

固体姿轨控发动机复杂电磁环境电磁效应 分析方法构建研究

刘革麟¹, 赵荣¹, 田野¹, 谢明², 张东¹

(1.中国航天科工集团第六研究院二一〇所, 西安 710065; 2.空军驻西安地区
第八军事代表室, 西安 710065)

摘要: **目的** 构建固体姿轨控发动机不同场景下的复杂电磁环境电磁效应分析方法。**方法** 通过将固体姿轨控发动机的复杂模型逐层分解, 根据各部件级模型的电磁敏感特性, 建立电磁敏感度模型。从系统级、整机级、部件级、PCB 板级到器件级分析固体姿轨控发动机所面临的复杂环境, 并对固体姿轨控发动机电磁特性进行分层解析研究。**结果** 对固体姿轨控发动机所面临的电磁环境场景进行分类, 分为待发发射、中段飞行、末段对敌 3 个主要场景, 并对 3 类场景下的干扰源进行分类, 得出复杂电磁环境下固体姿轨控发动机电磁干扰源及敏感体, 以及电磁耦合干扰矩阵。**结论** 本研究对于开展固体姿轨控发动机在复杂电磁环境下的稳定性和可靠性研究具有指导作用, 为进一步的电磁特性仿真与验证研究奠定了坚实的基础。

关键词: 固体姿轨控发动机; 复杂电磁环境; 电磁效应; 电磁敏感特性; 分层解析; 耦合干扰矩阵

中图分类号: TN011

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)08-0117-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.08.014

Analysis Method for Complex Electromagnetic Environment of Attitude-orbit Control Engine

LIU Gelin¹, ZHAO Rong¹, TIAN Ye¹, XIE Ming², ZHANG Dong¹

(1. The 210th Institute of the Sixth Academy of CASIC, Xi'an 710065, China; 2. Office of the Eighth Military Representative of the Air Force in the Xi'an Area, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The work aims to develop analysis methods for analyzing complex electromagnetic environment electromagnetic effects in different scenes of the attitude-orbit control engine construction. By decomposing the complex model of the attitude-orbit control engine layer by layer, electromagnetic sensitivity models were established based on the electromagnetic sensitive characteristics of each component-level model. Analysis was conducted from the system level, the complete machine level, the component level, the PCB board level to the device level to analyze the complex environment faced by the attitude-orbit control engine, and conduct layered analysis research on the electromagnetic characteristics of the attitude-orbit control engine. The electromagnetic environment scenarios faced by the attitude-orbit control engine were classified and divided into three main scenarios: ready-to-launch, mid-flight, and terminal engagement with the enemy. The interference sources under these three types of scenarios were classified, and the electromagnetic interference sources and sensitive bodies as well as the electromag-

收稿日期: 2024-04-23; 修订日期: 2024-05-14

Received: 2024-04-23; Revised: 2024-05-14

引文格式: 刘革麟, 赵荣, 田野, 等. 固体姿轨控发动机复杂电磁环境电磁效应分析方法构建研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(8): 117-126.

LIU Gelin, ZHAO Rong, TIAN Ye, et al. Analysis Method for Complex Electromagnetic Environment of Attitude-orbit Control Engine[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(8): 117-126.

netic coupling interference matrix of the attitude-orbit control engine under the complex electromagnetic environments were identified. This study provides guidance for the stability and reliability research of the attitude-orbit control engine in complex electromagnetic environments, laying a solid foundation for further electromagnetic characteristics simulation and validation research.

KEY WORDS: solid attitude-orbit control engine; complex electromagnetic environment; electromagnetic effects; electromagnetic sensitivity properties; layered analysis; coupled interference matrix

近年来,随着科技的迅猛发展,各国对高科技技术下的体系化作战研究不断深入,我国周边国家和地区的武器装备信息化程度不断提高,武器系统面临着更加复杂严峻的应用场景,同时我国导弹武器面临着十分复杂的作战电磁环境^[1-6]。固体姿轨控发动机在复杂电磁环境下是一个动态的多姿态系统,即固体姿轨控发动机的工况是丰富而复杂的。

电磁环境适应性试验研究以及战场中复杂电磁环境仿真研究已取得初步进展^[7]。通过对控制器类电子部件组成的分解进行电磁兼容分析研究^[8],复杂电磁环境的构建通过建立仿真场景中电磁敏感设备的电磁干扰要素^[9-10],其相互之间并无电磁耦合关系^[11],只有作用在电磁敏感设备本体时,才会产生相互耦合作用^[12]。复杂电磁环境构建的难点和技术关键点是复杂电磁环境中干扰因素众多,复杂度较高^[13],并且存在相互之间的耦合因素^[14],还存在影响机理不明晰等问题^[15-17]。开展系统性电磁环境效应试验的方法和试验过程^[18-19],全面研究固体姿轨控发动机在所有工况下的复杂电磁环境^[20],并对固体姿轨控发动机在复杂电磁环境的效应分析^[21],为固体姿轨控发动机电磁仿真提供相应的耦合模型和干扰矩阵^[22-25],为此需要对固体姿轨控发动机所面临的电磁环境场景进行解析构建研究。在固体姿轨控发动机复杂电磁环境电磁效应分析方法构建的研究中,研究人员发现,电磁干扰对发动机的控制精度有显著影响。他们通过建立仿真场景、试验验证等方法,分析干扰要素和相互之间耦合要素。同时,构建预测与仿真模型,为电磁效应分析提供有力的工具。

目前,尽管研究人员已对导弹武器所面临的复杂电磁环境开展了环境搭建、环境场景仿真等相关研究,已加快复杂电磁环境构建与耦合技术的发展,为研究人员提供了一定的技术基础,然而不同影响因素之间应如何相互耦合的效应机理仍然不够明确,缺乏系统性和深入性。同时,这也是解决固体姿轨控发动机在复杂电磁环境下适应性问题的核心要素。因此,本文重点研究复杂电磁环境场景构建、解析以及电磁效应耦合机理分析,通过将固体姿轨控发动机的复杂模型逐层分解,建立电磁敏感度模型。采用从系统级、整机级、部件级、PCB板级到器件级分析固体姿轨控发动机所面临的复杂环境,对固体姿轨控发动机电磁

特性分层解析研究,并对耦合分析模型以及干扰矩阵展开研究,对固体姿轨控发动机复杂电磁环境多因素、多场景综合分析。本文的研究不仅有助于深入理解固体姿轨控发动机在复杂电磁环境下如何解决电磁适应性问题,并提供干扰机理分析及耦合模型构建,还能促进固体姿轨控发动机在复杂电磁环境下电磁效应技术的发展。为发动机控制系统的设计、优化和评估提供理论支撑和实践指导。因此,本文的研究对于提升发动机在复杂电磁环境下的性能和可靠性具有迫切的必要性。

1 固体姿轨控发动机电磁环境影响

固体姿轨控发动机作为新型空空导弹和地空导弹调姿变轨的重要动力部件,其包含的控制、通讯、能量驱动、安全逻辑等电子单元,是新型机电一体化可控动力装置,且对电磁环境的敏感性越来越高,主要受到内部电磁环境、外部电磁环境的电磁效应影响。

由于现代战场大量使用电子信息装备,不仅数量庞大、体制复杂、种类多样,而且功率大,使得战场空间中的电磁信号非常密集,既有敌方故意释放的干扰信号,也有己方电子设备辐射的信号。不但有地物或云团等反射的杂波,还有民用电子设备发射的信号,甚至还有一些自然体辐射的电磁信号,这种敌我双方信息装备密集部署和电子对抗装备的激烈对抗,形成了极为复杂的电磁环境,如图1所示。在复杂电磁环境下,固体姿轨控发动机在不同的干扰类型下导致最终产品失效,影响固体姿轨控发动机有效工作,从而导致贻误战机,造成难以挽回的后果。

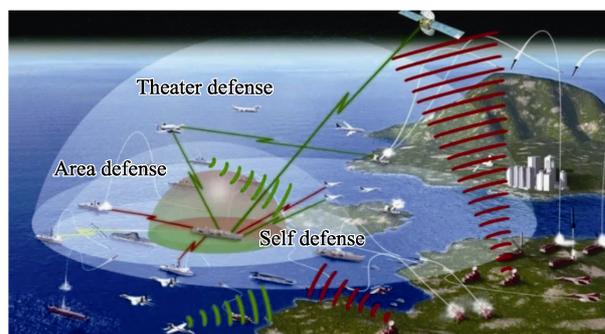


图1 现代战场复杂电磁环境^[26]

Fig.1 Complex electromagnetic environment in modern battlefield^[26]

2 电磁环境场景构建与解析

对复杂电磁环境下固体姿轨控发动机可能面临的外部电磁环境及内部电磁环境中的电磁武器干扰、

对抗及非对抗性辐射干扰、自然辐射干扰、平台基础噪声等方面逐一解析, 全面系统地分析影响固体姿轨控发动机整体工作运行效能的重点电磁环境因素, 如图 2 所示。

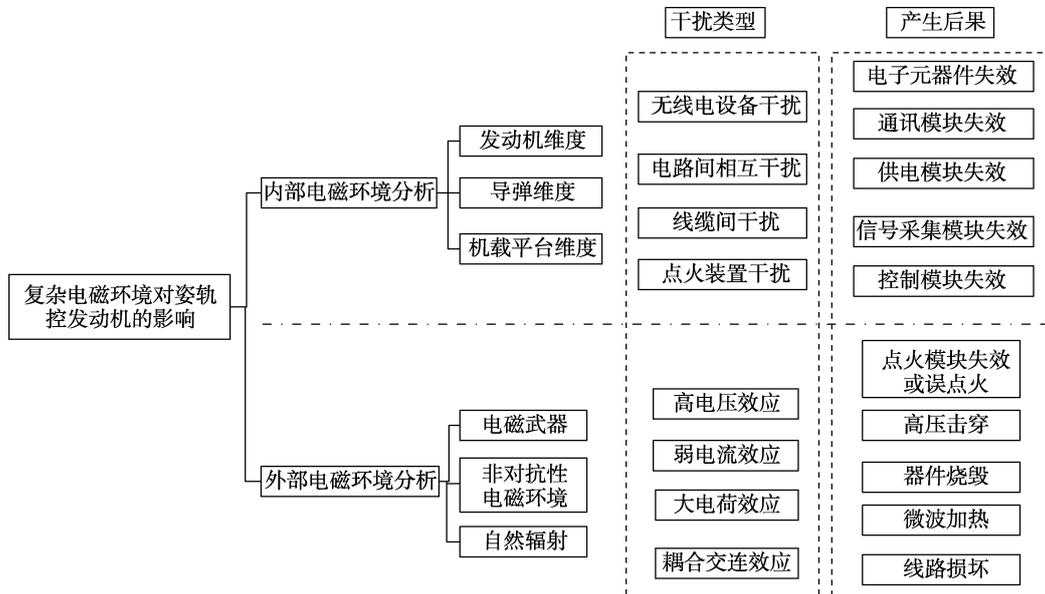


图 2 固体姿轨控发动机复杂电磁环境干扰及后果

Fig.2 Complex electromagnetic environment interference and consequences of solid attitude-orbit control engines

因固体姿轨控发动机在不同的工况条件下, 电路运行状态存在差异, 且不同工况下面临的电磁环境有所不同, 如图 3 所示。因此, 根据实际工作状态, 将

固体姿轨控发动机面临的复杂电磁电磁环境分解为 3 个主要场景: 待发状态环境、中段飞行状态环境、末段对敌状态环境。

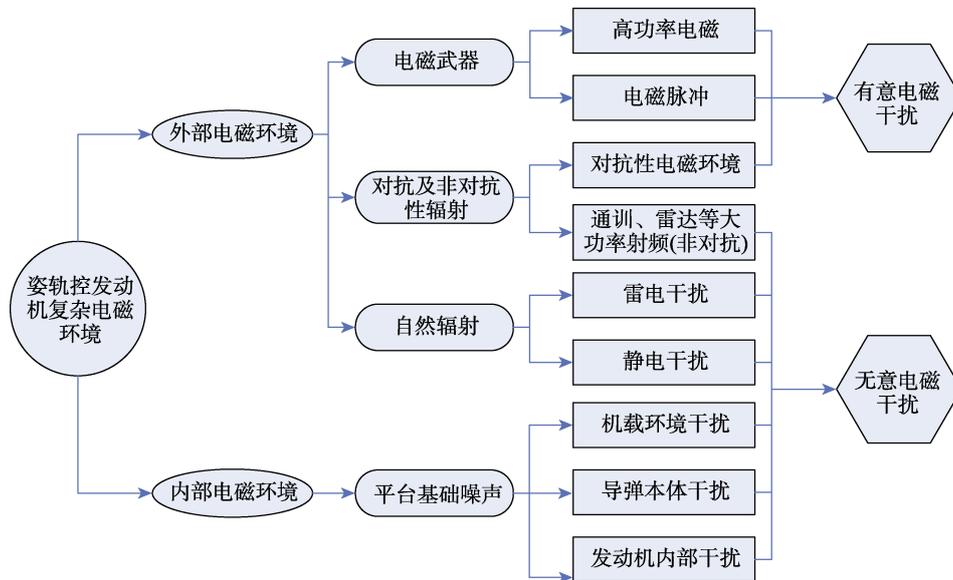


图 3 固体姿轨控发动机面临的复杂电磁环境

Fig.3 Complex electromagnetic environment for solid attitude-orbit control engines

2.1 待发状态环境场景

2.1.1 场景构建

待发状态主要面临平台基础噪声以及外部电

磁环境, 其电子设备包括了多种类型的信号发射源, 通过线缆束和连接部件的传导耦合或空间的辐射耦合形成了相对复杂的电磁环境。经过典型干扰威胁场景分析, 其关键是保证电源线和信号线的传导辐射不

会影响固体姿轨控发动机触发控制组件内部电路的正常工作。即待发射状态环境场景主要考虑外部电磁环境中的非对抗性辐射包括通信、雷达等大功率辐射，内部电磁环境中平台基础噪声中的机载环境干扰，如图4所示。其中，非对抗性辐射干扰主要来源

于飞机外部雷达等大功率装置的电磁辐射干扰，以及飞机内部供电系统等大功率、大电流装置的电磁辐射干扰、电磁感应干扰，也包含地面和空间系统可能存在的电磁辐射干扰。上述干扰源的频率范围通常可以覆盖 10 kHz~40 GHz。

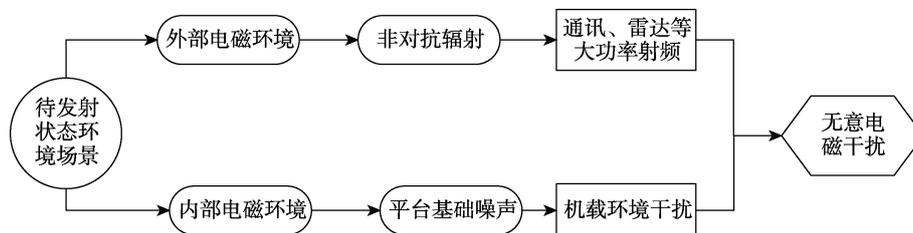


图4 待发射状态环境场景电磁分析

Fig.4 Electromagnetic analysis of environmental scenarios in ready-to-launch state

2.1.2 场景解析

待发射状态主要面临平台基础噪声以及外部电磁环境，固体姿轨控发动机电子设备包括了多种类型的信号发射源，通过线缆束和连接部件的传导耦合或空间的辐射耦合形成了相对复杂的电磁环境。针对导弹和机载平台开展固体姿轨控发动机电磁环境特性构建、电磁干扰链路解析、电磁耦合模型构建等，同时把其电源线传导耦合（频率范围为 10 kHz~10 MHz）作为典型干扰信号，进行其电磁特性的验证。

2.2 中段飞行状态环境场景

2.2.1 场景构建

中段飞行状态主要面临外部电磁环境以及平台基础噪声。导弹在中段飞行状态下，需要确保发动机的连接线缆、屏蔽壳体等在雷电干扰的间接状态下不失效、不损坏。即中段飞行状态环境场景主要考虑外

部电磁环境中的自然辐射中的雷电干扰，内部电磁环境中平台基础噪声中的弹体本体干扰，如图5所示。其中，雷电干扰通常无法精确采集，通过采信相关标准，在仿真和试验中用电流脉冲波形模拟，脉冲波形通常用包含上升沿和下降沿的尖峰脉冲表示。导弹本体的辐射干扰源具体包括 X 波段雷达导引信号、Ku 波段雷达导引信号、Ka 波段雷达导引信号。

2.2.2 场景解析

中段飞行状态主要考虑外部电磁环境对固体姿轨控发动机的影响，包括了电磁武器、对抗或非对抗干扰、自然辐射等多方面内容。重点分析固体姿轨控发动机中段飞行状态下的自然界间接雷电（电场强度为 $6 \times 10^6 / (1 + R^2 / 50^2)^{1/2}$ V/m，磁场强度为 $3.2 \times 10^4 / R$ A/m，其中 R 为设备与雷电之间的距离）干扰。雷电干扰通常无法精确采集，本论文拟定采信 GJB 8848—2016 系统电磁环境效应试验方法开展研究。

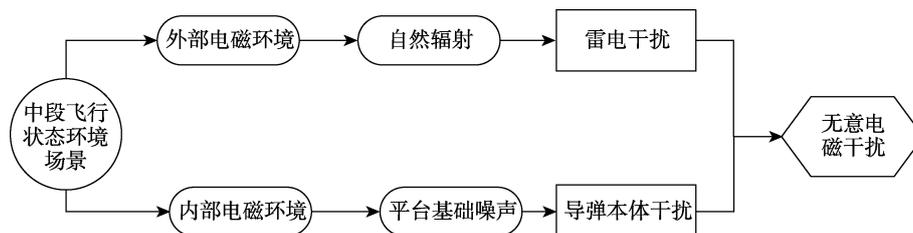


图5 中段飞行状态环境场景电磁分析

Fig.5 Electromagnetic analysis of environmental scenarios in mid-flight state

2.3 末段对敌状态环境场景

2.3.1 场景构建

末段对敌状态主要面临外部电磁环境以及平台基础噪声，由于此时导弹已经进入对敌电磁对抗性武器的干扰范围，主要考虑敌方电子对抗及电磁武器的干扰，即导弹末段对敌场景下电子对抗和敌方高功率电磁频率在范围 300 MHz~40 GHz 对固体姿轨控发动机的影响。这一阶段发动机通常处于高机动状态

下，因此需考虑发动机内部干扰，如图6所示。对敌电磁对抗性武器包括电磁脉冲和高功率电磁通常是无法采集的。通过采信相关信息，本项目关注的瞬态电磁场辐射包括高空核爆电磁脉冲以及超宽带电磁脉冲武器。

2.3.2 末段对敌状态环境场景解析

针对末段对敌状态，本文主要考虑敌方电磁干扰及电磁武器对固体姿轨控发动机的影响，即导弹末段

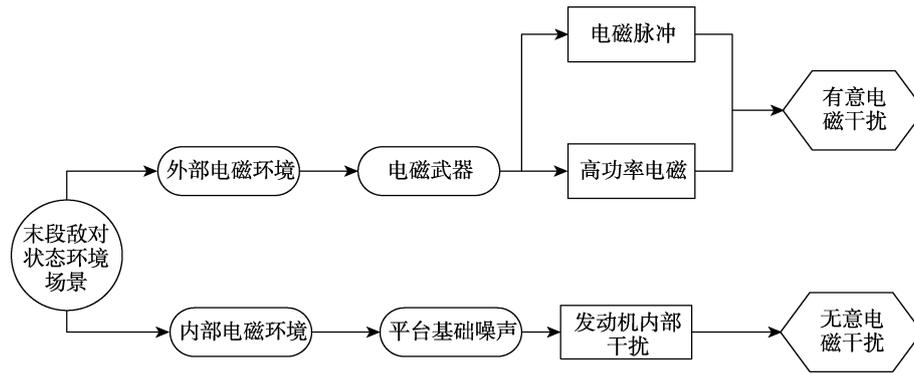


图 6 末段敌对状态环境场景电磁分析

Fig.6 Electromagnetic analysis of environmental scenarios in terminal engagement with the enemy

对敌场景下电磁干扰(频率为 30 MHz~40 GHz, 功率为 1~10 MW)和敌方高功率电磁(频率为 300 MHz~300 GHz), 并进行其电磁特性的验证。

3 固体姿轨控发动机电磁特性分层解

固体姿轨控发动机分层解析研究技术即采用自底向上或者自顶向下的研究方法, 根据电磁兼容仿真和研究方法的不同, 将固体姿轨控发动机拆解成不同层级进行研究。分析固体姿轨控发动机面临的复杂电磁环境, 可根据其工作状态下所受干扰来源的不同, 使用电磁特性分层技术将复杂电磁环境分成 6 个层级, 即系统级(包含系统内级和系统间级)、整机级、部件级、PCB 板级、器件级, 如图 7 所示。器件级即

固体姿轨控发动机的核心器件, 板级即固体姿轨控发动机的 PCB 板, 部件级即固体姿轨控发动机的全部部件, 整机级即固体姿轨控发动机自身, 系统内级即导弹及固体姿轨控发动机, 系统间级即固体姿轨控发动机外部的电磁干扰。具体分解见表 1。

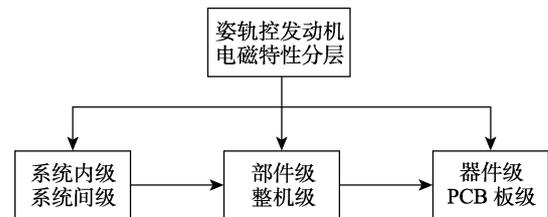


图 7 固体姿轨控发动机电磁特性分层研究路线
Fig.7 Roadmap for hierarchical study of electromagnetic characteristics of solid attitude-orbit control engines

表 1 固体姿轨控发动机电磁特性分层

Tab.1 Layered table of electromagnetic characteristics of solid attitude-orbit control engines

| 层级 | 名称 | 英文缩写 | 英文全称 | 文中指代 |
|----|--------|---------|-----------------------------|--------------------------------------|
| L1 | 器件级 | CL | Cell Level | 组成固体姿轨控发动机的核心器件 |
| L2 | PCB 板级 | PCBL | Printed Circuit Board Level | 组成固体姿轨控发动机的 PCB 板 |
| L3 | 部件级 | CPL | ComPonent Level | 组成固体姿轨控发动机的全部部件 |
| L4 | 整机级 | CML | Complete Machine Level | 固体姿轨控发动机自身 |
| L5 | 系统内级 | IntraSL | IntraSystem Level | 导弹及固体姿轨控发动机 |
| L6 | 系统间级 | InterSL | InterSystem Level | 固体姿轨控发动机与空基/陆基/舰艇 固体姿轨控发动机与外部电磁环境 |

固体姿轨控发动机作为新型空空导弹和地空导弹调姿变轨的重要动力部件。因其包含电气控制、通讯、能量驱动、安全逻辑等电子单元, 是新型机电一体化可控动力装置, 且对电磁环境的敏感性越来越高, 主要是受到系统内、系统间和系统外等方面的电磁效应影响。

固体姿轨控发动机电子部件组成的分解方法: 根据固体姿轨控发动机中的电子元器件、电子部件的组成和功能模块划分, 对其进行电子特性分解。由于固体姿轨控发动机主要受到系统内级和系统间级的复杂电磁环境干扰, 因此本文主要针对系统内和系统间 2 个层级的干扰即导弹和武器平台对固体姿轨控发动

机的电磁影响, 将电子部件组成分解的粒度确定至部件级, 即将组成固体姿轨控发动机整机级的全部电子部件分解到部件级水平, 并描述它们之间的电子连接关系, 最终形成整机级部件分解表(具体见表 2)。为下一步研究干扰机理奠定技术基础。

按照电磁兼容 3 要素分类, 可以将以上 8 种组部件分为 3 类, 如图 8 所示。

1) 电磁干扰源: 控制模块、开关电源、通讯/遥测模块、触发电路、触发装置、I/O 模块。

2) 电磁敏感体: 控制模块、触发电路、通讯/遥测模块、I/O 模块。

表 2 整机级部件分解表

Tab.2 Complete machine level component breakdown table

| 序号 | 部件名称 | 功能 |
|----|---------|--------------------------|
| 1 | 控制模块 | 解析指令, 完成指令下发, 位置控制、速度控制等 |
| 2 | 开关电源 | 供电 |
| 3 | 触发电路 | 接收指令释放电荷 |
| 4 | 通讯/遥测模块 | 数据传输 |
| 5 | IO 模块 | 数字、模拟量的输入输出 |
| 6 | 连接线缆 | 信号线缆、通信线缆、电源线缆 |
| 7 | 触发装置 | 触发 |
| 8 | 屏蔽壳体 | 弹体外壳、发动机舱段 |

3) 传播路径: 连接线缆 (存在差模传导辐射与共模辐射)、屏蔽壳体 (存在孔缝泄漏辐射)。

按照电磁仿真分析特性, 也可以将以上 8 种组部件分为 3 类。

1) 包含 PCB 板卡组部件: 控制模块、开关电源、触发电路、通讯/遥测模块、I/O 模块。

2) 高频电磁组部件 (射频类): 触发装置 (工作过程中可能产生对外的高频辐射)。

3) 线缆线束和屏蔽层: 连接线缆、屏蔽壳体。

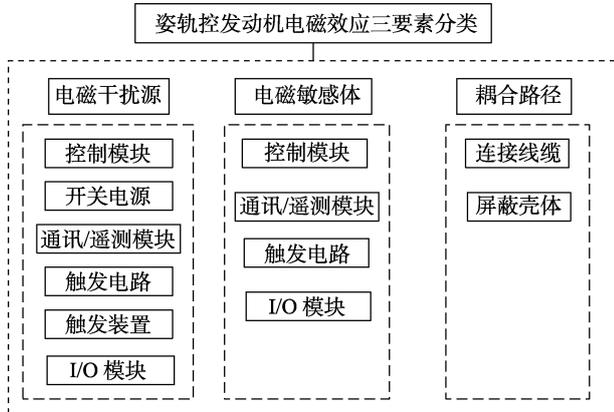


图 8 固体姿轨控发动机电磁分类

Fig.8 Electromagnetic classification of solid attitude-orbit control engines

4 固体姿轨控发动机复杂电磁环境电磁效应耦合分析

4.1 内部电磁环境效应

固体姿轨控发动机内部电磁环境主要是指平台基础噪声, 其主要分为固体姿轨控发动机自身电磁适应性问题, 固体姿轨控发动机在导弹载体上的电磁适应性问题, 以及空基载体上的电磁适应性问题。导弹内部电磁环境的分析主要分为无线电设备干扰、电路间的相互干扰、设备线缆间干扰、触发装置干扰、飞机上的电缆线束对固体姿轨控发动机的电磁干扰、飞

机电子设备对固体姿轨控发动机的电磁干扰。

4.2 外部电磁环境效应

外部电磁环境效应包括电磁武器对固体姿轨控发动机的电磁干扰、非对抗性电磁环境对固体姿轨控发动机的电磁干扰、自然辐射干扰、对抗性电磁环境干扰等。其中, 电磁武器包括有高功率电磁武器以及利用低当量核弹在高空引爆产生的高空核爆电磁脉冲武器; 非对抗性电磁环境对固体姿轨控发动机的电磁干扰包括机载制导武器上天线、机架线缆、舱段连接处、其他功能性孔缝导致电磁场的谐振、辐射耦合与传导耦合交织; 自然辐射包括雷电环境以及静电带来的电磁辐射; 对抗性电磁环境即电子对抗, 包含电子侦察、电子攻击和电子防护 3 个方面。

4.3 耦合分析模型

固体姿轨控发动机复杂电磁环境互耦效应模型的输入即电磁环境各组成要素的表征指标体系值以及固体姿轨控发动机的各工作环节、各信号处理切片的参数设置, 包括了复杂电磁环境在电磁能量、电磁信息、电磁行为等 3 个维度上的指标表征, 表示为:

$$\overline{EM} = \vec{f}_1(t, f, \Omega, e, m, p) + \vec{f}_2(t, f, \Omega, e, m, p) + \dots + \vec{f}_n(t, f, \Omega, e, m, p) \quad (1)$$

$$\overline{EM}_{PSD} = \sum_i \vec{f}_i(t, f, \Omega, e, m, p) = \sum_i [s_i \cdot \vec{\gamma}_i(\Omega, m, p)] \quad (2)$$

$$\overline{EM}_{MS} = \cup_i \vec{f}_i(t, f, \Omega, e, m, p) = \cup_i [m_i \cdot \vec{\rho}_i(t, f, \Omega, e, m, p)] \quad (3)$$

$$\overline{EM}_{ACT} = \cup_i \{[(EM)_i, (\Delta t)_i, \Omega_i(\alpha, \beta)]\} \quad (4)$$

式中: \overline{EM} 为复杂电磁环境整体描述; \overline{EM}_{PSD} 为复杂电磁环境在能量维度简要描述; \overline{EM}_{MS} 为复杂电磁环境在信息维度简要描述; \overline{EM}_{ACT} 为复杂电磁环境在行为维度简要描述; t 为时域表征指标; f 为频域表征指标; Ω 为空域表征指标; e 为能量域表征指标; m 为调制域表征指标; p 为极化域表征指标; s_i 为电磁功率/密度; $\vec{\gamma}_i$ 为能量特征指标; m_i 为载波携带信号数; $\vec{\rho}_i$ 为信号特征指标; $(\Delta t)_i$ 为行为维度上作战时间; $\Omega_i(\alpha, \beta)$ 为行为维度上作战空间变化指标; α 为方位角; β 为俯仰角。

固体姿轨控发动机的各工作环节、各信号处理切片的参数设置, 初步表示为:

$$W = \{W_1[S_1(x_1, x_2, \dots), S_2, \dots], W_2(S_1, S_2, \dots), W_3(S_1, S_2, \dots)\} \quad (5)$$

式中: W 表示固体姿轨控发动机工作参数整合结果; W_1 、 W_2 、 W_3 分别表示固体姿轨控发动机 3 个工作过程的工作参数; S_i 表示各信号处理切片的工作参数; x_i 表示具体的参数设置值。

1) 综合采用多种处理方法, 形成系统与环境多维度映射关系。按固体姿轨控发动机模块结构和时间标尺等, 对各切片和各工作过程的数学映射进行整合, 形成固体姿轨控发动机作战全流程的互耦效应数学映射关系。初步表示为:

$$\begin{cases} f_{\text{IPSD}} = F_1[x_1, x_2, \dots] \\ f_{\text{IMS}} = F_2[x_1, x_2, \dots] \\ f_{\text{IAC}} = F_3[x_1, x_2, \dots] \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} f_1 = F_1[x_1, x_2, \dots] \\ f_2 = F_2[x_1, x_2, \dots] \\ f_3 = F_3[x_1, x_2, \dots] \end{cases} \quad (7)$$

式中: f_{IPSD} 、 f_{IMS} 、 f_{IAC} 分别表示固体姿轨控发动机某一信号处理切片的某一性能指标与复杂电磁环境的数学映射关系; f_1 、 f_2 、 f_3 分别表示固体姿轨控发动机某一工作过程的性能指标与复杂电磁环境的数学映射关系。

2) 建立规范化效应模型, 对标输入确定输出, 迭代验模校模。针对互耦效应模型的校验, 需进行相同环境条件下的内场、外场或全数字仿真试验, 把互耦效应模型在能量、信息、行为维度上的计算结果与实测试验数据进行对比, 分析误差产生的原因, 修订数据模型, 改进建模方法, 完善机理研究结果。此外, 需对单个信号处理切片、单个工作流程以及整合后的模型进行“建模—校模—修模”的多次迭代, 保证单个模型的建模精度, 以确保固体姿轨控发动机复杂电磁环境互耦效应模型的建模精度符合指标要求。

4.4 耦合干扰矩阵

固体姿轨控发动机控制系统为顺序控制系统, 按照弹上机的指令依次完成点火动作。从其电路连接关系、工作原理分析可得固体姿轨控发动机上主要的部件的电磁干扰情况, 其线缆/线束、壳体(带有孔缝)会起到传导耦合路径的作用: PCB 板上控制模块(含 FPGA 芯片和晶振)和电源会起到干扰源或敏感体的作用; 固体姿轨控发动机点火控制组件由点火电路板和通讯电源板以连接器相连接, 与外部通过 I/O 模块上的连接器接口实现数据的沟通, 会受到线缆束传导耦合的影响; 通讯/遥测模块中的集成电路接收飞行控制装置的命令, 上传检测的结果, 会成为辐射耦合的敏感体和干扰源; 开关电源模块含有继电器、滤波器和光 MOS 管, 会受到传导耦合与辐射耦合; 点火电路内部有大量的充电电容, 负责给点火装置充电, 会受到传导耦合与辐射耦合的影响; 点火装置内部为电点火器, 与点火控制组件以连接器相通, 内部发火回路可能受到传导耦合影响。

通过对各个模块电磁效应的分析, 按照 GJB 1389A 中 5.3 规定的“空间和运载系统面临外部电磁射频环境”干扰频段和 GJB 7869 中的规定的电磁辐射信号类型、调制样式及极化方式, 确定了相关雷达/通讯信号工作波段和信号类型^[27], 再结合空间复杂电磁环境的分析成果和固体姿轨控发动机在空-空作战背景下的复杂电磁环境, 按照电磁特性的三要素, 初步拟定其在待发发射状态、中段飞行状态、末段对敌状态 3 种典型复杂电磁环境下的干扰矩阵, 见表 3~5。

表 3 待发发射状态环境场景干扰矩阵
Tab.3 Interference matrix of environmental scenarios in ready-to-launch state

| 干扰源 | 敏感体 | | | | | | | |
|-------|-----------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | R(1) | R(2) | R(3) | R(4) | R(5) | R(6) | R(7) | R(8) |
| | 控制模块 | 开关电源 | 激发电路 | 通讯/遥测模块 | IO 模块 | 连接线缆 | 激发装置 | 屏蔽壳体 |
| E(23) | X 波段 | T23,1 | T23,3 | | | T23,6 | T23,7 | T23,8 |
| E(24) | L 波段 | T24,1 | T24,3 | | | T24,6 | T24,7 | T24,8 |
| E(25) | C 波段 | T25,1 | T25,3 | | | T25,6 | T25,7 | T25,8 |
| E(26) | S 波段 | T26,1 | T26,3 | | | T26,6 | T26,7 | T26,8 |
| E(27) | HF 高频通信 | | | T27,4 | | | | T27,8 |
| E(28) | VHF 甚高频通信 | | | T28,4 | | | | T28,8 |
| E(29) | 导航系统辐射 | | | T29,4 | | | | T29,8 |

通过对固体姿轨控发动机复杂电磁环境电磁效应分析与构建方法研究, 得到固体姿轨控发动机电磁特性分层解析以及固体姿轨控发动机干扰矩阵。本论文研究结果可为固体姿轨控发动机在复杂电磁环境下仿真分析与试验验证提供理论方法支撑。本研究应用场景如下:

1) 针对 3 种不同电磁环境场景的构建与解析研

究结果, 可应用于固体姿轨控发动机、导弹或飞机开展复杂电磁环境场景构建中, 为不同场景下的主要干扰因素的选取提供参考。

2) 固体姿轨控发动机分层解析方法以及电磁效应耦合分析方法与结论, 可用于不同类型火工电一体化设备的不同层级干扰源及敏感体的电磁效应分析研究。

表4 中段飞行环境场景干扰矩阵
Tab.4 Interference matrix of environmental scenarios in mid-flight state

| 干扰源 | 敏感体 | | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | R(1) | R(2) | R(3) | R(4) | R(5) | R(6) | R(7) | R(8) |
| | 控制模块 | 开关电源 | 激发电路 | 通讯/遥测模块 | IO 模块 | 连接线缆 | 激发装置 | 屏蔽壳体 |
| E(1) 数据链射频辐射 | T1,1 | | | T1,4 | | T1,6 | | T1,8 |
| E(2) X 波段高脉冲波形 | T2,1 | | | | | T2,6 | | T2,8 |
| E(3) X 波段中脉冲波形 | T3,1 | | | | | T3,6 | | T3,8 |
| E(4) X 波段脉内调制波 | T4,1 | | | | | T4,6 | | T4,8 |
| E(5) X 波段脉间捷变波形 | T5,1 | | | | | T5,6 | | T5,8 |
| E(6) Ku 波段高脉冲波形 | T6,1 | | | | | T6,6 | | T6,8 |
| E(7) Ku 波段中脉冲波形 | T7,1 | | | | | T7,6 | | T7,8 |
| E(8) Ku 波段脉内调制波形 | T8,1 | | | | | T8,6 | | T8,8 |
| E(9) Ku 波段脉间捷变波形 | T9,1 | | | | | T9,6 | | T9,8 |
| E(10) Ka 波段脉间捷变波形 | T10,1 | | | | | T10,6 | | T10,8 |
| E(11) Ka 波段脉间捷变波形 | T11,1 | | | | | T11,6 | | T11,8 |
| E(12) Ka 波段脉间捷变波形 | T12,1 | | | | | T12,6 | | T12,8 |
| E(13) Ka 波段脉间捷变波形 | T13,1 | | | | | T13,6 | | T13,8 |
| E(14) 红外导引系统辐射(短波) | T14,1 | T14,2 | | | | T14,6 | | T14,8 |
| E(15) 红外导引系统辐射(中波) | T15,1 | T15,2 | | | | T15,6 | | T15,8 |
| E(16) 无线电引信辐射 | T16,1 | | T16,3 | | | T16,6 | T16,7 | T16,8 |
| E(17) 测试信号传导耦合 | T17,1 | | | | | T17,6 | | T17,8 |
| E(18) 触发信号传导耦合 | T18,1 | | T18,3 | | | T18,6 | T18,7 | T18,8 |
| E(19) 通信信号传导耦合 | | | | T19,4 | | T19,6 | | T19,8 |
| E(20) 遥测信号传导耦合 | | | | | | T20,6 | | T20,8 |
| E(21) 电源线传导耦合 | T21,1 | T21,2 | T21,3 | T21,4 | T21,5 | T21,6 | T21,7 | T21,8 |
| E(22) 雷电 | | | T22,3 | | | T22,6 | T22,7 | T22,8 |

表5 末段对敌环境场景干扰矩阵
Tab.5 Interference matrix of environmental scenarios in terminal engagement with the enemy

| 干扰源 | 敏感体 | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | R(1) | R(2) | R(3) | R(4) | R(5) | R(6) | R(7) | R(8) |
| | 控制模块 | 开关电源 | 激发电路 | 通讯/遥测模块 | IO 模块 | 连接线缆 | 激发装置 | 屏蔽壳体 |
| E(30) 电子战设备 | T30,1 | T30,2 | T30,3 | T30,4 | T30,5 | T30,6 | T30,7 | T30,8 |
| E(31) 电磁脉冲 | T31,1 | T31,2 | T31,3 | T31,4 | T31,5 | T31,6 | T31,7 | T31,8 |
| E(32) 高功率电磁 | | | T32,3 | | | T32,6 | T32,7 | T32,8 |

3) 耦合分析模型以及耦合干扰矩阵的研究结果,可应用于固体姿轨控发动机仿真分析与验证中,为干扰源、敏感体的主要关注点提供参考依据。

4) 针对大系统平台(移动载机平台)的复杂电磁环境电磁效应分析,因载机从固定平台到移动平台,其所面临的复杂电磁环境适应性分析因素不同,依据本研究方法对大系统平台进行场景构建、电磁特性分层解析、耦合干扰分析,从而为电磁特性仿真提供基础数据。

5 结语

1) 开展固体姿轨控发动机复杂电磁环境下的电磁效应分析研究,需分别对待发射状态、中段飞行状态、末段敌对3个典型场景进行场景搭建与干扰因素分析。

2) 针对固体姿轨控发动机工作状态下所受干扰来源的不同,使用电磁特性分层技术将复杂电磁环境分成6个层级,即器件级、板级、部件级、整机级、

系统内、系统间,进行固体姿轨控发动机电磁特性分层解析研究。

3)对固体姿轨控发动机在电磁能量、电磁信息、电磁行为3个维度上建立耦合分析模型,拟定出耦合干扰矩阵,为下一步电磁特性仿真与试验提供原理性分析依据。

参考文献:

- [1] 古小明,周克胜,朱居莹. 战场复杂电磁环境[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(8): 78-80.
GU X M, ZHOU K S, ZHU J Y. Battlefield Complex Electromagnetic Environment[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2009, 30(8): 78-80.
- [2] 丁潇,陈亚洲. 战场复杂电磁环境的仿真与构建方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 33-37.
DING X, CHEN Y Z. Research on Simulation and Construction Method of Complex Battlefield Electromagnetic Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 33-37.
- [3] 蔺美青,易传坤,徐廷新. 部队实战化训练战场电磁环境构建[J]. 国防科技, 2018, 39(5): 115-120.
LIN M Q, YI C K, XU T X. Construction of Battlefield Electromagnetic Environment for Army Practical Training[J]. Defense Technology Review, 2018, 39(5): 115-120.
- [4] 洪丽娜,韩慧,许雄,等. 复杂电磁环境表征方法[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(5): 37-40.
HONG L N, HAN H, XU X, et al. The Characterization Method on Complex Electromagnetic Environment[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2013, 29(5): 37-40.
- [5] 黄兴东,申功勋. 复杂电磁环境仿真试验体系的模型验证方法研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(12): 2562-2566.
HUANG X D, SHEN G X. Research of Model Validation Methods for Simulation Experiment System of Complex Electromagnetic Environment[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(12): 2562-2566.
- [6] 曾国奇,李思吟,熊小军. 复杂电磁环境下电子系统抗干扰性能仿真平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(4): 1077-1080.
ZENG G Q, LI S Y, XIONG X J. Design of Electronic System Anti-Interference Performance Simulation Platform under Complex Electromagnetic Environment[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(4): 1077-1080.
- [7] 孟海锋,熊学明,张琪. 电磁环境适应性试验仿真系统研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 31-36.
MENG H F, XIONG X M, ZHANG Q. Simulation System of the Electromagnetic Environment Adaptation Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(2): 31-36.
- [8] 刘春宏,沈莉莉,王敏. 战场复杂电磁环境仿真想定规划技术研究[J]. 通信对抗, 2017, 36(3): 46-50.
LIU C H, SHEN L L, WANG M. Study on Planning Technology of Complex Electromagnetic Environment Simulation Scenario[J]. Communication Countermeasures, 2017, 36(3): 46-50.
- [9] 李睿,官小莎. 基于控制器主板设计的电磁兼容仿真计算[J]. 船电技术, 2022, 42(4): 7-9.
LI R, GUAN X S. Electromagnetic Compatibility Simulation Based on the Controller Board Design[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2022, 42(4): 7-9.
- [10] 张寅,叶志锋,徐建国,等. 电子控制器PCB板电磁兼容性仿真与试验研究[J]. 航天控制, 2012, 30(1): 49-53.
ZHANG Y, YE Z F, XU J G, et al. The Simulation and Experimental Study on the EMC of the PCB for the Electronic Controller[J]. Aerospace Control, 2012, 30(1): 49-53.
- [11] 周伟江,徐加驹,张薇. 基于马尔科夫模型的海战场电磁环境构建效能评估[J]. 现代雷达, 2022, 44(11): 56-60.
ZHOU W J, XU J J, ZHANG W. Efficiency Evaluation of Electromagnetic Environment Construction in Sea Battlefield Based on MDP[J]. Modern Radar, 2022, 44(11): 56-60.
- [12] 李伟,魏光辉,潘晓东,等. 典型通信装备电磁敏感度判据研究[J]. 微波学报, 2016, 32(6): 70-75.
LI W, WEI G H, PAN X D, et al. Research on Electromagnetic Susceptibility Criterion for Typical Communication Equipment[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(6): 70-75.
- [13] 付继伟,侯朝楨,窦丽华. 瞬态电磁波对多层电缆耦合的数值分析[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(2): 170-173.
FU J W, HOU C Z, DOU L H. Numerical Research of the Effect of the Transient Electromagnetic Wave Coupled to Multiplayer Shielded Cables[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(2): 170-173.
- [14] 陈国凡,王小燕. 瞬态电磁波对电子设备电缆的电磁耦合分析[J]. 无线电工程, 2009, 39(1): 45-46.
CHEN G F, WANG X Y. Analysis on Electromagnetic Coupling of Transient Electromagnetic Wave to Interconnect Cables of Electronic Systems[J]. Radio Engineering of China, 2009, 39(1): 45-46.
- [15] 王月清,王健,王凡,等. 一种电磁环境量化分析方法[J]. 电波科学学报, 2013, 28(4): 744-748.
WANG Y Q, WANG J, WANG F, et al. A Method for Quantificational Analysis for Complex Electromagnetic Environment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(4): 744-748.
- [16] 唐莽,张其伟,柳立志,等. 雷达制导武器系统复杂电磁环境影响效应研究[J]. 现代雷达, 2021, 43(10): 1-8.
TANG M, ZHANG Q W, LIU L Z, et al. A Study on the Complex Electromagnetic Environment Influence Effects on Radar Guided Weapon System[J]. Modern Radar, 2021, 43(10): 1-8.

- [17] 李维林, 段静玄, 赵复政. 复杂电磁环境对作战系统的影响及对抗策略[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(5): 179-181.
LI W L, DUAN J X, ZHAO F Z. Effect on Combat System Produced by Involute Electromagnetic Environment and the Antagonizing Way[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(5): 179-181.
- [18] 赵红梅, 苏海斌, 王健. 战场电磁环境复杂度与战术通信性能的相关性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 113-117.
ZHAO H M, SU H B, WANG J. Correlation of Battle Electromagnetic Environment Complexity and Tactics Communication System Performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(11): 113-117.
- [19] 张勇, 赵炳秋, 何纯全, 等. 系统电磁环境效应要求和试验评估研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 63-68.
ZHANG Y, ZHAO B Q, HE C Q, et al. Study on Requirements and Test Evaluation of Electromagnetic Environmental Effects for Systems[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(9): 63-68.
- [20] 谢鹏浩, 毕军建, 胡小锋. 对典型结构弹体的电磁耦合规律数值分析[J]. 军械工程学院学报, 2014, 26(2): 39-42.
XIE P H, BI J J, HU X F. Analysis on Electromagnetic Coupling Law of One Typical Projectile Body[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2014, 26(2): 39-42.
- [21] 杨萃. 复杂电磁环境认识综述[J]. 科技资讯, 2014, 12(35): 53.
YANG C. A Summary of Understanding of Complex Electromagnetic Environment[J]. Science & Technology Information, 2014, 12(35): 53.
- [22] 肖培, 王珏, 凌明祥, 等. 场线路多耦合下电机及其驱动系统辐射电磁干扰预测方法研究[J]. 电子学报, 2017, 45(10): 2449-2456.
XIAO P, WANG J, LING M X, et al. An Efficient Approach for Predicting Electromagnetic Interference Emission of Motor and Its Driver System under Field-Circuit and TL Coupling[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(10): 2449-2456.
- [23] 孙凤杰, 邓建红. 电子学系统强电磁脉冲干扰场路结合仿真[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(12): 184-188.
SUN F J, DENG J H. Field-Circuit Co-Simulation of Electromagnetic Pulse Interference to Electronics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(12): 184-188.
- [24] 刘焱, 汤海燕, 唐东, 等. 基于场路协同仿真的机载设备电磁干扰分析[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(3): 82-86.
LIU Y, TANG H Y, TANG D, et al. Airborne Equipment EMI Analysis Based on Field - Circuit Cooperated Simulation[J]. Fire Control Radar Technology, 2013, 42(3): 82-86.
- [25] 郝建红, 范杰清. 电磁脉冲耦合效应的等效源建模及应用[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(6): 63024.
HAO J H, FAN J Q. Modeling and Application of Equivalent Source of Electromagnetic Pulse Coupling Effects[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(6): 63024.
- [26] 安全内参. 电磁作战管理, 需要实现哪些功能[EB/OL]. (2019-11-07) [2024-05-12]. <https://www.secrss.com/articles/14930>
Safety Internal Reference. EM Combat Management, What Functions Need to be Implemented[EB/OL]. (2019-11-07) [2024-05-12]. <https://www.secrss.com/articles/14930>
- [27] 江潮. 常用雷达波段名称及其频率、波长范围对照与划分[J]. 航天电子对抗, 1985, 1(2): 58-62.
JIANG C. Comparison and Division of Common Radar Band Names and Their Frequency and Wavelength Ranges[J]. Aerospace Electronic Warfare, 1985, 1(2): 58-62.