

DOI:10.19659/j.issn.1008-5300.2019.01.001

一种新型有源相控阵天线结构方案*

姚斌, 王伟, 冯树飞

(西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)

摘要:为满足高性能有源相控阵天线的新要求,文中提出了一种具有索桁组合背架与并联驱动装置的创新结构设计方案。建立了该结构方案的有限元模型,通过施加自重、温度、风等外载荷,对天线结构进行了静力学分析。以阵面自重最优为目标,应用序列线性规划法,通过优化索、杆截面尺寸,得到了一组结构方案。与传统方案相比,新方案在保证阵面精度的前提下,型面变形得到了改善,背架总重减少约 40%。

关键词:有源相控阵天线;天线结构设计方案;索桁背架;并联驱动

中图分类号:TN821+.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2019)01-0001-04

A Novel Structure Scheme for Large Active Phased Array Antenna

YAO Bin, WANG Wei, FENG Shu-fei

(Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to meet the new requirements of high-performance active phased array antenna, an innovative structure design scheme is proposed, which is composed of a cable-truss combination frame and a parallel drive device. First, the finite element model of this structure scheme is established. The static structure of the antenna is analyzed by applying external loads such as deadweight, temperature and wind. With the objective of optimal deadweight, a set of structure solutions is obtained by sequential linear programming method and optimizing the cable and rod section dimensions. Compared with the traditional scheme, under the premise of ensuring the front surface accuracy, the profile deformation is improved and the total weight of the back frame is reduced by about 40%.

Key words: active phased array antenna; antenna structure design scheme; cable-truss back frame; parallel drive

引言

众所周知,有源相控阵雷达在军事防御和探测领域占据绝对重要且不可替代的地位。随着电磁干扰、隐身与反隐身等技术的飞速进步,对有源相控阵雷达在结构刚度、指向精度等方面提出了更高的要求。在传统方案下,为了保证结构刚度与指向精度,天线的自重会大幅度上升,导致造价极其昂贵。为降低高要求带来的昂贵制造成本,天线结构轻量化设计一直是研究中的重中之重。文献[1]针对某雷达系统天线轻量化设计要求,进行了恶劣环境下的抗冲击仿真分析和结构轻量化设计。在雷达结构的轻量化设计中,大多数都是在传统基础上对结构进行尺寸优化,并不能使天线结构重量显著下降。为满足高要求,本文试图从

结构创新入手,在掌握已有传统整体结构设计的基础之上,对新型有源相控阵雷达天线结构进行创新设计,使新型整体结构能够在满足传统设计指标的基础上,实现轻量化和低功耗。实现相控阵雷达天线的轻量化与低功耗,不仅可在整个雷达系统的重量和控制方面做出很大贡献,由于天线在集成度方面的不断提高,还可在客观上对雷达天线性能的提升发挥较大的推动作用^[2-3]。

1 天线结构设计要求

1.1 阵面特征信息

某陆基有源相控阵天线高性能电子装备要求背架结构刚度大、重量轻。天线阵面模型与各组成部分的

* 收稿日期:2018-07-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475171)

关系如图1所示。该高集成度天线阵面尺寸为 $2\,320\text{ mm} \times 7\,100\text{ mm}$,由5个子阵组成,每个子阵由9个模块组成,每个模块又由240个单元组成,整个阵面总计有10 800个发射单元。每个模块的质量为16 kg,即整个阵面的总质量为720 kg。

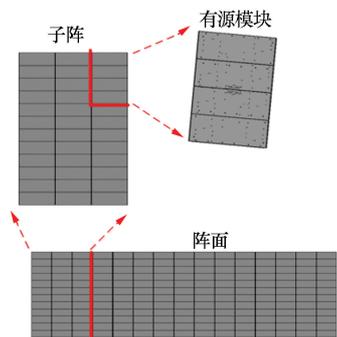


图1 天线阵面各组成部分关系图

1.2 天线结构设计要求

该陆基雷达工作在X波段(8 GHz ~ 12 GHz),按照Ruze经验公式,阵面变形均方根误差一般取 $\lambda/30 \sim \lambda/60$,所以在满足工作要求的条件下,阵面均方根 $a_{\text{RMS}} \leq 0.833$,且阵面的变形峰-峰值 $\varepsilon \leq 2.5\text{ mm}$ 。

天线在服役环境中,首先受到自身重力作用,其次受各种服役环境带来的额外载荷(如环境温度、风载荷等)作用。在这些复杂载荷作用下,首先需要满足工作精度,其次是提高雷达天线的电性能。传统方案采用纯桁架背架与串联机构结构,为了满足设计指标,天线结构笨重,且功耗大。为了改善这种状况,本文提出了一种创新方案:索桁背架与并联驱动结构。

2 创新方案概述

2.1 索-桁组合背架

要满足结构高精度要求,传统钢架结构的刚度就大,大刚度必然使结构自重大幅增加。本文在传统纯桁架结构中引入预应力索,可以增大结构的刚度,在一定程度上改善结构的变形趋势,而且可降低纯桁架的自重^[4]。索-桁结构如图2所示。

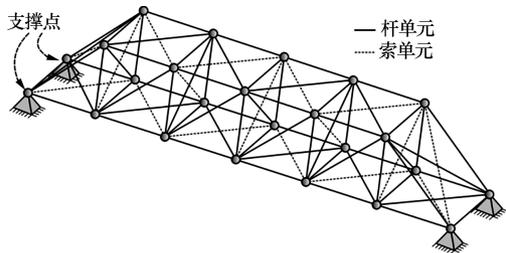


图2 索-桁结构示意图

与传统笨重的钢架结构相比,预应力索-桁背架

结构在满足结构设计指标的前提下,经验证可以降低结构自重^[5]。本文采用这种创新结构,在已建立的模型中引入预应力索,目的是在满足设计指标的前提下,改善型面变形,降低结构自重。

2.2 并联驱动

并联机构代表着当今机构学的发展趋势。与串联机构相比,并联机构有刚度大、承载能力大、精度高以及运动负荷小等优点^[6]。图3为并联驱动方案示意图。

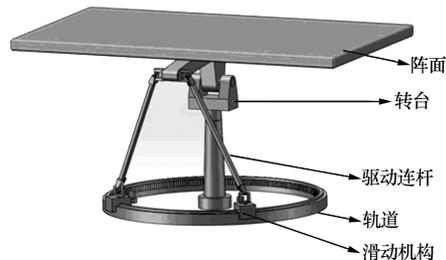


图3 并联驱动示意图

并联机构的运动原理为:轨道的中心轴线与天线方位转动中心重合,轨道内侧有齿条;滑动机构的齿轮副与齿条相啮合,齿轮副由伺服电机和减速机驱动,实现滑动机构在轮轨上的滑动;滑动机构在轨道上滑动时,牵引着驱动连杆下端移动,进而驱动着与连杆上端连接的背架结构运动。2根驱动连杆的上端通过虎克铰与背架或背架支托结构相连,下端则采用球铰与能沿轨道滑动的滑动机构相连(也可采用三转动自由度符合铰链代替球铰)。文中有限元模型的天线座是基于两自由度并联机构的方位-俯仰两轴座架结构建立的。

3 模型建立与分析校核

3.1 有限元模型建立

创新方案由并联天线座(实体单元)和背架结构(杆、梁、壳单元)组成。对于有限元模型的建立,ANSYS apdl 命令流在杆、梁、壳等单元的模型建立中效率高,而对于实体单元则效率极低。实际上,对于实体单元建模,选择三维建模软件(Solidworks、ProE等)更优。因此,本文将ANSYS apdl与Solidworks结合使用,即背架与阵面结构采用ANSYS apdl命令流,并联驱动天线座采用三维建模软件Solidworks。然后,在ANSYS apdl操作界面,利用接触单元将实体单元的天线座与梁、壳单元的骨架阵面装配在一起,完成创新方案的有限元模型建立,如图4所示。该建模方案可大大提高有限元模型建立的效率。有限元模型中各部分单元类型以及材料属性参数见表1。

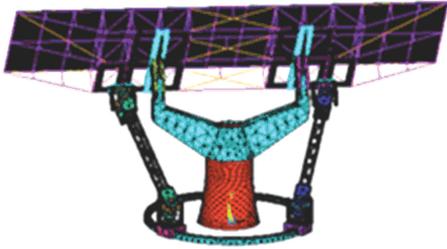


图 4 新型有源相控阵天线有限元模型

表 1 有限元模型各部分组成一览表

部件	单元类型	密度/(kg · m ⁻³)
立柱	实体	7.20e3
转台	实体	7.85e3
轨道	实体	7.60e3
连杆	Beam188、实体	7.85e3
背架	Beam188、link10	7.85e3
面板	Shell63	2.8e3

此时,有限元模型的结构参数为初步参数,是否满足设计指标暂且不知。按照设计指标,在自重与服役温度载荷作用下,阵面需满足一定平面度要求,因此需对结构进行分析校核。在有限元模型建立初期,背架结构是按照传统的纯桁架结构建立的。阵面结构采用二维四边形划分网格,均匀分布在背架结构上,在分析校核中提供阵面自重载荷。

3.2 静力学校核

在重力、温度载荷以及重力与温度载荷共同作用下,结构静力学分析结果见表 2。

表 2 静力学分析结果一览表 mm

载荷	工况						
	指平0°		俯仰45°		仰天90°		
	a _{RMS}	峰-峰值	a _{RMS}	峰-峰值	a _{RMS}	峰-峰值	
重力	0.265	1.391	0.400	1.413	0.670	2.224	
温度	60 °C	0.164	0.868	0.445	1.581	0.769	2.392
	-20 °C	0.373	2.066	0.369	1.380	0.567	1.955
重力+温度	60 °C	0.168	0.885	0.453	1.607	0.781	2.434
	-20 °C	0.377	2.083	0.376	1.406	0.580	1.998

注: 此校核过程中, 骨架自重354.987 kg。

由表 2 可以看出,在自重载荷、温度载荷及自重与温度载荷作用下,该有限元模型校核结果满足结构设计指标。此结果表示,在传统的钢架结构设计思路指导下,钢架的参数性能(包括自重、型面变形等)满足设计指标。

为改善型面变形及降低结构自重,引入预应力索。按照经验法,建立基于索桁背架的有限元模型。使用 iSight 优化软件进行优化,其中自变量为索、杆截面积 S,目标函数为结构自重,约束条件为温度-20 °C、指平工况下与温度 60 °C、仰天工况下的阵面峰-峰值,因

为由表 2 可以看出,在自重与温度同时作用下的所有工况中,上述 2 种工况下的阵面峰-峰值较大。算法采用序列线性化 SLP,对背架结构进行优化。对优化结构进行的静力学分析校核结果见表 3。

表 3 静力学分析结果一览表 mm

载荷	工况						
	指平0°		俯仰45°		仰天90°		
	a _{RMS}	峰-峰值	a _{RMS}	峰-峰值	a _{RMS}	峰-峰值	
重力	0.235	0.968	0.324	1.377	0.519	1.874	
温度	60 °C	0.139	0.611	0.411	1.622	0.616	2.167
	-20 °C	0.344	1.595	0.260	1.510	0.412	1.644
重力+温度	60 °C	0.141	0.618	0.418	1.649	0.627	2.203
	-20 °C	0.347	1.605	0.266	1.521	0.422	1.682

注: 此校核过程中,骨架自重214.527 kg。

由表 3 可以看出,在自重载荷、温度载荷及自重与温度载荷作用下,优化后该有限元模型校核结果满足结构设计指标。图 5 为阵面峰-峰值最大的情况,即自重、温度 60 °C 工况下的变形云图。

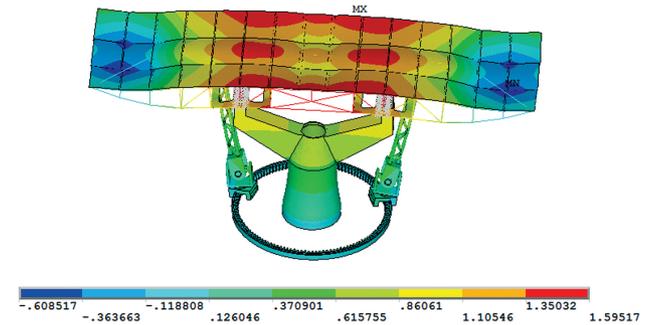


图 5 在重力、温度 60 °C 工况下的结构变形云图

综合比较 2 次静力学分析结果可知,与传统钢架结构相比,索-桁背架结构在引入预应力索后,在满足设计指标的前提下,阵面最大峰-峰值降低,型面变形有所改善,且背架结构自重大大降低(约 40%)。

3.3 风载荷校核

对于置于空气中的雷达天线,其结构设计的最大载荷由最大的风力产生,起着决定性作用。物体所受的风力由摩擦阻力与压差阻力组成。对于非流线型物体,摩擦阻力很小,压差阻力占主导因素。压差阻力是由于作用于物体的法向压力不均匀而产生的。压差阻力包括形状阻力、诱导阻力、波阻力等,天线结构的风力主要是涡流阻力(形状阻力)。涡流阻力是由于边界层从物体表面分离而在物体后面形成漩涡而产生的^[7]。

风力 F 与流体密度 ρ 、流速 v 、流体的粘性 μ 和物体的主要尺寸 D 有关,用因次分析法可以得出关系式:

$$F = \rho v^2 D^2 f \rho v D / \mu \quad (1)$$

因为 $D^2 \propto A$,故上式又可写成:

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 A f \left(\frac{\rho v D}{\mu} \right) \quad (2)$$

式中: f 为函数; A 为物体的特征面积。

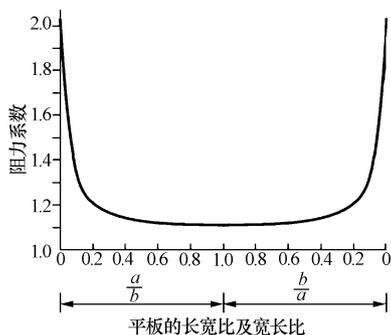
$\rho v D / \mu$ 称为雷诺数, 以 Re 表示, 是表示流动状态的一个无因次数。于是上式表示为:

$$F = \rho v^2 A f(Re) / 2 \quad (3)$$

令 $C_F = f(Re)$, 称为风力系数, 它与物体形状和 Re 数有关, 又称为形状系数。这样, 风力计算公式写为:

$$F = \rho v^2 A C_F / 2 \quad (4)$$

由于 C_F 与形状和 Re 有关, 所以形状相似的物体在 Re 数相同的情况下都是同一个 C_F 。该陆基雷达的阵面为矩形, 矩形平板的阻力系数选择依据如图 6 所示。



注: a 、 b 分别表示矩形平板的长和宽。

图 6 风垂直作用于平板的阻力系数

从图 6 的曲线可以看出: 当平板的长度远远大于其宽度(40~50倍)时, 阻力系数接近于 2; 当长宽比在 $1/3 \sim 1$ 时, 其阻力系数几乎为一常数, 正方形为 1.15。

该陆基天线阵面尺寸为 2 320 mm(宽) × 7 100 mm(长), 宽长比为 0.327, 按照阻力系数确定方法, 取阻力系数 $C_x = 1.19$ 。

在陆基雷达风载荷校核中, 通常按照八级风保精度的原则。在此处精度校核中, 取 $v = 20.8$ m/s, 按照风阻力公式计算可得 $F = 5 300.3$ N。校核结果见表 4。

表 4 精度分析结果一览表

载荷	mm				
	工况				
	指平 0°		俯仰 45°		
	a_{RMS}	峰-峰值	a_{RMS}	峰-峰值	
重力+温度	60 $^\circ$ C	0.285	1.286	0.667	2.356
+Wind	-20 $^\circ$ C	0.505	2.210	0.456	1.780

如果物体完全与风向对称, 则只有阻力, 没有升力与侧向力。如果物体相对于风向左右对称, 则没有侧向力, 有阻力与升力。对于平面相控阵天线阵面, 升力作用将整体阵面上移, 阵面的整体峰-峰值与 a_{RMS} 不

会改变。所以, 在此计算风阻力带来的影响。从表 4 分析结果可知, 在八级风工况下, 阵面在服役环境中可以保持精度工作。对于仰天工况, 风正吹产生的风阻力很小, 此处不做仿真计算。

4 结束语

为满足高性能有源相控阵天线的新要求, 与以往结构尺寸优化的轻量化设计相比较, 本文提出了一种索-桁组合背架、并联驱动的创新结构设计方案。建立了此结构方案的有限元模型, 通过施加自重、温度、风等外载荷, 对天线结构进行了静力学分析; 以阵面自重最优为目标, 应用序列线性规划法, 通过优化索、杆截面尺寸, 得到了一组结构方案; 与传统方案相比, 新方案在保证阵面精度的前提下, 型面变形得到改善, 背架新方案总重减少约 40%, 证明该创新方案有效。但在本文的索-桁组合背架优化中, 索单元是按照经验引入的, 未能对索-桁结构进行拓扑优化。后续将在创新结构的索-桁背架拓扑优化、传统与创新结构的总自重和驱动功率比较两方面进行深入研究, 以完善创新结构, 达到工程实际应用要求。

参考文献

- [1] 周泓, 庄文许, 宋骏琛. 雷达天线抗冲击仿真分析与轻量化设计[J]. 雷达与对抗, 2016(2): 53-60.
- [2] 周长仁, 杨永华, 肖德正. 相控阵雷达技术原理与发展趋势[J]. 理论与技术, 2012(3): 17-21.
- [3] 张金平, 李建新. 星载雷达有源相控阵天线轻量化技术[C]// 成都: 全国天线年会, 2009: 709-712.
- [4] FINOTTO V C, Da SILVA W R L. Hybrid fuzzy-genetic system for optimizing cabled-truss structures[J]. Advances in Engineering Software, 2013, 62-63(13): 85-96.
- [5] 冯树飞, 段学超, 段宝岩. 一种大型全可动反射面天线的轻量化创新设计方案[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017(5): 84-96.
- [6] 高峰, 戴建生. 现代机构学理论与应用研究进展[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [7] 叶尚辉, 李在贵. 天线结构设计[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986.

姚 斌(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高性能电子装备机电综合设计和天线结构优化设计。