

拉索预应力巨型网格结构布索形式研究*

贺拥军^{1†}, 王继新¹, 周绪红²

(1.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

摘要:针对由预应力和巨型网壳结构组合而成的一种超大跨度拉索预应力空间结构体系,总结了该结构体系已提出的两种预应力布置形式的索杆布置原则、受力机理、具体形式与几何拓扑关系;并在此基础上提出两种改进型拉索预应力布索形式.通过与已提出的两种布索形式及未布索桁架拱进行对比分析,初步研究了改进型布索形式下立体桁架拱的静力及稳定性能.对比指标包括结构最大位移、支座水平反力、杆件内力峰值、结构稳定极限承载力及失稳模态等5个方面.分析结果表明,两种改进型布索形式的引入均可有效地提高桁架拱的结构刚度,改善结构的静力性能,并能较大地提高其稳定承载力,同时还能改善已有布索形式的缺陷,是较合理的索杆布置;其中第2种改进型布索形式的综合性能更好,是一种更有效的布索形式.

关键词:拉索预应力巨型网格结构;布索形式;静力性能;稳定承载力;屈曲模态

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

Research on Arrangement Styles of Cables for Prestressed Reticulated Mega-structures

HE Yongjun^{1†}, WANG Jixin¹, ZHOU Xuhong²

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In terms of the prestressed spatial structure system consisted of prestressed and giant reticulated shell structure, the arrangement principle of cables and struts, force mechanism, configuration and topological relations for existing two types of cable-strut arrangements were summarized. Based on the above analysis, two improved kinds of cable-strut arrangement schemes were put forward. Through the comparison of the structures with the existing two types of cable-strut arrangements and the corresponding non-pretensioned truss arch in five aspects including maximum displacement, horizontal reaction force, peak value of member internal force, ultimate load and buckling mode, the static performance and stability of the truss arches, the responses of two improved cable-strut arrangement schemes were studied. The results indicate that the structural rigidity, static performance and stability of truss arches can be effectively improved for the introduction of improved cable-strut arrangement schemes. Additionally, the defects of the

* 收稿日期:2016-04-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701201), National Key Research and Development Program(2016YFC0701201);湖南省高校科技创新团队计划资助项目[湘财教指(2015)616号], Science and Technology Innovation Research Team Project of University in Hunan Province[XCJZ(2015)616]

作者简介:贺拥军(1970—),男,湖南宁乡人,湖南大学教授,博士

† 通讯联系人: E-mail: hyj0087@163.com

existing two types can be ameliorated, which demonstrates the reasonable arrangements of the cables and struts in the two improved schemes. Comparatively, the second improved scheme had optimized comprehensive performance, and it is more efficiency.

Key words: prestressed reticulated mega-structure; cable-strut arrangement styles; static property; bearing capacity; buckling mode

随着国民经济和人们生活水平的提高,工业生产、文化、体育等事业的飞速发展,人们对大跨度空间的需求也日趋增长^[1-2].其中最主要表现是结构跨度的不断增大,向超大跨度发展.各种大型文化体育盛会推动了大跨空间结构的跨度记录一次又一次被刷新;同时,在全球经济化浪潮中,人们的各种交流活动日趋频繁,各类大型火车站、航站楼等大跨度结构如雨后春笋般拔地而起.随着结构跨度的增加,单一形式的传统空间网格结构往往采用增大杆件截面面积或者增加结构层数的策略,其受力性能的不合理性越来越突出,无法适应超大跨度的发展需求.

为此,各国的科技工作者一直致力于为实现更大跨度的跨越而努力.近年来提出的巨型网格结构^[3]较好地实现了结构跨越能力的飞跃,改善了结构的受力性能.其传力路径由两级体系构成,第1级为巨型网格主体结构,承担整个结构的荷载并传递至支承结构上;第2级为普通网格子结构,承受主体结构网格内的屋面荷载并传至主体结构,从而形成传力路径明确的大网格套子网格结构体系.

现代大跨空间结构的发展趋势将是:通过将各类单一形式的结构、高强高性能的材料相互有机结合,集两种或几种结构的优点而形成组合结构,对结构概念和形体进行创新,得到更加合理、高效的新型大跨空间结构.

预应力网壳是在普通网壳中配置高强预应力索,借助张拉预应力索在局部或整体引入预应力而形成的一种结构体系.通过利用预应力索轻质高强的性能,达到减小结构的用钢量、降低结构总造价、减少结构的变形,同时能够增大结构的跨越能力^[4].

基于预应力结构的优越性,为进一步增大结构的跨度,将预应力引入巨型网格结构而形成拉索预应力巨型网壳结构,通过拉索和撑杆的合理布置及预应力大小的调整,充分利用索的轻质高强性能.刚柔体系有机组合势必将有效地减轻结构的自重、改善结构的受力性能、控制结构的变形和提高结构的承载力,从而使巨型网格结构的跨越能力进一步

提升.

1 拉索预应力索杆布置原则及形式

由以往的分析可知,对于巨型网格结构,其横向各榀立体桁架拱杆件内力远大于纵向立体桁架的内力,是结构的主要受力构件^[5],而纵向立体桁架受力相对较小,主要起增强横向立体桁架平面外稳定性和形成空间协同受力效果.将预应力体系布置在立体桁架拱平面内可更有效地改善结构的受力性能.因此,本文下述的各种布索类型均考虑布置在巨型网格结构横向的立体桁架拱平面内,而在纵向,只需布置一定数量的稳定索(无预应力)即可.

1.1 索杆布置形式 1

竖向均布荷载作用下,立体桁架拱在平面内的屈曲模态为中部凹曲,两侧凸曲,呈3个半波形式.当按照结构屈曲时的变形特征,在结构的3个半波范围内布置适当的撑杆和预应力拉索时,撑杆反向作用于立体桁架屈曲时位移较大点处,预应力索杆体系能为位移较大点提供弹性支撑,能较好地约束相应部位的变形,使结构变形、内力分布趋于均匀,提高结构的整体刚度,改善结构的受力性能^[6].基于上述原则,在拱的跨中内侧和两端外侧布置索杆,拉索和拱相交位置大致处于桁架拱屈曲时的反弯点上(此反弯点大致在拱轴线上的3/10处),结构具体形式如图1所示.

1.2 索杆布置形式 2

张弦梁结构^[7-8]是通过上弦刚性压弯构件和下弦柔性索组合,合理布置索杆而形成的一种自平衡体系,是目前较为成熟的一种预应力钢结构体系.其充分发挥了刚柔结构的受力特性,具有较好的受力性能.将张弦梁概念引入巨型网格结构,在立体桁架拱下部布置撑杆预应力索体系.撑杆设置于立体桁架拱的转折点(纵横向立体桁架梁相交处)处下弦主节点上,预应力拉索连接撑杆及两侧相邻主节点,相邻两段折线梁段、一根撑杆及两根拉索形成一个基本的张弦梁单元,各张弦梁单元相互交叉布

置,形成如图 2 中所示的张弦桁架拱结构^[9].整个索杆体系如同在桁架拱的下部形成一个加强层,增加了桁架拱结构的等效高度,有效地提高了结构的等效刚度.

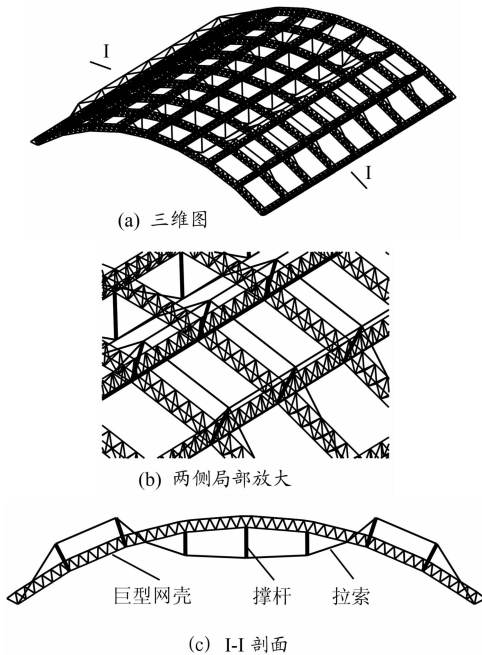


图 1 索杆布置形式 1

Fig.1 Arrangement type 1 of cables and struts

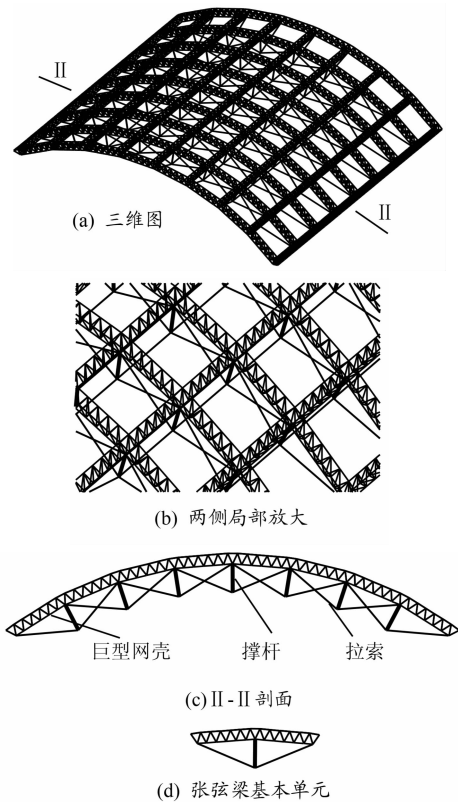


图 2 索杆布置形式 2

Fig.2 Arrangement type 2 of cables and struts

1.3 索杆布置形式 3

对于前述的索杆布置形式 1,由于立体桁架拱两侧的预应力索和撑杆布置在结构外侧,索杆外露,不利于钢索的防腐及屋面的布置,影响结构的安全性、耐久性维护和屋面的美观;同时,两侧的撑杆需穿过立体桁架梁上弦层及腹杆层与下弦节点相连,造成下弦节点上杆件密集,给节点构造及施工造成诸多不便.而在布索形式 2 中,索杆数量较多,杆件布置较密集.基于以上原因,考虑将布索形式 1 中两侧的外露预应力拉索及撑杆布置在结构内侧,形成如图 3 中所示的改进型索杆布置形式.通过调节撑杆长度,使两侧的预应力索之间形成向内朝向圆心的夹角(向心角).拉索预应力使撑杆由布索形式 1 中的受压状态转变为受拉状态.通过两侧撑杆的下拉,使桁架拱两侧有下凹的趋势;而中部撑杆受压,使桁架拱中部外凸,达到了布索形式 1 中类似的效果.同时两侧撑杆受拉,不存在立体桁架拱平面外的稳定性问题,减少了拉索预应力巨型网格结构中纵向稳定索的数量.整体结构索杆数量较少,布置较为简洁.

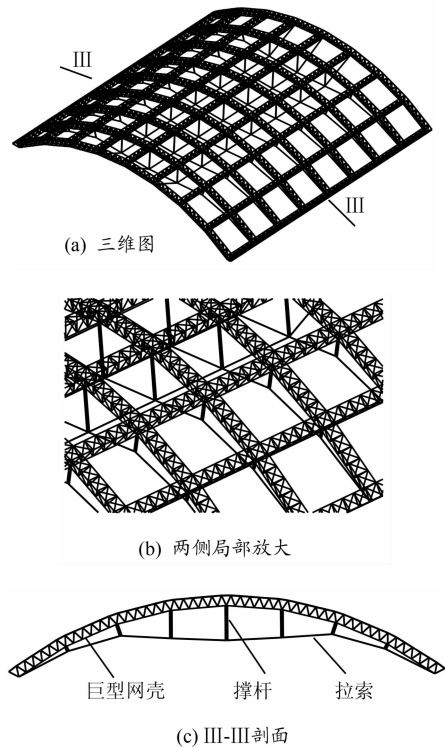


图 3 索杆布置形式 3

Fig.3 Arrangement type 3 of cables and struts

1.4 索杆布置形式 4

在上述提出的改进型索杆布置形式 3 中,为充分发挥预应力体系的作用效果,两侧索之间需形成

向心角,而中部索之间形成背心角,且角度越小,对结构受力性能的改善效果越好.在小矢跨比范围内,可通过增加中部撑杆长度和缩短两侧撑杆长度来满足.随着矢跨比的增大,中部撑杆所需的长度急剧增加.而撑杆越长,其占用的结构净空越大,影响室内的使用,且自身的压杆稳定性问题越突出.为减小撑杆长度,进一步改善预应力的作用效果,结合布索形式2,提出如图4所示的改进型布索形式.中部与两侧的撑杆长度可独立调整,长度大为减小,有效地增加了结构净空.

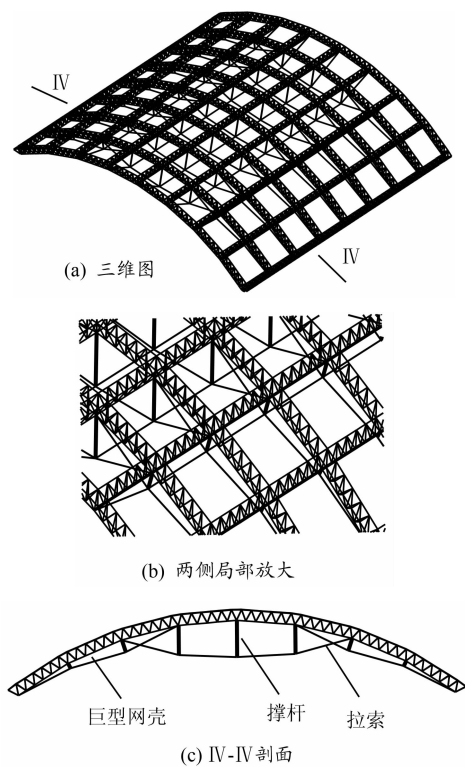


图4 索杆布置形式4

Fig.4 Arrangement type 4 of cables and struts

2 静力及稳定性能对比分析

显然,预应力索杆体系的布置不同,对结构各性能指标的影响也各不相同;且不同的荷载工况下,

作用效果也不尽相同,很难得到一种所有工况下都最优的布索形式,故需要进行综合评判,才能得到相对较好的布索形式.巨型网格结构中各榀平行的立体桁架拱作为结构的主要受力构件,基本呈平面受力状态,其受力性能往往决定着整个结构的承载能力.为简化分析,本文拟以巨型网格结构中的单榀立体桁架拱为分析模型,对上述提出的两种改进型布索形式,从结构的静力及稳定性能两方面分别与已提出的两种布索形式及未布索情况进行对比分析.主要通过考察结构最大挠度、杆件内力峰值、水平支座反力和稳定极限承载力等结构指标及屈曲模态对提出的两种布索形式的静力及稳定性能进行初步研究.通过这些宏观指标,从整体上验证提出的结构索杆布置的合理性,为后续深入研究奠定基础;同时,这些宏观指标一般也是实际工程中结构选型或设计时首先要关注的目标,可为实际工程提供相应参考.

2.1 计算模型

利用 ANSYS 有限元程序进行分析,桁架杆及撑杆采用 Link8 单元模拟,拉索采用 Link180 单元模拟,各单元之间假定为铰接.假定立体桁架拱只在拱平面内发生变形.立体桁架拱跨度为 120 m,矢跨比取 1/6,立体桁架梁的高度取为 3 m,拱向节点数为 9,上弦网格数为 5.桁架杆件截面尺寸为 $\Phi 152 \times 5$,拉索截面为 $\Phi 40$,撑杆选用 $\Phi 203 \times 10$.钢材弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,预应力拉索弹性模量为 $1.8 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.上弦节点承受 15 kN 竖向集中荷载,采用立体桁架拱两端下弦固定铰支座约束,拉索初始预应力大小为 500 kN.布索形式 1 中撑杆长度除跨中为 10 m 外,其余取为 8 m;布索形式 2 中统一取为 8 m;而布索形式 3 和 4 中的撑杆长度(对称)分别为 1.5, 3, 8 和 10 m.分析中仅考虑结构几何非线性.

2.2 静力性能对比分析

按照 2.1 节中模型参数取值,对 4 种布索形式及未布索立体桁架拱进行静力分析,得到各结构静力性能指标分析结果如表 1 所示.

表 1 4 种布索形式下结构静力性能对比

Tab.1 Comparison of static performance of the structures with four cable-strut arrangement types

结构形式	最大竖向位移/mm	位移降低率/%	最大支座水平反力/kN	支座反力降低率/%	杆件内力峰值/kN	杆件内力峰值降低率/%
未布索	-233.67	—	-885.47	—	-1 112.52	—
布索形式 1	-121.26	48.11	-847.64	4.27	-1 206.02	-8.40
布索形式 2	-194.94	16.57	-652.40	26.32	-1 014.11	8.85
布索形式 3	-169.37	27.52	-712.55	19.52	-1 298.08	-16.68
布索形式 4	-150.76	35.48	-701.21	20.80	-1 228.22	-10.40

注:1)降低率指 4 种布索形式性能指标值和相应未布索立体桁架拱指标值的差值与未布索立体桁架拱指标值的比值;2)降低率负值表示增大.

从表1中可以看出,与未布索立体桁架拱结构相比,由于预应力的引入,4种布索形式下结构的最大竖向位移较未布索桁架拱均有较大程度减小,降低率均超过16%,表明预应力的索杆布置形式可有效地提高结构的整体刚度.其中布索形式1和4的作用效果最明显,降低率分别达到48.11%和35.48%.对于结构支座水平反力而言,4种布索形式都能减小结构支座反力,除布索形式1降低率为4.27%,支座反力减小效果较弱以外,其余3种形式均在20%左右,降低效果明显;而对于杆件内力峰值,布索形式2稍有降低,其他3种形式均呈不同程度的增加,其中布索形式3增加最为明显,达16%以上,布索形式1和4在10%左右,进一步分析发现,这些内力峰值所在的杆件均是集中在索端和支座附近的下弦杆,由于预应力和支座反力的共同作用,使得其承受了较大的压力.但这些杆件数量很少,且仅出现在局部.因此,在实际工程中,只需对此处杆件采取一定的加强措施即可.

进一步分析杆件的内力分布,由于腹杆的内力较小,且预应力对其内力影响较小,因此本文重点关注上下弦杆的内力变化.对于上弦杆件,未布索时,除两端少数杆件受拉外,其余杆件均受压,且内力值从两支座端向跨中逐渐增加;施加预应力后,除布索形式2外,其余3种布索形式对结构杆件的内力影响较为相似,均是边跨部分杆件的内力逐渐增加,且越往跨中,增加幅度越大,跨中部分杆件内力则有所减小,而布索形式2的杆件内力一直增加,且增加幅度逐渐减小.而对于下弦杆件,4种布索形式的影响基本相似,内力分布趋势与上弦杆相反.未布索时,内力从两端至跨中逐渐减小,且端部杆件受压,中部杆件受拉;施加预应力后,除最外侧的峰值杆件外,边跨部分杆件的内力减小,而跨中部分的内力反向增加.引入预应力体系后,由于预应力引起的结构内力重分布,使结构的上下弦杆内力分布趋于均匀,更有利于材料的充分利用.

从上述分析可知,基于不同原理布置的预应力索杆体系,其作用效果也不尽相同.按照屈曲模态布置的布索形式1及提出的改进形式3和4,由于预应力索拱产生的反拱与均布荷载作用下的变形相抵消,其预应力效果主要体现在减小结构的竖向位移及支反力.而对于按照张弦梁理论布置的布索形式2,对位移减小的效果相对较弱,但对支座反力及杆件内力峰值的降低效果较好.综合静力性能指标来看,提出的改进型布索形式4效果较好,是一种行

之有效的改进.

2.3 稳定性能对比分析

从2.2节静力性能分析中可以看出,预应力的引入,在一定程度上提高了结构的整体刚度,约束了结构的变形,使结构内力分布更加均匀.而对于这种超大跨度桁架拱结构而言,稳定性同样值得关注,甚至更为突出.因此,本小节将对各种布索形式结构的稳定极限承载力及失稳模态进行分析.

取上述2.1节中结构模型,采用弧长法对4种布索形式结构及未布索情况进行荷载-位移全过程分析,得到结构最大位移点的荷载-位移曲线如图5所示.

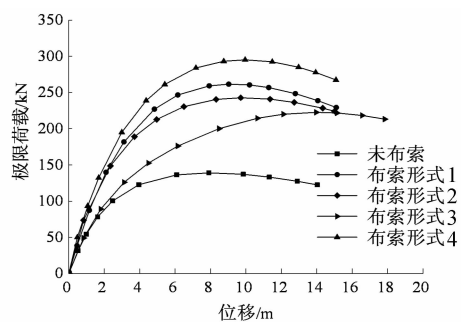


图5 不同布索形式下结构荷载-位移曲线
Fig.5 Load-displacement curves of structures with different cable-strut arrangement types

从图5中可以看出,未布索时结构的极限承载力为139.11 kN.引入预应力体系后,4种布索形式下立体桁架拱的极限承载力均高于未布索时立体桁架拱的极限承载力,分别为275.49, 242.78, 222.63, 295.13 kN.相比未布索情况,改进型的布索形式4的提高效果最佳,达到112.16%;布索形式1次之,为98.04%;而形式2和形式3的差别不大,分别为74.52%和60.04%.同时,荷载位移曲线的斜率变化,表明了整体结构的刚度随承受荷载增大的时变历程.比较各结构荷载位移曲线斜率可知,布索形式4的刚度最大,形式1和2次之,形式3的刚度最小,但均高于未布索情况.说明各种预应力的布置形式均比较合理,在一定程度上提高了结构的整体刚度,较好地改善了结构的受力性能,进而提高了结构的极限承载力.

荷载-位移曲线反映的是结构的某一点在加载过程中的变形情况,而无法反映出布索立体桁架拱整体变形情况.各布索形式及未布索立体桁架拱在极限荷载作用下的失稳模态如图6所示.

可以看出,未布索时结构失稳是中间部分发生较大的凹陷,两侧稍有外凸,最大位移发生在跨中.引入预应力后,除布索形式3外,其余几种布索形式

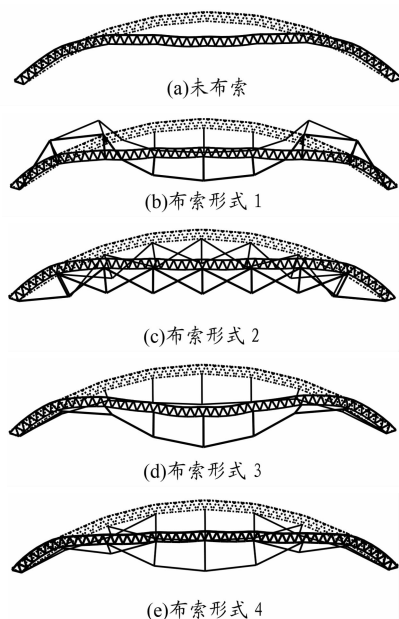


图6 不同布索形式下结构的失稳模态图
Fig.6 Buckling modes of structures with different cable-strut arrangement types

结构跨中部分呈现出整体下沉的变形趋势,说明跨中的预应力和撑杆体系能较好地抵制结构中部的下凹变形,使结构的变形更趋于均匀。布索形式1和4都是基于结构在均布荷载作用下的极限状态时的屈曲模态布置的索杆,其预应力产生的反拱位移与均布荷载作用下的位移正好相互抵消,有效地减小了结构的变形。而在布索形式2中,各小段张弦梁基本单元相互交叉增强,有效地增加了立体桁架拱等效高度,其中一段张弦梁单元失效时不会导致相邻单元失效,故在极限状态时,两侧的索杆虽发生松弛,但中部的索杆体系仍能较好地约束结构跨中的变形。布索形式3中预应力拉索呈悬挂状态,除支座节点外均是通过撑杆,而不是直接与桁架下弦节点相连,中部索与两侧索直接相互影响。桁架结构发生变形时,两侧的受拉撑杆同时会发生平面内的侧移,对中部索的预应力效果起卸荷作用,导致中部撑杆对跨中节点的变形约束作用减弱。因此,与其他几种布索结构相比,其变形相对较大。

从上面的静力稳定极限承载力和失稳模态分析可知,与未布索立体桁架拱相比,改进型布索形式3和4均能较好地约束结构的变形,提高结构稳定承载力;与已提出的两种布索形式相比,改进型布索形式4中索杆效率更高,是一种更好的布索形式。

3 结论

本文首先总结了2种拉索预应力巨型网格结构

形式的布索机理及具体几何拓扑关系,并在此基础上,提出了两种改进型布索形式。通过对4种布索形式立体桁架拱结构的静力及稳定性能进行对比分析,得出以下结论:

1)提出的两种改进型布索形式可改善结构的屋面布置,有效地缩短撑杆的长度,改善结构的使用净空,丰富了拉索预应力巨型网格结构形式;

2)4种布索形式结构中,预应力索杆体系的引入可以有效约束结构的变形,并不同程度地降低了结构的支座反力;对杆件内力峰值,除布索形式2稍有降低外,其他几种形式均有一定程度增大;

3)预应力拉索和撑杆有效地提高了结构的整体稳定性,与未布索结构相比较,极限承载力提高均在60%以上,其中提出的布索形式4提高率甚至达到了112%以上;

4)综合静力及稳定性能,提出的布索形式3和4均能在一定程度上提高结构的受力性能;相比较而言,形式4结构中索杆布置更合理,是一种更有效的布索形式。

参考文献

- [1] 董石麟,姚谏.网壳结构的未来与发展[J].空间结构,1994,1(1):3-10.
DONG Shilin, YAO Jian. The future and prospect of latticed shell structures[J]. Spatial Structures, 1994, 1(1): 3-10. (In Chinese)
- [2] 沈世钊.大跨空间结构的发展——回顾与展望[J].土木工程学报,1998,31(3):5-14.
SHEN Shizhao. Development of long-span structures—a review and prospect[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 5-14. (In Chinese)
- [3] 贺拥军,周绪红,董石麟.巨型网格结构的结构形式与支承方式[J].建筑结构,2006,36(8):16-19.
HE Yongjun, ZHOU Xuhong, DONG Shilin. Structural forms and support style of reticulated mega-structure[J]. Building Structure, 2006, 36(8): 16-19. (In Chinese)
- [4] 李明.预应力网壳结构布索方案研究[J].结构工程师,2003(2):10-14.
LI Ming. Research on the arrangement for prestressed cables of prestressed lattice shell structures[J]. Structural Engineers, 2003(2): 10-14. (In Chinese)
- [5] HE Y J, ZHOU X H. Static properties and stability of cylindrical ILTDBS reticulated mega-structure with doublelayer grid substructures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(12): 1580-1589.
- [6] HE Y J, ZHOU X H, ZHANG X T. Finite element analysis of the elastic static properties and stability of pretensioned cylindrical reticulated mega-structures[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 60: 1-11.
- [7] SAITOH M, OKASA A. The role of string in hybrid string structure[J]. Engineering Structures, 1999, 21(8): 756-769.
- [8] 白正仙,刘锡良,李义生.新型空间结构形式——张弦梁结构[J].空间结构,2001,7(2):33-38.
BAI Zhengxian, LIU Xiliang, LI Yisheng. A new type of spatial structure—beam string structure[J]. Spatial Structures, 2001, 7(2): 33-38. (In Chinese)
- [9] 贺拥军,孙轩,周绪红.张弦巨型网格结构布索方案研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(5):8-13.
HE Yongjun, SUN Xuan, ZHOU Xuhong. Research on cable-strut arrangement of string reticulated mega-structure[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(5): 8-13. (In Chinese)