

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005089

大型非周期相控阵天线协同设计*

方红梅¹ 宋志国¹ 谢永鹏¹ 刘明罡^{1,2}

(1. 南京电子技术研究所 南京 210039; 2. 天线与微波技术国防重点实验室 南京 210039)

摘要: 针对大型非周期相控阵天线的特点,提出一种多学科、多领域协同设计的方法。然后运用该方法指导两个产品天线设计,围绕协同设计的典型流程和几个关键控制点展开论述。在测试阶段实测天线的主要指标,天线1辐射端面平面度 ≤ 1.4 mm,栅瓣电平 ≤ -20 dB,天线2辐射端面平面度 ≤ 1.1 mm,栅瓣电平 ≤ -18 dB,实测数据与仿真结果吻合,各项指标优于设计输入要求,使用性能良好,验证协同设计方法的有效性。最后指明大型非周期相控阵天线协同设计的进一步研究方向。

关键词: 相控阵天线;非周期;协同设计;关键控制点

中图分类号: TN82 文献标识码: B 国家标准学科分类代码: 510.99

Collaborative design on large aperiodic array antenna

Fang Hongmei¹ Song Zhiguo¹ Xie Yongpeng¹ Liu Minggang^{1,2}

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China;

2. National Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: A multi-disciplinary and multi-domain collaborative design method of large-scale aperiodic phased array antenna is expounded, according to its characteristics. Then, the collaborative design about two antennas is carried out, focused on the typical process of collaborative design and several key control points. In the testing stage, the main indexes of the antenna are measured, the flatness of the radiating end face of antenna 1 is ≤ 1.4 mm, the grating lobe level is ≤ -20 dB, the flatness of the radiating end face of antenna 2 is ≤ 1.1 mm, and the grating lobe level is ≤ -18 dB. The measured data are in good agreement with the simulation results, and all the indexes are better than the design input requirements, which proves the effectiveness of the collaborative design method. Finally, the research direction in the future about large aperiodic array antenna is designated.

Keywords: phased-array antenna; aperiodic; collaborative design; key control point(KCP)

0 引言

随着军事技术的不断进步,各种体制的雷达在不同的军事领域应用越来越广泛。近年来,大型非周期相控阵雷达逐渐成为军事领域的重要组成部分,并越来越为业内人士熟知。2000年9月,美国的GBR-P雷达在南太平洋的夸加林导弹靶场成功地进行了洲际弹道导弹(ICBM)目标的试验,该雷达作用距离2000 km,总重量约500 t,天线口径近13 m^[1];2007年,美国组装完成SBX海基巨型反导雷达,雷达作用距离达到4800 km,总重量约2000 t,天线阵面口径近22 m^[2]。

天线阵面是有源相控阵雷达系统中集成度和复杂度最高的子系统,对雷达系统的威力、平台适应性、可靠性等重

要属性以及性能提升起到了决定性的作用^[3]。目前,有关天线阵面协同设计已有很多相关研究,如某片式T/R组件开展热、电磁多学科建模及仿真设计;某星载SAR天线开展结构场、电磁场、温度场协同设计;某波导裂缝天线协同应用MATLAB和HFSS软件实现波导裂缝天线精确建模^[4-6]。

上述研究往往集中在天线阵面的某一个功能元件、某一个技术点,或某一种技术手段,而针对整个天线阵面的协同设计没有系统性和全面性的研究。大型非周期相控阵天线具有口径规模大、精度要求高、非周期布局等典型特征。本文针对该类天线的典型特征,提出大型非周期相控阵天线阵面协同设计,建立典型设计流程,随后运用该流程指导两个天线设计,并在测试阶段通过各种测试手段

收稿日期:2020-09-15

* 基金项目:国家自然科学基金(51490664)项目资助

实测主要指标,验证协同设计方法的有效性,为大型非周期相控阵天线阵面的工程实施提供了一种有效的指导方法。

1 大型非周期天线典型设计流程

大型非周期相控阵天线典型设计流程如图 1 所示。

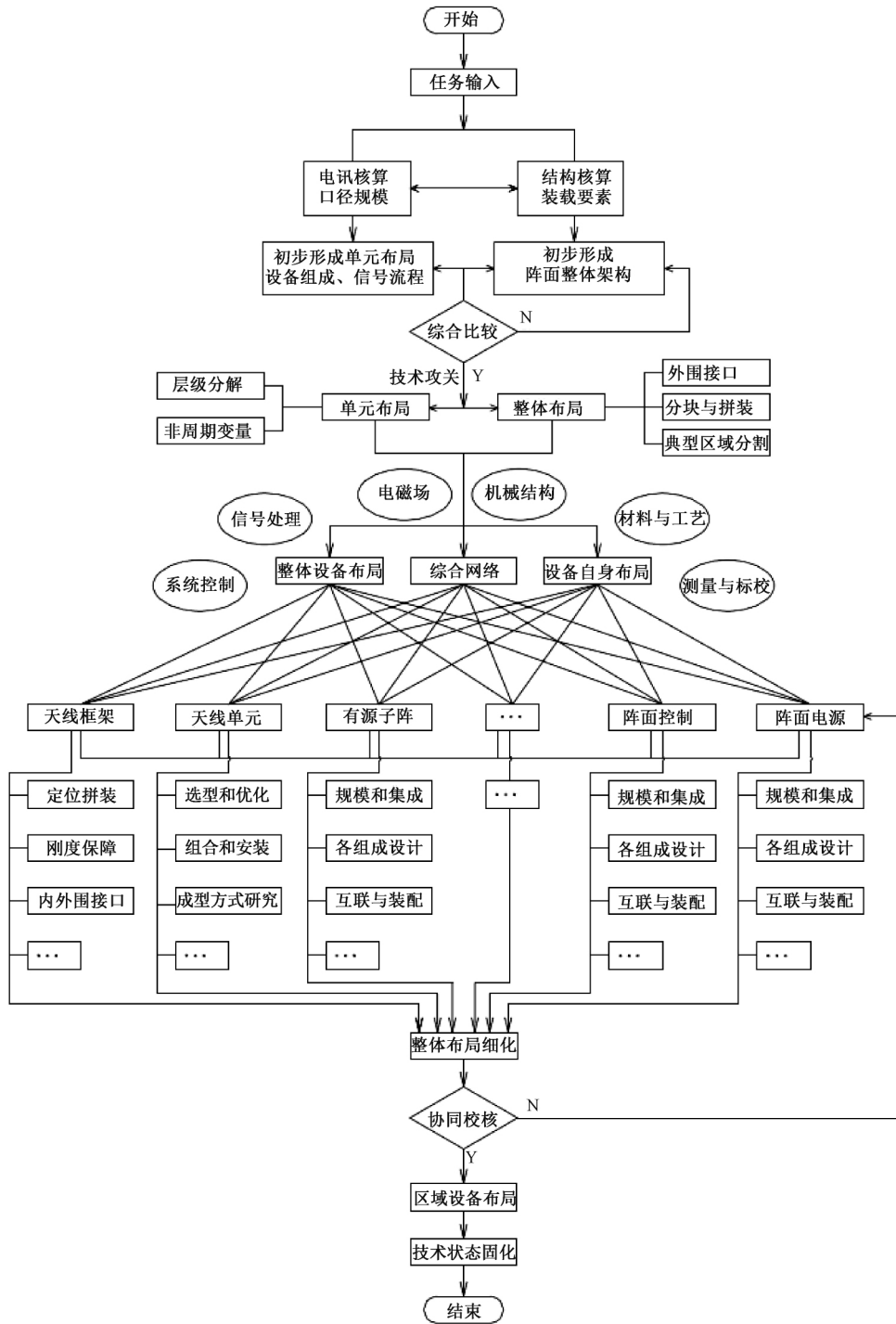


图 1 大型非周期天线阵面典型设计流程

从图 1 可以看出,大型非周期相控阵天线协同设计的实施过程涉及电信、结构、测量、材料等多学科领域,覆盖加工、装配、使用、维护等全寿命周期要求。由于其特殊的

体制和结构特点,需要在传统天线阵面设计指导流程的基础上增加若干技术环节,并由此产生多点相互渗透融合。整个设计过程纵向贯穿多个环节,横向并联多个子系统。

目前国内在研的某大口徑相控阵天线(天线1)和某中口径相控阵天线(天线2)均采用非周期体制,其工程研制是一个复杂而长期的过程。设计工作从任务输入开始,按协同设计典型流程逐层逐级开展方案论证,技术攻关,详细设计,……,直至技术状态完全固化。

2 协同设计几个关键控制点

大型非周期相控阵天线协同设计过程中,某些环节因纵横交叉关联关系复杂,成为协同设计全流程的关键控制点(kep control point, KCP)。这些控制点构成设计工作的核心和主体,继承前向节点成果的同时,又对后续设计扩展产生直接的关联,继而影响整个天线的经济成本和质量预期,并在后续加工、装配、使用中逐一体现。

2.1 非周期天线单元布局

随着单元间距的增大,天线在波束扫描过程中会出现不同程度的栅瓣,因此需采取一系列措施,打乱天线阵单元周期性排列,使其呈现形态各异的非周期布局,从而实现栅瓣抑制,这也成为非周期相控阵天线的典型特征。如图2所示。

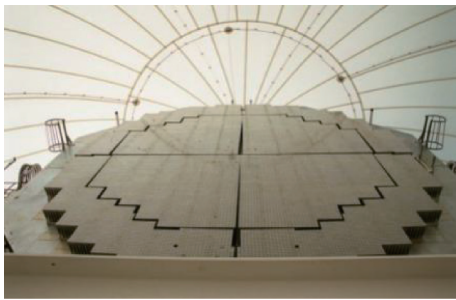


图2 GBP-P 雷达天线

非周期布局的实现方法很多,如将天线口径按定量或不定量进行分割,并将上述分割区域在一定范围内旋转或平移,从而达到栅瓣抑制的效果^[7-11]。非周期的离散度和错乱度越大,且细化颗粒度越细,越能获得良好的栅瓣抑制效果,但由此带来结构设计和装配维护的难题,由于非周期排列造成的空间无序化和碎片化,往往需要以最小尺寸设计统型,以适应不同的空间安装要求,这就给各级功能模块集成的尺寸条件提出了更为苛刻的要求,与此同时,各级模块的操作空间狭小且不规则,又使后续装配、使用和维护的难度增加。

在电信、结构协同作用下,根据总体指标要求对整个天线阵面口径规模进行等量匹配,并同步对天线全口径进行分割、重组、旋转或平移,结合天线阵面系统集成、结构实施、加工装配等诸多因素进行迭代优化,直至确定非周期单元布局所包含的每一个变量的准确数值。天线1将子阵按不同数量和排列形成超级子阵,超级子阵按特定方法旋转平移形成天线阵面,如图3(a)所示;天线2为不同

象限的子阵分别叠加不定量平移和错位,形成天线阵面,如图3(b)所示。

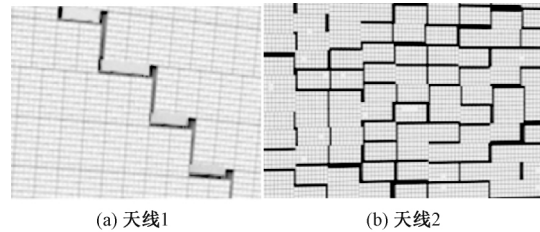


图3 天线1和天线2非周期布局

天线单元布局是整个天线阵面设计的前提。上述两种非周期天线单元布局,在实现栅瓣抑制的同时,兼顾天线阵面设备集成、结构实施、加工装配,以及后续雷达测试、使用、维护等全寿命周期的若干条件。

2.2 高增益天线单元

大型非周期相控阵雷达需要选择高增益、高口径效率的单元才能实现整个天线阵面的高增益,因此,喇叭天线成为首选^[12]。同时,当波束指向为阵面法线方向时,该类天线单元也能起到一定的栅瓣抑制效果。

天线单元协同设计过程中,首先根据电讯要求产生原始结构图,然后由结构、工艺结合不同应用阶段的需求进行成型探讨——小批量试验阶段,以快速响应精确成型为要求,可采用焊接+机加工方式成型,但造价高、周期长、一致性差;正式实施阶段,根据电测条件,进行批量化成型方式探讨,立足时间成本、经济效益、使用环境条件,必要时进行局部改造,以适应上述要求。

天线1中,天线单元从原始方案到批量成型(如图4(a)所示),经历了以下几点改进:

- 1) 结合电测数据和成型手段优选隔板结构;
- 2) 改进内腔截面以适应批量化成型方式;
- 3) 改造口径端面以便于尺寸控制和检测。

天线2中,天线单元从原始方案到批量成型(如图4(b)所示),经历了以下几点改进:

- 1) 简化内腔形状以降低成型难度;
- 2) 增加口径端盖以提高匹配性能;
- 3) 增设外围隔板以改善电磁兼容。

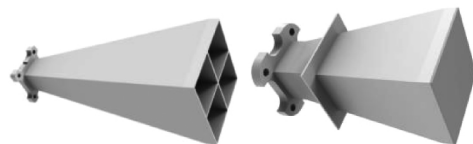


图4 天线1和天线2单元结构

上述两种天线单元在保证口径效益的同时,可获得优良的电磁特性,较高的生产效率和尺寸一致性,且接口明确,连接可靠,为整个相控阵天线集成奠定了基础。

2.3 高刚度天线框架整体架构和区域分割

天线框架是结构承载和设备集成的主体,是实现各项指标的主要部件,也是后续使用维护的主要平台。合理的层级划分和互联,清晰的综合走线,良好的人机交互,……,这些条件为加工装配、指标实现,以及后续电信、结构、工艺、测量等不同专业人员各自开展工作奠定基础。

根据电信号流程和天线阵面设备组成,初步形成天线阵面的结构总体参数,如水平跨距、外形重量、支承方式等;搭建天线框架整体架构,突破非周期单元布局 and 周期性区域分割之间的矛盾,在两者之间建立有效的机械连接,并根据边界条件开展机械变形分析;在此基础上,根据加工和运输条件确定结构件向下分块;结合密封、人机工程、设备布局 and 综合走线分割典型区域;根据上述条件复核电讯指标和结构精度,并以此判断整体架构和区域分割是否需要调整,直至符合要求;结合光、电各类信号传输和冷却管路分配,开展天线框架整体布局 and 典型舱室布局,并以此判断区域分割是否需要调整,直至符合要求。

在上述流程指导下,天线 1 划分为前端超级子阵、中段高频箱、后端阵面背架 3 个区域,其中,高频箱分割为 5 行 8 列共计 36 个典型舱室,如图 5(a)所示。天线 2 采用紧凑型架构,所有设备均集成在高频箱内,高频箱分割为 4 行 4 列共计 16 个典型舱室,如图 5(b)所示。

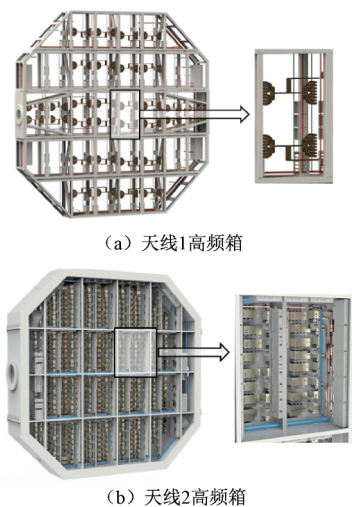


图 5 天线 1 和天线 2 整体架构和区域分割

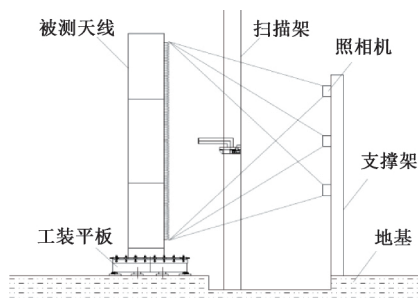
上述两种天线整体架构和区域分割方式为阵面集成提供了合理便捷的实施条件,获得产品良好的电性能和结构性能,实现了优良的人机交互特性。

3 技术成果

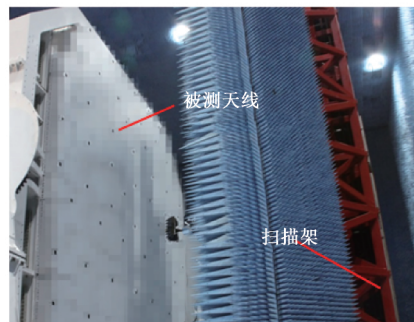
为验证协同设计方法的有效性,产品完成装配后开展结构试验和电性能测试工作,并实测平面度和栅瓣电平,作为考核天线结构性能和电性能是否满足要求的主要参数。

在装配阶段,采用摄影测量法^[13]测量天线辐射端面的

平面度。利用数码相机对天线阵面分区照相,获取辐射端面的靶标点位置数据,然后对照片进行数据处理,求得目标点的平面度误差和标准差,得到天线辐射端面平面度的准确数据,如图 6 所示,不同的俯仰角度下,天线 1 辐射端面平面度(RMS) ≤ 1.4 mm,天线 2 辐射端面平面度(RMS) ≤ 1.1 mm。两个天线辐射端面的变形如图 7 所示。



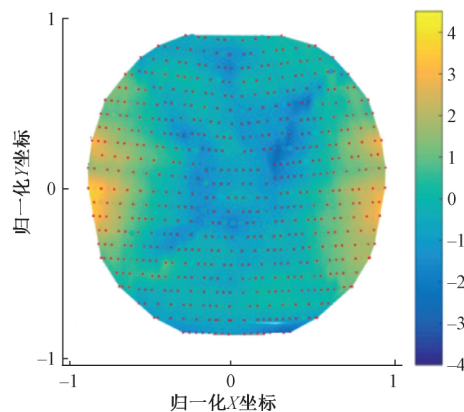
(a) 天线测试



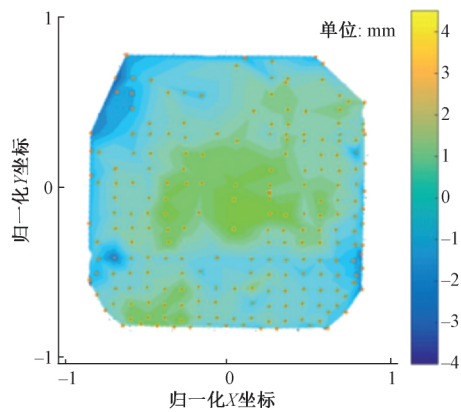
(b) 天线测试图

图 6 天线测试和实物图

在近场测试阶段,结合天线的非周期布局,定制探头扫描路线,对阵面进行精确扫描和补偿^[14],并对扫描数据进行特殊处理,得到天线栅瓣电平的实测数据,在不同的扫描角度下,天线 1 栅瓣电平 ≤ -20 dB;天线 2 栅瓣电平 ≤ -18 dB。两个天线的扫描方向图如图 8 所示。

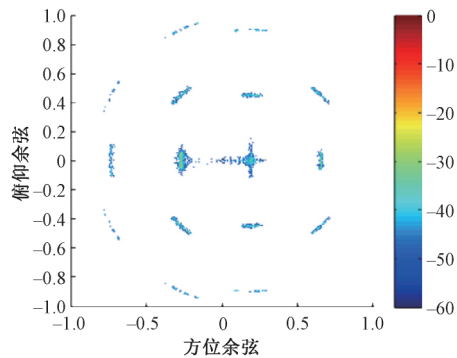


(a) 天线 1 实测变形图

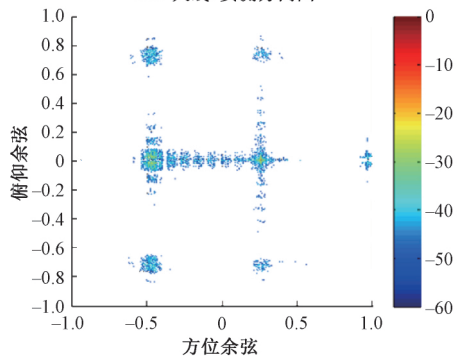


(b) 天线2实测变形图

图 7 天线 1 和天线 2 实测变形图



(a) 天线1实测方向图



(b) 天线2实测方向图

图 8 天线 1 和天线 2 实测方向图

上述测试结果如表 1 所示。

表 1 实测指标列表

产品序号	平面度/mm	栅瓣电平/dB
1	≤ 1.4	≤ -20
2	≤ 1.1	≤ -18

得益于全流程协同设计和几个关键点控制,天线 1 和天线 2 在指标实现、结构实施、人机工程方面,都取得良好的效果。两个天线结构和电性能指标满足产品输入要求,

使用性能良好。

4 结 论

本文针对大型非周期相控阵天线的特点,提出多学科领域协同设计的方法,并结合两个产品实例,对协同设计典型流程中的几个关键控制点展开论述,实测数据证明协同设计方法的合理性和有效性。

作为雷达家族的“后起之秀”,大型非周期相控阵天线的协同设计方法有待进一步完善和修正,如引入数字孪生法——将协同设计典型流程和具体产品相结合,创建数字化模型,根据天线性能指标的敏感程度设置关注变量,并将产品后续装配、测试和使用阶段的实测数据返回模型进行修正;本文的关键控制点有待进一步细化和补充,如高效系统环控技术——通过各级环控,优化天线阵面温度条件,开展电磁场、温度场、结构应力应变分析优化,并逐一落实具体措施;又如高精度测量与多自由度调整技术^[15-16]——采用高精度测量手段对天线状态进行跟踪,形成不同状态下的辐射端面坐标数据,结合数据对天线进行多自由度调整,针对调整结果进一步进行算法补偿,全面提高阵面精度,……通过协同设计中若干技术点和面的作用和实施,进一步强化非周期相控阵天线协同设计的广度和深度,逐渐形成一个日趋完善的可实施流程,全面提高非周期相控阵天线的综合性能。

参考文献

- [1] 费阿莉,朱瑞平,马静. GBR-P 天线性能研究[J]. 现代雷达,2010,32(2):71-75.
- [2] 陈晓栋. 美国海基 X 波段雷达发展现状[J]. 现代雷达,2011,33(6):29-30.
- [3] 任恒. 某相控阵雷达天线阵面热设计及流量分配研究[J]. 火控雷达技术,2017,46(1):55-56.
- [4] 倪勇,李建新,陈辉,等. 星载 SAR 相控阵天线一体化热设计[J]. 现代雷达,2016,38(4):62-63.
- [5] 刘健,蒋德福. 应用 MATLAB 协同 HFSS 设计波导裂缝天线[J]. 信息技术,2014(3):159-161.
- [6] 张平,于鹏飞,叶锐. 一种片式 T/R 组件的热电协同设计方法研究[J]. 机械与电子,2018,36(7):11-14,33.
- [7] TOYAMA N. Aperiodic array consisting of subarrays for use in small mobile earth stations [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(6):2005-2009.
- [8] WANG H, FANG D G, CHOW Y L. Grating lobe reduction in a phased array of limited scanning [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008,56(6):1581-1586.
- [9] KRIVOSHEEV Y V, SHISHLOV A V. Grating lobe suppression in phased arrays composed of identical or similar subarrays [C]. 2010 IEEE International

- Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2010: 724-730.
- [10] 马静,刘明昱. 旋转超级子阵在车载机动式雷达天线中的设计应用[J]. 现代雷达, 2016, 38(11): 67-69.
- [11] 李志刚,王鹏毅. 基于同心圆环的大间距子阵级阵列栅瓣抑制[J]. 电波科学学报, 2016, 31(6): 1134-1136.
- [12] 朱钟淦,叶尚辉. 天线结构设计[M]. 北京:国防工业出版社, 1980.
- [13] 李巍,董明利,孙鹏,等. 大尺寸摄影测量局部参数优化相对定向方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2056-2057.
- [14] 李勇,欧杰,徐平. 平面近场天线测量误差分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(11): 988-991.
- [15] 孙永江,金华松,于建成,等. 船载测控天线面精度测试及调整方法[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(9): 20-21.
- [16] 方红梅,钟剑锋,徐文华,等. 高精度调整技术在大型天线阵面上的应用研究[J]. 电子机械工程, 2018, 34(1): 8-10.

作者简介

方红梅,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为大型阵面结构设计。

E-mail: hm_fang77@sohu.com