

文章编号:1000-582X(2007)12-0021-04

## 基于 CAD 技术实现汽车电磁兼容的建模和仿真

李旭,俞集辉,汪泉弟,李永明,邓前锋

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030)

**摘要:**研究了一种利用 CAD 技术进行复杂目标的时域有限差分(FDTD)建模的方法,通过 CAD 技术建立起目标的几何—电磁参数描述文件,进行网格剖分后得到目标的 FDTD 离散化模型,最后利用此方法建立了某型汽车的 FDTD 离散化模型,并对其电磁兼容性问题进行了模拟仿真,所得结果验证了该方法的正确性和有效性。

**关键词:**复杂目标;CAD;时域有限差分法;汽车;电磁兼容;建模  
**中图分类号:**TM15;TB23 **文献标志码:**A

为了提高汽车的安全性、高效性和舒适性,大量电器设备广泛应用于汽车发动机控制系统、自动变速系统、制动系统、调节系统以及行驶系统中,并对汽车的性能起着决定性作用。随着汽车内电器设备的不断增加,车内的电磁环境(Electromagnetic Environment)大幅度恶化,轻则影响电子设备的正常工作,重则引起车内控制系统失灵、通信中断,甚至损坏相应的电器元件<sup>[1]</sup>,给汽车的安全行驶造成严重隐患。即便如此,更广泛应用汽车电器仍是汽车设计和生产的主要趋势。由此可知,车内电器密度将不断增加,相互干扰亦将更加严重,汽车内的电磁环境也更加恶劣。

由此可见,如何保证汽车电器设备正常工作,保证汽车电气系统可靠运行,进而实现汽车的安全行驶,进行汽车的电磁兼容性(Automotive Electromagnetic Compatibility)研究尤为必要<sup>[2]</sup>。目前,发达国家对汽车电磁兼容研究已取得了一些成绩<sup>[3-4]</sup>,形成了较为完善的汽车电磁兼容体系。但是,国内汽车工业长期处于落后地位,汽车电磁兼容问题一直没能得到足够的重视,汽车电磁兼容方面的工作也还仅限于汽车电磁干扰和电磁敏感度的测试<sup>[5-6]</sup>。而实验测试费用十分昂贵,因此,寻求合适的数字仿真方法,进行汽车电磁兼容的仿真研究十分必要。

FDTD(Finite Difference Time Domain)是一种时域

数值方法<sup>[7]</sup>,在解决非均匀介质,任意形状和复杂结构的电磁场问题上具有相当的优势。用 FDTD 计算目标的电磁兼容问题时,必须描述目标的几何和电磁参数并按 FDTD 要求进行网格化离散,称为目标的 FDTD 建模。对于结构和外形都比较复杂的汽车,其电磁兼容的仿真计算,需要建立可靠的几何模型,不同的模型不仅影响计算的效率而且直接影响到计算的准确度,因此对于复杂目标的建模方法<sup>[8-10]</sup>,国内外都在积极研究。

CAD 软件可以用来完成这样的几何-电磁建模工作,并且可以提供友好的可视化界面,大大减轻用户的工作量,降低工作的复杂程度,减小误差。一些大型的计算软件,如有限元软件、XPATCH 软件<sup>[9]</sup>等也是采用 CAD 方法进行目标描述。XPATCH 软件的代码中,电磁部分只有 30 000 条程序,而几何—电磁建模部分却有 150 000 条程序,由此可以看出复杂目标的几何—电磁建模的复杂程度和工作量。

在实际工作中,一般只能得到汽车的设计图,制造图、剖面线图,由这些图纸无法提供 FDTD 计算程序所需要的目标离散化几何-电磁描述,为此笔者研究了基于汽车设计图,制造图等,利用 CAD 软件提供的三维实体造型功能进行汽车的 FDTD 几何-电磁建模方法,从而实现了汽车电磁兼容性问题的准确模拟。

收稿日期:2007-07-01

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2006BA6015)

作者简介:李旭(1978-),男,重庆大学博士生,主要从事电磁兼容、电磁场理论及其数值计算方法研究。俞集辉(联系人),男,教授,博导,(E-mail)yujihui@cqu.edu.cn。

## 1 基于 CAD 的几何—电磁建模过程

采用的 CAD 软件是由 Autodesk 公司开发的运行于微机平台的计算机辅助设计软件 AutoCAD 2004。对于具有复杂外形的目标,首先将其按几何外形的特点分解为几个部件,并对各个部件分别建立其几何外形及尺寸的描述文件<sup>[10]</sup>,然后将各个部件拼接,形成整体的三维实体模型。最后进行 FDTD 网格剖分。建模过程如图 1 所示。

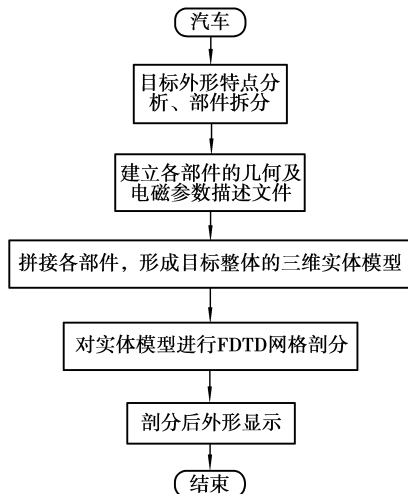


图 1 基于 CAD 的汽车的几何—电磁建模过程

### 1.1 部件拆分

可以根据实际的汽车车体,或者汽车的设计图、制造图、剖面线图提供任何可提供汽车详细结构的图纸,将汽车按其几何特点分解为几个部件,然后对各个部件进行单独处理,拆分的原则是便于部件几何外形数据的录入和模拟,这样,建立目标文件就相对简单,建模也比较方便。

### 1.2 建立各拆分部分的几何参数描述文件

在建立各拆分部分的几何参数描述文件时,首先确定垂直于某一坐标轴的  $N$  个剖面,然后在每一个剖面上读取  $P$  个型值点,则该部件共用了  $N \times P$  个型值点来描述其几何外形。剖面位置和型值点的疏密应当选择合适,在外形变化快的地方,剖面位置和型值点选得密一些,以便能准确地描述部件的几何外形。

### 1.3 拼接各拆分部分,形成整体模型

对于各个部件的拼接,由于已在型值点数据文件中给出各个部件相对于整体坐标系的相对位置,因此将各个部件的型值点坐标平移到这个相对位置,就可以将各个部件拼接到正确的位置上,形成整体的三维实体模型。至于各个部件拼接后可能出现的空气间隙,在型值点录入时,将相邻部件的型值点相互嵌入对方,这样模型会出现重叠,对重叠部分再作特别处理。对于汽车等目标,其各个部件一般都等效为导体,

所以这种重叠可以不予考虑。

### 1.4 对整体模型进行 FDTD 离散化

生成汽车的三维实心体图,并对每一部分赋予相应的电磁参数后,便可进行 FDTD 网格剖分。在剖分过程中, FDTD 网格大小(设  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \sigma$ )的确定需要考虑几个因素,由于受计算机内存和仿真时间的限制,不可能将  $\sigma$  取得很小。如果关心的是某一频段的信息,则还要考虑所关心的最高频率与  $\sigma$  的关系。据数值稳定性的要求, FDTD 方法一般需要将每波长至少分为 10 个  $\sigma$ , 因此若计算的最小波长为  $\lambda_{\min}$ , 则对应的最大频率  $f_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\min}} = \frac{c}{10\sigma}$ ,  $c$  为自由空间波速。

## 2 汽车的 FDTD 建模实例及仿真分析

为了验证建模方法的正确性,用上述建模方法对一边长为 10 cm,开口为 2 cm  $\times$  2 cm 的金属屏蔽箱体,在电磁波作用下箱体中点处的电场进行了计算。入射电磁波为高斯脉冲其电场的方向与  $y$  轴平行,表达式为:

$$E_{\text{in}} = \exp\left(\frac{-4\pi^2(t-t_0)^2}{\tau^2}\right), \quad (1)$$

其中  $\tau = 0.123\ 264\ \text{ns}$ ,  $t_0 = 3\tau$ , 用 AutoCAD 建立的屏蔽箱体的几何模型如图 2 所示。

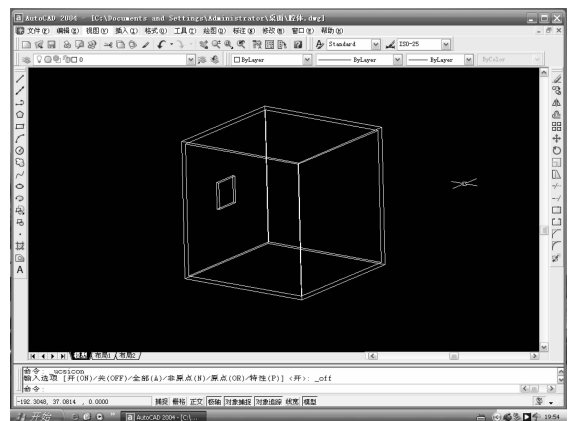


图 2 基于 AutoCAD 建立的屏蔽箱体的几何模型

对图 2 所示模型进行离散化 ( $\sigma = 0.1\ \text{cm}$ ), 并进行 FDTD 计算后得到箱体中点处电场  $E_y$  的归一化频域图如图 3 所示。根据腔体的耦合共振理论知空腔可能出现的谐振频率为:

$$f_{\text{mnp}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{0.1}\right)^2 + \left(\frac{n}{0.1}\right)^2 + \left(\frac{k}{0.1}\right)^2}. \quad (2)$$

则谐振模  $f_{101}$  频率的理论值为 2.121 32 GHz, 仿真结果 2.12 342 GHz,  $f_{102}$  频率的理论值为 3.35 410 GHz, 仿真结果 3.35 944 GHz,  $f_{112}$  频率的理论值为 3.67 423 GHz, 仿真结果 3.67 637 GHz。由此可见仿真结果与理论值吻合较好,说明笔者的建模方法是可行的。

在此基础上,运用上述方法对某型汽车进行了

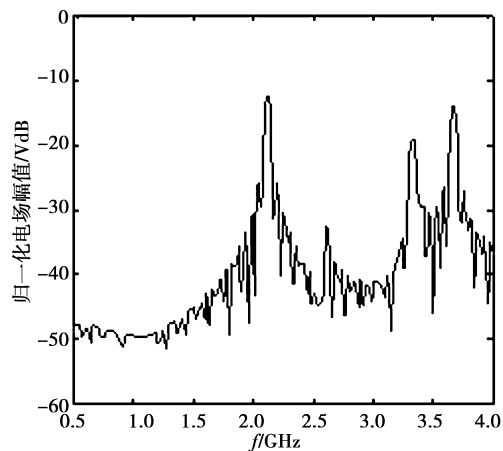


图 3 电场  $E_y$  的归一化频率图

CAD 几何建模,车体上的细小孔洞,接缝被填满,车体的曲面结构由多块平面构成,这样可减少数值仿真时曲面逼近所带来的误差。车厢内部保留前后座椅和驾驶盘部件,忽略其它细小构件的影响,其外部尺寸为长 5.03 m,宽 1.88 m,高 1.44 m,如图 4 所示。图中标出了天线安装的两个不同位置,车顶中部和车尾侧部。

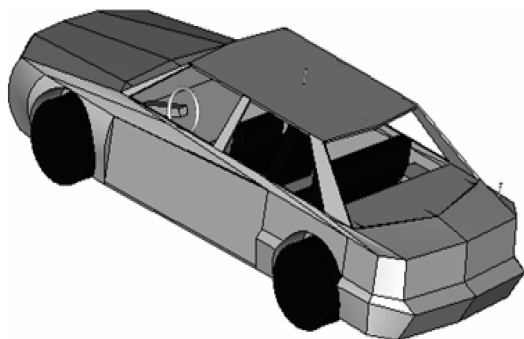


图 4 基于 AutoCAD 建立的某型汽车的几何模型

在进行车体的离散化过程中考虑到车载天线的工作频率为 900 MHz 左右,所以选择离散网格  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \sigma = 1.5$  cm 对车体进行离散,用 PML 作为吸收边界<sup>[11]</sup>,整个仿真区间共离散为  $165 \times 376 \times 140$  个网格,如图 5 所示。

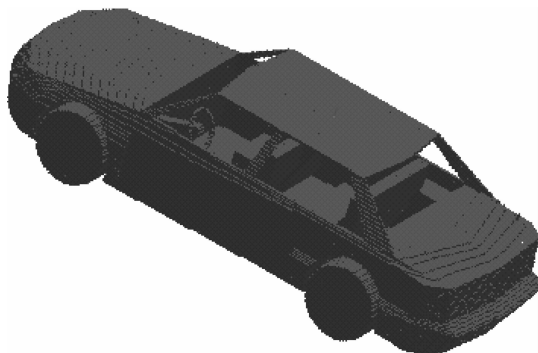


图 5 某型汽车经 FDTD 离散化后的模型

为了评估车载天线在车体内产生的电磁干扰情况,我们对当天线安装在车顶中部和车尾侧部位置时,

车体内电场的分布情况进行了仿真计算。天线的激励源为高斯脉冲,表达如式(1),这里取时间步长  $\Delta t = 28.89$  ps,脉冲宽度  $\tau = 64 \Delta t, t_0 = 3\tau$ 。

图 6 给出了当  $t = 2000 \Delta t$  时刻,汽车内部电场的分布情况。从图中可以看到天线的安装位置对车体内的电磁场分布有着十分重要的影响,当天线安装在车体中部时其在车体内产生的干扰电磁场比安装在车尾侧部时要大。车体内的不同位置处电磁场的强度有很大的变化,所以当我们在车体内安装电子设备时,敏感的设备应尽量避免开场的峰值区域,这样才能提高车载电子设备的抗干扰能力。

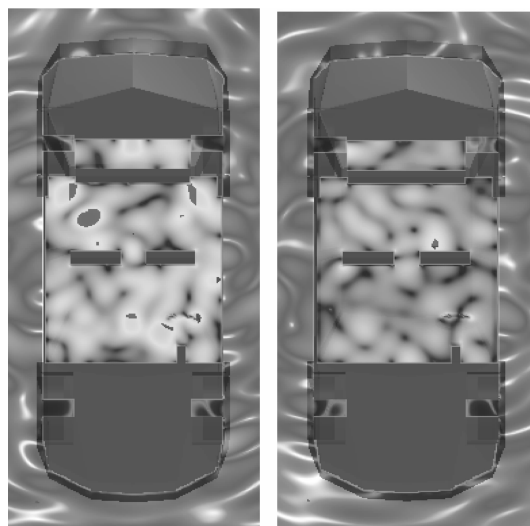


图 6  $t = 2000 \Delta t$  时,不同安装位置的天线在车体内产生的电场分布情况

天线增益方向图是反映天线特性的重要电参数,天线增益图通常只含水平增益图和垂直增益图 2 个二维的增益图。为了分析车体对天线特性的影响,对当仰角  $\theta = 90^\circ$ ,频率为 900 MHz 的两种不同安装位置的天线的水平增益方向图进行了计算,结果如图 7 所示。

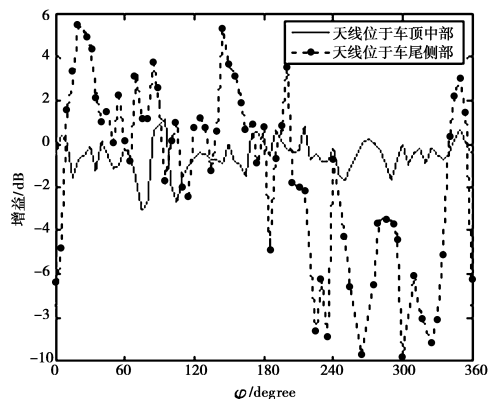


图 7 不同安装位置的天线的水平增益图

从图 7 中可以看到,当天线安装在车顶中部的时,增益的最大值为 2.0 dB 左右,最小值在 -3.0 dB 左右,当方位角  $\varphi$  从  $0^\circ$  到  $360^\circ$  范围内变化时,增益波动

较小,比较符合全方向天线对水平方向图特性的要求。当天线安装在车尾侧部时,由图 7 可看出增益值在  $-10.0$  dB 到  $6.0$  dB 之间变化,当方位角  $\varphi$  从  $0^\circ$  到  $360^\circ$  范围内变化时,增益波动较大。 $\varphi$  在  $220^\circ$  到  $330^\circ$  范围内变化时,天线的增益都比较小,这是因为此方向范围正好受到车顶及部分车体的遮挡,使天线的发射或者接收特性受到重要影响。

### 3 结 论

提出了一种利用 CAD 技术进行复杂目标的 FDTD 建模的方法,并利用此方法建立了某型汽车的 FDTD 离散化模型,对车载天线的电磁兼容性问题进行了模拟仿真。结果表明,车载天线的安装位置对车体内电磁场的分布情况有着重要影响,天线本身的增益随着安装位置的不同变化较大。

文中的建模方法和仿真研究过程可以扩展应用到不同的车型以及不同的车载电子设备的研究中去,从而为汽车电磁兼容的研究和设计提供相应的方法指导。

#### 参考文献:

- [1] 徐立. 我国汽车电磁兼容技术发展状况[J]. 安全与电磁兼, 2003(1):35-37.
- [2] CHEN C C. Predicting vehicle-Level EMC performance utilizing on-bench component characterization results[J]. Electromagnetic Compatibility Symposium, 1999, 2(8):765-769.
- [3] RUDDLE A R, FERRIERES X. Experimental validation of time-domain electromagnetic models for field coupling into the interior of a vehicle from a nearby broadband Antenna[J]. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol, 2004, 151(11):430-433.
- [4] FERRIERES X, PARMANTIER J P. Application of a hybrid finite difference/finite volume method to solve an automotive EMC problem[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(11):624-634.
- [5] 余召锋,徐鸣谦. 汽车电磁兼容性及其仿真预测技术[J]. 汽车研究与开发, 2003(2):38-41.
- [6] 徐立,武建刚. 电动汽车电磁辐射骚扰测量技术研究与实践[J]. 汽车工程, 2006, 28(5):35-37.
- [7] 李旭,俞集辉,李永明,等. 电磁场对导线贯通屏蔽箱体内部电路干扰的建模及仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(17):3 891-3 894.
- [8] 侯新宇,王超. 任意理想导电目标的 NURBS 曲面建模与 RCS 预估[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(3):345-349.
- [9] ANDERSH D J. XPATCH: a high frequency electromagnetic scattering prediction code and environment for complex three dimensional objects[J]. IEEE Antennas Propagation Magazine, 1994, 36(1):65-69.
- [10] 阎玉波,石守元,葛德彪. 用于 FDTD 的复杂目标的建模[J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 25(3):389-392.
- [11] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. Comput Phys, 1994, 114(2):185-200.

## Simulation of Automotive Electromagnetic Compatibility Problems Based on CAD Geometry Modeling

*LI Xu, YU Ji-hui, WANG Quan-di, LI Yong-ming, DENG Qian-feng*

(State key Laboratory of Power Transmission & System Security and New Jechnology,  
Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** A method based on CAD technology to modeling the complex object suitable for FDTD simulation was studied. The descriptive file of geometrical and electromagnetic parameter for the complex object was making up based on CAD, and the discrete model of the object suitable for FDTD simulation was obtained. By using this method the FDTD discrete model of a vehicle was constructed, and finally we computed EMC problems of the vehicle, results show that it is a useful method.

**Key words:** Complex object; CAD; FDTD method; Automotive; EMC; Object Modeling

(编辑 吕建斌)