

弦支穹顶结构体系及其结构特性分析^{*}

陈志华

(天津大学建筑工程学院 300072)

[摘要] 弦支穹顶结构体系是在单层网壳和张拉整体的基础上发展起来的一种新型空间结构。概述了弦支穹顶结构产生的背景和结构原理,归纳了弦支穹顶结构体系的研究现状,分析了预应力和矢跨比的影响。同时介绍了弦支穹顶在国内外工程实践中的应用,并提出了需要深入研究的一些关键课题。

[关键词] 弦支穹顶 单层网壳 张拉整体 预应力 矢跨比

The suspendome system is a new style space structures developed on the bases of single layer dome structures and tensegrity systems. The background and the structural principles of suspendome system are introduced and current research situation is described. The influences of prestress and rise span ratio are analyzed. Some typical engineering applications are introduced. The key problems are proposed for further research.

Keywords suspendome single layer dome tensegrity prestress rise span ratio

一、研究现状

1. 弦支穹顶结构概念的提出

在对索穹顶和单层网壳两种结构的优缺点进行充分的研究后,日本川口卫教授立足于张拉整体的概念,将索穹顶的思路应用于单层网壳,发展了一种新型空间结构——弦支穹顶(suspendome)^[1-3],图1为聚会穹顶(日本,跨度46m,高16m)^[3],图2为索杆连接节点。

典型的弦支穹顶结构体系是由单层球面网壳、撑杆及预应力拉索组成^[5,9],其中各层撑杆的上端与单层网壳相对应的各层节点径向铰接,下端由径向拉索与单层网壳的下一层节点连接,同一层的撑杆下端由环向箍索连在一起,使整个结构形成一个完整的闭合力系。弦支穹顶结构的传力路径很明确,在结构最初建成时,通过对索施加适当的预拉力,减小结构在外荷载作用下上部单层网壳对支座的推力,在结构受外来荷载作用时,内力通过上端的单层网壳传到下端的撑杆,再通过撑杆传给索,索受力后产生对支座的反向拉力,与此同时,撑杆的作用,大大减小了上部单层网壳各层节点的竖向位移和变形,杆件的内力相对单层网

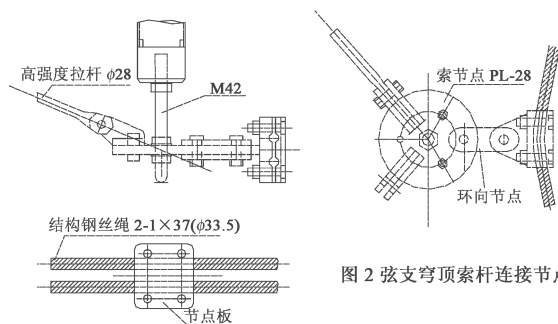


图2 弦支穹顶索杆连接节点

壳部分也有较大幅度降低,从而显著地改善了结构整体的刚度、强度和稳定性。

弦支穹顶的成形过程为:拼装上弦单层网壳结构层;将带有节点连接件的撑杆定位;放置斜索;按从外到内的顺序安装环索;从外到内伸长撑杆施加预应力;调整节点位置和预应力直至成形。

2. 主要研究成果

目前,以川口卫教授对弦支穹顶的研究较为系统^[7-14],主要成果有:1) 通过对跨度3m、矢高0.45m的弦支穹顶进行模型试验,发现相对于单层网壳来说,弦支穹顶结构的杆件内力大大减小,尤其对于外层环向杆件内力的改善较为明显,且节点的竖向位移也有很大程度的减小;2) 模型试验证实弦支穹顶结构的屈曲承载力较单层网壳有较大程度的提高,而且可以通过调节索中的初始预应力值来达到控制结构屈曲荷载的目的;3) 由于索的作用,与单层网壳相比,弦支穹顶结构的破坏位置向穹顶的中心方向移动;4) 设计并建成了世界上第一座弦支穹顶——跨度35m的光丘穹顶



图1 弦支穹顶结构体系实例——聚会穹顶

^{*} 国家自然科学基金项目:50008010。

(Hgarigaoka Dome), 并对光丘穹顶进行了实际结构的静载实验和动力实验, 发现静载实验结果与程序分析符合得很好, 而动力实验的结果表明弦支穹顶结构的振动性能与单层网壳差别不大, 这和特征值分析的结果也是相一致的; 5) 开发了适合弦支穹顶结构的新型节点, 如图 2 所示。

二、张拉整体部分的作用分析

以图 3 所示的凯威特-联方型弦支穹顶为例, 周边竖向为链杆支承, 其他方向自由滑动, 在一个支座处设置三向铰支座, 另一支座处设置两个方向的约束, 消除结构的刚体位移, 图中左边 1 至 7 为节点号, 右边 1 至 14 为上部网壳层杆件编号。承受竖向均布荷载 0.5 kN/m^2 , 折合每个节点为 5 kN 。假定节点为铰接, 单层网壳的杆件全部采用 $\phi 133\times 6$ 的钢管, 撑杆采用 $\phi 89\times 4$ 的钢管。径向拉索采用钢丝绳 $6\times 19\phi 18.5$, 环向拉索共 5 道, 由外及里前两道采用钢丝绳 $6\times 19\phi 24.5$, 后三道采用钢丝绳 $6\times 19\phi 21.5$ 。钢管和索的弹性模量都为 $E_1=2.06\times 10^{11}\text{ kN/m}^2$ 。应用 SAP 软件, 采用二力杆单元, 对该弦支穹顶进行线性有限元计算, 对初始应力采用加温差的方法来施加。表 1, 2 的计算结果证实, 对索施加预应力可以有效地改善单层网壳杆件的受力性能。

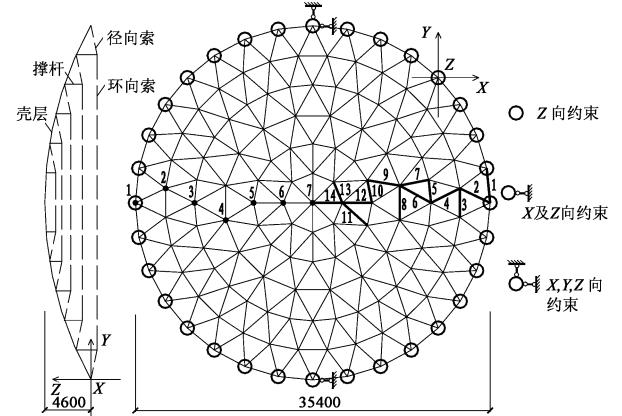


图 3 弦支穹顶计算模型

从图 4 可以看出, 索预应力的施加使单层网壳杆件产生与屋面荷载相反的内力, 适当调整索的预应力, 可以消除荷载状态下网壳环向杆件的拉力, 或者下部支承结构的水平推力; 而且拉索预应力对于杆件内力的调整则更多地集中在外圈杆件上, 对内层的杆件内力的影响不显著。

由表 3 可见, 在外荷载作用下, 本例中所确定的索单元 (图 5) 的内力都为拉力, 没有出现松弛, 说明用二力杆模拟索单元符合实际情况。

三、不同矢跨比的弦支穹顶内力分析

1. 计算模型

弦支穹顶环索施加温差产生的初应变及内力 表 1

环索圈号	1	2	3	4	5
对环索施加的初应变 $\mu\epsilon$	1 747.8	785	540	200	450
线性变形后环索的内力(kN)	99.9	49.1	19.6	10.0	5.0
非线性变形后环索的内力(kN)	101.3	50.7	19.9	10.1	5.0
温差 热膨胀系数(0.000 011 $^{\circ}\text{C}^{-1}$)	149	67	46	17	38.5

网壳杆单元内力表(kN) 表 2

杆件号	1	2	3	4	7	9	11	14
单层网壳								
外荷载作用	171.6	-20.3	-12	-16	-24.8	-20.7	-12	-15.4
弦支穹								
索初始应力作用	-163	5.8	-48.3	15.7	29.2	7.45	-3.65	0.2
顶结构								
同时作用	-49.5	-12.6	-41	-23	0.7	-15	-15.3	-15.4

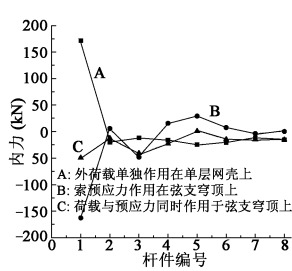


图 4 杆单元的内力比较

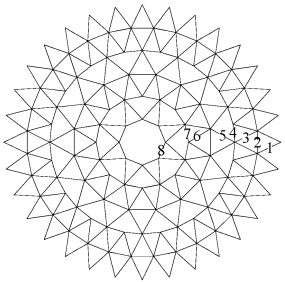


图 5 弦支穹顶结构中索构件及编号

索单元内力表(kN) 表 3

杆件号	1	2	3	4	5	6	7	8
同时作用	17.3	148	6.6	59.1	4.9	2.76	11.8	4.6

计算模型如图 6 所示, 该结构跨度 44m, 单层网壳的矢高分别为 3.37, 3.8, 4.8, 7.8, 10.8m, 相应的矢跨比分别为 0.077, 0.086, 0.109, 0.177, 0.245。将这五种弦支穹顶分别记为 A, B, C, D, E。弦支穹顶中间撑杆的高度均为 1.8m。作为上弦层的网壳采用凯威特型单层球面网壳, 沿环向等分为 6 份, 沿径向等分为 8 份, 结构周边支承在固定支座上。恒载 1.0 kN/m^2 , 活载 0.5 kN/m^2 , 荷载作用于上弦层。

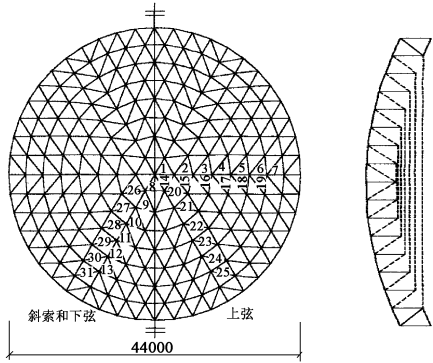


图 6 跨度 44m 弦支穹顶计算模型

2. 计算结果分析

对上述五种弦支穹顶进行了竖向荷载作用下的内力计算, 其部分杆件内力计算结果如表 4, 5 所示, 表中

上弦杆单元内力(kN)								表 4
杆号	1	2	3	4	5	6	7	
径向杆件	A	-186.2	-242.2	-221.9	-171.9	-131.2	-72.4	-15.9
	B	-188.1	-188.1	-171.6	-153.9	-120.8	-78.1	-34.7
	C	-235.5	-235.5	-221.4	-179.2	-152.5	-106.4	-65.9
	D	-133.7	-133.7	-118.7	-100.2	-85.1	-65.4	-48.1
	E	-98.3	-98.3	-86.2	-76.7	-65.1	-56.4	-44.0
杆号	14	15	16	17	18	19		
环向杆件	A	-184.4	-150.3	-135.9	-117.1	-58.5	-27.0	
	B	-147.7	-141.2	-127.1	-88.2	-76.5	-26.4	
	C	-175.9	-139.3	-126.2	-116.0	-80.4	-43.2	
	D	-93.9	-60.1	-57.6	-50.2	-45.6	-39.1	
	E	-59.7	-45.3	-35.7	-31.5	-29.3	-28.6	
杆号	14	15	16	17	18	19		
斜向杆件	A	-107.7	-74.8	-68.1	-42.6	-31.0	-15.4	
	B	-93.4	-71.6	-47.5	-40.5	-38.2	-23.0	
	C	-103.6	-72.5	-70.3	-50.2	-47.6	-34.3	
	D	-61.1	-42.4	-36.3	-29.5	-29.0	-25.0	
	E	-39.2	-33.2	-24.2	-22.8	-21.3	-19.6	

下弦索单元* 内力(kN)												表 5
杆件	环 索						斜 索					
索号	8	9	10	11	12	13	26	27	28	29	30	31
A	7.0	26.0	63.5	126.8	234.6	419.8	2.3	2.7	5.1	5.5	6.2	25.3
B	0.6	4.7	16.8	46.0	100.5	211.8	0.5	0.9	1.7	2.7	2.8	20.7
C	-6.4	-10.6	-10.5	-0.9	34.1	127.9	-3.1	-2.2	0.1	1.4	3.1	15.4
D	-9.8	-16.5	-22.0	-21.7	-13.3	29.8	-4.3	-2.3	-0.6	0.8	2.7	9.1
E	-8.0	-14.4	-17.9	-17.3	-13.3	12.0	-4.4	-1.7	-0.6	1.1	2.0	6.6

注:考虑索的预应力作用,索用杆元分析。

正号为受拉,负号为受压。

作为单层网壳和柔性拉索的一种组合结构,弦支穹顶中拉索承受的压力是不能超过施加给它的预拉力的,因此需要考虑不同矢高对弦支穹顶内力变化的影响,避免出现拉索受压的情况。由表 5 可以看到,在跨度不变的条件下,随着矢高的不断增大,环向拉索的内力有逐渐减小的趋势,并且从受拉状态过渡到了受压状态。这是由于随着矢跨比的增加,穹顶的几何形状也随之发生变化,它的受力也由原来‘梁’的受力特征逐步演变为‘拱’的受力特征,从而使得下弦拉索失去了它应有的约束作用。由表 5 可见,随着矢跨比的增大,下弦拉索的受力在不断减小的同时,各道环索间内力的差值也有减小的趋势。因此在进行弦支穹顶的设计时,为了使下弦的拉索承受较大的拉力,充分发挥材料本身的强度,上弦的矢高不应取得过大,这样才能使每道环索的内力较为合理。否则,环索中的内力减小,拉索对单层网壳的约束作用减弱,起不到弦支的作用;另外,索本身的内力过小,还可能在风荷载或地震作用下发生松弛现象,给结构的承载力带来不利影响。

四、弦支穹顶的线性与非线性分析比较

1. 计算模型

如图 3 所示的弦支球面穹顶结构,约束条件中增加周边各支座在切向为链杆约束,索的弹性模量 $E_2=1.8\times10^8\text{kN/m}^2$ 。采用 ANSYS 有限元软件,对该弦支穹顶分别进行线性和非线性有限元计算。单层网壳的杆件和撑杆采用link 8 单元,而环索和径向索则采用link 10 单元。仅考虑竖向均布荷载,外荷载设定为 1.5kN/m^2 ,折算到每个节点为 1kN 的竖向力。每圈的环索都施加相同的预拉力,和实际结构的受力状况相同。通过对由外向内的 5 道环向索施加预应力而对整个结构施加预应力。由外到内的 5 条环索的预应力相对大小为 $1:0.5:0.2:0.1:0.05$ 。有限元计算中,通过采用对环索施加初应变的方法来施加预应力。设由外到内的 5 条环索分别为 1~5 号索,表 1 给出 5 条索施加的初应变及变形后的预拉力。

2. 计算结果分析

节点位移如图 7 所示。杆件内力如表 6 所示。从图 7 和表 6 可以看出,弦支穹顶线性计算的结果和非线性计算的结果非常接近,证实了弦支穹顶结构中预应力索的引入的确增加了结构的刚度,因此弦支穹顶的非线性性能并不明显。所以在计算施加预应力后的弦支穹顶的节点位移和杆件内力时,可以用线性计算结果来近似代替。

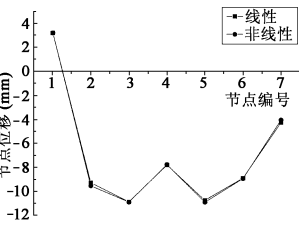


图 7 线性性和非线性计算的节点位移

线性和非线性计算的杆件内力								表 6
杆件内力	1	2	3	4	5	6	7	
线性计算(kN)	90.04	-31.86	-40.83	-36.80	-59.51	-33.38	-24.05	
非线性计算(kN)	90.55	-31.90	-44.21	-36.83	-59.29	-33.42	-23.57	

五、工程应用

天津保税区的弦支穹顶结构,跨度为 35.4m ,矢高 4.6m ,周边支承于沿圆周布置的 15 根钢筋混凝土柱及柱顶圈梁之上,柱顶标高 13.5m ,屋面以铝镁锰板为主,入口处局部为采光玻璃,见图 8。为了便于布置拉索,穹顶采用了凯维特和联方型组合的上弦层球面网壳,如图 3 所示。该部分由 376 根杆件和 137 个节点构成,杆件为 $\phi 127\times 4$ 和 $\phi 133\times 8$ 两种钢管^[13],所有杆件通过焊接空心球节点连接,由于焊接空心球节点刚度较大,结构分析与设计中假定杆件均为刚性连接。

弦支穹顶拉索预拉力的确定以使用荷载作用下穹顶对下部结构的水平推力最小为原则,考虑到外围拉索预拉力抵消穹顶水平推力的作用更为显著,设计拉索的预拉力从外圈到内圈逐渐变小。径环向拉索可通

过伸长撑杆方便地得到张拉,撑杆伸长后产生预压力,与径、环向拉索内的预拉力平衡。通过有限元分析可得:外圈撑杆预压力 $N_0=24\text{kN}$,内圈撑杆预压力 $N_0=8\text{kN}$ 时,弦支穹顶在使用荷载 $q=9.9\text{kN/m}^2$ 的作用下,对下部结构的水平推力最小。通过对环向拉索预拉力的调整有效地控制了穹顶对下部结构的水平推力,减小了设计荷载作用下上弦层网壳的杆件内力及节点位移。使天津保税区弦支穹顶有较好的稳定性和承载能力,同时加工制作及安装更安全、方便和快捷。



图8 天津保税区商务中心弦支穹顶

六、结论

弦支穹顶结构是基于单层网壳和索穹顶的一种新型的杂交(hybrid)空间结构。研究发现,弦支穹顶结构中的预应力索和撑杆有效地提高了整个结构的刚度,减小了杆件的内力以及对支撑构件的外推力,提高了结构的屈曲承载力;而且预应力施加后弦支穹顶结构的非线性特征不是很明显,所以在结构计算时可以首先用线性计算进行初步分析。另外,弦支穹顶结构已逐渐应用于实际工程,并取得了用钢量明显节省的效果,天津保税区商务中心大堂屋盖的实例说明,弦支结构广阔的应用前景。

作为一种新型的空间结构形式,弦支穹顶要在工程实践中推广,还有以下一些关键问题需要解决:1) 确定在各种单层网壳的网格形式下,撑杆和拉索的合理的布置方案;2) 判定结构在预应力施加后的初始形状,对拉索的初始预应力进行优化设计;3) 研究结构的整体稳定性,跟踪结构平衡路径,确定失稳临界荷载;4) 采用振型反应谱法和时程分析法研究结构的动力反应和抗震性能,并对其动力稳定性进行研究;5) 研究开发构造简单、施工方便且传力明确的节点连接形式;6) 结合预应力的设计和调整研究合理的施工方法。

参 考 文 献

1. Kawaguchi M, Abe M, Hatao T et al. On a structure system "suspendome" In: Proc. IASS Symposium, 1993, 523-530.
2. Tatenichi I et al. Vibration tests on a full size suspendome structure International Journal of Space Structure, 1997, (12).
3. Kawaguchi M, Abe M, Hatao T et al. Structural tests on the "suspendome" system In: Proc. of IASS Symposium, Atlanta, 1994.

4. Kawaguchi M, Abe M, Hatao T et al. Structural tests on a full size suspendome structure In: IASS International Symposium '97 Shell & Structures, Singapore, 1997.
5. Kawaguchi M, Abe M, Tatenichi I. Design tests and realization of "suspendome" system Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1999, (40).
6. 陈志华.弦支穹顶结构体系.见:第一届全国现代结构工程学术会议, 2001.
7. 川口卫,藤原智,吉田幸等.サスペン・ドーム开(その1)构造システムの概要.日本建筑学会大会学术讲演梗概集,北陆,1992.
8. 川口卫,户龙夫,藤原智等.サスペン・ドーム开(その2)构造模型による载荷.日本建筑学会大会学术讲演梗概集,东海,1994.
9. 川口卫,立道郁生,户龙夫等.サスペン・ドーム开(その3)光ヶ丘ドームのケーブル张力导入.日本建筑学会大会学术讲演梗概集,东海,1994.
10. 川口卫,立道郁生,安田由伦等.サスペン・ドーム开(その4)光ヶ丘ドームの静的载荷.日本建筑学会大会学术讲演梗概集,北海道,1995.
11. 川口卫,立道郁生,李纯一等.サスペン・ドーム开(その5)光ヶ丘ドームの振动.日本建筑学会大会学术讲演梗概集,北海道,1995.
12. 川口卫,户龙夫,立道郁生等.サスペン・ドーム开(その6)光ヶ丘ドームのケーブル长期計画.日本建筑学会大会学术讲演梗概集,近畿,1996.
13. 藤原智,户龙夫,立道郁生等.サスペン・ドーム开(その3)光ヶ丘ドームのケーブル张力导入.前田技术研究所,1994, (35).
14. 阿部优,立道郁生,川口卫.テンセグリック・システムによる补刚された薄肉ドームの提案.日本建筑学会学术报告集,1995.
15. Yue Yin et al. The study design and construction of suspendome. In: Proc. of IASS Symposium Nagoya, 2001.

70m 跨度网架屋盖结构体系——沪东造船厂装焊车间

沪东造船厂装焊车间跨度70m,柱距为18,24m。其大跨度屋盖体系采用螺栓球三层网架结构,其中18m柱距处网架为4500mm×4375mm,24m柱距处网架为4000mm×4375mm,网架高度为(2900+2900)mm。屋盖上设有跨度12m的通风气楼。网架用钢量为45kg/m²。该项目是目前国内外跨度最大的单层工业厂房,也是目前单层工业厂房屋盖中跨度最大的网架结构体系。共设置三层吊车:上层为2台起重量16Q的双小车桥式吊车,轨高25m,吊车跨度66m;中层为4台起重量4Q的吊车,轨高16m,吊车跨度64.4m;下层为6台起重量25Q的T型吊车,轨高9.5m,吊车跨度为19m。如此大型吊车应用于工业厂房中的网架结构国内外尚属首次。

网架同柱的支承节点采用弹簧板进行连接,既保证了网架由于温度收缩等因素引起的变位,同时也保证了网架在垂直力作用及风和吊车水平力作用下力的传递。该节点的设计符合排架铰接节点的假定,改变了网架结构以往设计中柱作为悬臂柱或弹性支承节点的计算假定,使厂房柱截面尺寸尽量经济。简化了连接节点的加工工艺和网架安装工程量,节约了节点用钢量。

车间全长266.6m,纵向为高低跨,低跨长126m,高跨长138m,温度伸缩缝设在126,138m轴线处。车间网架下弦的标高低跨为21.50m,高跨34.50m,高差达13m。设计中充分考虑到墙板的特点,高低跨间封墙采用了小立柱上下铰接节点连接。上节点同高跨网架上弦铰接连接,下节点同低跨网架上弦铰接相连。封墙垂直荷载通过小立柱传递给低跨网架上弦节点;风荷载通过小立柱传递给高低跨网架。此设计取消了70m跨度的水平抗风桁架,简化了水平抗风桁架同柱及托架的连接节点,仅此一项就节约了28钢材。工程设计受力明确,具有较好刚度。(第九设计研究院 楼国山)