电子战特种飞机电磁兼容预设计技术

苏东林 王冰切 金德琨

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083) (中航二集团科技委, 北京 100072)

欧阳绍修

(陕西飞机工业(集团)有限公司, 汉中 723213)

摘 要: 为解决飞机电磁兼容传统设计方法的不足,提出并采用自顶向下、全机系统量化的电磁兼容预设计方法,在特种飞机系统方案论证阶段构建能量传输模型和系统受扰的关联矩阵,通过数值仿真、行为级仿真、等效推算、模拟测试、数据统计等手段,分析机载设备、火工品、燃油和人员的安全性,对全机的电磁兼容进行评估、指标量化分配和优化设计,实现全机系统良好的电磁兼容设计状态;能针对分系统指标的变动随时分析全机电磁兼容性的变化,也可为实现全机电磁兼容而调整分系统指标. 该方法在全机系统定型前充分暴露可能出现的电磁兼容问题,并最大程度将其解决在系统设计阶段. 该方法已应用于多个特种飞机型号的电磁兼容研制中,预设计成功率高,为解决型号研制中的电磁兼容问题提供了重要的技术支撑.

关 键 词: 电磁兼容; 电子战; 特种飞机; 预设计; 量化

中图分类号: TN 99; V 2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)10-1241-05

EMC pre-design technologies on EW special aircraft

Su Donglin Wang Bingqie

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Jin Dekun

(Committee of Science and Technology, China Aviation Industry Corporation Ⅱ, Beijing 100072, China)

Ouyang Shaoxiu

(Shaanxi Aircraft Industry (Group) Co. Ltd, Hanzhong 723213, China)

Abstract: To resolve the disadvantages of the traditional electromagnetic compatibility (EMC) design method on electronic warfare (EW) special aircraft, a novel method named "top-down, systemic, quantificational pre-design" was presented and applied. As design scheme of EW special aircraft was conceived, systemic energy-transmission models and interfered relationship matrices were devised. Then the security of on-vehicle receivers, fuze, fuel, aviators and operators was analyzed with the method of numerical simulation, behavioral level simulation, equivalent calculation, statistics of datum, etc. The perfect system EMC performance can be achieved by evaluating EMC performance, distributing the EMC parameters quantificationally, optimizing design time after time. In addition, the system EMC performance can be analyzed along with the change of subsystem parameters. The subsystem parameters can be adjusted to meet the system EMC performance as well. The potential EMC problems can be exposed at the stage of design and resolved before the design was finalized. It has been applied in EMC design on a number of special aircrafts with a high success rate, and offered important technical support for resolving the acute EMC problems in research and development of models.

Key words: electromagnetic compatibility; electronic warfare; special aircraft; pre-design; quantification

收稿日期: 2006-07-29

作者简介: 苏东林(1960-),女,山东莱芜人,教授,sdl@buaa.edu.cn.

电子战特种飞机指对国家安全有重大影响的干扰机、预警机、通信指挥机、侦察机、无人机等特殊用途飞机,它们的共同特点是:任务系统由大量具备有源/无源、探测/侦察、干扰/抗干扰、通信/导航/雷达/识别等功能的电子设备组成,全机系统工作频带宽、收发设备频带交叠严重、发射设备辐射功率大、接收设备灵敏度高、天线数量多,且全部集中于一个载机平台上,使飞机电磁兼容问题变得异常复杂,成为特种飞机研制的重大技术风险之一.传统的飞机电磁兼容设计方是:由飞机总体主要依据系统的设计功能对各分系统提出指标要求,在分系统的研制或生产过程中,也主要考虑功能性要求来实现设计参数,对各分系统间的电磁兼容相互关联关系考虑不充分;分系统的电磁兼容测试也主要是依据国军标规定,并在对其裁剪的基础上进行,对特种装备的特殊电磁兼容要求考虑不足;当各分系统研制完成,进行飞机系统集成和总体联调时电磁兼容问题才充分暴露,无法进行大范围的指标更改,仅仅寄希望于研制后期的电磁兼容加固.

针对传统的电磁兼容工作忽视预设计、缺乏系统性,解决后期暴露问题的难度较大等问题,本文提出并采用"自顶向下、全机系统量化的电磁兼容预设计"方法,在特种飞机系统方案论证阶段通过数值仿真、行为级仿真[1]、等效推算、模拟测试、数据统计等手段对全机的电磁兼容性进行评估和优化设计,并能针对分系统指标的变动随时分析全机电磁兼容性的变化,也可为实现全机兼容而随时调整分系统指标.该方法在全机系统定型前充分暴露可能出现的电磁兼容问题,并最大程度将其解决在系统设计阶段.

1 自顶向下、全机系统量化预设计

针对传统飞机电磁兼容设计中存在的问题,本文提出"自顶向下、全机系统量化的电磁兼容预设计"方法,其设计过程如图1所示,即在系统方案论证阶段,飞机总体主要依据功能向各分系统提出指标和初步的天线布局、设备布局方案,在电磁兼容预设计中充分考虑机载电子设备的数量、功能、设计性能、设备布局、天线布局等特性,评估全机的电磁兼容性;根据评估结果,对机载各分系统性能指标进行量化分解和重新分配(其中包括频率指配、天线布局、发射功率、发射带外衰减、接收灵敏度、接收带外抑制、屏蔽性能、电缆布局、电磁环境分布、舱体谐振特性、设备布局、系统分系统及设备降级状况、设备安全性优先级等);对分系统指标分配之后的飞机系统重新进行电磁兼容分析和评估;根据评估结果对分系统指标、天线布局、设备布局等进行再调整和优化,直至全机达到良好的电磁兼容状态.经飞机总体确认后,进入研制和生产流程,并根据研制和生产过程中出现的新情况,进行电磁兼容性分析和评估等.

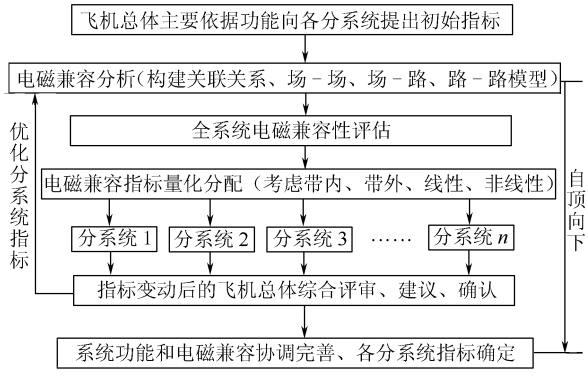


图1 自顶向下、全机系统量化的电磁兼容预设计过程

2 电磁兼容预设计技术

特种飞机电磁兼容预设计,以评估、优化机载电子设备、火工品、燃油和人员的安全性为核心,分析、控制飞机平台上发射设备辐射的能量在机舱内外敏感点的分布和接收设备的响应.

2.1 系统的能量传输模型

设特种飞机机载电子设备中,发射设备(前端接天线)有 M_1 部,标记为 $E_1,E_2,\cdots,E_{M_1}$,分析的等效辐射源数量为 M_2 个,其中辐射源包括发射设备,即 $M_2\geqslant M_1$,其他辐射源的标记为 $E_{M_1+1},\cdots,E_{M_2}$;接收设备(前端接天线)共 N_1 部,分析的等效敏感设备(包括火工品的引信)数量为 N_2 部,分别标记为 $R_1,R_2,\cdots,R_{N_2}$,其中敏感设备包括接收设备,即 $N_2\geqslant N_1$.

特种飞机复杂电磁环境下,敏感设备 j 耦合端口收到辐射设备 i 辐射的信号功率为[2-3]

$$P_{\mathrm{R}ji}=\int_{f_a}^{f_b}\frac{\eta_i(f)\beta_j(f)}{I_{ij}(f)}\mathrm{d}f \tag{1}$$

式中,$P_{\mathrm{R}ji}$ 为频率 $f_a\sim f_b$ 范围内从辐射源 i 耦合到敏感设备 j 的总功率,所考虑的频带范围不仅仅是带内,对带外的特性也要加以考虑;$\eta_i(f)$ 为辐射源 i 的端口输出功率谱密度;$\beta_j(f)$ 为敏感设备对不同调制信号的响应函数;$I_{ij}(f)$ 表示辐射源 i 与敏感设备 j 之间的隔离度.

敏感设备 j 接收到机载辐射源辐射的总信号功率为[2-3]

$$P_{\mathrm{R}j}\Big|_{f_a}^{f_b}=\sum_{i=1}^{M_2}\int_{f_a}^{f_b}\frac{\eta_i(f)\beta_j(f)}{I_{ij}(f)}\mathrm{d}f \tag{2}$$

同理,第 j 个燃油敏感点和操作员工作台位处的电磁辐射功率分别为

$$P_{\mathrm{O}j}\Big|_{f_a}^{f_b}=\sum_{i=1}^{M_1}\int_{f_a}^{f_b}\frac{\eta_i(f)\xi_j(f,t)}{T_{ij}(f)}\mathrm{d}f \tag{3}$$

$$P_{\mathrm{W}j}\Big|_{f_a}^{f_b}=\sum_{i=1}^{M_2}\int_{f_a}^{f_b}\frac{\eta_i(f)}{T_{ij}(f,t)}\mathrm{d}f \tag{4}$$

式中,$T_{ij}(f)$ 为发射设备 i 至注油口 j 的功率传输函数;$\xi_j(f,t)$ 为油气混合物的电磁功率吸收率,它由频率、时间、温度、油气混合物密度、空气的流动速度等因素决定;f_a 和 f_b 的取值由相应的国家军用标准确定;$T_{ij}(f,t)$ 为辐射源 i 至工作台位 j 的功率传输函数,是频率和时间的函数.

2.2　系统受扰的关联矩阵

2.2.1　设备受扰的关联矩阵

在考虑敏感设备安全时,辐射源和敏感设备之间的隔离度为一一对应关系,且表现出功率传输函数的功能,故以隔离度 $I_{ij}(f)$ 为单元构建敏感设备受扰的关联矩阵:

$$(I_{ij}(f))=\begin{bmatrix} I(E_1,R_1) & \cdots & I(E_1,R_{N_1}) & \cdots & I(E_1,R_{N_2}) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I(E_{M_1},R_1) & \cdots & I(E_{M_1},R_{N_1}) & \cdots & I(E_{M_1},R_{N_2}) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I(E_{M_2},R_1) & \cdots & I(E_{M_2},R_{N_1}) & \cdots & I(E_{M_2},R_{N_2}) \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中,收发共用设备间的隔离度可以取理想值∞;子矩阵

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} I(E_1,R_1) & \cdots & I(E_1,R_j) & \cdots & I(E_1,R_{N_1}) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I(E_i,R_1) & \cdots & I(E_i,R_j) & \cdots & I(E_i,R_{N_1}) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I(E_{M_1},R_1) & \cdots & I(E_{M_1},R_j) & \cdots & I(E_{M_1},R_{N_1}) \end{bmatrix}$$

为收发设备间通过天线端口进行能量传输时的隔离. $I(E_i,R_j)$ $(i\leqslant M_1,j\leqslant N_1)$ 由收发天线的辐射特性、在机身表面的安装位置、收发天线间的电尺寸、遮挡情况、收发天线间的极化匹配等因素决定. 工程计算中,当收发天线处于对方近场区时,可将收发天线等效为二端口网络,则

$$I(E_i,R_j)=\frac{1-|s_{11}(f)|^2}{|s_{12}(f)|^2} \tag{6}$$

当收发天线处于对方远场区时,由式(7)确定:

$$I(E_i,R_j)=\left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right)^2 G_{\mathrm{t}}(\theta_{\mathrm{t}},\varphi_{\mathrm{t}})G_{\mathrm{r}}(\theta_{\mathrm{r}},\varphi_{\mathrm{r}})L_{\mathrm{p}}L_{\mathrm{d}}S_{\mathrm{F}} \tag{7}$$

式中,λ 为分析频率;L_{p} 为收发天线间的极化衰减;D 为收发天线间的距离;L_{d} 为收发天线间的绕射衰减;S_{F} 为收发天线间的遮挡衰减;$G_{\mathrm{t}}(\theta_{\mathrm{t}},\varphi_{\mathrm{t}})$ 为发射天线在接收方向的功率增益;$G_{\mathrm{r}}(\theta_{\mathrm{r}},\varphi_{\mathrm{r}})$ 为接收天线在发射方向的功率增益. L_{d} 和 S_{F} 可由几何绕射理论、一致性几何绕射理论求得,是电磁兼容预设计"场-场"分析中的关键技术之一.

$I(E_i,R_j)$ 满足兼容性需求的量值为

$$I_{\mathrm{n}}(f)=\frac{P_{\mathrm{t}}\left(\dfrac{S}{N}\right)_j S_{mj}}{P_{js}L_{\mathrm{ta}}(f)L_{\mathrm{ra}}(f)L_{\mathrm{tf}}L_{\mathrm{rf}}} \tag{8}$$

式中,P_{t} 为发射设备的发射功率;$L_{\mathrm{ta}}(f)$ 为发射机在分析频点的发射衰减量,是频率的函数;$L_{\mathrm{ra}}(f)$ 为接收机在接收频点的接收抑制量,是频率的函数;L_{tf}是发射馈线损耗,指发射机输出端口到发射天线输入端口间馈线的传输损耗;L_{rf}是接收馈线损耗,指接收天线输出端口到接收机输入端口间馈线的传输损耗;S_{mj}为敏感设备 j 要求的安全裕度;P_{js}和 $\left(\dfrac{S}{N}\right)_j$ 分别为接收设备 j 的设计灵敏度和正常工作所需的信噪比.

2.2.2　燃油受扰的关联矩阵

设燃油敏感点(如注油口、放油口、通气孔等)数量为 K 个,标记为 $O_1,O_2,\cdots,O_K$. 在考虑燃油安全时,可以采用功率传输函数 $T_{ij}(f)$ 为单元构建受扰关联矩阵:

$$(T_{ij}(f))=\begin{bmatrix} T(E_1,O_1) & \cdots & T(E_1,O_j) & \cdots & T(E_1,O_K) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T(E_i,O_1) & \cdots & T(E_i,O_j) & \cdots & T(E_i,O_K) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T(E_{M_1},O_1) & \cdots & T(E_{M_1},O_j) & \cdots & T(E_{M_1},O_K) \end{bmatrix} \tag{9}$$

2.2.3　人员受扰的关联矩阵

设舱内操作人员工作台位的数量为 Z 个,标记为 $W_1,W_2,\cdots,W_Z$. 在考虑操作人员安全时,可以采用功率传输函数 $T_{ij}(f,t)$ 为单元构建受扰关联矩阵:

$$(T_{ij}(f,t))=\begin{bmatrix} T(E_1,W_1) & \cdots & T(E_1,W_j) & \cdots & T(E_1,W_Z) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T(E_i,W_1) & \cdots & T(E_i,W_j) & \cdots & T(E_i,W_Z) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T(E_{M_2},W_1) & \cdots & T(E_{M_2},W_j) & \cdots & T(E_{M_2},W_Z) \end{bmatrix} \tag{10}$$

2.3 设备、燃油、人员的安全性分析

对于每个敏感设备,由于信号的干扰,在耦合端口都存在一个可容忍的功率限值,即干扰门限功率. 对于第 j 个接收设备,其干扰门限功率以 L_{Rj} 表示,则 $P_{Rj}\Big|_{f_a}^{f_b}\cdot(L_{Rj})^{-1}$ 为电磁干扰余量,当

$$P_{Rj}\Big|_{f_a}^{f_b}\leqslant L_{Rj}S_{mj} \tag{11}$$

时,认为敏感设备为安全的. 对于带天线的接收设备,其安全工作的要求为

$$P_{Rj}\Big|_{f_a}^{f_b}\leqslant\frac{P_{js}}{\left(\frac{S}{N}\right)_j S_{mj}} \tag{12}$$

同样,燃油敏感点和人员的安全性可由敏感点处的辐射场强与相应的国家军用标准比较得到.

2.4 系统电磁兼容评估、指标量化分配和优化

2.4.1 电磁兼容指标分解

在进行全机系统电磁兼容评估之前,首先按照系统方案论证阶段的初步设想进行全机设备布局和天线布局,对辐射源和敏感设备编号,分析全机辐射源通过场-场、场-路、路-路至敏感点的能量传输关系,构建式(5)、式(9)和式(10)的系统受扰关联矩阵,列出影响电磁兼容评估的因素,即对电磁兼容指标进行分解,如在辐射设备和敏感设备之间分解出频率指配、天线布局、发射功率、发射带外衰减、接收灵敏度、接收带外抑制、正常接收所需的信噪比、屏蔽性能、电缆布局、电磁环境分布、舱体谐振特性、设备布局、设备可以容忍的降级状况、设备安全性优先级、敏感设备的安全裕度等参数.

2.4.2 电磁兼容性评估

在进行特种飞机电磁预设计时,必须对每个设计状态进行电磁兼容性评估,评估的流程如图2所示. 首先依据特种飞机的工程设计几何尺寸(如CATIA设计数据)对全机进行电磁兼容几何建模,由发射设备及其天线参数、天线布局特征等可以仿真舱外电磁环境,得到燃油受扰的关联矩阵,分析燃油的安全性;由舱内设备的布局特征、舱内辐射源参数、舱外电磁环境和机体的屏蔽性能等,可以得到操作员工作台位受扰的关联矩阵,分析人员的安全性;通过建立基于电磁场方法的系统模型、基于分布效应的场-路耦合模型、基于路方法的行为级仿真模型,分析收发天线的隔离、收发设备间的耦合等,得到敏感设备受扰的关联矩阵,进一步分析设备的安全性.

2.4.3 电磁兼容指标量化分配和优化

根据每次电磁兼容的评估结果,提出指标更改意见,即对指标进行量化分配,之后再进行电磁兼容性评估. 多次重复该设计过程,可以不断优化系统的电磁兼容设计指标,实现全机系统良好的电磁兼容设计状态. 在评估的同时进行适当的系统、分系统电磁兼容试验,对试验数据和分析数据交互修正、反复迭代,提高电磁兼容仿真分析的准确率.

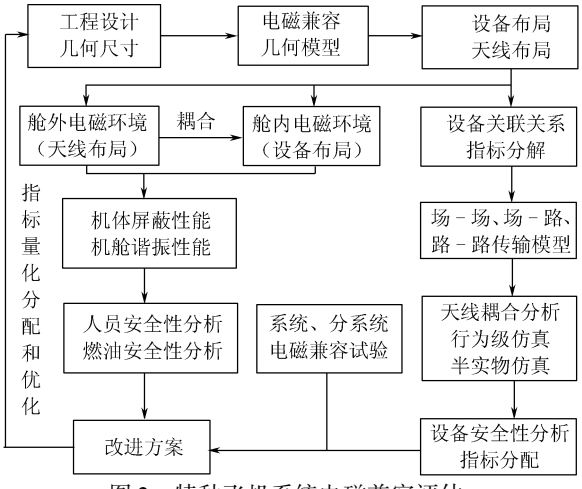


图2 特种飞机系统电磁兼容评估、指标量化分配和优化流程

3 分析实例

采用该技术对某特种飞机进行电磁兼容预设计:以飞机的CATIA设计数据建立如图3所示的电磁兼容几何模型,在此基础上分析机舱内外电磁环境、人员和燃油的安全性、机载天线辐射特性变化(图4所示为某天线装机前后辐射特性的变化)、天线隔离度、收发设备隔离度、机载敏感设备的安全性等[4-6].

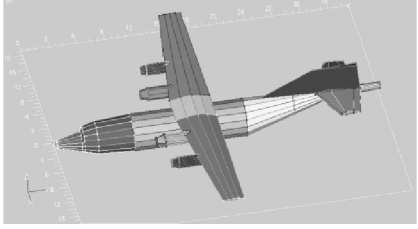
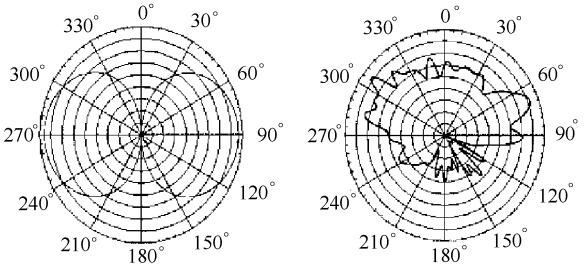


图3 某电子战特种飞机的电磁兼容几何模型

下面以解决机载塔康受扰问题为例说明指标量化分配和优化的过程.

图5所示为电磁兼容评估过程中得到的机载塔康设备受扰的电磁干扰树,其中编号为 E_2,E_3 和 E_4 的任务系统发射设备通过天线端口对塔康接收设备形成干扰,干扰余量如表1所示(E_2,E_3 和 E_4 均工作在塔康接收设备的带外;塔康设备所要求的安全裕度为6 dB). 理论上可以改变天线



a　装机前的 E 面方向图　　b　装机后的 E 面方向图

图 4　某机载天线装机前后的辐射特性变化

位置 D_1、发射设备辐射功率 D_2、发射天线功率增益 D_3、发射设备的带外衰减量 D_4、接收天线功率增益 D_5、接收设备的带外抑制量 D_6、接收灵敏度 D_7、信噪比 D_8、极化损耗 D_9 等电磁兼容指标来提高塔康接收设备工作的安全性. 由于飞机总体限定发射设备 E_2 和 E_3 的 $D_1, D_2, D_3, D_5, D_7, D_8, D_9$ 指标不能更改,且二者工作在塔康接收设备的带外,则可以将塔康接收设备在 $f_1 \sim f_6$ 6 个频点上的带外抑制量分别提高 38.6 dB,37.5 dB,36.4 dB,10.6 dB,10.5 dB,10.4 dB 以解决发射设备 E_2 和 E_3 对塔康的干扰(为塔康接收设备进行带通设计或加装带通滤波器). 发射设备 E_4 的天线安装有 3 个方案可供选择,同样,为了解决其对塔康的干扰,可以选择天线安装在位置 3 处,同时将塔康接收设备在 f_7, f_8, f_9 3 个频点上的带外抑制量分别提高 20.5 dB,19.1 dB,17.6 dB.

表 1　某特种飞机塔康接收设备受扰的干扰余量

发射设备	工作频率	隔离度/dB	隔离度需求/dB	干扰余量/dB
	f_1	71.4	104	38.6
E_2	f_2	72.5	104	37.5
	f_3	73.6	104	36.4
	f_4	77.4	82	10.6
E_3	f_5	77.5	82	10.5
	f_6	77.6	82	10.4
	f_7	89.3	106	22.7
E_4(位置 1)	f_8	90.6	106	21.4
	f_9	91.9	106	20.1
	f_7	80.4	106	31.6
E_4(位置 2)	f_8	81.8	106	30.2
	f_9	83.2	106	28.8
	f_7	91.5	106	20.5
E_4(位置 3)	f_8	92.9	106	19.1
	f_9	94.4	106	17.6

同样,系统地分析每一个敏感点的受扰情况,然后对能够调整的电磁兼容指标进行重新量化分配,可以改善全机系统的电磁兼容性. 多次重复该过程,可以不断优化系统的电磁兼容性能,实现全机系统良好的电磁兼容设计状态.

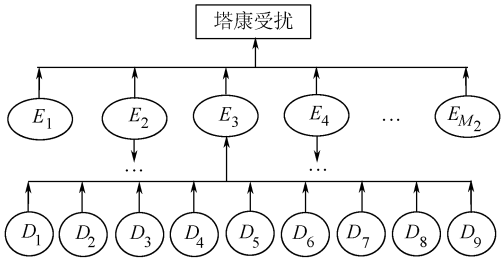


图 5　塔康接收系统受扰的电磁干扰树

4　结 束 语

本文针对电子战特种飞机研制中的电磁兼容问题,提出“自顶向下、全机系统量化的电磁兼容预设计”方法,分析电磁场在空域、时域、频域、极化域的分布,建立系统受扰的关联矩阵,在方案论证阶段预测并解决设计阶段可能出现的电磁兼容问题,在设计阶段预测并解决定型阶段可能暴露的电磁兼容问题,预设计成功率高,突破了决定型号研制成功与否的全机电磁兼容难题,为解决型号研制中尖锐的电磁兼容问题提供了重要的技术支撑,保障了多个型号的研制、首飞、地面试验、全机电磁兼容试飞和设计定型试验.

参考文献(References)

[1] Wang Qiong, Su Donglin. Prediction design of the noise and gain specificatoins of the RF receiver[C]//Proceeding of 17# International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Singapore:[s. n.],2006:262-265

[2] Bogdanor J L. Intrasystem electromagnetic compatibility analysis program. volume Ⅰ. user's manual engineering section[R]. AD-A008526, 1974

[3] Bogdanor J L. Intrasystem electromagnetic compatibility analysis program. volume Ⅱ. user's manual usuage section[R]. AD-A008527, 1974

[4] 苏东林,王东方,王明皓,等. 机载天线电磁兼容性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(2):228-230
Su Donglin, Wang Dongfang, Wang Minghao, et al. Electromagnetic compatibility analysis on plane antennas[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(2):228-230(in Chinese)

[5] 王东方,苏东林. 柱状机体、星体与天线间的电磁兼容性[J]. 现代雷达,2001,23(5):80-82
Wang Dongfang, Su Donglin. Electromagnetic compatibility between antennas and cylinder aircraft[J]. Modern Radar, 2001, 23(5):80-82(in Chinese)

[6] Wang Bingqie, Zhang Xiaolei, Zeng Guoqi, et al. Visual discrete GTD ray path tracing on aircraft [C]//Zhang Linchang. IEEE 2005 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceeding. Beijing:[s. n.],2005: 692-695