

# 动车组线槽电磁屏蔽效能仿真分析\*

郭 强 张 宁

(之江实验室,311100,杭州//第一作者,工程师)

**摘 要** 介绍了磁场屏蔽效能公式的物理意义和计算方法,并以此为基础,重点研究了动车组电缆线槽对低频磁场的屏蔽作用。利用 COMSOL 多物理场耦合仿真分析软件,分析了线槽厚度、电流频率、电缆与线槽距离等屏蔽线槽主要参数对屏蔽效果的影响,同时分析了两根电缆和三相电缆的磁场分布。

**关键词** 动车组; 电缆线槽; 低频磁场; 屏蔽效能

**中图分类号** O441.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.020

## Simulation and Analysis of Magnetic Field Shielding for Electric Multiple Unit Trunking

GUO Qiang, ZHANG Ning

**Abstract** The physical meaning and the computing method of electromagnetic shielding effectiveness formula are introduced. On this basis, the shielding effect of electric multiple unit (EMU) cable trough on the low-frequency magnetic field is mainly studied. By using the COMSOL Multiphysics simulation analysis software, the influence of parameters like the channel thickness, the current frequency, the distance between cable and slot on the shielding effect of the low-frequency magnetic field, the magnetic field distribution of two cables and three-phase cables are analyzed.

**Key words** motor train unit; cable trough; low frequency magnetic field; shielding effectiveness

**Author's address** Zhijiang Lab, 311100, Hangzhou, China

近年来,我国轨道交通事业快速发展,动车组制造水平日益提高。动车组的牵引系统是其主系统之一,包括了受电弓、变压器等高压用电设备。这些设备使动车组的空间电磁场环境非常复杂。同时,动车组也使用了温度、速度等各类低压信号传感器以及其他对电磁干扰非常敏感的元器件,一旦受到电磁干扰,其内部会产生感应电压和感应电

流,导致信号失真,从而使输出值存在误差,影响列车状态的监控和控制,存在着严重的安全隐患<sup>[1]</sup>。因此,保障敏感元器件不受电磁干扰成为列车电磁兼容设计的一个重要问题。

低压信号从产生、传送到最后被上位机接受,整个过程中,主要受到电磁干扰的是传送线缆部分。车内包括了 25 kV 电力电缆线、230 V 辅助供电电缆线,根据法拉第电磁感应定律和毕奥-萨法尔定律,这些电缆线会在空间中产生电磁场,所以常用的减少电磁干扰的方法包括设计金属线槽、给电缆外包屏蔽层等,但不同材料、不同厚度的线槽其电磁屏蔽的效果不同<sup>[2]</sup>。

由于低频磁场比高频磁场的趋肤深度大<sup>[3-4]</sup>,而要屏蔽低频磁场必须要使用高磁导率材料,这样才能将磁场封闭在线槽内部而不会泄漏至外部空间。因此,本文主要研究低频磁场的屏蔽效果。

## 1 屏蔽效果公式

屏蔽体的效果公式为:

$$S_E = 20 \lg \frac{H_0}{H_s} \quad (1)$$

式中:

$S_E$ ——屏蔽体的效果, dB;

$H_0$ ——无屏蔽时的磁场强度, A/m;

$H_s$ ——屏蔽后相同位置的磁场强度, A/m。

式(1)的物理含义是屏蔽体将磁场衰减的程度。例如,屏蔽前磁场为 1 T,屏蔽后在相同位置的磁场为 0.1 T,则  $S_E$  为 20 dB。一般民用机箱屏蔽效能在 40 dB 下,即磁场衰减到 1%,军用屏蔽要求达到 60 dB。

屏蔽效能的计算公式为:

$$S_E = 20 \lg \frac{1}{|T|} \quad (2)$$

\* 之江实验室基金项目(113009-AA2003);中国博士后科学基金项目(2019M662121)

$$|T| = |T_1| \cdot |T_2| \cdot |T_3| \quad (3)$$

式中:

$T$ ——屏蔽效能;

$T_1$ ——吸收损耗;

$T_2$ ——反射损耗;

$T_3$ ——多次反射损耗。

则式(2)变为:

$$S_E = 20 \lg \frac{1}{T_1} + 20 \lg \frac{1}{T_2} + 20 \lg \frac{1}{T_3} \quad (4)$$

根据吸收损耗、反射损耗和多次反射损耗的定义,式(4)变为:

$$S_E = 8.686 \frac{t}{\delta} + 14.4 + 10 \lg \left( \frac{\sigma_r f r^2}{\mu_r} \right) + 20 \lg (1 - 10^{-0.868 \frac{t}{\delta}}) \quad (5)$$

式中:

$t$ ——屏蔽槽厚度, m;

$r$ ——线缆距离屏蔽体的距离, Hz;

$f$ ——通过线缆的信号频率, m;

$\delta$ ——趋肤深度;

$\sigma_r$ ——材料的相对电导率;

$\mu_r$ ——材料的相对磁导率。

$\delta$  计算公式为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (6)$$

式中:

$\sigma$ ——材料电导率;

$\mu$ ——材料磁导率, 可以查表得到。

通过式(6)可以看出, 影响屏蔽线槽性能的主要包括材料属性(电导率和磁导率)、屏蔽体厚度、信号频率、电缆与屏蔽体的距离。

## 2 屏蔽效果仿真分析

动车组车载电缆分为 3 类<sup>[5-6]</sup>, 其中 A 类电缆是指供电电缆、动力电缆、辅助装置电缆等, B 类电缆指蓄电池电缆和控制电缆, C 类电缆包括 C1 型通讯电缆和 C2 型传感器电缆等。根据 TB/T 1507—93 中对电缆线芯截面和通过电流大小的说明。选取截面积为 300 mm<sup>2</sup> 的铜线芯做为研究对象, 施加电流 335 A。该模型接近动车组牵引系统电机动力线缆的尺寸。建模时设定线缆长度为半径的 50 倍, 可以认为是无限长导线, 分析理想状态下参数变化时的线槽屏蔽效能。

首先设定电流频率为 50 Hz, 屏蔽体材料为铝

制, 屏蔽层厚度为 10 mm, 线芯与屏蔽层的距离为 150 mm。通过公式可以计算此时的屏蔽效果约为 87.3 dB, 屏蔽效果三维仿真图如图 1 所示。

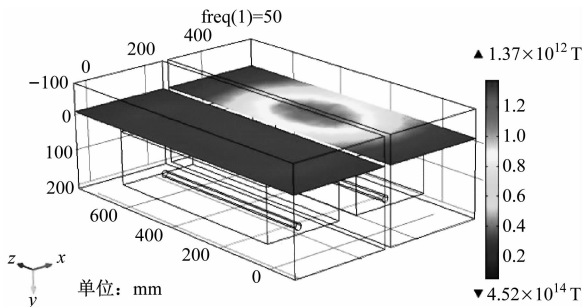


图 1 屏蔽效果三维仿真

图 1 中, 框内圆柱表示裸漏铜导线, 内框表示屏蔽体, 外框表示屏蔽体的外空间, 三维图中坐标数值表示模型尺寸。颜色切片表示距离屏蔽体上表面 20 mm 的空间辐射磁场结果。右侧是屏蔽前的结果图, 左侧是屏蔽后的结果图, 可以看出屏蔽前的图片颜色较深, 说明磁场值较大。通过对比可以清晰地看出, 屏蔽层将磁场约降低了 2 个数量级。下面就影响屏蔽效果的主要参数进行分析。

### 2.1 屏蔽层厚度对屏蔽效果的影响

屏蔽体厚度影响了吸收损耗和多次反射损耗。屏蔽体厚度越大, 吸收损耗和多次反射损耗越大, 屏蔽的效果越好。但屏蔽体厚度的增加会增加车体重量, 因此, 在设计时要综合考虑。图 2 为屏蔽效能对屏蔽体厚度的变化曲线。设定磁场频率为工频 50 Hz, 线芯距离屏蔽层的距离为 150 mm。

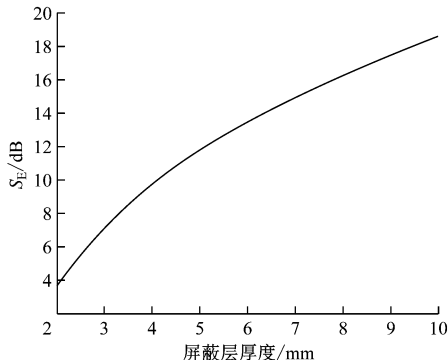


图 2 屏蔽层厚度与屏蔽效果关系曲线

由图 2 中可以看出, 随着屏蔽层厚度的增加, 屏蔽效果越来越好。通过图 3 的仿真效果图能直观地看出屏蔽体厚度对效果的影响。

图 3 左侧是经过屏蔽厚度为 14 mm 的铝屏蔽体后的磁场空间辐射图, 右侧为 7 mm 的辐射效果

图,颜色切片表示屏蔽体上表面 20 mm 的空间磁场值。可以明显看出左图的颜色比右图颜色浅,说明对磁场的屏蔽效果更好。通过公式可以计算出 14 mm 厚度的屏蔽效能约为 117.98 dB,7 mm 厚度屏蔽体厚度约为 65.24 dB。

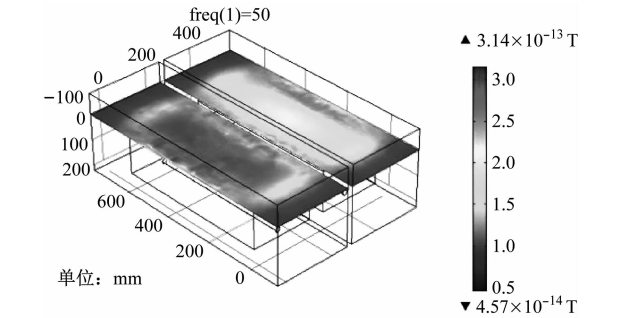


图3 屏蔽层厚度不同时屏蔽效果仿真

2.2 信号频率对屏蔽效果的影响

图4为信号频率对磁场屏蔽效果的影响。我国电力系统采用的是工频 50 Hz 的电压。低频磁场的涡流效应不明显,所以趋肤深度小,吸收损耗小,决定屏蔽效能的主要是反射损耗。而反射损耗与场的波阻抗有关,磁场的波阻抗很小,反射损耗小,整体的屏蔽效能差。当频率升高时,吸收损耗增加,反射损耗也增加,屏蔽效能快速增加。图5为厚度均为 7 mm 的铝屏蔽体,频率分别为 50 Hz 和 100 Hz 的磁场屏蔽效果图,横纵坐标数字值表示模型尺寸,单位 mm。图中可见,频率较高时,屏蔽后的空间磁场较小。计算可知,100 Hz 的屏蔽效能约为 89.9 dB。

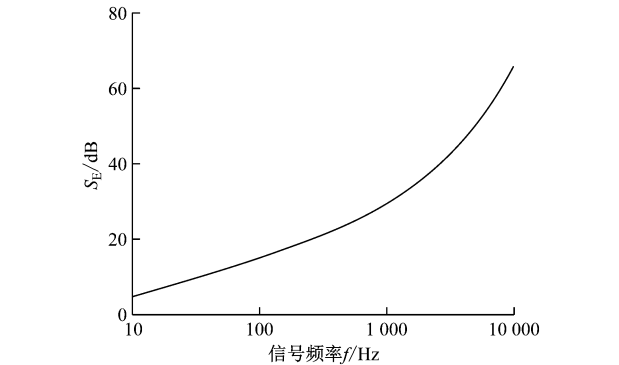


图4 信号频率与屏蔽效果关系曲线

2.3 电缆与屏蔽层距离  $r$  变化时的屏蔽效果分析

图6为电缆与屏蔽体的距离  $r$  对屏蔽效果的关系曲线。电缆线与屏蔽层的距离,取决于线槽的高度和线缆半径。在线缆半径确定的前提下,线槽越高,同种电缆与屏蔽层的距离就会越大, $r$  影响到反

射损耗。 $r$  增大时,屏蔽效能也增加,这是由于磁场在空间中随着距离呈现三次方反比例衰减的原因。但  $r$  的增加会导致线槽尺寸的增加,因此,优化线槽尺寸,合理设计车内空间,是电磁兼容设计时要考虑的问题之。

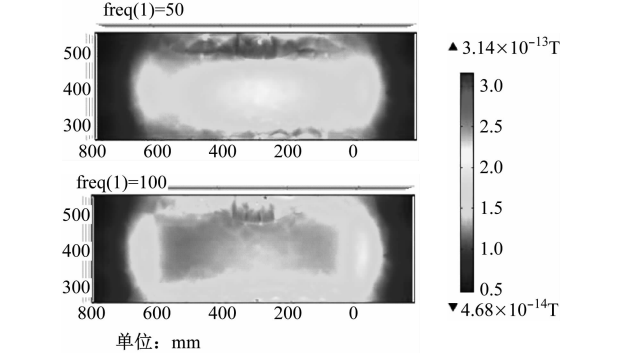


图5 磁场频率不同时屏蔽后的空间磁场辐射结果

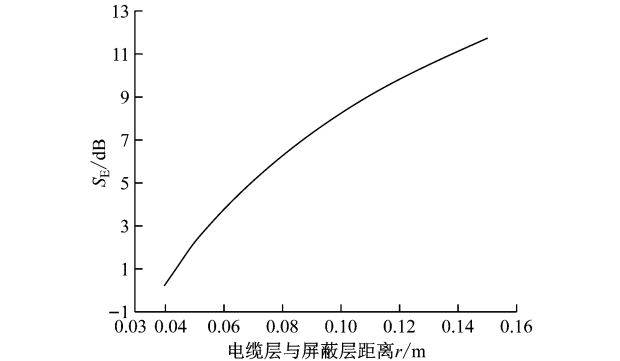


图6 电缆层与屏蔽层距离对屏蔽效果影响

图7为电缆与屏蔽层不同距离的屏蔽效果仿真结果图。左侧为电缆与屏蔽层的距离为 150 mm 时,屏蔽后的磁场对空间辐射的效果图,右侧为 160 mm 的效果图。图中可见,距离增加了 10 mm 后磁场的屏蔽效果更加明显。

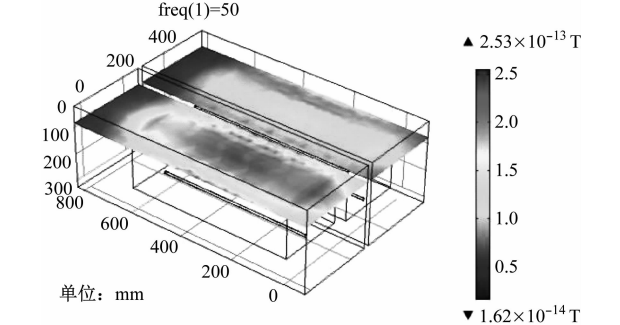


图7 电缆与屏蔽层不同距离的屏蔽效果

2.4 屏蔽材料变化时的屏蔽效果分析

不同的材料其磁导率和电导率都不同,这直接

影响吸收损耗、反射损耗和多次反射损耗。例如,硅钢、不锈钢等材料由于磁导率较高,可以增加趋肤深度、吸收损耗,低频磁场的屏蔽效果较好,但是由于其密度是铝的 2.9 倍,同体积的钢比铝质量大,会导致车体质量增加,影响车辆的动态性能。图 8 为磁导率对屏蔽效果的影响。

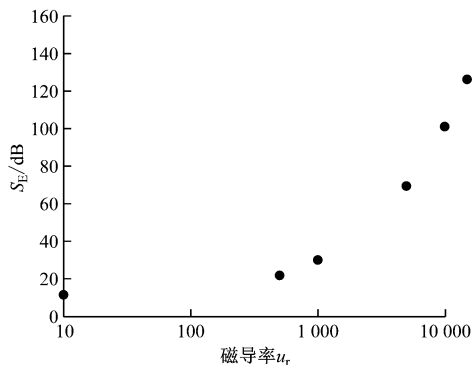


图 8 磁导率与屏蔽效果关系

相对磁导率为 1 的材料主要为铜、铝、锌、铅等金属,相对磁导率为 500 的不锈钢其屏蔽效能已经达到 70 dB。但钢材料的密度较大,综合考虑,屏蔽材料一般选择铝金属。

### 3 双缆同槽的磁场分析

根据比奥萨法尔定律和右手法则,两个方向相反的电流,产生的磁场方向相反,可以相互抵消。因此,电流或电压方向相反的电缆可以并排放在同一个线槽中。图 9 为方向相反和方向相同的电流在空间产生的磁场分布图。图中箭头表示磁力线,圆圈表示导线。左图中两根导线的电流方向相反,产生的磁场的方向正好相反,可以起到相互抵消的作用;右图中两个电流的方向相同,产生的磁场方向相同,相互叠加在一起使磁场增强,不利于低频磁场屏蔽。



图 9 方向相反和方向相同的电流在空间产生的磁场

图 10 为两根电缆同向和异向电流屏蔽后对空间辐射的三维效果图。图中左侧为屏蔽体内两根电缆通过相同方向的电流,右侧为电缆中通过数值

相等,方向相反的电流。可以看出,右侧磁场对空间的辐射值更小。

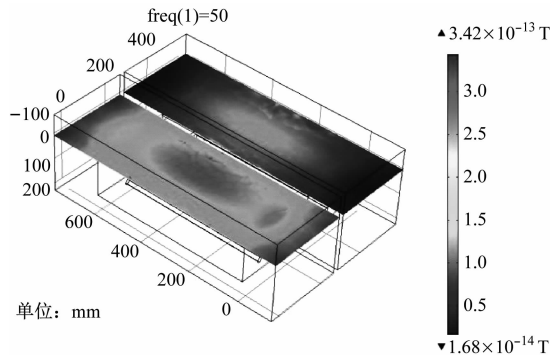


图 10 两根电缆同向和异向电流屏蔽后对空间辐射的效果

相互垂直的两条电缆在空间中产生的磁场线也是相互垂直的,不会相互耦合产生干扰。因此在布线中,不同种类的电缆在垂直布置时,不要求最小距离。

### 4 三相电缆的磁场分析

牵引电机使用的是幅值相同、相角各差  $120^\circ$  的三相交流电。三相电缆一般放在同一个线槽内,排列方式有两种<sup>[7]</sup>,一种是三根并列,另一种是三根捆成三角形,其屏蔽后的辐射效果如图 11 所示。

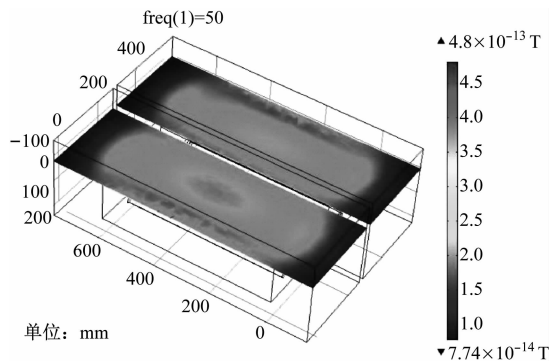


图 11 三根导线的磁场

图 11 中,左侧为三根电缆并列布线,右侧为捆成三角形布置。由于磁场的相互抵消作用,可以使三角形布线方式的空间辐射的磁场更小。

### 5 结语

本文分析了在计算列车低频磁场屏蔽效能公式时,影响计算结果的主要参数,包括材料、屏蔽体厚度、电缆与屏蔽体距离及频率,利用 COMSOL 多物理场耦合分析软件,对不同参数变化时对屏蔽效

(下转第 97 页)

师室噪声频谱图频率 40 Hz 处对应的峰值明显降低,峰值由整改前 62 dB(A)降低至 52 dB(A),降低了约 10 dB(A);经过车体端墙小幅度改动,有效控制了机械师室的异常噪声,验证了机械师室异常噪声产生机理分析的正确性。

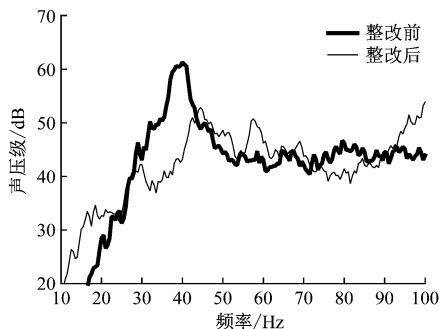


图 12 整改前后机械师室噪声频谱图对比结果

## 5 结论

1) 机械师室噪声频谱在 40 Hz 处存在明显峰值,且 40 Hz 频率处的噪声不随动车组运行速度的变化而改变。

2) 机械师室后端墙、车体端墙的振动频谱在 40 Hz 附近均存在明显峰值,与机械师室噪声频谱特性规律保持一致,且与车体端墙的一阶固有频率仿真结果相吻合。

3) 综合试验与仿真分析结果,机械师室 40 Hz 噪声和振动峰值主要由车体端墙和机械师后端墙共振引起的,列车在高速运行过程中,高速气流激

励在车体端墙上,引起了车体端墙的共振,车体端墙结构模态的共振使机械师室产生了异常噪声。

4) 车体端墙经过整改后,机械师室噪声频谱图频率 40 Hz 处峰值明显降低,端墙的固有频率变大,峰值由整改前 62 dB(A)降低至 52 dB(A),降低了约 10 dB(A),机械师室的异常噪声得到有效控制。

## 参考文献

- [1] 韩光旭,张捷,肖新标,等. 高速动车组车内异常振动噪声特性与车轮非圆化关系研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22):113.
- [2] POISSON F, GAUTIER P E, LETOURNEAUX F. Noise sources for high speed trains: a review of results in the TGV case [C]// Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Munich: Springer, 2007:71.
- [3] 张伟,陈光雄,肖新标,等. 高速列车车内噪声声品质客观评价分析[J]. 铁道学报,2011(2):13.
- [4] 范蓉平. 高速列车车厢减振降噪材料和结构的一体化设计技术与性能评估方法[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [5] 张敬涛,周以齐. 拖拉机驾驶室内异常噪声分析与控制[J]. 噪声与振动控制,2017,37(2):75.
- [6] 张筱璐,黄其柏,许智生,等. 空调机异常噪声源的实验分析与诊断研究[J]. 噪声与振动控制,2009,29(3):136.
- [7] 张立军,余卓平,靳晓雄,等. 减振器异常噪声的试验研究与分析[J]. 振动与冲击,2002(1):35.
- [8] 樊康,华春蓉,闫兵,等. 某航空发动机机扭振减振器失效机理分析[J]. 机械科学与技术,2018,37(2):318.
- [9] 樊康. 直裂纹转子系统呼吸效应与振动特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

(收稿日期:2018-11-17)

(上接第 92 页)

能的影响进行了仿真,对双缆同槽及三线同槽电缆的空间磁场分布进行了描述。研究表明,优化电缆的布局方式及走线,选用合适的屏蔽材料和屏蔽体厚度,可以有效地降低动车组中电缆向空间辐射的低频磁场值,减少电磁污染,提高列车运行的安全性能。

## 参考文献

- [1] 章国平,康洪军. 高速动车组布线线槽电磁兼容设计[J]. 铁道机车车辆,2018(8):4.
- [2] ROBINSON M P, TURNER J D. Shielding effectiveness of a rec-

tangular enclosure with a rectangular aperture [J]. Electronics Letters, 1996, 32(17):1559.

- [3] 何金良. 电磁兼容概论[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [4] 袁岩兴. 低频磁屏蔽材料的制备与研究[D]. 北京:北京工业大学,2005.
- [5] CEN. 铁路应用 机车车辆布线规则:EN 50343:2003[S]. Brussels:CEN, 2003.
- [6] 杨君,苑丰彪. 高速动车组电磁兼容性设计研究[J]. 机车电传动,2009(2):13.
- [7] 王艳琴,郝明远,汪星华,等. CRH3G 型动车组电磁兼容性的仿真分析[J]. 城市轨道交通研究,2014(6):146.

(收稿日期:2018-10-21)