 图,为了简洁,图中只画出定子绕组及绕组供电 的电路简图。



图 1 四相电机的结构及电路简图

Fig.1 Structure and circuit diagram of four phase motor

由于电路具有开关特性,磁路具有磁饱和性 和非线性特点,需将电机内的磁场能量转化为 机械能的部分能量(称为磁共能)采取分段线 性化^[9-10],也可将电机内的电感进行分段线性化, 为此,经简化后的电磁转矩表达式为

$$T_e = \frac{1}{2}Ki^2 \tag{1}$$

式中, *K* 为电机绕组中电感对位置角的变化率, *i* 为电机绕组中的相电流。

SR 驱动电机转矩波动的产生,是由于定、 转子间的切向作用力和径向作用力导致的结果, 因此需要对电机的切向力和径向力进行计算。参 照电机实际运行工况,可确立定、转子间切向力 与时间之间的关系,如图2所示,数学表达式为

$$F_{n} = \begin{cases} \frac{T_{e}}{R}, & nT \le t \le (n + \frac{7}{20})T \\ 0, & (n + \frac{7}{20})T \le t \le (n + 1)T \end{cases}$$
 $(n = 0, 1, \dots)$

(2)

式 中 , *R* 表 示 电 机 定 子 的 内 半 径 , $T = \frac{1}{f} = \frac{60}{a} N_r$, *f* 为转矩波动的基波频率, *a* 为 电机旋转转速, *N*, 为电机的转子极数, *t* 为激励 力在一个周期内的作用时间。

电机定、转子间的径向力,若要对其进行精确解析则非常不易,因为电机磁路具有饱和性和 非线性^[11]。从定性的分析出发,可作如下假设: ①磁路是线性的;②电机径向力集中作用于定子 磁极;③电机绕组中相电流为常数。由于定、转 子间径向力和切向力的作用周期相同,对其进行 简化,可得径向力与时间的关系,如图3所示, 数学表达式为

$$F_{r} = \begin{cases} \frac{i^{2}(L_{\min} + \frac{a\pi K}{30}(t - nT))}{2\sqrt{b^{2} + (\frac{\pi ar}{30})^{2}(\frac{7T}{20} - (t - nT))^{2}}}, & nT \le t \le (n + \frac{7}{20})T\\ 0, & (n + \frac{7}{20})T \le t \le (n + 1)T \end{cases}$$
(3)

式中,r表示转子半径,b为最短气隙长度,b=R-r; L_{min}为绕组最小电感; *i*为绕组电流。



Fig.3 The relationship between radial force and time

汽车在行驶过程中,驱动电机一直在运转, 因此电机定、转子间的切向力和径向力的方向一 直在变化,故需要分析切向力和径向力在垂向的 合力。依据力的合成、分解原理,该垂向力的表 达式为

$$F(t) = \begin{cases} \frac{T_{e}}{R} \cos(\frac{a\pi}{30}t + \varphi) - \frac{i^{2}(L_{\min} + \frac{a\pi K}{30}(t - nT))}{2\sqrt{b^{2} + (\frac{\pi ar}{30})^{2}(\frac{7T}{20} - (t - nT))^{2}}} \sin(\frac{a\pi}{30}t + \varphi), & nT \le t \le (n + \frac{7}{20})T \\ 0, & (n + \frac{7}{20})T \le t \le (n + 1)T & (n = 0, 1, \cdots) \end{cases}$$

$$(4)$$

上式中, φ 是电机转子的初相位。表 2 中是 SR 电机的一组参数,为目前应用较多的四相电 机。

表 2 电机参数

Table 2 Motor parameters									
电机参数	L_{min}	Κ	а	b	R	r	i	Te	Т
取值	4.95	82.5	1500	0.001	0.05	0.049	1	41.25	6/25

依据式(4),利用 Matlab/Simulink 软件, 建立 SR 电机垂向激励力模型,如图 4 所示。选 择总时长 40 s,时间步长为 0.02 s,输出的电机 垂向激励力与时间的关系如图 5 所示,可以看 出 SR 电机转矩波动产生的激励力具有明显的 周期性。



图 5 SR 电机垂向激励力与时间关系 Fig.5 The relationship between vertical exciting force and time of SR motor

2 路面模型的建立

汽车振动输入中,最主要输入的是路面不平度,在统计其特性时主流采用的是路面功率谱密度,国内外在对路面功率谱密度进行拟合时常采用的表达式*G_q(n)*如下:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-1}$$

式中,n表示空间频率(m^{-1}),与波长 λ 互为倒数, 表示每米中所含波长个数; n_0 为参考空间频率, $n_0 = 0.1m^{-1}$; $G_q(n_0)$ 指的是路面不平度系数,单 位是 m^3 ; W为频率指数,它指的是路面不平度的 频率结构。

《汽车理论》中提到可以依据路面功率谱密 度对路面不平度进行分级,可分为8级,分类标 准如表3所示;各级频率指数w=2,表中定义了 各级路面 $G_q(n_0)$ 的几何平均值,并给出了空间频 率为 $0.011m^{-1} < n < 2.83m^{-1}$ 之间的路面不平度的 均方根值的几何平均值^[12]。图6为下文仿真时用 到的路面激励函数,即B级路面不平度模拟(车 速为50km/h)。

表3各级路面谱密度

Table 3 Spectral density of pavement at all levels						
路面等级	$G_q(n_0)/(10^{-6} \text{m}^3)$ ($n_0=0.1 \text{ m}^{-1}$)	$\sigma_{q'}(10^{-6}\text{m})$ (0.011 m ⁻¹) $\leq n \leq (2.83 \text{ m}^{-1})$				
	几何平均值	几何平均值				
А	16	3.81				
В	64	7.61				
С	256	15.23				
D	1024	30.45				
Е	4096	60.90				
F	16384	121.80				
G	65536	243.61				
Н	262144	487.22				





3 电机转矩波动干扰下的机-电耦合

模型

图 7 为本文建立的附加轮毂电机的 1/4 车辆 垂向振动动力学模型。



图 7 1/4 车辆垂向振动动力学模型

Fig. 7 Dynamic model of vertical vibration of 1 / 4 vehicle

根据图 7,可得到车辆垂向振动动力学微分 方程:

$$(m_1 + m_3) \ddot{y}_1 + c_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_0) + c_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1 (y_1 - y_0) + k_2 (y_1 - y_2) = 0$$
 (5)

$$m_2 \ddot{y}_2 + c_2 \left(\dot{y}_2 - \dot{y}_1 \right) + k_2 \left(y_2 - y_1 \right) = 0$$
(6)

$$F_{t} = k_{1}(y_{1} - y_{0}) + c_{1}(\dot{y}_{1} - \dot{y}_{0})$$
(7)

$$F_{n} = k_{2} \left(y_{1} - y_{2} \right) + c_{2} \left(\dot{y}_{1} - \dot{y}_{2} \right)$$
(8)

式中, *m*₁为电动汽车非簧载质量(其中轮 毂电机质量除外); *m*₂为簧载质量; *m*₃为轮毂电 机质量; *k*₁、*c*₁为轮胎刚度和阻尼; *k*₂、*c*₂为车辆 悬架刚度和阻尼; *y*₀、*y*₁和*y*₃分别为路面不平度、 车轮和车身的位移; *F*_t为车轮动载荷; *F*_n为簧载 质量的振动输入。

外转子轮毂电机不设减速器,行驶过程中电 机产生的转矩波动直接作用于轮毂及车轮^[13]。根 据式(5)~(8),在 MATLAB/SIMULINK 中建 立图 7 的仿真模型,如图 8 所示,该模型包括的 三个模块如下: 1/4 车辆垂向振动模块、路面激 励模块以及轮毂电机模块。表 4 中列举的是图 8 所示仿真模型中具体的参数值。



图 8 附加轮毂电机的 1/4 车辆垂向振动 Simulink 仿真模型 Fig.8 Simulink simulation model of 1 / 4 vertical vibration of vehicle with additional hub motor

表 4 仿真参数 Table 4 Simulation parameters

车辆参数	初值	车辆参数	初值
非簧载质量 <i>m</i> ₁ (kg)	25	轮胎阻尼 c1 (N/(m/s))	400
簧载质量 m2(kg)	200	悬架刚度 k2 (N/m)	18000
轮毂电机质量 m ₃ (kg)	20	悬架阻尼 c ₂ (N/(m/s))	1600
轮胎刚度 k ₁ (N/m)	190000	车轮半径 r (m)	0.3

4 仿真分析

基于图 8 仿真模型, 开展了附加电机激励和 不加电机激励的汽车垂向振动对比分析, 如图 9~10 所示。

4.1 车身加速度对比分析









根据图 9,不加电机时车身加速度主要落在 -2m/s²~2m/s²范围内,车身的加速度一直在随着 路面不平度的变化而变化;从频谱上看 0~10 Hz 时随着车身频率的增加,车身的加速度也在逐渐 增加,在10Hz时受影响最大;10~40 Hz时车身 加速度受频率影响逐渐降低;频率大于40Hz之 后车身加速度逐渐趋于稳定,车身加速度受频率 影响低。

根据图 10, 在轮毂部分加入 SR 电机后, 电 机的垂向激励力变大, 车身的振动加速度主要在 -20m/s²~20m/s²范围内, 部分车身加速度甚至达 到 40 m/s², 可以看出轮毂电机对车身加速度的影 响很大; 从频谱图上看, 加入 SR 电机后车身的加 速度随频率变化, 由于垂向激励力变大, 0~10 Hz, 车身加速度逐渐增大, 最大达到4m/s², 10~40 Hz 车身加速度受频率变化较小, 大于 40 Hz 后频率 的增加对车身加速度基本上没有影响。

4.2 车轮动载荷对比分析









根据图 11,不加电机时车轮动载荷主要在 -2000*N*~2000*N*变化,从频谱上看 0~10 Hz 范 围内,随着车身频率的增加,*Ft*在逐渐增加,在 10Hz 时 *Ft* 达到最大,10~40 Hz 时,*Ft* 逐渐降低, 频率大于 40 Hz 之后车身 Ft 逐渐趋于稳定, Ft 较小。

根据图 12,加上电机后,车轮动载荷变化 很大,从仿真结果看,Ft主要在-12000~12000 N 范围内变化,最大值甚至达到-17000 N,可以看 出轮毂电机对Ft的影响很大;从频谱图上看,加 入SR电机后车轮动载荷随频率变化,0~10 Hz, Ft逐渐增大,最大达到17000 N;10~40 Hz,Ft 逐渐减小;频率大于40 Hz 后,Ft基本上不受其 影响。

5 结论

基于以上分析,可知:

 汽车车身振动和车轮的动载荷很大程度 上受 SR 电机的转矩波动影响,也即对汽车乘坐 舒适性有一定影响,影响乘员乘坐的舒适感;恶 化了轮胎的抓地性,不利于汽车驱动和行驶安全 性。因此,研究轮毂驱动电动车的垂向动力学及 机-电耦合振动机理的抑制方法具有紧迫性。

 2)说明此类电动汽车产业化之前,需采取 措施,改进悬架结构或者优化参数或创新设计相 关机构或进一步研究电机的转矩控制问题,以提 高轮毂驱动电动汽车的行驶平顺性、安全性。

参考文献:

- [1] 郑淑琴,龙江启. 电动汽车永磁无刷轮毂电机控制策
 略建模[J].中国机械工程,2017,28(6):744-749,755.
- [2] 肖强. 电动汽车轮毂电机电磁设计与电磁振动分析 研究[D]. 南昌:华东交通大学,2019.

- [3] 李耀华,马建,刘晶郁,等. 电动汽车用永磁同步电机 驱动系统控制策略比较研究[J]. 汽车工 程,2013,35(5):412-417.
- [4] Zhang Lipeng, Zhang Silong, Zhang Wei. Multiobjective optimization design of in-wheel motors drive electric vehicle suspensions for improving handling stability. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233 (8):2232-2245.
- [5] 邵凯,汪若尘,孟祥鹏,等.轮毂驱动电动车的电磁混合 悬架控制研究[J].重庆理工大学学报:自然科 学,2018,32(6):26-33,174.
- [6] 汪若尘,俞峰,邵凯等.集成电磁悬架的轮毂驱动电动车垂向振动抑制方法研究[J].农业机械学报,2018,49(7):382-389.
- [7] 李哲,郑玲,胡一明,等.轮毂驱动电动汽车振动负效应 及抑制方法[J].重庆大学学报,2019,42(2):20-29.
- [8] 童炜,侯之超.轮毂驱动电动汽车垂向特性与电机振动分析[J].汽车工程,2014,36(4):398-403,425.
- [9] 祁新梅,郑寿森,付青.电动汽车后轮轮毂电机驱动的 操纵控制[J].中山大学学报:自然科学版,2019,58(1): 83-90.
- [10] 郑阳,陈勇,赵理.轮毂电机驱动电动汽车平顺性控制 仿真[J].计算机仿真,2018,35(6):159-166.
- [11] 张利鹏,李亮,祁炳楠.轮毂电机驱动电动汽车侧倾稳 定性解耦控制[J].机械工程学报,2017,53(16):94-104.
- [12] 余志生,夏群生.汽车理论[M].北京:机械工业出版 社,2012.
- [13] 张海涛,王云霞,胡新林.汽车主动悬架系统控制器的 设计与仿真研究[J].井冈山大学学报:自然科学版, 2016,37(4):7-62.