

大型回转网状天线风阻计算及其对动平衡影响研究

陈鹏翔, 贺尔铭, 姚瀚宇, 黄峻峰, 舒俊成

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

摘要:在地面动平衡配平试验中,由于大型回转网状天线主反射器受风阻的影响,卫星天线难以得到正确配平结果。为了解决这一问题,对大型回转网状天线在低压环境与地面标准大气压环境中风阻影响下的动平衡问题进行了研究。以理论分析及圆柱绕流二维试验数据为基础,提出了基于CFD三维流场分析的大型回转网状天线风阻计算方法,将回转状态下网状天线主反射器的分布风阻等效为作用点位于各象限的主矢、主矩,进而通过动力学等效法转化为配平面上的偏心质量,为估算风阻对大型网状天线动平衡精度的影响从而补偿风阻效应提供了一条可行的创新途径。结合某型星载网状天线地面动平衡需求,建立了网状天线的整体有限元模型,进行了地面动平衡配平试验仿真,分析了风阻对天线地面动平衡配平结果的影响,为补偿风阻影响、保证天线在轨配平精度提供了重要数据。

关键词:大型网状天线;动平衡试验;风阻等效;圆柱绕流

中图分类号:V416.2

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2021)03-0549-09

载人航天及卫星通信技术的迅猛发展对星载天线的动力学性能及精度提出了更高要求,因而具有可展开、大收缩比的大型回转网状天线逐渐成为未来星载天线构型的发展趋势,例如XOVWM卫星^[1-2]与SMAP^[3-4]卫星的星载天线。星载天线在工作过程中为了扩大扫描覆盖范围需要实现低速旋转功能,而其结构的非轴对称性及质心与旋转中心不重合的构型会直接引入较大的静、动不平衡量,特别是天线的动不平衡量会使天线结构产生涡动,直接影响天线型面保形与姿态控制精度,进而导致天线出现指向误差,严重影响空间站及卫星的通信性能^[5-6]。因此星载天线的地面动平衡配平试验尤为重要。

轴对称回转系统动平衡问题起初主要在诸如航空发动机^[7]、直升机旋翼^[8]等的转子动力学领域内被广泛研究。为实现空间在轨环境的真实模拟,以往小型星载天线的地面动平衡试验都必须将卫星天

线放入模拟真空环境低压罐中进行配平试验^[9],但通常大型网状天线展开后直径可达6~10 m甚至更大,设计制作与之匹配的低压罐较为困难且成本较大,因此目前只能在地面气压环境中开展大型天线配平试验。低压和地面气压环境势必会对大型回转天线展开后的网状反射面和支架结构产生风阻^[10],进而影响天线动平衡试验的配平结果。对于传统的实体结构天线而言,可使用CFD流场分析软件进行完整的天线建模与风阻仿真^[11],但由于大型网状天线结构及细节处的绕流特性十分复杂,难以使用现有商用软件直接进行分析风阻,加之国内外现有大型网状天线风阻计算的相关资料极少,因此该类天线地面配平实验中风阻分析的研究充满了挑战。

回转网状天线的风阻主要产生于主反射器椭圆形桁架、前后索网面、金属丝网反射面和纵向调节索^[12]。虽然无法从网状天线主反射器整体结构进行风阻的仿真分析,我们可以考虑将主反射器进行

收稿日期:2020-10-08

作者简介:陈鹏翔(1997—),西北工业大学硕士研究生,主要从事结构动力学与振动控制、力学仿真分析研究。

通信作者:贺尔铭(1964—),西北工业大学教授,主要从事飞机结构动力学与振动控制研究。e-mail:heerming@nwpu.edu.cn

拆解,将拆分后的基础独立结构视为圆柱绕流的情况进行分析。目前已有大量针对圆柱绕流的试验及仿真分析的研究^[13-14],其中沈国辉等^[15]针对光滑圆柱在风洞中进行了均匀流下的扰流试验,提供了雷诺数与阻力系数的对应关系;邓小兵等^[16]用大涡模拟数值方法研究了三维方柱绕流问题,并将数值计算结果与相关文献结果进行对比。

本文基于二维圆柱绕流、三维方柱绕流的研究结果,将大型网状天线主反射器拆分为多级子结构进行流场计算及风阻分析,再依次进行叠加,最终得到整体网状天线主反射器的风阻特性,进而研究风阻对网状天线动平衡配平试验的影响规律和补偿方法。本文提出的大型回转网状天线风阻分析方法可为其地面动平衡试验提供理论基础和数值依据。

1 模型建立与分析流程

1.1 结构模型建立

本文研究的网状天线主反射器(见图 1)由椭圆形桁架、前索网面、后索网面、金属丝反射网面以及纵向调节索组成。丝网膜由直径为 0.05 mm 的圆柱丝组成,尺寸很小未建立对应的几何模型,不出现在示意图中。各类部件在风阻下的响应特性不同,对各类结构的结构简化建模思路和处理方法见图 2。纵向调节索、环形桁架以及金属丝网反射面均为圆柱体,其特征尺寸是圆柱截面直径;前、后索网面为扁矩形碳带,其特征尺寸为碳带宽度。

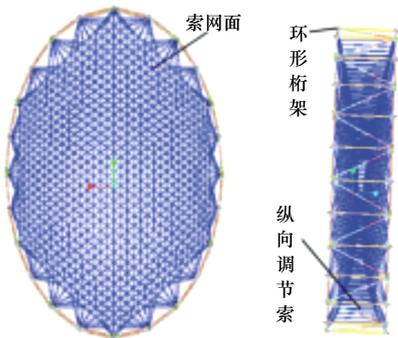


图 1 网状天线主反射器结构图

1.2 分析流程

大型网状天线主反射器风阻计算的主要思路及流程如图 3 所示:

- 1) 首先对各结构构型进行分类,根据不同的结构构型分析每个部件的简化方法并构建其等效模型,并以各自特征尺寸建模进行风阻计算;
- 2) 利用仿真软件计算各部件各子单元之间的关系,参考相关文献验证计算的可行性及准确性;
- 3) 基于相关参考文献,提取雷诺数与阻力系数的数据表,通过计算出的雷诺数插值得出相应的阻力系数,进而进行风阻的计算;
- 4) 网状天线为对称设计,为避免回转过程中各象限受力的相互抵消,采用 4 个象限来描述网状天线的受力情况及力矩。使用 MATLAB 软件进行编程,计算每个部件不同象限的受力情况;
- 5) 针对结构中的各构件,分析各部件的风阻,包括所受气动力及作用的位置;
- 6) 综合网状天线各个结构中的风阻,获得总合力(主矢)、总力矩(主矩)及其作用点位置。

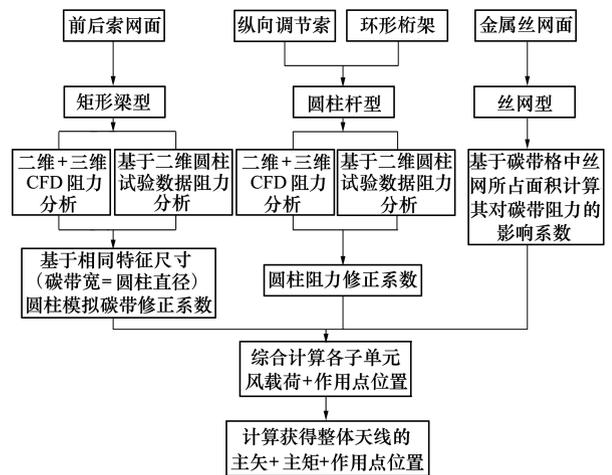


图 3 网状天线主反射器风阻分析流程图

2 各结构风阻分析

2.1 桁架与纵向拉索的风阻模型分析

环形桁架和纵向拉索均能够分解为圆柱杆,能够直接基于圆柱绕流模型进行风阻的分析计算。利用 Fluent CFD 仿真软件分析圆柱杆的二、三维模型,分别求得阻力系数并进行对比,之后再 CFD 计算结果与二维圆柱绕流的试验数据进行对比,从

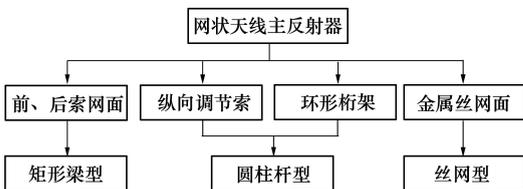


图 2 主反射器简化建模思路

而获得环形桁架与纵向拉索的风阻仿真修正系数。

将几何模型导入 ICEM 软件中进行网格划分,如图 4 所示;检查网格质量,如表 1 所示。

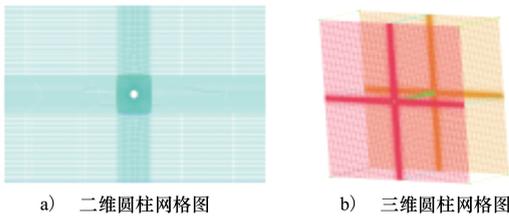


图 4 圆柱网格图

表 1 圆柱模型网格质量检查

模型	单元数	质量(Q)	角度质量(A)
圆柱(二维)	31 752	0.9~1	49.5~90
圆柱(三维)	790 784	0.85~1	58.5~90

在 Fluent CFD 流场分析软件中使用 RNG 或 SA 湍流模型求解。根据工作状态下网状天线边缘桁架线速度近似值,设定材料属性为理想气体,速度为 $V=2\text{ m/s}$,边界条件 inlet 为 2 m/s ,三维计算中的参考面积设为 1。可计算得二维圆柱阻力系数为 1.121 7,三维圆柱阻力系数为 $9.058\ 5\times 10^{-4}$ 。

工况速度 2 m/s 对应的雷诺数为

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{1.225 \times 2 \times 7 \times 10^{-3}}{17.9 \times 10^{-6}} = 958 \quad (1)$$

式中: ρ 为大气密度; v 为来流速度; d 为特征长度; μ 为黏性系数。

依据有关圆柱绕流试验文献[12,15],获得二维情况下圆柱绕流雷诺数与阻力系数曲线。

将(1)式所得雷诺数在图 5 中插值可得阻力系数为 1.175 8,与上文中二维仿真计算结果接近,认为仿真计算正确。

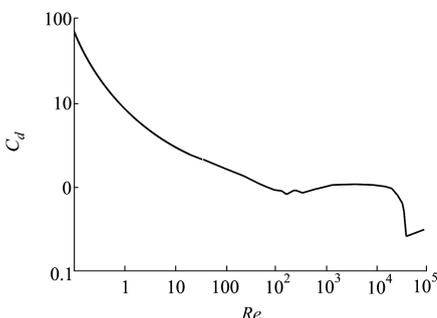


图 5 雷诺数与阻力系数关系图

表 2 二维与三维 CFD 仿真阻力对比

维数	模型/mm	阻力/N
二维	圆柱(7)	28.84×10^{-4}
三维	圆柱(7×150)	22.19×10^{-4}

对比二维、三维圆柱的 CFD 阻力计算可知二维与三维结果有一定差异,建立(2)式所示的修正系数来调整由二维圆柱绕流模型计算所得的阻力。

$$C_{1} = a \times \frac{F_{3d} + F_{pro}}{F_{pro}} \quad (2)$$

式中, F_{3d} 是三维圆柱阻力; F_{pro} 是二维试验数据所得阻力;系数 a 是一个系数,用来表征综合三维圆柱和二维试验数据来模拟真实条件下的圆柱风阻。该系数的选取原则为:

1) F_{pro} 作为真实情况上限,因为使用二维试验数据计算的风阻忽略了横向流动;

2) F_{3d} 比真实风阻低,因为三维圆柱阻力忽略了周围子结构产生的流场干扰问题;

3) 由于实际结构复杂,圆柱风阻高于 F_{3d} 与 F_{pro} 的平均值,因此桁架与纵向拉索应采用修正系数 C_1 进行修正。综上所述, a 取 0.7。

2.2 碳带的风阻模型分析

对于前、后索网面结构而言,等截面矩形碳带不是圆柱形,但通过 Fluent CFD 仿真软件分别计算出二维、三维圆柱直杆与矩形截面碳带的阻力系数并与试验数据对比,可以建立该扁矩形与相同特征尺寸的圆柱绕流阻力系数之间的转化关系,从而使前、后索网面结构也能够简化为圆柱模型。

与 2.1 节方法相同,建立模型,使用 Icem 软件划分网格并检查网格质量,导入在 Fluent CFD 中进行分析计算。界条件与桁架和纵向拉索相同,计算二维碳带与三维碳带阻力系数,计算得二维碳带阻力系数为 3.034 5,三维碳带阻力系数为 $2.990\ 5\times 10^{-3}$ 。

根据二维圆柱绕流阻力公式 $C_d = F_d / (q \times d)$,且 $q = 0.5\rho v^2$,可得二维矩形碳带的阻力为

$$F_{2d} = 3.186 \times 10^{-3} q \quad (3)$$

在三维碳带绕流阻力的分析中,参考面积为 1,根据上文可得三维矩形碳带的阻力为

$$F_{3d} = 2.990\ 5 \times 10^{-3} q \quad (4)$$

可得二、三维矩形碳带阻力计算误差为 6.5%。

表 3 仿真阻力系数计算结果表

维数	模型/mm	阻力系数 C_d	C_{dp}/C_{dy}
二维	平板(7×0.25)	3.034 5	2.705 2
	圆柱(7)	1.121 7	
三维	平板(7×0.25×150)	$2.990 5 \times 10^{-3}$	3.029 1
	圆柱(7×150)	$9.058 5 \times 10^{-4}$	

表 3 分别展示了二维和三维情况下圆柱杆与碳带的阻力系数计算结果,其中 C_{dp} 为同一维度下平板的阻力系数, C_{dy} 为同一维度下圆柱的阻力系数。后续计算碳带风阻时,可视为 3 倍圆柱模型风阻。

2.3 考虑结构干扰的风阻模型分析

由于网状天线子结构复杂,无法直接用于风阻计算,因此寻求局部结构相似的等效简化。为了计入子结构之间流场干扰情况下的风阻,建立一个田字形的微小单元体结构作为研究对象,用来简化模拟网状天线局部多处交叉的几何结构。田字形模型由六根圆柱杆模型组合而成,与圆柱单元体计算结果比较,探究单根圆柱杆的阻力系数与微小单元体的阻力系数之间的关系,从而研究流场干扰影响系数。建立几何模型,划分网格,如图 6 所示:

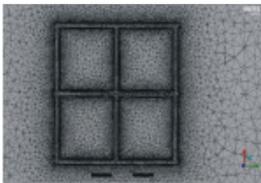


图 6 微小单元体结构网格图

采用 SA、RNG 湍流模型分别求解,结果对比如表 4 所示:

表 4 采用 2 种模型计算圆柱单元体与田字形的结果

模型	圆柱阻力系数 C_d	田字形阻力系数 C_t	C_t/C_d
SA	$1.222 4 \times 10^{-5}$	$5.989 9 \times 10^{-5}$	4.9
RNG	$1.258 6 \times 10^{-5}$	$6.035 4 \times 10^{-5}$	4.8

微小田字形模型与圆柱单元体个数之比为 6,但二者的阻力系数之比仅为 4.9,4.8,说明各子结构之间存在相互耦合的流场干扰。接下来在计算金属丝网面的风阻的过程中,需要考虑各圆柱杆之间相互耦合的影响。拟使用面积近似等效法,将金属丝网等效移动至邻近的碳带上。为此,需先对单根杆进行阻力系数的修正。设修正系数为 C_2

$$C_2 = C_1 \times \frac{F_{CFD}}{6 \times F_{3d}} \quad (5)$$

式中, F_{CFD} 为田字形结构的阻力。子结构互相耦合带来流场干扰的碳带阻力公式为

$$F'_i = C_2 \times F_i \quad (6)$$

式中, F'_i 为修正后的碳带阻力。

2.4 金属丝网的风阻模型分析

对于金属丝网面而言,为克服其尺寸小、网格密度大带来的流场干扰、建模难度大的问题,采用根据一个碳带格中丝网结构与碳带的面积之比来确定丝网对碳带流场干扰造成的风阻影响系数的方法,对金属丝网临近碳带的风阻进行模拟。

假设丝网膜的面积为 S_s ,碳带的面积为 S_g ,由于碳带长度不一,这里采用平均长度进行风阻修正系数的分析。对于碳带,有等效特征参数 d ,因此碳带的等效面积 $S_g = L \times d$ 。对于丝网,有长度 l 、直径 d_s ,因此丝网的面积 $S_s = N \times l \times d_s$,其中 N 为碳带三角格中丝网小段的个数。

综上有 $C_3 = S_s/S_g$,其中 C_3 为丝网与碳带之间面积的倍数关系。结合丝网等效面积与流场干扰的修正系数可得丝网所受阻力

$$F_s = C_3 \times F'_i \quad (7)$$

式中: F_s 为一个三角碳带格中的丝网阻力; F'_i 是修正后的单根碳带的阻力。最终碳带阻力为

$$F''_i = \frac{2}{3} F_s + F'_i \quad (8)$$

综上,在大型网状天线各结构风阻的计算中,使用修正系数 C_1 修正了椭圆环形桁架和纵向调节拉索的阻力系数;使用修正系数 C_2 修正了前、后索网碳带结构基于圆柱绕流 3 倍阻力系数的计算结果;最后同时使用等效面积与修正系数,叠加得到总的风阻计算结果。

3 大型回转网状天线风阻分析

使用 MATLAB 软件对大型回转网状天线的风阻进行编程分析,网状天线主反射器分为前后索网面、纵向调节索、椭圆桁架和金属丝网四部分,分别以各自的风阻子程序计算。假定网状天线地面动平衡时回转角速度 $\omega = 20 \text{ r/min}$,对于整个网状主反射器而言,不同回转半径处的单元流场具有不同的线速度,计算其风阻时应分别考虑。

回转网状天线主反射器风阻分析流程见图 7:

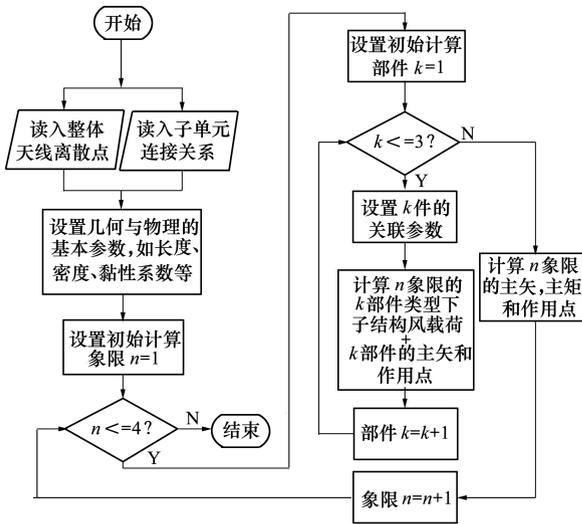


图 7 回转网状天线风阻编程分析流程图

大型网状天线风阻分析主要有以上 3 个工况,分别对应了试件体积过大无法装入低压罐时的海平面环境、5%标准大气压以及 0.27%标准大气压的低压罐罐内环境:

表 5 3 种工况参数

工况号	压强/Pa	密度/(kg · m ⁻³)
一	1.103×10 ⁵	1.225
二	5.529×10 ³	8.891×10 ⁻²
三	2.998×10 ²	4.003×10 ⁻³

其中大气压与密度均来自《空气动力学基础》中标准大气参数表(SI 单位制)。在动静平衡研究中,通常将大型网状天线置于笛卡尔坐标系中,将其受到的力、力矩以及作用点等使用 4 个象限来描述,如图 8 所示:

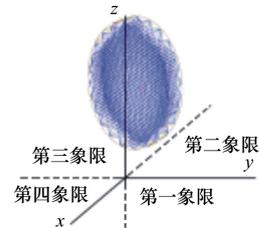


图 8 网状天线象限图

在 MATLAB 中编程求解得到相应的计算结果,各工况下各象限的主矢、主矩以及作用点见表 6~8。

表 6 工况一计算结果表

象限	主矢 F/N	主矩 M/(N · mm)	作用位置 P/mm
第一	(4.52, -0.06, 0)	(278.19, 23 410.50, -5 334.73)	(15.64, 1 180.55, 5 181.45)
第二	(1.28, 0.06, 0)	(-193.20, 4 968.41, -2 037.64)	(-70.48, 1 589.51, 3 882.41)
第三	(-1.40, 0.06, 0)	(-199.46, -5 275.51, -2 240.44)	(-72.27, -1 593.03, 3 757.50)
第四	(-4.55, -0.04, 0)	(172.02, -11 593.45, -5 353.58)	(10.40, -1 175.90, 2 546.80)

表 7 工况二计算结果表

象限	主矢 F/N	主矩 M/(N · mm)	作用位置 P/mm
第一	(0.49, -0.01, 0)	(36.05, 2 545.09, -564.08)	(18.02, 1 141.66, 5 152.27)
第二	(0.12, 0.01, 0)	(-21.70, 461.58, -182.60)	(-82.88, 1 546.94, 3 920.19)
第三	(-0.13, 0.01, 0)	(-22.07, -482.41, -200.42)	(-85.20, -1 555.08, 3 752.49)
第四	(-0.50, -0.01, 0)	(23.77, -1 291.90, -568.79)	(12.45, -1 136.06, 2 580.86)

表 8 工况三计算结果表

象限	主矢 F/N	主矩 M/(N · mm)	作用位置 P/mm
第一	(0.052, -0.001, 0)	(5.08, 264.60, -58.78)	(22.85, 1 129.41, 5 085.97)
第二	(0.011, 0.001, 0)	(-2.07, 42.39, -16.90)	(-85.80, 1 552.99, 3 906.38)
第三	(-0.012, 0.001, 0)	(-2.11, -44.53, -18.58)	(-87.87, -1 560.49, 3 750.65)
第四	(-0.053, -0.001, 0)	(4.21, -142.85, -59.23)	(19.06, -1 123.69, 2 711.36)

4 大型网状天线配平及风阻影响研究

4.1 风阻影响分析方法

根据转子动力学知识,在地面配平试验中使用有限元法计算天线的静、动不平衡量 G_1 与 G_2

$$G_1 = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n m_i x_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n m_i y_i\right)^2} \quad (9)$$

$$G_2 = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n m_i x_i z_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n m_i y_i z_i\right)^2} \quad (10)$$

式中: m_i 为天线第 i 个单元的质量; (x_i, y_i, z_i) 为天线第 i 个单元的质心坐标。

根据上一节计算结果,各工况风阻对网状天线的的作用效果均等效为各象限内作用点的力和力矩。对风阻的影响采用动力学等效方法,流程如下:

1) 选取 2 个垂直交于旋转轴 Z 的平面,交 Z 轴于 A, B 两点。根据平行移轴定理,将 4 个作用点的力平移至交点 A 处,因平行移轴产生的合力矩 M_{ox}, M_{oy} ,如图 9a) 所示。

2) 由于 Z 轴力矩 M_z 对不考虑形变的天线无影响,故继续将合力矩等效为作用在 A, B 两点,平行于两平面的力偶,如图 9b) 所示。

3) 叠加得到 A, B 处的合力 F_A, F_B ,即风阻产生的作用于转轴的等效离心力,如图 9c) 所示。

4) 根据 $F_N = m\omega^2 R$,将风阻产生的离心力等效为 F_A, F_B 方向上的质量块按工作转速产生的离心力,通过质量块的形式直观反映出风阻对动平衡的影响,如图 9d) 所示。

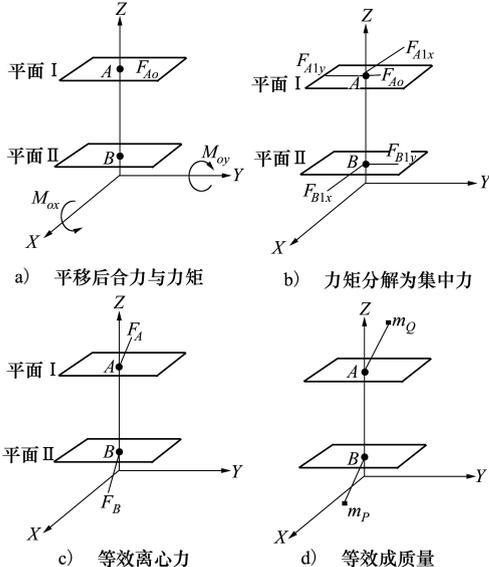


图 9 风阻影响等效质量分析流程图

4.2 大型星载网状天线配平研究

使用 MSC.Patran 建立整个大型星载网状天线的有限元模型,依次经过质量属性校核、惯性力载荷检查、自由模态检查以及工作模态分析等模型验证环节,天线有限元模型及配平面选取如图 10 所示。根据静、动不平衡量公式(9)至(10),使用 MATLAB 计算有限元模型中导出的各单元质量、质心信息,并计算其初始不平衡量。由于天线结构受限,只能在有限平面上的特定位置进行质量配平。通过对比研究选出最优配平方案:分别取高频箱下表面、副反射器上部筋条位置作为配平面,即坐标分别为 $(0, 0, 45.50)$ 与 $(0, 0, 1\ 088.42)$ 的平面,在质心位置 $(614.09, 368.68, 45.50)$ 处添加 4.54 kg 重物,在质心位置 $(-2\ 181.85, -88.89, 1\ 088.42)$ 处添加 3.54 kg 重物。

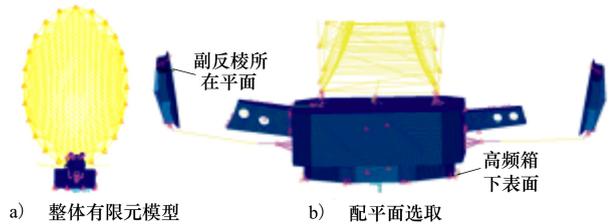


图 10 大型星载网状天线有限元模型及配平面选取

4.3 低压罐及地面气压下的风阻影响

根据上述风阻动平衡影响分析方法,以工况三的低压环境计算结果为例分析低压罐内风阻对大型网状天线动平衡的影响。

取两平面与旋转轴交点 A 为 $(0, 0, 1\ 088.42)$, B 为 $(0, 0, 45.50)$ 。分别在其对应位置计算 A, B 点离心力,可得 F_A 为 $[-8.45 \times 10^{-2}, -1.55 \times 10^{-3}, 0]$ N, F_B 为 $[-8.25 \times 10^{-2}, -1.55 \times 10^{-3}, 0]$ N。

在 F_A 方向上选取点 P 点 $(-845, -15.5, 1\ 088.42)$ mm,在 F_B 方向上选取 Q 点 $(825, 15.5, 45.5)$ mm。其中工作转速 $\omega = 20\ \text{r/min} = 2.09\ \text{rad/s}$ 。带入离心力公式可得到 P 点等效质量 m_p 为 $2.24 \times 10^{-5}\ \text{kg}$, Q 点等效质量 m_q 为 $2.24 \times 10^{-5}\ \text{kg}$ 。

低压罐内风阻对大型网状天线的影晌可等效为在 $(-845, -15.5, 1\ 088.42)$ 与 $(825, 15.5, 45.55)$ 两点处分别添加 $2.24 \times 10^{-5}\ \text{kg}$ 的质量块所产生的影响。

将计算所得的等效质量块带入卫星天线模型中,使用 MATLAB 分别计算卫星天线配平前后风阻带来的静、动不平衡量影响:

表9 配平前后低压罐风阻对动静不平衡量影响

不平衡量类型	添加风阻前		添加风阻后		影响程度/%	
	配平前	配平后	配平前	配平后	配平前	配平后
静不平衡量/($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$1.341 2 \times 10^4$	16.00	$1.341 1 \times 10^4$	15.56	0.000 075	2.75
动不平衡量/($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$1.747 0 \times 10^7$	2 692.75	$1.745 1 \times 10^7$	1 924 7.13	0.11	614.78

配平前施加风阻后静、动不平衡量均略有减小,这是因为风阻等效离心力方向与卫星天线自身不平衡力方向相反,即出现了部分抵消的情况。但如果将风阻等效质量块带入已配平的卫星天线中,会发现动不平衡量急剧增加,达614.78%,说明若低压罐中的配平不考虑风阻,则会与实际情况差异很大。

当天线尺寸过大,难以在低压罐中进行配平时,我们需要研究海平面标注大气压下的天线配平问题。使用工况一的计算结果分析地面气压下风阻对

表10 配平前后标准大气压风阻对动静不平衡量影响

不平衡量类型	添加风阻前		添加风阻后		影响程度/%	
	配平前	配平后	配平前	配平后	配平前	配平后
静不平衡量/($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$1.341 2 \times 10^4$	16.00	$1.337 7 \times 10^4$	18.68	0.26	16.75
动不平衡量/($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$1.747 0 \times 10^7$	2 692.75	$1.591 5 \times 10^7$	1.56×10^6	8.90	57 833.34

由结果可知,海平面标准大气压下风阻对天线动不平衡量的影响极其巨大,忽略风阻直接配平的误差可高达500余倍,将会带来严重后果。如果要在地面大气压下配平,则需要将风阻考虑在内重新进行计算配平质量。因此,在实际地面动平衡配平试验中,必须补偿风阻影响,才能正确模拟天线结构在轨的动平衡特性。

5 结论

针对大型网状天线在地面动平衡配平试验中受风阻的影响,本文提出了创新性的大型回转网状天线风阻计算方法,通过动力学等效转化为配平面上的偏心质量,实现了风阻与原不平衡量的叠加。经过计算得:风阻在低压、海平面标准大气压下对动平衡试验配平结果影响高达614.78%和57 833.34%。

1) 对大型网状天线的结构进行拆解和分析,确定了对该类天线风阻问题的研究方向。

卫星天线动平衡的影响。两平面所取位置与前文相同,计算A、B点集中力结果可得 F_A 为 $[-6.51, -0.035 9, 1 088.42]$ N, F_B 为 $[6.36, 0.055 6, 45.5]$ N。

在 F_A 方向上选取P点 $(-651, -3.59, 1 088.42)$ mm,在 F_B 方向上选取Q点 $(636, 5.56, 45.55)$ mm,等效质量为 2.24×10^{-3} kg。

同前文计算方法,将地面气压下风阻等效质量分别加入配平前后的卫星天线模型中,计算静、动不平衡量,结果见表10。

2) 以圆柱绕流试验的阻力系数为计算基础,通过对各部件2D、3D模型的CFD分析与试验结果相对应的方式,完成了各子结构自身及结构与结构间流场耦合情况下风阻计算的方法修正。

3) 使用MATLAB程序基于步骤2)中的修正方法,计算了整个大型网状天线在海平面标准大气压和2种低压工况下的风阻,并给出了各工况下天线在4个象限的主矢、主矩和作用点位置。

4) 使用动力学等效转化法,将各工况下天线的风阻在4个象限的主矢、主矩和作用点位置的信息等效转化为所选平面内的偏心质量。对风阻的该种处理方法为其他外载荷对天线动平衡的影响分析和配平补偿提供了新的研究途径。不过,在实际情况中,为了使星载天线地面动平衡试验配平更精确,除本文重点讨论的风阻影响之外,还需考虑重力、离心力、机箱内电子元件质心偏移及主副反射器展开角度的影响。

参考文献:

- [1] RODRIGUEZ E, STILES B W, DURDEN S L, et al. XOVWM: the next-generation ocean surface vector winds mission[C]//28th Conf on Hurricanes and Tropical Meteorology, Orlando, FL, 2008
- [2] RODRIGUEZ E, GASTON R W, DURDEN S L, et al. A scatterometer for XOVWM, the extended ocean vector winds mission[C]//IEEE Radar Conference, 2009: 1-4
- [3] ALVAREZ-SALAZAR O S. Pointing architecture of SMAP's large spinning antenna[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2013: 4560
- [4] ZENG J, CHEN K S, BI H, et al. A Preliminary evaluation of the SMAP radiometer soil moisture product over United States and Europe using ground-based measurements[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(8): 4929-4940
- [5] 薛孝补, 朱海江, 吕旺, 等. 卫星大型旋转载荷动平衡控制应用研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(8): 1001-1005
XUE Xiaobu, ZHU Haijiang, LYU Wang, et al. Application research on dynamic balance control for spaceborne large-scale rotary payload[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(8): 1001-1005 (in Chinese)
- [6] 王秋晓, 汪飞, 孔波. 一种改进的卫星旋转载荷动平衡的振动结构[J]. 振动与冲击, 2016, 35(3): 204-208
WANG Qiuxiao, WANG Fei, KONG Bo. Improved vibrational mechanism for dynamic balance of satellite-borne rotating payload[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(3): 204-208 (in Chinese)
- [7] 姜广义, 王德友, 焦业秋. 大型发动机转子本机平衡技术试验研究[J]. 航空发动机, 2008(1): 19-22
JIANG Guangyi, WANG Deyou, JIAO Yeqiu. Experimentd investigation of local balanced technique for large aeroengine rotor[J]. Aeroengine, 2008(1): 19-22 (in Chinese)
- [8] 周秋峰. 直升机旋翼动平衡优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013
ZHOU Qiufeng. Research on optimization of helicopter rotor dynamic balance[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (in Chinese)
- [9] 牛宝华, 姚瀚宇, 艾永强, 等. 星载天线地面动平衡试验仿真研究[J]. 航天制造技术, 2019(3): 32-36
NIU Baohua, YAO Hanyu, AI Yongqiang, et al. Dynamic balancing design simulation and ground test for satellite antenna[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019(3): 32-36 (in Chinese)
- [10] 龚燃. 美国“土壤湿度主动-被动探测”卫星将升空[J]. 国际太空, 2015(1): 31-35
GONG Ran. NASA's soil moisture active-passive(SMAP) mission set to launch[J]. Space International, 2015(1): 31-35 (in Chinese)
- [11] 王朋朋, 牛宝华, 艾永强, 等. 海洋二号卫星微波辐射计的动平衡设计仿真与试验[J]. 振动与冲击. 2016, 36(9): 1-6
WANG Pengpeng, NIU Baohua, AI Yongqiang, et al. Dynamic balancing design simulation and test for HY-2A satellite microwave radiometer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 36(9): 1-6 (in Chinese)
- [12] 邓歆献. 某雷达结构风荷载特性及抗风性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017
DENG Xinxian. Study on wind load characteristics and resistance performance of a radar structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese)
- [13] 李雪健. 较高雷诺数下串列方柱绕流的数值模拟[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014
LI Xuejian. Numerical simulation of flow around two prisms in tandem arrangement at high Reynolds numbers[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014 (in Chinese)
- [14] 马亮, 钱光平. 非球形风沙粒子的低雷诺数绕流阻力特性研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2011, 26(1): 19-23
MA Liang, QIAN Guangping. The study on the lower Reynolds drag around nonspherical sand particles[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(1): 19-23 (in Chinese)
- [15] 沈国辉, 姚剑锋, 郭勇, 等. 直径 30 cm 圆柱的气动力参数和绕流特性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(6): 22-28
SHEN Guohui, YAO Jianfeng, GUO Yong, et al. Aerodynamic coefficient and flow characteristics of a 30 cm-diameter circular cylinder[J]. Journal of Vibration and Shock. 2020, 39(6): 22-28 (in Chinese)
- [16] 邓小兵, 张涵信, 李沁. 三维方柱不可压缩绕流的大涡模拟计算[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(2): 167-172
DENG Xiaobing, ZHANG Hanxin, LI Qin. Large eddy simulation of 3-dimensional incompressible flow around a square cylinder[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(2): 167-172 (in Chinese)

- [17] HE Erming, YIN Geliang, HU Yaqi. Random vibration analysis and structural modification of satellite-borne equipment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(455):310-313

Wind resistance calculation of large rotary mesh antenna and its influence on dynamic balance precision

CHEN Pengxiang, HE Erming, YAO Hanyu, HUANG Junfeng, SHU Juncheng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Due to the wind resistance which acts on the main reflector of large rotary mesh antenna, the correct balancing result of satellite antenna is difficult to be gotten in the ground dynamic balancing test. In order to solve this problem, the dynamic balance method of large rotary mesh antenna which is under the influence of wind resistance in both low pressure environment and standard atmospheric pressure environment on the ground is studied. Based on the theoretical analysis and the experimental data of two-dimensional flow around circular cylinder, a new method of the large rotary mesh antenna wind resistance calculation is proposed, according to the CFD analysis of the three dimensional flow field. Through the dynamic equivalent method, the distributed wind resistance acted on the main reflector of the mesh antenna in the rotating state is equivalent to the principal vector and principal moment of the action point in each quadrant, and then transformed into the eccentric mass on the distribution plane. It provides a feasible and innovative way to estimate the influence of wind resistance on the dynamic balance accuracy of large mesh antenna, so as to compensate the wind resistance effect. Combined with the ground dynamic balancing requirements of a certain type of satellite mesh antenna, the whole finite element model of the mesh antenna is established, the simulation of ground dynamic balancing test is carried out, and the influence of wind resistance on the ground dynamic balancing results of the antenna is analyzed in this study, which provides important data for compensating the influence of wind resistance and ensuring the on-orbit balancing accuracy of the antenna.

Keywords: large mesh antenna; dynamic balance test; wind resistance equivalent; flow around circular cylinder

引用格式: 陈鹏翔, 贺尔铭, 姚瀚宇, 等. 大型回转网状天线风阻计算及其对动平衡影响研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(3): 549-557

CHEN Pengxiang, HE Erming, YAO Hanyu, et al. Wind resistance calculation of large rotary mesh antenna and its influence on dynamic balance precision[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(3): 549-557 (in Chinese)