

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102663228 A

(43) 申请公布日 2012. 09. 12

(21) 申请号 201210059826. 6

(22) 申请日 2012. 03. 08

(71) 申请人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号

(72) 发明人 蔡建国 冯健

(74) 专利代理机构 南京天翼专利代理有限责任公司 32112

代理人 汤志武

(51) Int. Cl.

G06F 19/00 (2006. 01)

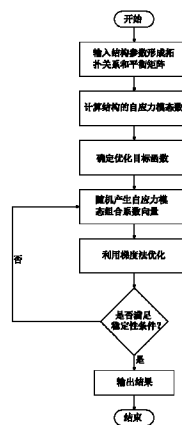
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 3 页

(54) 发明名称

一种索杆张力结构初始预应力分布确定方法

(57) 摘要

本发明公开了一种索杆张力结构初始预应力分布确定方法,属于空间结构的建筑设计和结构设计领域。第一步、给定索杆张力结构的几何和拓扑关系,并计算其平衡矩阵;第二步、计算索杆张力结构的自应力模态数;第三步、确定优化方法中的目标函数,第四步、随机产生 c 组自应力模态组合系数,从而可以得到 c 个初始预应力分布,利用梯度法进行优化,从而得到 c 组最终初始预应力分布,然后比较 c 组最终初始预应力分布对应的刚度矩阵二次型最小特征根,取刚度矩阵二次型最小特征根最大的数据为最终结果, c 的取值为大于 100 的整数;第五步、判断所取初始预应力分布的索杆张力结构是否满足稳定性条件。



1. 一种索杆张力结构初始预应力分布的确定方法,其特征在于,包括以下步骤:

第一步、给定索杆张力结构的几何和拓扑关系,其杆件数为 b , 节点数为 N , 约束数为 k , 则结构体系的非约束位移数为 $n = 3 \times N - k$, 并计算其平衡矩阵:

$$Af = P$$

其中 A 为 $n \times b$ 矩阵,称为平衡矩阵; f 为 b 维杆件内力矢量; P 为 n 维节点力矢量;

第二步、计算索杆张力结构的自应力模态数:

$$A = U \begin{bmatrix} S_{rr} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} W^T$$

式中 $S_{rr} = \text{diag}\{S_{11}, S_{22}, \dots, S_{rr}\}$ 称为矩阵 A 的奇异值,并有 $S_{11} \geq S_{22} \geq \dots \geq S_{rr} > 0$; 矩阵 U 和 V 分别可以表示为: $[u_1, u_2, \dots, u_r, m_1, \dots, m_m]$ 和 $[w_1, w_2, \dots, w_r, t_1, \dots, t_s]$, 则 $m = n - r$ 为机构位移模态数, $s = b - r$ 为自应力模态数;

当所求的自应力模态数 s 为 1 时,如果这个自应力模态满足索受拉,杆受压的条件,就是所要求的初始预应力分布;如果不满足这个条件,需重新给定结构的几何或拓扑关系;当自应力模态数 s 大于 1 时,则一般预应力状态 T 是 s 个独立自应力模态的线性组合,即

$$T = \alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \dots + \alpha_s T_s$$

式中: T_i 为体系第 i 阶独立自应力模态向量; α_i 为组合系数,用优化方法来寻找组合系数 α_i ;

第三步、确定优化方法中的目标函数,

$$\min \left(w_1 (-\lambda_{\min}) + w_2 \left(\sum_{i=1}^{b_1} \text{funt}c_i + \sum_{i=1}^{b_2} \text{funt}s_i \right) + w_3 \left(\sum_{i=1}^b t_i^2 - \delta \right) + w_4 \left(\sum_{i=1}^b (t_i - \bar{t})^2 - \varepsilon \right) \right)$$

其中, w_1 为最小特征值权重系数, w_2 为可行性条件权重系数, w_3 为总预应力大小权重系数, w_4 为总预应力分布均匀性权重系数, δ 为给定的总预应力大小的限值条件, ε 为给定的内力偏差限值, $\min(-\lambda_{\min})$ 为索杆张力结构的刚度最大条件, $\min\left(\sum_{i=1}^b t_i^2 - \delta\right)$ 为杆件的内力需求条件, $\min\left(\sum_{i=1}^b (t_i - \bar{t})^2 - \varepsilon\right)$ 为预应力分布的均匀性, $\min\left(\sum_{i=1}^{b_1} \text{funt}c_i + \sum_{i=1}^{b_2} \text{funt}s_i\right)$ 为结构的可行性条件, λ_{\min} 是索杆张力结构几何刚度矩阵二次型的最小特征根, t_i 向量 T 中第 i 个元素,也即第 i 根杆件的内力, \bar{t} 为所有杆件内力的平均值,表示为: $\sum_{i=1}^b |t_i|$, 在杆件为拉索时, $\text{funt}c_i$ 表示为:

$$\text{funt}c_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } t_i \geq 0 \\ |t_i| & \text{如果 } t_i < 0 \end{cases}$$

在杆件为压杆时, $\text{funt}s_i$ 表示为:

$$\text{funt}s_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } t_i \leq 0 \\ |t_i| & \text{如果 } t_i > 0 \end{cases}$$

第四步、随机产生 c 组自应力模态组合系数,从而可以得到 c 个初始预应力分布,利用梯度法进行优化,从而得到 c 组最终初始预应力分布,然后比较 c 组最终初始预应力分布对应的刚度矩阵二次型最小特征根,取刚度矩阵二次型最小特征根最大的数据为最终结果, c 的取值为大于 100 的整数;

第五步、判断所取初始预应力分布的索杆张力结构是否满足稳定性条件,结构的稳定

性通过其切线刚度矩阵 K 是否正定来判断, 如果结构是稳定的, 则在任意的小位移模态 d 下切线刚度矩阵的二次型是正定的:

$$d^T K d > 0$$

如果满足稳定性条件, 输出结果; 如果不满足稳定性条件, 重新进行第四步。

一种索杆张力结构初始预应力分布确定方法

技术领域

[0001] 本发明公开了一种基于梯度法优化的索杆张力结构初始预应力分布确定方法,属于空间结构的建筑设计和结构设计领域。

背景技术

[0002] 索杆张力结构是由拉索和压杆为基本单元组成的,它与一般传统结构的最大区别是结构内部存在自应力模态和机构位移。如果结构可通过施加预应力提供刚度,虽然结构内部存在一阶无穷小机构,但仍能像传统结构一样承受一定的荷载。在未施加预应力前,结构自身刚度无法维持形状,体系处于松弛态,只有施加一定大小的预应力才能成形和承受荷载;且其预应力的大小和分布直接影响着结构的受力性能,只有结构中的预应力大小和分布合理,结构才能有良好的力学性能。因此求解索杆张力结构初始预应力分布是首先需要解决的关键问题。

[0003] 在一个三维索杆结构中,假定自由节点 i 与节点 j 、 k 相连,连接节点 i 、 j 的单元 (i, j) ,其内力为 f_{ij} ,长度为 l_{ij} ;连接节点 i 、 k 的单元 (i, k) ,其内力为 f_{ik} ,长度为 l_{ik} ;作用于节点 i 的外荷载为 p_i ,其在 x 、 y 、 z 三个方向的分量为 p_{ix} 、 p_{iy} 、 p_{iz} 。索杆体系在节点 i 处的平衡方程可以表述为:

$$[0004] \left. \begin{aligned} (x_i - x_j)f_{ij} / l_{ij} + (x_i - x_k)f_{ik} / l_{ik} &= p_{ix} \\ (y_i - y_j)f_{ij} / l_{ij} + (y_i - y_k)f_{ik} / l_{ik} &= p_{iy} \\ (z_i - z_j)f_{ij} / l_{ij} + (z_i - z_k)f_{ik} / l_{ik} &= p_{iz} \end{aligned} \right\}$$

[0005] 假定给定一个空间铰接结构体系,其杆件数为 b ,节点数为 N ,约束数为 k ,则结构体系的非约束位移数为 $n = 3 \times N - k$ 。该结构体系的平衡方程为:

$$[0006] Af = P$$

[0007] 其中 A 为 $n \times b$ 矩阵,称为平衡矩阵; f 为 b 维杆件内力矢量; P 为 n 维节点力矢量。

[0008] 根据矩阵理论,设 A 矩阵的秩为 r ,则可对 A 矩阵进行奇异值分解:

$$[0009] \mathbf{A} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} S_{rr} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{W}^T$$

[0010] 式中 $S_{rr} = \text{diag}\{S_{11}, S_{22}, \dots, S_{rr}\}$ 称为矩阵 A 的奇异值,并有 $S_{11} \geq S_{22} \geq \dots \geq S_{rr} > 0$;矩阵 U 和 V 分别可以表示为: $[u_1, u_2, \dots, u_r, m_1, \dots, m_m]$ 和 $[w_1, w_2, \dots, w_r, t_1, \dots, t_s]$,则 $m = n - r$ 为机构位移模态数, $s = b - r$ 为自应力模态数。

[0011] 当前大部分索杆张力结构找力方法中,没有考虑结构承受荷载的能力,而土木工程结构均是用来承受荷载的,所以这样求得的预应力分布可能致使结构的刚度很弱。

发明内容

[0012] 为了克服现有初始预应力分布确定方法不考虑结构刚度的缺点,本发明利用优化方法寻找能够保证结构几何稳定、刚度最大、预应力分布均匀以及满足拉索受拉、压杆受压

等条件的初始预应力分布形式。

[0013] 为解决上述技术问题,本发明采用的技术方案是:

[0014] 一种索杆张力结构初始预应力分布确定方法,包含如下步骤:

[0015] 第一步、给定索杆张力结构的几何和拓扑关系,其杆件数为 b ,节点数为 N ,约束数为 k ,则结构体系的非约束位移数为 $n = 3 \times N - k$,并计算其平衡矩阵:

$$[0016] \quad Af = P$$

[0017] 其中 A 为 $n \times b$ 矩阵,称为平衡矩阵; f 为 b 维杆件内力矢量; P 为 n 维节点力矢量;

[0018] 第二步、计算索杆张力结构的自应力模态数:

$$[0019] \quad \mathbf{A} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} S_{rr} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{W}^T$$

[0020] 式中 $S_{rr} = \text{diag}\{S_{11}, S_{22}, \dots, S_{rr}\}$ 称为矩阵 A 的奇异值,并有 $S_{11} \geq S_{22} \geq \dots \geq S_{rr} > 0$;矩阵 U 和 V 分别可以表示为: $[u_1, u_2, \dots, u_r, m_1, \dots, m_m]$ 和 $[w_1, w_2, \dots, w_r, t_1, \dots, t_s]$,则 $m = n - r$ 为机构位移模态数, $s = b - r$ 为自应力模态数;

[0021] 当所求的自应力模态数 s 为 1 时,如果这个自应力模态满足索受拉,杆受压的条件,就是所要求的初始预应力分布;如果不满足这个条件,需重新给定结构的几何或拓扑关系;当自应力模态数 s 大于 1 时,则一般预应力状态 T 是 s 个独立自应力模态的线性组合,即

$$[0022] \quad T = \alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \dots + \alpha_s T_s$$

[0023] 式中: T_i 为体系第 i 阶独立自应力模态向量; α_i 为组合系数,用优化方法来寻找组合系数 α_i ;

[0024] 第三步、确定优化方法中的目标函数,

$$[0025] \quad \min \left(w_1 (-\lambda_{\min}) + w_2 \left(\sum_{i=1}^{b_1} \text{func}_i + \sum_{i=1}^{b_2} \text{funt}_i \right) + w_3 \left(\sum_{i=1}^b t_i^2 - \delta \right) + w_4 \left(\sum_{i=1}^b (t_i - \bar{t})^2 - \varepsilon \right) \right)$$

[0026] 其中, w_1 为最小特征值权重系数, w_2 为可行性条件权重系数, w_3 为总预应力大小权重系数, w_4 为总预应力分布均匀性权重系数, δ 为给定的总预应力大小的限值条件, ε 为给定的内力偏差限值, $\min(-\lambda_{\min})$ 为索杆张力结构的刚度最大条件, $\min\left(\sum_{i=1}^b t_i^2 - \delta\right)$ 为杆件的内力需求条件, $\min\left(\sum_{i=1}^b (t_i - \bar{t})^2 - \varepsilon\right)$ 为预应力分布的均匀性, $\min\left(\sum_{i=1}^{b_1} \text{func}_i + \sum_{i=1}^{b_2} \text{funt}_i\right)$ 为结构的可行性条件, λ_{\min} 是索杆张力结构几何刚度矩阵二次型的最小特征根, t_i 向量 T 中第 i 个元素,也即第 i 根杆件的内力, \bar{t} 为所有杆件内力的平均值,表示为: $\frac{1}{b} \sum_{i=1}^b |t_i|$,在杆件为拉索时, func_i 表示为:

[0027]

$$\text{func}_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } t_i \geq 0 \\ |t_i| & \text{如果 } t_i < 0 \end{cases}$$

[0028] 在杆件为压杆时, funt_i 表示为:

[0029]

$$\text{funt}_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } t_i \leq 0 \\ |t_i| & \text{如果 } t_i > 0 \end{cases}$$

[0030] 第四步、随机产生 c 组自应力模态组合系数,从而可以得到 c 个初始预应力分布,利用梯度法进行优化,从而得到 c 组最终初始预应力分布,然后比较 c 组最终初始预应力分布对应的刚度矩阵二次型最小特征根,取刚度矩阵二次型最小特征根最大的数据为最终结果, c 的取值为大于 100 的整数;

[0031] 第五步、判断所取初始预应力分布的索杆张力结构是否满足稳定性条件,结构的稳定性通过其切线刚度矩阵 K 是否正定来判断,如果结构是稳定的,则在任意的小位移模态 d 下切线刚度矩阵的二次型是正定的:

$$[0032] \quad d^T K d > 0$$

[0033] 如果满足稳定性条件,输出结果;如果不满足稳定性条件,重新进行第四步。

[0034] 本发明的有益效果是,本发明以体系刚度最大、预应力分布均匀以及拉索受拉、压杆受拉为目标函数,利用优化方法寻找自应力模态组合系数。本发明确定的索杆张力结构的初始预应力分布,考虑了结构承受荷载的能力,在结构总预应力大小一定的情况下,刚度最大。另外,均匀的预应力分布在结构的设计、施工甚至维护等方面都具有优越性。所以本发明确定的预应力分布,将使同类构件拥有相同的截面,这样即可以节省原材料以及方便施工,更重要的是使同类构件的安全储备相同。由于本发明的限制条件较少,适合各种索杆体系的预应力水平的确定。

附图说明

[0035] 下面结合附图及实施例对本发明进一步详细说明:

[0036] 图 1 是本发明计算流程图。

[0037] 图 2 是索杆张力结构节点编号图。

[0038] 图 3 是索杆张力结构杆件编号图。

[0039] 图 4 是不同自应力模态向量组合系数初值优化结果的比较示意图。

具体实施方式

[0040] 确定索杆张力结构初始预应力分布包含如下步骤:

[0041] (1) 给定索杆张力结构的几何和拓扑关系,并计算其平衡矩阵;

[0042] (2) 计算索杆张力结构的自应力模态数。当所求的自应力模态数 s 为 1 时,如果这个自应力模态满足索受拉,杆受压的条件,就是所要求的初始预应力分布;如果不满足这个条件,需重新给定结构的几何或拓扑关系。本发明主要针对自应力模态数 s 大于 1 的情况,则一般预应力状态 T 是 s 个独立自应力模态的线性组合,即

$$[0043] \quad T = \alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \dots + \alpha_s T_s$$

[0044] 式中: T_i 为体系第 i 阶独立自应力模态向量; α_i 为组合系数。一般可以用优化方法来寻找组合系数 α_i 。

[0045] (3) 确定优化方法中的目标函数,

$$[0046] \quad \min \left(w_1 (-\lambda_{\min}) + w_2 \left(\sum_{i=1}^b \text{funt} c_i + \sum_{i=1}^b \text{funt} s_i \right) + w_3 \left(\sum_{i=1}^b t_i^2 - \delta \right) + w_4 \left(\sum_{i=1}^b (t_i - \bar{t})^2 - \varepsilon \right) \right)$$

[0047] 其中, w_1 为最小特征值权重系数, w_2 为可行性条件权重系数, w_3 为总预应力大小权重系数, w_4 为总预应力分布均匀性权重系数, δ 为给定的总预应力大小的限值条件, ε 为

给定的内力偏差限值。目标函数的其它参数的含义如下：

[0048] (a) 刚度最大

[0049] 结构的切线刚度矩阵 K 可以分为几何刚度矩阵 K_G 和材料刚度矩阵 K_E , 则对任意的位移模态 d , 刚度矩阵的二次型 Q 可以表述为：

$$[0050] \quad Q = d^T K d = d^T K_E d + d^T K_G d$$

[0051] 而一般索杆张力结构都是动不定结构, 如果上式中的 d 为位移模态矩阵 M (矩阵 M 为矩阵 U 的最后 m 列), 则 $K_E M = 0$ 。其刚度矩阵的二次型可以写为：

$$[0052] \quad Q = M^T K_G M$$

[0053] 根据式 7 给出的 Q 的最小特征值 λ_{\min} 可以判断结构的刚度的大小。 λ_{\min} 越大, 则结构的刚度越大。因此, 如果希望在体系的材料和外荷载确定的情况下结构的刚度最大, 预应力分布应该使 Q 的最小特征值 λ_{\min} 最大。所以索杆张力结构的刚度最大可以表述为：

$$[0054] \quad \min(-\lambda_{\min})$$

[0055] 需要指出的是, 结构使用的总预应力大小需要控制; 否则的话, 如果预应力分布全部放大 k 倍, 则刚度矩阵的二次型对应的特征值也放大 k 倍。这样, 寻找最大的特征值 λ_{\min} 就变为寻找最大的 k 了。本节是通过给定所有杆件的内力平方和来限制总体预应力大小的, 具体如下式表示为：

$$[0056] \quad \text{constr}(\mathbf{T}) = \mathbf{T}^T \mathbf{T} = \sum_{i=1}^b t_i^2$$

[0057] 其中 t_i 为向量 T 中第 i 个元素, 也即第 i 根杆件的内力。所以杆件的内力需要满足：

$$[0058] \quad \min\left(\sum_{i=1}^b t_i^2 - \delta\right)$$

[0059] (b) 预应力分布的均匀性

[0060] 均匀的预应力分布在结构的设计、施工甚至维护等方面都具有优越性。例如, 均匀的预应力分布, 将使同类构件拥有相同的截面, 这样即可以节省原材料以及方便施工, 更重要的是使同类构件的安全储备相同。在这里, 通过控制各单元内力偏差, 具体由下式求得：

$$[0061] \quad \sum_{i=1}^b (t_i - \bar{T})^2$$

[0062] 其中 $\bar{T} = \sum_{i=1}^b |t_i|$ 。所以预应力分布的均匀性可以表述为：

$$[0063] \quad \min\left(\sum_{i=1}^b (t_i - \bar{T})^2 - \varepsilon\right)$$

[0064] (c) 可行性条件

[0065] 由于索杆结构的拉索只能受拉, 压杆只能受压, 所以需要在确定预应力分布时考虑杆件预应力的正负属性。设前 b_1 根杆件为拉索, 后 b_2 根杆件为压杆, 本文通过如下程序来判断结构中的杆件是否满足可行性条件。在杆件为拉索时, 函数为：

[0066]

$$\text{func}_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } t_i \geq 0 \\ |t_i| & \text{如果 } t_i < 0 \end{cases}$$

[0067] 在杆件为压杆时, 函数为：

[0068]

$$\text{funt}_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } t_i \leq 0 \\ |t_i| & \text{如果 } t_i > 0 \end{cases}$$

[0069] 则结构的可行性条件的目标函数为：

$$[0070] \quad \min \left(\sum_{i=1}^{b_1} \text{funt}_i c_i + \sum_{i=1}^{b_2} \text{funt}_i s_i \right)$$

[0071] (4) 随机产生 c 组自应力模态组合系数,从而可以得到 c 个初始预应力分布,利用梯度法进行优化,从而得到 c 组最终初始预应力分布,然后比较 c 组最终初始预应力分布对应的刚度矩阵二次型最小特征根,取刚度矩阵二次型最小特征根最大的数据为最终结果。 c 的取值为大于 100 的整数。

[0072] (5) 判断所取初始预应力分布的索杆张力结构是否满足稳定性条件。结构的稳定性可以通过其切线刚度矩阵 K 是否正定来判断。如果结构是稳定的,则在任意的小位移模态 d 下切线刚度矩阵的二次型是正定的：

$$[0073] \quad d^T K d > 0$$

[0074] 如果满足稳定性条件,输出结果;如果不满足稳定性条件,重新进行第 4 步。

[0075] 利用图 1 所示的流程编制相应程序,结构具体算例对本发明的具体实施方式作出更为详细的说明：

[0076] 索穹顶结构设置一道环索,杆件数 $b = 49$,其中压杆为 9,拉索为 40,非约束节点为 18,约束节点数为 8。其节点坐标见表 1,该结构具有 6 个自应力模态,见表 2。其节点和杆件编号见图 2 和图 3。确定内力平方和的约束值 $\delta = 30$,内力偏差限值 $\varepsilon = 0.001$ 。由于初始模态向量组合系数对最终优化结果有一定的影响,因此程序采取搜寻 100 个,选取刚度矩阵二次型最小特征根最大的数据为最优的结果。100 组结果数据的比较如图 4 所示。得到最佳的刚度矩阵二次型的最小特征根为 1.0994。

[0077] 利用优化方法得到最佳的独立自应力模态向量组合系数为： $\{-2.2929 \ -0.2352 \ -0.03614.1286 \ 0.0147 \ -2.7641\}^T$ 。优化后得到的杆件的力密度分布见表 3。

[0078] 表 1 索穹顶结构节点坐标

[0079]

| 节点编号 | x | y | z | 节点编号 | x | y | z |
|------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|
| 1 | 4.6338 | -0.0004 | -3.7584 | 10 | 21.4966 | -0.0004 | 3.7369 |
| 2 | 4.6338 | -0.0004 | 3.7369 | 11 | 19.0271 | -5.9623 | -3.7584 |
| 3 | 7.1033 | 5.9615 | -3.7584 | 12 | 19.0271 | -5.9623 | 3.7369 |
| 4 | 7.1033 | 5.9615 | 3.7369 | 13 | 13.0652 | -8.4318 | -3.7584 |
| 5 | 13.0652 | 8.4310 | -3.7584 | 14 | 13.0652 | -8.4318 | 3.7369 |
| 6 | 13.0652 | 8.4310 | 3.7369 | 15 | 7.1033 | -5.9623 | -3.7584 |
| 7 | 19.0271 | 5.9615 | -3.7584 | 16 | 7.1033 | -5.9623 | 3.7369 |
| 8 | 19.0271 | 5.9615 | 3.7369 | 17 | 13.0652 | -0.0004 | 1.1469 |
| 9 | 21.4966 | -0.0004 | -3.7584 | 18 | 13.0652 | -0.0004 | 6.1410 |

[0080] 表 2 索穹顶结构的自应力模态

| | 杆件编号 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 |
|--------|------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| [0081] | 1 | 0.0785 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1347 | 0.0000 | 0.1094 |
| | 2 | 0.0785 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1347 | 0.0000 | 0.1093 |
| | 3 | 0.0785 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1346 | 0.0000 | 0.1093 |

| | | | | | | | |
|--------|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 4 | 0.0785 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1346 | 0.0000 | 0.1093 |
| | 5 | 0.0785 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1346 | 0.0000 | 0.1093 |
| | 6 | 0.0785 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1347 | 0.0000 | 0.1093 |
| | 7 | 0.0785 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1347 | 0.0000 | 0.1094 |
| | 8 | 0.0785 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1347 | 0.0000 | 0.1094 |
| | 9 | -0.0465 | 0.2330 | -0.3294 | -0.2983 | 0.2330 | -0.0002 |
| | 10 | 0.4466 | -0.3296 | 0.0000 | -0.0106 | 0.0000 | -0.0002 |
| | 11 | -0.0465 | 0.2331 | 0.3298 | -0.2977 | -0.2330 | -0.0002 |
| | 12 | -0.0378 | 0.0000 | -0.0001 | 0.0648 | 0.3296 | 0.4404 |
| | 13 | -0.0466 | -0.2330 | -0.3293 | -0.2982 | -0.2331 | -0.0002 |
| | 14 | 0.4467 | 0.3295 | 0.0000 | -0.0105 | 0.0000 | -0.0002 |
| | 15 | -0.0466 | -0.2330 | 0.3298 | -0.2978 | 0.2330 | -0.0002 |
| | 16 | -0.0378 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0649 | -0.3295 | 0.4405 |
| | 17 | 0.0816 | -0.1127 | 0.1594 | 0.0429 | -0.1127 | 0.0824 |
| | 18 | -0.1569 | 0.1594 | 0.0001 | -0.0962 | 0.0000 | 0.0824 |
| | 19 | 0.0816 | -0.1127 | -0.1594 | 0.0427 | 0.1127 | 0.0824 |
| | 20 | 0.0773 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1327 | -0.1594 | -0.1307 |
| | 21 | 0.0816 | 0.1127 | 0.1594 | 0.0429 | 0.1127 | 0.0824 |
| | 22 | -0.1570 | -0.1594 | 0.0001 | -0.0962 | 0.0000 | 0.0824 |
| | 23 | 0.0816 | 0.1127 | -0.1594 | 0.0427 | -0.1127 | 0.0824 |
| | 24 | 0.0773 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1327 | 0.1594 | -0.1307 |
| [0082] | 25 | -0.1071 | 0.2408 | -0.3404 | -0.2069 | 0.2408 | -0.0825 |
| | 26 | 0.4024 | -0.3406 | -0.0001 | 0.0904 | 0.0000 | -0.0825 |
| | 27 | -0.1071 | 0.2408 | 0.3407 | -0.2063 | -0.2408 | -0.0825 |
| | 28 | -0.0981 | 0.0000 | -0.0001 | 0.1683 | 0.3406 | 0.3728 |
| | 29 | -0.1072 | -0.2408 | -0.3404 | -0.2068 | -0.2409 | -0.0825 |
| | 30 | 0.4025 | 0.3405 | -0.0001 | 0.0904 | 0.0000 | -0.0825 |
| | 31 | -0.1072 | -0.2408 | 0.3407 | -0.2064 | 0.2408 | -0.0825 |
| | 32 | -0.0981 | 0.0000 | -0.0001 | 0.1684 | -0.3405 | 0.3728 |
| | 33 | 0.0736 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1263 | 0.0000 | 0.1026 |
| | 34 | 0.0736 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1263 | 0.0000 | 0.1026 |
| | 35 | 0.0736 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1263 | 0.0000 | 0.1026 |
| | 36 | 0.0736 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1263 | 0.0000 | 0.1026 |
| | 37 | 0.0736 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1263 | 0.0000 | 0.1026 |
| | 38 | 0.0736 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1263 | 0.0000 | 0.1026 |
| | 39 | 0.0736 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1264 | 0.0000 | 0.1026 |
| | 40 | 0.0736 | 0.0000 | 0.0001 | -0.1264 | 0.0000 | 0.1026 |
| | 41 | -0.0394 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0675 | 0.0000 | -0.0548 |
| | 42 | -0.0394 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0675 | 0.0000 | -0.0548 |
| | 43 | -0.0394 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0675 | 0.0000 | -0.0548 |
| | 44 | -0.0394 | 0.0000 | -0.0001 | 0.0675 | 0.0000 | -0.0548 |
| | 45 | -0.0394 | 0.0000 | -0.0001 | 0.0675 | 0.0000 | -0.0548 |
| | 46 | -0.0394 | 0.0000 | -0.0001 | 0.0675 | 0.0000 | -0.0548 |
| | 47 | -0.0394 | 0.0000 | -0.0001 | 0.0675 | 0.0000 | -0.0548 |
| | 48 | -0.0394 | 0.0000 | -0.0001 | 0.0675 | 0.0000 | -0.0548 |
| [0083] | 49 | -0.0867 | 0.0000 | -0.0001 | 0.1487 | 0.0000 | -0.1207 |

[0084] 表 3 索穹顶结构优化结果

| 杆件编号 | 力密度 | 杆件编号 | 力密度 | 杆件编号 | 力密度 |
|------|--------|------|--------|------|---------|
| 1 | 1.0384 | 18 | 0.3030 | 35 | 0.9740 |
| 2 | 1.0382 | 19 | 0.2091 | 36 | 0.9740 |
| 3 | 1.0381 | 20 | 0.3635 | 37 | 0.9741 |
| 4 | 1.0380 | 21 | 0.2666 | 38 | 0.9742 |
| 5 | 1.0380 | 22 | 0.2282 | 39 | 0.9742 |
| 6 | 1.0382 | 23 | 0.2630 | 40 | 0.9742 |
| 7 | 1.0384 | 24 | 0.3621 | 41 | -0.5207 |
| 8 | 1.0384 | 25 | 0.4291 | 42 | -0.5206 |
| 9 | 1.1715 | 26 | 0.2406 | 43 | -0.5205 |
| 10 | 0.9889 | 27 | 0.4411 | 44 | -0.5205 |
| 11 | 1.1829 | 28 | 0.1114 | 45 | -0.5205 |
| 12 | 0.8638 | 29 | 0.3182 | 46 | -0.5206 |
| 13 | 1.0640 | 30 | 0.4003 | 47 | -0.5207 |
| 14 | 1.1436 | 31 | 0.3261 | 48 | -0.5207 |
| 15 | 1.0718 | 32 | 0.1143 | 49 | -1.1463 |
| 16 | 0.8669 | 33 | 0.9742 | | |
| 17 | 0.2147 | 34 | 0.9741 | | |

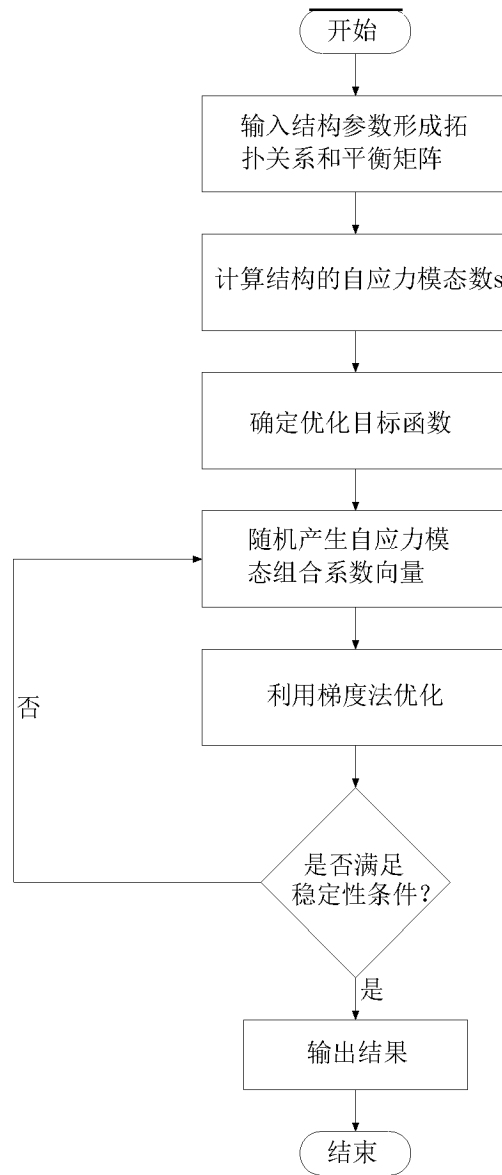


图 1

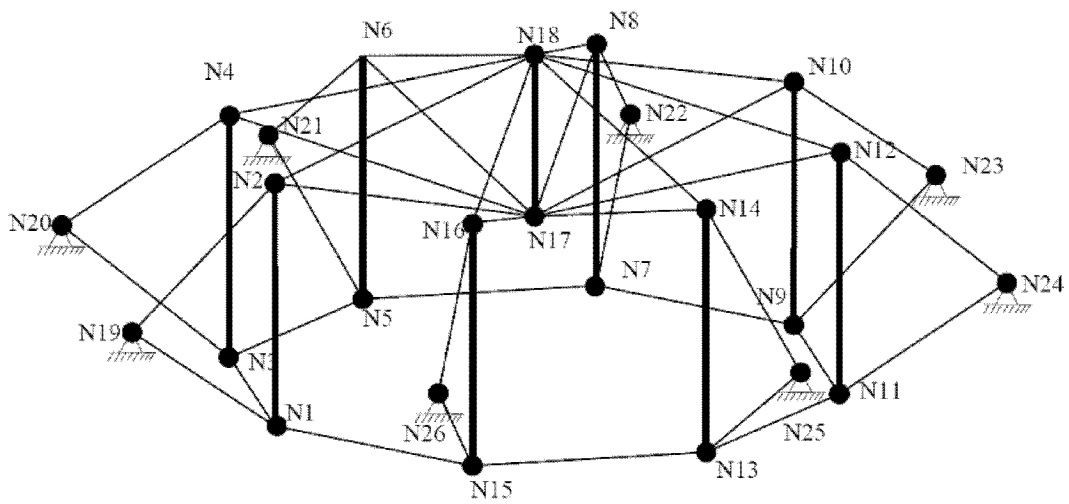


图 2

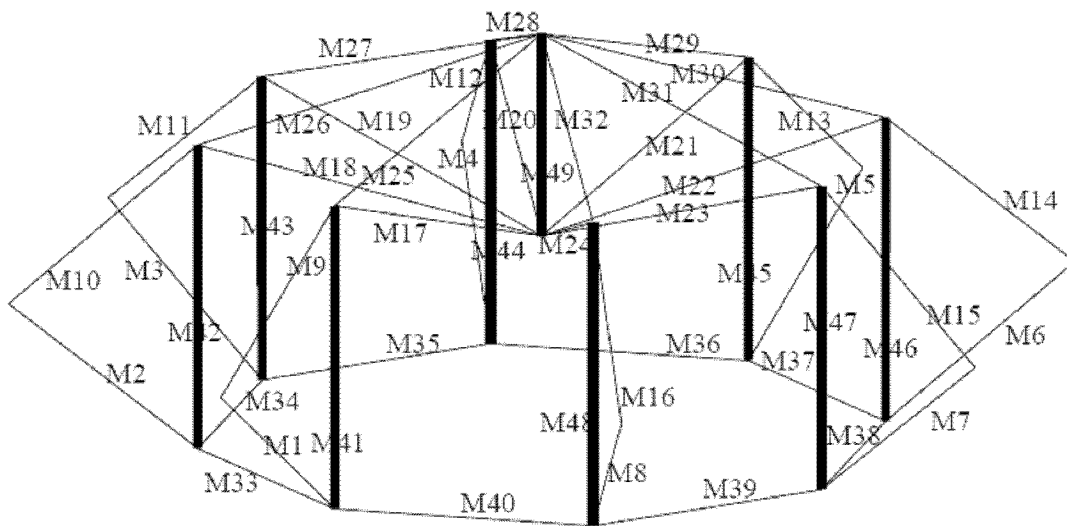


图 3

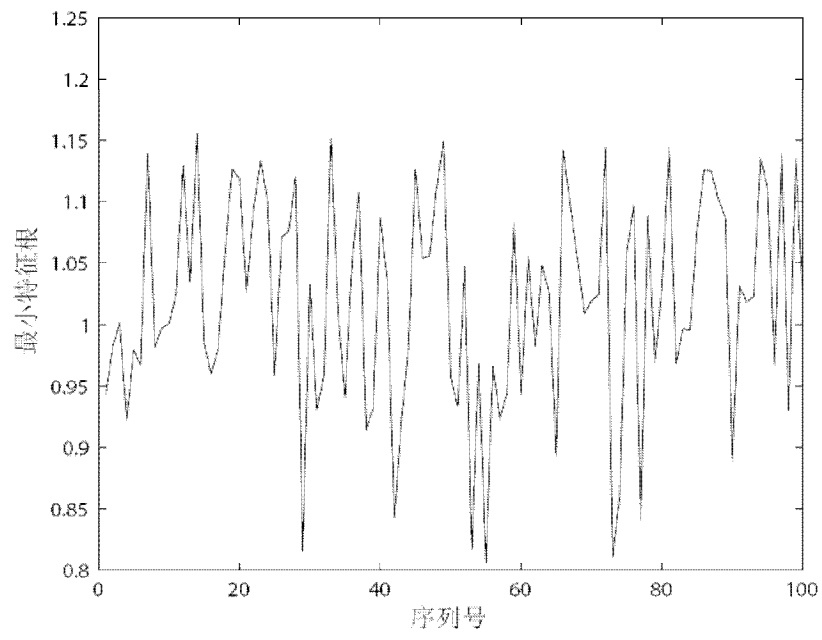


图 4