

新型张弦网壳组合结构的设计与分析

沈银澜¹⁾ 牟在根¹⁾✉ 范重²⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 中国建筑设计研究院, 北京 100044

✉ 通信作者, E-mail: zgmu@ces.ustb.edu.cn

摘 要 在鄂尔多斯东胜体育中心综合体育馆展厅结构设计中, 提出了在张弦桁架之间设置双层网壳的新结构体系, 在满足复杂建筑造型的同时, 有效增加了结构的刚度和稳定性. 设计了接近实际工程的基本算例, 从整体模型入手, 全面分析了垂跨比、初始预应力和撑杆数量变化对结构静力性能、动力性能以及用钢量的影响. 依据分析结果, 对不规则造型的鄂尔多斯东胜体育中心综合体育馆展厅进行设计, 其中索的预应力是设计中的难点和关键, 本文给出了详尽的调索方法和依据.

关键词 桁架; 预加应力; 撑杆; 参数优化

分类号 TU 393.3

Design and analysis of a new hybrid structure composed of truss strings and a shell

SHEN Yin-lan¹⁾, MU Zai-gen¹⁾✉, FAN Zhong²⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China

✉ Corresponding author, E-mail: zgmu@ces.ustb.edu.cn

ABSTRACT A new hybrid structure arranging a double-layer shell between truss strings was proposed in the project-roof design of the Exhibition Center in Erdos Dong-sheng Sports Center. The new structure system not only meets the demand of adapting to an irregular large-span roof, but also increases the structural stiffness and stability. Model examples close to the actual project was designed. The effects of sag-to-span ratio, initial prestresses and the numbers of struts on the static and dynamic behaviors and the steel consumption of the integral structure were fully analyzed by concerning the integrate model. Based on the research result of model examples, the irregular roof of Erdos Dong-sheng Exhibition Center was designed. Besides, the design of the pre-stressed cable is difficult and critical, and a detailed method and the corresponding reference to adjust the pre-stressed cable were provided.

KEY WORDS trusses; prestressing; struts; parameter optimization

张弦桁架结构是由桁架、撑杆和预应力索组成的自平衡结构体系^[1-2]. 传统的张弦桁架结构是各榀之间铺设檩条组成大跨度空间结构; 对传统的张弦桁架结构研究大多集中在对静力性能的研究, 分析的参数主要是结构的矢跨比、垂跨比、桁架高度、初始预应力幅值、撑杆间距及数目等对结构受力性能的影响^[3-5], 而且参数优化分析大部分集中于单榀张弦梁^[4-6], 忽略了榀与榀之间的相互影响. 此外, 张弦结构是一种偏柔的结构体系, 动力响应相对较大, 有学者^[6-8]研究张弦结构参数

的变化对动力特性的影响得到一些有益的结论, 但还不够充分.

本文的张弦桁架结构, 与传统的张弦桁架不同, 在相邻空间管桁架之间设置双层网壳, 适应于屋盖的不规则造型, 增加桁架的稳定性与刚度. 结合工程的设计需要, 全面分析了整体屋盖模型垂跨比、初始预拉力和撑杆数目等对结构的受力特性和自振特性的影响, 并在此基础上, 将研究成果直接应用到鄂尔多斯东胜体育中心综合体育馆展厅的钢屋盖设计, 获得了较好的技术经济效果.

1 张弦网架算例设计

研究对象为规则的双坡顶造型^[9], 跨度 78 m, 张弦结构受压构件为空间管桁架, 下弦为钢索, 中间均匀布置了七根撑杆如图 1 所示, 共 11 榀。桁架厚度为 2 m, 矢高为 3 m, 桁架间距为 9 m。在相邻张弦桁架之间设置双层网壳, 可以有效增加桁架的稳定性与刚度。网壳的网格采用四角锥网格, 基本尺寸为 3 m × 3 m, 厚度为 2.0 m。支座一边为固定铰支座, 一边为沿跨向滑动支座。图 2 所示即为屋盖的整体模型, 红色的杆件表示的是共 11 榀张弦桁架。

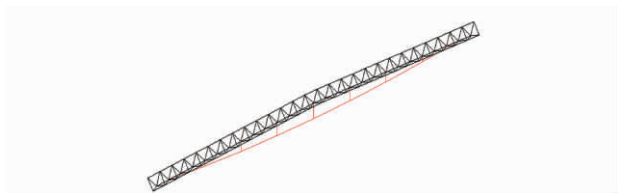


图 1 单榀张弦桁架

Fig. 1 Single truss string

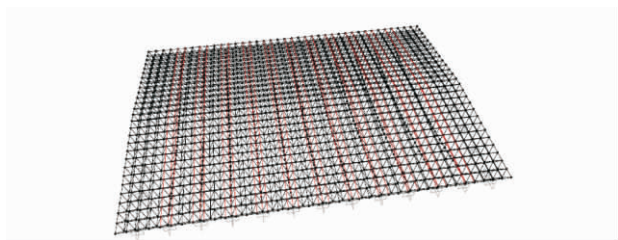


图 2 算例的整体模型

Fig. 2 Integral model of the example

1.1 索的初始线形

1.1.1 受横向均布荷载作用的索

自重下类似于受横向均布荷载 q 的情况如图 3 所示。索上切出一微段, 水平长度为 dx , 索长 ds , 受张力 T , 水平分力为 H , 取一微段 dx 进行受力分析如图 4 所示。

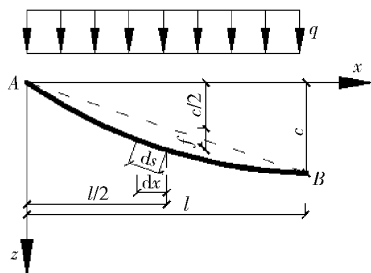


图 3 横向均布荷载作用下索段示意图

Fig. 3 Cable segment under lateral uniform load

$$\sum x = 0, (dH/dx)/dx = 0 \quad (1)$$

$$\sum z = 0, [d(Hdz/dx)/dx]dx + qdx = 0 \quad (2)$$

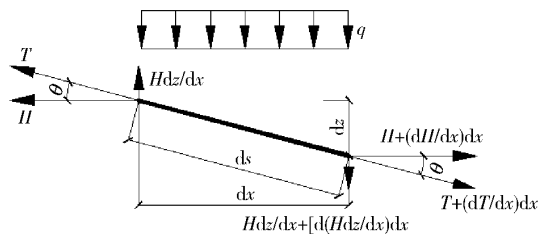


图 4 横向均布荷载作用下索段受力分析图

Fig. 4 Force analysis of the cable segment under lateral uniform load

通过微分方程求解以及边界条件得到索在水平均布荷载下的线形是抛物线即

$$z = (q/2H)x(l-x) + (c/l)x \quad (3)$$

设索中点 $l/2$ 的最大挠度是 f , 而且 A, B 两点等高, 可得到索的挠度和横向张力关系为 $H = ql^2/8f$ 和索的初始线形 $z = 4f(x - x^2/l)/l$ 。

1.1.2 受沿索长均布荷载作用的索

如图 5 所示, AB 索段受沿索长均布荷载 q (如索自重等) 作用, 将沿索长的均布荷载 q 等效为沿水平均布的荷载 q_x , 进行受力分析如图 6 所示, 则有

$$q_x = qds/dx = q[1 + (dz/dx)^2]^{0.5} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)经积分得

$$z = (H/q)[\cosh\alpha - \cosh(2\beta x/l - \alpha)] \quad (5)$$

式中 $\alpha = \operatorname{arsinh}[\beta(c/l)/\sinh\beta] + \beta$, $\beta = ql/2H$ 。

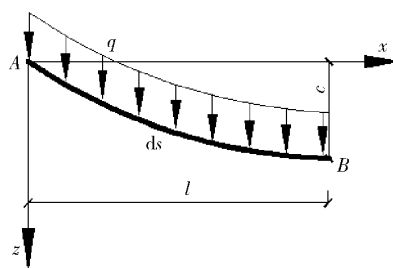


图 5 沿索长均布荷载下索段示意图

Fig. 5 Cable segment under uniform load distributed along the cable length

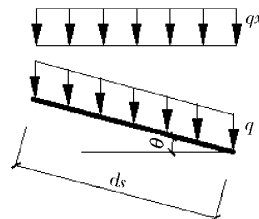


图 6 沿索长均布荷载下的索段受力分析图

Fig. 6 Force analysis of the cable segment under uniform load distributed along the cable length

当 A, B 等高, 跨中垂度为 f 时, 索的初始线性 $z = (H/q)[\cosh\alpha - \cosh(qx/H - \alpha)]$, 索的挠度和水平张力关系为 $f = H/q[\cosh\alpha - 1]$ 。

当 f 相同且 $f/l \leq 0.1$ 时, 两条曲线坐标很接近, 由于悬链线表达复杂, 本设计拉索初始线形采用抛物线形。

1.2 算例截面尺寸设计

算例的截面规格采用实际工程中的截面种类, 如表 1 所示。

表 1 截面尺寸与规格			
Table 1 Section size and specifications			
腹杆及网架截面/ (mm × mm)	张弦桁架截面/ (mm × mm)	撑杆截面/ (mm × mm)	索截面/ (mm × mm)
φ76 × 4	φ159 × 6	φ219 × 8	φ5 × 127
φ76 × 5	φ159 × 8	φ219 × 10	φ5 × 139
φ95 × 5	φ180 × 8	φ245 × 10	φ5 × 163
φ95 × 6	φ219 × 8	φ245 × 12	φ5 × 199
φ127 × 6	φ219 × 10		

注: Q345C 热轧无缝钢管, 弹性模量为 2.1×10^5 MPa; 索的弹性模量 1.6×10^5 MPa, 索的破断应力 $\sigma_b = 1670$ MPa。

考虑五种荷载作用, 即初始预应力、结构自重(程序计算)、屋面恒荷载($1.00 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$)、屋面活荷载($0.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$) 和 风荷载(迎风面为 $1.28 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 背风面为 $0.64 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 平行向为 $0.77 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$)。

针对上述荷载作用, 考虑三种典型的最不利工况进行分析比较。

工况 1: 1.2 张弦网架自重(含预应力) + 1.2 屋面附加恒载 + 1.4 屋面活载。

工况 2: 1.0 张弦网架自重(含预应力) + 1.0 屋面附加恒载 + 1.4 风向 1(迎风面背风面)。

工况 3: 1.0 张弦网架自重(含预应力) + 1.0 屋面恒载 + 1.4 风向 2(风向与脊线方向相同)。

1.3 算例的参数优化分析

本计算采用 SAP2000 中等效降温法来模拟索的预应力以及多次张拉过程, 索用框架单元模拟。整条钢索降温收缩, 结构将约束这种收缩, 从而使上弦桁架产生向上的拱度, 起到压弯效果, 下拉索受拉, 形成自平衡体系。

本文的参数优化主要关注以下目标:

- (1) 索在各种组合工况下不松弛, 索的应力比控制在 0.4 之内;
- (2) 参照《钢结构设计规范》(GB50017—2003), 预应力张弦梁在恒载和活载标准作用下的挠度为其跨度的 $1/400$, 预应力张弦梁在活荷载标准值产生的挠度为其跨度的 $1/500$;
- (3) 杆件控制应力比为 0.85。

1.3.1 垂跨比的影响分析

根据《空间网格结构技术规程》报批稿(2007—

12—14) 对张弦拱(拱架)的设计规定, 张弦的垂距可取跨度的 $1/30 \sim 1/12$, 所以本模型中垂距为 2.5、3、3.5、4、4.5 和 5 m, 即垂跨比为 $1/31.2$ 、 $1/26$ 、 $1/22.3$ 、 $1/19.5$ 、 $1/17.3$ 和 $1/15.6$ 。

垂跨比的优化, 在满足以上参数优化的目标的前提下, 调节在恒载和活载标准作用下跨中挠度值趋近于零, 以便比较不同垂跨比下受力性能及用钢量。

在三种最不利工况中, 工况 1 中索力达到最大索力; 工况 2 风荷载效应最大, 为最小索力, 满足不松弛。把不同垂跨比下的索的受力统计如图 7 和图 8 所示, 其中横坐标的数值表示从第 1 榀到第 13 榀。由图 7 和图 8 看出最大索力和最小索力均产生于中间榀的张弦梁, 并且随着垂跨比的增大, 相同榀的最大索力和最小索力相应减小。垂跨比 $1/31.2$ 、 $1/26$ 与垂跨比 $1/22.3$ 、 $1/19.5$ 、 $1/17.3$ 和 $1/15.6$ 索力有较大变化是由于垂跨比 $1/31.2$ 和 $1/26$ 所用的索截面为 $\phi 5 \text{ mm} \times 199 \text{ mm}$, 而其他垂跨比所用的索截面为 $\phi 5 \text{ mm} \times 163 \text{ mm}$, 索的应力变化较小, 满足索的设计索力小于 0.4 的标准破断力的要求。

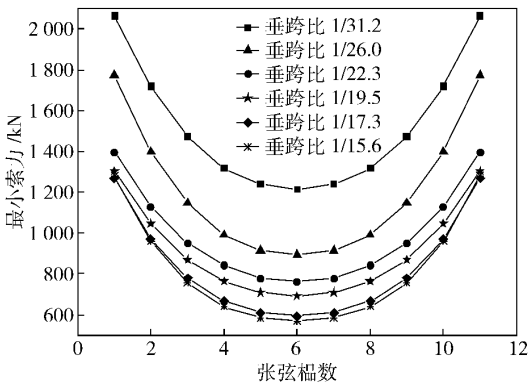


图 7 不同垂跨比下各榀最小索力分布
Fig. 7 Minimum pre-stresses of strings at different sag-to-span ratios

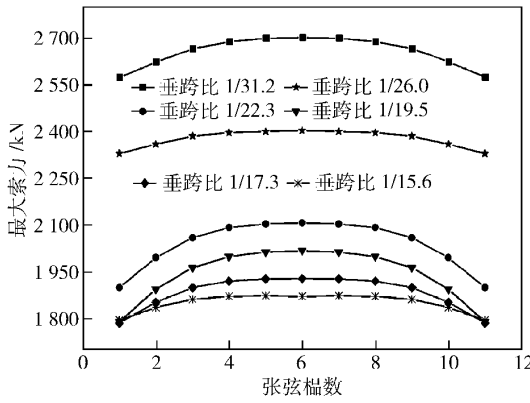


图 8 不同垂跨比下各榀最大索力分布
Fig. 8 Maximum pre-stresses of strings at different sag-to-span ratios

六种模型用钢量的对比如图9所示:垂跨比1/19.5时,用钢量达到最大361 t,相当于 $34.5 \sim 38.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$;垂跨比在1/26 ~ 1/22.3时用钢量较小;垂跨比1/31.2时屋盖用钢量增大,不宜采取;在大于1/19.5时屋盖的用钢量有减小趋势但是用钢量依然偏大.综上所述,对于这种跨度的张弦网架结构最小用钢量应在垂跨比1/26 ~ 1/22.3中选择.

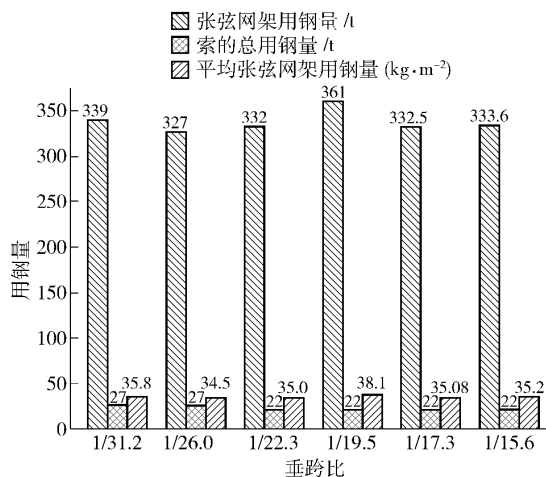


图9 垂跨比与用钢量关系

Fig. 9 Relationship between sag-to-span ratio and total steel consumption

1.3.2 初始预应力大小的影响分析

针对最少用钢量的垂跨比1/22.3的张弦桁架网壳屋盖,分析不同索的初始预应力对结构受力性能及用钢量影响,图10和图11统计了不同预应力下,中间榫的张弦桁架在工况1和工况2下的荷载效应.

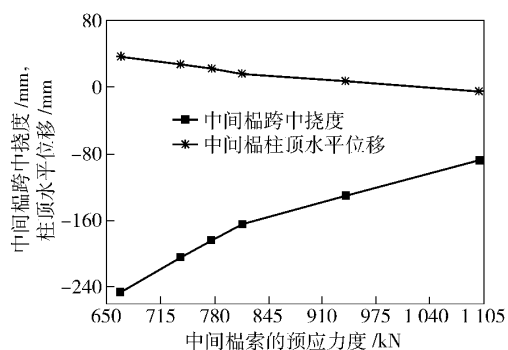


图10 工况1下的荷载效应

Fig. 10 Load effect in Case 1

工况1,恒活荷载共同作用抵消了初始预应力反拱值,使得跨中竖向位移出现负向最大值,且随着预应力力度的增大而呈非线性减小,减小的趋势逐渐减慢.索的拉力有效地减小恒活荷载下屋盖对柱的水平推力,从图10看到,随着预应力力度的增加,工况

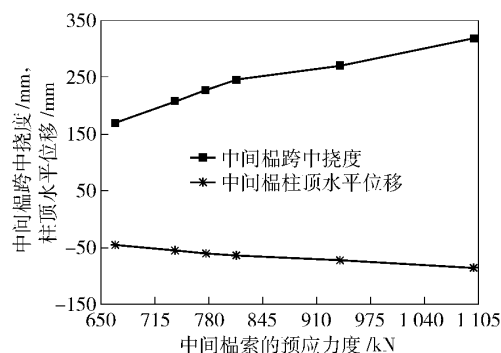


图11 工况2下的荷载效应

Fig. 11 Load effect in Case 2

1下滑动支座的水平位移逐渐减小趋于零.工况2是风吸力最大的情况,从图11中看到随着索的预应力力度的增加,屋盖的跨中向上的竖向位移在单调增加对屋盖很不利;柱顶支座的水平位移也在单调增加,当位移过大容易导致滑动支座滑落柱顶.因此为安全起见,索的预应力力度应取较小的预应力值.

1.3.3 撑杆数量及间距的影响分析

针对撑杆数量为3根(间距为18m)、5根(间距为12m)、7根(间距为9m)和11根(间距为6m)的四个模型进行分析.如图12所示,标准工况下(1.0恒荷载+1.0活荷载)随着撑杆的增加,跨中挠度减小,屋盖形成反拱并且逐渐趋于稳定;图13中索力也随着撑杆数量的增加而增加,但增加的幅度变缓并逐渐趋向于水平.因此可以看出,对于跨度为78m的张弦桁架撑杆数应不少于5根.

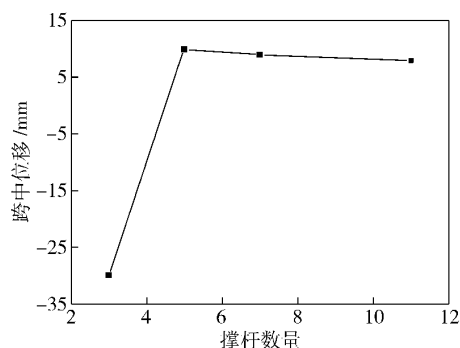


图12 标准工况下撑杆数量与跨中挠度的关系

Fig. 12 Relationship between the numbers of struts and midspan deflection in the standard case

1.4 张弦网架结构动力性能研究

1.4.1 垂跨比对自振特性的影响

张弦梁结构是一种形式复杂、刚柔结合的体系^[4-6],往往在低阶振型表现为索的平面外振动^[7-9].图14反映了不同垂跨比下屋盖的周期变化曲线.由于索的前11阶为平面外振动,所以前11阶各阶周期减小幅度的缓慢.从第12阶开始到第17

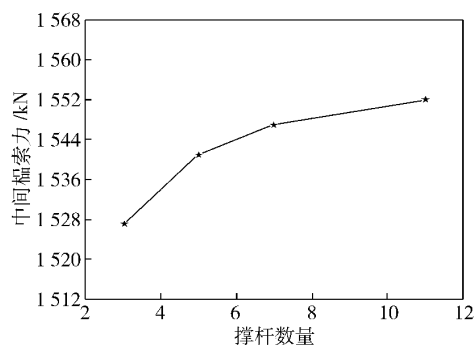


图13 标准工况下撑杆数量与索力的关系

Fig.13 Relationship between the numbers of struts and cable-force in the standard case

阶,结构周期减小幅度明显加快,这一阶段的振型主要是屋盖的整体振型。从第18阶开始周期减小幅度又明显减弱,这一阶段的振型主要是索的二阶摆动。对比不同垂跨比的周期曲线发现,前12阶的自振周期明显随着垂跨比的增大而增大。这说明张弦网架结构的垂跨比加大,水平向的刚度有所减弱。

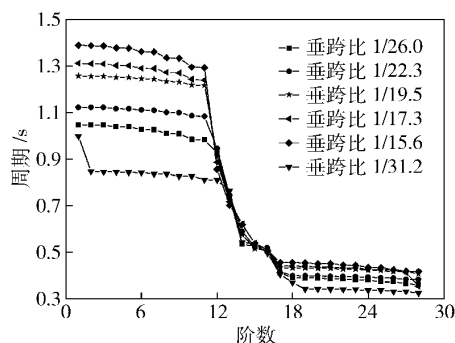


图14 不同垂跨比下的周期曲线

Fig.14 Periodic curves at different sag-to-span ratios

1.4.2 预应力对结构自振特性的影响

预应力的施加是采用降温法,六个模型中的索分别施加温度荷载 -100 、 -120 、 -130 、 -140 、 -160 和 -180 ℃,比较预应力对自振周期的影响。结果发现预应力的改变并不能改变模型的主要振型,如图15所示,六种模型的前11阶振型都表现为结构下弦索的平面外的振动,而且随着预应力度的增大而周期变小,频率增加,说明预应力度的增加有利于索的平面外刚度的加强。

从第12振型开始出现屋盖的整体振型,不同的预应力模型在第12振型的周期值很相近,为0.95左右,说明预应力度的增大对整体的刚度影响较弱。

2 鄂尔多斯东胜体育中心综合体育馆展厅屋盖设计

鉴于鄂尔多斯东胜体育中心展厅屋盖的不规则

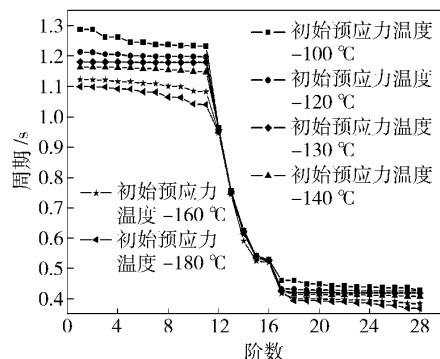


图15 不同初始预应力的周期曲线

Fig.15 Periodic curves at different initial pre-stresses

造型,采用这种新型张弦网壳组合结构。屋盖设计为双坡屋顶,中间均匀布置了7根撑杆,共14榀,如图16所示,红色的构件表示张弦桁架。桁架厚度为2m,垂跨比为1/25,桁架间距为9m。网壳的网格采用四角锥网格,基本尺寸为 $3\text{m} \times 3\text{m}$,厚度为2.0m。悬挑部分为12m,下部为三层的混凝土部分,柱顶高为18.500m。采用算例的截面尺寸和优化目标对屋盖进行钢结构设计。考虑以下荷载作用:初始预应力、结构自重(程序计算)、屋面恒荷载($1.00\text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$)、屋面活荷载($0.5\text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$)、雪荷载(基本雪压:50年重现期 $s_0 = 0.35\text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,100年重现期 $s_0 = 0.40\text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$)以及风荷载(按照风洞试验报告)。设计考虑混凝土和钢结构的正负温差,按照七度($0.10g$)地震设防,设计地震为第3组,建筑场地类别为II类。

经计算分析张弦结构用钢量为580t,索用钢量为11t,总用钢量为591t,总建筑面积为14000 m^2 ,比相同建筑面积的传统张弦桁架用钢量大大减少。

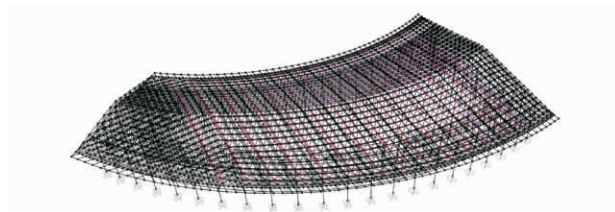


图16 展厅屋盖模型计算图

Fig.16 Model diagram of the exhibition center roof

由于建筑的不规则性,张弦桁架各榀跨度不等,给调节索力带来了很大困难。本设计初次调索保证索在任何复杂组合工况下不退出工作,最大索力的应力比控制在0.4之内。第2次调索使屋盖各榀张弦桁架以及两头的网架部分在标准工况下跨中竖向变形趋近于零。第3次微调使最小索力控制在100~250kN左右,以确保索的协调性和均匀性^[10];最大索力的应力比接近0.4,既满足索的使用安全

又能使索在此情况下充分发挥其张拉力. 表 2 是各 榀索的截面及受力特点.

表 2 各榀索的截面及受力情况

Table 2 Cable sections and forced conditions

索编号	跨度/m	索截面/(mm×mm)	预拉力/kN	最大索力/kN	最小索力/kN	最大索力应力比
1	52.880	φ5×61	501	743	154	0.354
2	54.018	φ5×61	515	769	96	0.371
3	55.181	φ5×61	564	869	100	0.411
4	56.380	φ5×85	766	1177	106	0.405
5	57.584	φ5×85	753	1172	97	0.408
6	58.806	φ5×85	764	1197	118	0.417
7	58.806	φ5×85	764	1203	138	0.420
8	61.312	φ5×85	746	1184	140	0.416
9	62.674	φ5×85	708	1133	135	0.401
10	64.060	φ5×85	703	1120	167	0.397
11	65.525	φ5×85	726	1161	236	0.404
12	67.065	φ5×73	565	916	181	0.368
13	68.713	φ5×73	582	931	250	0.365
14	70.485	φ5×73	547	877	221	0.330

3 结论

(1) 这种新型的张弦网壳组合结构体系与传统的张弦结构相比,用钢量小,空间适应性强,特别适合于不规则的大跨建筑.

(2) 张弦网壳结构的选型应依据大量的参数分析并结合相关工程经验而设计. 用钢量并不是随垂跨比的增加而单调变化的,应通过算例分析来获得较小用钢量的垂跨比. 在本设计中垂跨比为 1/26 ~ 1/22.3 时用钢量较小.

(3) 张弦网架结构是一种刚柔结合体系,其自振周期随着垂跨比的增加而减小,其前很多振型表现为下弦索的局部振动,其结构的整体振型出现在高阶振型,因此在对结构进行动力分析中,建议振型数不少于 60 阶.

(4) 整体结构中下弦索的最小索力和最大索力均发生在中间榀,所以建议在设计中重点关注中间榀索的最大应力以及风荷载下索是否松弛.

参 考 文 献

- [1] Saitoh M. Principle of Beam String Structure // *Proceedings of the International Colloquium on Space Structures for Sports Buildings*. Madrid, 1986: 617
- [2] Kato S, Nakazawa S, Matsue Y, et al. Active control of axial forces in beam string space frames // *IASS Symposium on Spatial, Lattice and Tension Structure*. Atlanta: ASCE, 1994: 664
- [3] Chen R Y, Dong S L, Sun W B. Design and analysis of a long-span pre-stressed truss string structure. *Spat Struct* 2003, 9(1): 45
(陈荣毅,董石麟,孙文波. 大跨度预应力张弦桁架结构的设计与分析. 空间结构 2003, 9(1): 45)

- [4] Bai Z X, Liu X L, Li Y S. Influence analysis of factors of single beam string structure. *Steel Struct*, 2001, 16(3): 42
(白正先,刘锡良,李义生. 单榀张弦梁结构各因数的影响分析. 钢结构, 2001, 16(3): 42)
- [5] Chen H X, Shu X W. Influence analysis of prestress on mechanical performance of beam string structure. *J South China Univ Technol Nat Sci*, 2003, 31(5): 79
(陈汉翔,舒宣武. 预应力值对张弦梁结构受力性能的影响分析. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2003, 31(5): 79)
- [6] Wang X L, Liu Y Z. Influences of rise-to-span ratio and sag-to-span ratio on the prestressed spatial truss string structure. *Spat Struct* 2005, 11(1): 35
(王秀丽,刘永周. 矢跨比和垂跨比对张弦立体桁架性能的影响分析. 空间结构. 2005, 11(1): 35)
- [7] Wang X L, Ding N S, Cui J F. Analysis of free vibration characteristics of stringed beam structure. *J Lanzhou Univ Technol*, 2006, 32(4): 105
(王秀丽,丁南生,崔继付. 张弦梁结构的自振特性分析. 兰州理工大学学报 2006, 32(4): 105)
- [8] Wang X L, Ding N S, Chai H. Seismic response and parametric analysis of beam string structures. *Spat Struct* 2006, 12(2): 34
(王秀丽,丁南生,柴宏. 大跨度张弦梁结构非线性地震响应及参数分析. 空间结构 2006, 12(2): 34)
- [9] Kong D D, Zhang H X, Zhao X. Dynamic property and earthquake response analysis of cable-strut-supported shell structure. *World Earthquake Eng*, 2008, 24(4): 136
(孔丹丹,张海霞,赵欣. 张弦网壳结构的自振特性及地震响应分析. 世界地震工程 2008, 24(4): 136)
- [10] Xiong W, Wu M Z. Vertical seismic response analyses of large-span truss string structures. *World Earthquake Eng*, 2007, 23(2): 145
(熊伟,吴敏哲. 大跨度张弦桁架竖向地震反应分析. 世界地震工程 2007, 23(2): 145)