

导弹电磁兼容性讨论

八七二一七部队 杨 骅

文摘 讨论了导弹武器系统地面对接试验中导弹制导控制系统出现的电磁兼容和电磁兼容问题,用具体实例说明其产生根源,有一定的说服力,对导弹武器系统总体和分系统的设计和试验有一定的参考价值。

文章简要地叙述了电磁兼容和非兼容的原理,并用实验加以说明,特别对筒弹型武器系统。文章还对电磁兼容和非兼容问题进行了分析,对由电容耦合、电感耦合和辐射耦合造成的武器系统内部之间和内外间的兼容和非兼容问题进行了一般地数学分析。

文章最后对提高导弹电磁兼容性能提出了措施,可供武器系统设计人员参考。

主题词: 1. 电磁兼容性

2. 导弹制导——电磁兼容性

随着电子技术的发展,导弹制导控制系统信息量的增加及弹体内空间利用率的提高,电磁非兼容这一电子系统长期存在的问题,越来越多地出现于导弹制导控制系统,严重时造成导弹参数不正常、控制系统功能紊乱。这里仅对导弹系统内部各分系统之间及导弹与外部系统间有用信号的非兼容加以讨论。

一、电磁非兼容的一般方式

我们知道,电磁兼容性的一般范围,包括电子设备中无意造成的信号而引起的那些问题。干扰信号的产生可以有意的、或无意的,发射机的输出、寄生发射和泄漏均可引起干扰。这些电磁耦合可能是由以下原因所引起的:

1. 电缆之间的串扰;
2. 信号源的直接辐射;
3. 各种电子元件和电缆的接收,或者经过天线和某种惯常的传输途径的接收。

当不需要的电磁能量耦合进一个电子设备时,就会出现电磁非兼容。这种耦合通常分为四个主要类别:传导、辐射、外壳穿透以及天线耦合。从概念上看,每一模型都有共同的性质(见图1)。电磁能量由某个源发生,通过耦合媒质,经传输、接收,然后进行处理。而

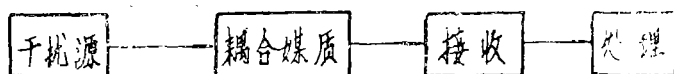


图1 一般干扰情况

电磁非兼容性，通常在“处理”处反映。

这四种耦合模型的某种组合所造成的非兼容性的程度，一般用全耦合系统的考虑来描述（见图2）。这样的系统包括干扰源、辐射器、传输媒质、检测设备及信息处理元件。

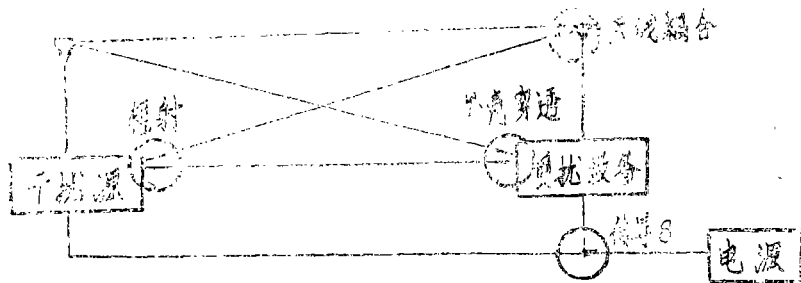


图2 干扰耦合的四种模型

我们所讨论的导弹制导控制系统，电磁干扰来自两个方面：其一是导弹本系统内各分系统信号间的相互干扰；其二是来自导弹外部的射频干扰。就导弹地面联试状态而言，主要是遥测系统的射频影响。这里由于导弹的金属壳体在测试时是接地的，屏蔽良好，所以外部电磁场穿透导弹外壳而引起的干扰可以不考虑。而导弹接收机的频率通常与外部系统（非导引系统）的射频频率相隔一段距离，因此，一般意义上的两天线之间的耦合，在这里也不成立。我们知道，在导弹电路的设计中，由于设置了诸多的混频及滤波电路，这在原理上又防止了通过线路直接联接而可能产生的传导干扰。因此，导弹电气系统电磁干扰的产生，就只有信号辐射至某一电路（或电路引线）而产生干扰的可能。

二、电磁兼容试验结果

针对多种型号导弹，在地面调试中出现的电磁非兼容现象，在初步分析的基础上，做了有关电磁兼容试验。

导弹系统内部的电磁兼容试验与结果

某型某批导弹，在地面调试中发现，指令形成装置输出零指令时，有较大的“差拍”出现（见图3）。经初步分析，认为与弹上某滤波器有关，做试验如下：



图3 “差拍”波形

- 1，该滤波器加装屏蔽罩，“差拍”依然存在；
- 2，将该滤波器外壳经50Ω电阻接地，“差拍”未消除；
- 3，将该滤波器放置在弹体之外，差拍消失；
- 4，适当调整该滤波器在弹上的安装位置，“差拍”消失；

5, 调整信号线走向、位置, “差拍”消失;

6, 改变作为干扰源的弹上某电路频率, “差拍”消失。

试验证明, “差拍”的产生, 是弹上某电路信号频率耦合到某滤波器引线所致。可见, 导弹系统内部所产生的电磁非兼容, 主要是弹上不同电路的信号, 耦合至某一敏感电路(如混频、滤波、VCO等电路)或其信号线所致, 其非兼容的程度与电路的频率、灵敏度、电路设置位置及导线的分布有关。

导弹与外部系统间的电磁兼容试验与结果

1, 非筒弹地面联试电磁兼容试验

某型导弹在地面联试中, 多次出现遥测系统开机, 弹上制导控制系统功能紊乱现象, 做试验如下:

a. 遥测系统关机, 导弹工作正常;

b. 遥测开机, 干扰复现, 移动遥测天线, 使其接近或远离导弹测试舱口, 干扰随之加重或减轻, 直至消失;

c. 对测试电缆施以屏蔽, 干扰消失;

d. 弹上遥测发射机移至弹外, 遥测天线位置保持不变, 干扰依然存在;

e. 关闭遥测载频, 不关付载频, 干扰消失。关闭付载频, 不关载频, 干扰依然存在;

f. 改变遥测发射机频率, 干扰仍存在;

g. 减小遥测发射功率, 干扰消失。

2. 筒弹地面联试电磁兼容试验

某型导弹, 在以筒弹状态进行控制系统、遥测系统联试时发现: 在正常联试中, 舵面产生抖动, 给一指令, 舵偏不到位等现象。基于条件所限, 仅做如下试验:

a. 打开包装筒前帽, 故障消除;

b. 更换外型不同的前帽, 故障消失。

3. 结论

试验证明, 导弹所受到的外部系统的电磁干扰, 来自遥测发射机射频空间电磁场的辐射; 干扰途径是遥测天线辐射的信号, 通过导弹测试电缆或筒弹脱落插头所联接电缆进入弹内; 非兼容的程度与电缆处的场强密度及电缆的屏蔽状况有关。

三、电磁兼容性分析

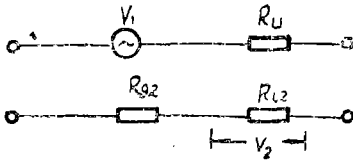
非兼容的方式

1. 内部非兼容的方式

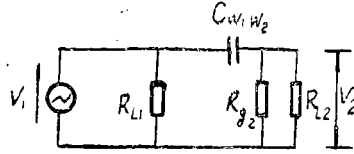
就导弹内部系统而言, 由于其总体要求, 系统内部结构紧密、各电路间距离有限, 所以电路输出、输入线间的耦合是不可避免的。而导弹在设计时, 对各电路的共用线及高频部件均有严格地考虑, 导弹内部系统由传导和穿透所带来的非兼容可以不考虑。因此, 导弹内部系统的非兼容方式, 就仅有导线间的耦合(含等效的辐射耦合)一种。这其中主要分为电感耦合、电容耦合及近场的电磁辐射耦合。

a. 电感耦合

在两个闭合的回路之间会产生电感传输。对于两根位置接近的导线而言，主要是互感耦



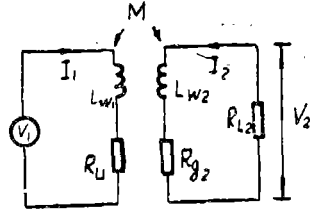
(a)



(c)

合，这类似于变压器的作用。如图 4 (b) 所示，这时第一根导线里的电流 I_1 产生变化磁通 $d\phi$ ，变化的磁通在第二根导线上产生电流 I_2 ， I_2 在与导线串联的阻抗两端产生电压降 V_2 。其传输阻抗为：

$$\frac{V_2}{I_1} = \frac{I_2 \pi f M R_{L2}}{(R_{L2} + R_{g2}) + I_2 \pi f L_{W2}}$$



(b)

图 4 耦合等效电路

式中 M 是互感， L_{W2} 是二回路的自感。

若不考虑自感，则耦合与频率成正比。用磁通密度的概念来表示，则一个具有面积为 \overline{A} 的闭合环，由于具有磁通密度 \overline{B} ，而引起的电压 V_N ， $V_N = -\frac{d}{dt} \int_A \overline{B} \cdot \overline{A}$

若闭合环是固定不变的，磁通密度是随时间按正弦而变化的，并且整个闭合环的面积为常数，则 $V_N = I \omega B A \cos \theta$

A 为闭合环的面积， B 是随角频率 ω 每秒弧度按正弦而变化的磁通密度的有效值， V_N 是感应电压的有效值。

$$\text{即： } V_2 = \frac{I \omega B A R_{L2} \cos \theta}{R_{g2} + R_{L2}}$$

可见，耦合与频率成正比。要减小耦合，在电路频率一定的条件下，只有减小 B 、 A 或 $\cos \theta$ 。对于 B 项，可使其远离电路，或将干扰线对进行绞合，绞合可使两条线上的磁场 B 相抵消。 A ，亦可使接收电路的两线绞合而减小。通过适当调整干扰源或接收电路的方面，可使 $\cos \theta$ 减小。

b. 电容耦合

电容耦合是通过导线间的电容，使某一电路对另一电路形成交连，如图 4 (C)，对地阻抗高的电路容易产生电容传输。对于给定的电流，这种电路可以容许最高的对地电压，其电压传输函数为：

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{32 \pi f R_{a2} C_{W1W2}}}$$

$$\text{式中: } R_{a2} = \frac{R_{g2}R_{L2}}{R_{g2} + R_{L2}}$$

C_{W1W2} 是以地为基准的两线间电容

在 $R_{a2} \ll \frac{1}{j\omega C_{W1W2}}$ 的情况下

$$V_2 = j\omega R_{a2} C_{W1W2} V_1$$

可见: 耦合直接与噪声源的频率、被扰回路的电阻、两导线间电容及噪声电压的幅度等成正比。设噪声源的电压和频率固定不变, 如欲降低电容耦合, 则需减小其余两个参数。即将接收回路运用在低阻状态, 或采取适当改变导线方向进行屏蔽、使导线远离等方法。

在电路阻抗和频率较低时, 电感耦合是次要的, 而在高电路阻抗和频率较高时, 电容耦合则是主要的。

C. 辐射耦合

辐射耦合可以说明从一个电路到另一个电路的能量传输。在导弹系统内部, 大量的元件都是封装在一个相对来说占地很小的空间内。因此, 许多耦合都可以看成近场模式, 其场强可由一根载流导线或一个载流圆环在任何距离处产生的场强求和或积分等效。其辐射耦合的强弱取决于自感、互感和电容。

2、导弹与外部系统的非兼容方式

对导弹与外部系统来说, 联线的传导、导线间的相互耦合通常均可忽略, 而辐射穿透又不可能 (具有雷达窗口或红外窗口的导弹可能会有例外)。因此, 导弹与外部系统的电磁非兼容, 一般是由外部系统的强功率信号辐射至某一电路引线, 耦合而引起的。具体地说, 就是信号辐射至测试电缆, 或脱落插头电缆耦合而引起的, 这已被多次试验所证实。这种非兼容可看作由辐射耦合而造成的, 但它不是高电平能量经一般的天线和传输线耦合进接收机, 而是一种非天线耦合。这种辐射耦合是高电平的异常检测。

四、非兼容的机理

1, 导弹内部电路间的非兼容机理

导弹内部电路间的耦合, 不论是哪一种具体形式, 其耦合强度是不大的, 可以认为干扰信号的幅值 (设其为 A_2) 在信道中小于有用信号 (信道信号) 的幅值 (设其为 A_1)。由于导弹各电路中设置了诸多的滤波、检波、混频等电路, 与信道频率相差较远的频率信号无法通过。因此, 构成非兼容的原因, 是那些与信道频率相近的干扰信号的进入。其干扰的形成, 可用两个不同频率的简谐振动的叠加来描述。

设: 信道信号为: $u_1 = A_1 \cos \omega_1 t$

干扰信号为 $u_o = A_2 \cos \omega_2 t$ (不计相角)

则信道中信号为:

$$\begin{aligned} u_o &= u_1 + u_n \\ &= A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t \\ &= A \cos \omega_1 t + A_2 \cos [\omega_1 t + (\omega_2 - \omega_1) t] \\ &= [A_1 + A_2 \cos (\omega_2 - \omega_1) t] \cos \omega_1 t - A_2 \sin (\omega_2 - \omega_1) t \sin \omega_1 t \end{aligned}$$

$$= \sqrt{A_1^2 + 2A_1A_2\cos(\omega_2 - \omega_1)t + A_2^2} \cos \left\{ \omega_1 t + t_{an}^{-1} \left[\frac{A_1 \sin(\omega_2 - \omega_1)t}{A_1 + A_2\cos(\omega_2 - \omega_1)t} \right] \right\}$$

其波形如图 5 所示，相差最大时幅度最大，相位变化最快时频差最大。由于 A_1 大于 A_2 ， ω_1 远大于 $(\omega_2 - \omega_1)$ ，则 $A_1\cos\omega_1 t$ 可认为是一个载波，而 $A_2\cos\omega_2 t$ 是一个边带，系数 $\sqrt{A_1^2 + 2A_1A_2\cos(\omega_2 - \omega_1)t + A_2^2}$ 可认为是瞬时振幅，而时间导数

$$\omega_1 t + t_{an}^{-1} \left[\frac{A_2 \sin(\omega_2 - \omega_1)t}{A_1 + A_2\cos(\omega_2 - \omega_1)t} \right] \text{ 可认为是瞬时频率。}$$

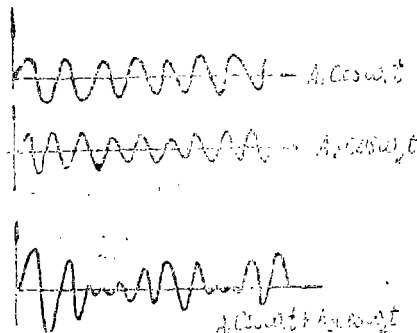


图 5 和信号及分量

这类干扰的问题还可用矢量法表示，如图 6 所示。 \vec{A} 表示信号， \vec{B} 表示干扰，二者之和是 \vec{R} 。 R 的长度变化代表总的有效振幅调制，而角 ϕ 代表总的有效频率调制，和的振幅在 $(\vec{A} + \vec{B})$ 与 $(\vec{A} - \vec{B})$ 间变化。

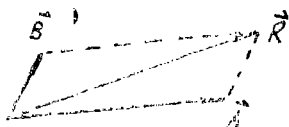


图 6 矢量表示法

可见，叠加后的信号是受差频的振幅和相角调制的，其频率围绕信号频率 ω_1 而回来摆动。当合成信号的频率、幅度在电路中满足某一设计条件时，电路向后续部件输出动作信号，造成导弹控制系统误动作，非兼容形成。

对含有锁相电路的导弹而言，若干扰作用于锁相环，则不论干扰作用于锁相环的任何位置，如图 7 所示，其结果都将使压控振荡器输出一调相波。即：

$$u(t) = A\cos(\omega_1 t + \frac{\Delta F}{\omega}\cos\omega t)$$

其中 $\omega = \omega_1 - \omega_i$
 ω_i —— 干扰频率。

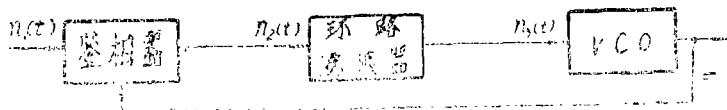


图 7 锁相环干扰位置

其频率也是围绕 ω_1 而上下摆动的,当输出满足某一设计条件时,电路输出动作信号,导弹控制系统误动作,非兼容形成。

2. 导弹与外部系统间的非兼容机理

对于电路组件来说,任何一根载流导线都相当于且确实就是一个辐射体。相应地,处在电磁场中的一根导线就相当于且的确就是一根接收天线。实际上,一根导线可以同时起到接收天线和发射天线两种作用。在导弹地面调试、联试中,由导弹测试舱口引出的测试电缆的每一芯线,筒弹联试状态脱落插头电缆的芯线,都可以看作是一弱方向性的引向天线。当外界的场强足够强时,外部系统的射频能量便可在其上感应出感应电流,进入导弹内部电路。

正常情况下,各种电路周围电磁场的强度应小于其所能屏蔽的范围,即小于其功率密度阈值。当电路周围的电磁场能量很强时,由于布线端的功率密度超过它所能屏蔽的范围,则射频能量将通过引向天线或布线耦合进导弹内部。高电平能量被耦合进导弹布线中后,处于电路输入线上的高电平信号,在它所遇到的非线性元件中产生包络检波,或产生畸变,生成多种谐波频率,扰乱电路的正常工作,使控制系统发生错误。处于电路输出线上的干扰信号,寄生在电路输出信号上,使下级执行级发生错误,构成非兼容。这种耦合的程度随发射天线的方位及信号能量的变化而变化,除检波及电路中出现的谐振之外,耦合程度与发射机的频率无关。而电路中的谐振,往往又是很难预料的。

经典书中已给出了一些功率密度的范围,在电路中,超过此范围时,不需要的耦合干扰便可能发生。如下表所示。

异常检测效应的功率密度阈

发 生 异 常 检 测 电 路	功 率 密 度 阈
音 频 电 路	+ 10 ~ + 20dBmw/m ²
射 频 电 路	+ 20 ~ + 40dBmw/m ²
中 频 电 路	+ 20 ~ + 40dBmw/m ²
视 频 电 路	+ 30 ~ + 45dBmw/m ²

各种电路端的功率密度可由下式给出:

$$P_d = P_i + G_i - 20 \log d + k + b$$

P_d ——功率密度(分贝毫瓦/米²)

P_i ——干扰源发射功率(分贝毫瓦/米²)

G_i ——干扰天线增益(分贝)

d ——干扰源与被扰者之间的距离(米)

k ——常数,当 d 为米时, $k = -11$ 。

经多次非筒弹状态地面联试电磁兼容试验证实,上表及公式基本适用于导弹的异常检测。

由于导弹生产工艺、批次不同,各电路所采用的兼容措施不同,及考虑异常检测可能发

生时，外部系统射频电缆、天线的位置、方式及反射等问题，受扰电路端的功率密度阈及实际功率密度将与上述值略有不同。

五、提高导弹电磁兼容能力的措施

1. 减小导弹内部耦合的措施

A，在导弹电路设计时，应注意各电路频谱的分布，使频率之间相隔一定的距离，即系统内部防止出现两个以上的相近工作频率；

B，对那些电路较为敏感的频率，应避免采用强信号；

C，将可能产生干扰的电路电源及其它敏感电路的电源隔离开，在任何供电方式和负载情况下，都应确保电源的稳定；

D，对进入鉴相器、模拟电路和压控振荡器的电源线加以旁路；

E，用同轴线联接保护射频、中频及敏感信号的出入端；

F，电源与地之间应接入旁路电容，将瞬变信号，射频信号及其它信号短路；

G，把可能造成非兼容信号的元件和导线，与连接敏感元件的布线、回线隔离开，将信号线对绞合；

H，为缩短电磁耦合路径的长度，要使导线尽可能地短；

I，用屏蔽线或屏蔽套来减小导线间的电容耦合。

2，减小导弹与外部系统耦合的措施

A，合理选择导弹测试、联试时外部射频系统的天线位置，使其方向图的旁瓣、背瓣在导弹测试舱口处所产生的场的功率密度，小于舱口端最敏感电路的阈值；

B，对筒弹状态下联试的导弹，要考虑筒的外形及遥测系统参数，使信号不能经脱落电缆进入导弹内部；

C，对导弹测试舱口处的插座、测试电缆及脱落电缆施予良好的屏蔽措施。

参 考 资 料

1. 雷达手册	M·I斯科尔尼克
2. 电磁兼容原理	B·E凯瑟
3. 频率分析、调制和噪声	S·格德曼
4. 锁相频率合成	威廉F·依根
5. 空间跟踪和通信用地面	

发射机系统设计 郭行莹、陆文福