

矿用变频器辐射电磁干扰特性分析

杨 洋¹, 杨 桢¹, 荣 相^{2,3}, 史 晗^{2,3}, 眭先明^{2,3}

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015; 3. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)

摘要: 为了研究矿用变频器运行状态下电磁辐射分布特性, 基于以电压源型两电平变频器为核心的调速系统, 在分析调速系统工作机理与干扰源的基础上, 采用矩量法和天线理论相结合的方式, 在电磁场仿真软件 FEKO 中搭建了变频器天线模型。通过模型仿真结果, 分析了调速系统稳态下的干扰特性。研究表明: 变频器外壳起到了很好的屏蔽作用, 内部电磁干扰主要集中在逆变器与散热片之间; 机壳背部散热片处场强较大, 且 0.5 m 外场强均符合限值; 远场辐射波瓣的方向与频率有关。通过实验平台验证了理论和模型的合理性。该研究对矿用变频调速系统的电磁干扰抑制具有参考价值。

关键词: 矿用变频器; 电磁干扰; 天线模型; 矩量法; FEKO

DOI: 10.12067/ATEEE2102011

文章编号: 1003-3076(2021)07-0070-11

中图分类号: TM15

1 引言

经过十几年的发展, 矿用变频器已经在煤矿的生产、运输、通风等环节得到广泛的运用^[1]。大量变频器的使用对周围其他设备也带来了许多影响: 变频器工作时继电保护器误动作, PLC 工作异常, 安全监控系统误报警等等, 从现场情况来看大多都是附近变频器产生的干扰所引起的^[2,3]。

对于变频器的电磁干扰, 相关学者主要从传导和辐射两方面进行了大量研究。对于传导电磁干扰, 曹海洋等^[4]建立了大功率双三电平变频调速系统的各部分高频模型, 并详细分析了传导干扰的传输路径; 张忠彪等^[5]以现代变频驱动系统为研究对象, 分析了系统中传导干扰产生的原因和耦合路径, 并设计了一种地线 LC 滤波器来代替传统高阶 EMI 滤波器; 孟进等^[6]基于双重傅里叶积分方法建立了三相 PWM 逆变器差模干扰源和共模干扰源的数学模型, 并研究了 PWM 调制方式对电磁干扰的影响, 结果表明空间矢量脉宽调制方式下干扰量值最大, 断续 PWM 方式下最小。而对于变频器辐射电磁干

扰的研究大多以测量为主。邹哲强等^[7]采用示波器和频谱分析仪对井下变频器等设备的中低频段电磁干扰源进行了测量分析, 得出变频器等设备为主要的电磁干扰源的结论; 辛中华等^[8]调查走访了多家煤矿, 分析研究了产生电磁干扰的原因并对主要设备的干扰情况进行了现场测试, 结果表明变频器发射干扰的频段很宽, 低频分量较大, 且超过了频段标准限值。对于电磁辐射模型的相关研究, 国内华北电力大学^[9-11]根据天线理论, 采用 FEKO 软件搭建了换流阀天线模型, 通过与实际测量对比, 证明了方法的可靠性。

本文基于两电平电压源型防爆变频器, 采用以矩量法为核心的电磁场仿真软件 FEKO 搭建变频器辐射天线模型, 用以研究分析变频器工作状态下辐射干扰情况, 为今后电磁干扰抑制方法的研究提供理论依据。

2 变频器拓扑结构和调制方式

变频器可以看作是一个 PWM 脉冲发生装置, 大量脉冲信号会通过导体部分以一定的方式发射出

收稿日期: 2021-02-22

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究经费资助(LJ2019JL013、LJ2020JCL020)、辽宁工程技术大学学科创新团队资助(LN-TU20TD-29)、天地(常州)自动化股份有限公司自研项目(2019GY102)

作者简介: 杨 洋(1995-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为电磁环境科学与技术;

杨 桢(1980-), 男, 江苏籍, 副教授, 博士, 研究方向为智能电网技术及理论。

去,形成干扰。因此 PWM 脉冲的生成原理对于干扰源的分析尤为重要。图 1 为交直交电压源型两电平变频器基本电路拓扑图。其电路包含了由 6 个二极管组成的三相不可控整流桥、由平波电容形成的滤波电路和由 6 个 IGBT 以及与之反并联的二极管组成的三相桥式逆变电路三部分。

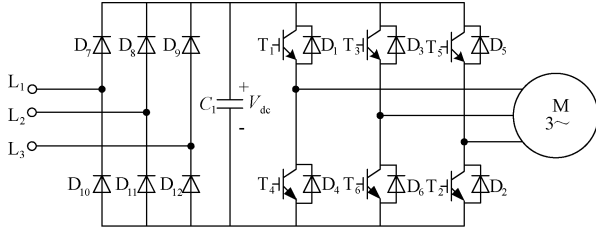


图 1 电压源型两电平变频器拓扑图

Fig.1 Topology diagram of voltage source two-level inverter

变频器工作过程:三相电源经三相不控整流形成脉动的直流电,再经过滤波电容平波后,得到一个相对恒定的直流电压源。该电压加到三相桥式逆变器的两端,通过 IGBT 的“通”和“断”,在电机侧获得幅值恒定、脉宽和频率可调的电压脉冲序列。为了防止电路短路,逆变器采用 180° 导通型,即处于同一桥臂的上下两个 IGBT 元件不能同时导通。因此,只考虑上桥臂开关状态,令 IGBT 导通为“1”断开为“0”,这样就得到表 1 的逆变器开关状态表。

表 1 逆变器开关状态表

Tab.1 Inverter switch status table

序号	开关状态			开关代码
1	T ₂	T ₄	T ₆	000
2	T ₆	T ₁	T ₂	100
3	T ₁	T ₂	T ₃	110
4	T ₂	T ₃	T ₄	010
5	T ₃	T ₄	T ₅	011
6	T ₄	T ₅	T ₆	001
7	T ₅	T ₆	T ₁	101
8	T ₁	T ₃	T ₅	111

所研究的变频器采用电压空间矢量作为调制方式,关于此调制方式的相关研究很多^[12-14],这里不再赘述。

3 变频调速系统天线模型的建立

3.1 电磁干扰计算方法

矩量法是将连续的积分方程离散化,由于积分方程自动满足辐射边界条件,这使得矩量法对于求解变频器这种复杂物体的辐射电磁场比其他数值解法更

有优势^[15]。FEKO 软件核心是矩量法,首先计算出天线表面的线(面)电流和线(面)磁流,然后利用这些参数结合电磁场数值计算方法求得相关场强。

对于面天线^[16],首先进行三角形剖分,如图 2 所示,公共边长为 l_n 的两个相邻三角形面元 T_n^+ 构成的第 n 个面元对。

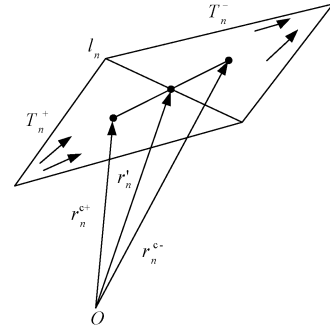


图 2 公共边及对应的三角面元对结构

Fig.2 Common edge and corresponding triangular face element pair structure

用偶极子模型来等效通过公共边 l_n 的面电流分布,等效电偶极子偶极矩 \mathbf{m} 表示为:

$$\mathbf{m} = \int_s \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') d\mathbf{s}' = I_{sn} \mathbf{m}_{sn} \quad (1)$$

式中, \mathbf{m}_{sn} 为第 n 个偶极子模型对应的偶极矩,即

$$\mathbf{m}_{sn} = l_n (\mathbf{r}_n^{c-} - \mathbf{r}_n^{c+}) \quad T_n^{\pm} \in s \quad (2)$$

式中, \mathbf{r}_n^{c-} 、 \mathbf{r}_n^{c+} 分别表示标号为 n 的公共边所对应的两个三角形 T_n^- 、 T_n^+ 的质心位置矢量。结合电偶极矩表达式可得等效电偶极矩 \mathbf{m}_{sn} 产生的电场表达式为:

$$\mathbf{E}_{sn}^s(\mathbf{r}) = \frac{\eta}{4\pi} \left[(\mathbf{M}_{sn} - \mathbf{m}_{sn}) \left(\frac{j k}{R} + C \right) + 2 \mathbf{M}_{sn} C \right] e^{-j k R} \quad (3)$$

式中

$$C = \frac{1}{R^2} \left[1 + \frac{1}{j k R} \right] \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{sn} = \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{m}_{sn}) \mathbf{R}}{R^2} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$; $R = |\mathbf{R}|$; η 和 k 分别为自由空间的波阻抗和波数。

对于任意形状线天线^[11],设长度为 L ,半径为 a ,电磁波波长为 λ 。 $a \ll L$, $a \ll \lambda$,则线天线在距离 r 处的辐射场强 \mathbf{E} 为:

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} - \nabla \varphi \quad (6)$$

式中, ω 为电磁波角频率; \mathbf{A} 为磁矢位; φ 为标量电位。对于线天线:

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int_L i(l') \frac{e^{-jkr}}{r} dl' \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_L \frac{-1}{j\omega} \frac{di(l')}{dl'} \frac{e^{-jkr}}{r} dl' \quad (8)$$

式中, ϵ 和 μ 分别为介质电导率和磁导率; $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ 。

另外,根据 Lorentz 规范:

$$\nabla \cdot A = -j\omega\mu\epsilon\varphi \quad (9)$$

利用矩量法求得面电流与线电流代入以上公式,最终求得电场强度。

3.2 干扰源分析

变频调速系统在稳定运行期间,会向外辐射产生电磁干扰,主要的干扰源是变频器,而变频器之所以能产生持续的电磁干扰,主要是逆变器功率开关元件 IGBT 频繁地导通和关断,此过程中产生极高的 du/dt 和 di/dt ^[17]。如图 3 为实测开通、关断瞬间 IGBT 两端电压的波形图。

从图 3 中可以看出电压从 40 V 上升到 1.7 kV 仅用了 1.12 μs ,从 1.54 kV 下降到 -180 V 同样也仅用了 1.12 μs ,如此高幅值快速变化的电压或电流脉冲会通过连接的电抗器、变压器和调速电机等形式形成传导电磁干扰;另一方面通过逆变器叠层母排、直流母排和连接线路等向空间辐射电磁能量,形成辐射电磁干扰;由于变频调速系统存在寄生电感和寄生电容,传导电磁干扰通过寄生电感和寄生电容后产生瞬态的电压和电流脉冲,也会形成辐射电磁干扰。图 4 为变频调速系统电磁干扰传播路径。

3.3 变频调速系统天线模型

由 3.2 节分析可知,变频调速系统主要干扰源来自于逆变器功率元件产生的电压脉冲,因此,为准确获得电磁干扰源,采用高分辨率的探头及高性能示波器多次测量逆变器桥臂电压,并最终挑选出典

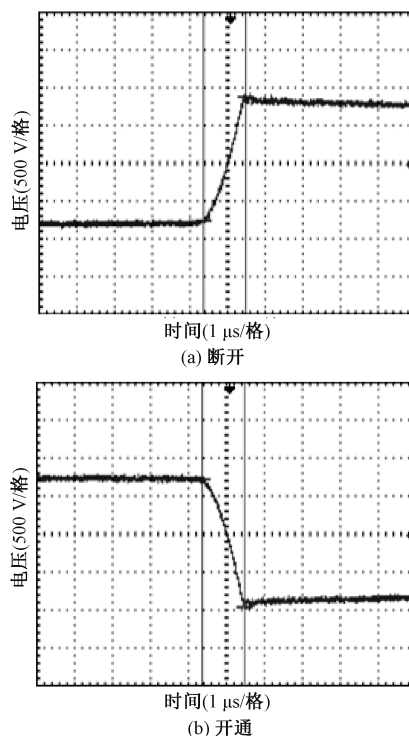


图 3 IGBT 开断波形

Fig.3 IGBT turn-on and turn-off waveform

型波形。

图 5(a) 为示波器 2.5 ms 缩放下的连续电压脉冲,可以看出脉冲有密集和稀疏阶段。根据电磁兼容的要求,变频器工作时所产生的电磁干扰应不影响周围设备,所以在选择干扰源电压时,考虑干扰最严重的情况。因此采用密集阶段最短周期的电压脉冲,如图 5(b) 所示。

通过傅里叶变换,得到图 6 干扰源电压幅频域上的波形。表 2 列出了典型频率下干扰源电压幅值。结合图 6 和表 2 可以看出随着频率的升高电压幅值呈下降趋势,将各频点电压幅值作为馈电源加入天线模型中。

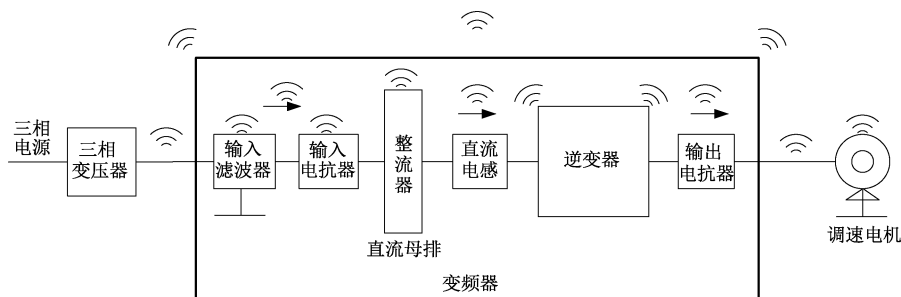


图 4 变频调速系统电磁干扰传播路径

Fig.4 Electromagnetic interference propagation path of variable frequency speed regulation system

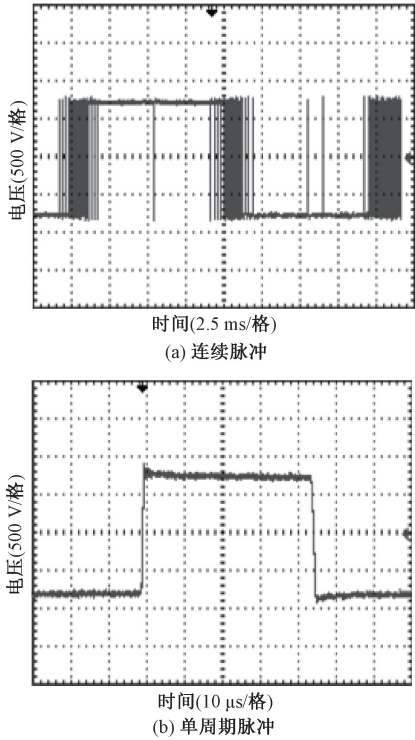


图 5 IGBT 端电压脉冲波形

Fig.5 IGBT terminal voltage pulse waveform

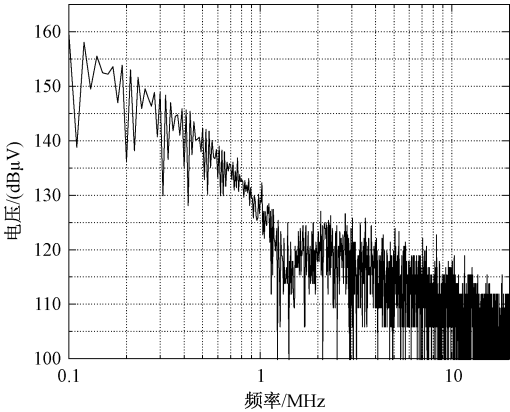


图 6 干扰源电压幅频特性

Fig.6 Interference source voltage amplitude-frequency characteristics

表 2 典型频率干扰源电压幅值

Tab.2 Typical frequency interference source voltage amplitude

频率/MHz	电压/V
0.1	97.83 ∠ 32.9°
0.3	27.979 4 ∠ 96.1°
0.5	13.109 2 ∠ 160.3°
1	2.837 1 ∠ -17.8°
5	0.489 2 ∠ 257.6°
10	0.292 5 ∠ 210.7°
20	0.091 8 ∠ 245.1°

变频器外部连接三相电源与调速电机,设电源进线为理想导体,将调速电机以及内部安装的电抗器、直流电感、滤波器用集中阻抗代替。设备外壳以及母排等效成面天线,将测量得到的干扰源电压加在 IGBT 所在母排上,按照变频调速系统实际运行的情况相连接,建立变频调速系统天线模型,如图 7 所示。采用矩量法将面天线和线天线进行剖分,并用 RWG 基函数做电流展开,计算天线表面的面(线)电流和面(线)磁流,按照 3.1 节所介绍的方法计算变频调速系统天线模型在空间中所产生的电磁场,以此来研究变频器工作时产生的辐射电磁干扰。

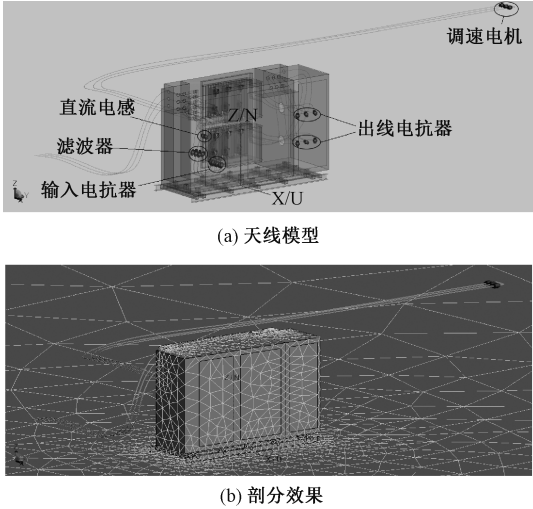


图 7 变频调速系统天线模型及其剖分效果

Fig.7 Antenna model of variable frequency speed regulation system and its split effect

4 电磁干扰特性分析

基于所搭建的天线模型,将大地设置为理想导体,计算变频调速系统正常运行状态下向空间辐射的电场强度。下面从近场和远场两方面对计算结果进行分析。由于 EMI 接收设备以及仿真计算结果均是以 dB 为单位,此单位与 V/m 换算关系如下:

$$E' = 20 \lg E \quad (10)$$

式中, E 与 E' 单位分别为 V/m、dB。

4.1 近场特性

为分析变频器内部电磁干扰分布情况,通过变频器内部设置了三处近场计算区域,分别对应模型坐标位置为: $(X=0, -200 < Y < 200, 0 < Z < 190)$ 、 $(-150 < X < 150, -200 < Y < 200, Z=121.7)$ 、 $(-150 < X < 150, -200 < Y < 200, Z=54.2)$ 单位为 cm。计算了这三处位置典型频点下的电场强度,图 8 列出了 0.1 MHz、0.5 MHz、1 MHz 及 20 MHz 频点下的场强分布图。

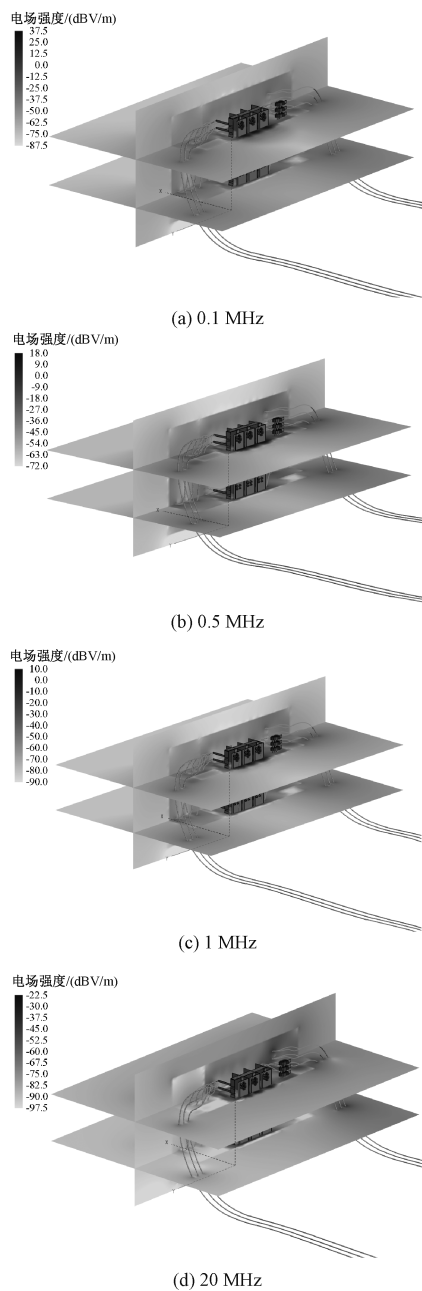


图8 变频器内部场强分布

Fig.8 Field strength distribution inside inverter

从图8中4个频点的内部场强分布可以看出,高场强分布位置均被限制在了变频器机壳内部,机壳很好地起到了屏蔽作用。各频点逆变器叠层母排与散热片之间场强均最大,其中0.1 MHz频点最大值达到了37.5 dBV/m。其次是进出线电缆、各元器件以及内部连接线处,明显高于其他位置,证明了图4电磁干扰传播路径的合理性。

逆变器的散热片安装于机壳的背部,根据上文分析此处干扰较为严重,因此距机壳背部2 cm位置专门设置了近场计算区域,如图9所示。

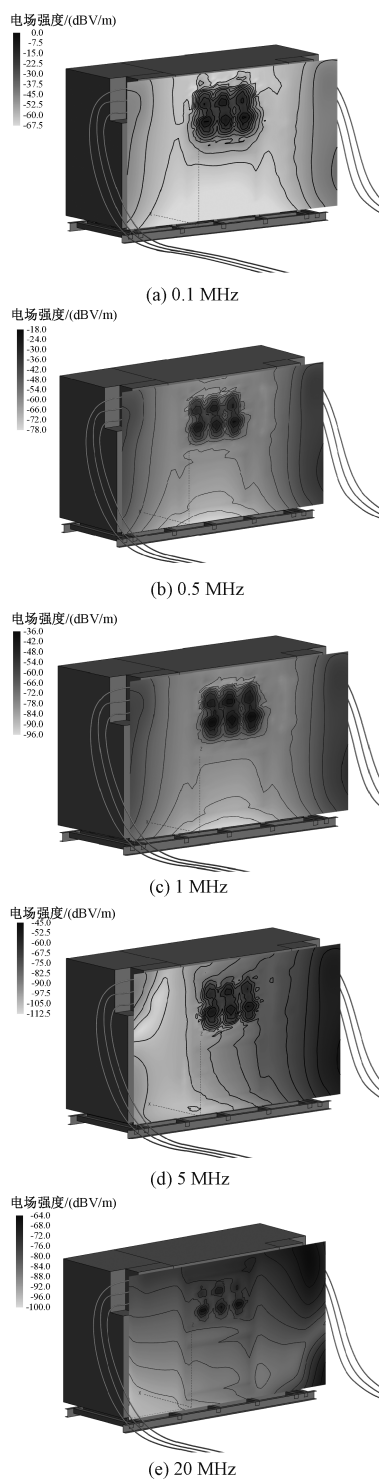


图9 机壳背部场强分布

Fig.9 Field strength distribution on back of chassis

由图9可以看出,散热片安装位置处的电场强度在各频点场强分布中均较大。且随频率的增大进出线电缆位置处高场强分布占比越来越大,所以高频下,电缆的电磁干扰更为严重。数值上,从各频点场强最大值来看,随频率的提高场强减小。为了进一

步研究散热片位置处场强随计算距离的变化情况,每隔 0.5 m 设置一个计算点,计算了 0~10 m 距离的场强分布情况,如图 10 所示。

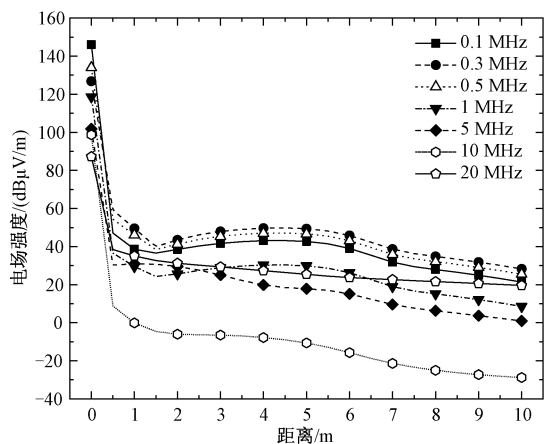


图 10 场强随距离分布

Fig.10 Distribution of field strength with distance

分析图 10,各频点电场强度随距离的增大逐渐减小,其中 0~0.5 m 内电场强度下降速度最快,0.5 m 以后场强曲线逐渐趋于平缓,且 0.1 MHz、0.3 MHz 以及 0.5 MHz 频点场强趋于一致。根据《GB17626.6 电磁兼容试验和测量技术》中规定频率为 0.15~80 MHz 的无线电干扰限值为 1 V/m (约 120 dBμV/m),0.5 m 以外各频点均符合此限值^[11]。

变频器调速系统在井下工作驱动输送机、通风机等设备,根据巷道位置情况可单独设置放变频器的房间,或直接放置在巷道内。其附近一般会有组合开关、移动变电站以及皮带控制箱等配套设备,变频器产生的干扰对周围这些设备的正常工作会有很严重的影响。因此,为了分析变频器周围受到的干扰情况,计算了距变频器前后左右四面 0.5 m 处电场强度,图 11 为 0.1 MHz、0.5 MHz、1 MHz、5 MHz 及 20 MHz 频点场强分布。

从图 11 中可以看出变频调速系统在稳定运行期间,在其周围四面产生的电磁干扰具有明显的方向性,均是以进出线电缆为中心向四周扩散减小,其中 0.1 MHz 频点场强最大值为 -9 dBV/m,20 MHz 最大值为 -37.5 dBV/m。因此需要特别注意,在放置其他设备时应尽量远离变频调速系统进出线电缆位置。

4.2 远场特性

为研究变频调速系统电磁干扰向远处的传播规律,计算各典型频点远场,图 12 为 0.1 MHz、

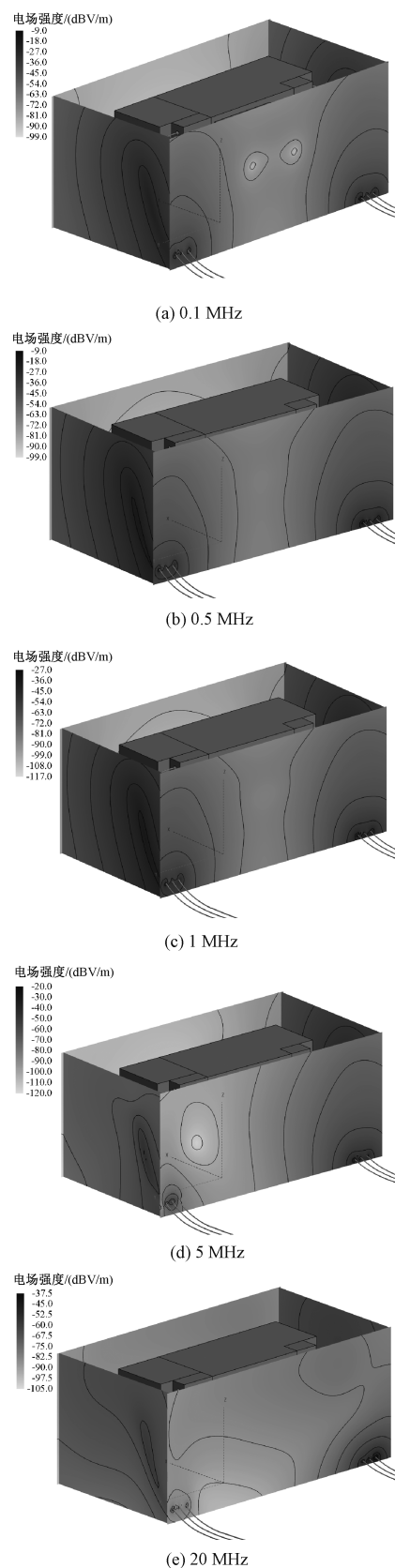


图 11 变频器四面 0.5 m 近场分布

Fig.11 0.5 m near field distribution on all sides of inverter

0.5 MHz、1 MHz、5 MHz、10 MHz 及 20 MHz 频点远场三维场强分布图。

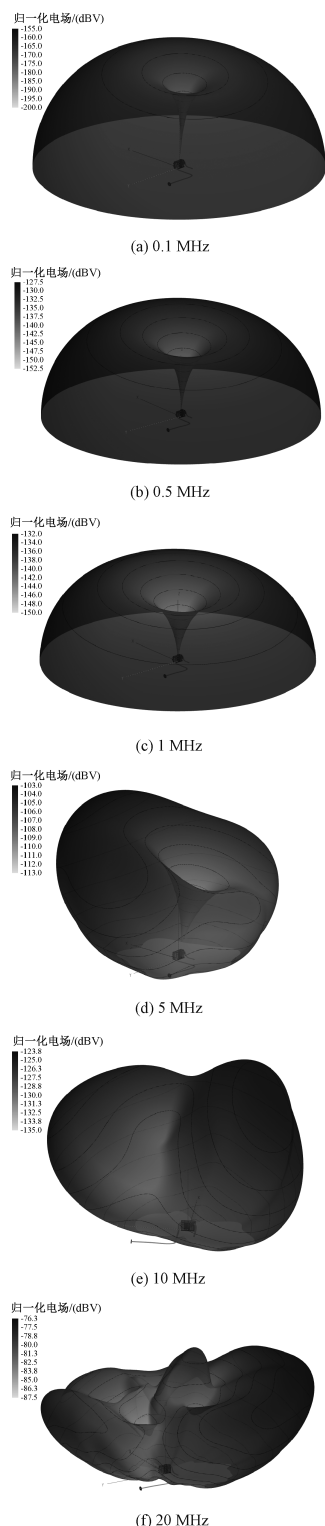


图 12 远场三维场强分布

Fig.12 Three-dimensional field strength distribution in far field

由远场分布图可以看出,辐射波瓣与频率密切相关。低于 1 MHz 频点均以变频器顶部为中心向

四周呈波纹状均匀传播。5 MHz 频点以后远场分布不再均匀,且波瓣逐渐增多。10 MHz 频点时,远场朝进、出线电缆与 Z 轴夹角 45° 方向传播。20 MHz 频点远场波瓣较多,主要朝进线电缆与 Z 轴夹 45° 方向传播。

5 实验验证

为验证搭建的变频器天线模型的有效性,本文基于天地(常州)自动化股份有限公司变频调速系统实验平台,实际测量了稳态下调速系统的电磁环境。实验平台如图 13 所示,380 V 电源经过多台变压器的调压,分别送给两台变频器,由这两台变频器驱动 355 kW 对拖平台。采用电机 M2 作为负载,通过调节其转矩的大小来改变所带负载的大小。

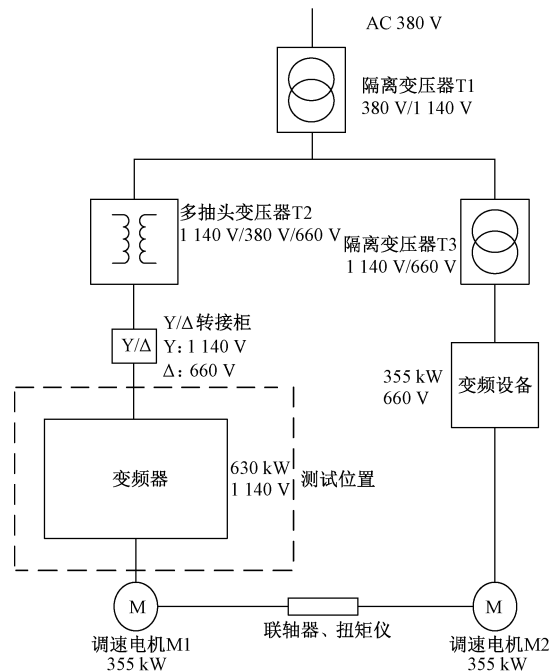


图 13 变频调速系统实验平台连接图

Fig.13 Connection diagram of experiment platform of variable frequency speed regulation system

所测变频器放置在车间的空旷位置,周围 5 m 范围内无任何遮挡物,图 14 为实验平台部分实物图,测试时,除被测设备外车间其他设备均处于断电状态。

采用图 15 中的近场探头与安利 MS2711D 手持式频谱分析仪,测量了变频器稳定工作状态下散热片位置与变频器左侧门位置处的电场强度,当所测值大于背景值 6 dB 时保存测量数据。在搭建的天线模型相同位置处设置了近场求解的点,图 16 为计算与测量位置示意图,通过 FEKO 软件计算出天线

模型对于此处的辐射场强。图 17 为计算与测量结果的对比。

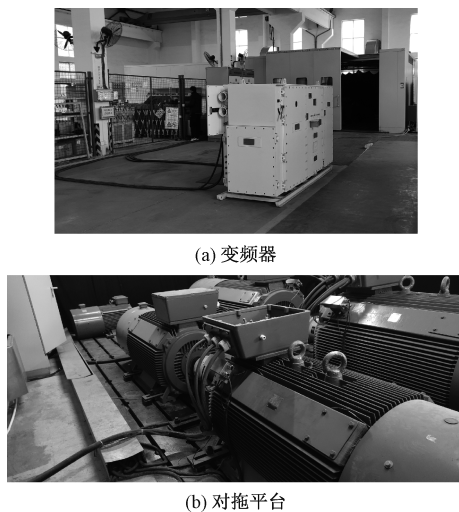


图 14 实验平台部分实物图
Fig.14 Part of experimental platform

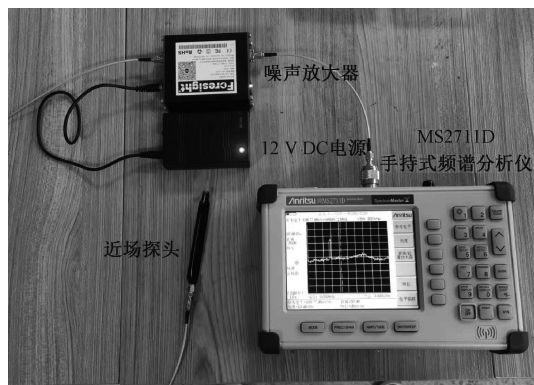


图 15 测试设备
Fig.15 Test equipment

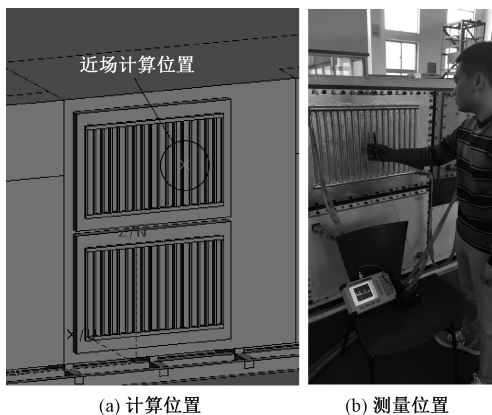


图 16 计算与测量位置示意图
Fig.16 Schematic diagram of calculation and measurement positions

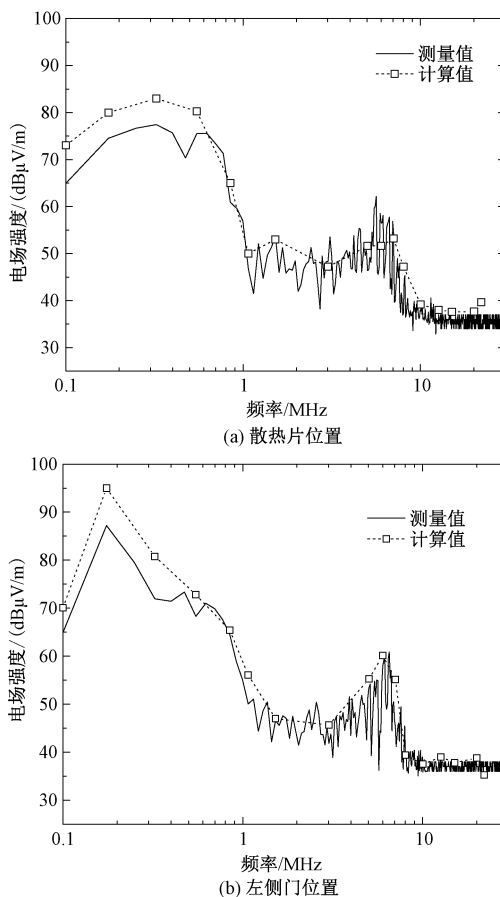


图 17 测量与计算结果的对比
Fig.17 Comparison of measurement and calculation results

综合分析两处位置的对比图,在 0.1~30 MHz 范围内,同一位置的电场计算结果与测量结果基本一致。两处位置 0.1~0.5 MHz 计算值偏大,分析原因是计算时考虑最大干扰情况:①认为逆变器三相功率元件均动作。②馈电源电压均采用最短周期电压脉冲。其他位置处波形拟合较为理想,因此,证明了本文搭建的变频调速系统天线模型的有效性。

此外,对 30~1000 MHz 频点电场强度参考 GB 12668.3—2012《调速电气传动系统 第3部分 电磁兼容性要求及其特定的试验方法》,采用 PMM9010 电磁干扰接收机和 Schwarzbeck VULB 9163 双锥对数周期宽带天线(30 MHz~3 GHz),对变频器正面和侧面 3 m 位置场强进行测量,如图 18 所示。

图 19 为背景噪声以及正面、侧面场强的测量结果,从图 19 中可以看出由于背景噪声的原因使得 85~110 MHz 以及 870~960 MHz 频段场强较高,其余各频点均符合限值要求。



图18 现场测试图

Fig.18 Field test diagram

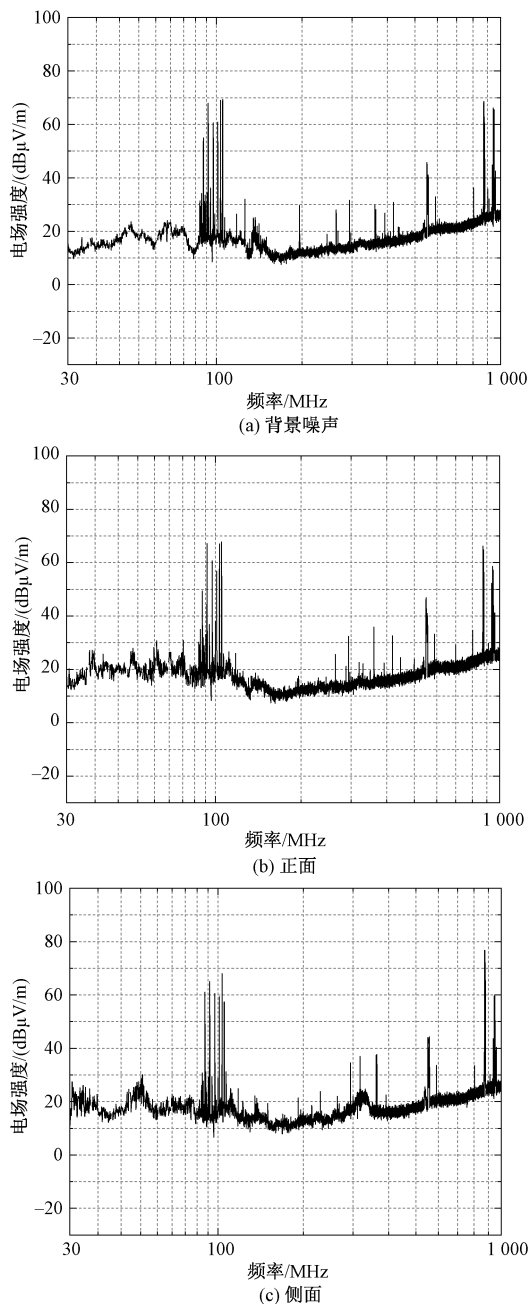


图19 30~1 000 MHz 频段场强

Fig.19 Field strength in 30~1 000 MHz frequency band

6 结论

本文基于矩量法和天线理论,使用电磁场仿真软件 FEKO 搭建了变频调速系统天线模型,通过对相同位置计算与测量场强值对比,验证了模型的合理性。通过此模型计算了变频调速系统稳定运行状态下近场与远场的分布情况:

(1)变频器机壳将高场强限制在了内部,证明机壳起到了很好的屏蔽作用,内部逆变器位置处场强最大值达到了 37.5 dBV/m,对内部设备干扰严重,今后需对此位置干扰进行重点抑制。

(2)机壳背部,散热片安装位置处场强较大,且随计算距离的增大迅速减小,0.5 m 以外满足干扰限值。

(3)从距变频器四个面 0.5 m 位置处的场强分布来看进出线电缆干扰较强,放置其他设备时应注意远离。

(4)对于远场,辐射波瓣的方向与频率有关。低频时辐射波瓣主要朝 X、Y 轴方向传播,高频时干扰主要朝 Z 轴偏向线缆方向传播。

参考文献 (References):

- [1] 朱永平, 徐晓建 (Zhu Yongping, Xu Xiaojian). 浅谈矿用变频器发展趋势 (Development trend of mine frequency converter) [J]. 工矿自动化 (Industry and Mine Automation), 2017, 43 (10): 18-23.
- [2] 杨继深 (Yang Jishen). 现代工业中电能质量与电磁干扰控制 (Power quality and electromagnetic interference control in modern industry) [M]. 北京: 电子工业出版社 (Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 2011.
- [3] 孙继平, 王福增 (Sun Jiping, Wang Fuzeng). 煤矿井下电磁干扰对通信和监控系统的影响分析 (Analysis of affection of electromagnetic interference on communication and monitoring and control system in coal mine underground) [J]. 工矿自动化 (Industry and Mine Automation), 2009, 35 (2): 23-27.
- [4] 曹海洋, 姜子健, 沈建辉, 等 (Cao Haiyang, Jiang Zijian, Shen Jianhui, et al.). 大功率双三电平变频调速系统共模电磁干扰研究 (Research on the common mode EMI of high power dual three-level frequency control systems) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (5): 17-25.
- [5] 张忠彪, 陈国柱 (Zhang Zhongbiao, Chen Guozhu). 基于地线 LC 滤波器的变频器传导干扰抑制 (Suppression of conducted interference in variable frequency con-

- verter based on ground LC filter) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2020, 54 (11): 5-7, 16.
- [6] 孟进, 马伟明, 张磊, 等 (Meng Jin, Ma Weiming, Zhang Lei, et al.). 考虑 PWM 调制策略的逆变器共模和差模干扰源模型 (DM and CM EMI sources modeling for inverters considering the PWM strategies) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2007, 22 (12): 92-97.
- [7] 邹哲强, 庄捷, 屈世甲 (Zou Zheqiang, Zhuang Jie, Qu Shijia). 煤矿井下中低频段电磁干扰测量与分析 (Measurement and analysis of underground electromagnetic interference of medium and low frequency band) [J]. 工矿自动化 (Industry and Mine Automation), 2013, 39 (5): 1-5.
- [8] 辛中华, 张晓冬, 刘涛, 等 (Xin Zhonghua, Zhang Xiaodong, Liu Tao, et al.). 智能化煤矿电磁环境及电磁兼容标准架构 (Intelligent coal mine electromagnetic environment and electromagnetic standard framework) [J]. 煤炭科学技术 (Coal Science and Technology), 2020, 48 (7): 1-7.
- [9] 孙海峰, 杜林森, 梁贵书, 等 (Sun Haifeng, Du Linsen, Liang Guishu, et al.). VSC-HVDC 换流系统辐射电磁场计算及其影响因素分析 (Calculation of radiated electromagnetic field of VSC-HVDC converter system and its influence factors) [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版) (Journal of North China Electric Power University), 2015, 42 (6): 16-23.
- [10] 孙海峰, 杜林森, 梁贵书 (Sun Haifeng, Du Linsen, Liang Guishu). 模块化多电平换流阀系统天线模型及其辐射电磁骚扰特性分析 (Antenna model of MMC-HVDC converter valve system and its radiated electromagnetic disturbance analysis) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (3): 879-888.
- [11] 张卫东, 万潜, 赵东来, 等 (Zhang Weidong, Wan Qian, Zhao Donglai, et al.). 柔性直流输电系统换流阀无线电干扰特性仿真分析 (Simulation analysis of characteristics of radio interference on HVDC-flexible transmission system converter valve) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (6): 1650-1657.
- [12] 吴晓新, 柳巍, 阮毅, 等 (Wu Xiaoxin, Liu Wei, Ru-an Yi, et al.). 一种 SVPWM 过调制算法及其在两电平逆变器中的应用 (SVPWM over-modulation algorithm and its application in two-level inverter) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2015, 19 (1): 76-81.
- [13] 王文斌, 张波 (Wang Wenbin, Zhang Bo). 五桥臂逆变器最少模式 SVPWM 调制机理及特性 (Modulation mechanism and characteristics of modes SVPWM for five-leg inverters) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (4): 35-41.
- [14] 马明, 肖宏伟, 王玲, 等 (Ma Ming, Xiao Hongwei, Wang Ling, et al.). 基于扇区平滑过渡三电平整流器中点电位滞环控制研究 (Research on neutral point potential hysteresis control based on sector transition for three level rectifier) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2021, 40 (1): 17-24.
- [15] 盛新庆 (Sheng Xinqing). 计算电磁学要论 (Essentials of computational electromagnetics) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: China Science Publishing), 2018.
- [16] 胡庆, 高荣, 肖琴, 等 (Hu Qing, Gao Rong, Xiao Qin, et al.). 等效偶极矩法分析金属天线电磁辐射特性研究 (Analysis of electromagnetic radiation characteristics of metal antenna using equivalent dipole-moment method) [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版) (Journal of Hefei University of Technology) (Natural Science Edition), 2012, 35 (5): 648-651.
- [17] 郭彦杰, 王丽芳, 廖承林 (Guo Yanjie, Wang Lifang, Liao Chenglin, et al.). 电动汽车用 IGBT 及逆变器的电磁兼容性分析 (Analysis of EMC characteristics on IGBT and inverter in electric vehicles) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (6): 1732-1737.

Analysis of radiated electromagnetic interference characteristics of mine used frequency converter

YANG Yang¹, YANG Zhen¹, RONG Xiang^{2,3}, SHI Han^{2,3}, SUI Xian-ming^{2,3}

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;

3. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: In order to study the electromagnetic radiation distribution characteristics of the mine inverter in the operating state, based on the speed control system with the voltage source type two-level inverter as the core, and on the basis of analyzing the working mechanism and interference source of the speed control system, combining the method of moment with the antenna theory, a frequency converter antenna model is built in the electromagnetic field simulation software FEKO. Through the simulation results of the model, the disturbance characteristics of the speed control system under steady state are analyzed. The research results show that, the inverter shell has a good shielding effect, and the internal electromagnetic interference is mainly concentrated between the inverter and the heat sink; the field strength at the heat sink on the back of the case is relatively large, and beyond 0.5 m the field strength is within the limit. The direction of the far-field radiation lobe is related to the frequency. The rationality of the theory and the model is verified by the experimental platform. This research has reference value for the electromagnetic interference suppression of the mine-used frequency conversion speed regulation system.

Key words: mine-used inverter; electromagnetic interference; antenna model; method of moments; FEKO