

地面无人平台电磁兼容及防护技术研究

赵晓凡, 李小健

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 阐述了地面无人平台电磁兼容性的一些关键问题, 介绍了地面无人平台的分类及关键能力。根据系统组成和应用场景, 分类研究了各类设备所处的内外电磁环境, 剖析了其面临的电磁兼容隐患。最后, 从总体设计、频谱规划、测试验证三个方面, 给出了针对地面无人平台电磁兼容工作的具体建议。

关键词: 地面无人平台; 电磁兼容; 电磁干扰; 电磁防护零散

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.05.015

中图分类号: TJ07 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2017)05-0064-05

Electromagnetic Compatibility and Protection Techniques of Ground Unmanned Vehicles

ZHAO Xiao-fan¹, LI Xiao-jian¹

(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: This paper elaborated some key problems on electromagnetic compatibility of ground unmanned platform and introduced classification and key abilities of the ground unmanned platform. Based on system composition and application scenarios, this paper researched internal and external electromagnetic environment of different equipment by classification, and analyzed hidden risks in electromagnetic compatibility it faces. Finally, it proposed specific suggestions on electromagnetic compatibility of ground unmanned platform from overall design, spectrum test and validation test.

KEY WORDS: ground unmanned vehicle; EMC; EMI; scattering of electromagnetic protection

地面无人平台是一种有动力且不需要人员驾驶的地面机动平台, 它可以采用一种或多种控制方式(自主/半自主/遥控方式)工作, 既具有车辆机动性特点, 又包含智能自主性的特点, 同时可以携带各种致命或非致命武器装备。近年来, 随着无人技术的发展, 地面无人平台在许多领域得到了广泛应用^[1-3], 通过地面环境感知系统实时接收来自多种探测传感器的目标特征描述, 以及精密定位系统给出的位置、姿态、运动参数等数据, 并将这些数据传输给计算机处理系统, 进行分析处理及有效融合、决策与规划, 向动力推进系统、搭载的武器系统等输出控制指令, 实现自主机动及自主控制。为了实现该目标, 需要安装大量的传感器和探测器等观瞄系统, 同时其控制系统较有人装备而言, 对安全性、准确性的要求更高。

与此同时, 相较于有人装备, 无人平台的应用场景更加多样, 任务地点涵盖了整个陆基环境, 面临的电磁环境复杂多变^[4]。

在这种状况下, 电磁兼容成为了地面无人平台的一个关键性问题, 直接影响到平台的功能和生存能力, 然而, 目前并不具备成熟的地面无人平台电磁兼容性设计试验方法^[5-7]。复杂的使用环境和精密的感知设备, 使得针对传统装备的电磁兼容设计指标和验证方法不再有效^[8]。同时, 常规的电磁兼容设计方法对于宽频谱、高度数字化的无人平台也不再适用。如何进行防护性能总体设计和测试评价成为了亟待研究的问题。

文中就地面无人平台电磁兼容性的一些关键问题进行了阐述。首先, 介绍地面无人平台的分类及关

键能力。然后根据系统组成和应用场景，分类研究了各类设备所处的内外电磁环境，剖析了其面临的电磁兼容隐患。最后，从总体设计、频谱规划、测试验证三个方面，给出了针对地面无人平台电磁兼容工作的具体建议。

1 地面无人平台发展及共性特点

国外发达国家开展了大量的无人平台系统开发研制工作，并取得大量研究成果。其中以军事应用为目的开发的典型无人平台有 PackBot, SMSS, Avant Guard, Bigdog 等，如图 1 所示。可以执行侦察监视、任务支援、武装警卫、丘陵地形负重行走等众多任务。国内相关的技术开发工作也在紧锣密鼓进行中，有些系统已经达到实用阶段。

分析其实现功能性能的共性特点，各类地面无人平台至少需要具备以下四个方面的基本能力。

1) 环境感知或探测能力：感知平台周围环境，为智能系统提供决策依据。

2) 综合决策能力：依据感知系统得到的环境数据作出决策，并向执行系统下达指令。

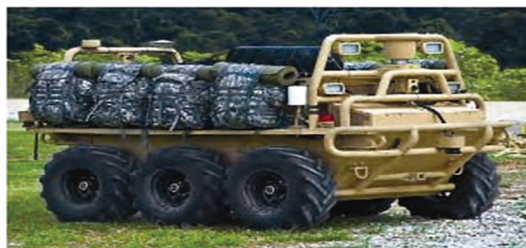
3) 执行能力：执行决策系统、操作控制系统等下达的行动指令。

4) 通信能力：保证地面无人移动平台与操作控制系统信息联络。

上述四方面基本能力的实现采用的技术不仅涉及光、机、电、磁等多学科领域，还涉及感知、导航、动力能源、自动控制、人机交互、计算机、通信等综合集成设计应用技术，这些相关学科和技术领域都与电磁兼容技术密切相关，同时存在大量的电磁干扰问题，无人平台的电磁兼容性能直接影响其功能性能的实现。如何开展电磁兼容和防护设计，并对其进行验证与评价是极为复杂的问题，也是无人平台技术集成设计中的一项关键技术。



a PackBot小型无人平台



b SMSS班组任务支援系统



c AvantGuard轻型无人平台



d Bigdog无人平台

图 1 国外典型地面无人系统

2 无人平台系统组成及电磁干扰特点分析

无人机动平台虽然在结构匹配、传感器配置、功能实现上各不相同，但是在无人驾驶系统组成上有着显著的共同点，都包含环境感知系统（含定位）、运动规划系统、跟踪控制系统、底盘动力系统等子系统，这些共同点构成无人机动平台的基本组成部分^[9]。与有人车辆相比，车辆普遍安装光电、红外探测装置、目标识别系统、无线通信设备、雷达传感器、摄像机、变焦设备、夜视镜等大量光电探测设备和高速网络数

据传输系统，以实现各种功能^[10-11]。就电磁兼容和电磁防护技术而言，由于无人平台各系统凸显对电和电磁波的强烈依赖性，系统电磁兼容问题更加突出。平台采用的混合动力驱动系统、控制决策高速处理系统、光电探测环境感知系统本身都存在电磁干扰控制的难题，更不用说集成到一个有限空间里，电磁干扰的概率大大增加。由于多域环境的使用要求，外部电磁环境对其功能性能的影响也远高于传统的有人平台，解决方案有待进一步探索，需要高度重视。

2.1 环境感知系统的电磁干扰特性

环境感知系统是指通过各种传感器设备的输入

建立无人车辆周围包含二维或三维环境特征的环境模型的系统。其中主要包含以下四类传感器。

1) 全局姿态传感器: 全局姿态传感器的功能是确定平台的全局位置和方向。报告全局姿态消息提供平台的位置和方向。运用适当的传感器测量转动、倾斜和偏航参数, 可以标定车辆方向。

2) 局部姿态传感器: 局部姿态传感器负责计算车辆的局部姿态, 模块启动后定位车辆。局部姿态通常用 x 、 y 、 z 、旋转量、倾斜度和偏航角计算。当该模块使用位移表示的译码器和用流速表示的陀螺仪时, 局部姿态估计的精确度将逐渐降低。特别是干燥路面上使用高摩擦力的轮胎/轮胎面和光纤视觉陀螺仪, 会导致大约 1% 的距离误差。该模块和速率状态模块都要求相同的传感器消息 (陀螺仪、译码器)。

3) 速率状态传感器: 速率状态传感器负责报告平台的瞬时线速度和角速度。该模块和局部姿态模块要求同样的传感器消息 (陀螺仪、译码器)。

4) 视觉感受器: 视觉感受器模块为车辆上的一个或多个摄像头提供通用界面。它可以为所有摄像头类型提供通用界面——串口、线路、USB 等, 还能同时支持多摄像头 (任意维度) 工作。

由于功能需求以上各种传感器模块分布在车身周围, 它的主要作用是建立地面无人机动平台周围的环境模型, 为无人系统的决策、规划和控制提供地图、环境约束和定位信息。这类带窗口和图像功能的传感器灵敏度高、使用频谱宽, 本身就是敏感源, 非常容易受电磁干扰。同时这类探测传感器又是各类数据的前端, 采样数据的可靠性要求高, 目前主要采用成熟的工业级产品。这类传感器的电磁兼容设计和工艺实现都比较困难, 防护能力相对薄弱, 同时又缺乏经验和试验数据, 因此存在较大的电磁干扰风险。

2.2 底盘动力系统电磁环境特性

底盘动力系统采用混合动力或纯电动模式, 其控制系统主要包括底盘综合测控计算机、动力系统控制器及各类功能控制器等。其中动力传动系统采用高功率电机、大功率和脉宽调制技术的控制器, 采用约 390~400 V 直流高压供电, 具有功率大、瞬态变化快等类型的电磁干扰特性。与以往有人车辆底盘安装相比, 内部空间更加狭小, 安装密集度更高, 平台内的供电特性、接地特性、安装方式、匹配设计都有自身的特点, 而且集中了不同类别的电子电气设备, 各种大功率设备、敏感设备与控制终端紧密排列, 使系统内电磁环境更加复杂。这一复杂系统既包含使用强电的各种大功率、大电流电力电子设备, 又包含小功率、小电流微电子器件构成的控制设备以及产生微弱信号的各种传感器。系统内部的大功率高频开关电源、高功率密度轮毂电机、大功率脉宽调制信号等都是容

易产生电磁辐射的系统, 产生的强烈电磁噪声将对控制器等弱电设备的正常工作和周围环境产生严重的干扰。主要包括以下几种影响较为严重的电磁干扰特性: 混合动力系统及高压供电系统电磁兼容特性; 大功率脉宽调制技术产生的电磁干扰特性; 电源变换器 DC/DC 产生的电磁干扰特性。

平台系统内共地安装的大量传感器、探测器、计算机、控制器、通信类负载均属于低电压、小电流的弱电设备, 与系统中的强电高压设备之间通过电源线、信号线互连, 机电复合传动、启动/发电一体机、电源变换器等工作时产生的强烈的电磁噪声将通过导线传导或电磁辐射构成干扰。干扰幅值高、覆盖频段包括大部分电子设备工作频段, 干扰信号频率容易被电子设备响应, 对智能控制单元和接口器件、传感器、通讯串口、电磁阀和继电器等造成干扰。产生的谐波可能引起电子控制系统的逻辑错误, 甚至导致部分敏感器件或固体组件的损坏。

2.3 侦察打击任务载荷系统的外部电磁环境适应性

侦察打击任务载荷系统, 其特点是安装在平台外部, 主要的侦察攻击设备都暴露在车体外部, 直接面临复杂的电磁环境。其功能具备环境侦察、监视和一定的目标打击能力。主要包括侦察系统、武器系统和任务载荷控制系统等部分。侦察系统用来对任务环境实施监视观察并搜索打击目标; 武器系统用来对目标进行瞄准、跟踪和打击; 任务载荷控制系统负责对侦察系统和武器系统进行控制, 并与其他设备进行数据通信。如何在复杂环境中保证上述各类设备的正常工作, 特别是保证侦察感知系统、高速数据台的正常工作成为该平台电磁兼容工作的重点及难点。

3 无人平台电磁兼容工作要点

地面无人平台系统本身就处于一个极端复杂的电磁环境中, 不仅有自身产生的电磁特性, 还将对周围外界环境非常敏感。平台长期处在复杂的电磁辐射环境中, 会增加种种不稳定的因素。其一就是对电子器件的影响, 可能使其老化或失效。射频激励信号还可能诱发设备的潜通路, 从而使感知等系统误操作。同时地面无人平台技术超前, 集成度和技术含量高, 还有大量新出现的电磁干扰问题需要探索和研究, 分析研究并评估各种电磁环境及对平台功能使命的影响, 并采取措施加以控制, 可以避免或减少上述现象的发生。

3.1 电磁兼容总体设计技术

大量的感知、探测传感器、天线等的布局由于车

体物理尺寸限值,可能无法达到理想的布局设计,或者系统工作时进行电磁兼容设计的结果可能与功能兼容性要求出现偏差,都有可能会导致系统功能降低,应该通过试验验证给出合理的指标体系。总体设计规划对无人平台来说非常重要,重点应该开展以下几方面的研究工作。

1) 顶层设计:结合任务使用需求,从顶层设计高度出发,进行全系统设计规划,提出综合设计方案。

2) 指标分配:采取量化预测设计手段,开展动态指标分配研究,建立分配机制,合理分配设计指标。针对强电磁防护的设计应该建立三级的防护体系,使其更有针对性。

3) 布局设计:天线、车载设备、电缆敷设、屏蔽设计、优化总体布局,空间、时间、频率隔离 V/UHF 频段的自适应干扰抵消技术等。

4) 信息安全防护设计:为了保证严酷电磁环境中信息传输性能,需要从三个方面进行设计。首先采用错误检测和校准机制的优化通信协议;其次采用平衡(而不是单边)发射和接收信号;第三建立过载保护机制。系统内通信方式采用红外、激光或点对点的微波信号,加大频谱使用间隔,减少谐波干扰。传输线缆采用光纤而不是传统的铜线电缆。

3.2 对于有意和无意辐射的频率使用规划

就地面无人平台感知系统而言,它将涉及射频资源总体规划、频谱共用与复用、射频综合探测、综合宽带射频网络、分布式超宽带有源阵列天线、毫米波宽带收发组件、宽带射频并行多通道接收与发射等先进技术,本身内部电磁环境复杂,它既是干扰源也是敏感源。因此无人平台感知系统总体设计需要对各类传感器集成和射频传感器等关键设备进行电磁兼容建模仿真^[12],利用仿真模拟特定电磁环境,合理规划选用频率。通过多方案比较,并且获取各种潜在电磁干扰的计算结果,从而判断干扰源发射的电磁能量是否影响敏感设备,系统能否兼容工作,这样不仅可以及早发现设计中的薄弱环节,也便于对系统总体布局方案和电磁兼容设计进行评估分析和量化改进^[13-15]。重点开展以下几方面的研究。

1) 电磁仿真计算:建立数字化电子样机开展电磁环境仿真,结合发射功率、发射机带外衰减、接收机灵敏度、接收机带外抑制等指标、电磁频谱分析。

2) 天线性能试验:方向图仿真及试验验证。

3) 关键设备影响分析:屏蔽效能、电缆布局、分系统设备降级状况、分系统设备安全性等因素、无线电设备影响。

4) 电磁防护设计:结合外部射频电磁辐射数据与平台屏蔽效能测试结果对车载安全类设备开展电磁兼容性防护技术分析、设计。

5) 全车射频参数规划:谐波、宽带噪声、接收机参数、天线参数、电子设备晶振参数等。

3.3 电磁环境适应性试验与评价方法研究

相较传统装备,地面无人平台拥有更为精密的感知系统,更为紧凑的布局布线,面临更为复杂的使用环境。传统的电磁兼容试验评价方法不再适用。要想有效地评价无人平台的电磁兼容性,需要在明确定义背景环境和威胁环境的前提下,结合系统特点分析干扰耦合机理,提出针对性的指标,建立可行的试验评价方法^[13]。具体内容如下。

1) 定义无人平台的背景环境和威胁环境。首先应该开展地面装备面临的背景环境和威胁环境分析,设置专门专题(课题)进行研究。准确给出干扰类型、干扰样式、干扰量级及响应机理,准确定义背景环境和威胁环境,提出采购、设计双方认可的环境定义和考核项目及设施方法,逐步开展试验考核:哪些是必须考核的环境;哪些要求适用于当前受试的平台;在几种确认的测试方法中选取特定的测试方法;选择适合的符合性等级和极限值(设计是否已经考虑,破坏性多高);合适的操作模式以测试对照或证实其符合性。

2) 分析确定无人平台主要受威胁的系统和作用机理。对于无人平台来说,重点分析感知、决策、动力及通信系统,摸清目前的设计情况、敏感度阈值、已经通过的试验项目等。通过高性能的频谱监测设备,捕获常态及瞬态干扰信号,监测频率捷变信号和宽带信号,采集电磁环境数据,包括雷达信号环境、通信信号环境、光电信号环境等描述参数。采用功能强大的处理软件和信号模拟系统,通过实时频谱、时频特性等多频谱电磁特征提取技术,借助行之有效的分析控制策略,自适应地进行复杂电磁环境的数据采集提取,实现窄带数字信号的解调、信号调制特性的识别等功能。针对感知系统,探索电磁环境对其的作用规律,确定干扰、损伤机理,建立设备电磁耦合模型,电子元器件、部件及系统的电磁损伤模型,探索电磁防护设计的新方法、新技术,为系统电磁兼容分析预测技术、优化设计技术和防护加固技术奠定基础^[14]。

3) 指标剪裁及评估方法。借鉴以往项目的经验进行理论分析和研究,在实际使用中总结经验来对选用测试项目的适用范围、频率范围、极限值进行剪裁,从而制订出适合该平台情况的无人平台电磁兼容指标要求。由于一些通用的标准并不是针对该无人平台的专用电磁兼容测试标准,因此在实际测试中有些指标很难达标,有些指标需要加强。为制定有针对性的指标要求,这就需要找出标准中各项测试的理论依据,然后再针对无人平台的实际情况进行合理的剪裁,以减少不必要的开支。

4 结论

地面无人平台对电磁频谱的依赖性很强,无论从管理方面还是设计方面都高度重视电磁兼容保障性工作。从技术储备来说,在无人平台这类项目中,电磁兼容设计及防护技术还是空白。电磁兼容设计和控制本身是系统工程,特别是在该系统缺乏防护设计和试验经验数据的情况下,探索试验项目和试验方法,对强电磁干扰不同等级的划分及量级的选择凸显重要。系统的防护设计原则上只能根据系统关重性,按照设备的功能在系统中的重要性进行加权。从行业角度来说,在自动化、信息化、数字化程度较高,感知控制要求高的产品经验还很欠缺,需要在实践中通过定量的和定性的分析,不断摸索经验,以系统最终在规定的电磁环境中正常工作为目标,采取各种措施使得地面无人平台能够在系统内和系统外都有良好的电磁兼容和防护性能。

参考文献:

- [1] BLASCH E P, LAKHOTIA A, SEETHARAMAN G. Unmanned Vehicles Come of Age: The DARPA Grand Challenge[J]. *Computer*, 2006, 39(12): 26—29.
- [2] 孟红, 朱森. 地面无人系统的发展及未来趋势[J]. *兵工学报*, 2014, 35(增刊): 38—44.
- [3] LIU Xin, DAI Bin. The Latest Status and Development Trends of Military Unmanned Ground Vehicles[C]// *Proceedings of Chinese Automation Congress*. Changsha, Hunan: IEEE, 2013: 533—537.
- [4] 刘尚合, 武占成, 张希军. 电磁环境效应及其发展趋势[J]. *国防科技*, 2008(1): 1—6.
- [5] GJB 1389A—2005, 系统电磁兼容性要求[S].
- [6] MIL-STD-464A-2002, Electromagnetic Environmental Effects Requirement for Systems[S].
- [7] Ministry of Defence Standard 59-411-2007, Electromagnetic Compatibility[S].
- [8] THOMAS D, JAMES A. *Artificial Intelligence: Theory and Practice*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004.
- [9] WENDORFF W V. Communication is the Base of Tomorrow's Highly Reliable Automobile Electronics. *SAE Transaction Journals of Passenger Cars: Electronic-Electric System*, 2002(1): 336—341.
- [10] RUSSELL M E. Integrated Automotive Sensors[J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 223—229.
- [11] GOONERATNE C P, MUKHOPAHYAY S C, GUPTA G S, et al. A Review of Sensing Technologies for Landmine Detection: Unmanned Vehicle Based Approach[C]// *2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents*. Palmerston North, New Zealand, 2004: 13—15.
- [12] TALUKDER A, MANDUCHI R, CASTANO R, et al. Autonomous Terrain Characterisation and Modelling for Dynamic Control of Unmanned Vehicles[C]// *Ieee/Rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2002: 708—713.
- [13] CRAIGHEAD J, MURPHY R, BURKE J, et al. A Survey of Commercial & Open Source Unmanned Vehicle Simulators[C]// *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. 2007: 852—857.
- [14] HOW J P, BETHKE B, FRANK A, et al. Real-time Indoor Autonomous Vehicle Test environment: A Testbed for the Rapid Prototyping of Unmanned Vehicle Technologies[J]. *Control Systems IEEE*, 2008, 28(2): 51—64.
- [15] NY J L. Performance Optimization for Unmanned vehicle Systems[J]. *Massachusetts Institute of Technology*, 2008, 43: 149—157.