

车辆 EMC 之屏蔽设计

由于导致 EMC 问题的三大要素为噪声源(source)、路径(path)及受害端(victim)。在电磁兼容(EMC)领域中, 电磁屏蔽的作用就是可以切断电磁能量从空中的传递路径, 达到消除电磁干扰的目的。良好的屏蔽设计, 能有效的降低车上电装设备的噪声辐射, 也可减少外界电磁噪声对车上电装设备的影响。现代化的车辆设计中, 为减轻重量与增强机械特性, 车体结构或车辆零组件逐渐倾向于改用电性较复杂的复合材料(如非导电母材中加上导电或高导磁之添加物、导电碳黑、本质型导电聚合体、先进复合材料、…等等)来取代金属。由于复合材料的导电性不如金属, 其电磁屏蔽效率(SE; shielding effectiveness)将会改变。另外, 车辆零组件存在有散热、线路进出或窗口等孔洞(aperture), 这些孔洞亦会影响整体的屏蔽效果。因此, 屏蔽材料的选定与孔洞的设计是屏蔽对策中非常重要的关键技术。

1.1 屏蔽材料的选定

屏蔽效率(SE; shielding efficiency)是决定屏蔽是否良好的参数, 其定义为 $SE(dB) = 20 \log(E_1/E_2)$, 其中 E_1 是噪声源未采取屏蔽措施时在观测点的电/磁场强度, 而 E_2 是噪声源采取屏蔽措施后在观测点的电/磁场强度, 将两者的比值取对数计算后就是此屏蔽措施的屏蔽效率(SE)。由于电磁波辐射的特性会因远近场而有所差异, 一般远近场的临界距离可表示为 $d = \lambda/2\pi$, 而临界频率可表示为 $f_0 = c/2\pi d$, 其中 λ 为波长(m)、 c 为光速(v/m)。就车辆常用之测试距离 1m 而言, 可得临界频率为 47.7MHz。当 $f > f_0$ 时为远场平面波, 当 $f < f_0$ 时为近场。近场又可分为电场与磁场两种现象, 近场之电场辐射源为高电压、低电流

特性之噪声源(高阻抗), 而近场之磁场辐射源则为低电压、高电流特性之噪声源(低阻抗)。相对于近场之电/磁场辐射源, 远场平面波的波阻抗为 377Ω , 可视为高阻抗与低阻抗的临界值。对于不同特性的辐射电磁波而言, 相同材质的屏蔽材料会产生不同的效果, 所以如何选用适宜的屏蔽材料是十分重要的。

如图 4.1 所示, 屏蔽材料的屏蔽效率可以表示为 $SE(dB) = R + A + B$, 其中 R 为电磁波在屏蔽材料表面上反射造成的损失, 故称为反射损失; A 为电磁波在屏蔽材料内传播时发生的损失, 故称为吸收损失及 B 则为多重反射修正系数。由于多重反射的效应影响有限, 因此可简化为 $SE = R + A$ 。由此可知反射损失及吸收损失的值越高, 材料的屏蔽效率越好。

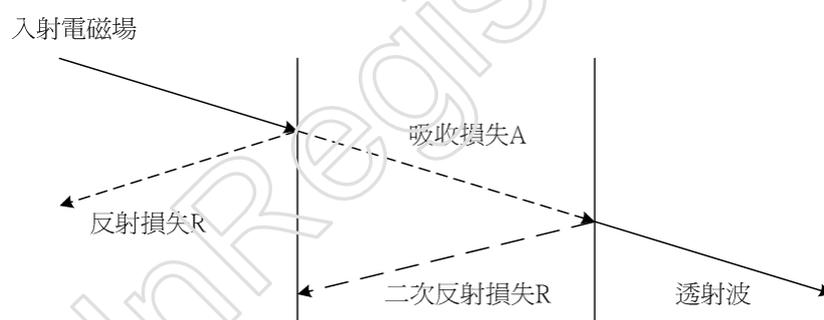


图 4.1 屏蔽材料的重要参数

1.1.1 反射损失

屏蔽材料的反射损失必须分别考虑磁场、电场与平面波的影响, 其计算式可表示为:

$$\text{磁场: } R(dB) = 14.6 - 10\log[(\mu_r / \sigma_r) / (F \cdot r^2)] \quad (\text{式 4.1})$$

$$\text{电场: } R(dB) = 322 - 10\log[(\mu_r / \sigma_r) \cdot F^3 \cdot r^2] \quad (\text{式 4.2})$$

$$\text{平面波: } R(dB) = 168 - 10\log[(\mu_r / \sigma_r) \cdot F] \quad (\text{式 4.3})$$

其中 F 为频率(Hz), r 为观测点距离(m), μ_r 为相对导磁系数及 σ_r 为导电率。根据上述的计算式可得以下结论:

- (1) 反射损失是材料导磁率与导电率的函数, 高导电率的材料(如铜、铝)都具有较高的反射损失。
- (2) 反射损失与电磁波辐射的特性有关, 所以屏蔽体到辐射源的距离变化会影响反射损失的大小。对于电场辐射源(高阻抗)而言, 如果距离电场辐射源越近, 因为电磁能量的阻抗越大, 所以反射损失也越大。然而对于磁场辐射源(低阻抗)则正好相反。因此, 对电场辐射源的进行屏蔽, 屏蔽体应尽量靠近辐射源, 而对磁场辐射源而言, 屏蔽体应尽量远离辐射源。但是随着频率的提高, 反射损失将与电磁波辐射的特性、观测点距离无关。这是因为当频率提高至远近场的临界频率时, 电/磁场辐射源的波阻抗将相当于远场平面波的波阻抗, 此时波阻抗将维持约 377Ω 。
- (3) 由于反射损失也是频率的函数, 对于磁场(高阻抗), 反射损失随着频率提升而增加; 对于电场(低阻抗)、平面波则是随着频率提升而减小。
- (4) 由于反射损失并不会损耗电磁能量, 而是将电磁能量反射。因此针对 EMI 的屏蔽措施而言, 屏蔽材料的反射损失不可太高, 因为高噪声源产生的电磁波经由屏蔽措施的反射后可能干扰内部的其它邻近且较敏感的组件。然而对于 EMS 的屏蔽措施而言, 则无须考虑反射损失是否过高。

1.1.2 吸收损失

由于吸收损失可表示为

$$A(\text{dB}) = 8.69(t/\delta) \quad (\text{式 4.4})$$

其中 t 为屏蔽材料的厚度(mm)， δ 为趋肤深度，其表示式为 $0.66/\sqrt{\mu\sigma f(\text{MHz})}$ 。根据(式 4.4)可得以下结论：

- (1) 吸收损失与趋肤深度有关，趋肤深度越深，吸收损失越小。趋肤深度与材料特性有关，屏蔽材料的导磁率与导电率有关，导磁率或导电率越高，趋肤深度越小；且随着频率提高，同一材料的趋肤深度也会变小。不过由于金属材料的导电率增加有限，通常采用高导磁率的材料以增加吸收损失，如表 4.1。

表 4.1 常用屏蔽材料的趋肤深度

材料	导电率	相对 导磁系数	趋肤深度(mm)			
			50Hz	10kHz	1MHz	100MHz
铜	5.8×10^7	0.99	8.5	0.66	0.066	6.6×10^{-3}
铝	3.54×10^7	1	11	0.85	0.085	8.5×10^{-3}
普通冷轧钢	0.93×10^7	200	1.4	0.14	0.1	16×10^{-3}
低碳钢	0.58×10^7	1000	0.85	0.06	0.04	20×10^{-3}
铁镍合金	0.19×10^7	20000	0.33	0.058	0.058	38×10^{-3}

- (2) 屏蔽材料越厚，吸收损失越高。由(式 4.4)可知，当屏蔽材料每增加一个趋肤深度的厚度，可增加 8.69dB 的吸收损失。
- (3) 吸收损失与电磁波辐射的特性(波阻抗)无关，无论是电场、磁场或平面波，吸收损失都是相同的。因为吸收损失仅与趋肤深度有关。如表 4.1 所示，频率越低，材料的趋肤深度越大，

所以吸收损失会越小，因此低频的电磁能量具有较强的穿透力。

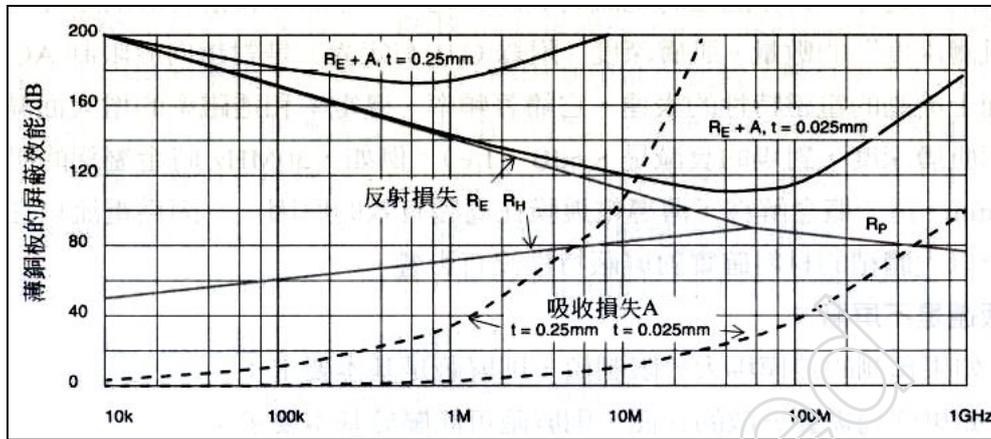


图 4.2 铜板的屏蔽效率与频率的关系

1.1.3 屏蔽材料的整体屏蔽效能

综合以上说明可得知吸收损失与反射损失是决定材料屏蔽效率的重要参数，所以在选用屏蔽材料时有以下原则：

- (1) 低频时，材料的屏蔽效率与电磁波辐射的特性(波阻抗)密切相关。因为低频时电磁能量的趋肤深度较大，导致吸收损失降低，此时屏蔽效率主要取决于反射损失。而反射损失与电磁波辐射的波阻抗有关，磁场的波阻抗很低，所以反射损失也低，因此相对于低频电场而言，低频磁场更难屏蔽，如图 4.2 所示。
- (2) 高频时屏蔽效率与电磁波辐射的特性(波阻抗)无关。因为高频时电磁能量的趋肤深度较小，吸收损失较高，此时屏蔽效率主要取决于吸收损失。所以高频时，对于不同特性的辐射电磁波而言，屏蔽材料的屏蔽效率几乎相同。

(3) 相对于磁场而言，屏蔽材料对电场的反射损失较高，对平面波的吸收损失较高，所以磁场是最难屏蔽的，尤其是频率非常低的磁场，如 50/60Hz 的磁场就必须另外采用其它的屏蔽方法。

1.2 屏蔽体的孔洞设计

一般而言，除了低频磁场外，大部分的金属材料都可以提供 100dB 以上的屏蔽效率。由于理想的屏蔽体必须是一个完全封闭的屏蔽体，才能形成完整、连续的导体，达到最佳的屏蔽效果。但是在实际应用上，完全封闭的屏蔽体是毫无实用价值的，因为车辆零组件必须考虑散热、线路进出或窗口等设计，所以必须考虑孔洞造成的影响。因为孔洞会破坏导体的连续性，导致电磁能量会在孔洞处泄漏，降低整体的屏蔽效果。所以孔洞的设计例如①孔洞形状、②孔洞深度(厚度)及③开孔率等，都是屏蔽设计中非常重要的关键。