

文章编号: 2095-4980(2019)02-0278-06

大型平板微波天线伺服俯仰系统工程设计

夏旭光, 姚红萍, 刘朝阳

(中国电子科技集团公司 第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要: 针对大型平板微波天线俯仰系统进行工程研究, 设计了一种强度高、质量轻的桁架结构作为天线背架。根据指标要求建立数学模型, 将整个运动过程通过准确的力学计算进行力矩分配, 从而选定电机、减速机等结构要件; 通过对关键结构件的有限元仿真及高功率微波环境下的电磁兼容性设计, 进一步保证整个俯仰系统可靠工作。通过实验验证, 承载负载总重达到 2 t 左右, 角速度最高可达 $10^\circ/\text{s}$, 可以完成 $0^\circ\sim 70^\circ$ 俯仰运动, 定位精确度优于 0.1° 。实测平板微波天线各项参数均能达到设计要求, 微波测试方向图形态良好, 波束指向满足要求。

关键词: 大型平板微波天线; 桁架结构背架; 有限元仿真

中图分类号: TN821⁺.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0278

Engineering design on pitch system of large plate microwave antenna

XIA Xuguang, YAO Hongping, LIU Chaoyang

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou Henan 450047, China)

Abstract: The pitching system of a large plate microwave antenna is studied. A truss structure with high strength and light weight is designed as the antenna back frame. According to the index requirements, the mathematical model process is allocated through accurate mechanical calculation to select the structure elements such as motor and reducer. Through the finite element simulation of the key structure and the hardening design of high power microwave, the whole pitch system is further guaranteed to complete the experiment. The load is up to two tons, the rotation speed is 10° per second, and the range of pitch motion is $0^\circ\sim 70^\circ$. The positioning accuracy is better than 0.1° . All the parameters can meet the design requirements. The direction pattern of the microwave test is good, and the beam direction meets the requirements.

Keywords: large plate microwave antenna; truss structure back frame; finite element simulation

在大型平板微波天线系统的工程研制中, 俯仰系统既要具有良好的刚性、强度, 以便承载天线质量, 保证天线平面精确度, 又要具有快速反应能力, 以便迅速调整角度, 精确定位。本文设计了以工字钢桁架结构为基础, 负载能力、刚性、质量等指标较好的一款背架结构, 并对俯仰整体运动进行了系统设计, 整套系统能够很好地满足工程要求。

1 俯仰系统组成及结构设计

1.1 俯仰系统组成

本方案中, 俯仰结构采用了电机、齿轮传动机构作为俯仰运动的驱动方式。齿轮传动机构主要由驱动电机、减速箱、减速齿轮、力矩平衡机、手动升降装置等组成^[1-3]。平衡机平衡大部分重力矩, 驱动电机通过减速机减速, 再通过减速齿轮第二级放大, 利用电机正反转完成俯仰运动, 通过编码器完成精确定位。俯仰伺服子系统由伺服机构、电机、伺服驱动器、测角单元、保护单元、伺服控制器、通信接口电路等组成。伺服控制器经过总线接收到上位计算机命令后, 通过伺服驱动器控制电机驱动负载按预定要求运动, 同时把俯仰角度及俯仰工作状态通过总线发送给上位机^[4-5]。组成原理如图 1 所示。

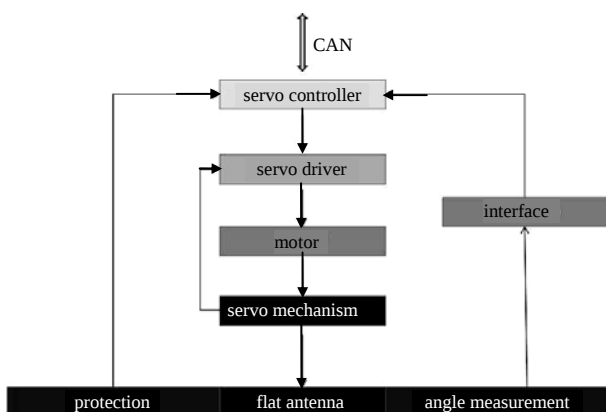


Fig.1 Schematic diagram

图1 原理图

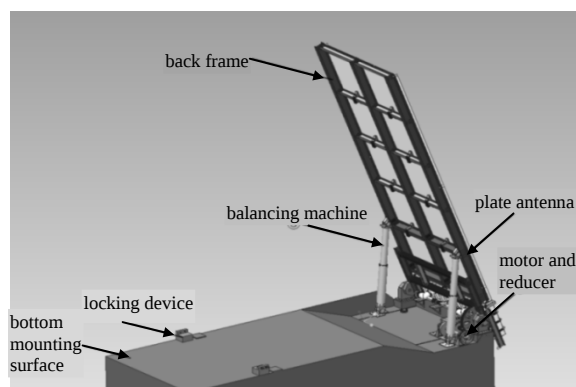


Fig.2 Integrated structure of elevation system

图2 俯仰系统整体结构

1.2 俯仰系统结构设计

综合考虑已有工程条件及指标要求,俯仰系统整体结构设计如图2所示^[6-8]。方案中,背架整体通过底部安装面后方安装的2个轴承座进行定位,轴承座中安装有测角装置。天线整体通过天线面边缘固定,天线背面通过连接件连接,并在后方与背架进行刚性连接,将天线定位并牢固固定在背架上。背架下方,安装有平衡机构,上端安装在整体重心位置,下端固定在下沉底部,机构通过压缩弹簧平衡大部分的重力力矩,并且具有机械限位作用。在背架下方一侧,装有电机减速机及齿轮机构,通过较大的减速比提升力矩来驱动背架及天线完成俯仰运动^[9]。同时,增加了手动升降装置,便于加电前安装及调整。整体结构由电机驱动,通过减速器、齿轮的减速增加输出力矩,输出端大齿轮与背架进行刚性连接,推动背架绕后方轴承座中钢轴进行俯仰运动,同时,通过轴承座中编码器及旋转变压器及时反馈角度信息,完成俯仰角度的精确控制^[10]。方舱前部,安装有0°锁紧装置,便于交通运输。

1.3 俯仰系统结构的理论计算

俯仰天线产生的力矩包括重力矩、惯性力矩、摩擦力矩及风力矩。

1) 重力矩分析计算

对各个主要部件分析得到:天线在0°时,重力矩最大,为:

$$M_Z = G_1 L_1 + G_2 L_2 + G_3 L_3 \quad (1)$$

式中: G_1 为天线重力; G_2 为背架重力; G_3 为电机及控制箱重力; L_1 为天线重力力臂; L_2 为背架重力力臂; L_3 为电机及控制箱力臂。

2) 惯性力矩分析计算

转动惯量公式如下:

$$M_G = \epsilon m d^2 / 3 \quad (2)$$

式中: ϵ 为转动加速度; m 为总质量; d 为平板顶端距旋转轴距离。

3) 摩擦力矩分析计算

俯仰轴旋转时存在轴系摩擦带来的摩擦力矩,初步估算摩擦力矩为:

$$M_M = G K L_M \quad (3)$$

式中: G 为总重力; K 为摩擦系数; L_M 为摩擦力作用力臂。

4) 风力矩分析计算

$$M_F = 0.5 \rho (V \sin \alpha)^2 S L_4 \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度(标况为 1.293 kg/m^3); V 为空气流速, $V=9.35 \text{ m/s}$ (参考五级风速); S 为平板天线迎风面积; L_4 为平板中心到转轴的距离。

5) 总力矩的运动过程合成

为了分析整个过程中各部件力及力矩变化过程,对图3所示模型进行简化建模并分析,简化模型如图4所示。图4中, F_T 为平衡机弹簧推力; G 为重力; c 为弹簧长度(运动中); a, b 为运动过程中三角形两边的长度; $\angle A$ 为运动过程中边 a 与 b 的夹角; $\angle AA$ 为运动过程中边 a 与水平面夹角; $\angle B$ 为运动过程中边 a 与 c 的夹角; $\angle C$ 为推力竖直夹角。

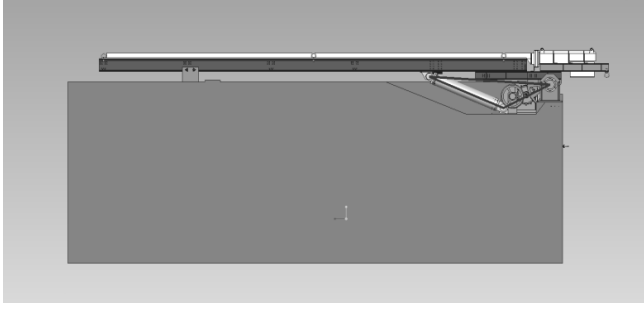


Fig.3 Simplification diagram of model
图 3 模型简化示意图

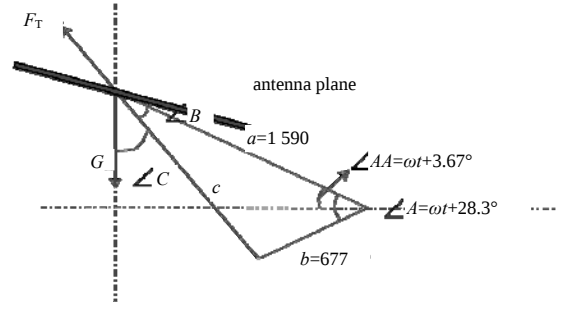


Fig.4 Model simplification
图 4 模型简化

在该模型中, 设定: L_0 为弹簧原长; C_0 为初始位置时弹簧长度; K 为弹簧弹性系数。

以上参数部分变量关系如下:

$$c = a^2 + b^2 - 2ab \cos \angle A \quad (5)$$

$$F_T = k(L_0 - c) \quad (6)$$

$$\sin \angle B = \frac{b \sin \angle A}{c} \quad (7)$$

$$\cos \angle B = \sqrt{1 - \left(\frac{b \sin \angle A}{c} \right)^2} \quad (8)$$

$$\angle C = 90^\circ - \angle A - \angle B \quad (9)$$

总体整个运动过程必须满足力矩平衡, 平衡关系如下:

$$M_Z + M_G + M_M + M_F = M_T + M_l \quad (10)$$

式中 M_l 为电机作用在俯仰机构上的力矩大小。

在该运动过程中, 设定角速度为 ω , 时间为 t , 则俯仰角度为 ωt 。由此, 可以推出各个力矩值对应转动角度的函数关系:

$$M_Z = M_{Z, \max} \cos(\angle AA) \quad (11)$$

$$M_F = M_{F, \max} \sin(\angle AA) \quad (12)$$

$$M_T = F_T \times a \sin \angle B \quad (13)$$

$$M_l = M_d \times 80\% \times N_1 N_2 \quad (14)$$

式中: N_1 为减速机减速比; N_2 为二级齿轮减速比。

由于风力矩方向的不确定性, 按照其作用效果不同, 分为与平衡机效果相同及相反 2 种情况(两者效果相反, 绝对值最大), 取其最大值进行分析, 同时综合加入惯性力矩、摩擦力矩进行考虑, 得到整个系统需要电机负载的力矩值分别为 $14.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $24.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 如图 5、6 所示:

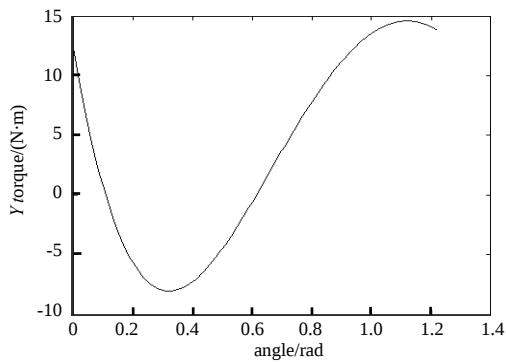


Fig.5 Variation diagram of motor output(opposite effect)
图 5 电机输出载荷变化图(风力矩与平衡机作用效果相反)

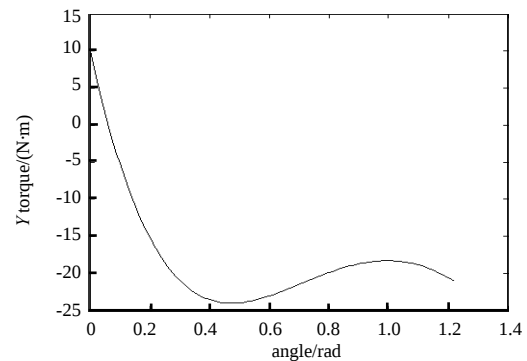


Fig.6 Variation diagram of motor output(same effect)
图 6 电机输出载荷变化图(风力矩与平衡机作用效果相同)

2 俯仰系统结构件——背架结构设计仿真分析

2.1 背架结构设计

天线背架是平板天线的支撑和安装平台,主要用于可靠地固定平板天线并和天线一起绕旋转轴做俯仰运动。由于平板天线外形尺寸和质量都较大,因此天线背架需采用合理的结构形式来满足强度和刚度要求。

本方案采用工字钢组成的桁架结构进行背架设计,其结构如图7所示。桁架结构分为上下2层,上层中3根主梁为16号工字钢,主要承担大部分重量。结构增加了6排横梁加强侧向强度,由于整体重心偏后方,后方2排使用16号工字钢作为短梁,其余使用10号工字钢作为短梁。为加强后侧强度,在后方增加了第二层桁架结构,并对该层的关键位置增加了加强筋。最后方2根短工字钢用于固定天线平板后方电机及控制箱等结构。在第一层上方安装了6个M20的吊环螺栓,用于吊装背架及天线,在第二层的后方亦有2个M20的吊环螺栓,为预留的后方拉伸弹簧的位置。整体结构中,每根工字钢的连接位置使用了角钢作为连接件,通过螺钉进行连接。

2.2 背架结构仿真

对背架模型进行简化,除去一些零件,并在受力位置增加特征面;对于一些圆角、倒角等特征进行曲面合并操作,减少部件表面、接触面、锐角位置,使有限元的划分更有利。同时,这些改变并不会对零件力学特性造成影响^[11-12]。

对承载面方向进行受力分析:首先进行材料属性赋值,载荷设定为集中点力,按照重心位置进行合理分布,主要质量分布在重心与轴中间,总质量约为1.7 t;随后对边界条件进行定义、有限元划分,负载设定为2.5 t;最后完成零件的有限元分析,仿真分析结果如图8所示。从图中可以看到,虽然主要质量加载在背架后方,但后方双层桁架结构具有较好的力学特性,形变量小于1 mm,而背架前端,由于距离支撑点较远,形变量最大达到1.476 mm。

对背架左右方向进行受力分析:在背架前端施加向上2 000 N的力,其余条件不变,结果如图9所示,最大形变0.923 mm。

对背架前后方向进行受力分析:在背架前端施加向上2 000 N的力,其余条件不变,结果如图10所示,最大形变0.165 7 mm。

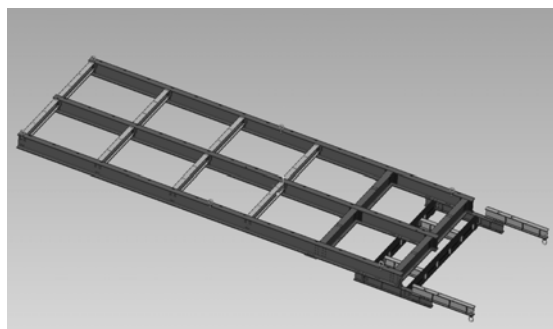


Fig.7 Schematic diagram of back frame structure
图7 背架结构示意图

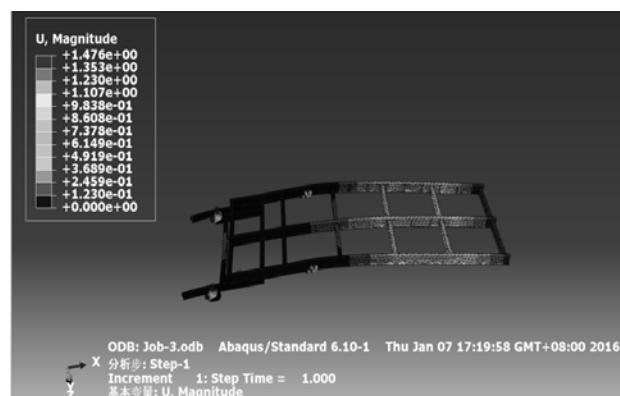


Fig.8 Finite element analysis of back frame(upper and lower direction)
图8 背架有限元分析(上下方向)

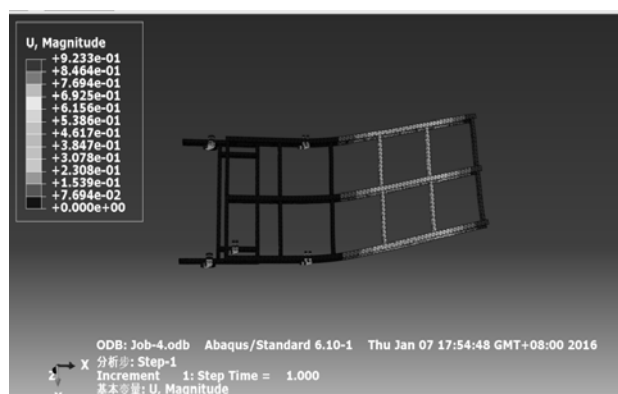


Fig.9 Finite element analysis of back frame(left and right direction)
图9 背架有限元分析(左右方向)

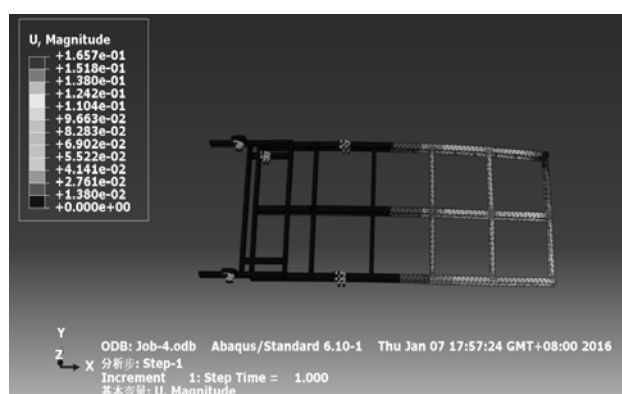


Fig.10 Finite element analysis of back frame(front and back direction)
图10 背架有限元分析(前后方向)

综上力学分析可知:在分析设定质量与实际负载质量大致相等的情况下,背架结构能够满足设计指标要求,并具有一定的余量,在前后方向及左右方向上并没有多大的负载,但在2 000 N的力作用下,形变量均不足1 mm,体现了较好的力学结构特性。

3 电磁兼容性设计

系统中包括的电源种类较多,电磁兼容设计非常重要,同时,由于可能受到天线的电磁辐射干扰,需采取多种措施来解决电磁兼容性问题^[13-14],主要考虑从以下几方面着手:

1) 信号隔离:强电与弱电之间采用光电隔离驱动,信号传输采用屏蔽线。

2) 接地:系统中对各种电源以及继电器、开关电路、电动机等噪声电平较高的部件,要引出各自独立的地线,分组并联,单点接地,在合适位置预留接地设计。

3) 接线屏蔽:所有对外引线采用高温屏蔽导线。具体做法,所有涉及的器件选型时均考虑电磁屏蔽的要求;凡是密封箱体,在其密封处利用导电橡胶条形成屏蔽壳体;关键元器件利用导电银布进行包裹;暴露在外的器件、电线用导电银布进行多层包裹等。

4 结论

在该工程中,天线工作面为大约6 m×2 m的长方形,俯仰系统承载总重达到2 t左右,角速度最高可达到10°/s,可以完成0°~70°俯仰运动,定位精确度优于0.1°。微波实验方向图形态良好,波束指向满足要求^[15]。

如此大的尺寸、总重量对结构设计的刚性,运动中的稳定性等有着非常高的要求。结合工程条件及指标要求,经过合理理论计算及力学仿真所设计的大型平板天线俯仰系统,在工程使用中能够满足指标要求,并顺利完成实验任务。

参考文献:

- [1] 李杰,葛化敏. 雷达中伺服驱动单元设计应用[J]. 科技创新, 2012(23):26-27. (LI Jie, GE Huamin. Design and application of servo drive unit in radar[J]. Technological Innovation, 2012(23):26-27.)
- [2] 马万奎. 一种双频天线俯仰连动机构设计[J]. 河北省科学院学报, 2017,34(1):57-61. (MA Wanlei. Design of a dual-frequency antenna pitching mechanism[J]. Journal of Hebei Academy of Sciences, 2017,34(1):57-61.)
- [3] 颜长锋,傅卫平,朱育刚. 某大型雷达天线俯仰机构的设计[J]. 电子机械工程, 2008,24(3):34-38. (YAN Changfeng, FU Weiping, ZHU Yugang. Design of a large radar antenna pitching mechanism[J]. Electro Mechanics, 2008,24(3):34-38.)
- [4] 宋玲,蔡祥宝. 雷达主机与雷达伺服通信接口设计[J]. 计算机技术与发展, 2017,27(9):197-200. (SONG Ling, CAI Xiangbao. Design of servo communication interface between radar host and radar[J]. Computer Technology and Development, 2017,27(9):197-200.)
- [5] 吕东阳,王显军. 基于模糊PID控制的电机转台伺服系统[J]. 计算机应用, 2014(z1):166-168,185. (LYU Dongyang, WANG Xianjun. Motor turntable servo system based on fuzzy PID control[J]. Computer Application, 2014(z1):166-168,185.)
- [6] 成大先,王德夫. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2007. (CHENG Daxian, WANG Defu. Mechanical design manual[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2007.)
- [7] 叶尚辉,李再贵. 天线结构设计[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1986:53-60. (YE Shanghui, LI Zaigui. Antenna structure design[M]. Xi'an, China:Northwest Telecommunication Engineering Institute Press, 1986:53-60.)
- [8] 王先奎. 机械制造工艺学[M]. 北京:机械工业出版社, 1995:200-300. (WANG Xiankui. Mechanical manufacturing technology[M]. Beijing:Machinery Industry Press, 1995:200-300.)
- [9] 汤廷松,陈继华,李宗春. 大型天线俯仰大齿轮的安装与调整[C]// 现代工程测量技术发展与应用研讨交流论文集. 宁波:[s.n.], 2005:344-351. (TANG Tingsong, CHEN Jihua, LI Zongchun. Symposium on installation and adjustment of large antenna pitch gear[C]// Development and Application of Modern Engineering Surveying Technology. Ningbo, Zhejiang, China:[s.n.], 2005:344-351.)
- [10] 杨黎都,张德锋,王立冬,等. 转台对天线阵列角模拟精度的影响[J]. 光电与控制, 2013,20(11):100-104. (YANG Lidu, ZHANG Defeng, WANG Lidong, et al. The influence of turntable on the accuracy of antenna array angle simulation[J]. Electro-Optic and Control, 2013,20(11):100-104.)

(下转第287页)