

# 直流有刷电机电磁干扰建模及预测

张 戟, 王建昌, 刘家栋

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 直流有刷电机作为汽车摇窗中的一个重要的零部件, 其产生的电磁干扰容易与其他车载电器产生电磁耦合, 给汽车的安全驾驶造成一定的隐患。针对直流有刷电机电磁干扰的建模和预测问题, 通过深入研究直流有刷电机换向过程和电机传导干扰系统模型以及电机绕组等效电路模型, 建立电源和线路阻抗稳定网络(line impedance stabilization networks, LISN)的等效电路模型, 对电机的传导干扰强度进行模型仿真预测, 结果较为准确; 基于电机辐射干扰测试流程, 利用CST软件建立电机辐射干扰的三维模型, 将三维模型与二维模型进行联合仿真, 利用电流钳测试得到频域上的激励源以及CST仿真得到辐射干扰系统的传递函数, 对电机的辐射干扰强度进行模型仿真预测, 结果较为准确。

**关键词:** 直流摇窗电机; 有刷电机; 电磁干扰; 传导干扰; 辐射干扰; 绕组模型; 激励源

中图分类号: TN972

文献标志码: A

## Modeling and Prediction of Electromagnetic Interference for Brushed DC Motors

ZHANG Ji, WANG Jianchang, LIU Jiadong

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** As a relatively important component in the body design, the DC brush motor can easily generate electromagnetic interference with other on-board electrical appliances, causing certain hidden dangers to the safe driving of the car. Aiming at the modeling and prediction of the electromagnetic interference of the brushed DC motor, through in-depth research on the commutation process of the brushed DC motor, the motor conduction interference system model and the equivalent circuit model of the motor winding, the power supply and LISN (Line Impedance Stabilization Networks) are established. The effective circuit model is used to simulate and predict the conducted interference intensity of the motor, and the results are more accurate; based on the

test process of the motor radiated interference, the CST software is used to establish a 3D model of the radiated interference of the motor, and the 3D model and the 2D model are co-simulated, using the current The excitation source in the frequency domain is obtained from the clamp test, and the transfer function of the radiation interference system is obtained by the CST simulation, and the model simulation prediction of the radiation interference intensity of the motor is carried out, and the results are relatively accurate.

**Key words:** electromagnetic interference; conducted interference; radiated interference; brushed motor; winding model; excitation source

直流摇窗电机在工作时由于电机换向时会产生电流和电压的波动, 这些波动以传导干扰和辐射干扰的形式对外界的设备产生一定的影响。目前汽车的电子化程度越来越高, 电机的电磁干扰会对电机控制设备产生影响, 严重情况下会影响汽车的控制系统。因此在电机设计开发研究的前期, 提早发现并解决好摇窗电机的电磁干扰问题, 是各大汽车厂商包括科研院所内面临的重要问题。

在对电机的传导干扰进行建模研究时, 需要对电机的绕组阻抗建立等效电路电路模型。文献[1]提出了一种阻抗模型能够模拟电机大约在 150—1 000 MHz 范围内的阻抗频谱数据。此外, 该模型还考虑了电机绕组的集肤效应和电机铁芯内部电磁场的涡流效应。文献[2]考虑了与电机电枢有关的物理特性和现象, 提出了一种低压直流电机电枢的高频建模方法, 能够较好地拟合电枢测试结果。文献[3]提出了一种RLC并联的电路模块, 通过多个电路模块的组合模拟出阻抗的波峰波谷数目, 通过对参数的定量化计算, 使得电路的阻抗频谱仿真结果与实测结果拟合较好。

收稿日期: 2022-12-21

第一作者: 张戟(1967—), 男, 教授, 主要研究方向为汽车电磁兼容及电子控制技术。E-mail: jizhang@tongji.edu.cn

摇窗电机在工作时,电机内部的电刷与换向片会有规律的进行交替性接触,这会导致电枢中的部分绕组元件会被循环短路,因此在整个换向过程中,电机内部会产生有规律的电流和电压波动,这样一个循环所需的时间就是换向周期。这些波动引起的干扰可以通过电源线或者空间传递到其他设备上,进而对其他设备产生电磁干扰。因此通过电路模型准确模拟电机的换向过程,对于仿真结果的准确性是非常重要的。

文献[4]通过分析电机换向时的换向电压方程,利用Matlab工具计算得到一个换向周期内电机端子处的电压情况,并将该数据导入PSPICE软件进行仿真运算。文献[5]通过构建一个随时间变化的接触电阻模型来模拟电机换向时的阻抗变化情况,进而模拟出电机换向时的电压波动情况。文献[6]通过在绕组元件上方构建一些开关模型来模拟绕组元件被短路的过程,但是对于换向时因为接触问题产生的换向毛刺没有充分考虑。

对于电机本体的建模,国内外很多文献都认为电机内部不需要精确建模。如文献[7]在对直流雨刮电机进行辐射骚扰抑制时,提出电机的金属外壳电机本体的电磁干扰具有较好的屏蔽效果,可以对电机对外的线束采用屏蔽措施,实现对电机的电磁屏蔽,反映了电机本体对外的电磁辐射强度远远低于电源线的。文献[8]在构建直流电机的辐射干扰模型时,没有模拟雨刮电机内部的运转方式,只建立了雨刮电机的金属外壳模型,并在雨刮电机端口处导入试验所测得的电流。文献[9]介绍了一种简化的直流电动机及其接线盒电磁辐射模型,并与实测结果进行了比较。文献[10]在分析电机的辐射干扰模型时,主要对电机的外部线缆模型进行了理论分析。

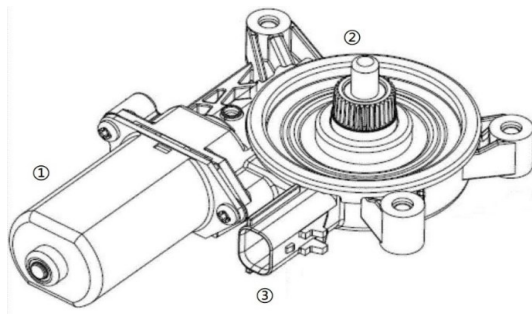
在对电机的辐射干扰激励源进行建模之前,目前国内外的很多文献研究认为电机的干扰主要集中在电机的外接电源线上,因此对于电机外接电源线上的电磁干扰进行研究非常有必要。文献[11-15]认为线缆的对外电磁辐射主要激励源是线缆上的共模干扰。其中文献[11]对电器电路板的电磁干扰进行了分析,提出共模干扰抑制对电磁辐射减弱具有重要意义。文献[12]通过仿真和测试证明了线缆上的共模干扰是线缆对外辐射干扰的主要激励源。文献[15]认为电缆束上的共模电流通常是几百兆赫以下辐射发射的主要来源。

## 1 直流电机换向理论与换向模型建立

### 1.1 直流电机换向理论

相比于直流无刷电机,直流有刷电机不需要控制器,通电即可启动或者制动,整体的控制电路相对简单。因为其造价低廉并且运转时性能比较稳定,直流有刷电机也被广泛应用于汽车工业中。

本文研究使用的直流有刷电机是上海某电机公司生产的12V摇窗电机,图1是该电机的结构示意图。



注: ① 定子部分,定子磁极、外壳和电刷结构; ② 转子(电枢)部分,电枢铁心、电枢绕组和换向器; ③ 传动机构,减速器和齿轮。

图1 摇窗电机示意图

Fig.1 Window actuator motor

本文研究的直流有刷电机,采用的单叠绕组结构。在电机运转的过程中,一组绕组元件在一个周期内会被电刷短路一次,其绕组的实物图如图2所示,结构示意如图3所示。



图2 直流电机电枢绕组

Fig.2 DC motor armature winding

单叠绕组的连接规律就是,所有的相邻元件依次串联(即后一个元件首端与前一个元件的尾端相连),每串联一个元件就向右移动一个虚槽,同时元件的出线端在换向器上移动一个换向片,最后形成一个闭合的回路。具体连接的示意图如图3所示。

换向情况中,由于换向元件具有漏磁电感,因此换向元件中将产生电感电动势 $e_r$ 。根据楞次定律,该电动势的产生就是为了阻碍电流的变化,此外,在

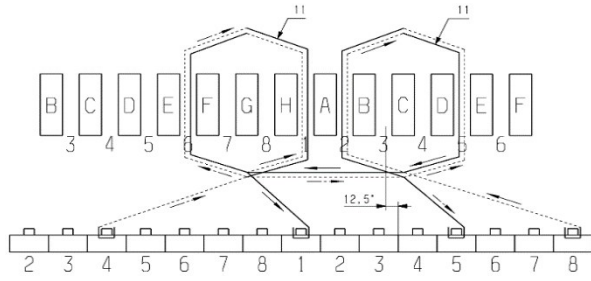


图3 电机绕组的展开图

Fig.3 Unwinding diagram of motor winding

几何中性线处还存在一定的交轴电枢磁场,换向元件“切割”该磁场时,将产生运动电动势 $e_{cl}$ 。由于电动势 $e_r$ 和 $e_{cl}$ 的出现,换向元件中电流改变方向的时刻将比直线换向时后延,这种情况是延迟换向。

### 1.2 接触压降计算

电机的阻抗元件可以简化为一个RLC的多阶电路,通过该等效电路来模拟电机绕组在关注频段的阻抗特性,激励元件可以理解电机换向过程中的电压变化,在这里可以对电机换向过程中的电路进行理论分析,计算得到电压波动时域数据作为电机简化模型中的干扰激励源。接下来对电机换向过程中的电路进行分析。

图4中带斜条纹的矩形框代表电刷,与之接触的空白长方形为换向片,由 $R_s$ 、 $L_s$ 和 $e_k$ 组成的串联支路代表正在换向的元件(由于电路的对称性,图中只分析一个换向元件),两条 $u_a$ 支路为直流有刷电机电枢绕组的两条并联支路。

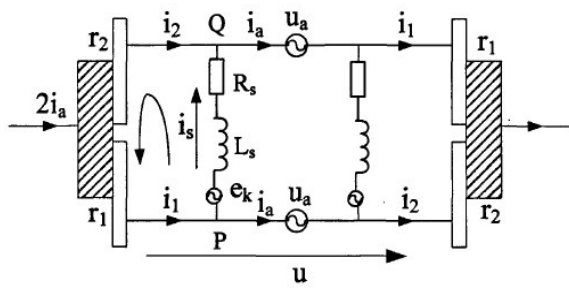


图4 直流有刷电机换向等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of commutating for DC brushed motor

对于图4,根据基尔霍夫电压定律可以得到:

$$L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s + e_k + r_1 i_1 - r_2 i_2 = 0 \quad (7)$$

式中: $i_s$ 为换向电流; $L_s$ 、 $R_s$ 为换向元件漏感和电阻, $e_k$ 为换向元件的旋转电势, $r_1$ 、 $r_2$ 分别为电刷与两片换向片的接触电阻; $i_1$ 、 $i_2$ 为经电刷引入换向片的

接触电流,图中 $i_a$ 是电枢支路电流; $t$ 为时间。

由于旋转电势 $e_k$ 在实际的情况下数值特别小,同时本文忽略换向元件其电阻压降的影响,因此在换向过程中式(7)可简化为

$$L_s \frac{di_s}{dt} + r_1 i_1 - r_2 i_2 = 0 \quad (8)$$

同时,对于图中P、Q两节点,由基尔霍夫电流定律可得:

$$i_1 = i_a + i_s \quad (9)$$

$$i_2 = i_a - i_s \quad (10)$$

假设电刷与换向片间为理想的面接触,接触电阻与接触面积成反比,则:

$$r_1 = \frac{T_k}{T_k - t} \cdot R_d \quad (11)$$

$$r_2 = \frac{T_k}{t} \cdot R_d \quad (12)$$

根据式(7)一式(11),可以将式(7)的电刷接触压降公式写为

$$L_s \frac{di_s}{dt} + \left( \frac{T_k}{T_k - t} + \frac{T_k}{t} \right) R_d i_s - \left( \frac{T_k}{T_k - t} - \frac{T_k}{t} \right) R_d i_a = 0 \quad (13)$$

式(13)是含时变系数的一阶微分方程,代入电机支路电流 $i_a$ 、换向周期 $T_k$ 和接触电阻 $R_d$ 等相关参数在Matlab中编码求解,可得到电机换向电流的时域解,如图5所示。

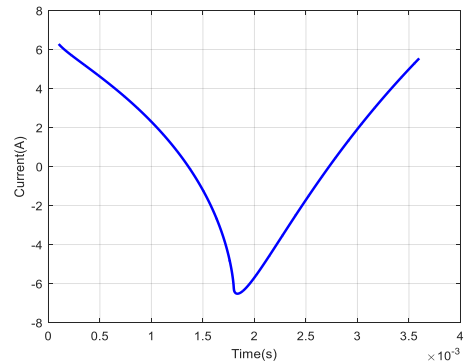


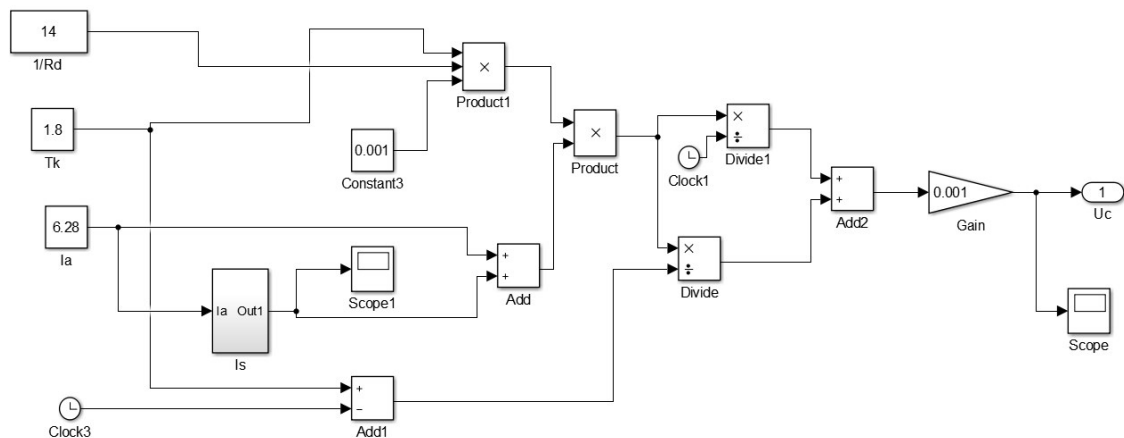
图5 直流有刷电机换向电流时域图

Fig.5 Commutation current of DC brushed motor

由图5可以发现,该电机的换向过程是延迟换向,电流呈现出上凸的趋势。计算得到换向电流的时域数据后,根据式(14)可以计算得到电机换向的接触压降,利用Simulink搭建计算模型(见图6),代入电机的相关参数可以得到电机换向时的端口电压随时间变化的数据。后续可以将该时域数据从Matlab中导出到一个TXT文件中,作为时域激励源用于下一步的电路仿真。



$$u_c = R_d \cdot \frac{T_k}{T_k - t} \cdot (i_s + i_a) + R_d \cdot \frac{T_k}{t} \cdot (i_s + i_a) f e \quad (14)$$

图6 计算 $u_c$ 的Simulink模型Fig.6 Simulink model for calculating  $U_c$ .

### 1.3 开关换向模型

电机换向导致的电压波动是整个电机传导测试系统的激励源,因此对直流有刷电机的换向过程进行准确建模是提高仿真准确性的关键一步。

如上文提到,目前很多文献是通过测试得到电机端子处的电压波动作为激励源,然后将测试数据放入仿真软件中进行仿真,或者是通过建立随时间变化的电阻元器件。前者对于电机中的共模干扰不能充分考虑,后者则需要建立非常复杂的电路模型并且准确性不够。本文从电机换向时各个绕组元件的通断情况出发,利用PSPICE软件中的理想时间开关元件来模拟电机在换向时绕组元件的通短路情况。

该直流有刷电机有一组对称的电刷和8个组成环形的换向片,绕组为8绕组元件结构。电机在换向时,在一个换向周期内随着时间的增加,电机的绕组元件会有规律的被短路。当电刷与处于换向片之间时,因为相邻的两个换向片电势相同,即相邻换向片之间的绕组元件会被短路。当电刷完全在换向片上时,电枢不被短路。用于计算电机负载换向时的绕组元件短路时间所需相关参数的汇总如表1所示。

表1 换向所需参数

Tab.1 Commutation parameters

序号	参数	数值
1	转子转速/(rad/min)	3 957
2	换向片弧度/(°)	40.98
3	电刷弧度/(°)	37.93
4	换向片间弧度/(°)	4.00

实际的电机内部结构中,换向片和电刷均为圆弧形,对应到转子轴中心有一个弧度角,且电刷相对于轴中心的弧度角要小于换向片对应的弧度角。当电刷处于两个换向片之间时,绕组元件会被短路。为了便于计算换向过程中的绕组元件的短路时间,针对于电刷与换向片的相对位置可以绘出图7所示的位置示意图。

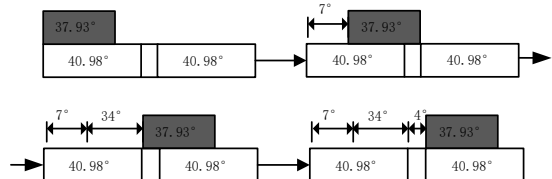


图7 电刷与换向片的相对位置

Fig.7 The relative position of the brush and commutator

图7中,黑色的为电刷;下面的是换向片,其中4个图框按照箭头指示为一个换向周期的4个状态,实际运行中是换向片在移动。本文为了便于理解,在这里简化为电刷移动,且将电刷和换向片简化为矩形,矩形框内的数字代表其相对于转子轴中心的弧度角,因此4个图框对应换向时的4个状态分别为:①电刷刚刚结束上一个换向过程(0°);②换向片准备进入换向(7°);③换向片进入换向(34°);④换向结束(4°)。上述过程电刷共移动45°,因为该电机为8绕组结构,正好对应一个换向周期,即在一个换向周期中,有换向片移动34°对应的时间处于短路状态,换向片移动11°对应的是非短路状态。此时电

机的转动速度为 3 957 r/min。经计算:一个换向周期为 1.8 ms,其中短路时间为 1.4 ms,非短路时间是 0.4 ms。

在 PSPICE 软件中,通过在电枢上面添加开关元器件  $T_{CLOSE}$  和  $T_{OPEN}$  来模拟出电机在换向过程中一个电枢的短路效果,如图 8 所示。当仿真时间为 0 ms 时,  $T_{CLOSE}$  模块向下闭合,  $T_{OPEN}$  模块处于闭合状态,此时两个开关模块下的绕组被短路;当仿真时间为 1.4 ms 时,  $T_{OPEN}$  模块处于断开状态,此时绕组元件模型上面的开关电路无法连通,即绕组元件不能被短路。在 0~1.4 ms 的时间范围内,绕组元件被短路,当仿真时间大于 1.4 ms 时,绕组元件不被短路。整体来看将仿真时间设置为 1.8 ms 即一个电机换向周期时,在 0~1.4 ms 的时间范围内绕组元件被短路,1.4~1.8 ms 时间范围内绕组元件不被短路。

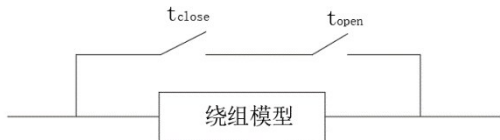


图 8 绕组元件开关换向模型

Fig.8 Switching commutation model of winding components

## 2 传导干扰建模及仿真分析

本文使用的直流有刷电机按照电磁兼容性(EMC)测试标准 CISPR25 进行了传导干扰测试实验。测试环境可以大致被分为 3 个部分,分别是 12 V 的直流电源、线性阻抗稳定网络(LISN)和电机。

直流有刷电机绕组一般为多元件结构,单个元件的阻抗特性一般会随着测试频率的增加而发生不规则的变化,在频谱图上会呈现出一定数目的波峰和波谷。本文将绕组元件等效为一个集总参数电路,使得在整个频段内等效电路的阻抗与实测元件的阻抗相一致。本文使用的直流有刷电机绕组共有 8 个绕组元件。

对于电机的绕组建模,通过建立一个等效电路模拟电机正负接线柱之间的阻抗特性,然后将正负接线柱之间的电流电压变化作为换向激励源。

本文在此基础上考虑了电机换向过程中会有部分元件被短路,因此在实际的电机换向周期中,电机正负接线柱之间的绕组电路是一个动态变化的过程,因此本节对电机绕组建模时考虑到了单个绕组元件的阻抗频谱特性,分别对单个元件进行建模,然

后在此基础上分析其换向激励源。

本文研究使用的直流有刷电机绕组是单叠绕组。单叠绕组的连接规律是:所有的相邻绕组元件依次串联,每串联一个元件就移动一个换向片,最后形成一个闭合的回路。该直流有刷电机绕组部分绕线方式如图 2 所示。通过该图可以看出相邻的两个换向片之间有一个完整的元件。

### 2.1 电机绕组元件建模

在该电枢进行建模时,将建模的重点放在绕组元件建模上(见图 9)。根据绕组的连接方式,通过单个的元件模型最终构建出该直流有刷电机的绕组模型,在测试前需要将元件与电刷之间的连接点断开,然后针对其中一个绕组元件回路进行测试。

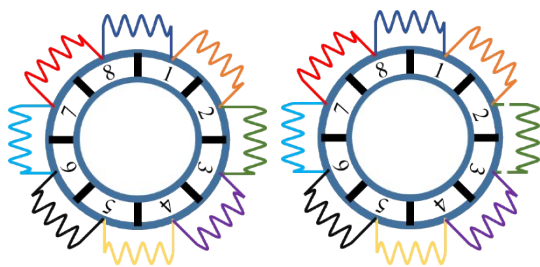


图 9 电机绕组元件建模

Fig.9 Modeling of motor winding components

进行测试实验前需要将相邻换向片上的焊接点断开,然后选择一个绕组的两个接头,利用稳态阻抗分析仪测试该元件的阻抗。将拟合计算得到的各个元器件参数带入 PSPICE 软件中,最终确定的元件模型如图 10 所示。

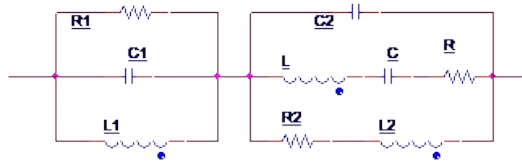


图 10 元件模型

Fig.10 Component model

在 PSPICE 软件中,对该绕组模型进行阻抗分析,仿真频率设在 150~108 MHz。

为了便于较仿真效果,将仿真结果与测试结果导入 Matlab 软件进行绘图对比,并根据误差情况调整绕组电路模型中各个电器元件的取值,最终确定绕组模型中各个元器件取值,见表 2。仿真结果与实验结果的对比情况如图 11 所示。

通过图 11 可以认为所建立的电机绕组元件电路模型的阻抗频谱与测试结果基本保持一致。在整

表2 电路模型中参数取值

Tab.2 Parameters for equivalent circuit model

参数	数值
$R, R_1, R_2$	$0.2\ \Omega, 8\ \Omega, 1\ \text{G}\Omega$
$L, L_1, L_2$	$105\ \text{nH}, 2.7\ \text{nH}, 100\ \text{H}$
$C, C_1, C_2$	$230\ \text{nF}, 15\ \text{nF}, 1 \times 10^{-20}\ \text{nF}$

个建模过程中,电器元件参数的确定首先是通过电路分析然后再理论计算。与实际测试结果进行对比后,再对模型中的参数大小进行微小调整。整个建模流程参数确定有理论依据,且该建模方法同时也适用于对其他类型直流有刷电机的绕组元件建模。

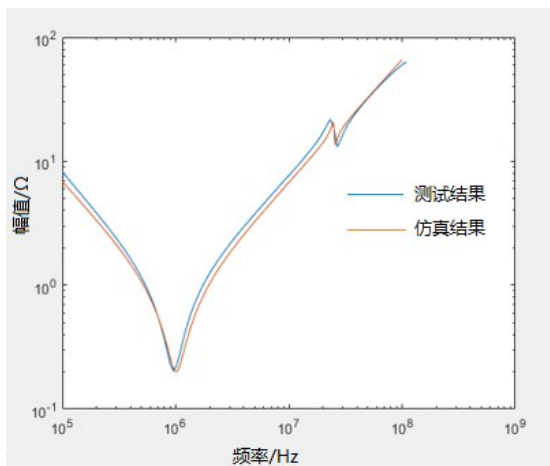
## 2.2 寄生电容建模

按照标准 CISPR25 规定,对本文研究的直流有刷电机进行了电机传导干扰测试实验,测试频率范围是  $150\ \text{kHz} \sim 108\ \text{MHz}$ 。在做电机传导干扰测试实验时,电机的金属外壳与测试平台是直接接触的。在仿真时可以将电机的外壳当做“地”,即为0电势

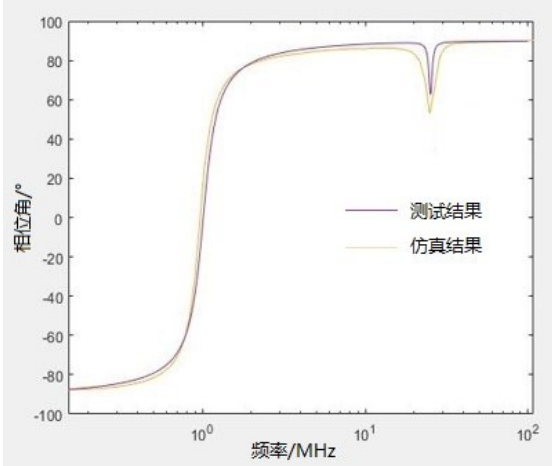
点,在建模时可以认为电机是接地的。在进行高频阶段仿真时,由于电机与外壳之间的空隙导致的寄生电容不能忽略,因此需要对电机绕组元件与外壳之间的寄生电容进行阻抗测试实验以确定寄生电容的数值大小。

电机外壳与绕组元件之间的寄生电容阻抗频谱可以通过阻抗分析仪测试得到,然后利用电容阻抗计算公式与测试结果进行拟合确定寄生电容的数值大小。根据电容的阻抗计算公式,最终确定该电容的取值为  $100\ \text{pF}$ ,拟合效果如图12所示。

从阻抗上来看,一个电容模型已经很好地模拟出测试结果,在本文的仿真模型中,忽略在高频段一些细微的阻抗波动。通过上述对单个绕组元件和寄生电容的建模,最终确定的电机的八绕组模型。该绕组模型由8个绕组元件串联组成成一个环路,每个绕组元件模型与地之间有一个电容元件来模拟绕组元件与机壳的寄生电容。绕组模型参数选取根据上文的计算得到,整个计算流程有理论依据。



(a) 阻抗幅值对比



(b) 阻抗相位角对比

图11 绕组元件模型仿真结果与实测结果对比

Fig.11 Simulated and measured result comparison for winding component model

## 2.3 电机传导干扰系统仿真结果

电机的建模根据前文的研究将绕组开关短路模型带入其中。对于 LISN 和电机之间的电源线,在测试时采用的是一根  $15\text{cm}$  的导线,其本身的电阻很小可以忽略不计。最终得到的传导干扰系统模型如图13所示,该模型主要分为电源模型、LISN 模型和电机模型3个部分。

实验室可以通过接收机与 LISN 的输出接口连接,得到 LISN 输出端的电压频谱数据作为该电机的传导干扰测试结果。在 PSPICE 软件中可以通过瞬

态仿真,利用软件自带的电压探针得到 LISN 电路模型中  $50\ \Omega$  电阻两端的电压变化数据,将该数据进行计算作为传导干扰结果。

为了便于与仿真结果进行对比,将测试报告中各个频段下的干扰取相应的数值并在 MATLAB 中绘图。最终得到测试结果和仿真结果对比如图14所示。通过对比可以发现该电机在  $150\ \text{kHz} \sim 108\ \text{MHz}$  频率范围内,仿真结果与实际测试结果能够较好地拟合,仿真模型的准确性较高。

开关换向模型不仅考虑了电机在一个换向周期



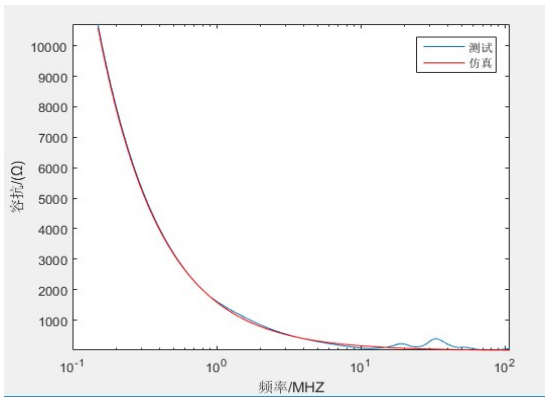


图 12 测试与仿真结果对比

Fig.12 Measured and simulated result comparison

内绕组元件的通短路情况,同时也考虑了高频火花干扰,这使得电机的换向激励建模比较准确。在此基础上通过对电源和 LISN 的准确建模,相比于通过理论计算和示波器测试建立的模型,利用开关模型得到的仿真结果远远优于上述两种模型。

### 3 辐射干扰建模及仿真分析

电机辐射干扰一般是通过空间传播。在汽车运行环境中,由于空间狭小并且电子部件较多,电机的辐射干扰强度较大且容易与汽车的控制模块行成干扰耦合。因此从仿真角度对电机的辐射干扰进行预测分析对汽车内部电磁环境优化具有重要意义。

直流电机的辐射干扰通过相邻电平信号消除 (ALSE) 方法得到其辐射干扰的频谱数据,在进行模型构建时需要将建模重点放在辐射干扰测试时的激励源建模和外部实验环境的建模。

在 EMC 实验室按照标准 CISPAR25 对直流有刷电机进行辐射干扰测试,测试时给电机加上负载

以模拟直流有刷电机换向时的工况。测试时,在电机水平方向 1m 处放置干扰接收天线,天线与实验室外部的接收机相连接,最终通过对接收机频谱分析得到电机各个频段的辐射干扰。

#### 3.1 辐射干扰测试系统建模

在进行建模前,确定以下有关尺寸的参数。电机与铜板边缘相差 200 mm,线束与铜板边缘距离 100 mm。试验线束长度为 1 500 mm,测试点距离试验线束为 1 000 mm,地面为金属板材料,金属板尺寸为 8 000 mm(长)×5 000 mm(宽)。测试台距离地面 950 mm,测试台尺寸为 2 500 mm(长)×1 500 mm(宽),厚度为 2 mm。

在对电机建模时,电机的金属外壳对于其内部的电磁干扰有很好的屏蔽效果,因此可以忽略电机内部的结构,只需要对电机的外壳进行建模。最终建立的电机辐射干扰测试系统如图 15 所示。图 15 是电机测试系统三维模型的布置图,图中编号①代表电机外壳模型;编号②代表电机的干扰线缆模型;编号③代表 LISN 模型;编号④代表 12 V 蓄电池电源模型;编号⑤代表实验桌面;编号⑥代表实验室地面;编号⑦—⑨代表天线模型,分别是 1 m 长的垂直单极天线、双锥天线和对数周期天线,这 3 种天线对应的测试频率范围分别是 150 kHz~30 MHz、30~200 MHz 和 200 MHz~400 MHz。

在 CST 三维仿真软件的 STUDIO 仿真环境中构建出电机的三维仿真环境后,切换到二维电路 Schematic 环境,对三维环境的接口进行建模处理。在该环境中,主要是设置相应的阻抗端口、建立 LISN 模型、直流电源模型、设置单位激励接口和仿真环境设置等。

图 16 中的端点 1 和 2 指三维模型中的电机外接口,该接口与电机外接电源线连接,然后电源线与

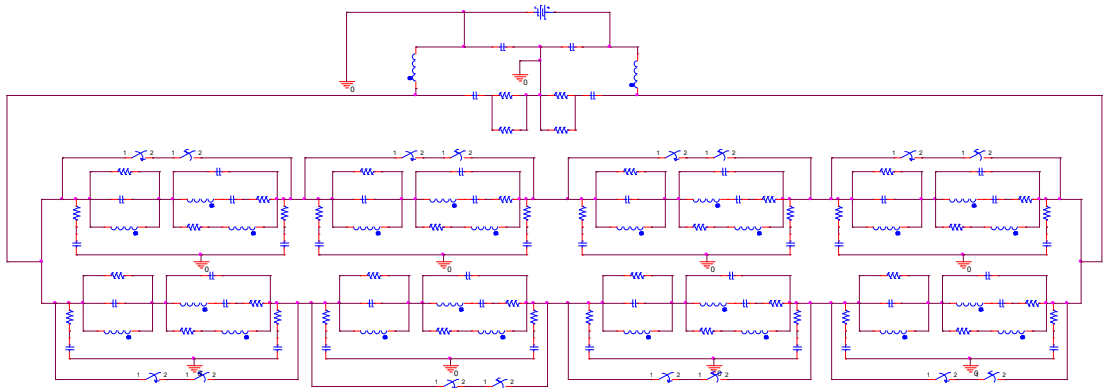


图 13 传导干扰系统模型

Fig.13 Conducted interference model

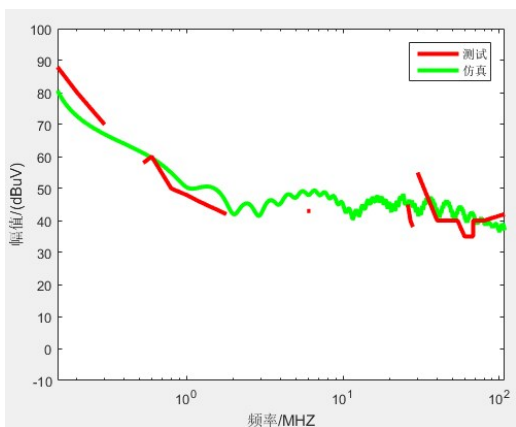


图14 传导干扰对比图

Fig.14 Comparison for conducted interference results

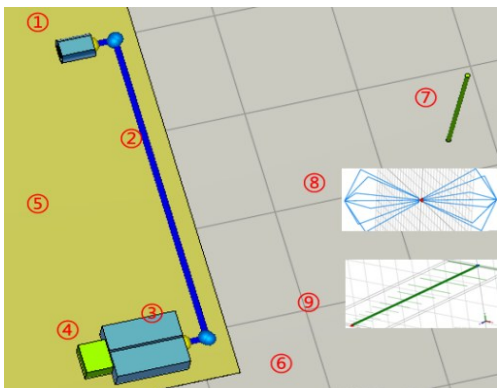


图15 电机测试系统三维模型

Fig.15 3D model of the motor testing system

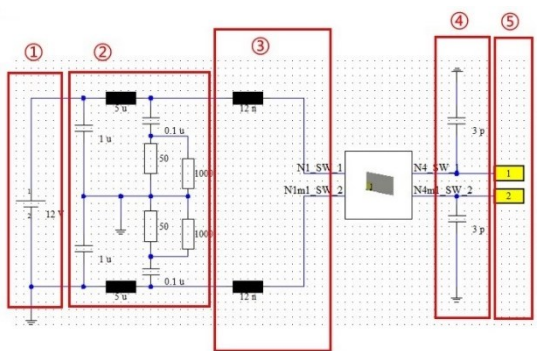


图16 电机辐射干扰测试系统二维电路模型

Fig.16 Circuit model of the motor radiation interference testing

LISN和电池连接。直流电源可以简化为一个12 V的理想直流电源,LISN按照标准电路模型搭建。

### 3.2 辐射干扰仿真计算

确定电机的辐射干扰激励源是电源线上的电流干扰以后,可以采用两种方式得到电机的辐射干扰结果。一种是通过电流钳测试得到电机运转过程中电源线上的共模干扰作为激励源,然后将该激励源

与系统的传递函数频域乘积计算。另一种是通过仿真得到电机换向时外接电源线上的时域电流干扰,将该仿真结果带入到仿真模型中,采用时域仿真计算得到辐射干扰结果。本文采用传递函数法计算辐射干扰。在构建出电机辐射干扰模型基础上,在CST中计算电机辐射干扰测试系统的传递函数。这里以共模干扰作为电机对外辐射的干扰源,在CST中将电机的端口设置为单位电流激励。建立单位激励端口port后,需要对端口port的相关参数进行设置。首先将激励源设置为电流脉冲并将电流频域幅值设置为单位1,并且端口激励的频率范围大于仿真频率范围,这里为了建模的准确度,选择设置为550 MHz。

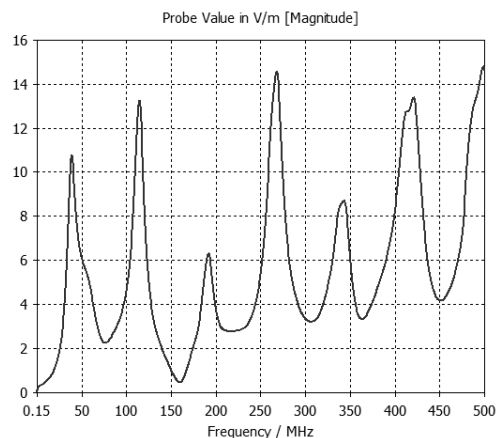


图17 电机辐射干扰系统的传递函数

Fig.17 Transfer function of motor radiation interference system

获得了电机辐射干扰系统的传递函数后,下一步需要确定电机辐射干扰系统的激励源。电机的在空载和负载两种工况下换向电流差别较大,因此两种工况下的外接电源线的干扰有较大的差异,为了保证实验激励测试的准确性,测试激励时需要给电机添加负载。通过磁滞制动器来给电机提供制动的力矩以模拟直流有刷电机实际工况下的负载。

根据共模干扰和差模干扰的流向,电流钳可以通过不同测试方式得到电源线内的共模干扰和差模干扰。在测试电源线上的差模干扰时,在电流钳内卡住一根电源线,在测试电源线上的共模干扰时,在电流钳内卡住两根电源线,此时电源线内的差模干扰因为方向相反,产生的电磁感应效应正好抵消,共模干扰因为方向相同可以测试得到其共模干扰的大小。线缆上共模电流对系统辐射发射起主要的贡献。接下来在传递函数法中模型结果的获取将以图



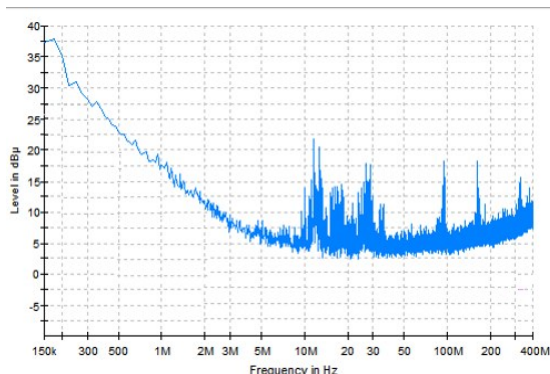


图18 电机电源线共模干扰

Fig.18 Common-mode interference on motor power lines

18测试得到的电源线共模干扰作为激励源进行仿真。

### 3.3 仿真结果及分析

三维模型和二维电路模型构建完成后,切换到CST中的建模仿真设置页面,设置仿真频率范围为150 kHz~30 MHz;定义边界条件为开放边界,即open;在三维模型的电源线水平相距1 m处设置电磁场探针,且探针位置位于接地平面以上1 000 mm处,记录电磁场分布。

利用测试得到的图18所示的共模干扰频谱和图17所示的电机辐射干扰测试系统的传递函数,在频域内进行乘积运算,得到电机辐射干扰测试系统的仿真结果。通过Matlab软件绘制测试结果与仿真结果,得到的结果对比如图19所示。

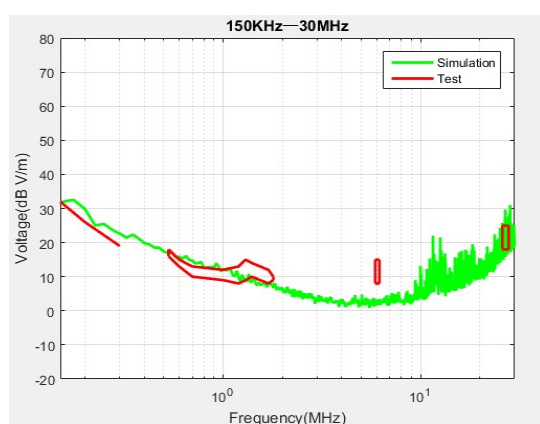


图19 150 kHz~30 MHz 电机辐射干扰对比

Fig.19 150 kHz - 30 MHz Motor radiation interference results comparison

由图19可以发现,在150 kHz~30 MHz频率范围内,测试结果与仿真结果基本一致,即仿真结果可以很好地预测出电机辐射干扰。在30~400 MHz高

频段,仿真结果与测试结果在频谱趋势和幅值上均有一定的误差,但仿真结果依然能反映出测试结果的幅值和趋势情况,具有一定的参考价值。

## 4 结语

为了从仿真层次对直流有刷电机的电磁干扰进行预测,开展了直流有刷电机电磁干扰建模研究。针对现有的电机电磁干扰模型对激励源考虑过于简单化和理想化等问题,深入研究了电机的换向过程并对激励源进行准确建模,并在此基础上建立了电机的传导干扰测试系统模型和辐射干扰测试系统模型。本文取得的研究成果主要有以下两个方面:

(1) 基于阻抗分析仪的测试数据,建立了绕组元件模型和绕组元件与机壳的寄生参数模型;基于摇窗电机绕组结构建立了8绕组元件模型;基于电机换向理论研究建立了开关模型来模拟摇窗电机电磁干扰激励源;在此基础上对电源和LISN准确建模,建立了电机传导干扰系统模型;将模型仿真结果与实测结果对比,验证了模型的准确性,可将该模型作为电机传导干扰测试的预测模型。

(2) 提出传递函数法对直流有刷电机辐射干扰系统进行了建模及预测研究。基于电机辐射干扰测试系统,确定系统激励源主要是电机外接电源线。在CST中分别建立三维模型和二维电路模型进行联合仿真,并通过传递函数法来预测摇窗电机的辐射干扰。通过仿真对比发现传递函数法的仿真结果的准确性较好,对于预测电机的辐射干扰有一定的指导意义

## 参考文献:

- [1] KAHOU L R, MARCHAL P, AZZOUZ Y, *et al.* HF model of DC motor impedance EMC problems in automotive applications[C]// EMC 2008: IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Detroit: IEEE, 2008.
- [2] KAHOU L R, AZZOUZ Y, MARCHAL P, *et al.* New behavioral modeling for DC motor armatures applied to automotive EMC characterization [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2010, 52(4):888.
- [3] ZHANG J, LIAO Z, SUN Z C. Electric vehicle behavioral modeling methods for motor drive system EMI design optimization [C]// SAE 2015 World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper 2015-01-1204, 2015. DOI: 10.4271/2015-01-1204.
- [4] 汪泉弟, 郑亚利. 电动汽车的电磁兼容原理、仿真模型及建模技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 99.

- WANG Quandi, ZHENG Yali. Electromagnetic compatibility principle, simulation model and modeling technology of electric vehicles[M]. Beijing: Science Press, 2017: 99.
- [5] OGANEZOVA I, KADO R, KHVITIA B, *et al.* EMC model of low voltage DC motor [C]// EMC 2014: IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Tokyo: IEEE, 2014.
- [6] LEFERINK F B J, ETTEN W C. EMC study of an automotive application [M]. Enschede: Twente University Press, 2004.
- [7] 余承亮, 朱秋燕, 王骞. 汽车雨刮器电机辐射骚扰抑制[J]. 安全与电磁兼容, 2011(4):59.  
YU Chengliang, ZHU Qiuyan, WANG Qian. Suppression of radiation disturbance of automobile wiper motor[J]. Safety and Electromagnetic Compatibility, 2011(4):59.
- [8] 田锦涛. 车载雨刮电机的电磁辐射仿真与测试研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2018.  
TIAN Jintao. Research on electromagnetic radiation simulation and testing of vehicle wiper motor[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018.
- [9] SURIANO C R, SURIANO J R, THIELE G, *et al.* Prediction of radiated emissions from DC motors [C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Denver: IEEE, 1998.
- [10] 徐加征, 张本军. 电源共模电容接地对辐射发射的影响[J]. 电子质量, 2019(11):95.  
XU Jiazheng, ZHANG Benjun. Influence of power supply common mode capacitor grounding on radiated emission [J]. Electronic Quality, 2019(11):95.
- [11] SMITH W T, FRAZIER R K. Prediction of anechoic chamber radiated emissions measurements through use of empirically-derived transfer functions and laboratory common-mode current measurements [C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Denver: IEEE, 1998.
- [12] CHEN H, WANG T. Estimation of common-mode current coupled to the communication cable in a motor drive system[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60: 1777.
- [13] MAKHARASHVILI T, WALUNJ S, HE R J. Prediction of common mode current in cable harnesses [C]// 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC). Singapore: IEEE, 2018.
- [14] WALUNJ S, MA F, MAKHARASHVILI T, *et al.* Experimental characterization of the common-mode current sources in a cable harness [C]// 2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI). New Orleans: IEEE, 2019.