

# (12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局



(43) 国际公布日  
2013 年 12 月 27 日 (27.12.2013) WIPO | PCT

(10) 国际公布号  
WO 2013/189275 A1

- (51) 国际专利分类号:  
*E04B 1/342* (2006.01) *E04B 1/32* (2006.01)  
*E04B 7/14* (2006.01) *E04B 7/16* (2006.01)  
*E04B 1/35* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2013/077380
- (22) 国际申请日: 2013 年 6 月 18 日 (18.06.2013)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:  
201210200718.6 2012 年 6 月 18 日 (18.06.2012) CN  
201210200722.2 2012 年 6 月 18 日 (18.06.2012) CN  
201210200723.7 2012 年 6 月 18 日 (18.06.2012) CN
- (71) 申请人: 中国航空规划建设发展有限公司 (CHINA AVIATION PLANNING AND CONSTRUCTION DEVELOPMENT CO., LTD.) [CN/CN]; 中国北京市德外大街 12 号, Beijing 100120 (CN)。
- (72) 发明人: 葛家琪 (GE, Jiaqi); 中国北京市德外大街 12 号, Beijing 100120 (CN)。张国军 (ZHANG, Guojun); 中国北京市德外大街 12 号, Beijing 100120 (CN)。王树 (WANG, Shu); 中国北京市德外大街 12 号, Beijing 100120 (CN)。李辰琦 (LI, Chenqi); 中国辽宁省沈阳市浑南新区浑南东路 9 号, Liaoning 110168 (CN)。宋族明 (SONG, Zuming); 中国辽宁省盘锦市兴隆台区惠宾大街 119 号, Liaoning 124008 (CN)。
- (74) 代理人: 中科专利商标代理有限责任公司 (CHINA SCIENCE PATENT AND TRADEMARK AGENT LTD.); 中国北京市海淀区西三环北路 87 号国际财经中心 D 座 11 层, Beijing 100089 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

[见续页]

(54) Title: ASYMMETRICAL OPEN TYPE INTEGRAL TENSION CABLE MEMBRANE STRUCTURE AND METHOD FOR CONSTRUCTION AND DESIGN THEREFOR

(54) 发明名称: 一种非对称开口式整体张拉索膜结构及其施工和设计方法

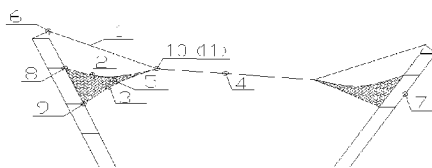


图 1 / Fig. 1

(57) Abstract: An asymmetrical open type integral tension cable membrane structure and method for construction and design therefor are provided. The dimensional integral tension cable membrane structure with a central opening is formed by three layers of radial cables including suspension cables (1), ridge cables (2) and valley cables (3), and ring cables, wherein the suspension cables (1) are positioned above the ridge cables (2), and the ridge cables (2) are positioned above the valley cables (3). One ends of the valley cables (3), ridge cables (2) and suspension cables (1) are connected to the ring cables (4) and the other ends are connected to a peripheral support structure (7), and coating membranes (5) are tensioned between adjacent ridge cables (2) and valley cables (3), with the adjacent ridge cables (2) and valley cables (3) as the framework for stretching the coating membranes (5). The construction of the structure comprises the steps of: lifting the suspension cables (1), ridge cables (2) and valley cables (3) step by step to the location adjacent to the corresponding anchor nodes for the cable body according to the formed shape of the tension cable membrane structure, stretching and anchoring the suspension cables (1), ridge cables (2) and valley cables (3) in place synchronously with a tension device to achieve the final shape of the integral tension cable membrane structure. The overall process load-based multi-stage design method for the open type integral tension structure is applied to the structure.

(57) 摘要:

[见续页]



WO 2013/189275 A1

**本国际公布:**

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

— 包括经修改的权利要求(条约第 19 条(1))。

---

一种非对称开口式索膜整体张拉结构及施工和设计方法，通过吊索（1）、脊索（2）和谷索（3）三层径向索与环索（4）形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，吊索（1）在脊索（2）上方，脊索（2）在谷索（3）上方，谷索（3）、脊索（2）、吊索（1）的一端连接到环索（4），另一端连接到外围支撑结构（7），且覆膜（5）张紧在相邻脊索（2）和谷索（3）之间，相邻的脊索（2）和谷索（3）作为覆膜（5）的骨架张拉覆膜（5）。该结构的施工方法，包括步骤：按章张拉索膜结构成型后的形状，由牵引装置将吊索（1）、脊索（2）和谷索（3）分步骤提升到距离邻近对应的索体锚固节点的位置；利用张拉装置将吊索（1）、脊索（2）和谷索（3）同步张拉锚固就位，实现空间整体张拉索膜结构的最终成形态。该结构采用基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段设计方法。

## 一种非对称开口式整体张拉索膜结构及其施工和设计方法

### 技术领域

本发明涉及大跨度空间结构领域，尤其涉及大跨度索膜结构，更具体地，本发明涉及非对称开口式整体张拉索膜结构及其施工和设计方法。

### 背景技术

索膜结构的发展源于 20 世纪后期，它是一种新型的张拉结构，由于其独特的体系特点，它能充分利用索与膜的材料抗拉的特性，材料利用效率高。索膜结构的历史最早可以追溯到古老的帐篷，但是它作为一种临时建筑并没有被人们所重视，直到上世纪 80 年代开发出了新型膜材料之后，膜结构才开始得到广泛应用。索膜结构按照其构造形式可以分为：充气式膜结构；索桁架膜结构；索穹顶结构和张拉索膜结构。

张拉索膜结构是一种依靠膜自身的张力以及拉索共同组成的结构体系，该结构主要由张拉索和覆盖的膜材料组成，拉索又分为谷索脊索以及处于膜边缘的边索，在此类结构中膜单元得到充分张拉，能够承受一定荷载。该类结构膜单元可以充当结构水平之间的联系，具有很好的承载作用，且对于水平方向的地震及风荷载具有很好的吸收作用。

张拉索膜结构按照其受力特点可以分为：

(1) 一般张拉索膜结构，膜是主要的受力部分，该结构通过给膜施加一定的预应力使膜具有一定刚度，该类结构由于膜本身强度的限制，无法施加很大的预应力，故该类结构一般应用于跨度较小的结构。

(2) 复合张拉索膜结构，该结构索结构承受结构主要的力，膜单元主要承受局部荷载。因为索网的存在，该类结构刚度较一般张拉索膜结构大，因而可以在大跨度结构中得到应用。同时此类结构索与膜的预应力必须按照一定的比例施加。

现有的开口型索膜整体张拉结构多用于体育场建筑，主要有两种类型：1、径向索为外圈高低两层，至内环索交为一层；平面为圆形或近似椭圆形，整体相对规则，内环索处于同平面内；2、另一种类型为，两层

径向索外围交于一圈，至内环索分为上下两层，两层之间通过撑杆连接。上述开口型索膜整体张拉结构由于结构限制，多为对称造型，难以实现非对称造型的建筑效果。

由于张拉索膜结构造型美观，体型轻盈，材料利用率高，特别适合于体育会展场馆、机场等大跨度结构的屋盖。随着计算机技术的进步，张拉膜结构在实际工程中得到了广泛的发展，该结构的索网作为结构主受力体系，通过膜面张拉使结构成形，作为次要受力体系。因为索网的存在，该类结构刚度较一般张拉索膜结构大，因而可以在大跨度结构中得到应用。同时此类结构索与膜的预应力必须按照一定的比例施加。由于张拉索膜结构跨度大，施工复杂，合理的施工方案不仅能使结构成形态满足设计要求，同时能够降低施工过程的难度。不同的施工张拉方法可能对结构成型后的受力状态产生影响，故合理的张拉方案关系到结构的最终受力和安全性能。

开口式预应力整体张拉结构以钢索为主受力构件，具有合理的受力特性和较高的结构效率，是较能体现当代建筑先进材料、设计和施工技术水平的现代化结构体系。开口式整体张拉主体结构由两个部分构成（见图 1、图 4）：由吊索 1、脊索 2、谷索 3、环索 4 形成了结构中部的连续张力索网，周边支撑结构 7。索膜次结构包括由张紧于脊索、谷索之上的膜和膜边索 12。预应力的施加使开口式整体索网从机构演变为结构，并能承受设计使用荷载，所以张力索网是开口式预应力整体张拉结构的主要承力构件，它实现了“连续张力海洋”的结构力学先进理念。本结构体系属于以“小应变一大竖向变形”为主要特征的非线性柔性结构。

由于开口式预应力整体张拉结构体系新颖，受到设计理论、设计手段的制约，以往开口式预应力整体张拉结构设计仅限于弹性阶段设计，主要包括构件弹性承载力设计、体系弹性竖向变形能力设计。上述设计方法无法反映由加载至破坏全过程结构力学特性，从而无法充分揭示结构各受力阶段的安全控制要素，不能完全满足预应力整体张拉结构安全

设计要求。上述设计方法已远落后于一般较常规的建筑工程采用的“弹性—非线性”二阶段设计方法。而且，本结构体系属于以非线性大竖向变形为主要特征的柔性索网结构，在荷载作用下的结构响应与一般较常规的以刚性结构为主的建筑工程完全不同，目前采用的弹性阶段设计方法，无法反映开口式预应力整体张拉结构非线性大竖向变形特征，从而无法实现对该类柔性结构的承载能力及竖向变形能力的安全控制，更不能满足具备非线性大竖向变形特征的柔性结构体系特性要求。基于上述原因，目前采用的设计方法无法完全满足开口式预应力整体张拉结构安全性、经济性、合理性要求。

## 发明内容

为克服现有技术中的问题的至少一个方面，提出本发明。

本发明提出一种新型索膜整体张拉结构，通过吊索、脊索和谷索三层径向索与环向索形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，这样可以通过脊索和谷索之间的张拉膜面借助脊谷索外端的高差形成索膜竖向承载刚度，吊索增强结构整体竖向刚度。由于有三层索，通过调整不同部位吊索和脊谷索索力，可以实现索膜结构非对称造型的建筑效果。

具体而言，根据本发明的一个方面，提出了一种非对称开口式整体张拉索膜结构，通过吊索、脊索和谷索三层径向拉索与环索形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，其中：在所述三层径向拉索中，吊索在脊索上方、脊索在谷索上方，谷索、脊索、吊索的一端连接到所述环索，谷索、脊索、吊索的另一端连接到外围支撑结构；且覆膜张紧在相邻脊索和谷索之间，相邻的脊索和谷索作为覆膜的骨架张拉所述覆膜。

进一步的，非对称开口式整体张拉索膜结构还包括：膜边索，所述膜边索张紧在相邻谷索和脊索的所述另一端之间，并且张紧所述覆膜在相邻谷索和脊索的所述另一端之间的边缘。

可选的，外围支撑结构包括位于顶部的吊索节点，位于中部的脊索节点，以及位于下部的谷索节点，吊索的另一端连接到所述吊索节点，谷索的另一端连接到所述谷索节点，脊索的另一端连接到所述脊索节点；环索通过第一环索索夹节点与谷索和吊索的一端连接；环索通过第二环

索索夹节点与脊索的一端连接。进一步的，所述外围支撑结构具有柱体、顶部环梁或桁架、中部环梁或桁架和下部环梁或桁架，所述吊索节点设置在所述顶部环梁或桁架上，所述脊索节点设置在所述中部环梁或桁架上，且所述谷索节点设置在所述下部环梁或桁架上。

可选的，所述外围支撑结构为 X 型柱。

可选的，所述谷索、脊索、吊索的索力能够调节。

可选的，所述环索采用单根环索或一组平行的多根环索。

可选的，所述吊索为径向放射状布置或者 X 型交叉布置。

通过上述技术方案，可以实现体育场屋盖非对称马鞍形的建筑造型，脊索和谷索外端高差不必太大，吊索在膜面上方，对建筑效果影响很小，膜面建筑效果更为优美，结构受力合理，施工快捷。

本发明提出一种针对非对称开口型索膜整体张拉结构体系的施工方法。该结构体系通过吊索、脊索和谷索三层径向索与环向索形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，通过脊索和谷索之间的张拉膜面借助脊谷索外端的高差形成索膜竖向承载刚度，吊索增强结构整体竖向刚度。本发明的施工方法不用设置脚手架，只需要以外围钢结构为支撑，进行分批次提升同步张拉，即可实现设计的成形态，且施工全过程结构状态可调控，施工安全状态可控制，施工方法简捷高效。

根据本发明的另一方面，提出了一种非对称开口式整体张拉索膜结构体系的施工方法，所述非对称开口式整体张拉索膜结构体系包括通过吊索、脊索和谷索三层径向拉索与环索形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，其中：在所述三层径向拉索中，吊索在脊索上方、脊索在谷索上方，谷索、脊索、吊索的一端连接到所述环索，谷索、脊索、吊索的另一端连接到外围支撑结构；且覆膜张紧在相邻脊索和谷索之间，相邻的脊索和谷索作为覆膜的骨架张拉所述覆膜，所述方法包括以下步骤：按照所述张拉索膜结构成型后的形状，由牵引装置将吊索、脊索和谷索分步骤提升到距离邻近对应的索体锚固节点的位置；以及利用张拉装置将吊索、脊索和谷索同步张拉锚固就位，实现所述空间整体张拉索膜结构的最终成形态。

有利的，以预应力拉索张拉施工全过程计算机仿真模拟分析为施工指导依据。

有利的，预应力拉索张拉施工全过程计算机仿真模拟分析考虑结构体系几何非线性，采用大型通用有限元程序，采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解。

有利的，以张拉吊索、张拉脊索、张拉谷索、张拉覆膜为先后张拉顺序，环索不需要进行张拉，最终形成空间整体张拉索膜结构。

有利的，在任何一张拉步骤张拉完成后，均需检测已张拉完成的拉索拉应力  $\sigma_s$ ，并以  $0.95 \sigma_0 \leq \sigma_s \leq 1.05 \sigma_0$  为拉索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_0$  为通过全过程施工模拟分析确定的拉索的拉应力；所有拉索最终张拉完成后，需检测环索的最大变形值  $d_s$ ，并以  $0.90 d_0 \leq d_s \leq 1.10 d_0$  为环索允许施工变形判别条件， $d_0$  为通过全过程施工模拟分析确定的环索的最大变形值；所有拉索最终张拉完成后，需检测环索的拉应力  $\sigma_{HS}$ ，并以  $0.90 \sigma_{H0} \leq \sigma_{HS} \leq 1.10 \sigma_{H0}$  为环索允许施工拉应力判别条件，其中， $\sigma_{H0}$  为通过全过程施工模拟分析确定的环索的拉应力。

更加具体的，上述方法包括如下步骤：

(1) 以实现设计要求的结构成形态为目标，以索膜结构整体张拉为张拉施工的基本原则，通过计算机建立整体结构计算模型，并输入相关结构参数，进行预应力拉索张拉施工全过程计算机仿真模拟分析；求得拉索的预应力、下料长度以及拉索的先后张拉顺序等技术参数用于张拉施工，分析过程考虑结构体系几何非线性；分析采用大型通用有限元程序，采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解；

(2) 先从下往上安装外围钢结构，并安装环桁架或环梁-谷索节点、环桁架或环梁-脊索节点、环桁架或环梁-吊索节点；

(3) 根据施工模拟分析计算结果得出各索的下料长度，进行环索和各径向索的精确下料；

(4) 在地面组装环索，并通过第一环索索夹节点将环索与吊索和谷索的一端连接，通过第二环索索夹节点将环索与脊索的一端相连；

(5) 通过辅助索将各根吊索的另一端牵引至距离外围钢结构顶部相应的环桁架或环梁-吊索节点一定距离，取 0.4m 至 1.5m，此时环索连同

脊索和谷索被提离地面距离；

(6) 由牵引工装改成张拉工装，根据施工模拟分析计算结果，进行吊索的另一端的同步张拉，并检测已张拉完成的吊索的拉应力  $\sigma_{DS}$ ，以  $0.95 \sigma_{D0} \leq \sigma_{DS} \leq 1.05 \sigma_{D0}$  为吊索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_{D0}$  为通过全过程施工模拟分析确定的吊索的预拉应力；若不满足要求，则需对已张拉的吊索采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，吊索的另一端张拉就位后，与顶部环向桁架或环梁-吊索节点 6 相连；

(7) 通过辅助索牵引脊索另一端靠近相应的环桁架或环梁-脊索节点，然后换成张拉工装，根据施工模拟分析计算结果，进行脊索的另一端同步张拉，并检测已张拉完成的脊索的拉应力  $\sigma_{JS}$ ，以  $0.95 \sigma_{J0} \leq \sigma_{JS} \leq 1.05 \sigma_{J0}$  为脊索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_{J0}$  为通过全过程施工模拟分析确定的脊索的预拉应力；若不满足要求，则需对已张拉的脊索采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，脊索的另一端张拉就位后，至环桁架或环梁-脊索节点位置，并与环桁架或环梁-脊索节点相连；

(8) 通过辅助索牵引谷索的另一端靠近相应的环桁架或环梁-谷索节点，然后换成张拉工装，根据施工模拟分析计算结果，进行谷索的另一端同步张拉，并检测已张拉完成的谷索的拉应力  $\sigma_{GS}$ ，以  $0.95 \sigma_{G0} \leq \sigma_{GS} \leq 1.05 \sigma_{G0}$  为谷索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_{G0}$  为通过全过程施工模拟分析确定的谷索的预拉应力；若不满足要求，则需对已张拉的谷索采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，谷索的另一端张拉就位后，至环桁架或环梁-谷索连接节点位置，并与环桁架或环梁-谷索连接节点相连；

(9) 检测环索的最大变形值  $d_s$ ，并以  $0.90 d_0 \leq d_s \leq 1.10 d_0$  为环索允许施工变形判别条件；检测环索的拉应力  $\sigma_{HS}$ ，并以  $0.90 \sigma_{H0} \leq \sigma_{HS} \leq 1.10 \sigma_{H0}$  为环索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_{H0}$  为全过程施工模拟分析确定的环索的预拉应力；若不满足要求，则需重新调节吊索、脊索、谷索的拉应力，直至满足环索允许施工变形判别条件及允许施工拉应力判别条件，同时要求满足吊索、脊索、谷索的允许施工拉应力判别条件；

(10) 根据全过程施工模拟分析计算结果，在相邻脊索、谷索和膜

边索之间通过张拉覆膜形成索膜张拉结构。

可选的，上述步骤（4）-（5）由以下步骤替换：

（1'）在地面组装环索，并通过第一环索索夹节点与吊索的一端相连，同时将第一、第二环索索夹节点连接到环索；

（2'）通过辅助索将各根吊索（1）的另一端牵引到距离外围钢结构顶部相应的环桁架或环梁-吊索节点一个距离，该距离取 0.4m 至 1.5m，此时环索被提离地面；

（3'）将第一环索索夹节点与谷索的一端相连，将第二环索索夹节点与脊索的一端相连。

本发明采用了分步提升索膜结构整体张拉施工方法，并以预应力拉索张拉施工全过程计算机仿真模拟分析为施工指导依据，可以保证实际张拉施工完成后的结构形态符合设计结构成形态的要求，简捷高效地实现体育场屋盖开口型整体张拉索膜结构非对称马鞍形的建筑造型，施工全过程结构受力状态可调控，施工安全状态可控制，施工方法简捷高效。

为改进和完善开口式预应力整体张拉结构工程设计，本发明以大量试验及计算分析为基础，针对非线性竖向变形特征明显的开口式整体张拉柔性结构，提出适合于开口式预应力整体张拉结构的一种基于结构承载全过程的多阶段设计方法。

本发明的目的之一是提供一种基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段目标控制设计方法，同时提供各阶段设计指标确定方法，以充分体现开口式预应力整体张拉结构承载全过程“小应变—大竖向变形”柔性结构特征，解决现有开口式预应力整体张拉结构设计方法存在的技术问题，实现开口式预应力整体张拉结构设计的安全性、经济性、合理性。承载全过程：指从结构仅承受自重及索体初始预应力状态开始，对结构逐步增加荷载至结构破坏极限状态的全过程。

根据本发明的再一方面，提出了一种基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段设计方法，所述开口式整体张拉结构包括通过吊索、脊索和谷索三层径向拉索与环索形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，其中：在所述三层径向拉索中，吊索在脊索上方、脊索在谷索上

方，谷索、脊索、吊索的一端连接到所述环索，谷索、脊索、吊索的另一端连接到外围支撑结构；且覆膜张紧在相邻脊索和谷索之间，相邻的脊索和谷索作为覆膜的骨架张拉所述覆膜，

其中：

根据开口式预应力整体张拉结构承载全过程所体现的结构非线性特性将结构力学响应变化过程依次分为如下几个阶段：

阶段①，即弹性阶段，荷载由预应力张拉加自重的结构成形态增加到由永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用的结构正常使用态，谷索拉应力逐渐下降，其它拉索拉应力接近按线性增长，环索非线性竖向变形；

阶段②，谷索松弛或拉应力下降至最低点，其它拉索拉应力接近按线性增长，环索非线性竖向变形，最大竖向变形增量倍数大于荷载增量倍数；

阶段③，谷索再次拉紧，所有拉索拉应力接近按线性增长，直至受拉屈服，环索非线性竖向变形；最大竖向变形增量倍数小于荷载增量倍数；

阶段④，拉索拉应力按非线性增长，应力增量倍数小于荷载增量倍数，直至拉索拉断破坏，环索非线性竖向变形，最大竖向变形增量倍数大于荷载增量倍数，结构丧失承载力，

其中：荷载增量倍数即施加荷载与 1 倍可变荷载的比值；竖向变形增量倍数即永久荷载及施加荷载共同作用下的结构竖向变形与永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下的结构竖向变形的比值；应力增量倍数即永久荷载及施加荷载共同作用下的拉索应力与永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下的拉索应力的比值；施加荷载是指除永久荷载外，施加在结构上的荷载；谷索松弛指谷索出现拉应力为 0 的情况。

可选的，在开口式预应力整体张拉结构承载全过程分析中，将结构材料模型设定为非线性属性；依据试验结果在计算模型中考虑索的预应力损失及索夹节点约束刚度影响，并在计算过程考虑结构体系几何非线性；分析采用大型通用有限元程序，采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解。有利的，通过上述计算模型及计算方法确定承载全过程中体系的承载能力、竖向变形能力、拉索应力等参数变化关系。

上述基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段目标控制设计方法包括如下步骤 1：

确定如下参数：索体弹性模量、屈服强度、极限强度  $\sigma_u$ 、线膨胀系数、索夹连接节点摩擦系数及其约束刚度；采用计算机软件建立与建筑情况一致的仿真计算模型，并将上述参数输入计算模型，进行开口式预应力整体张拉结构承载全过程分析，拉索预拉应力为  $\sigma_0$ ；以及确定各结构力学响应阶段，绘制相关结构响应曲线。可选的，通过力学实验复核索体弹性模量、屈服强度、极限强度  $\sigma_u$ 、线膨胀系数、索夹连接节点摩擦系数及其约束刚度。有利的， $\sigma_0$  为  $0.2-0.3\sigma_u$ 。

上述基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段目标控制设计方法还可包括步骤 2：

根据结构响应阶段①，即弹性阶段，永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下，计算得出索体拉应力  $\sigma_1$ ，以  $0 < \sigma_1 \leq (0.35 \sim 0.5)\sigma_u$  作为阶段①承载力安全条件；计算得出环索竖向变形值  $d_1$  及谷索竖向变形后的曲线倾角  $\alpha_1$ ， $d_1$  为永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下环索竖向变形值； $\alpha_1$  为永久荷载及 1 倍可变荷载 (P1) 同作用产生竖向变形后的谷索曲线上任意点的切线与水平线的夹角，以  $d_1 \leq [d_1]$ ， $\alpha_1 \geq [\alpha]$  作为阶段①竖向变形能力安全条件，其中  $[d_1]$  为满足膜结构建筑使用要求确定的永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下环索最大允许竖向变形值， $[\alpha]$  为永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下谷索竖向变形后的曲线倾角最小允许值，并以满足上述要求为条件，确定拉索预拉应力  $\sigma_0$  的合理性；若分析结果不满足本步骤上述控制要求，应采取调整拉索预拉应力  $\sigma_0$ 、或改变体系布局、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2 进行设计，直至满足要求。可选的， $[d_1]$  取  $L/(60-85)$ ， $L$  为开口式预应力整体张拉结构悬挑长度； $[\alpha]$  取值范围为 5-7 度。

上述基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段目标控制设计方法还可包括步骤 3：

根据结构响应阶段②，谷索松弛或拉应力下降至最低点的荷载增量倍数  $P_s/P_1$ ，以  $P_s/P_1 \geq K_s$ ，作为阶段②弹性承载能力安全条件，其中  $K_s$  为体系弹性承载能力系数；以  $d_s/d_1 \geq \gamma (P_s/P_1)$  作为阶段②弹性竖向变形能力安全条件， $\gamma$  为系数， $d_s$  为谷索松弛或拉应力下降至最低点的施加荷载 ( $P_s$ ) 作用下，环索竖向变形值； $d_s/d_1$  为弹性竖向变形能力系数；若不满足本步骤承载能力安全条件或竖向变形能力安全条件要求，应采取调整拉索初拉力、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2、

步骤 3 进行设计，直至满足要求。可选的， $K_s=1.3-1.8$ ； $\gamma=1.0-1.2$ 。

上述基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段目标控制设计方法还可包括步骤 4：

根据结构响应阶段③，以拉索屈服时对应的荷载增量倍数  $P_y/P_1 \geq K_y$  作为阶段③体系屈服承载能力安全条件，其中  $K_y$  为体系屈服承载力系数；计算得出拉索屈服时对应的环索竖向变形值  $d_y$ ，拉索屈服时对应的谷索竖向变形后的曲线倾角  $\alpha_y$ ，以  $d_y \leq [d_y]$ ， $\alpha_y \geq [\alpha_y]$  作为阶段③竖向变形能力安全条件，其中  $[d_y]$  为拉索屈服时环索最大允许竖向变形值， $[\alpha_y]$  为拉索屈服时谷索竖向变形后的曲线倾角最小允许值， $[\alpha_y] \geq 0$  度；若不满足本步骤承载能力安全条件或竖向变形能力安全条件要求，应采取调整钢索初拉力、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2、步骤 3、步骤 4 进行设计，直至满足要求。可选的， $K_y=5.0-6.5$ ； $[d_y]$  取  $L/(12-20)$ 。

上述基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段目标控制设计方法还可包括步骤 5：

根据结构响应阶段④，以拉索极限破段时对应的荷载增量倍数  $P_u/P_y \geq K_u$  作为阶段④体系极限承载能力安全条件；计算得出拉索极限破段时对应的环索竖向变形值  $d_u$ ，以  $d_u/d_y \geq \gamma (P_u/P_y)$  作为阶段④体系极限竖向变形能力安全条件，其中  $K_u$  为体系承载能力延性系数； $d_u/d_y$  为体系竖向变形能力延性系数；若不满足本步骤承载能力安全条件或竖向变形能力安全条件要求，应采取调整拉索初拉力、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2、步骤 3、步骤 4、步骤 5 进行设计，直至满足要求。可选的， $K_u=1.4-1.8$ 。

上述基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段目标控制设计方法可取得如下技术效果之一：

(1) 完全拟合了开口式预应力整体张拉结构由加载至破坏全过程力学响应，充分揭示结构各受力阶段的安全控制要素，充分体现承载全过程开口式预应力整体张拉结构非线性柔性结构特征，解决现有开口式预应力整体张拉结构设计方法存在的技术问题。

(2) 对开口式预应力整体张拉结构进行多阶段设计控制，通过对各阶段承载能力安全指标的控制，实现了结构承载力安全性能及延性性能的要求。

(3)通过分析确定结构竖向变形能力线及结构竖向变形延性能力线，并以结构竖向变形能力系数及结构竖向变形延性能力系数作为设计控制指标，实现了结构竖向变形安全性能及延性性能的要求。

(4)采用了基于结构承载全过程的多阶段设计目标控制，弥补了现有只进行弹性阶段设计的设计方法的不足，更好的实现了工程安全性、经济性、合理性。

## 附图说明

为了使本发明的目的、特征及优点能更加明显易懂，下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明，其中：

图 1 为根据本发明的一个示例性实施例的整体张拉索膜结构剖面图，  
图 2 为根据本发明的一个示例性实施例的整体张拉索膜结构三维图，  
图 3 为根据本发明的一个示例性实施例的整体张拉索膜结构局部三维图，

图 4 为根据本发明的一个示例性实施例的整体张拉索膜结构局部剖面图，

图 5 为根据本发明的一个示例性实施例的与谷索和吊索相连的第一环索索夹节点的示意图，

图 6 为根据本发明的一个示例性实施例的与脊索相连的第二环索索夹节点的示意图，

图 7 为根据本发明的一个示例性实施例的环向桁架或环梁吊索节点的示意图，

图 8 为根据本发明的一个示例性实施例的环梁-脊索节点的示意图，

图 9 为根据本发明的一个示例性实施例的环梁-谷索节点的示意图，

图 10 为根据本发明的一个示例性实施例的非对称开口式整体张拉索膜结构体系的施工方法的流程图，

图 11 为根据本发明的一个示例性实施例的结构承载全过程荷载-力学响应非线性迭代过程示意图，

图 12 为根据本发明的一个示例性实施例的施加荷载 P 与环索竖向变形 d 关系曲线，

图 13 为根据本发明的一个示例性实施例的施加荷载  $P$  与谷索应力  $\sigma$  关系曲线，

图 14 为根据本发明的一个示例性实施例的施加荷载  $P$  与环索应力  $\sigma$  关系曲线，

图 15 为根据本发明的一个示例性实施例的谷索竖向变形示意图，

图 16 为根据本发明的一个示例性实施例的本发明实施例中开口式预应力整体张拉结构构成，

图 17 为根据本发明的一个示例性实施例的基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段设计方法的流程图。

各附图中：

吊索-1、脊索-2 和谷索-3、环索-4、覆膜-5、环向桁架或环梁吊索节点-6、外围钢结构（或支撑结构）-7、环梁-脊索节点-8、环梁-谷索节点-9、与谷索和吊索相连的环索夹节点-10、与脊索相连的环索夹节点-11、膜边索-12。

图 11 中，横坐标  $d$  表示竖向变形，纵坐标  $P$  表示恢复力，下角标  $i$  表示迭代过程第  $i$  步， $P^a$  为目标荷载。

图 12 中，纵坐标轴  $d$  表示结构环索竖向变形；横坐标为施加荷载  $P$ 。L 表示承载力全过程分析中的不同结构响应阶段。

图 13 中，纵坐标轴  $\sigma_g$  表示谷索应力；横坐标为施加荷载  $P$ 。L 表示承载力全过程分析中的不同结构响应阶段。

图 15 中， $\alpha_1$  为谷索竖向变形后的曲线倾角。

## 具体实施方式

下面详细描述本发明的实例性的实施例，实施例的示例在附图中示出，其中相同或相似的标号表示相同或相似的元件。下面参考附图描述的实施例是示例性的，旨在解释本发明，而不能解释为对本发明的限制。

下面参照图 1-9 以某体育场工程为例描述一种非对称开口式整体张拉索膜结构。

首先建立外围支撑钢结构 7，如图 2 所示，支撑钢结构采用 X 型柱和环向梁，顶部设置环桁架，

在顶部环桁架与吊索连接位置设置环梁-吊索节点 6；

在外围钢结构 7 中部环梁与脊索 2 和谷索 3 外端连接处分别设置中部环梁-脊索节点 8 和下部环梁-谷索节点 9；

根据索力的大小，内圈环向索 4 采用一组平行的 10 根内环索 4，分为上下两层，每层 5 根内环索 4；

内环索 4 通过索夹节点 10 与吊索 1 和谷索 3 内端相连接；

内环索 4 通过索夹节点 11 与脊索 2 内端相连接；

脊索 2 和谷索 3 及膜边索 11 之间通过张拉覆膜 5 形成非对称开口型张拉整体索膜结构。

下面参照图 1-10 描述一种非对称开口式整体张拉索膜结构体系的施工方法。

具体实施方式 1：

以某体育场工程为例，来说明本发明的具体实施方式 1。

(1) 以实现设计要求的结构成形态为目标，以索膜结构整体张拉为张拉施工的基本原则，通过计算机建立整体结构计算模型，并输入相关结构参数，进行预应力拉索张拉施工全过程计算机仿真模拟分析。求得拉索的预应力、下料长度以及拉索的先后张拉顺序等技术参数用于张拉施工，分析过程考虑结构体系几何非线性。分析采用 ANSYS 软件，采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解。

(2) 先从下往上安装外围钢结构 7，并安装环梁-谷索节点 9、环梁-脊索节点 8、环梁-吊索节点 6 等；

(3) 根据施工模拟分析计算结果得出各索的下料长度，进行环索 4 和各径向索 1、2、3 的精确下料；

(4) 在地面组装环索 4，并通过索夹节点 10 与吊索 1 内端和谷索 3 内端相连接，通过索夹节点 11 与脊索 2 内端相连；

(5) 通过辅助索将各根吊索 1 外端牵引至距离外围钢结构 7 顶部环桁架或环梁 6 相应连接节点一定距离，取 0.4m 至 1.5m，此时脊索 2 和谷

索 3 与环索 4 被提高地面；

(6) 由牵引工装改成张拉工装，根据施工模拟分析计算结果，进行吊索 1 外端同步张拉，并检测已张拉完成的吊索 1 的拉应力  $\sigma_{DS}$ ，以  $0.95 \sigma_{D0} \leq \sigma_{DS} \leq 1.05 \sigma_{D0}$ ，为吊索 1 允许施工拉应力判别条件，若不满足要求，则需对已张拉的吊索 1 采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，吊索 1 外端张拉就位后，与顶部环向桁架或环梁-吊索节点 6 相连；

(7) 通过辅助索牵引脊索 2 外端靠近相应的中层环梁-脊索节点 8，然后换成张拉工装，根据施工模拟分析计算结果，进行脊索 2 外端同步张拉，并检测已张拉完成的脊索 2 的拉应力  $\sigma_{JS}$ ，以  $0.95 \sigma_{J0} \leq \sigma_{JS} \leq 1.05 \sigma_{J0}$ ，为脊索 2 允许施工拉应力判别条件，若不满足要求，则需对已张拉的脊索 2 采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，脊索 2 外端张拉就位后，至环梁脊索连接节点 8 位置，并与脊索节点 8 相连；

(8) 根据施工模拟分析计算结果，进行谷索 3 外端同步张拉，并检测已张拉完成的谷索 3 的拉应力  $\sigma_{GS}$ ，以  $0.95 \sigma_{G0} \leq \sigma_{GS} \leq 1.05 \sigma_{G0}$ ，为谷索 3 允许施工拉应力判别条件，若不满足要求，则需对已张拉的谷索 3 采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，谷索 3 外端张拉就位后，至环梁谷索连接节点 9 位置，并与谷索节点 9 相连；

(9) 检测环索 4 的最大变形值  $d_s$ ，并以  $0.90 d_0 \leq d_s \leq 1.10 d_0$ ，为环索 4 允许施工变形判别条件；检测环索 4 的拉应力  $\sigma_{HS}$ ，并以  $0.90 \sigma_{H0} \leq \sigma_{HS} \leq 1.10 \sigma_{H0}$ ，为环索 4 允许施工拉应力判别条件。若不满足要求，则需重新调节吊索 1、脊索 2、谷索 3 的拉应力，直至满足环索 4 允许施工变形判别条件及允许施工拉应力判别条件，同时要求满足吊索 1、脊索 2、谷索 3 的允许施工拉应力判别条件；

(10) 根据施工模拟分析计算结果，在相邻脊索 2、谷索 3 和膜边索 12 之间通过张拉覆膜 5 形成索膜张拉结构。

具体实施方式 2：

以某体育场工程为例，来说明本发明的具体实施方式 2。

(1) 以实现设计要求的结构成形态为目标, 以索膜结构整体张拉为张拉施工的基本原则, 通过计算机建立整体结构计算模型, 并输入相关结构参数, 进行预应力拉索张拉施工全过程计算机仿真模拟分析。求得拉索的预应力、下料长度以及拉索的先后张拉顺序等技术参数用于张拉施工, 分析过程考虑结构体系几何非线性。分析采用 ANSYS 软件, 采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解。

(2) 先从下往上安装外围钢结构 7, 并安装环梁-谷索节点 9、环梁-脊索节点 8、环梁-吊索节点 6 等;

(3) 根据施工模拟分析计算结果, 得出各索的下料长度, 进行环索 4 和各径向索 1、2、3 的精确下料;

(4) 在地面组装环索 4, 并通过索夹节点 10 与吊索 1 内端相连, 同时将索夹节点 11 连接于环索 4;

(5) 通过辅助索将各根吊索 1 外端牵引至距离外围钢结构 7 顶部环桁架或环梁 6 相应连接节点一定距离, 取 0.4m 至 1.5m, 此时环索 4 被脱离地面;

(6) 通过环索索夹节点 10 与谷索 3 内端相连, 通过环索索夹节点 11 与脊索 2 内端相连接;

(7) 由牵引工装改成张拉工装, 根据施工模拟分析计算结果, 进行吊索 1 外端同步张拉, 并检测已张拉完成的吊索 1 的拉应力  $\sigma_{DS}$ , 以  $0.95 \sigma_{D0} \leq \sigma_{DS} \leq 1.05 \sigma_{D0}$ , 为吊索 1 允许施工拉应力判别条件, 若不满足要求, 则需对已张拉的吊索 1 采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节, 直至满足判别条件, 吊索 1 外端张拉就位后, 与顶部环向桁架或环梁-吊索节点 6 相连;

(8) 通过辅助索牵引脊索 2 外端靠近相应的中层环梁-脊索节点 8, 然后换成张拉工装, 根据施工模拟分析计算结果, 进行脊索 2 外端同步张拉, 并检测已张拉完成的脊索 2 的拉应力  $\sigma_{JS}$ , 以  $0.95 \sigma_{J0} \leq \sigma_{JS} \leq 1.05 \sigma_{J0}$ , 为脊索 2 允许施工拉应力判别条件, 若不满足要求, 则需对已张拉的脊索 2 采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节, 直至满足判别条件, 脊索 2 外端张拉就位后, 至环梁脊索连接节点 8 位置, 并与脊索节点 8 相连;

(9) 通过辅助索牵引谷索 3 外端靠近相应的环梁-谷索节点 9，然后换成张拉工装，根据施工模拟分析计算结果，进行谷索 3 外端同步张拉，并检测已张拉完成的谷索 3 的拉应力  $\sigma_{GS}$ ，以  $0.95 \sigma_{G0} \leq \sigma_{GS} \leq 1.05 \sigma_{G0}$ ，为谷索 3 允许施工拉应力判别条件，若不满足要求，则需对已张拉的谷索 3 采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，谷索 3 外端张拉就位后，至环梁谷索连接节点 9 位置，并与谷索节点 9 相连；

(10) 检测环索 4 的最大变形值  $d_s$ ，并以  $0.90 d_0 \leq d_s \leq 1.10 d_0$ ，为环索 4 允许施工变形判别条件；检测环索 4 的拉应力  $\sigma_{HS}$ ，并以  $0.90 \sigma_{H0} \leq \sigma_{HS} \leq 1.10 \sigma_{H0}$ ，为环索 4 允许施工拉应力判别条件。若不满足要求，则需重新调节吊索 1、脊索 2、谷索 3 的拉应力，直至满足环索 4 允许施工变形判别条件及允许施工拉应力判别条件，同时要求满足吊索 1、脊索 2、谷索 3 的允许施工拉应力判别条件；

(11) 根据施工模拟分析计算结果，在相邻脊索 2、谷索 3 和膜边索 12 之间通过张拉覆膜 5 形成整体张拉索膜结构。

下面参照图 1-17 描述一种基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段设计方法。

某开口式整体张拉屋盖结构工程，如图 1，结构最大悬挑长度 43m，结构最大高度 65m，整个屋盖结构体系通过由径向吊索 1、膜结构脊索 2 和谷索 3、膜边索 12、环索 4 和周边支撑结构 7 而成。

#### 步骤 1:

根据相关国家设计标准，确定索体弹性模量  $E_s=1.6 \times 105 \text{MPa}$ ，（名义）屈服强度  $f_y=1330 \text{MPa}$ ，极限强度  $f_u=1670 \text{MPa}$ ，线膨胀系数  $\alpha=1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ；在试验室内对索及索夹连接节点进行力学试验，得到连接节点摩擦系数及约束刚度等参数，计算中考虑 3% 的损失。

依据试验室试验结果，将结构材料模型设定为材料非线性属性；并在计算过程考虑结构体系几何非线性和节点预应力损失。分析在 ANSYS 软件中进行，采用非线性迭代方法求解。拉索预拉应力为  $\sigma_0=334 \text{MPa}$ ，根据分析结论，确定各结构力学响应阶段，并绘制相关结构响应曲线（图

12-图 14)。

步骤 2: 经计算, 在永久荷载及 1 倍可变荷载( $P_1$ )共同作用下, 拉索最大拉应力为  $\sigma_1=580\text{Mpa} < 0.4 \times 1670 \text{ Mpa}$ , 最小拉应力为  $\sigma_s=210\text{Mpa} > 0$ , 满足拉索材料承载力要求; 环索竖向变形值为  $d_1=476\text{mm} < 43000/85$ , 满足在永久荷载及 1 倍可变荷载( $P_1$ )共同作用下环索最大允许竖向变形值的要求。确定雪荷载作用下谷索竖向变形后的曲线倾角为  $\alpha_1=6 \text{ 度} > 5 \text{ 度}$ , 满足曲线倾角最小允许值的要求。由于上述各项指标均符合要求, 表明拉索预拉应力采用  $\sigma_0=334\text{Mpa}$  合理, 可以进行下一步骤设计。

步骤 3: 在阶段②, 经分析得到, 谷索拉应力下降至最低点的荷载增量倍数  $P_s/P_1$  为 1.9, 取  $K_s=1.8$ ,  $P_s/P_1 > K_s$ , 符合本阶段弹性承载能力安全条件要求; 经计算, 拉应力下降至最低点时的环索竖向变形值  $d_s=1163\text{mm}$ , 在永久荷载及 1 倍可变荷载( $P_1$ )共同作用下环索竖向变形值  $d_1=476\text{mm}$ , 可以得到弹性竖向变形能力系数  $d_s/d_1=2.44$ , 在步骤 2 中, 取  $\gamma=1.2$ , 可以得到  $d_s/d_1 > \gamma (P_s/P_1)$ , 符合本阶段弹性竖向变形能力安全条件要求。可以进行下一步骤设计。

步骤 4: 在阶段③, 经分析得到, 拉索屈服时对应的荷载增量倍数  $P_y/P_1=8.2$ , 取  $K_y=6.5$ ,  $P_y/P_1 > K_y$ , 符合本阶段体系屈服承载能力安全条件要求; 经计算, 拉索屈服时的环索竖向变形值  $d_y=2863\text{mm} < [d_y]$ ,  $[d_y]=L/15=2867\text{mm}$ ,  $\alpha_y=1.2 \text{ 度} > 0 \text{ 度}$ , 符合本阶段体系屈服竖向变形能力安全条件要求。可以进行下一步骤设计。

步骤 5: 在阶段④, 经分析得到, 拉索极限破段时对应的荷载增量倍数  $P_u/P_y=1.85$ , 取  $K_u=1.8$ ,  $P_u/P_y > K_u$  符合本阶段体系极限承载能力安全条件要求; 拉索极限破段时对应的环索竖向变形值  $d_u=6568\text{mm}$ , 可以得到体系竖向变形能力延性系数  $d_u/d_y=2.45$ , 经计算, 取  $\gamma=1.2$ ,  $d_u/d_y \geq \gamma (P_u/P_y)$  符合本阶段体系极限竖向变形能力安全条件。

上述各步骤均满足, 结构安全指标控制要求, 设计完成。

在详细说明本发明的较佳实施例之后, 熟悉本领域的技术人员可清楚的了解, 在不脱离随附权利要求的保护范围与精神下可进行各种变化与改变, 且本发明亦不受限于说明书中所举示例性实施例的实施方式。

## 权 利 要 求 书

1、一种非对称开口式整体张拉索膜结构，通过吊索、脊索和谷索三层径向拉索与环索形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，其中：在所述三层径向拉索中，吊索在脊索上方、脊索在谷索上方，谷索、脊索、吊索的一端连接到所述环索，谷索、脊索、吊索的另一端连接到外围支撑结构；且覆膜张紧在相邻脊索和谷索之间，相邻的脊索和谷索作为覆膜的骨架张拉所述覆膜。

2、根据权利要求 1 所述的非对称开口式整体张拉索膜结构，还包括：膜边索，所述膜边索张紧在相邻谷索和脊索的所述另一端之间，并且张紧所述覆膜在相邻谷索和脊索的所述另一端之间的边缘。

3、根据权利要求 1 所述的非对称开口式整体张拉索膜结构，其中：外围支撑结构包括位于顶部的吊索节点，位于中部的脊索节点，以及位于下部的谷索节点，吊索的另一端连接到所述吊索节点，谷索的另一端连接到所述谷索节点，脊索的另一端连接到所述脊索节点；

环索通过第一环索索夹节点与谷索和吊索的一端连接；

环索通过第二环索索夹节点与脊索的一端连接。

4、根据权利要求 3 所述的非对称开口式整体张拉索膜结构，其中：所述外围支撑结构具有柱体、顶部环梁或桁架、中部环梁或桁架和下部环梁或桁架，所述吊索节点设置在所述顶部环梁或桁架上，所述脊索节点设置在所述中部环梁或桁架上，且所述谷索节点设置在所述下部环梁或桁架上。

5、根据权利要求 1 所述的非对称开口式整体张拉索膜结构，其中：所述外围支撑结构为 X 型柱。

6、根据权利要求 1 所述的非对称开口式整体张拉索膜结构，其中：所述谷索、脊索、吊索的索力能够调节。

7、根据权利要求 1-6 中任一项所述的非对称开口式整体张拉索膜结构，其中：

所述环索采用单根环索或一组平行的多根环索。

8、根据权利要求 1-6 中任一项所述的非对称开口式整体张拉索膜结构，

其中：

所述吊索为径向放射状布置或者 X 型交叉布置。

9、根据权利要求 7 所述的非对称开口式整体张拉索膜结构，其中：  
所述吊索为径向放射状布置或者 X 型交叉布置。

10、一种非对称开口式整体张拉索膜结构体系的施工方法，所述非对称开口式整体张拉索膜结构体系包括通过吊索、脊索和谷索三层径向拉索与环索形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，其中：在所述三层径向拉索中，吊索在脊索上方、脊索在谷索上方，谷索、脊索、吊索的一端连接到所述环索，谷索、脊索、吊索的另一端连接到外围支撑结构；且覆膜张紧在相邻脊索和谷索之间，相邻的脊索和谷索作为覆膜的骨架张拉所述覆膜，

所述方法包括以下步骤：

按照所述张拉索膜结构成型后的形状，由牵引装置将吊索、脊索和谷索分步骤提升到距离邻近对应的索体锚固节点的位置；

利用张拉装置将吊索、脊索和谷索同步张拉锚固就位，实现所述空间整体张拉索膜结构的最终成形态。

11、根据权利要求 10 所述的方法，其中：

以预应力拉索张拉施工全过程计算机仿真模拟分析为施工指导依据。

12、根据权利要求 11 所述的方法，其中：

预应力拉索张拉施工全过程计算机仿真模拟分析考虑结构体系几何非线性，采用大型通用有限元程序，采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解。

13、根据权利要求 11 或 12 所述的方法，其中：

以张拉吊索、张拉脊索、张拉谷索、张拉覆膜为先后张拉顺序，环索不需要进行张拉，最终形成空间整体张拉索膜结构。

14、根据权利要求 13 所述的方法，其中：

在任何一张拉步骤张拉完成后，均需检测已张拉完成的拉索拉应力  $\sigma_s$ ，并以  $0.95 \sigma_0 \leq \sigma_s \leq 1.05 \sigma_0$  为拉索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_0$  为通过全过程施工模拟分析确定的拉索的拉应力；所有拉索最终张拉完成后，需检测环索的最大变形值  $d_s$ ，并以  $0.90 d_0 \leq d_s \leq 1.10 d_0$  为环索允许

施工变形判别条件， $d_0$  为通过全过程施工模拟分析确定的环索的最大变形值；所有拉索最终张拉完成后，需检测环索的拉应力  $\sigma_{HS}$ ，并以  $0.90 \sigma_{H0} \leq \sigma_{HS} \leq 1.10 \sigma_{H0}$  为环索允许施工拉应力判别条件，其中， $\sigma_{H0}$  为通过全过程施工模拟分析确定的环索的拉应力。

15、根据权利要求 10 所述的方法，包括如下步骤：

(1) 以实现设计要求的结构成形态为目标，以索膜结构整体张拉为张拉施工的基本原则，通过计算机建立整体结构计算模型，并输入相关结构参数，进行预应力拉索张拉施工全过程计算机仿真模拟分析；求得拉索的预应力、下料长度以及拉索的先后张拉顺序等技术参数用于张拉施工，分析过程考虑结构体系几何非线性；分析采用大型通用有限元程序，采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解；

(2) 先从下往上安装外围钢结构，并安装环桁架或环梁-谷索节点、环桁架或环梁-脊索节点、环桁架或环梁-吊索节点；

(3) 根据施工模拟分析计算结果得出各索的下料长度，进行环索和各径向索的精确下料；

(4) 在地面组装环索，并通过第一环索索夹节点将环索与吊索和谷索的一端连接，通过第二环索索夹节点将环索与脊索的一端相连；

(5) 通过辅助索将各根吊索的另一端牵引至距离外围钢结构顶部相应的环桁架或环梁-吊索节点一定距离，取 0.4m 至 1.5m，此时环索连同脊索和谷索被提高地面距离；

(6) 由牵引工装改成张拉工装，根据施工模拟分析计算结果，进行吊索的另一端的同步张拉，并检测已张拉完成的吊索的拉应力  $\sigma_{DS}$ ，以  $0.95 \sigma_{D0} \leq \sigma_{DS} \leq 1.05 \sigma_{D0}$  为吊索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_{D0}$  为通过全过程施工模拟分析确定的吊索的预拉应力；若不满足要求，则需对已张拉的吊索采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，吊索的另一端张拉就位后，与顶部环向桁架或环梁-吊索节点相连；

(7) 通过辅助索牵引脊索另一端靠近相应的环桁架或环梁-脊索节点，然后换成张拉工装，根据施工模拟分析计算结果，进行脊索的另一端同步张拉，并检测已张拉完成的脊索的拉应力  $\sigma_{JS}$ ，以  $0.95 \sigma_{J0} \leq \sigma_{JS} \leq 1.05 \sigma_{J0}$  为脊索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_{J0}$  为通过全过程施工模拟分

析确定的脊索的预拉应力；若不满足要求，则需对已张拉的脊索采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，脊索的另一端张拉就位后，至环桁架或环梁-脊索节点位置，并与环桁架或环梁-脊索节点相连；

(8) 通过辅助索牵引谷索的另一端靠近相应的环桁架或环梁-谷索节点，然后换成张拉工装，根据施工模拟分析计算结果，进行谷索的另一端同步张拉，并检测已张拉完成的谷索的拉应力  $\sigma_{GS}$ ，以  $0.95 \sigma_{G0} \leq \sigma_{GS} \leq 1.05 \sigma_{G0}$  为谷索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_{J0}$  为通过全过程施工模拟分析确定的谷索的预拉应力；若不满足要求，则需对已张拉的谷索采用放松或拉紧等方式进行拉应力调节，直至满足判别条件，谷索的另一端张拉就位后，至环桁架或环梁-谷索连接节点位置，并与环桁架或环梁-谷索连接节点相连；

(9) 检测环索的最大变形值  $d_s$ ，并以  $0.90 d_0 \leq d_s \leq 1.10 d_0$  为环索允许施工变形判别条件；检测环索的拉应力  $\sigma_{HS}$ ，并以  $0.90 \sigma_{H0} \leq \sigma_{HS} \leq 1.10 \sigma_{H0}$  为环索允许施工拉应力判别条件， $\sigma_{H0}$  为全过程施工模拟分析确定的环索的预拉应力；若不满足要求，则需重新调节吊索、脊索、谷索的拉应力，直至满足环索允许施工变形判别条件及允许施工拉应力判别条件，同时要求满足吊索、脊索、谷索的允许施工拉应力判别条件；

(10) 根据全过程施工模拟分析计算结果，在相邻脊索、谷索和膜边索之间通过张拉覆膜形成索膜张拉结构。

16、根据权利要求 15 所述的方法，其中：步骤 (4) - (5) 由以下步骤替换：

(1') 在地面组装环索，并通过第一环索索夹节点与吊索的一端相连，同时将第一环索索夹节点、第二环索索夹节点连接到环索；

(2') 通过辅助索将各根吊索 (1) 的另一端牵引到距离外围钢结构顶部相应的环桁架或环梁-吊索节点一个距离，该距离取 0.4m 至 1.5m，此时环索被提离地面；

(3') 将第一环索索夹节点与谷索的一端相连，将第二环索索夹节点与脊索的一端相连。

17、一种基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段设计

方法，所述开口式整体张拉结构包括通过吊索、脊索和谷索三层径向拉索与环索形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，其中：在所述三层径向拉索中，吊索在脊索上方、脊索在谷索上方，谷索、脊索、吊索的一端连接到所述环索，谷索、脊索、吊索的另一端连接到外围支撑结构；且覆膜张紧在相邻脊索和谷索之间，相邻的脊索和谷索作为覆膜的骨架张拉所述覆膜，

其中：

根据开口式预应力整体张拉结构承载全过程所体现的结构非线性特性将结构力学响应变化过程依次分为如下几个阶段：

阶段①，即弹性阶段，荷载由预应力张拉加自重的结构成形态增加到由永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用的结构正常使用态，谷索拉应力逐渐下降，其它拉索拉应力接近按线性增长，环索非线性竖向变形；

阶段②，谷索松弛或拉应力下降至最低点，其它拉索拉应力接近按线性增长，环索非线性竖向变形，最大竖向变形增量倍数大于荷载增量倍数；

阶段③，谷索再次拉紧，所有拉索拉应力接近按线性增长，直至受拉屈服，环索非线性竖向变形；最大竖向变形增量倍数小于荷载增量倍数；

阶段④，拉索拉应力按非线性增长，应力增量倍数小于荷载增量倍数，直至拉索拉断破坏，环索非线性竖向变形，最大竖向变形增量倍数大于荷载增量倍数，结构丧失承载力，

其中：荷载增量倍数即施加荷载与 1 倍可变荷载的比值；竖向变形增量倍数即永久荷载及施加荷载共同作用下的结构竖向变形与永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下的结构竖向变形的比值；应力增量倍数即永久荷载及施加荷载共同作用下的拉索应力与永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下的拉索应力的比值；施加荷载是指除永久荷载外，施加在结构上的荷载；谷索松弛指谷索出现拉应力为 0 的情况。

18、根据权利要求 17 所述的方法，其中：

在开口式预应力整体张拉结构承载全过程分析中，将结构材料模型设定为非线性属性；依据试验结果在计算模型中考虑索的预应力损失及

索夹节点约束刚度影响，并在计算过程考虑结构体系几何非线性；分析采用大型通用有限元程序，采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解。

19、根据权利要求 18 所述的方法，其中：

通过上述计算模型及计算方法确定承载全过程中体系的承载能力、竖向变形能力、拉索应力等参数变化关系。

20、根据权利要求 17-19 中任一项所述的方法，包括如下步骤 1：

确定如下参数：索体弹性模量、屈服强度、极限强度  $\sigma_u$ 、线膨胀系数、索夹连接节点摩擦系数及其约束刚度；采用计算软件建立与建筑情况一致的仿真计算模型，并将上述参数输入计算模型，进行开口式预应力整体张拉结构承载全过程分析，拉索预拉应力为  $\sigma_0$ ；以及确定各结构力学响应阶段，绘制相关结构响应曲线。

21、根据权利要求 20 所述的方法，还包括步骤：

通过力学实验复核索体弹性模量、屈服强度、极限强度  $\sigma_u$ 、线膨胀系数、索夹连接节点摩擦系数及其约束刚度。

22、根据权利要求 20 所述的方法，其中：

$\sigma_0$  为  $0.2-0.3 \sigma_u$ 。

23、根据权利要求 20 所述的方法，还包括步骤 2：

根据结构响应阶段①，即弹性阶段，永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下，计算得出索体拉应力  $\sigma_1$ ，以  $0 < \sigma_1 \leq (0.35-0.5) \sigma_u$  作为阶段①承载力安全条件；计算得出环索竖向变形值  $d_1$  及谷索竖向变形后的曲线倾角  $\alpha_1$ ， $d_1$  为永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下环索竖向变形值； $\alpha_1$  为永久荷载及 1 倍可变荷载(P1)同作用产生竖向变形后的谷索曲线上任意点的切线与水平线的夹角，以  $d_1 \leq [d_1]$ ， $\alpha_1 \geq [\alpha]$  作为阶段①竖向变形能力安全条件，其中  $[d_1]$  为满足膜结构建筑使用要求确定的永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下环索最大允许竖向变形值， $[\alpha]$  为永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下谷索竖向变形后的曲线倾角最小允许值，并以满足上述要求为条件，确定拉索预拉应力  $\sigma_0$  的合理性；若分析结果不满足本步骤上述控制要求，应采取调整拉索预拉应力  $\sigma_0$ 、或改变体系布局、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2 进行设计，直至满足要求。

24、根据权利要求 23 所述的方法，其中：

$[d_1]$ 取  $L/(60-85)$ ， $L$  为开口式预应力整体张拉结构悬挑长度；

$[\alpha]$ 取值范围为 5-7 度。

25、根据权利要求 23 所述的方法，还包括步骤 3：

根据结构响应阶段②，谷索松弛或拉应力下降至最低点的荷载增量倍数  $P_s/P_1$ ，以  $P_s/P_1 \geq K_s$ ，作为阶段②弹性承载能力安全条件，其中  $K_s$  为体系弹性承载能力系数；以  $d_s/d_1 \geq \gamma (P_s/P_1)$  作为阶段②弹性竖向变形能力安全条件， $\gamma$  为系数， $d_s$  为谷索松弛或拉应力下降至最低点的施加荷载 ( $P_s$ ) 作用下，环索竖向变形值； $d_s/d_1$  为弹性竖向变形能力系数；若不满足本步骤承载能力安全条件或竖向变形能力安全条件要求，应采取调整拉索初拉力、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2、步骤 3 进行设计，直至满足要求。

26、根据权利要求 25 所述的方法，其中：

$K_s=1.3-1.8$ ；

$\gamma=1.0-1.2$ 。

27、根据权利要求 25 所述的方法，还包括步骤 4：

根据结构响应阶段③，以拉索屈服时对应的荷载增量倍数  $P_y/P_1 \geq K_y$  作为阶段③体系屈服承载能力安全条件，其中  $K_y$  为体系屈服承载力系数；计算得出拉索屈服时对应的环索竖向变形值  $d_y$ ，拉索屈服时对应的谷索竖向变形后的曲线倾角  $\alpha_y$ ，以  $d_y \leq [d_y]$ ， $\alpha_y \geq [\alpha_y]$  作为阶段③竖向变形能力安全条件，其中  $[d_y]$  为拉索屈服时环索最大允许竖向变形值， $[\alpha_y]$  为拉索屈服时谷索竖向变形后的曲线倾角最小允许值， $[\alpha_y] \geq 0$  度；若不满足本步骤承载能力安全条件或竖向变形能力安全条件要求，应采取调整钢索初拉力、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2、步骤 3、步骤 4 进行设计，直至满足要求。

28、根据权利要求 27 所述的方法，其中：

$K_y=5.0-6.5$ ；

$[d_y]$ 取  $L/(12-20)$ 。

29、根据权利要求 27 所述的方法，还包括步骤 5：

根据结构响应阶段④，以拉索极限破段时对应的荷载增量倍数  $P_u/P_y$

$\geq K_u$  作为阶段④体系极限承载能力安全条件；计算得出拉索极限破段时对应的环索竖向变形值  $d_u$ ，以  $d_u/d_y \geq \gamma (P_u/P_y)$  作为阶段④体系极限竖向变形能力安全条件，其中  $K_u$  为体系承载能力延性系数； $d_u/d_y$  为体系竖向变形能力延性系数；若不满足本步骤承载能力安全条件或竖向变形能力安全条件要求，应采取调整拉索初拉力、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2、步骤 3、步骤 4、步骤 5 进行设计，直至满足要求。

30、根据权利要求 29 所述的方法，其中：

$K_u=1.4-1.8$ 。

## 经修改的权利要求

国际局收到日：26.11月2013 (26.11.2013)

1、一种基于承载全过程的开口式预应力整体张拉结构多阶段设计方法，所述开口式整体张拉结构包括通过吊索、脊索和谷索三层径向拉索与环索形成中间开口的空间整体张拉索膜结构，其中：在所述三层径向拉索中，吊索在脊索上方、脊索在谷索上方，谷索、脊索、吊索的一端连接到所述环索，谷索、脊索、吊索的另一端连接到外围支撑结构；且覆膜张紧在相邻脊索和谷索之间，相邻的脊索和谷索作为覆膜的骨架张拉所述覆膜，

其中：

根据开口式预应力整体张拉结构承载全过程所体现的结构非线性特性将结构力学响应变化过程依次分为如下几个阶段：

阶段①，即弹性阶段，荷载由预应力张拉加自重的结构成形态增加到由永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用的结构正常使用态，谷索拉应力逐渐下降，其它拉索拉应力接近按线性增长，环索非线性竖向变形；

阶段②，谷索松弛或拉应力下降至最低点，其它拉索拉应力接近按线性增长，环索非线性竖向变形，最大竖向变形增量倍数大于荷载增量倍数；

阶段③，谷索再次拉紧，所有拉索拉应力接近按线性增长，直至受拉屈服，环索非线性竖向变形；最大竖向变形增量倍数小于荷载增量倍数；

阶段④，拉索拉应力按非线性增长，应力增量倍数小于荷载增量倍数，直至拉索拉断破坏，环索非线性竖向变形，最大竖向变形增量倍数大于荷载增量倍数，结构丧失承载力；

其中：荷载增量倍数即施加荷载与 1 倍可变荷载的比值；竖向变形增量倍数即永久荷载及施加荷载共同作用下的结构竖向变形与永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下的结构竖向变形的比值；应力增量倍数即永久荷载及施加荷载共同作用下的拉索应力与永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下的拉索应力的比值；施加荷载是指除永久荷载外，施加在结构

上的荷载；谷索松弛指谷索出现拉应力为 0 的情况。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其中：

在开口式预应力整体张拉结构承载全过程分析中，将结构材料模型设定为非线性属性；依据试验结果在计算模型中考虑索的预应力损失及索夹节点约束刚度影响，并在计算过程考虑结构体系几何非线性；分析采用大型通用有限元程序，采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解。

3、根据权利要求 2 所述的方法，其中：

通过上述计算模型及计算方法确定承载全过程中体系的承载能力、竖向变形能力、拉索应力等参数变化关系。

4、根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法，包括如下步骤 1：

确定如下参数：索体弹性模量、屈服强度、极限强度  $\sigma_u$ 、线膨胀系数、索夹连接节点摩擦系数及其约束刚度；采用计算软件建立与建筑情况一致的仿真计算模型，并将上述参数输入计算模型，进行开口式预应力整体张拉结构承载全过程分析，拉索预拉应力为  $\sigma_0$ ；以及确定各结构力学响应阶段，绘制相关结构响应曲线。

5、根据权利要求 4 所述的方法，还包括步骤：

通过力学实验复核索体弹性模量、屈服强度、极限强度  $\sigma_u$ 、线膨胀系数、索夹连接节点摩擦系数及其约束刚度。

6、根据权利要求 4 所述的方法，其中：

$\sigma_0$  为  $0.2-0.3 \sigma_u$ 。

7、根据权利要求 4 所述的方法，还包括步骤 2：

根据结构响应阶段①，即弹性阶段，永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下，计算得出索体拉应力  $\sigma_1$ ，以  $0 < \sigma_1 \leq (0.35-0.5) \sigma_u$  作为阶段①承载力安全条件；计算得出环索竖向变形值  $d_1$  及谷索竖向变形后的曲线倾角  $\alpha_1$ ， $d_1$  为永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下环索竖向变形值； $\alpha_1$  为永久荷载及 1 倍可变荷载 (P1) 同作用产生竖向变形后的谷索曲线上任意点的切线与水平线的夹角，以  $d_1 \leq [d_1]$ ， $\alpha_1 \geq [\alpha]$  作为阶段①竖向变形能力安全条件，其中  $[d_1]$  为满足膜结构建筑使用要求确定的永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下环索最大允许竖向变形值， $[\alpha]$  为永久荷载及 1 倍可变荷载共同作用下谷索竖向变形后的曲线倾角最小允许值，并以满

足上述要求为条件，确定拉索预拉应力  $\sigma_0$  的合理性；若分析结果不满足本步骤上述控制要求，应采取调整拉索预拉应力  $\sigma_0$ 、或改变体系布局、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2 进行设计，直至满足要求。

8、根据权利要求 7 所述的方法，其中：

$[d_1]$  取  $L/(60-85)$ ， $L$  为开口式预应力整体张拉结构悬挑长度；

$[\alpha]$  取值范围为 5-7 度。

9、根据权利要求 7 所述的方法，还包括步骤 3：

根据结构响应阶段②，谷索松弛或拉应力下降至最低点的荷载增量倍数  $P_s/P_1$ ，以  $P_s/P_1 \geq K_s$ ，作为阶段②弹性承载能力安全条件，其中  $K_s$  为体系弹性承载能力系数；以  $d_s/d_1 \geq \gamma (P_s/P_1)$  作为阶段②弹性竖向变形能力安全条件， $\gamma$  为系数， $d_s$  为谷索松弛或拉应力下降至最低点的施加荷载 ( $P_s$ ) 作用下，环索竖向变形值； $d_s/d_1$  为弹性竖向变形能力系数；若不满足本步骤承载能力安全条件或竖向变形能力安全条件要求，应采取调整拉索初拉力、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2、步骤 3 进行设计，直至满足要求。

10、根据权利要求 9 所述的方法，其中：

$K_s=1.3-1.8$ ；

$\gamma=1.0-1.2$ 。

11、根据权利要求 9 所述的方法，还包括步骤 4：

根据结构响应阶段③，以拉索屈服时对应的荷载增量倍数  $P_y/P_1 \geq K_y$  作为阶段③体系屈服承载能力安全条件，其中  $K_y$  为体系屈服承载力系数；计算得出拉索屈服时对应的环索竖向变形值  $d_y$ ，拉索屈服时对应的谷索竖向变形后的曲线倾角  $\alpha_y$ ，以  $d_y \leq [d_y]$ ， $\alpha_y \geq [\alpha_y]$  作为阶段③竖向变形能力安全条件，其中  $[d_y]$  为拉索屈服时环索最大允许竖向变形值， $[\alpha_y]$  为拉索屈服时谷索竖向变形后的曲线倾角最小允许值， $[\alpha_y] \geq 0$  度；若不满足本步骤承载能力安全条件或竖向变形能力安全条件要求，应采取调整钢索初拉力、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2、步骤 3、步骤 4 进行设计，直至满足要求。

12、根据权利要求 11 所述的方法，其中：

$K_y=5.0-6.5$ ;

$[d_y]$ 取  $L/(12-20)$ 。

13、根据权利要求 11 所述的方法，还包括步骤 5：

根据结构响应阶段④，以拉索极限破段时对应的荷载增量倍数  $P_u/P_y$   $\geq K_u$  作为阶段④体系极限承载能力安全条件；计算得出拉索极限破段时对应的环索竖向变形值  $d_u$ ，以  $d_u/d_y \geq \gamma (P_u/P_y)$  作为阶段④体系极限竖向变形能力安全条件，其中  $K_u$  为体系承载能力延性系数； $d_u/d_y$  为体系竖向变形能力延性系数；若不满足本步骤承载能力安全条件或竖向变形能力安全条件要求，应采取调整拉索初拉力、或增加拉索刚度或承载力，重新按照步骤 1、步骤 2、步骤 3、步骤 4、步骤 5 进行设计，直至满足要求。

14、根据权利要求 13 所述的方法，其中：

$K_u=1.4-1.8$ 。

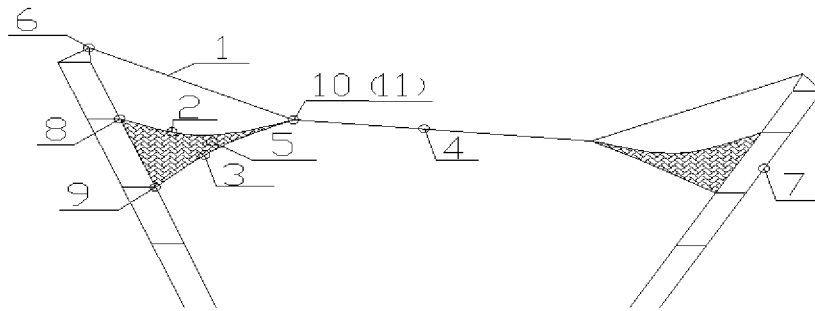


图 1

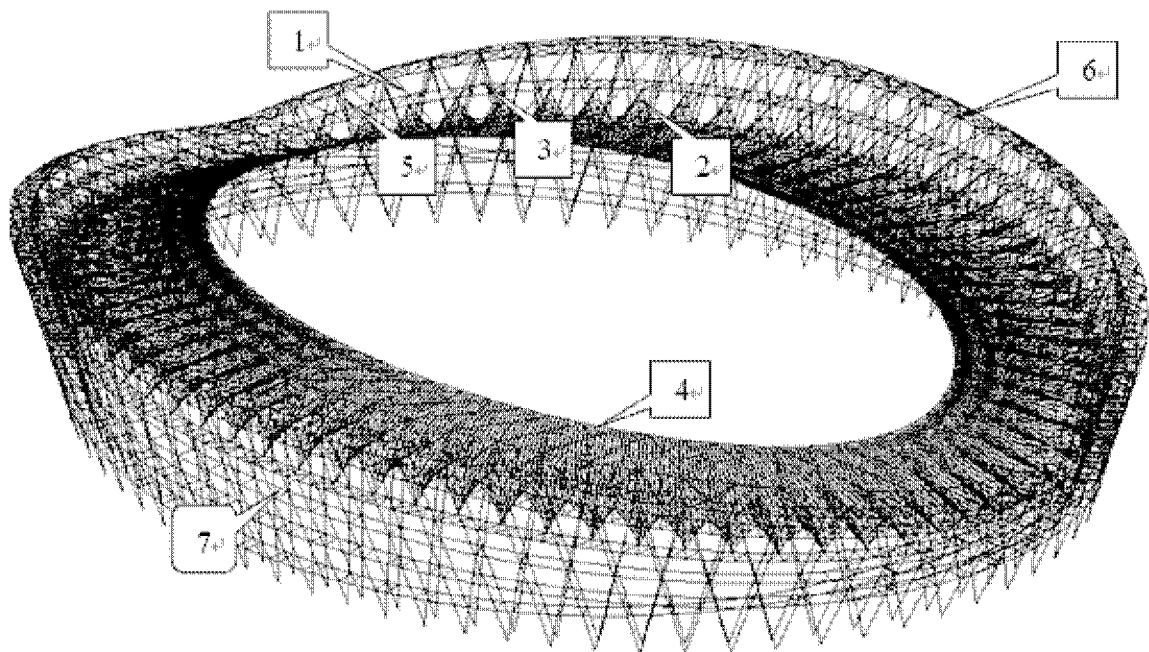


图 2

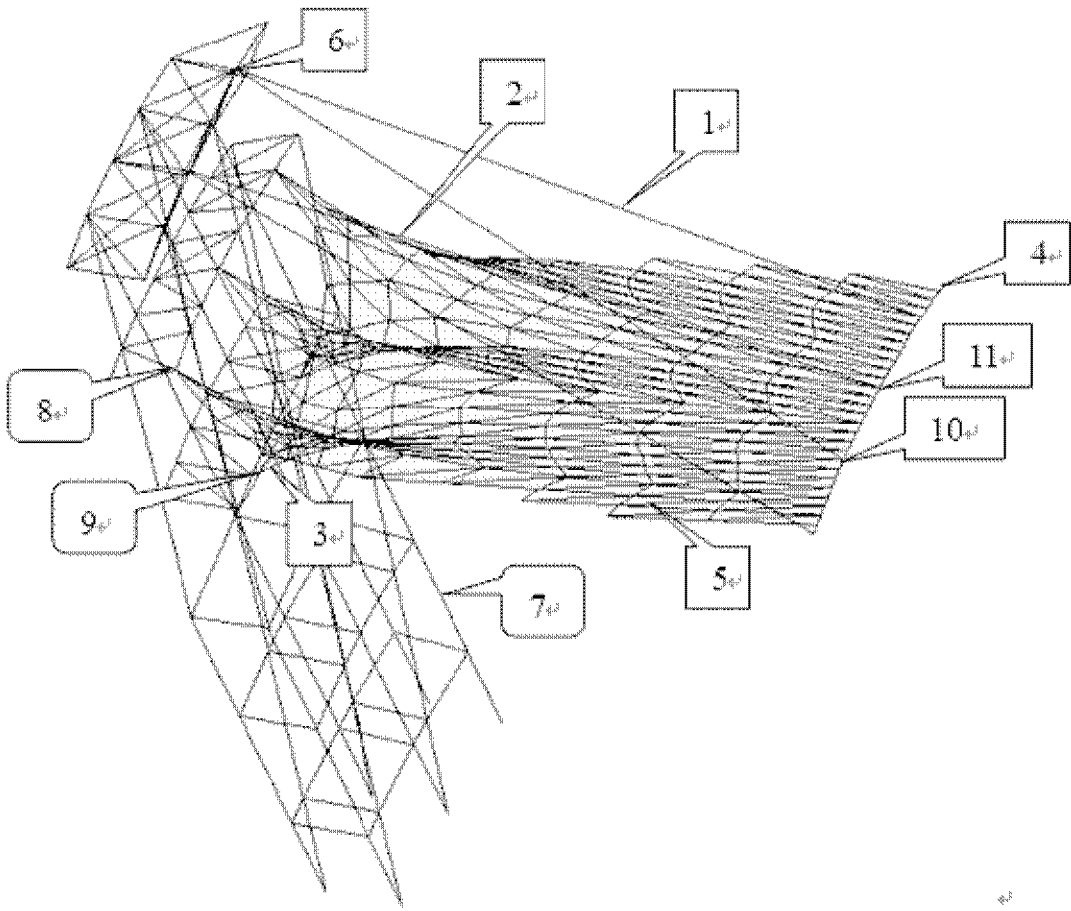


图 3

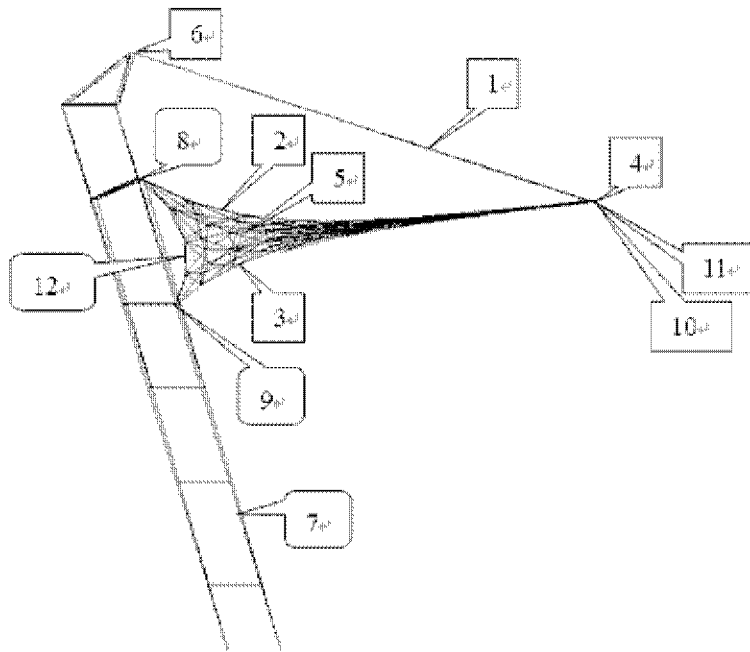


图 4

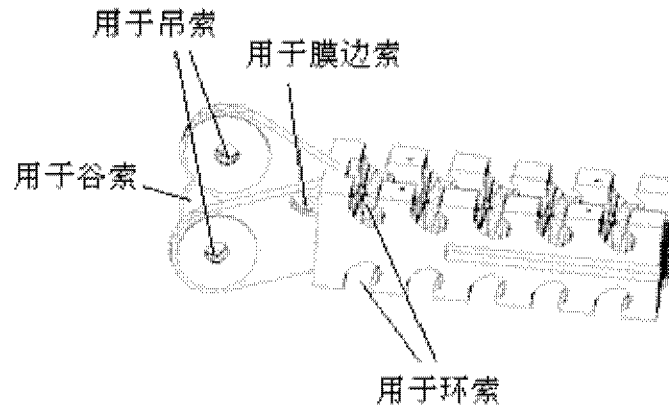


图 5

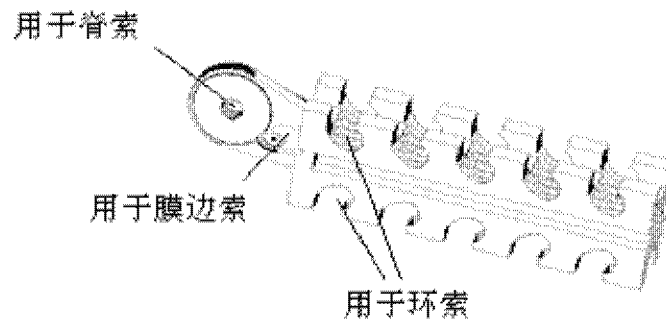


图 6

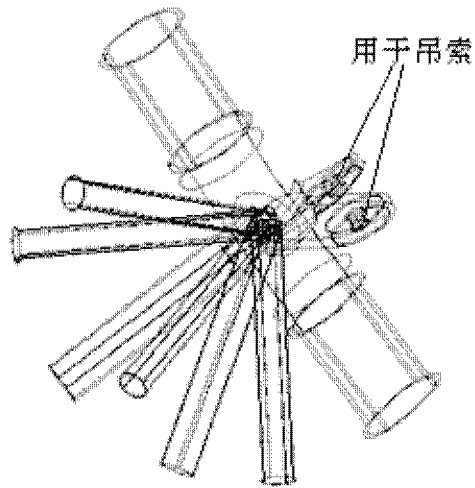


图 7

4/9

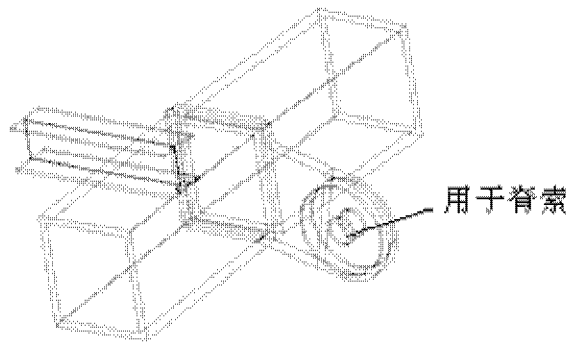


图 8

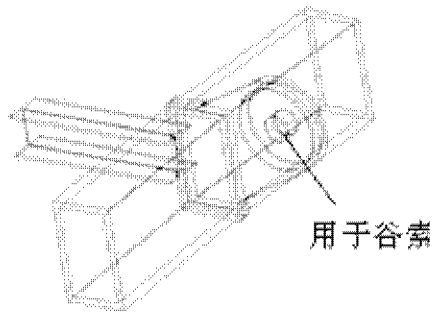


图 9

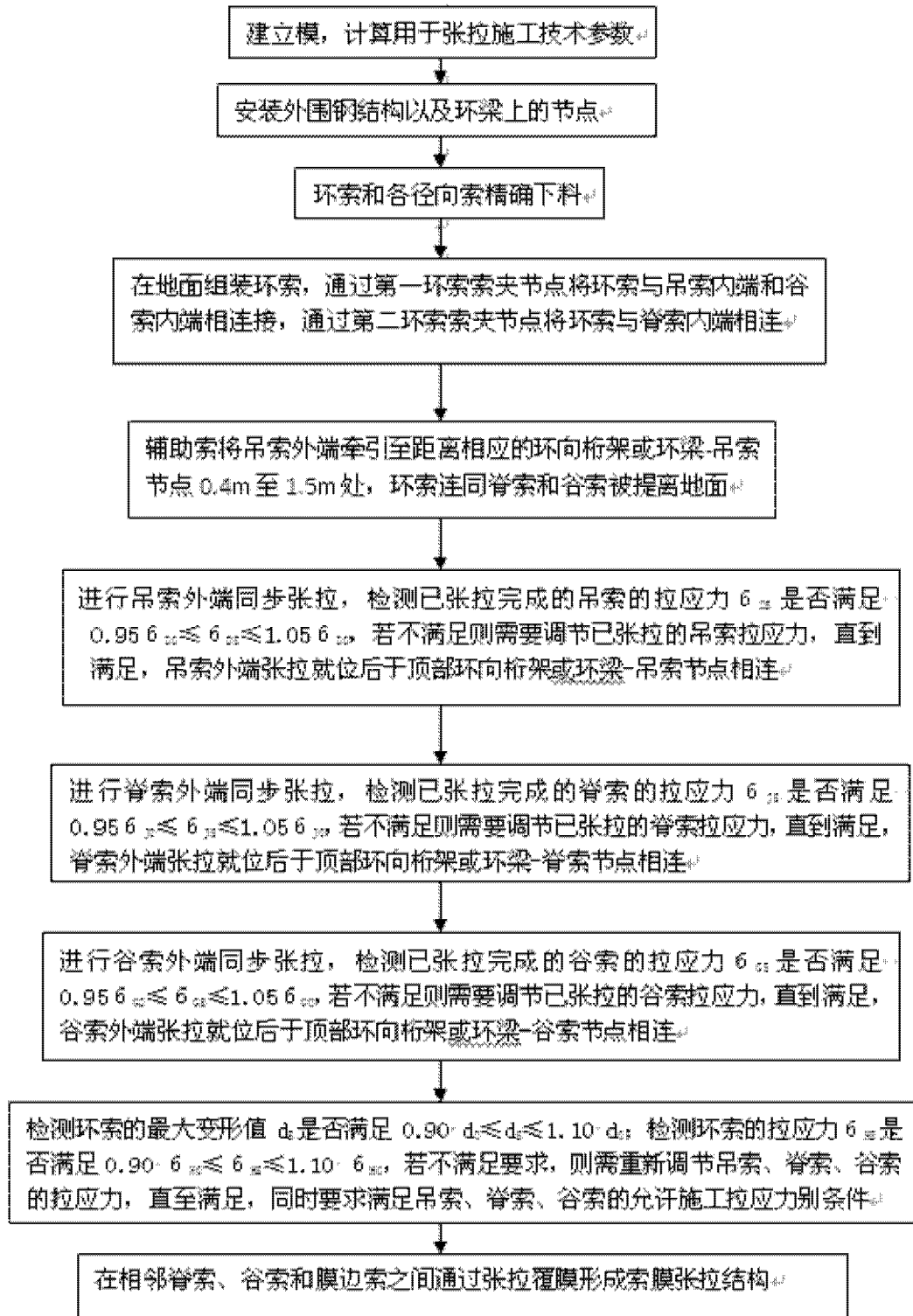


图 10

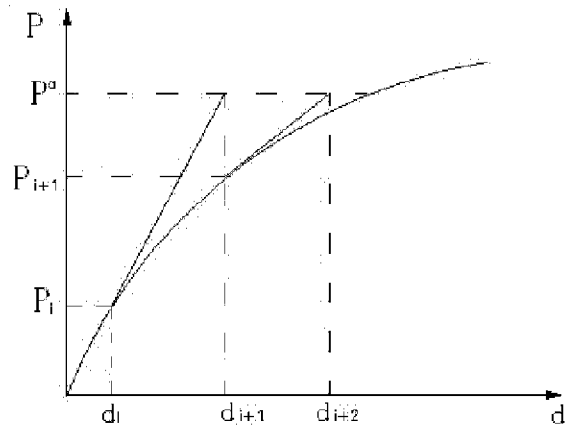


图 11

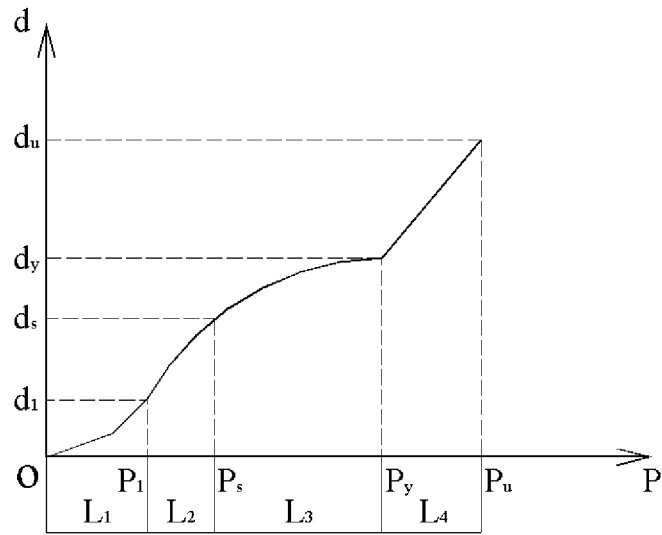


图 12

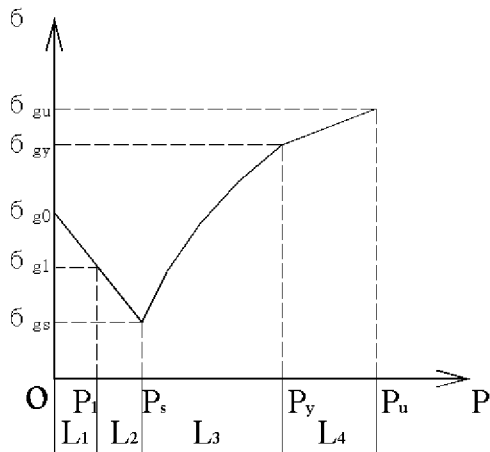


图 13

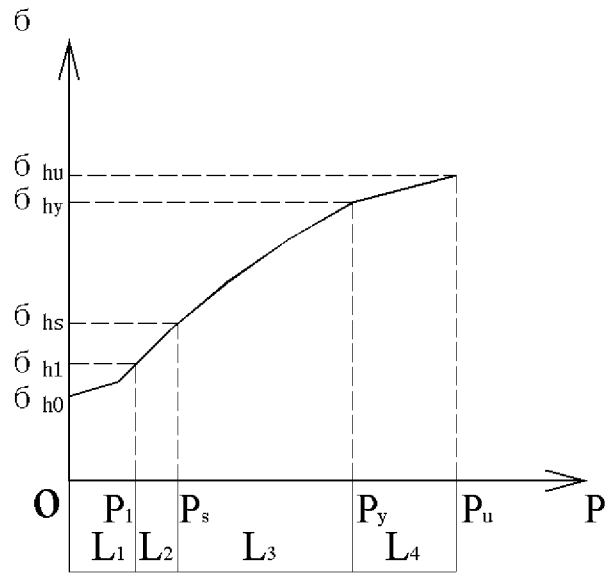


图 14

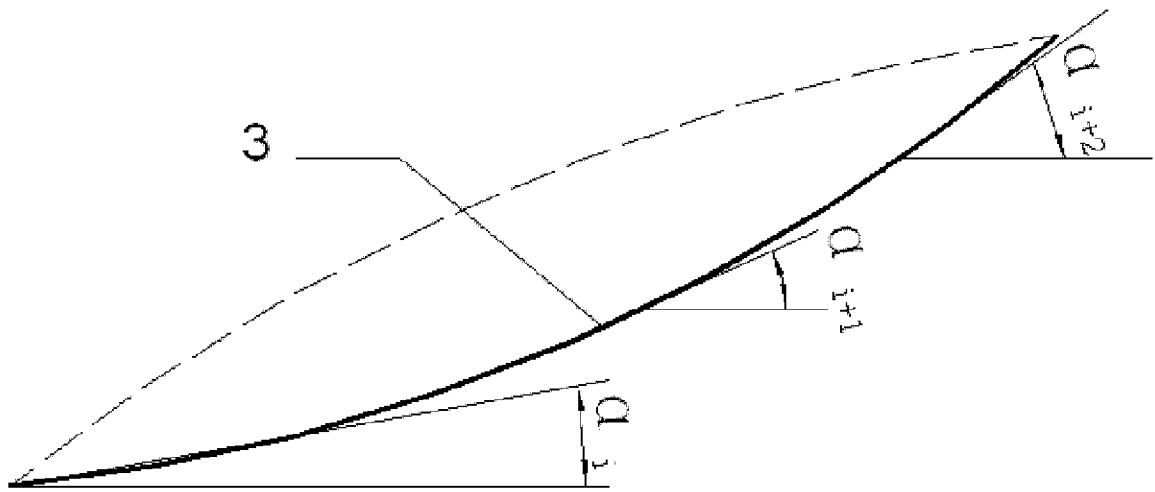


图 15

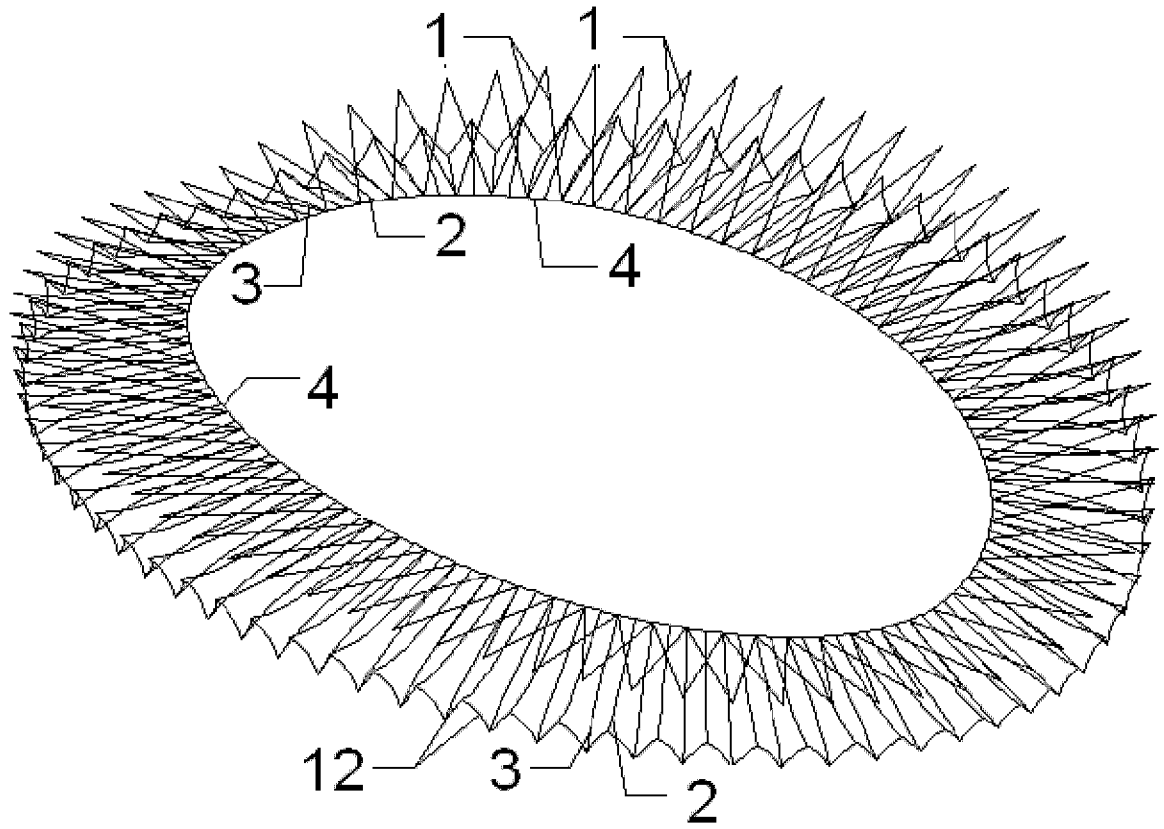


图 16

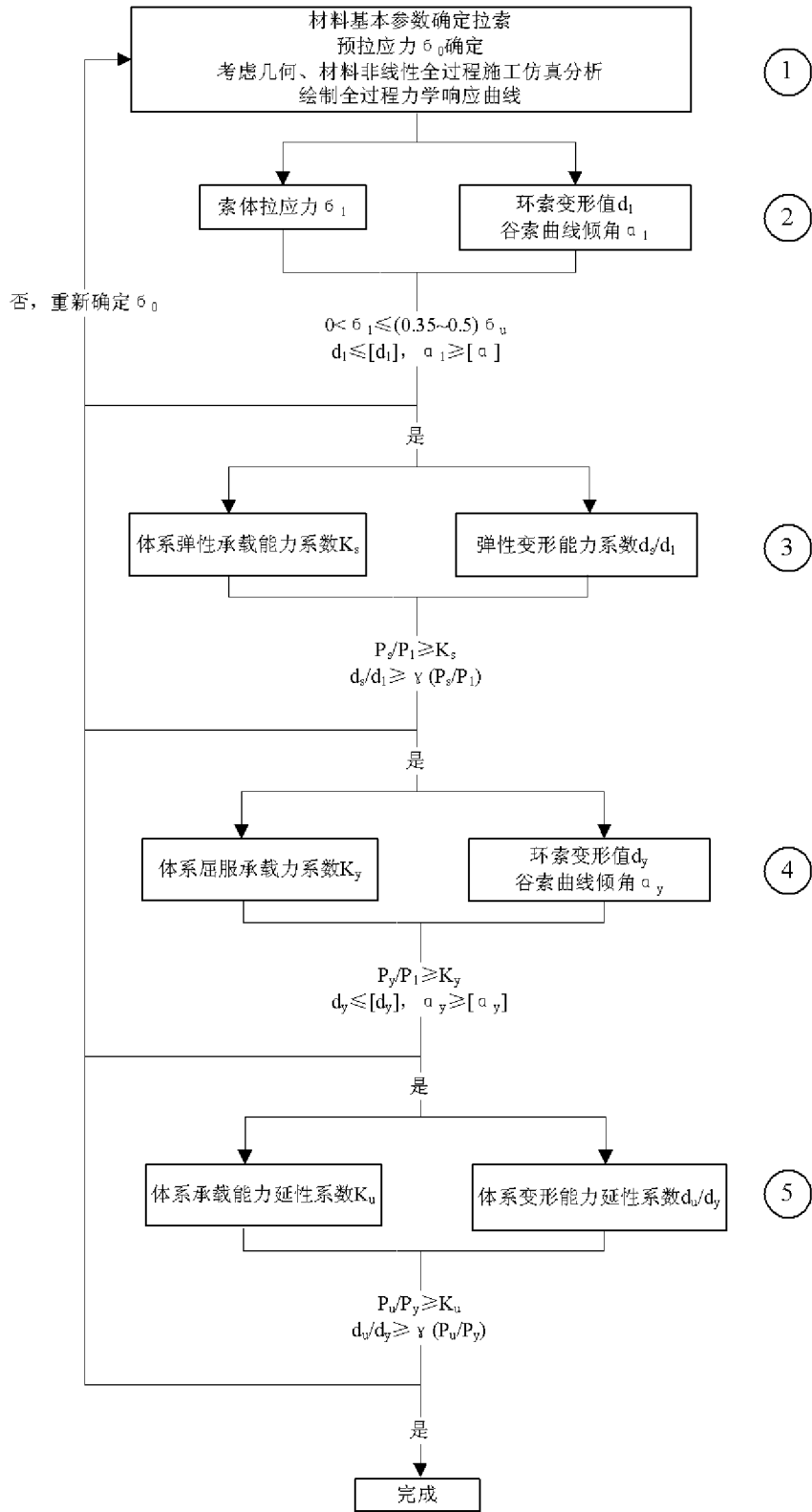


图 17

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/CN2013/077380

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See the extra sheet  
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: E04B1/-; E04B7/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: membrane, cable, symmetrical, open, stretch, draw, ridge, valley, nolinear

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	LI, Zhongli et al, Wuhu Stadium Membrane Structure Canopy, The collections of The 2nd National Modern Structural Engineering Seminar, July 2002, pages 147-152, ISSN 1000-8993	1-16
A	CN 201411778 Y (GUANGZHOU JIEZHI BUILDING TECHNOLOGY DEV) 24 February 2009 (24.02.2009) the whole document	1-30
A	CN 201377123 Y (GUANGZHOU JIEZHI BUILDING TECHNOLOGY DEV) 6 January 2010 (06.01.2010) the whole document	1-30
A	US 5899028 A (WARNER G) 4 May 1999 (04.05.1999) the whole document	1-30
A	WO 9410411 A1 (WEIDLINGER ASS) 11 May 1994 (11.05.1994) the whole document	1-30
PX	DUAN, Youheng, Cable-Membrane Structure Stretching and Loading Whole Course Simulating Computation, October 2012, 2012 No. 10, the whole document, ISSN1674-0246	1-30

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&amp;”document member of the same patent family</p>
---	--

Date of the actual completion of the international search  
26 August 2013 (26.08.2013)

Date of mailing of the international search report

Name and mailing address of the ISA  
State Intellectual Property Office of the P. R. China  
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao  
Haidian District, Beijing 100088, China  
Facsimile No. (86-10) 62019451

Authorized officer  
REN, Liangping  
Telephone No. (86-10) 62084926

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**International application No.  
PCT/CN2013/077380

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 102733481 A (CHINA AVIATION PLANNING&CONSTR DEV CO) 17 October 2012 (17.10.2012) claims 1-6	10-16
PX	CN 102733479 A (CHINA AVIATION PLANNING&CONSTR DEV CO) 17 October 2012 (17.10.2012) claims 1-5	1-9
PX	CN 102733525 A (CHINA AVIATION PLANNING&CONSTR DEV CO) 17 October 2012 (17.10.2012) claims 1-4	17-30

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International application No.  
PCT/CN2013/077380

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 201411778 Y	31.03.2009	None	
CN 201377123 Y	06.01.2010	None	
US 5899028 A	04.05.1999	None	
WO 9410411 A1	11.05.1994	US 5355641 A	18.10.1994
CN 102733481 A	17.10.2012	None	
CN 102733479 A	17.10.2012	None	
CN 102733525 A	17.10.2012	None	

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2013/077380

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

E04B 1/342 (2006.01) i

E04B 7/14 (2006.01) i

E04B 1/35 (2006.01) i

E04B 1/32 (2006.01) n

E04B 7/16 (2006.01) n

<b>A. 主题的分类</b>		
参见附加页		
按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类		
<b>B. 检索领域</b>		
检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)		
IPC: E04B1/-, E04B7/-		
包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献		
在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))		
CNPAT,CNKI,WPI,EPODOC:索膜,膜结构,开口,对称,张拉,吊索,脊索,谷索,环索,非线性, membrane, cable, symmetrical, open, stretch, draw, ridge, valley, nolinear		
<b>C. 相关文件</b>		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	李中立等, 芜湖体育场膜结构罩篷, 第二届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 7月2002, 第147-152页, ISSN 1000-8993	1-16
A	CN 201411778 Y (广州市杰志建筑技术开发有限公司) 24.2月2009 (24.02.2009) 全文	1-30
A	CN 201377123 Y (广州市杰志建筑技术开发有限公司) 6.1月2010 (06.01.2010) 全文	1-30
A	US 5899028 A (WARNER G) 4.5月1999 (04.05.1999) 全文	1-30
A	WO 9410411 A1 (WEIDLINGER ASS) 11.5月1994 (11.05.1994) 全文	1-30
PX	段有恒, 索膜结构张拉及加载全过程仿真分析研究, 中国优秀硕士学位论文全文数据库工程科技II辑, 10月2012, 2012年第10期, 全文, ISSN 1674-0246	1-30
<input checked="" type="checkbox"/> 其余文件在 C 栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 26.8月2013 (26.08.2013)		国际检索报告邮寄日期
ISA/CN 的名称和邮寄地址: 中华人民共和国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号100088 传真号: (86-10)62019451		受权官员  任亮平  电话号码: (86-10) 62084926

C(续). 相关文件		
类 型	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 102733481 A (中国航空规划建设发展有限公司) 17.10 月 2012 (17.10.2012), 权利要求 1-6	10-16
PX	CN 102733479 A (中国航空规划建设发展有限公司) 17.10 月 2012 (17.10.2012), 权利要求 1-5	1-9
PX	CN 102733525 A (中国航空规划建设发展有限公司) 17.10 月 2012 (17.10.2012), 权利要求 1-4	17-30

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号  
**PCT/CN2013/077380**

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN 201411778 Y	31.03.2009	无	
CN 201377123 Y	06.01.2010	无	
US 5899028 A	04.05.1999	无	
WO 9410411 A1	11.05.1994	US 5355641 A	18.10.1994
CN 102733481 A	17.10.2012	无	
CN 102733479 A	17.10.2012	无	
CN 102733525 A	17.10.2012	无	

A. 主题的分类

E04B1/342(2006.01) i

E04B7/14(2006.01) i

E04B1/35(2006.01) i

E04B1/32(2006.01) n

E04B7/16(2006.01) n