

文章编号:1673-2049(2017)05-0076-07

拉索预应力巨型网格结构体系

贺拥军¹, 周绪红^{1,2}, 王继新¹

(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 400045)

摘要:阐述了拉索预应力巨型网格结构体系发展与研究的必然性和必要性;介绍了针对这一体系提出的各种结构形式中拉索预应力的布置原则、受力机理及具体形式;回顾了拉索预应力巨型网格结构体系的研究现状,包括静力及稳定性能、预应力索张力计算及其优化、张拉全过程分析、结构动力特性等。总结了该结构体系中各参数的合理取值,得到了较优的预应力大小及预应力分布比例,提出了针对静力性能的三级优化方法及预应力索张拉施工过程中索力的计算方法,得到了布索后结构的动力特性变化规律。最后对拉索预应力巨型网格结构体系研究的关键问题及发展方向进行了展望。

关键词:超大跨度;拉索预应力巨型网格结构;结构体系;刚柔组合空间结构;研究现状;展望

中图分类号: TU356

文献标志码: A

Prestressed Reticulated Mega-structure System

HE Yong-jun¹, ZHOU Xu-hong^{1,2}, WANG Ji-xin¹

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

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The necessity and inevitability of research and development on prestressed reticulated mega-structure system were described. The cable-strut arrangement principle, force mechanism, and configuration of various prestressed reticulated mega-structures were summarized. The research status on prestressed reticulated mega-structure system was reviewed, including static performance and stability, pretension force of cables and their optimization, whole-process pretensioning analysis, and dynamic characteristics. Some reasonable parameters of the structure were summarized. The optimum values and distribution proportions of the cable pretensions were obtained. The three-grade optimization method for static performances and the method for calculating the required initial strains of cables in the tensioning construction were presented, the variation of the structural dynamic performances were obtained after the pretensioned cables were arranged. Finally, the key and prospect of the research on the prestressed reticulated mega-structure system were discussed.

Key words: super-span; prestressed reticulated mega-structure; structure system; rigid-flexible combined structure; research status; prospect

0 引言

大跨度空间结构由于其受力性能好、自重轻、结

构形式丰富等优势而得到了广泛的应用。人类社会的发展对更大跨度空间和场所的需求日趋增长^[1-3],进入 21 世纪后,各种大型文化体育盛会进一步推动

收稿日期:2017-08-22

基金项目:国家重点研发计划资助(2016YFC0701201);湖南省高校科技创新团队支持计划项目(湘财教指[2015]616号)

作者简介:贺拥军(1970-),男,湖南宁乡人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:hyj0087@163.com。

了大跨空间结构的飞速发展,其中最主要的是结构跨度不断增长,逐渐向超大跨度发展。然而,单一形式的传统空间网格结构采用增大杆件截面或者增加结构层数的策略已无法适应超大跨度发展的需求^[4]。为此,各国科技工作者一直在进行不懈的探索研究,寻找既能跨越超大空间又具有良好经济技术指标的结构体系。同时,轻质高强材料如高强钢材和拉索的应用与发展、施工技术的创新、结构分析理论的日臻完善和应用^[3]也促使着空间结构不断向超大跨度发展。近年来提出的巨型网格结构体系^[5-9]和预应力网格结构体系^[10-12]等较好地实现了结构跨越能力的提高。巨型网格结构体系是通过合理的力流引导来增加结构的跨度,整体结构由 2 级构成: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;第 2 级为普通网格子结构,承受主体结构大网格内的屋面荷载并传至主体结构上,从而形成传力路径明确的大网格套子网格结构体系。预应力网格结构体系主要是通过传统网格结构中配置高强拉索、局部或整体引入预应力而形成的一种刚柔组合空间结构,如弦支网格结构、张弦梁结构^[12-13]等。

基于预应力结构体系的优越性,为改善巨型网格结构的受力性能,提高其刚度与稳定性,并进一步增强结构跨越能力,将预应力体系引入巨型网格结构而形成了拉索预应力巨型网格结构体系。本文介绍了针对这一体系提出的各种结构形式中拉索预应力的布置原则、受力机理及具体形式,回顾了拉索预应力巨型网格结构体系的研究现状,最后对该结构体系研究的关键问题及发展方向进行了展望。

1 拉索预应力巨型网格结构的形式与特点

对巨型网格结构而言,子结构承受大网格范围内的屋面荷载并将它们传递至主体结构。子结构采用双层平板网架结构,且跨度较小,一般不存在稳定性问题;主体结构立体桁架梁虽然是双层的,但跨度大,从整体来看仍是一个单层梁系网格结构,因此仍然存在稳定性问题。随着结构跨度的进一步增大,上下弦杆内力分布不均,主体结构中纵横向立体桁架交点受力复杂;同时主体结构的厚跨比减小,整体刚度下降,稳定性问题将更加突出。为改善巨型网格结构的受力性能,提高其刚度与稳定性,进一步增强结构跨越能力,通过引入预应力体系形成了拉索预应力巨型网格结构体系。通过拉索和撑杆的合理

布置及预应力大小的调节,充分利用拉索的轻质高强性能,刚柔体系有机组合势必将有效减轻结构自重,改善结构受力性能,控制结构变形和提高结构承载力,从而使巨型网格结构的跨越能力进一步提升。因此,拉索预应力巨型网格结构体系的提出与研究具有重要的理论意义与应用价值。

依据不同的巨型网格结构形式及布索机理,笔者及课题组近年来提出了以下几种拉索预应力巨型网格结构具体形式。

1.1 拉索预应力柱面巨型网格结构

竖向均布荷载作用下,巨型网格结构在子结构共同承载情况下也可能发生平面内失稳,且失稳模态与单榀桁架拱的屈曲模态类似,为主体结构中中部凹陷,两侧向外凸出,呈 3 个半波形式。因此,当按照结构屈曲时的变形特征,将撑杆和预应力拉索适当地布置在结构失稳时的 3 个半波范围内,撑杆作用于立体桁架屈曲时位移较大点处,预应力索杆体系对桁架拱而言相当于弹性支承,能较好地约束相应部位的变形,从而使结构变形、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,并进一步提高巨型网格结构的跨越能力。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^[14-15]。

1.2 张弦柱面巨型网格结构

张弦梁结构^[12-13]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,提出了张弦巨型柱面网格结构,其结构具体形式如图 2 所示^[16-17]。下部的空间预应力索杆体系如同在巨型网格结构的下部形成一个加强层,增加了桁架拱结构的等效高度,可有效地提高结构的等效刚度,改善结构的受力性能。

1.3 拉索预应力球面巨型网格结构

对球面巨型网格结构而言,主体结构为主要的受力构件。同时,在竖向荷载作用下环向边缘杆件也将承受很大的拉力,拉伸变形也是网格结构产生挠度的一个方面。因此,布索应选择在主体结构受力敏感区域,使结构在预应力作用下出现大量的卸载杆和少量的增载杆或中性杆,从而最大限度地改善结构的受力性能。同时也要兼顾到布索对结构净

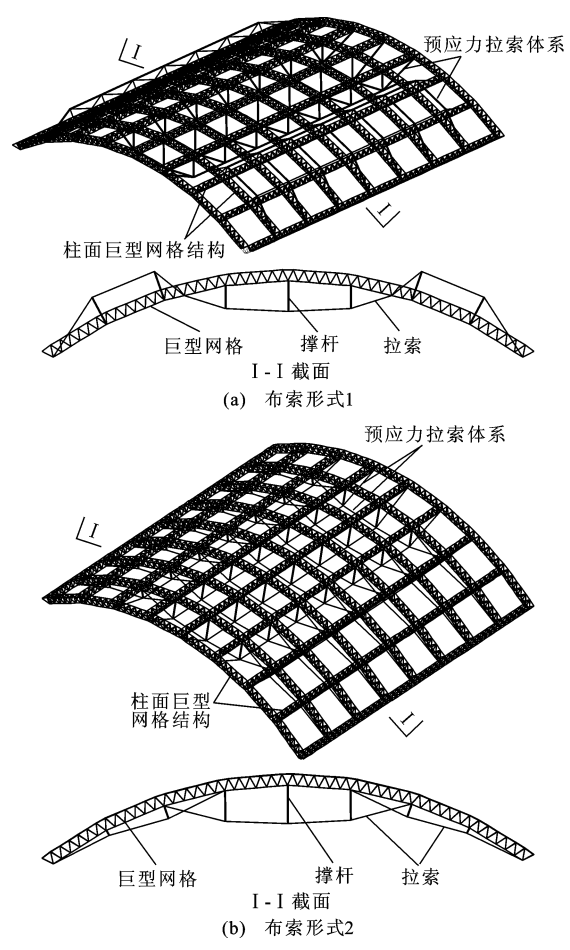


图 1 拉索预应力柱面巨型网格结构

Fig. 1 Prestressed Cylindrical Reticulated Mega-structure

使径向构件产生向上的变形来抵消竖向荷载作用下的向下变形,明显改善径向杆件的受力性能;若沿环向边缘构件的切向布置高强拉索并施加预应力,使网格结构出现内收现象,在中部产生向上的反拱也可抵消竖向荷载作用下的变形,限制环向边缘构件的拉伸变形。基于上述考虑,提出了拉索预应力球面巨型网格结构^[18]及如图 3 中所示的几种具体布索形式。

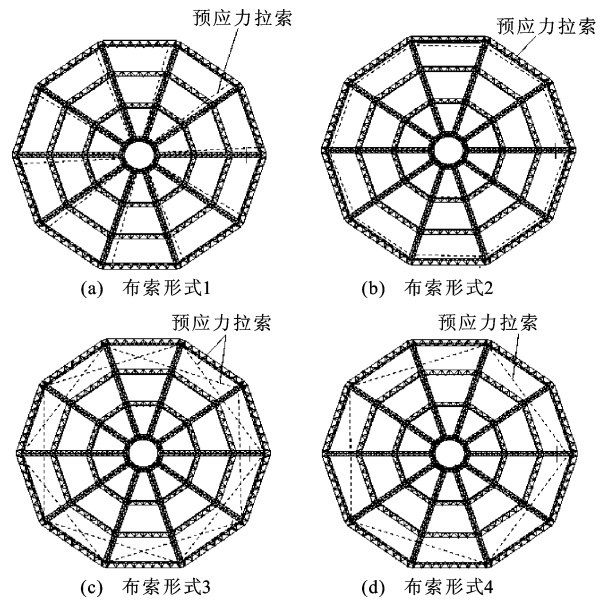


图 3 拉索预应力球面巨型网格结构

Fig. 3 Prestressed Spherical Reticulated Mega-structure

2 拉索预应力巨型网格结构研究现状

作为一种全新的刚柔体系组合的超大跨度空间结构体系,拉索预应力巨型网格结构体系提出的时间较短,相关的理论研究也还处于初步阶段,还很少应用于工程实例中。近年来,笔者及其课题组对以上提出的 3 种拉索预应力巨型网格结构进行了分析研究,取得了一些成果,主要包括以下几个方面。

2.1 静力及稳定性能

如前所述,随着结构跨度的增大,巨型网格结构也会存在稳定性问题;另一方面,引入预应力体系后,巨型网格结构体系的受力性能势必将发生较大的改善。为探究预应力体系对巨型网格结构受力性能的影响,笔者对不同形式的拉索预应力巨型网格结构静力及稳定性进行了研究^[15,17-18]。

首先,以各项静力性能指标为依据,通过大规模的参数分析,研究了矢跨比、桁架梁高度、撑杆长度、预应力大小等关键结构参数的变化对结构静力及稳定性的影响,并得到了拉索预应力结构的静力及稳

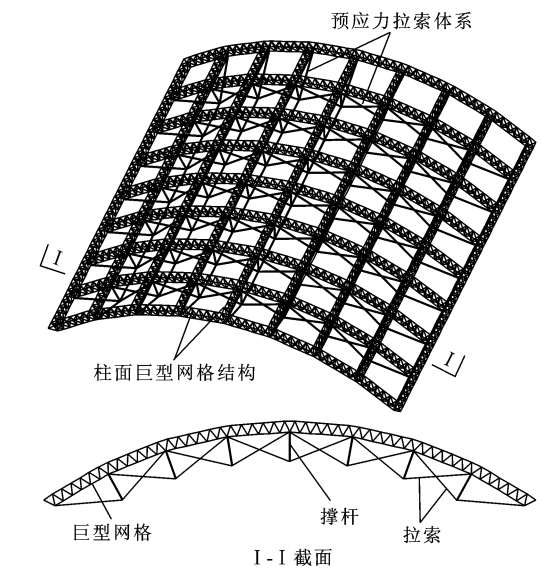


图 2 张弦柱面巨型网格结构

Fig. 2 String Cylindrical Reticulated Mega-structure

空的影响。基于球面巨型网格结构的形式特点,一般采用廓外布索形式,预应力索可沿结构径向或环向布置。若在径向构件下布置高强拉索,预应力可

定性能随以上参数变化的规律。研究结果表明,基于不同原理提出的各种布索形式均能较好地改善巨型网格结构的受力性能,验证了提出的各种拉索体系布置的合理性及有效性。通过大规模的参数分析,得到了各结构参数的合理取值范围,并给出了一些结构布置建议,可为实际工程设计提供一定的依据。对图 1(a)中按屈曲变形模式布置拉索预应力体系的巨型网格结构而言,主体结构的最优矢跨比为 1/10~1/6,且在此区间内,矢跨比越小,预应力体系对巨型网格结构的刚度和稳定性提高作用越明显;对图 2 中所示的张弦柱面巨型网格结构,主体结构的矢跨比宜取 1/6~1/5。对于上述 2 种结构形式,增大主体结构立体桁架梁的高度虽然可以提高受力性能,但拉索预应力的增强效果却减弱,为保证预应力的增强效果,主体结构桁架梁不宜过高;同时,合理的预应力可显著提高结构的受力性能,过大的预应力会导致杆件内力过大及降低预应力对稳定性效率的提高效率。对拉索预应力柱面巨型网格结构

表 1 不同几何参数下拉索预应力柱面巨型网格结构最优预应力及预应力比例

Tab. 1 Optimum Prestress and Proportions of Prestressed Cylindrical Reticulated Mega-structures with Different Geometric Parameters

跨度/m	$\lambda=1/4$		$\lambda=1/5$		$\lambda=1/6$		$\lambda=1/8$		$\lambda=1/10$	
	最优预应力/ kN	预应力 比例	最优预应力/ kN	预应力 比例	最优预应力/ kN	预应力 比例	最优预应力/ kN	预应力 比例	最优预应力/ kN	预应力 比例
120	600	1 : 1	600	1 : 1	750	1.5 : 1	900	1.5 : 1	900	1.5 : 1
140	350	1 : 1	400	1 : 2	600	1 : 1.5	600	1.5 : 1	850	2 : 1
160	450	1 : 1.5	650	1 : 1	650	1.5 : 1	800	2 : 1	1 000	1.5 : 1
180	500	1 : 1	450	1 : 1.5	600	1.5 : 1	550	2 : 1	700	2 : 1

对比分析了半跨与全跨荷载作用下的稳定性能。对于拉索预应力和张弦柱面巨型网格结构而言,结构对不对称荷载作用比较敏感,半跨荷载作用将会降低结构的稳定性,但预应力体系的引入会降低结构对不对称荷载作用的敏感性,明显提高结构在半跨荷载作用下的稳定性;不对称荷载对拉索预应力球面巨型网壳稳定性影响则较小。

2.2 基于静力性能的结构优化分析

对拉索预应力球面巨型网格结构进行了基于静力性能的优化^[19],提出对拉索预应力、立体桁架梁高度、主体结构杆件截面的三级优化分析方法,对各变量分别采用不同的目标和方法进行逐级优化:优化拉索预应力时,以结构杆件内力的平方和最小为目标函数并运用复形法和影响矩阵线性优化法求解;对立体桁架梁高度的优化则通过结构内力峰值和挠度比 2 项指标予以确定;对杆件截面优化则以结构自重为目标函数并采用满应力法求解。研究发

而言,当柱面网格主体结构拱向网格数为偶数时,撑杆应由跨中向两侧布置,这样撑杆为奇数,且长度逐渐减小,同时保证跨中部分的拉索预应力范围超过总跨度的 1/2,此种布置形式可以通过较小的预应力来更有效地约束跨中的下凹变形,提高结构的整体刚度,从而有效地改善结构的静力性能和增强结构的稳定承载力;张弦柱面巨型网格结构合理的撑杆长度宜取 4~8 m,此时预应力效果最佳。

着重分析了结构跨中拉索预应力的大小及其与两侧拉索中预应力的比值对结构稳定性能的影响。增大预应力值可大幅度提高结构的刚度及稳定承载力,但并非越大越好,而是存在较优的预应力值及预应力分布。通过大规模的试算,得到不同结构跨度、不同矢跨比下各种拉索预应力巨型网格结构的最优预应力值及最佳预应力分布。表 1 中给出了不同结构跨度和矢跨比 λ 的拉索预应力柱面巨型网格结构[图 1(a)]最佳跨中拉索预应力大小及其与两侧拉索中预应力的比例,可供实际工程参考。

现,沿环向布索的静力能够较好地改善球面巨型网格结构的静力性能;立体桁架梁高度对预应力作用效果影响明显;相比于传统的全局优化方法,三级优化能以较少的计算量、较高的计算效率使预应力的作用效果、结构受力性能等均达到最佳。沿环向布索可以使结构的用钢率得到较大幅度的降低,表 2 给出了图 3(c)中所示的环向布索球面巨型网格结构在未布索、布索不施加预应力、有预应力拉索 3 种情况下优化用钢量的对比。由表 2 可以看出:在球面巨型网格结构中,布索和施加预应力明显降低了结构的用钢量。

2.3 施工张拉索力计算及张拉全过程分析

为达到结构设计中预定的预应力状态,实际工程中通常对预应力结构采取分阶段分批次张拉来施加预应力,以提高预应力索的使用效率。由于施工、结构构件误差等多种客观因素的影响,常使施加的预应力出现偏差,与设计预应力不符,需要反复调

表 2 3 种情况下拉索预应力球面巨型网格结构用钢量对比

Tab. 2 Comparison of Steel Amounts in Prestressed Spherical Reticulated Mega-structure Under Three Conditions

无拉索		有拉索无预应力		有拉索施加预应力	
最优自重/kg	钢材节省比例/%	最优自重/kg	钢材节省比例/%	最优自重/kg	钢材节省比例/%
489 520	0	472 387	3. 5	412 665	15. 7

整,因此施工预应力索力的计算和张拉是一个十分复杂的过程。以图 3(c)中拉索预应力球面巨型网格结构为例,提出了一种拉索预应力巨型网格结构中预应力索张拉施工过程中索力的计算方法,用以提高索张拉施工的效率;同时对张拉过程中结构杆件内力和最大位移等进行了全过程跟踪分析^[20]。研究表明,该方法仅需要少量次数的迭代计算,通过不断减小拉索实际张力与目标张力的差值便可求解各索在张拉过程中应该产生的初始应变,最后只要利用计算结果并按照预定的张拉顺序张拉预应力索,经过 1 次张拉就能达到各自的目标张力值,施工精度高,且无需反复调整,可大幅度提高施工效率。同时,在预应力索张拉过程中,结构的刚度和受力不断发生变化,有必要对预应力张拉进行施工全过程模拟跟踪分析。

2.4 动力特性研究

通过模态分析方法对图 2 中张弦柱面巨型网格结构动力特性进行了研究^[21],包括对主体结构单独承载和子结构协同承载 2 种情况下结构前 12 阶自振周期及相应振型进行了比较,并对子结构协同承载和主体结构单独承载 2 种承载形式下结构首阶各向振型的出现次序及相应自振周期进行了主体结构矢跨比、桁架梁高度、撑杆长度、预应力大小等一系列参数分析,探究了这些参数变化对张弦柱面巨型网格结构各方向刚度的影响。分析结果表明:主体结构单独承载时结构的纵向刚度最弱,子结构的引入能够极大地增强结构水平、纵向刚度,但预应力体系对结构纵向刚度无明显改善;子结构协同承载时,预应力体系的引入可以显著提高结构的拱向及竖向刚度。为保证预应力体系对结构竖向刚度的提高效果,主体结构矢跨比应取较大值,且桁架梁高度的取值不宜过大。

3 拉索预应力巨型网格结构体系研究展望

为进一步改善巨型网格结构的受力性能,提高其跨越能力,笔者及其课题组提出了拉索预应力巨型网格结构体系。已有的研究表明,拉索预应力巨型网格结构体系是一种经济、合理、性能优越的

结构体系,但目前的相关研究还处于起步阶段,要达到全面推广应用此类新型结构体系的目标,尚有许多理论问题和结构关键技术有待于深入研究,如全面掌握结构的受力性能、结构细部构造等。具体可从以下几方面进行深入研究:

(1)在已有拉索预应力巨型网格结构形式下,进一步对不同结构形式相互结合、改良现有结构形式等方面进行探索;不同布索方案的研究;不同曲面形式的拉索预应力巨型网格结构,如倒悬链面、抛物面等;预应力体系与巨型网格主体结构的合理连接形式;支座的合理设置。

(2)拉索预应力巨型网格结构体系复杂,计算费时,效率低下。可进一步探究其简化分析方法和等效简化模型,如连续或者半连续化模型。

(3)拉索预应力巨型网格结构体系受力性能和失稳机理研究:风荷载、地震作用等动力荷载作用下受力性能研究;强震、风振、冲击荷载等作用下结构的强度破坏、动力失稳机理;结构振动、减震、稳定控制实用措施。

(4)结构设计理论研究:实用的结构稳定承载力计算公式及合理的安全系数取值;拉索预应力计算及结构找形分析方法;预应力及结构构件优化设计方法;抗震、抗风实用计算方法;主体结构、预应力拉索、撑杆及三者之间的连接细部构造方法;支座节点设计方法;计算机辅助软件的开发,如可视化建模、自动生成、计算分析、优化设计、后处理等;施工张拉全过程模拟分析。

(5)拉索预应力巨型网格结构施工技术研究:整体结构施工工艺流程分析;构件标准化制作及优化研究;构件工厂制作、运输、现场装配技术研究;现场预应力张拉控制技术分析;施工全过程监测技术研究。

4 结 语

拉索预应力巨型网格结构体系结合了巨型网格结构主次分明、传力路线明了的特点和预应力拉索轻质高强的优良性能,充分地发挥了刚性结构体系和柔性结构体系各自的受力优势,能较好地改善巨型网格结构的受力性能,并进一步提高结构的跨越

能力;同时也能大幅度地提高材料利用率,节约用钢量。因此拉索预应力巨型网格结构体系能够满足空间结构向超大跨度结构发展的需求。在现今空间结构飞速发展的阶段,随着中国经济的高速发展和国际地位的显著提升,为满足人们日益增长的物质文化需求和各种国际盛会的举办需求,必将会有大批超大跨度空间场馆的投入建设。因此,此种杂交结构体系必将有着良好的发展应用前景,是一种较理想的超大跨空间结构形式。

参考文献:

References:

- [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 Shi-lin, YAO Jian. The Future and Prospect of Latticed Shell Structures[J]. Spatial Structures, 1994, 1(1):3-10.
- [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 Shi-zhao. Development of Long-span Structures — A Review and Prospect[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3):5-14.
- [3] 董石麟. 空间结构的发展历史、创新、形式分类与实践应用[J]. 空间结构,2009,15(3):22-43.
DONG Shi-lin. The Development History, Innovation, Classification and Practical Application of Spatial Structures[J]. Spatial Structures, 2009, 15(3):22-43.
- [4] 李燕云,王斌兵,刘锡良. 超大跨度筒壳的理论研究[J]. 空间结构,1998,4(2):36-40.
LI Yan-yun, WANG Bin-bing, LIU Xi-liang. Theoretical Research of Super-span Barrel Vaults[J]. Spatial Structures, 1998, 4(2):36-40.
- [5] 贺拥军,周绪红,刘永健,等. 超大跨度巨型网格结构[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(3):25-29.
HE Yong-jun, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, et al. Super-span Reticulated Mega-structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3):25-29.
- [6] 贺拥军,周绪红,董石麟. 平板网架子结构圆柱面交叉立体桁架系巨型网格结构的研究[J]. 土木工程学报,2002,35(6):24-31.
HE Yong-jun, ZHOU Xu-hong, DONG Shi-lin. Research on Megastructure Braced with Substructures of Double Layer Grids[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(6):24-31.
- [7] 贺拥军,周绪红,董石麟. 叉筒网壳子结构圆柱面交叉立体桁架系巨型网格结构的稳定性研究[J]. 建筑结
构学报,2003,24(2):54-63.
HE Yong-jun, ZHOU Xu-hong, DONG Shi-lin. Research on Cylindrical Latticed Intersected Three-dimensional Beam System Reticulated Megastructure with Single Layer Latticed Intersected Cylindrical Shell Substructure[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(2):54-63.
- [8] 贺拥军,周绪红,董石麟. 膜型网壳结构巨型网格结构的整体与局部稳定性研究[J]. 土木工程学报,2005,38(2):13-21.
HE Yong-jun, ZHOU Xu-hong, DONG Shi-lin. Research on Overall and Local Stability of Reticulated Mega-structure with Single Layer Membranous Latticed Shell Substructure[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(2):13-21.
- [9] 贺拥军,李 佳,周绪红. 球面巨型网格结构的构成、支承方式与力学模型[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2007,34(3):11-14.
HE Yong-jun, LI Jia, ZHOU Xu-hong. Research on the Form, Support Styles and Mechanical Model of Spherical Reticulated Mega-structure[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 34(3):11-14.
- [10] 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):33-38,10.
BAI Zheng-xian, LIU Xi-liang, LI Yi-sheng. A New Type of Spatial Structure — Beam String Structure [J]. Spatial Structures, 2001, 7(2):33-38, 10.
- [11] 张毅刚. 张弦结构的十年(一)——张弦结构的概念及平面张弦结构的发展[J]. 工业建筑,2009,39(10):105-113.
ZHANG Yi-gang. Development of Cable-supported Structures in the Last Ten Years (1) — Concept of Cable-supported Structures and Development of Plane Cable-supported Structures [J]. Industrial Construction, 2009, 39(10):105-113.
- [12] SAITOH M, OKADA A. The Role of String in Hybrid String Structure [J]. Engineering Structures, 1999, 21(8):756-769.
- [13] SAITOH M, OKADA A, MAEJIMA K, et al. Study on Mechanical Characteristics of a Light-weight Complex Structure Composed of a Membrane and a Beam String Structure[C]//ABEL J F, LEONARD J W. Spatial, Lattice and Tension Structures. New York: ASCE, 1994:632-641.
- [14] 贺拥军,章小桐,周绪红. 拉索预应力折线型立体桁架拱布索方案研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2011,38(8):7-12.

- HE Yong-jun, ZHANG Xiao-tong, ZHOU Xu-hong. Research on the Arrangement Styles of Cables for Pretensioned Folded Line Type 3D-trussed Arch[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(8): 7-12.
- [15] 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.
- [16] 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 Yong-jun, SUN Xuan, ZHOU Xu-hong. Research on Cable-strut Arrangement of String Reticulated Mega-structure [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(5): 8-13.
- [17] HE Y J, SUN X, WANG J X, et al. The Elastic Static Property and Stability of String Cylindrical Reticulated Mega-structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 20-29.
- [18] HE Y J, ZHOU X H, ZHANG Y F. Research on Stability of Pretensioned Spherical Reticulated Mega-structure[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351-352: 704-707.
- [19] 贺拥军, 周佳伟, 周绪红. 拉索预应力球面巨型网格结构静力性能优化分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(3): 7-12.
- HE Yong-jun, ZHOU Jia-wei, ZHOU Xu-hong. Optimizing Analysis of the Static Behaviors of Pretensioned Spherical Reticulated Mega-structure[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010, 37(3): 7-12.
- [20] 贺拥军, 周绪红, 周佳伟. 拉索预应力空间网格结构的索张力计算及张拉全过程分析[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 223-229.
- HE Yong-jun, ZHOU Xu-hong, ZHOU Jia-wei. Pretensioning Calculation and Whole-process Analysis of Prestressed Space Reticulated Structure[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(2): 223-229.
- [21] 贺拥军, 孙 轩, 周绪红. 张弦巨型网格结构动力特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(5): 737-743, 750.
- HE Yong-jun, SUN Xuan, ZHOU Xu-hong. Research on Dynamic Performance of String Reticulated Mega-structure[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(5): 737-743, 750.