



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107491594 B

(45)授权公告日 2020.07.14

(21)申请号 201710607715.7

(22)申请日 2017.07.24

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107491594 A

(43)申请公布日 2017.12.19

(73)专利权人 北京空间飞行器总体设计部
地址 100094 北京市海淀区友谊路104号

(72)发明人 张志娟 关晓东 邹元杰 苑广智
马炜 宫伟伟 于登云 刘绍奎

(74)专利代理机构 中国航天科技专利中心
11009

代理人 陈鹏

(51) Int. Cl.

G06F 30/20(2020.01)

G06F 30/18(2020.01)

(56)对比文件

- CN 106294970 A, 2017.01.04,
- CN 105956383 A, 2016.09.21,
- CN 106777501 A, 2017.05.31,
- CN 106934147 A, 2017.07.07,
- CN 105740517 A, 2016.07.06,
- CN 106816715 A, 2017.06.09,
- CN 105912781 A, 2016.08.31,

审查员 郭瑞

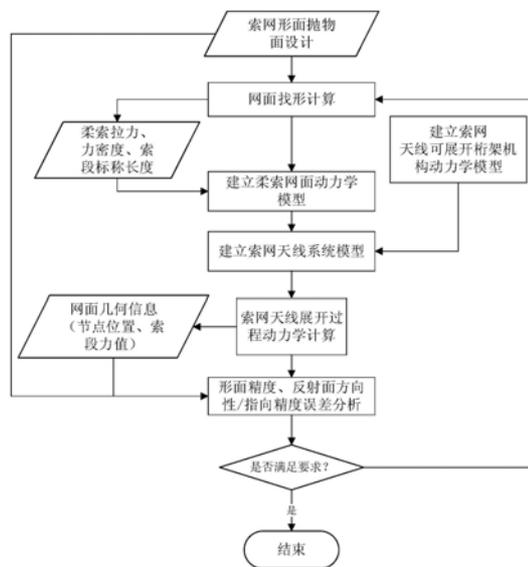
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种索网天线形面精度计算方法

(57)摘要

本发明克服现有索网天线形面精度计算方法的不足,考虑索网天线在轨展开过程对索网天线在轨展开后形面精度的影响,提出的计算流程可有效补充索网天线地面展开试验有地球重力和大气影响的不足,能较准确地预测索网天线在太空在轨工作状态下的形面精度及工作性能。同时提出根据节点与整个抛物面的最小距离计算误差均方根值,该方法能更准确反映天线的索网网面的光滑度;提出了一种指向误差计算方法,该方法能更直观反映天线索网网面的电信号反射精度。



1. 一种索网天线形面精度计算方法,其特征在于,包括步骤如下:

步骤一、对柔索网面的形面抛物面划分索网网格,根据静态找形方法计算得到各节点之间的柔索拉力数值、各个柔索段展开后的标称长度,得到静态找形网面;

步骤二,采用多体系统动力学的方法建立索网天线的桁架机构动力学模型,桁架机构动力学模型包括杆、铰链、转动关节、展开驱动卷簧动力学模型;

步骤三,基于步骤一计算获得的静态找形网面,采用珠式模型建立柔索网面的收拢状态动力学模型,模型包括集中质量点模型和节点之间柔索拉力模型;

步骤四,将步骤二和步骤三两个模型通过柔索网面与桁架机构的连节点组装为一个动力学模型,并做一次展开过程动力学计算,计算结果包括展开后柔索网面所有节点的几何位置、各柔索段的拉力值,得到展开计算柔索网面;

步骤五,基于步骤四的计算结果,计算展开计算柔索网面的形面精度误差 s ;

步骤六,基于步骤四的计算结果,计算展开计算柔索网面的指向精度误差 α ;

步骤七,如果步骤五和步骤六的形面精度误差 s 和指向精度误差 α 满足设定的阈值,方法结束;如果形面精度误差 s 和指向精度误差 α 不满足设定的阈值,调整柔索网面各单元的初始节点位置和初始拉力,返回步骤一。

2. 根据权利要求1所述的一种索网天线形面精度计算方法,其特征在于:所述步骤六的具体步骤如下:

步骤6.1、设电信号沿柔索网面的馈源照射方向平行入射,计算 m 个反射面单元中 M 个采样反射面单元接收到电信号后反射方向矢量与从入射点指向馈源矢量的夹角 α_ξ ;其中, $\xi=1,2,3,\dots,M$; M 为正整数;

步骤6.2、计算柔索网面的指向精度误差
$$\alpha = \frac{\sum_{\xi=1}^M \alpha_\xi}{M}。$$

3. 根据权利要求1或2所述的一种索网天线形面精度计算方法,其特征在于:所述步骤五中,柔索网面的形面精度误差 s 的计算公式如下:

$$s = \left(\frac{1}{N} \sum_{\lambda=1}^N (\delta_\lambda)^2 \right)^{1/2}$$

其中, N 为柔索网面的采样节点数,为正整数; δ_λ 为索网天线从收拢状态到展开状态过程中,柔索网面的采样节点与柔索网面的形面抛物面的最短距离, $\lambda=1,2,3,\dots,N$ 。

一种索网天线形面精度计算方法

技术领域

[0001] 本发明属于雷达天线技术领域,尤其涉及一种索网天线形面精度计算方法。

背景技术

[0002] 索网天线指采用柔性索网作为反射面(柔性索网反射面在后文简称柔索网面)的雷达天线。索网天线主要由可展开桁架结构和反射网组成。其中反射网一般为抛物面形状,反射网边缘有若干位置与可展开桁架结构连接。以目前国内外应用广泛的周边桁架式索网天线举例,结构组成包括可展开周边桁架、起支撑成形作用的柔性张力索网和反射网,其中柔性张力索网多为三向网格索网,其单元为三角形,金属反射网附着在前索网背部用来实现馈源信号反射。索网天线与常规刚性反射面天线相比具有展收比大、质量轻、折叠性好、展开后主结构刚度高等优点,当前已广泛用于国内外的通信卫星、遥感卫星、侦察卫星等航天领域。例如美国图拉雅(Thuraya-1)卫星重78公斤,收拢发射状态直径为1.3米,入轨展开后直径为12.25米,展收比达到10:1。

[0003] 对于索网天线这类由柔索网面和杆件可展结构组成的机构,由于组成柔索网面的柔索在不受轴向拉力时为松弛状态,只有展开拉紧后在应力作用下才有轴向刚度,而在拉紧前柔索组成的索网反射面的几何外形具有不确定性。因此柔性索网本身的设计和分析是不同可展桁架结构的索网天线的共性问题。索网天线设计与在轨应用的一项关键问题就是保证柔索网面在轨的展开后形面精度。形面精度是指柔索网面在轨展开后的形状和设计形状的一致性,形状和设计形面形状完全一致为精度最高情况。形面精度直接影响柔索网面的电性能。针对索网天线在轨展开后柔索网面的形面建模和精度计算通常称为找形或成形设计。实际工程中,在成形设计时用一系列节点和一定面积的三角单元逼近抛物面,成形结果和理想抛物面之间的形面偏差一般通过网面所有对应节点之间距离的均方根衡量。天线设计时通过求得最小均方根确定所在的最佳拟合抛物面,再得到满足精度指标要求的最少柔索数量或者最简网格划分。

[0004] 传统的索网天线网面精度的计算方法主要是动力松弛法、力密度法以及直接采用基于有限元方法。动力松弛法的基本思想是把结构的找形过程看作一个由动态到静态平衡的过程,在动态的衰减过程中,动能最大值的位置是结构的平衡位置,所以确定结构动能为极大值时的位置,即为找形的结果。力密度法是张力结构找形分析的主要方法,其基本思想是将索结构离散成节点和杆的网络模型,根据结构单元和节点之间的拓扑关系,同时设定力密度值或应力密度值建立关于节点的平衡方程组,从而求得各节点的坐标即相应的曲面形态。有限元法的主要思想是假定索单元的几何形状推导其位移模式,计算变形前后的索长变化,根据平衡方程或者能量原理来推导刚度矩阵,计算索单元端节点力和端节点位移的关系,集成结构整体平衡方程进行迭代计算。

[0005] 这几种方法的共性是直接考虑柔索网面展开状态形面,利用迭代优化的方法找到形面精度最高的各单元(或各节点之间)的张紧力以及对应的柔索网面各节点的几何位置坐标,也就是计算得到一个新的满足设计要求的柔索网面。

[0006] 传统的形面精度误差计算方法主要有两种,第一种是计算新柔索网面采样节点与标称网面对应的采样节点之间的竖向距离,然后求整个网面的均方根值;第二种是计算新柔索网面的采样节点和标称网面的包含该节点的单个反射面单元的距离,然后求整个网面的均方根值。

[0007] 索网天线在实际工程应用中都是以收拢状态发射,航天器入轨后天线在轨完成展开和机构锁定。因此单纯建立柔索网面展开状态模型作为找形和形面精度计算的方法有其局限性,计算结果只是所有平衡状态中的一个特解,不能考虑在轨展开过程的影响。同时,采用前述两种形面精度误差计算方法得到的结果受到柔索网面局部单元变形的影响很大,在评价整个柔索网面的形面精度方面有局限性,并且这两种方法得到的误差与网面的光滑度有较大关系,对于评价索网天线展开后的电性能的能力有限,有进一步改进的必要。

发明内容

[0008] 本发明要解决的技术问题是:克服现有技术的不足,提供一种索网天线形面精度计算方法。解决当前索网天线形面精度计算方法不能考虑在轨展开影响、不能全面反映形面平滑度和指向精度的问题。

[0009] 本发明所采用的技术方案是:一种索网天线形面精度计算方法,包括步骤如下:

[0010] 步骤一、对柔索网面的形面抛物面划分索网网格,根据静态找形方法计算得到各节点之间的柔索拉力数值、各个柔索段展开后的标称长度,得到静态找形网面;

[0011] 步骤二,采用多体系统动力学的方法建立索网天线的桁架机构动力学模型,桁架机构动力学模型包括杆、铰链、转动关节、展开驱动卷簧动力学模型;

[0012] 步骤三,基于步骤一计算获得的静态找形网面,采用珠式模型建立柔索网面的收拢状态动力学模型,模型包括集中质量点模型和节点之间柔索拉力模型;

[0013] 步骤四,将步骤二和步骤三两个模型通过柔索网面与桁架机构的连节点组装为一个动力学模型,并做一次展开过程动力学计算,计算结果包括展开后柔索网面所有节点的几何位置、各柔索段的拉力值,得到展开计算柔索网面;

[0014] 步骤五,基于步骤四的计算结果,计算展开计算柔索网面的形面精度误差 s ;

[0015] 步骤六,基于步骤四的计算结果,计算展开计算柔索网面的指向精度误差 α ;

[0016] 步骤七,如果步骤五和步骤六的形面精度误差 s 和指向精度误差 α 满足设定的阈值,方法结束;如果形面精度误差 s 和指向精度误差 α 不满足设定的阈值,调整柔索网面各单元的初始节点位置和初始拉力,返回步骤一。

[0017] 所述步骤六的具体步骤如下:

[0018] 步骤6.1、设电信号沿柔索网面的馈源照射方向平行入射,计算 m 个反射面单元中 M 个采样反射面单元接收到电信号后反射方向矢量与从入射点指向馈源矢量的夹角 α_ξ ;其中, $\xi=1,2,3,\dots,M$; M 为正整数;

[0019] 步骤6.2、计算柔索网面的指向精度误差
$$\alpha = \frac{\sum_{\xi=1}^M \alpha_\xi}{M}。$$

[0020] 所述步骤五中,柔索网面的形面精度误差 s 的计算公式如下:

$$[0021] \quad s = \left(\frac{1}{N} \sum_{\lambda=1}^N (\delta_{\lambda})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

[0022] 其中,N为柔索网面的采样节点数,为正整数; δ_{λ} 为索网天线从收拢状态到展开状态过程中,柔索网面的采样节点与柔索网面的形面抛物面的最短距离, $\lambda=1,2,3,\dots,N$ 。

[0023] 本发明与现有技术相比的优点在于:

[0024] (1) 本发明考虑到了天线在轨展开的影响,可较准确地预测索网天线在太空在轨工作状态下的形面精度及工作性能。

[0025] (2) 本发明提出根据节点与整个抛物面的最小距离计算误差均方根值,能更准确反映天线的索网网面的光滑度。

[0026] (3) 本发明提出的指向误差计算方法能更直观反映天线索网网面的电信号反射精度。

[0027] (4) 本发明提出的计算流程通用性好,可有效补充索网天线地面展开试验有地球重力和大气影响的不足,和地面试验相结合,可提高索网天线在轨形面精度。

附图说明

[0028] 图1为本发明的索网天线柔索网面构型图。

[0029] 图2为本发明的索网天线形面精度计算方法流程图。

[0030] 图3为本发明实施例的索网天线坐标系定义和指向精度计算示意图。

[0031] 图4为本发明实施例的三向网格索网类型示意图。

[0032] 图5为本发明实施例的柔索珠式模型示意图。

具体实施方式

[0033] 下面结合附图和实施例对本发明进行进一步说明。

[0034] 本发明实施例为某周边环形桁架式索网天线,展开口径30m,展收比为11.4:1。索网天线的桁架机构由30跨结构相同的平行四边形桁架单元组成。桁架展开到位后,前后索网、竖向张力索在内部拉力的作用下达到平衡位置,构成天线抛物面。其柔索网面构型如图1所示。

[0035] 如图2所示,一种索网天线形面精度计算方法,具体步骤如下:

[0036] 步骤一,依据索网天线在轨工作模式和电性能设计要求得到柔索网面的形面抛物面,创建笛卡尔参考坐标系如图3所示,抛物面方程如下:

$$[0037] \quad Z = \frac{X^2 + Y^2}{4f} \quad (1)$$

[0038] 其中,f为抛物面天线的焦距。(X,Y,Z)为柔索网面的抛物面上任一点坐标。

[0039] 步骤二,对步骤一抛物面按照图4所示的三向网格索网类型进行网格划分,划分后的索网共n个节点,m个反射面单元和k段柔索。根据力密度方法静态找形方法计算得到各节点之间柔索拉力数值、各个柔索段展开后标称长度,得到静态找形网面,找形结果为索网展开张紧状态下所有索段的力密度。该过程是求索网结构的一组预拉力,使得整个索网在周边桁架约束下为力平衡,并且满足最大和最小柔索拉力之比应尽可能小。n,m,k均为正整

数。

[0040] 网格划分后索网网面共包含k段柔索。每一段柔索的力密度 q_i 为:

$$[0041] \quad q_i = t_i / l_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, k) \quad (2)$$

[0042] 其中, t_i 为网面展开状态下第i段柔索的拉力, l_i 为网面展开状态下第i段柔索的长度。索网网面内节点j ($j=1, 2, 3, \dots, n$) 在X方向的静力平衡方程为:

$$[0043] \quad \begin{cases} \sum_{\mu \in C_j} q_{\mu} l_{\mu x} = 0 & \text{节点}j\text{为内部节点} \\ \sum_{\mu \in C_j} q_{\mu} l_{\mu x} = f_{gx} & \text{节点}j\text{为与桁架固定节点} \end{cases} \quad (3)$$

[0044] 式(3)中, C_j 为与节点j相连的节点组成的集合, q_{μ} 为节点j与相邻节点 μ ($\mu \in C_j$ 指节点 μ 属于集合 C_j) 之间柔索段的力密度, $l_{\mu x}$ 为节点j与相邻节点 μ 之间柔索段长度在X方向分量, f_{gx} 为桁架对节点j的约束反力在X方向分量。

[0045] 索网网面内节点j ($j=1, 2, 3, \dots, n$) 在Y和Z方向的静力平衡方程与式(3)形式相同。

[0046] 优化模型如下: 设置初始力密度和网面初始节点坐标, 寻找 q_1, q_2, \dots, q_k 的一组解, 使 t_{\max}/t_{\min} 取得最小值;

[0047] 约束方程为:

$$[0048] \quad \begin{cases} \sum_{\mu \in C_j} q_{\mu} l_{\mu x} = 0 & \text{节点}j\text{为内部节点} \\ \sum_{\mu \in C_j} q_{\mu} l_{\mu x} = f_{gx} & \text{节点}j\text{为与桁架固定节点} \end{cases} \quad (4)$$

$$[0049] \quad \begin{cases} \sum_{\mu \in C_j} q_{\mu} l_{\mu y} = 0 & \text{节点}j\text{为内部节点} \\ \sum_{\mu \in C_j} q_{\mu} l_{\mu y} = f_{gy} & \text{节点}j\text{为与桁架固定节点} \end{cases} \quad (5)$$

$$[0050] \quad \begin{cases} \sum_{\mu \in C_j} q_{\mu} l_{\mu z} = 0 & \text{节点}j\text{为内部节点} \\ \sum_{\mu \in C_j} q_{\mu} l_{\mu z} = f_{gz} & \text{节点}j\text{为与桁架固定节点} \end{cases} \quad (6)$$

$$[0051] \quad 0 < q_i \leq [q] \quad (7)$$

$$[0052] \quad z_j = \frac{x_j^2 + y_j^2}{4f} \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

[0053] 约束方程中, 式(4)~式(6)为柔索网面力密度平衡方程, 其中, C_j 为与节点j相连的节点组成的集合, q_{μ} 为节点j与相邻节点 μ ($\mu \in C_j$ 指节点 μ 属于集合 C_j) 之间柔索段的力密度, $l_{\mu x}, l_{\mu y}, l_{\mu z}$ 为节点j与相邻节点 μ 之间柔索段长度在X、Y、Z方向分量, f_{gx}, f_{gy}, f_{gz} 为与桁架固定节点受到的约束反力在X、Y、Z方向分量。

[0054] 式(7)为力密度最大值约束, 其中, $[q]$ 为索段的力密度最大设计许用值。

[0055] 式(8)为索网面上节点在笛卡尔参考坐标系下的空间位置(x_j, y_j, z_j) 依赖关系, 其中, f 为抛物面天线的焦距。通过优化计算得到 q_i, t_i, l_i ($i=1 \dots k$) 的值和与桁架固定节点受到的约束反力 f_g 的值。

[0056] 步骤三,采用多体系统动力学的方法建立展开桁架的横杆、竖杆、杆间铰链、驱动力矩,得到桁架机构动力学模型。

[0057] 步骤四,基于步骤二计算获得的静态找形网面,采用珠式模型建立柔索网面的收拢状态动力学模型。具体是将柔索质量等效在各节点上,将索网节点间柔索拉力建立为集中质量点间拉力模型。将竖向张力索建立为力模型,模型如图5所示。为了提高计算速度,设后索网节点与前索网节点对称,前后索网间竖向张力索与Z轴平行。

[0058] 索网节点间柔索拉力函数 F_i 为:

$$[0059] \quad F_i = \begin{cases} K(d_i - l_i) - cd_i & d_i - l_i > 0 \\ 0 & d_i - l_i \leq 0 \end{cases}, i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (9)$$

[0060] 其中K为柔索刚度系数,通过试验测得,c为柔索阻尼系数, d_i 为第i段柔索的长度, l_i 为网面展开状态下第i段柔索的长度,k为柔索个数。

[0061] 竖向张力索力函数 F_{zj} 为:

$$[0062] \quad F_{zj} = \begin{cases} g(h_j + a)^e - bh_j & |h_j| - a < 0 \\ 0 & |h_j| - a \geq 0 \end{cases}, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

[0063] 其中,g为刚度系数, h_j 为索网节点位移,a为力函数的判断条件,e为指数,b为阻尼系数,n为节点数。

[0064] 步骤五,将步骤三和步骤四两个模型通过柔索网面与桁架机构的连节点组装为一个动力学模型,并做一次展开过程动力学计算,得到展开计算柔索网面各个节点几何坐标、柔索网面的柔索长度与柔索拉力、竖向张力索拉力。

[0065] 步骤六,基于步骤五的分析结果,计算展开计算柔索网面的形面精度误差:计算索网天线展开完成后,从柔索网面采样节点与柔索网面的形面抛物面的最短距离均方根s,计算公式如下:

$$[0066] \quad s = \left(\frac{1}{N} \sum_{\lambda=1}^N (\delta_\lambda)^2 \right)^{1/2}$$

[0067] 其中,N为柔索网面的采样节点数,为正整数; $\delta_\lambda (\lambda = 1, \dots, N)$ 为采样节点与形面抛物面曲线(公式(1))的最短距离。该方法比只计算采样节点的Z轴坐标与形面抛物面对应位置Z轴坐标之差均方根的传统形面精度误差计算方法更能反映展开后柔索网面的光滑度和形面一致性;

[0068] 步骤七,基于步骤五的分析结果,分析展开计算后柔索网面的指向精度误差 α 。

[0069] 索网的形面抛物面如图3所示,入射信号矢量与天线参考坐标系的Z轴平行,设为 \vec{q} , \vec{q} 经过一个曲面单元反射后的标称指向矢量为 \vec{p}_1 , \vec{p}_1 指向焦点F,其法线矢量为 \vec{n}_1 。可知 \vec{p}_1 矢量指向精度误差为0。同时基于步骤五可得到该曲面单元三个节点的坐标,三个节点组成的平面单元为E。 \vec{q} 经过平面单元E反射后的指向矢量为 \vec{p}_2 ,法线矢量为 \vec{n}_2 。设 \vec{p}_1 与 \vec{p}_2 的夹角 β_2 为该单元的指向精度误差角。 β_2 可直接计算,也可按公式(11)计算。

$$[0070] \quad \beta_2 = 2\beta_1 \quad (11)$$

[0071] 其中 β_1 为 \vec{n}_1 与 \vec{n}_2 的夹角。

[0072] 设柔索网面共有 m 个反射面单元,采样个数为 M , M 为正整数;计算 M 采样反射面单元的指向精度误差角 α_{ξ} ($\xi=1,2,3,\dots,M$),然后按照公式(12)计算柔索网面指向精度误差 α 。

$$[0073] \quad \alpha = \frac{\sum_{\xi=1}^M \alpha_{\xi}}{M} \quad (12)$$

[0074] 该方法能直观反映出展开后的柔索网面的方向指性精度。方向指性精度能直接反映索网天线电反射性能,并弥补了形面精度无法反映网面局部平移误差的不足。

[0075] 步骤八,将步骤六和步骤七的形面精度误差 s 与指向精度误差 α 计算结果与设计指标对比,如果满足设定的阈值指标,则说明设计满足要求,如果不满足设定的阈值指标,则修正初始力密度和网面初始节点坐标值,重复步骤二~步骤七进行迭代计算。

[0076] 综上所述,以上仅为本发明的较佳实施例而已,并非用于限定本发明的保护范围。

[0077] 本发明说明书中未作详细描述的内容属本领域技术人员的公知技术。

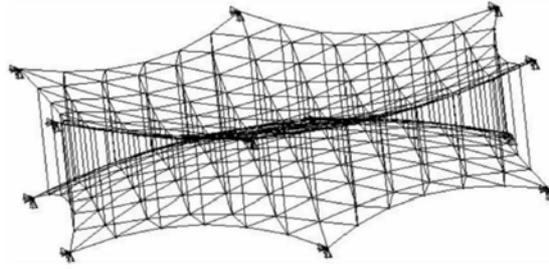


图1

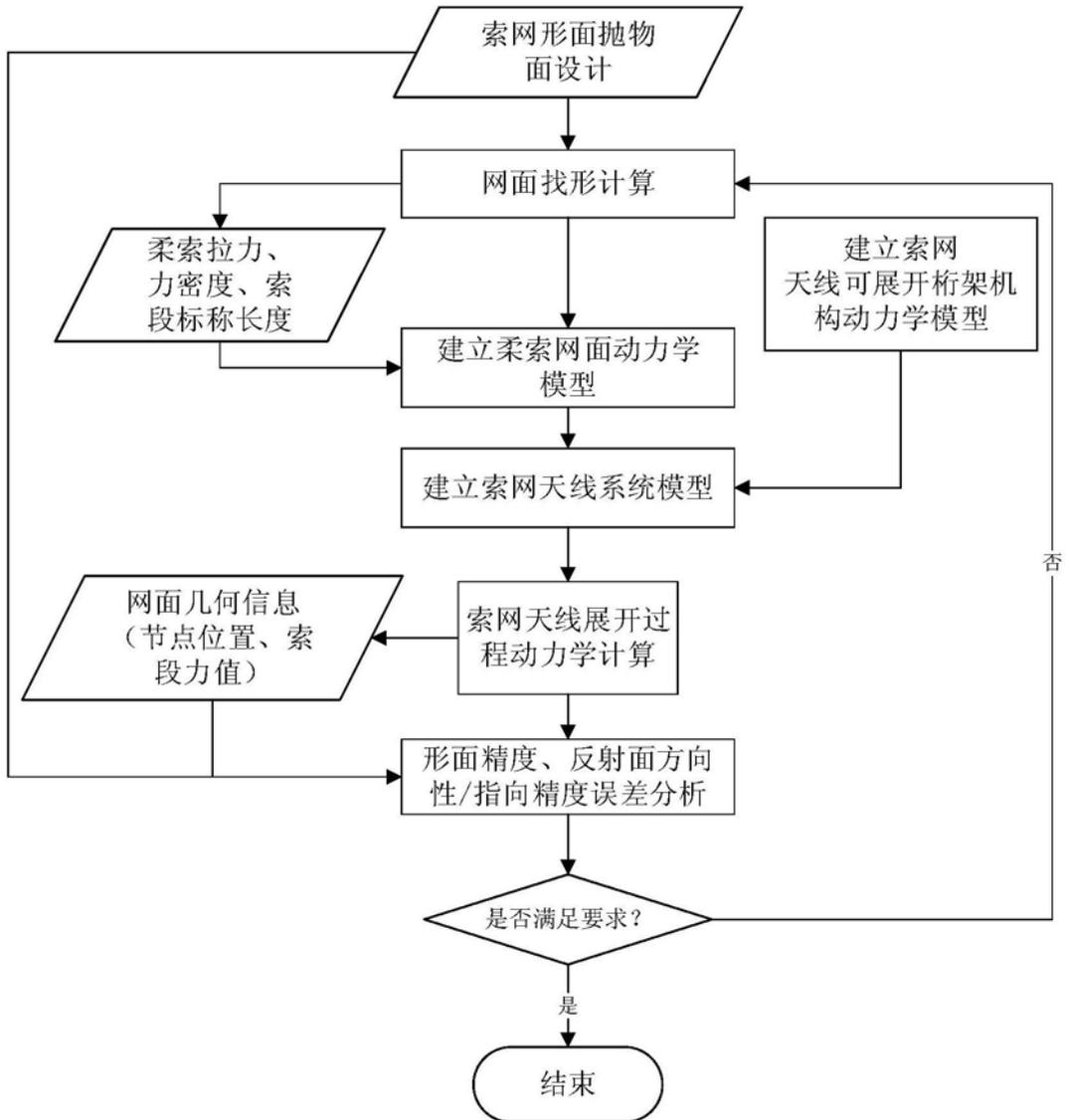


图2

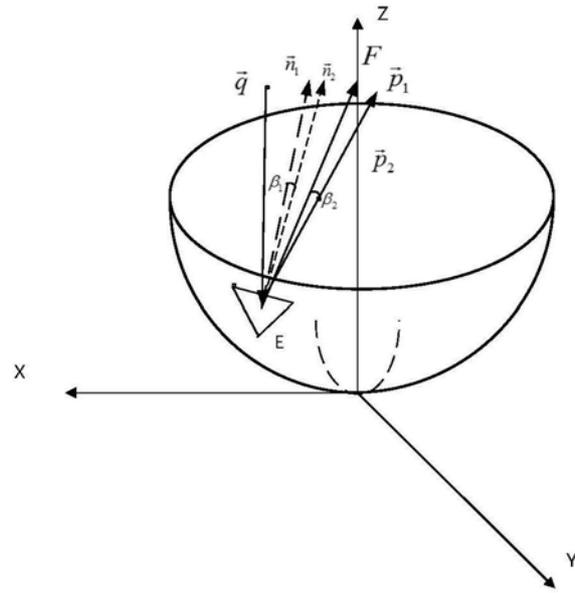


图3

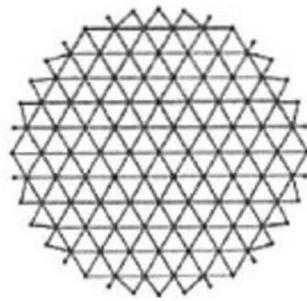


图4

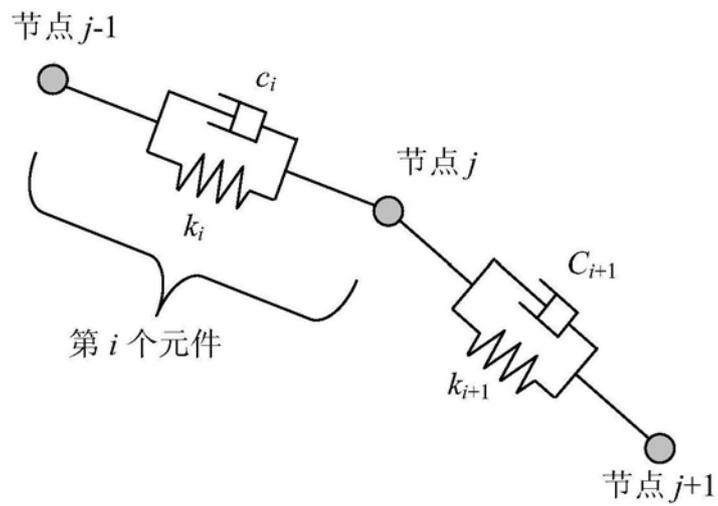


图5