

面向应急通信车的多学科综合设计优化技术研究

邓伟华, 张国华, 陈维通, 武 明

(中国电子科技集团公司第三十研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 应急通信车的设计涉及结构学、材料学、力学、热学、光学、声学、电磁学、综合布线等多个学科领域。计算机辅助设计 (Computer Aided Drafting, CAD)、计算机辅助工程分析 (Computer Aided Engineering, CAE) 等现代化设计技术的不断发展, 给应急通信车多学科综合优化设计带来了新的契机。为适应应急通信车集成技术发展的新形势, 提高应急通信车的整体性能和环境适应能力, 引入综合优化设计方法, 得到应急通信车整体设计最优解, 规避装备研制的可能缺陷和风险, 缩短装备设计周期, 并最大化提高产品整体性能和产品质量。基于 CAD、CAE 设计软件进行可视化建模, 通过力学、热学、电磁兼容仿真和数字化布线虚拟等多学科优化设计与分析, 进一步提升应急通信车的装备研制能力, 实现应急通信车的快速设计并一次成功。

关键词: 应急通信车; 多学科综合设计优化; CAD; CAE; 数字模型

Research on multidisciplinary comprehensive design optimization of emergency communication vehicle

DENG Weihua, ZHANG Guohua, CHEN Weitong, WU Ming

(No.30 Institute of CETC, Chengdu 610041, China)

Abstract: The design of emergency communication vehicle involves to Multiple disciplines such as structural engineering, materials science, mechanics, thermodynamics, acoustics, electromagnetics, and comprehensive cabling. The continuous development of modern design technologies such as Computer Aided Drafting(CAD) and Computer Aided Engineering(CAE) has brought new opportunities for optimization design of emergency communication vehicle. In order to adapt to the new situation of integrated technology development for emergency communication vehicle, improve the overall performance and environmental adaptability of emergency communication vehicle, and inrodece comprehensive optimization design methods, the optimal solution for the overall design of emergency communication vehicle can be obtained, avoiding defects and risks in equipment development, shortening the development cycle, ande maximizing the overall performance an product quality of the product.Based on CAD and CAE design tools for visual modeling,through multidisciplinary optimization design and analysis such as mechanics, thermodynamics, electromagnetics, and digital wiring virtualization, the development of emergency communication vehicle is further improved, acheieving rapid design and one-time success.

Keywords: emergency communication vehicle; MDO; CAD; CAE; digital model

0 引言

近年来,全球气候变化、人为工程活动以及社会矛盾和治安风险相互交织,导致各类应急突发事件频发。应急通信系统作为国家战略层的保障系统,受到业界普遍关注和探讨,在应急通信手段、装备、技术及应用各个层面均有不同程度的创新与发展。

应急通信车作为应急通信系统的重要组成部分,其功能性能指标和质量、适用性、经济性越来越受到重视。应急通信车是一种复杂的车载系统产品,涉及平台系统、业务系统、通信系统、安全防护系统、综合保障系统等多个分系统,并关联人机工程、机动性、通过性、运输性、环境适应性、电磁兼容性、可靠性、维修性等多方面能力,其设计难度大,技术涉及面广,是一门多学科综合性复杂系统工程。

传统的工程优化设计技术一般通过事后测试评估发现装备设计中的缺陷和不足,然后基于测试结果和专家经验进行设计优化。该技术发展模式存在设计周期长、各设计环节相互独立、设计易反复等问题,导致工程设计经费投入大、研制周期长、质量不可控。

随着科技不断进步,用户对装备产品的要求不再局限于简单的功能实现,而是在功能、性能、外观、工效等各个方面都提出了更高要求,特别是对降低设计成本、缩短研制周期和提高装备质量的工程化实现提出了殷切期望。

应急通信车作为典型的多学科耦合复杂系统,其涉及的学科相互制约,且学科间耦合关系复杂。设计生产需依托多学科综合的科学化、高效化模式及手段,协调各子学科和分系统之间的关系,获得最优化设计的方法论。应急通信车研制单位需要围绕装备的高质量、低成本、短研制周期进行产品的技术和管理开发,引入数字化综合设计与制造技术,进行装备的多学科优化,以期达到系统设计理论最优解,降低工程设计在投入、质量和周期方面的风险。

本文从应急通信车的概念、多学科特点与

多学科综合优化理论出发,充分借鉴国内外多学科的新观念、新理论、新技术、新方法和新成果,开展应急通信车多学科综合优化建模、仿真和迭代优化设计,寻求基于工程工具的多学科优化设计方法,获得应急通信车各个设计环节的理论最优解,为应急通信车工程化实现提供设计参考。

1 应急通信车概念与多学科特点

1.1 应急通信车概念

应急通信车作为应急通信系统的重要组成部分,是前出到事件现场开展应急通信指挥的主要平台,在国家应急和军队非战争作战系统中愈发凸显重要作用,其技术进步对国民经济发展和群体生命保障起到了关键支撑作用。

在重大事件发生后,应急通信车能够迅速赶赴应急任务现场,搭建现场通信指挥节点,与后方应急指挥中心建立通信指挥通道,提供语音、数据、视频等多样化综合业务保障,为后方应急指挥中心有效作出指挥决策提供保证。

应急通信车以高机动越野底盘载车平台为基础,集成供配电系统和环境辅助系统,搭建承载平台;综合集成通信保障系统、应用服务支撑系统和应用业务系统等任务载荷^[1]。典型的应急通信车集成架构如图1所示。

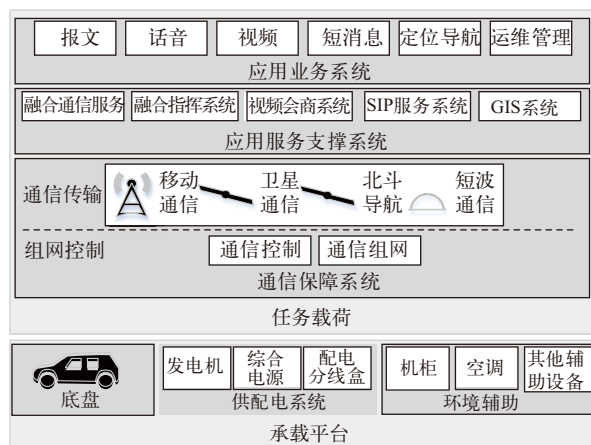


图1 典型的应急通信车集成架构

Fig. 1 The typical emergency communications vehicle integrated architecture

1.2 应急通信车多学科特点

应急通信车应用场景和环境复杂，经常面临复杂结构应力场、电磁场、温度场、生物场和化学场的考验，其承载平台和任务载荷的多学科属性，体现在几何学、结构学、材料学、力学、热学、电磁学和综合布线技术等多个学科领域。

(1) 承载平台多学科特点

承载平台作为应急通信车的动力、供电和环境核心，涉及力、热、电、光、声等多个自然科学，还涉及结构、材料、工艺、装配、环境适应性等多个技术学科。

(2) 任务载荷多学科特点

任务载荷作为应急通信车的业务保障核心，涉及应用业务、通信组网、通信控制等专业学科，以及电磁兼容、防辐射、数据处理、通信约束、任务分析、总体能力、应用效能等技术学科。

2 多学科综合优化设计方法综述

多学科设计优化 (Multidisciplinary Design Optimization, MDO) 是一种通过充分探索和利用系统内相互作用的协同机制来设计复杂系统及其子系统的方法，是对涉及多个学科的复杂问题解决方法的统称，本质是一种优化策略，而不是具体的算法。多学科综合优化设计最初源于航空航天领域，主要应用于飞行器以及机械结构设计，凭借在大规模复杂工程系统设计中的高效性，受到各国学者和工程师的重视和青睐，随后逐渐扩展到船舶、汽车等工业领域^[2]。

MDO方法自诞生后，历经30多年发展，受到国内外机构和学者关注，并取得一定成果。世界各国研究机构的成立和对MDO方法的讨论大大推动了其发展，也促进了MDO在工程上的应用^[3]。代表机构和贡献见表1。

我国对MDO的研究起步较晚，研究内容单一，实际工程应用有限。近年来，MDO逐渐获

得政府、研究机构以及高校等学术界的重视，科研机构和高校都投入了大量资源，开展MDO方法的理论和应用研究，也取得了一定成效。比如，文献[4]对液压支架进行研究，搭建其MDO平台，利用Pro/E和ANSYS软件的接口技术，搭建动力学和静力学两个学科的优化设计平台，最后对液压支架进行多学科设计优化。文献[5]对分时分动器进行研究，基于设计变量和尺寸约束分析力学性能和目标函数，借助ISIGHT软件进行分动器目标函数仿真和迭代计算，通过236次迭代计算和目标函数收敛，实现了分动器优化设计，并趋于最优解，验证了MDO方法的可行性。

表 1 MDO 研究机构及其贡献

Tab. 1 The multi-disciplinary design optimization research institute and its contributions

机构名称	主要内容	成果及领域
AIAA	撰写 MDO 白皮书，组织国际会议	分别于 1991 和 1998 发布 MDO 白皮书
NASA	发展 MDO 方法，推动 MDO 技术	火星探路者及卫星概念设计等
Stanford	MDO 基础理论与应用研究	CO 法、飞机设计
SRI, RAS	增加优化算法的稳定性	航空航天领域
Europe	开发 MDO 分布式计算引擎	飞机设计
NUAA	展开 MDO 优化算法研究	飞行器设计
NUDT	分布式协同优化	飞行器设计
NWPU	面向 MDO 的系统总体设计	飞行器、鱼雷设计
UESTC	MDO 基础理论与应用研究	基于可靠性的多学科研究

这些研究机构的成立和对MDO方法的讨论大大推动了MDO的发展，也促进了MDO在工程上的应用。

3 应急通信车设计流程和方法

3.1 设计流程

应急通信车MDO主要围绕应急通信车任务

场景分析、总体能力分析、系统体系设计和系统模型设计等开展分析设计,通过模型仿真分析和综合优化设计方法,对系统力学、热学、声学、布线和电磁设计进行建模分析和模态分析等耦合优化迭代,使系统设计趋于最优。应急通信车MDO流程如图2所示。

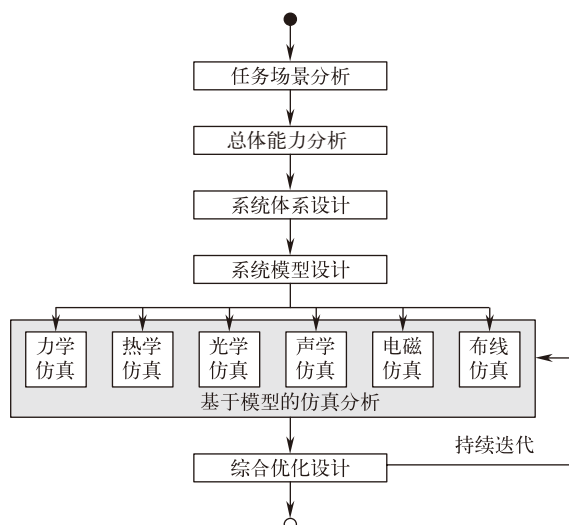


图2 应急通信车 MDO 流程

Fig. 2 The MDO process for emergency communication vehicles

3.2 任务场景分析

应急通信车的任务场景主要面向抢险救援和公共突发事件的处置,具备平台快速出动、通信通联顺畅、业务处理快速的应用特点,且与应急指挥大厅一体联动处置应急事件,具备平台保障与通信保障能力,以及指令指挥、视频指挥、语音指挥等综合业务能力^[6]。应急通信车任务场景如图3所示。

3.3 总体能力分析

应急通信车总体能力需基于任务场景、任务样式、任务环境和保障对象等,面向基本任务过程和活动、任务特性和规则、通联关系对象等进行分析,重点突出时域要素、空域要素、效率要素、韧性要素、本征要素和谱系要素,明确系统机动保障能力和信息力,包括全域机动能力、多业务能力、业务支撑服务能力、泛在化通信保障能力和全域环境适应能力。应急通信车总体能力

分析模型如图4所示。

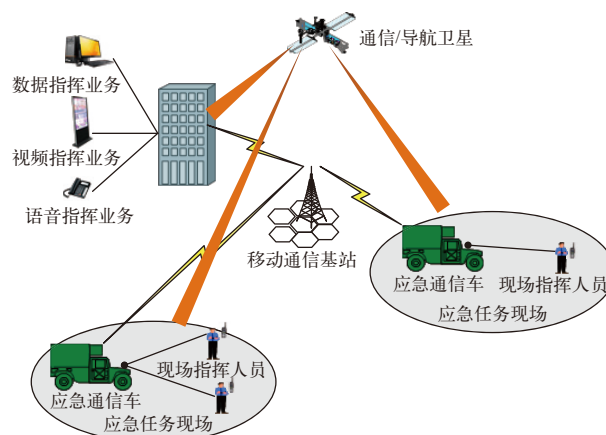


图3 应急通信车任务场景示意图

Fig. 3 Schematic diagram of emergency communication vehicle

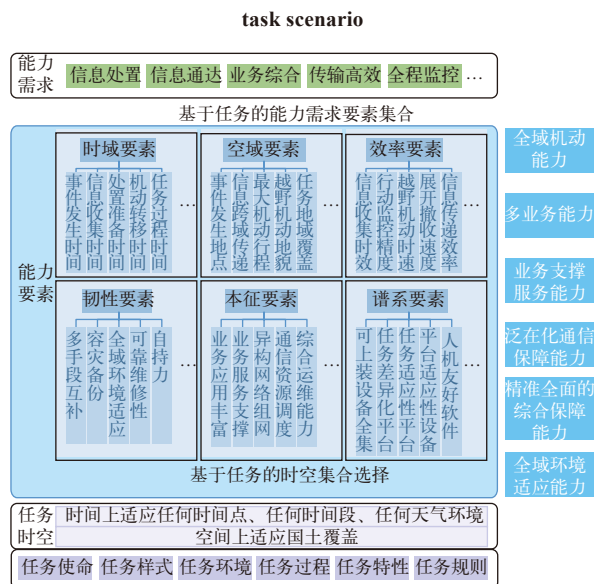


图4 应急通信车总体能力分析模型

Fig. 4 The overall capability analysis model for emergency communication vehicles

3.4 系统体系设计

应急通信车应充分考虑任务应用需求,在应急通信体系整体技术框架下开展功能体系设计。应急通信车以数据、视频、语音业务为核心,以通信传输、组网控制为辅助,以导航定位、运维管理为补充,以承载底盘上装的供电系统、机架机柜为平台,设计形成以承载底盘、综合保障、通信保障、应用业务、运维管理等为主体的系统体系^[7]。应急通信车系统体系如图5所示。

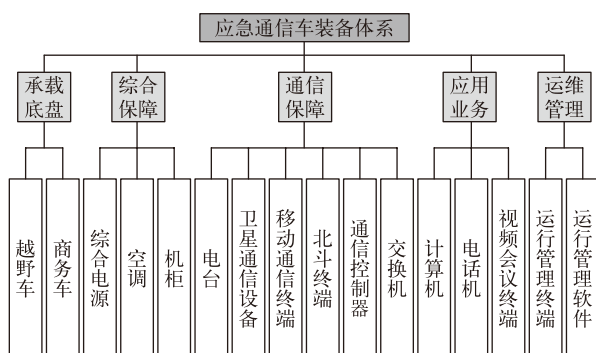


图5 应急通信车系统体系

Fig. 5 The emergency communication vehicle system architecture

3.5 系统模型设计

应急通信车模型按照承载平台和上装设备进行集成设计，设计内容包括整车平台建模和上装设备建模，利用专业结构建模工具UG、Pro/E^[8]，先对整车载具进行轻量化建模，再对平台改装与加装部分进行详细化建模，同时对上装设备进行不同颗粒度的建模，以兼顾复杂系统的轻量化显示与个体装备的准确建模，并适应不同层级的模型迭代优化。应急通信车数字模型如图6所示，上装设备数字模型如图7所示。



图6 应急通信车数字模型示意图

Fig. 6 The schematic diagram of digital model for emergency communication vehicle

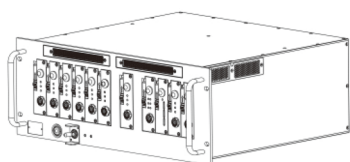


图7 上装设备数字模型示意图

Fig. 7 The schematic diagram of digital model for installing equipment

4 基于模型仿真分析的综合设计优化

4.1 力学模型与设计优化

(1) 刚体力学仿真与设计优化

应急通信车在不同路面等级行驶时，车内设备会承受相应的振动和冲击，上装设备和辅件需开展减振设计。利用有限元力学仿真工具软件ANSYS、Ls-Dyna，对承载平台与上装装备，特别是敏感设备进行有限元模型处理，依照振动、冲击与碰撞标准进行动力学仿真分析，定量评估设备应力水平与变形程度，进而对车辆和上装设备抗冲振设计进行优化，直至满足各种路面振动和冲击要求。

(2) 流体力学仿真与设计优化

为保证整车在极端大风天气情况下的工作能力，需要车体抗倾覆与天线抗弯折模拟。借助流体力学与结构力学模拟工具Fluent、mechanical进行耦合式仿真模拟，计算流体力学仿真工具进行流固耦合模拟，定量分析车体迎风面的风压与倾覆力矩，以及天线的风压与弯折形变，依照车体的重心与天线强度数据判断整车的抗风性能。

4.2 热学仿真与设计优化

为实现整车与系统装备在极端温度环境下的工作能力，需要对车内环控系统性能进行模拟，定量分析设备工作温度环境和操作人员人体舒适度情况。利用有限元散热环控仿真软件6sigmaDC、Icepak，开展涵盖装备、人员、空调、太阳辐照等影响因素在内的制冷与制热环控模拟，判断整车保温层、空调选型、热源布局等的设计合理性。应急通信车热学仿真模型如图8所示。

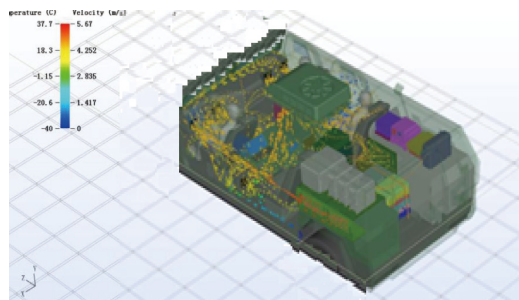


图8 应急通信车热学仿真模型示意图

Fig. 8 The schematic diagram of thermal simulation model for emergency communication vehicle

4.3 声学仿真与设计优化

整车在加装系统装备后会增加车内噪声量级,需要对噪声声压级、声强级进行量化评估,并依照噪声在频域的分布特性进行有针对性的降噪设计。利用声学边界元与有限元分析工具PERA SIM AcousticBEM,对车辆内部空间进行空间模型简化处理,开展操作工位、噪声源、声阻抗物的建模与声振动模拟,合理规划隔声降噪措施与噪声源布局。应急通信车声学仿真模型如图9所示。

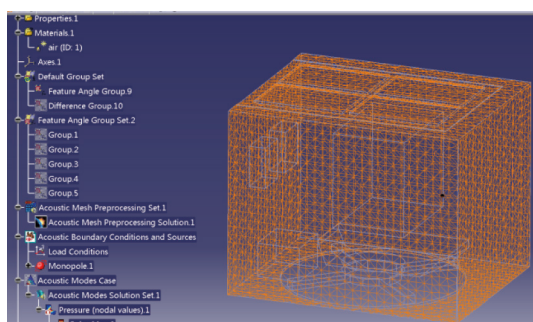


图9 应急通信车声学仿真模型示意图

Fig. 9 The schematic diagram of acoustic simulation model for emergency communication vehicle

4.4 光学仿真与设计优化

车内操作位具有良好的光照度,是应急通信车开展业务的重要保障之一。采用专业照度仿真软件Dialux,可进行整车照明仿真计算,实现整车照度仿真三维效果模拟。根据光照度指标要求和工作区席位分布,通过数字化仿真设计合理的照明布局 and 光照度。应急通信车光学仿真模型如图10所示。

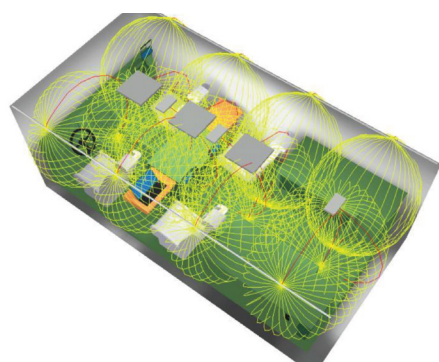


图10 应急通信车光学仿真模型示意图

Fig. 10 The schematic diagram of optical simulation model for emergency communication vehicle

4.5 电磁仿真与设计优化

为解决车载设备间的电磁兼容性、天线间耦合度、整车辐射危害性评估等问题,需要借助专业的电磁兼容分析工具进行仿真评估,利用电磁兼容时域与频域方法的仿真工具HFSS、CST,导入整车结构模型,配合使用天线极化方向图,进行设备级的屏蔽效能模拟,优化整车天线布局位置,实现耦合度与失真度最小化。应急通信车电磁学仿真模型如图11所示。

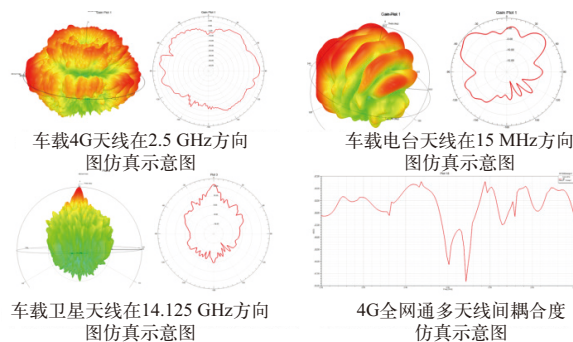


图11 应急通信车电磁学仿真模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram of electromagnetic simulation model for emergency communication vehicle

4.6 布线仿真与设计优化

利用电气互联设计工具进行整车线缆布局与优化设计。为解决车内线路改造与系统装备之间电气互联设计的准确性与合理性问题,采用专业的三维布线设计工具UG进行数字化空间三维布线设计,实现线缆点到点的精确规划,将线缆长度、预埋绑扎、信号类型进行量化整理与直观展示。应急通信车综合布线模型如图12所示。

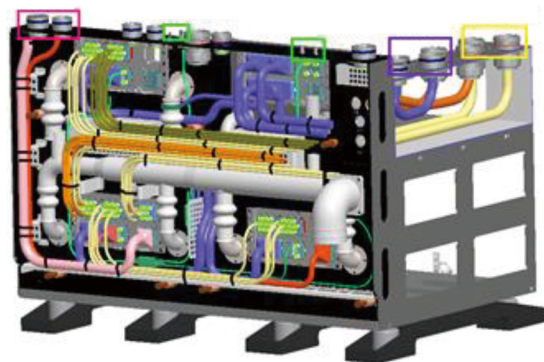


图12 应急通信车综合布线模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of comprehensive wiring model for emergency communication vehicle

5 效能分析

(1) 通信保障能力

通过电磁与布线仿真优化设计，应急通信车各通信手段互扰能力减少，通信效率明显提高。4G同频共址多天线之间的耦合度最大值分别为-26.67 dB、-26.24 dB和-25.42 dB，均小于判定值-25 dB。125 W短波通信距离实测值495 km，业务测试20次，接通率95%；超短波在中等起伏地区实测值15 km，业务测试20次，接通率100%；卫通带宽2.4 Mbit/s，初始入网测试20次，成功率100%；3路4G全网通业务测试20次，接通率100%。

(2) 环境控制能力

通过热学、声学、光学仿真与优化设计，应急通信车环境控制能力更优，结果均优于GJB 219B—2005设计要求^[11]。环控制冷过程中，人体体表周围风速均值约为0.31 m/s；环控制热过程中，人体体表周围风速均值约为0.21 m/s，均远优于<0.5m/s的设计要求。行车状态下，车内操作位噪声最大值70.4 dB (A)，优于<75 dB (A)的标准；驻车状态下，车内操作位噪声最大值为61.3 dB (A)，均优于<65 dB (A)的设计要求。车内3处工作区最大照度分别为656 lx、634 lx、637 lx，整车工作面的平均照度为187 lx，操作席位处的平均照度为332 lx，优于≥100 lx的设计要求。

(3) 平台机动与稳定性

通过力学仿真与优化设计，应急通信车具备更完善的全时域机动能力，可适应城市、平原、山地、沟壑、高原、戈壁、沙漠等全地形环境，以及公路、山路、越野等全路面环境，并满足机动性、地形适应性及抗风性能要求。

6 结束语

本文以应急通信车这一多学科复杂系统为对象，基于UG、Pro/E、Icepak、Mechanical、Dialux等CAD和CAE设计仿真工具，对应急通信车设计所涉及的力学、热学、光学、声学、电磁学和综合布线开展仿真分析，完整实践了基于

模型、数字化仿真的系统工程综合设计与迭代优化，使应急通信车工程设计趋于最优解。相关模型的构建和仿真结果，不仅助力应急通信车设计落地，还为后续基于模型数据的数字工艺生产和管理提供支撑，也有助于装备数字化转型发展阶段的谱系发展积累经验，为后续装备设计、生产、交付过程基于模型的系统工程方法研究奠定经验和数据基础。

参考文献

- [1] 唐勇, 张国华, 邓伟华, 等. 基于分层分域理论的应急通信车环境适应性设计方法[J]. 环境技术, 2023, 41(7): 28-33.
- [2] 龙腾, 刘建, 孟令涛, 等. 多学科设计优化技术发展及在航空航天领域的应用[J]. 航空制造技术, 2016, 498(3): 24-33.
- [3] 张遂川. 压气机叶片的多学科设计优化[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [4] 李庆国. 液压支架多学科设计优化平台研究与实现[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
- [5] 朱勋龙, 郑泉, 陈黎卿. 基于多学科设计优化方法的分动器优化设计[J]. 机械设计, 2018, 35(3): 92-96.
- [6] 胡金锁, 张迎, 冷伟峰, 等. 面向5G的多任务场景军事应用研究[J]. 通信技术, 2020, 53(8): 1934-1942.
- [7] 武明, 迟浩洋, 李长隆, 等. FTA在应急通信车网络故障诊断系统的应用[J]. 通信技术, 2024, 57(1): 104-110.
- [8] 王崑声, 袁建华, 陈红涛, 等. 国外基于模型的系统工程方法研究与实践[J]. 中国航天, 2012, 11: 52-57.

作者简介

邓伟华(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为通信系统设计与开发。

(收稿日期: 2024-12-21)