DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2021.02.003

某车载天线阵面结构设计与仿真分析*

张李军,王 晨,顾叶青,周小龙 (南京电子技术研究所,江苏南京 210039)

摘 要:针对某车载有源相控阵雷达高机动的设计需求,天线阵面采用高集成和功能模块化设计,由功能结构一体化冷却面板替代不锈钢冷却管网,由盲插互连的馈线综合层替代电缆组件直插式结构。相较于传统天线阵面, 其厚度减小了一半,质量减轻了40%。天线骨架采用内外框架拼装式新型结构,外框架由箱梁拼焊,保证结构强度,内框架采用横纵梁和天线面板逐级定位的高精度设计,保证天线阵面设备间盲插互连的可靠性,为天线阵面 的高集成设计提供了一种新的思路。文中还建立了天线骨架的有限元模型,进行静力分析和振动冲击分析,得到 了天线骨架在各工况下的应力云图和变形云图。研究结果表明,天线阵面结构在各工况下均能满足电讯提出的 精度指标要求,整体性能较好。

关键词:高集成;功能模块化;盲插互连;有限元分析;刚强度 中图分类号:TN821⁺.8 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2021)02-0009-04

Structure Design and Simulation Analysis of a Vehicle-borne Antenna

ZHANG Lijun, WANG Chen, GU Yeqing, ZHOU Xiaolong

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Aiming at high maneuverability requirements for a vehicle-borne active phased array radar, the design method of high integration and function modularization of the antenna is adopted. The stainless steel cooling pipe network is replaced by the function & structure integrated cooling panel and the direct-insert structure of cable assembly is replaced by the blindly interconnected feeder composite layer. Compared to the traditional antenna array, its thickness is reduced by half and the weight by 40%. A new type of antenna framework is adopted to assemble the internal and external frames. The external frame of the antenna skeleton is welded by the box beam to ensure the structural strength. The internal frame adopts the high precision design method that the horizontal beam, vertical beam and antenna panel are positioned step by step to ensure the reliability of blind interconnection among equipment on the antenna framework structure is also established in this paper to carry out the static analysis and vibration and impact analysis. The stress distribution graph and deforming graph under different work conditions are obtained. The results indicate that the strength and stiffness of the structure can meet the design requirement.

Key words: high integration; function modularization; blind interconnection; finite element analysis; strength and stiffness

引 言

有源相控阵天线具有诸多优点,其高功率、高效率的本质特征为大幅提升雷达作用距离提供了最有效的技术途径^[1],已成为当今相控阵雷达发展的主流方向^[2]。有源相控阵天线是典型的复杂电子机械装备,

通常由天线单元组合、T/R组件、电源模块、馈线网络 模块、热控管网以及作为结构支撑基础的天线骨架等 组成^[1]。其中,天线单元与T/R组件之间需实现快速 互连,以满足维修性与互换性的要求^[3-4]。此外,也要 求电源网络、控制网络等能快速方便地实现互连^[5-6]。 盲插互连技术是将一对具有盲插对接功能的电连接器

^{*} 收稿日期:2020-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51490664)

分别装在一个固定面板和一个可移动模块上,通过移动模块直接实现电连接器之间互连的技术^[3-6]。

盲插互连可以使天线阵面获得更高的集成度,可 实现天线阵面结构的轻量化设计,从而提高雷达的综 合性能,而且无引线对接技术还使天线阵面更简洁美 观。不过,盲插互连的高精度需求对天线阵面及天线 骨架的结构设计提出了更高的要求。

本文介绍了某车载有源相控阵天线阵面高集成和 功能模块化的设计方法,采用内外框架拼装形式的新 型骨架,既保证了天线阵面的刚强度,又满足了盲插互 连的高精度需求,而且还可缩短研制周期,降低研制成 本,为天线阵面的高集成设计提供了一种新的思路。

1 天线阵面系统设计

某车载有源相控阵天线阵面(图1)包括天线单元 组合、天线骨架、T/R组件、阵面电源、馈线网络、冷却 网络等设备。该天线根据阵面上的设备组成及设备之 间的互连关系,结合可维修性、测试便利性和可靠性, 采用了高集成和功能模块化设计。由功能结构一体化 冷却面板替代传统方案的不锈钢冷却管网,由盲插互 连的馈线综合层替代传统方案的电缆组件直插式结 构,相较于传统天线阵面,其厚度减小了一半,质量减 轻了40%,从而提高了雷达设备的高机动性。在天线 阵面布局上,将若干个T/R组件集成为一个具有独立 功能的子阵面舱室模块。天线阵面上的设备都安装在 天线骨架的前端或后端,骨架(阵面的承载结构)的逐 级定位高精度设计保证了阵面上设备之间盲插互连的 可靠性。

	-			
		5 +	-	-
-			1	11
			4	5
-	-	1		-
			-	
	-		-	_
			1	
-	-		-	

图 1 某车载有源相控阵天线阵面外形

天线面板将天线骨架分隔为前舱和后舱,前舱布 置天线单元组合,后舱布置T/R组件及后端的馈线网 络。前舱由一体化多功能冷却面板上统一的安装基准 保证盲插的高精度要求,实现T/R组件在前端与天线 单元组合及冷却面板的无引线互连。后舱通过馈线综 合层分配和汇总电讯信号,从而实现每一个子阵面舱 室在功能上的独立。

2 天线骨架设计

天线骨架内部由横梁和纵梁分隔成具有独立功能 的子阵面舱室(图2),每个子阵面舱室包含有源T/R 组件、馈线网络及天线单元组合等。T/R组件的上、下 两侧通过浮动盲插形式实现与馈线网络的信号互连。 馈线网络及T/R组件都安装和定位在横梁和面板上, 彼此之间的定位精度是能否实现信号可靠互连的关 键,所以为了保证T/R组件与馈线网络信号互连的可 靠性,对天线骨架提出了高精度的要求。

考虑到以上因素,在设计时将天线骨架拆分为内 框架与外框架,两侧采用连接件固定,通过定位销将内 框架从前端安装进外框架并用紧固件固定,如图2所 示。外框架由四周的箱梁拼焊成型,为钢结构,起到保 证结构强度和支撑的作用;内框架由横梁和纵梁通过 榫卯定位,与面板螺接拼装,保证T/R组件、馈线网络 和天线单元盲插互连的精度。内框架以天线面板为基 准,横梁、T/R组件与面板定位,馈线网络与横梁定位, 通过逐级定位将精度要求分配到横梁上,而纵梁仅作 为整个框架结构的支撑。天线面板上的安装和定位要 素由铝板一体机加工成型,保证了各个部件拼装的定 位精度。横梁由定制铝型材机加工成型,避免了焊接 等其他工艺带来的变形问题,有效保证了因盲插互连 产生的高精度需求。骨架内框架以零部件形式加工后 再进行拼装,大大缩短了项目研制周期,节约了成本。



车载平台的天线阵面有密封的要求。虽然在结构 形式上,天线骨架外框架包裹了内框架,但螺接形式并 不能起到密封的作用。因此,在设计时,天线阵面的前 端利用天线罩实现天线骨架内外框架的密封;在天线 阵面的后端,在内框架与外框架之间设计门框,利用 门框上的密封条实现天线骨架内外框后端结合处的 密封。

3 天线阵面力学分析

3.1 有限元模型的建立

对于相控阵天线这样的复杂结构,有限元法是最

常用和最有效的力学分析方法。根据仿真分析内容的 需要,采用ANSYS软件对天线阵面的振动和冲击特性 进行分析。根据阵面的骨架结构形式进行有限元模型 的建模,建模中对面板上的小孔、倒角和凸台等特征 进行简化,不考虑其对骨架结构振动与冲击性能的影 响。由于天线骨架内大部分结构均为薄板结构,一个 方向上的尺寸远小于另外两个方向,所以采用壳单元 Shell63进行网格划分。

天线骨架外部由Q345钢板焊接箱梁结构形成外 框架,内部由铝制纵梁与横梁及面板形成内框架,结构 所用材料参数见表1。计算时,天线骨架自身总质量为 2.4 t,天线单元与其他附件的总质量约为4.9 t。

表 1 材料参数				
材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	
5A05	70	0.35	2 800	
Q_{545}	210	0.55	7 900	

在进行力学分析时,涉及计算工作的物理量长度、 质量、密度、力和应力的单位分别为mm,kg,kg/mm³, mN和kPa。为方便描述,建模、分析所涉及的总体坐 标系约定为:X轴方向为横梁方向,Y轴方向为纵梁 方向,Z轴方向为天线阵面厚度即法向方向,遵守右手 定则。

3.2 天线骨架静态分析

由于要求在有限的空间设计出合理的天线骨架结构,在严格控制质量的基础上还需保证骨架结构在各种状态下的强度和刚度,而且车载平台天线骨架还需满足一定的抗风能力,因此根据该型产品的环境条件要求,需对下面4种工况进行分析校核:

1)工况1,倒竖状态,不工作;

2)工况2,6级风,风速为13.8 m/s,自重,计算参考 温度为20°C,需保精度工作;

3) 工况3,8级风,风速为20 m/s,自重,计算参考 温度为20°C,需正常工作;

4) 工况4,12级风,风速为40 m/s,自重,计算参考 温度为20°C,设备不损坏。

通过施加均布载荷,模拟它对天线骨架的影响。 当给定风速为平稳风速时,风压q的计算公式为:

$$q = \frac{K_{\rm R} (K_{\rm g} K_{\rm h})^2 V^2 g}{16} \tag{1}$$

式中:V为风速;g为重力加速度;K_R为风阻系数,主 要取决于物体的形状与风向,这里3种工况中均取1.4; K_g为阵风因子,当给定风速为最大风速时取为1;K_h 为高度因子,取为1。 经计算,工况2,工况3和工况4下的风压分别为 167 Pa,350 Pa和1400 Pa。分析时,风压等效为集中 力载荷,施加在相应的节点上。

经分析,在天线阵面倒竖状态(工况1)下,天线 骨架的最大应力为61 MPa,出现在上支耳处,不超出 Q345钢的屈服强度345 MPa,相应的应力分布如图3 所示。

天线阵面工作状态的3种工况下的最大变形和最 大应力见表2。天线骨架在3种工况下的最大应力分 别为12.6 MPa,15.2 MPa和23.8 MPa,均出现在上支 耳处,不超出Q345钢的屈服强度345 MPa。图4为工 况3下的应力分布云图。

表 2 工作状态下的静态分析结果

工况	最大变形/mm	最大应力/MPa
工况2	0.107	12.6
工况3	0.120	15.2
工况4	0.230	23.8



天线阵面在高低温条件下需保证精度要求,其低 温工作条件为-40°C,高温工作条件为+50°C。天 线阵面上的设备(包括天线单元)都安装定位在天线骨 架内框架上,且均为同质材料,热膨胀系数一致,可保 证高精度要求。前端和后端由高频箱门和天线罩与外 界高低温环境隔离,需保精度的骨架内框架和阵面设 备为舱内环境,受高低温环境影响相对较小。天线骨 架内外框架通过连接件过渡,有一定的调节作用。经 分析,天线阵面在高低温下的变形为1.02 mm,满足电 讯提出的精度指标要求,如图5所示。



3.3 天线骨架振动冲击分析

车载有源相控阵雷达在满足高机动要求的同时, 在长距离运输时,其天线阵面及天线骨架还需保证强 度和刚度。根据国军标要求,随机振动和冲击条件见 表3和表4。

表 3 随机振动条件

装载 形式	振动 形式	频率范围/ Hz	垂直轴 均方根	横侧轴 均方根	纵向轴 均方根
Ⅱ类汽 车运输	随机 振动	$5\sim 500$	2.489g	1.012g	0.629g

表 4 冲击条件			
装载形式	冲击脉冲波形	峰值加速 度/(m·s ⁻²)	脉冲持续 时间/ms
地面设备	半正弦波	200	11

经分析,在垂向振动工况下,天线骨架的最大变形为0.22 mm,满足电讯提出的精度指标要求,最大应力为168.7 MPa,出现在上支耳处,不超出Q345钢的屈服强度345 MPa,相应的应力分布如图6所示。

在垂向冲击工况下,11 ms时天线骨架的最大变 形为5.15 mm,最大应力为202.35 MPa,出现在上支 耳处。垂向冲击时,天线骨架内外框架拼装连接件(采 用7075铝合金材料,许用应力约为550 MPa)的最大 应力为203.7 MPa,满足强度要求。图7为垂向冲击变 形分布云图。



表 5 支耳孔校核组

部位	实际承受应力/ MPa	挤压强度/ MPa	安全系数
上支耳	202.35	289.8	1.43

4 结束语

针对某车载有源相控阵雷达高机动的设计需求, 天线阵面采用高集成和功能模块化设计,由功能结构 一体化冷却面板替代不锈钢冷却管网,由盲插互连的 馈线综合层替代电缆组件直插式结构。相较于传统天 线阵面,其厚度减小了一半,质量减轻了40%。设计时 天线骨架外部采用由钢板焊接的箱梁结构形式的外框 架,保证天线骨架在各环境条件下的强度和刚度;内部 采用横纵梁与面板逐级定位的高精度设计的内框架, 保证天线骨架内设备及馈线网络安装的高精度要求。 从仿真分析可以看出,天线骨架结构在各工况下均能 满足电讯提出的精度指标要求,整体性能较好。

参考文献

- [1] 顾叶青,姚晔, 王超, 等. 有源相控阵天线集成设计[J]. 电子机械工程, 2016, 32(6): 29-32, 40.
- [2] 顾叶青, 唐宝富, 王超, 等. 大型相控阵天线模块化设计 [J]. 电子机械工程, 2016, 32(2): 1-4.
- [3] 谢金祥. 某盲插连接器高密度安装板的设计与优化[J]. 电子机械工程, 2015, 31(3): 24-27.
- [4] 陈竹梅. 有源相控阵雷达射频同轴连接器盲插机构的设计 与分析[J]. 电子机械工程, 2002, 18(5): 11-15.
- [5] 叶菁. 一种相控阵天线的布线设计 [J]. 现代雷达, 2005, 27(7): 45-47.
- [6] 李玉峰,徐红莲,吕慎刚,等. 电液一体化盲插技术及实现 方法[C]//电子机械与微波结构工艺学术会议,呼和浩特: 中国电子学会电子机械工程分会,2014.

张李军 男,1990年生,工程师,主要从事大型有 源相控阵雷达天线结构设计工作。

声 明 为适应我国信息化建设,扩大本刊以 及作者的知识信息交流渠道,本刊已被封 面上的数据库全文收录,其作者文章著作 权使用费与本刊稿酬一次性付给。如作者 不同意文章被收录,请在来稿时向本刊申 明,本刊将作适当处理。