

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.04.023

# 索穹顶结构的美学表现研究

陶义雅, 吕辉

(南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 为了对索穹顶结构的美学表现进行研究, 列举现有的大多数索穹顶形式, 分析其形式美, 以五边形三四撑杆索穹顶结构为例, 分析其在造型、建筑材料及其结构类型所涉及的比例参数影响下的静力美, 探讨初始预应力大小对五边形三四撑杆索穹顶结构动力美表现的影响; 根据静、动力美表现的研究方法对三个索穹顶工程实例进行静止状态与受荷状态的美学剖析。结果表明: 结构在满足实用功能和对称荷载的前提下, 圆形索穹顶结构本身与受力状态富有对称美。为满足工程需要以及结构刚度需求, 索穹顶结构逐渐采用刚性屋面或刚性并柔性并存屋面, 体现出索穹顶结构的刚柔并济之美。

**关键词:** 索穹顶结构; 静力美; 动力美; 美学表现; 力学

**中图分类号:** TU399

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2024)04-0157-08

## Aesthetic Expression of Cable Dome Structure

TAO Yiya, LV Hui

(Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China)

**Abstract:** In order to analyze the aesthetic performance of cable dome structure, most existing cable dome forms were listed, their formal beauty was analyzed, and heptagonal serial cable dome structure and octagonal cable dome structure were proposed according to the rules. Taking the structure of a pentagonal three - four - stay cable dome as an example, the static beauty of the structure in the static state and under the influence of the static beauty expression parameters are analyzed. The influence of initial prestress on the dynamic performance of the pentagonal three - four - stay cable dome structure is discussed. Based on the method of static and dynamic beauty expression, the static state and load state of three examples of cable dome engineering are compared and analyzed. The results show that the circular cable - dome structure itself is symmetrical with the stress state under the premise of satisfying the practical function and symmetrical load. In order to meet the needs of engineering and structural rigidity, the cable dome structure gradually adopts rigid roof or rigid and flexible roof, which reflects the beauty of rigid and flexible cable dome structure. The results can provide reference for the unification of mechanics and aesthetics for the designers of cable dome structure.

**Keywords:** cable dome structure; static beauty; dynamic beauty; aesthetic expression; mechanic

1962年,美国建筑师富勒在其专利中首次提出“张拉整体思想”,实现“压杆孤岛存在于拉杆海洋”的设想<sup>[1]</sup>。1986年,美国工程师 Geiger 发展并推广富勒的张拉整体结构思想,实现了一种新型的效率极高的张力集成体系或全张力体系——大跨度索穹顶结构,并成功运用于汉城奥运会的体操馆和击剑馆<sup>[2]</sup>。1992年,美国工程师 Levy 将 Geiger 索穹顶

改进为联方型,并成功运用在 Georgia 索穹顶中<sup>[3]</sup>。此后,国内外大跨度建筑开始采用索穹顶结构,结构形式多为 Geiger 型和 Levy 型。根据其结构组成的各种组合变化,国内外学者相继研究出肋环型、鸟巢性、葵花型、Kiewitt 型、五边形、蜂窝型及鼓蜂窝型序列索穹顶。

不同的结构形式,体现了结构不同的美感。古

收稿日期:2023-12-20

修稿日期:2024-02-06

基金项目:国家自然科学基金项目“多撑杆类全铰接弦支网壳体系创新及设计分析理论研究”(52278224)

作者简介:陶义雅(1999—),女,硕士研究生,研究方向为空间结构。E-mail:2111081400007@stu.nchu.edu.cn

通讯作者:吕辉(1982—),男,副教授,主要从事空间结构方面的工作。E-mail:lvhui@nchu.edu.cn

往今来,无论东西方,人类对建筑的审美活动都有着广泛的研究,但“美学”一词普遍认为由德国哲学家 Baumgarten 于 1750 年提出。我国对建筑美学表现的研究起步较晚,最早作为学科名称提出“美学”这个词是在 1900 年。1932 年,梁思成和林徽因在《平郊建筑杂录》中提出“建筑意”概念,即现在所认为的建筑意境。黑格尔认为,美是理念的感性显现。曾坚等<sup>[4]</sup>认为,建筑美学是研究建筑与环境美的本质规律;是分析建筑相关要素之间的审美关系;研究建筑审美经验为中心内容,并且探索建筑艺术实践方法的学科。

建筑的发展体现了人类历史的发展,建筑史实际是一部从建筑角度研究人类发展的人类史。柯布西耶在其《走向新建筑》中指出,建筑形象应该具有时代性。为研究索穹顶的美学表现,本文以浙江大学董石麟院士最新提出的五边形三四撑杆索穹顶<sup>[5]</sup>为例,分析其在静止状态下的静力美与受荷状态下的动力美。最后基于工程实例运用索穹顶的美学表现对索穹顶进行静力美与动力美的美学表现分析。

## 1 索穹顶造型的静力美表现

结构的静力之美是指结构在静止状态、只受自重时的美学表现,仅从造型、材料以及与结构类型相关的比例参数对结构的静力之美进行研究。

### 1.1 造型

如图 1 列举的造型均为各种索穹顶仅上弦脊索布置的平面图,不同的造型又可以根据撑杆数量的不同使得三维下造型更加多样化。此外,当结构有开口的需求时,又会出现各类型索穹顶的开口形式,从而进一步丰富结构形式。

此外可以发现,索穹顶的基本单元边数可依次增加,据此笔者提出了图 1(m)、图 1(n)、图 1(o) 三种索穹顶的上弦脊索布置形式:七边形序列索穹顶(根据撑杆布置不同,分为七边形四三撑杆索穹顶和七边形三四撑杆索穹顶)以及八边形索穹顶,如图 1 所示三种均是设内孔造型。当索穹顶为圆形时,各形式均为轴对称结构,深深体现了中国建筑的对称美,且随着造型环数与边数的增加,对称索穹顶愈发显得富丽堂皇。

### 1.2 建筑材料

建筑材料影响建筑结构,从最初的木结构建筑到之后逐渐发展起来的石砌结构、混凝土结构及钢索结构,一个时期的建筑材料体现了这一时期的建筑特色。建筑材料的发展使得“建筑材料决定建筑

结构”的时代转化为“建筑结构选择建筑材料”的时代,随着国家大力支持钢结构的发展,我国出现不少具有世界影响力的钢结构建筑,如水立方、鸟巢、世博轴等,同时我国学者在钢结构建筑体系也不在不断创新与发展。

索穹顶一般为整个房屋建筑中的屋盖部分,可采用钢材,如圆钢管、钢丝、钢绞线等建造而成,属于钢结构的一部分,上部铺设的围护结构可选择柔性膜材或刚性钢板。钢结构有着抗震性能好、建设周期短、绿色环保等优点<sup>[6]</sup>。索穹顶结构的钢屋与膜结构合用时,组成索膜屋盖结构。钢丝与钢绞线在受到预应力的作用下,会出现应力刚化;膜结构透光率好,在白天几乎不需要人工照明,节约了能源费用,且膜结构自重轻,制作施工方便<sup>[7]</sup>。

与土、木等天然建筑材料相比,索膜结构中的钢材给人一种坚硬、高级与贵重感,与柔性膜材结合使用时体现了建筑的刚柔并济之美。如图 2 所示为天津理工大学体育馆的索膜结构屋盖,屋面中部采用膜材,其余部分为金属钢材<sup>[8]</sup>。膜材的使用兼顾了围护与采光功能,在正常日照的情况下,馆内人员可以视线清晰的运动,达到了节能的功效。

### 1.3 结构比例

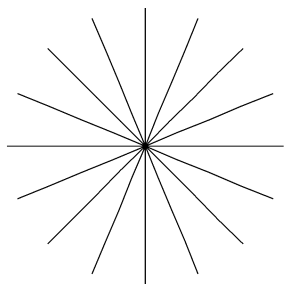
各艺术评估家无一例外地承认比例在美学表现中的重要性,我们最熟悉的莫过于《蒙娜丽莎的微笑》中的黄金比例 0.618。在建筑美学中,也存在比例影响建筑美的情况,如建筑常常按一定的模度进行设计,认为这种符合模度的设计才具有一定的建筑美感,该说法自然就显得设计不够灵活了。索穹顶中常见的比例有厚跨比、矢跨比、孔跨比、下弦节点位置等,设计师总是试图改变这些比例的大小,以期达到结构合理的受力状态。

#### 1.3.1 厚跨比

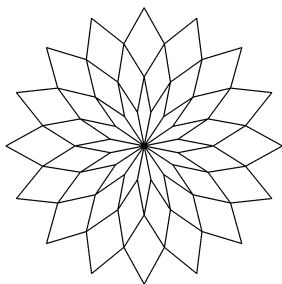
厚跨比是指索穹顶的下弦节点到索穹顶上弦的垂直距离  $h_i$  与索穹顶的跨度  $l$  之比,也称之为高跨比,索结构技术规程<sup>[9]</sup>指出,索穹顶的高度与跨度之比不宜小于 1/8。根据内外圈高度调整系数  $\xi$  是否为 0,有等厚跨比结构和变厚跨比结构之分,变厚跨比结构中的厚度<sup>[10]</sup>:

$$h_i = h_0 \left( 1 \pm \xi \frac{r_i}{r} \right) \quad (1)$$

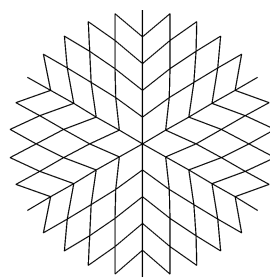
式中: $h_i$  为下弦节点  $i'$  垂线与球面上交点  $i$  的距离; $h_0$  为下弦节点  $0'$  垂线到球面上交点  $0$  的距离; $\xi$  为结构高度调整系数; $r_i$  为下弦节点  $i'$  到  $0_a$  的水平距离; $r = L/2$ ;  $L$  为结构跨度。



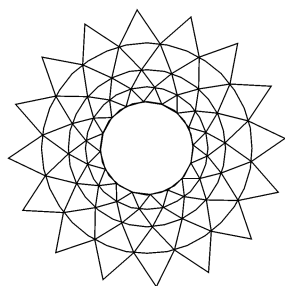
(a) Geiger(肋环)型索穹顶结构



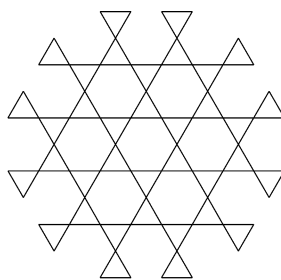
(b) Levy(葵花)型索穹顶结构



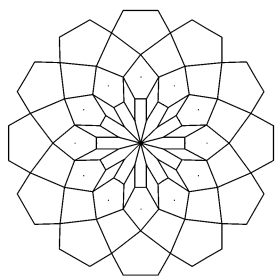
(c) Kiewitt型索穹顶结构



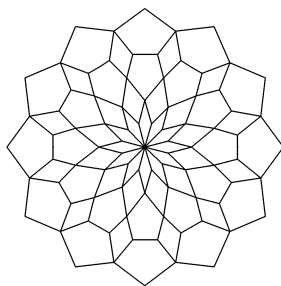
(d) 鸟巢型索穹顶结构



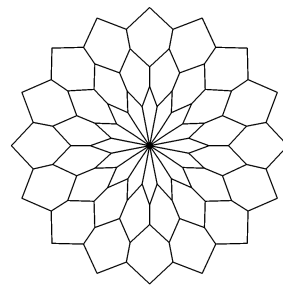
(e) 星形四面体型索穹顶结构



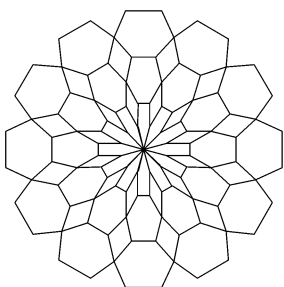
(f) 五边形三四撑杆索穹顶



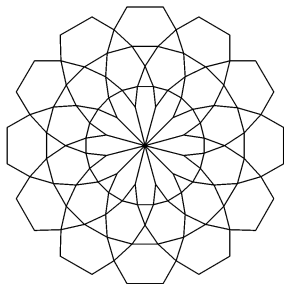
(g) 五边形四三撑杆索穹顶



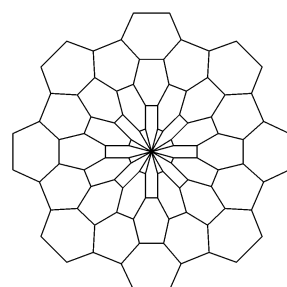
(h) 蜂窝型穹顶结构



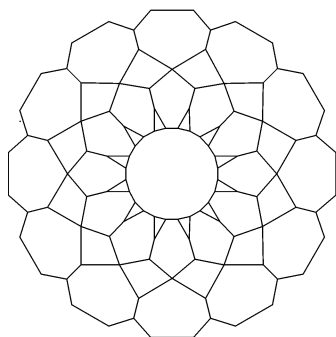
(i) 鼓蜂窝四撑杆 I 型索穹顶结构



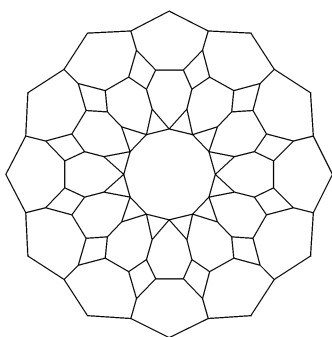
(j) 鼓蜂窝四撑杆 II 型索穹顶结构



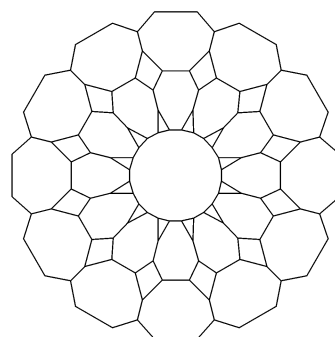
(k) 鼓蜂窝四撑杆 III 型索穹顶结构



(m) 七边形四三撑杆索穹顶



(n) 七边形三四撑杆索穹顶



(o) 八边形索穹顶

图 1 各种形式索穹顶上弦脊索布置图



图 2 天津理工大学体育馆建筑效果图

图 3 为等厚跨比索穹顶结构与变厚跨比索穹顶结构示意图,图中  $i_a$ 、 $i_b$  为上弦脊索节点编号,  $T$  为上弦脊索,  $V$  为撑杆,  $B$  为斜索,  $H$  为环索。

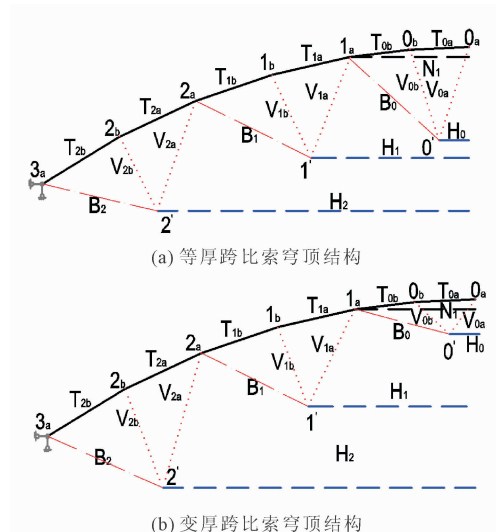


图 3 等厚跨比与变厚跨比索穹顶示意图

如图 4 所示为等厚跨比与两种变厚跨比的结构简图,明显发现:当厚跨比从最外圈开始向内依次按 1:0.618 比例缩小的结构简图更加美观,缓慢地缩小使视野越靠中心越空旷的同时过渡自然、变化均衡,给人意犹未尽的韵味。当以 1:1 比例缩小时,结构看起来肥胖粗犷,使得屋盖部分给人一种沉重的压迫感;当以 1:0.5 比例缩小时,厚跨比变化过于剧烈,产生较大的落差,尤其是最外面几圈,由于基数大,对半折减后差距明显,使结构不协调。

### 1.3.2 矢跨比

矢跨比是指索穹顶结构的环梁位置到结构最上端的垂直距离  $f$  与索穹顶的跨度  $l$  之比。索结构技术规程中暂无对矢跨比的明确要求,空间网格结构技术规程<sup>[11]</sup>指出,球面网壳的矢跨比不宜小于 1/7;在抗震设防烈度为 7 度的地区,当网壳结构的矢跨比大于或等于 1/5 时,应进行水平抗震验算;当矢跨比小于 1/5 时,应进行竖向和水平抗震验算。

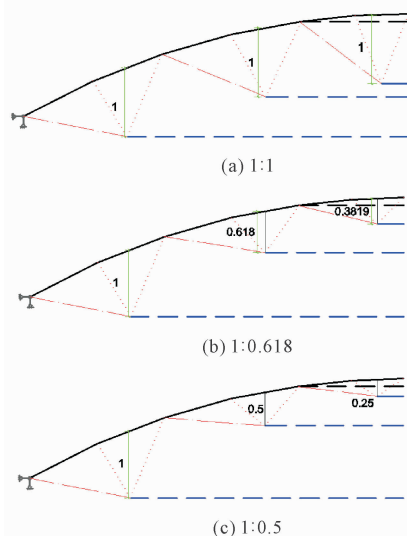


图 4 厚跨比变化

如图 5 所示是不同矢跨比下的五边形三四撑杆索穹顶结构的平面图与立面图,其中立面图取其中一榀。给定结构跨度均为 120 m、环索道数 2 道,沿圆周方向均等分为 12 份。根据经验取值,以下图 5 五边形三四撑杆索穹顶结构的矢跨比依次为:0.06、0.07、0.08、0.09、0.10。

由图 5 可知,相同跨度下,矢跨比对五边形三四撑杆索穹顶结构的平、立面图影响不大,这是因为矢跨比取值均较小,即便跨度很大,根据矢跨比的定义所得的索穹顶结构的环梁位置到结构最上端的垂直距离  $f$  也相差不大。对矢跨比为 0.06~0.10 的最外圈撑杆的长度以及与水平面的夹角进行测量,得到长度依次为:17.2773 m、17.1217 m、16.9807 m、16.8551 m、16.7452 m;角度大小依次为:18°、16°、14°、12°、10°,可见,随着矢跨比的增大,结构最外圈撑杆的长度以及与水平面的夹角逐渐减小,将这种差距放大时,矢跨比的增大使结构更加厚重。

### 1.3.3 下弦节点位置

以五边形三四撑杆索穹顶为例,下弦节点位置主要有三种情况:(1)位于 a 类节点正下方,此时  $\theta_i = \theta_{ia}$ ,如图 6(a);(2)位于 a 类节点与 b 类节点的中间下方,此时  $\theta_{ia} < \theta_i < \theta_{ib}$ ,如图 6(b);(3)位于 b 类节点正下方,此时  $\theta_i = \theta_{ib}$ ,如图 6(c)。

当结构出现(1)、(3)情况时,总存在部分撑杆垂直于水平面,此时该撑杆受力达到最优态。同时,由于垂直而投影成点的撑杆减少了俯视图中的索杆数量,俯视该结构时更加空旷整洁。每一情况下节点虽然一般不会处于同一水平面,但错落有序,从内向外环环降低。

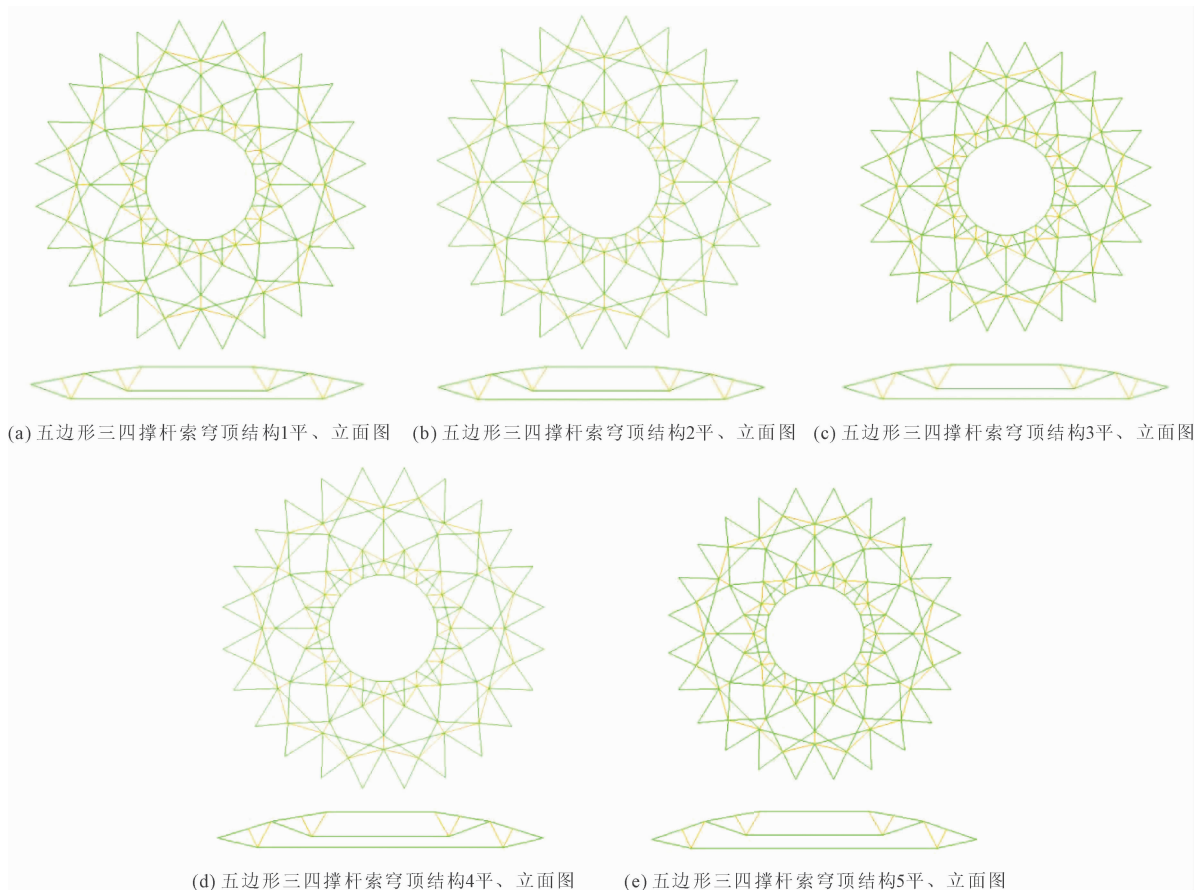


图 5 不同矢跨比的五边形三四撑杆索穹顶结构平、立面图

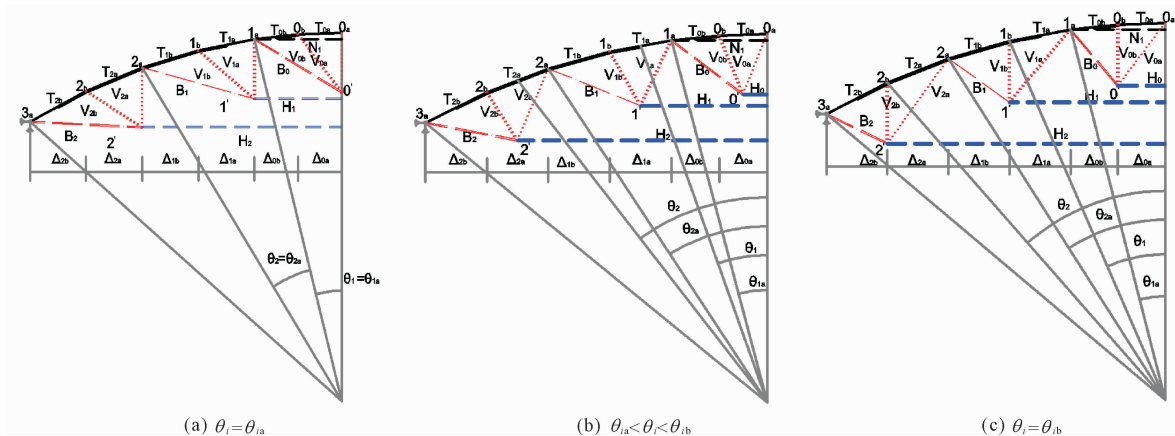


图 6 下弦节点位置

## 2 索穹顶造型的动力美表现

建筑的存在首先要满足其所需功能,只有在满足功能的前提下再发展其美学才有意义。结构的动力美即分析结构发挥功能(承受荷载)时所产生的功能美。除前文提及的厚跨比与矢跨比对索穹顶受力有影响外,靠预应力提供刚度的该类结构还受其

初始预应力大小的影响。以跨度为 100 m、厚跨比与矢跨比均为 0.1 的开口五边形三四撑杆索穹顶结构为研究对象分析内力与位移变化,统一孔跨比为 0.2,作用在结构上的荷载只考虑恒、活荷载,参照文献[8],膜屋面恒载 0.015 kN/m<sup>2</sup>,活载 0.5 kN/m<sup>2</sup>。

### 2.1 结构的受力特性

如图 7 所示为结构给予主动索 H<sub>2</sub> 初始预应力

分别为:2 000 kN、2 500 kN、3 000 kN、3 500 kN 及 4 000 kN 时各索杆内力的变化情况,图 8 为  $H_2$  初始预应力为 3 000 kN 时的轴力云图。可知:随初始预应力的增大,索杆内力不断增大,主动索变化最大,其次是内圈脊索,撑杆的内力变化速度基本一致,带给人们一种平静感;结构最大内力发生在主动索;由于结构为中心对称,其轴力云图也为中心对称,抛开主动索的最大索力,其余索杆内力具有一定程度上的统一性。

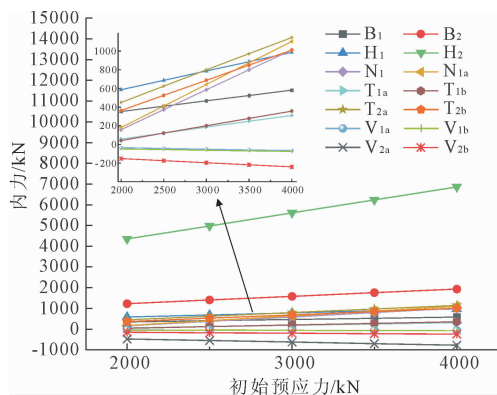


图 7 结构内力随预应力的变化

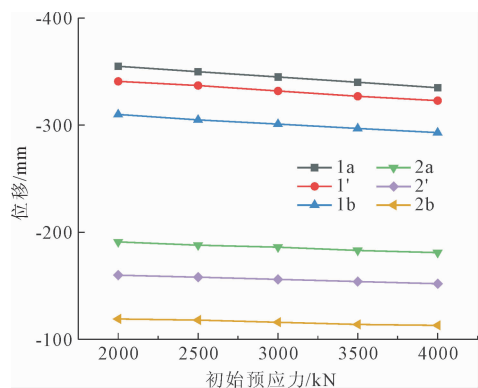


图 9 结构位移随预应力的变化

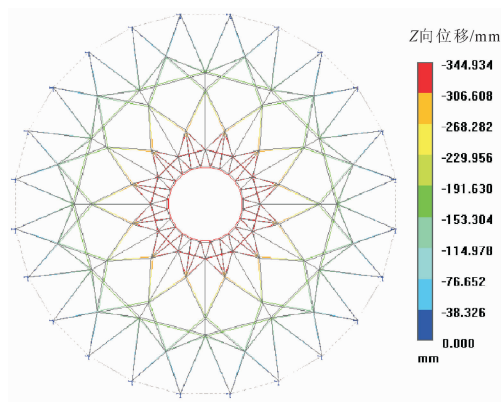


图 10 位移云图

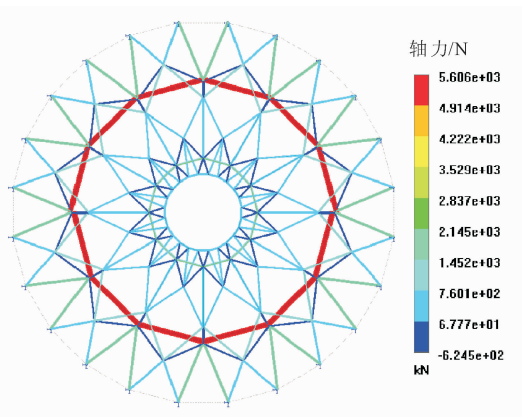


图 8 轴力云图

## 2.2 结构的变形美

如图 9 所示为结构给予主动索  $H_2$  初始预应力分别为:2 000 kN、2 500 kN、3 000 kN、3 500 kN 及 4 000 kN 时各节点位移的变化情况,图 10 为  $H_2$  初始预应力为 3 000 kN 时的竖向位移云图。可知:随初始预应力的增大,各节点位移不断减小,且减小速度一致;结构位移均小于规范限制( $100000 \times 1/250 = 400$  mm);结构最大位移发生在最内圈位置,从最内圈至最外圈,节点位移逐渐减小,紧凑而连续,宛如音乐般从高潮到结束;由于结构为中心对称,其位移云图也为中心对称,再一次强调了结构的均衡美。

## 3 索穹顶美学表现案例

### 3.1 天津理工大学体育馆

天津理工大学体育馆(如图 2 所示)于 2017 年竣工,建筑总面积  $1.71$  万  $m^2$ ,由天津大学建筑设计研究院设计,天津中际装备制造有限公司进行钢结构安装,索结构部分施工由北京市建筑工程研究院有限责任公司完成。

从静力美表现分析,结构功能上,整个体育馆包括中心赛场、训练馆和辅助用房,可容纳五千多名观众,膜结构的透光性减少了室内灯光的使用,绿色环保的同时降低了屋面灯光设备荷载。结构形式上,抛开常规的圆形索穹顶形式,天津理工大学体育馆屋盖部分为马鞍形,是国内第一个超百米的索穹顶结构。中间部分索穹顶采用 Gieger 型,最外圈采用 Levy 型<sup>[12]</sup>,成功结合了索穹顶发展史中最经典的两种结构形式,Levy 型结构部分保证结构稳定的同时 Gieger 型结构部分又使结构更加简洁大气。最内圈的刚性屋面部分俯瞰宛如一叶扁舟,又似一张新生的绿叶。材料使用上,与初步设计提出的单层网壳结构、双层网壳结构、辐射式桁架相比,索穹顶结构

的用钢量最少,受力性能良好。屋盖部分选用 Q345B 刚性金属屋面与柔性膜屋面相结合的形式<sup>[13]</sup>,刚性屋面为索穹顶柔性结构提供了一定的刚度。建筑二层以上外立面采用横向线条分明的银白色铝板,阳光照射下更加凸显结构的层次感。

从动力美表现分析,该复合式索穹顶结构边界条件为三向铰接时结构最大竖向位为 164 mm;拉索的最大应力由温度控制,静力工况下最大应力比为 0.45,最小应力为 8.59 MPa。考虑刚性屋面的檩条作用时,结构位移比不考虑檩条时小,两种情况的位移云图均以长轴为对称轴对称<sup>[14]</sup>。

### 3.2 雅安天全体育馆

雅安天全体育馆(如图 11 所示),属于 2013 年四川雅安地震后的重建项目,建筑面积 1.3 万 m<sup>2</sup>,建筑高度 29 m,于 2017 年竣工。体育馆由中国建筑西南设计研究院有限公司设计,钢结构安装单位是发达控股集团有限公司,北京市建筑工程研究院有限责任公司完成其索结构部分的施工。



图 11 雅安天全体育馆

从静力美表现分析,结构功能上,这座体育馆可举行较小型的综合性赛事或单项比赛,可容纳 2 700 名人员观看赛事。由于雅安地区多地震、多雨水,使用金属刚性屋盖可提高结构的抗震性能,减少膜屋面的维护成本。结构形式上,体育馆外形似钵,索穹顶共设三道环索,自内向外分别位于 6 m 半径、18 m 半径以及 28.325 m 处,径向索最内圈采用 Geiger 肋环型,中圈、外圈 Levy 葵花型布置,环向等分为 15 份<sup>[13]</sup>,屋盖平面呈常规圆形,直径 77.3 m,矢高 6.5 m<sup>[14]</sup>。材料选择上,拉索采用高钒索,撑杆和刚性拉环采用 Q345B 钢管,相较最初设想的肋环型索穹顶屋盖,葵花 + 肋环混合型屋盖的用钢量减少了 17%。屋盖铺设采用铝镁锰板材料,通常檩条的存在会显著增加结构刚度,但在本工程中,檩条对刚度的提高并不明显,故调整固定檩条为简支滑动檩条。体育馆外立面均涂用奶白涂料,简单大气而不乏建筑美感。

从动力美表现分析,索穹顶结构在 1.0 恒载 +

1.0 半跨活载时发生的最大位移为 -159 mm,挠跨比 1/485<sup>[15]</sup>。如图 12 所示为雅安天全体育馆在 1.0 恒载 + 1.0 活载满跨作用下的失效模态<sup>[16]</sup>,不难看出,由于结构与荷载均是对称布置,失效模态也为对称。

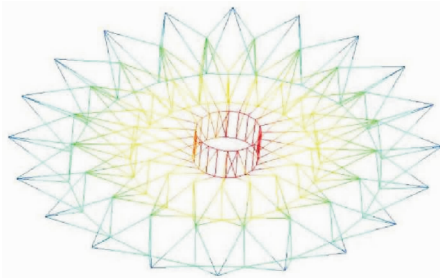


图 12 全跨失效模态

### 3.3 成都凤凰山足球场

成都凤凰山足球场(如图 13 所示)位于成都金牛区,建筑总面积 45.6 万 m<sup>2</sup>,于 2020 年竣工。由中建西南建筑设计研究院设计,浙江精工钢结构有限公司参与钢结构安装,南京东大现代预应力工程有限责任公司参与索结构部分的施工。



图 13 成都凤凰山足球场

从静力美表现分析,结构功能上,这是一座满足国际足球通用足球场标准、可容纳 6 万人的专业足球场,成为 2023 年亚洲杯的主场馆之一。结构形式上,该工程为了足球场的需求,采用非常规的椭圆平面,长轴 279 m,短轴 234 m,屋盖罩棚悬挑 55 m~64 m<sup>[17]</sup>。大开口边缘设置了刚性内拉环桁架,使结构由于大开口设置而造成的刚度与整体性下降得到了补偿,有效传递了力流,成为中国首个大开口索穹顶结构。材料使用上,索穹顶的内拉刚性环采用 Q420B 钢材,节点与连接板材采用 Q345B,索体材料采用密封钢绞线索,屋面部分采用 ETFE 膜结构。

从动力美表现分析,屋盖大开口索穹顶结构在 1.0 恒载 + 1.0 活载作用下最大竖向位移为 -388 mm,1.0 恒载 + 1.0 风吸荷载作用下最大竖向位移

为  $-323\text{ mm}$ ,且这两种最大竖向位移工况都发生在短轴侧内拉环边缘处<sup>[16]</sup>。

## 4 结 论

本文列举了不同的索穹顶结构形式,以五边形三四撑杆索穹顶结构为例,确定了其不同材料与比例影响下的结构静力美表现与动力美表现的研究原理,最后根据原理对三个工程实例进行静力美表现与动力美表现研究,结论如下:

(1) 圆形索穹顶结构在静止与对称受力状态下都呈现出对称的均衡美;实际工程中通常采用圆形屋面与椭圆屋面,符合中国传统建筑对对称美的追求。

(2) 索穹顶结构往往与膜结构联合使用,为保证结构刚度与稳定性要求,近年来工程也常采用刚性屋面或刚柔并存屋面,在刚性结构与柔性结构的共同作用下,结构的刚柔并济之美显而易见。

### 参考文献:

- [1] Buckminster F R. Tensile-integrity structures[M]. 1962, 2:265-272.
- [2] Geiger D H, Stefaniuk A, Chen D. The design and construction of two cable domes for the Korean Olympics[J]. 1986.
- [3] Terry W R. Georgia Dome cable roof construction techniques: Spatial, Lattice and Tension Structures [C]. 1994.
- [4] 曾 坚,尹海林. 对建立有中国特色的建筑美学体系的思考[J]. 建筑学报,2003(1):25-27.
- [5] 吕 辉,宋潮浪,董石麟,等. 圆形五边形三四撑杆混合型开口索穹顶预应力态及多参数敏感度分析[J/OL]. 工程力学,2023: 1-15 [2023-11-28] [http://kns.](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20231127.1658.049.html)

- cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20231127.1658.049.html.
- [6] 孙 冰,何 洪,吴昌根,等. 全钢结构对比传统混凝土结构的优势[J]. 施工技术,2017,46(S2):445-449.
- [7] 蓝 天,郭 璐. 膜结构在大跨度建筑中的应用[J]. 建筑结构,1992(6):37-42.
- [8] 闫翔宇,马 青,陈志华,等. 天津理工大学体育馆复合式索穹顶结构分析与设计[J]. 建筑钢结构进展,2019,21(1):23-29,44.
- [9] 索结构技术规程(JGJ 257—2012)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [10] 董石麟,刘宏创,朱谢联. 葵花三撑杆 II 型索穹顶结构预应力态确定、参数分析及试设计[J]. 建筑结构学报,2021,42(1):1-17.
- [11] 空间网格结构技术规程(JGJ 7—2010)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [12] 陈志华,楼舒阳,闫翔宇,等. 天津理工大学体育馆新型复合式索穹顶结构风振效应分析[J]. 空间结构,2017,23(3):21-29,35.
- [13] 王 鑫,陈志华,闫翔宇,等. 天津理工大学体育馆索穹顶结构自振特性分析及地震作用时程分析[J]. 建筑结构,2017,47(16):52-58.
- [14] 闫翔宇,马 青,陈志华,等. 天津理工大学体育馆复合式索穹顶结构分析与设计[J]. 建筑钢结构进展,2019,21(1):23-29,44.
- [15] 冯 远,向新岸,董石麟,等. 雅安天全体育馆金属屋面索穹顶设计研究[J]. 空间结构,2019,25(1):3-13.
- [16] 向新岸,冯 远,董石麟,等. 雅安天全体育馆金属屋面索穹顶极限承载力研究[C]//中国建筑科学研究院有限公司、中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第十七届空间结构学术会议论文集,2018:607-614.
- [17] 冯 远,王立维,张 彦,等. 成都凤凰山专业足球场结构设计[J]. 建筑结构,2020,50(19):15-21,14.