

# 低压直流电机的电磁发射特性的研究\*

张晨 张志宏 何宏

(1. 天津理工大学自动化学院 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室 天津 300384;

2. 天津广播电视台传输发射部 天津 300072)

**摘要:** 因为低压直流电机 EMC 特性会对整车 EMC 特性产生影响,针对低压直流电机干扰信号超过上限时,将会导致电动汽车安全性降低问题,对低压直流电机的电磁发射特性进行研究,包括低压直流电机的阻抗特性、辐射发射特性、瞬态传导发射特性。抑制电磁干扰的措施有接地、屏蔽、滤波等,以中国汽车技术研究中心对某一新型电动汽车电磁兼容性研究为背景,对电磁屏蔽技术进行研究。测试结果表明,电磁屏蔽可以解决低压直流电机的电磁辐射干扰对整车 EMC 特性影响的问题。

**关键词:** 低压直流电机;电磁干扰;电磁发射特性;电磁屏蔽

**中图分类号:** TN03 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

## Study on electromagnetic emission characteristics of low voltage DC moto

Zhang Chen Zhang Zhihong He Hong

(1. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems, School of Automation of Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Transmission and Launch Department, Tianjin Radio and TV Station, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Because the EMC characteristic of low-voltage DC motor will affect the EMC characteristics of the vehicle, this paper will lead to the problem of reducing the safety of electric vehicle when the low-voltage DC motor interference signal exceeds the upper limit, and study the electromagnetic emission characteristics of low voltage DC motor, including low voltage DC Motor impedance characteristics, radiation emission characteristics, transient conduction emission characteristics. The measures to suppress the electromagnetic interference are grounded, shielded, and so on. The paper studies the electromagnetic shielding technology in the background of the research on the electromagnetic compatibility of a new electric vehicle with the China Automotive Technology and Research Center. The test results show that the electromagnetic shielding can solve the problem that the electromagnetic radiation interference of the low voltage DC motor affects the EMC characteristics of the vehicle.

**Keywords:** low voltage DC motor; electromagnetic interference; electromagnetic emission characteristics; electromagnetic shielding

## 0 引言

目前,随着大众对绿色环保意识日渐增强,电动汽车的发展也是蒸蒸日上,其内部低压直流电机的应用也十分广泛。电动汽车的暖风、后视镜等用到的电机均属于低压直流电机,低压直流电机 EMC 特性对整车 EMC 特性有着不可忽略的影响,其干扰信号向外发射超出最大限值,低压直流电机对整车的辐射会使电动汽车的安全性降低,所以很有必要对低压直流电机进行研究<sup>[1-6]</sup>。本文先分析低压直流电机的结构和工作原理,再系统地分析低压直流电机

EMC 的特性,并探究电机屏蔽法是否会在一定程度上阻断干扰信号像外发射,从而降低辐射干扰对电动汽车 EMC 特性的影响。

## 1 低压直流电机的结构和工作原理

### 1.1 低压直流电机的结构

组成低压直流电机的主要结构为定子和转子。定子和转子间存在气隙,气隙是机械能与电能相互转化的媒介,气隙的大小以及磁场分布对低压直流电机能否正常工作有非常大的影响。在一般规格的电机中,1~3 mm 的气隙最为

收稿日期:2017-07

\* 基金项目:天津市科技支撑重大科技工程专项基金(14ZCDGSF00028)、天津市高等学校创新团队培养计划(TD12-5015)项目资助

常见。电动汽车暖风机的结构如图 1 所示。



图 1 电动汽车暖风机的结构

## 1.2 低压直流电机的工作原理

低压直流电机运行原理如图 2 所示。当给电刷加压时,电流流经载流线圈,线圈的两边会受到电磁力的作用,其大小的影响因素有磁感应的强度,直流电机的工作电流的大小以及导体有效长度,表达式为:

$$f = Bil$$

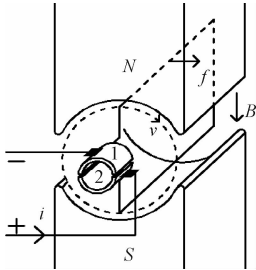


图 2 电机运行原理

若电刷两端所加电压不再发生变化时,S 极端的电流的流向也不会发生变化,则电机的转动方向固定。

电动汽车主要的供电装置是电池包,一般供电电压高于 250 V 且低于 380 V。但是电动汽车系统中有大量的低压部件并由蓄电池供电,这个范围的电压是不能直接供电的,要借助 DC/DC 转换器将高电压转换成 12 V 的低电压为蓄电池充电,才能保证使低压部件的正常工作。低压直流电机拥有较好的启动特性,调速范围也比较大。

## 2 低压直流电机电磁发射特性

电动汽车中有多种电磁干扰源,其中比较重要的就包括低压直流电机,同时它也是整车辐射发射超标的重要因素。在换向器的作用下,当电流的流向发生变化的时候,电流的幅值会在此刻出现比较大的波动,因此会产生强烈的电磁干扰。受电机本身寄生参数的影响,电流的瞬变以及电压的瞬变会作用在寄生电容或寄生电感上从而形成闭合回路,也会再次产生电磁干扰。低压直流电机在被开启的一瞬间会产生比自身电压高出很多倍的电压,会对系统中敏感部件产生不可逆的影响,使其无法正常工作。

### 2.1 阻抗特性

因为电感器本身就是一可以改变电流相位的储能元件,所以电磁发射特性是受电机阻抗特性影响的<sup>[7]</sup>。在低

压直流电机中,存在着不可忽视的寄生参数,分析高频阻抗特性的难度系数大,这也是为何电机高频 EMI 模型建立比较困难的一个因素。利用阻抗分析仪测量电机端口的阻抗和电感,电机阻抗如图 3 所示,电机电感如图 4 所示。

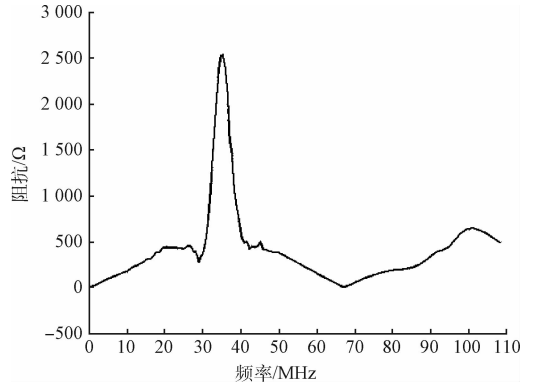


图 3 电机阻抗

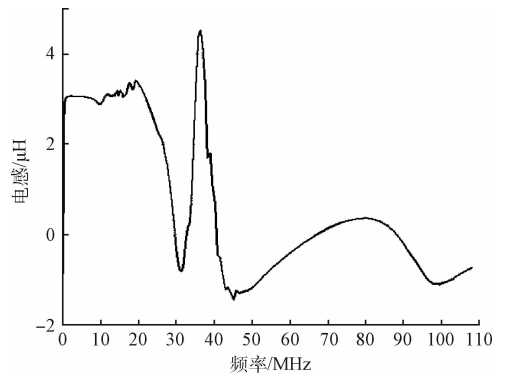


图 4 电机电感

由电机阻抗图可看出,在直流电机阻抗特性曲线图中有两个波峰,第 1 个表示直流电机发生第 1 个并联谐振点,对应的频率值为 35 MHz,此时阻抗为 2 535 Ω,在图 3 中该点的阻抗值达到了最大值并远大于周围其他频率段内的阻抗值,形成了一个尖峰。在频率为 100 MHz 的时候发生了第 2 个并联谐振点,但此时对应的阻抗值为 650 Ω,第 2 个的阻抗值明显小于第 1 个。在频率为 67 MHz 时,阻抗的值是最小的,以最小值为分界线,将整个频率段分为低频段和高频段两部分。

由电机电感图可看出,在低频段直流电机的电感值会有比较剧烈的波动,但是在高频段电感值的波动就相对稳定,在低频和高频段均出现了电感值为负的情况,这时电机表现出的是电容性。

探讨谐振的阻抗特性时选用一个并联等效单元来等效,再把两个并联谐振单元进行串联(RLC 并联谐振单元如图 5 所示),就可得到低压直流电机阻抗特性曲线对应的电路拓扑结构<sup>[8]</sup>。

在并联谐振单元中,对于涉及到的参数  $R, L, C$  可以由固定的公式提取。在出现谐振时,其对应的阻抗幅值如式(1)。

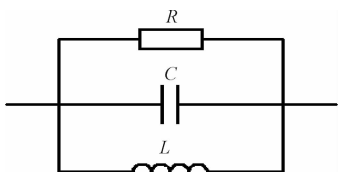


图 5 RCL 并联谐振单元

$$Z(f) = \frac{1}{\sqrt{\left(2\pi fC - \frac{1}{2\pi fL}\right)^2 + \left(\frac{1}{R}\right)^2}} \quad (1)$$

式中:  $f$  表示谐振频率,  $Z(f)$  表示谐振频率的阻抗值。在 RCL 并联谐振单元中电阻等效为阻抗值, 所以两个谐振单元中的电阻值可以直接由图中数据获得。即:

$$R = Z(f) \quad (2)$$

电路发生并联谐振, 谐振频率公式:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (3)$$

电阻可直接读出, 联立式(1)和(3)可求出电容  $R$  和电感  $L$  的值。根据所求得的参数, 可建立频率范围为 0.15~108 MHz 的低压直流电机的宽频阻抗模型如图 6 所示。

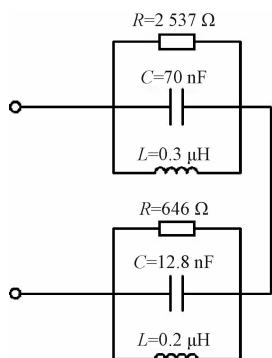


图 6 低压直流电机宽频阻抗模型

## 2.2 辐射发射特性

低压直流电机的电源线可以等效的看成发射天线, 在频率不高于 1 GHz 时, 在布置时天线是对准线束的, 在频率高于 1 GHz 时, 是使用喇叭天线对准待测件的。辐射测量现场如图 7 所示。因为对频率大小有要求, 测量不同频率段时现场布置基本相同, 只是在天线的选型上不同而已。测量的辐射发射结果如图 8 所示。

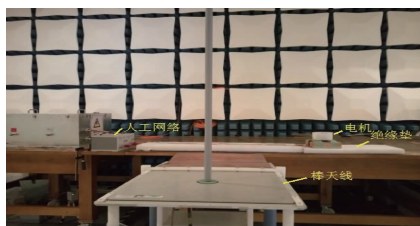


图 7 辐射测量

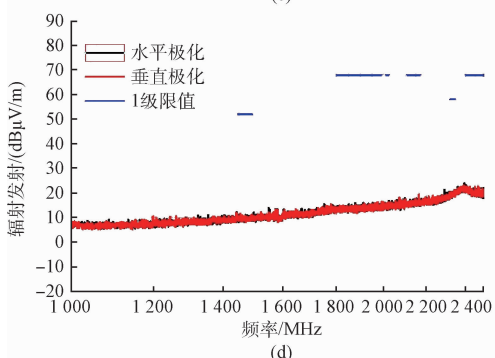
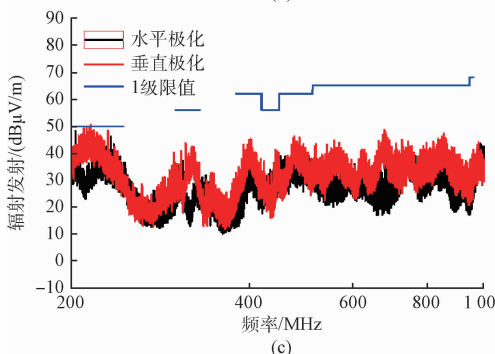
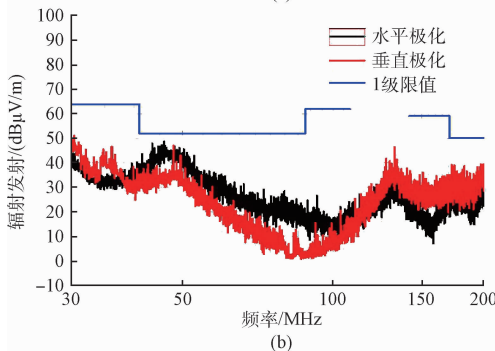
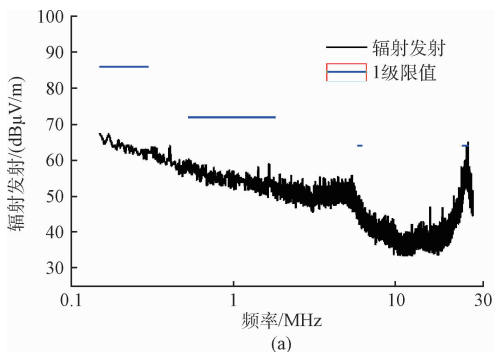


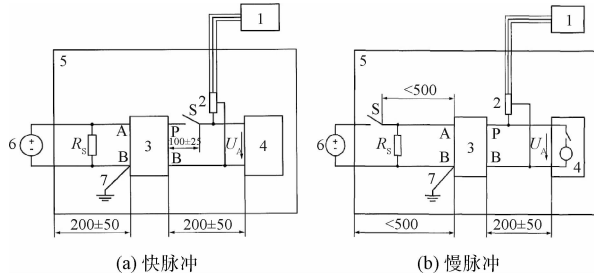
图 8 辐射发射结果

从辐射发射结果图中可以看出与一级限值相比较, 图 8(a) 的超标点在频率为 28 MHz, 超出一级限值约 1.3 dB, 图 8(c) 的超标点在频率为 220 MHz 时, 超出一级限值约 0.8 dB。

## 2.3 瞬态传导发射特性

当被测设备瞬间切断或者开通时会产生瞬态干扰信号称为瞬态传导发射。该测试需在屏蔽室中进行以防止为外

界的其他电磁环境对测试结果产生影响<sup>[9]</sup>。在捕捉被测设备在导通和关断时的瞬态电压选用精度比较高的示波器,将被测参数记录下来,主要包括瞬态电压的最大正负幅值、脉冲宽度以及上升、下降的时间,测试完毕后分析所记录参数。根据脉冲的快慢对瞬态传导发射进行分析并模拟机械开关和电子开关。测试原理如图 9 所示,现场布置如图 10 所示,瞬态传导发射测试结果如图 11 所示。



1. 示波器, 2. 电压探头, 3. 人工网络, 4. DUT, 5. 接地平板, 6. 电源, 7. 接地线(长度<math><100\text{ mm}</math>),  $R_s$  为分流电阻,  $S$  为开关。

图 9 测试原理

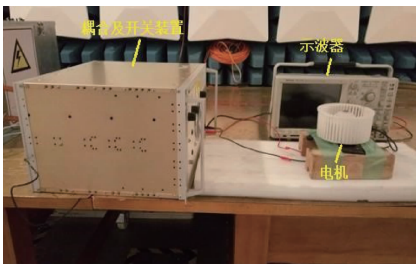


图 10 现场布置图

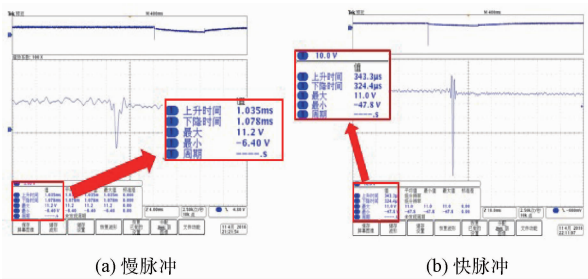


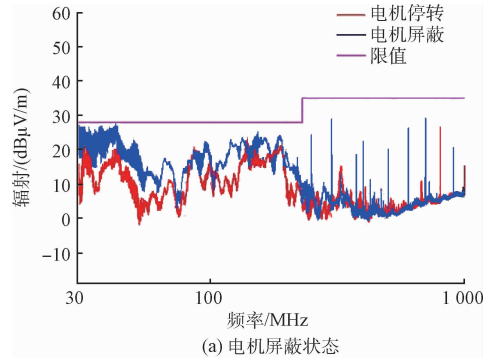
图 11 瞬态传导发射测试结果

由 11(a) 可知,慢脉冲最小为  $-6.4\text{ V}$ ,快脉冲最小  $-47.8\text{ V}$ ,在被测低压直流电机中,快、慢脉冲的测量值不同,电机参数却不会发生变化。由于快脉冲的开通和关断的时间间隔较短,所以单位时间内电流变化率大,瞬间产生的干扰比较大。

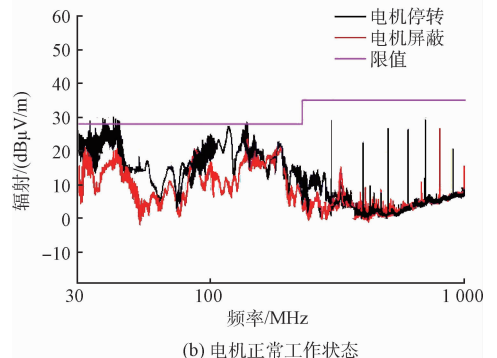
### 3 低压直流电机对整车 EMC 测试的影响

中国汽车技术研究中心电磁兼容室统计显示,有较多整车辐射测试超标是因为低压直流电机造成的。针对辐射

超标的问题,探究屏蔽措施是否可以阻断辐射向外发射起到良好的作用。对某新款电动汽车做摸底测试窄带发射试验时,对电机工作状态和电机屏蔽状态进行辐射测试,电机辐射测试如图 12 所示。将原工作状态与改善后的状态进行对比,改善前后电机对整车的辐射如图 13 所示。



(a) 电机屏蔽状态



(b) 电机正常工作状态

图 12 电机辐射测试

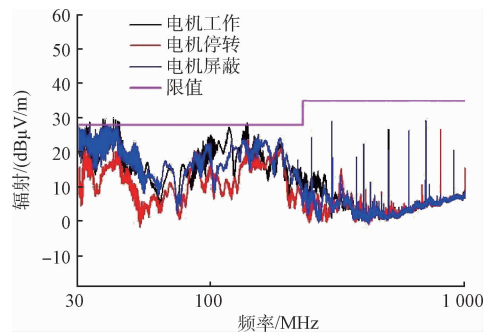


图 13 改善前后电机对整车的辐射图

图 12(b) 可知,电动机工作时辐射超标的频率主要集中在  $33\sim 45\text{ MHz}$ ,在约  $150\text{ MHz}$  处也出现了超标现象(图中黑线所示)。让除暖风机之外的其他设备均处于正常工作状态,此时测试窄带发射是正常的;若让暖风机也正常的工作测试窄带发射出现超标的现象,所以暖风机可以造成窄带辐射发射超标。现利用铜箔将暖风机的电源线屏蔽起来,重复上述测试步骤,测试结果如图 12(a) 所示,从电机屏蔽后曲线的波动上可以看出并没有超过上限值,说明屏

蔽措施可以起到阻断干扰信号向外发射的作用。

## 4 结 论

低压直流电机产生的电磁干扰会影响电动汽车中其他电气设备的正常工作, 必须要找到抑制低压直流电动机电磁干扰的方法, 抑制电磁干扰的措施主要有接地、屏蔽、滤波等, 本文以低压直流电动机正常工作产生的电磁干扰对整车 EMC 影响为主线展开研究, 通过分析它的结构特点, 工作原理以及电磁兼容特性, 寻找最佳的抑制措施<sup>[10-15]</sup>。本文最后通过对电动汽车中低压直流电机 EMC 辐射特性对整车辐射发射的影响进行研究, 并采取屏蔽措施对电机屏蔽, 测试屏蔽后电机的辐射的状态, 测试结果表明利用屏蔽的方法可有效地抑制电机辐射向外发射。

## 参考文献

- [1] 滕添益, 缪文泉, 杨东, 等. 国内外电动汽车电磁兼容测试标准体系比对与研究[J]. 上海汽车, 2014(2): 58-62.
- [2] 张艳辉, 徐坤, 郑春花, 等. 智能电动汽车信息感知技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 794-805.
- [3] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高电压技术, 2014(6): 1605-1613.
- [4] 王爱玲, 秦晓明. 基于 LC 谐振的叠层母排杂散电感测量新方法[J]. 电测与仪表, 2014(16): 85-88.
- [5] 张新宇. 电动汽车电机逆变器系统的电磁干扰与抑制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [6] 张威, 程维明, 杨东. 电动汽车驱动系统 EMC 测试的试验方案研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4): 80-83.
- [7] 崔祥飞, 程维明, 杨东. 电动汽车驱动系统 EMC 问题的测试及整改[J]. 电子测量技术, 2013, 36(5): 45-48.
- [8] 文家昌, 叶祥平. 建设 EMC 测试实验室的技术研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(9): 1-4.
- [9] 高新杰, 李国珍, 李燕侠, 等. 电动汽车常见的 EMC 问题与特性[J]. 安全与电磁兼容, 2015(3): 15-19.
- [10] 仇亚芳, 杜明星, 窦汝振, 等. 屏蔽层对电缆寄生参数的影响分析[J]. 电测与仪表, 2015, (20): 47-50, 101.
- [11] 张宏. 磁环抑制直流线路无线电干扰的实验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [12] 汪泉弟, 秦传明, 郑亚利, 等. 低压永磁直流电机的传导电磁干扰模型[J]. 电机与控制学报, 2011(1): 55-59, 67.
- [13] 吴存学. 电机宽频等效电路模型的快速建模方法[J]. 西南汽车信息: 2012 年下半年合刊, 2012: 8.
- [14] 朱达, 颜伟, 王恩荣. 分析电磁兼容检测与优化[J]. 电子技术与软件工程, 2017(11): 127.
- [15] NARASIMMAN P. Design and comparison of controller for the reduction of conducted electromagnetic interference in an inverter[J]. Circuits and Systems, 2016, 7(7): 1167-1176.

## 作者简介

张晨, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车低压直流电机电磁兼容性。

E-mail: 13820686092@163.com

何宏(通信作者), 1960 年出生, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为检测技术与自动化装置, 电磁兼容。

E-mail: heho604300@126.com