

文章编号:1673-2049(2005)03-0025-05

超大跨度巨型网格结构

贺拥军¹,周绪红²,刘永健³,董石麟⁴,李 佳¹

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082; 2. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061;
3. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 4. 浙江大学 空间结构研究中心,浙江 杭州 310027)

摘 要:叙述了研究与开发超大跨度结构的必然性与必要性,介绍了适应这一需要而提出的巨型网格结构体系的结构构成形式与特点;回顾了巨型网格结构的研究状况,包括部分类型结构的适宜跨度、静力与稳定性、动力与地震响应特性及结构简化分析方法等;总结了该体系结构设计的合理参数选择、进行抗震验算所需考虑的地震波作用方向及组合维数、用振型分解反应谱法进行抗震验算所需的振型阶数等。最后指出了巨型网格结构体系研究的关键问题和今后的研究方向。

关键词:超大跨度;巨型网格结构;结构体系;研究现状;展望;稳定性

中图分类号:TU356 **文献标志码:**A

Super-span reticulated mega-structure

HE Yong-jun¹, ZHOU Xu-hong², LIU Yong-jian³, DONG Shi-lin⁴, LI Jia¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
4. Space Structure Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The necessity of research and development on super-span structures was described. The form and characteristic of the reticulated mega-structure that met need were introduced. Authors reviewed the research status on the reticulated mega-structure, including suitable spans, statics and stability, dynamic and seismic response traits, and simplified analysis methods for some types of reticulated mega-structure. Some results were summarized, including reasonable form parameters of the structure, the reasonable required components of seismic loads for seismic design and reasonable vibration modes combination of vibration mode-decomposition-response-spectra method. Finally, the key and trend of the research on reticulated mega-structure were pointed out.

Key words: super-span; reticulated mega-structure; structure system; research status; prospect; stability

0 引 言

随着社会经济的发展、人类生活水平的提高,不断对空间结构提出了各种各样的要求,其中最主要的就是增大结构的跨度,向超大跨度结构发展^[1,2]。

各种国际性的体育盛会、展览会等都要求场馆跨度过大,其中在设计方面,要求新颖美观、具有国际一流的建筑与结构方案;在施工方面,要求高质量、高速度地建造竣工。日本巴组铁工所提出了“超大跨度时代已至,着眼未来的巴组式新环境空间的设想”,

收稿日期:2005-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(50508013);湖南省自然科学基金项目(02JJY3011)

作者简介:贺拥军(1970-),男,湖南宁乡人,湖南大学副教授,工学博士,博士后。E-mail:hyj0087@163.com

并提出了跨度分别为 200、500、1 000 m 的网壳穹顶蓝图。其中跨度 500 m 为全天候多功能体育、娱乐活动场所;跨度 1 000 m 是创造理想的未来城市,体现工作、居住、娱乐一体化的日常生活环境^[3]。而单一形式的空间网格结构随着跨度的增大,其受力性能的不合理性也逐渐突出,为此,各国科技工作者一直在进行不懈的努力,寻求改善结构体系的受力性能的方法。近年来出现了一些应用于超大跨度建筑体的非单一结构形式,如整体张拉结构体系、杂交结构体系等。整体张拉结构是由一组互相独立的受压杆与一套连续的受拉索构成的空间结构,它能最大限度地利用材料的性能,以最少的材料建造大跨度空间结构,是目前国际上正在研究并逐步推广的一种新型结构体系;杂交结构是将不同类型的结构进行组合而得到的,如弦支网壳结构^[4]、张弦梁结构、斜拉结构等,它能进一步发挥不同类型结构的优点,可更合理、更经济地跨越大空间。大跨度空间结构的技术水平是一个国家建筑业水平的重要衡量标准,世界各国对大跨度空间结构技术的发展,特别是对新型大跨度空间结构体系的研究开发和工程应用一直给予高度的重视。中国大跨度空间结构的技术水平在近年也得到了长足发展^[1,2,5],但与国际先进水平相比,还存在一定差距,主要表现在结构形式还比较拘谨,新颖的建筑构思与先进的结构创新之间尚缺乏理想的有机结合,尤其是 150 m 以上的超大跨度空间结构的工程实例还比较少。

1 巨型网络结构的构成形式与特点

网壳结构一般有单层与双层之分,对于极大多数的单层网壳结构,其承载能力是由结构稳定性控制的,远未发挥出材料的应有强度。因此对大、中跨度结构,目前多采用双层网壳结构,以避免结构失稳的发生。随着跨度的进一步加大,网格小时,网格密度大,双层网壳也会有因厚跨比太小而引起的整体稳定问题。李燕云等^[6]对 200 m 跨度圆柱面网壳结构进行过双层与 3 层的对比分析研究并指出,对超大跨度网壳来说,已属多层结构,再增加层数对提高结构整体工作性能的作用并不明显,采用多层形式以突破内力的限制来增加网壳的跨度是不可行的。结构设计任务从某种意义上说就是力流的引导,一个好的结构布局应该是构件主次分明、传力路线简短明了。实际结构中应包含两类构件:①主要构件,它们布置在载荷传递路线较短的位置上,若这类构件失效,结构往往不能再承受设计载荷;②次要构

件,这些构件的布置主要是维持结构外形、传递局部载荷、增强局部刚度等。巨型网络结构体系正是根据这些原则,受高层巨型结构体系^[7]的启发而提出的,其基本构成方式为:首先形成大网格结构,构成大网格的构件即为结构主构件,须对它们进行特别加强,大网格结构可以是由组合杆组成的巨型杆系结构,也可由立体桁架交叉而成的立体桁架梁系结构;然后在大网格内布置小网格结构,可以是双层小网架,也可以是单层网壳。这样就可使单一网络结构体系变为双重结构体系,其中第一级为大网格结构体系,称之为主体结构,主要承担结构载荷并将其传递至支承结构;第二级为普通网络结构,称之为子结构,布置于主体结构的大网格中,承受大网格范围内的屋面载荷并将它们传递至主体结构上,从而形成大网格套小网格的结构形式,如图 1~4 所示。

巨型网络结构的整体载荷由相对比较稀疏、宏大的主体骨架承担,虽然主体结构杆件内力大,但它的构件并非普通单一杆件,而是组合杆或立体桁架梁,完全可以避免单杆过长而内力过大的现象。大量的子结构主要承担局部载荷,且跨度小,杆件完全可能按构造要求来设置,可以采用单层网壳形式,这样必然可大幅度降低用钢量,在结构跨度要求越来越大的今天,其研究与应用意义是显而易见的。

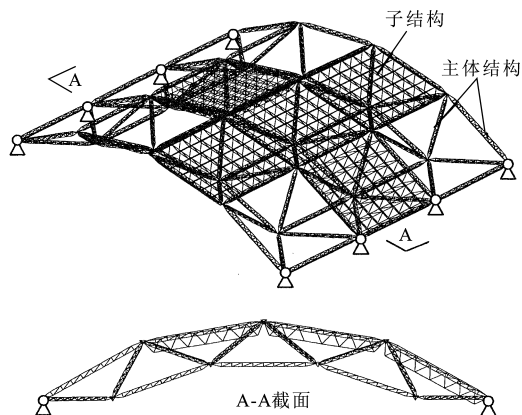


图 1 双层平板网架子结构圆柱面组合杆系巨型网络结构

Fig. 1 Cylindrical latticed-composite-member-system reticulated mega-structure with double layer grid substructures

2 巨型网络结构的研究现状

巨型网络结构可以说是一种全新的结构体系,除早年的日本宇都体育馆、墨西哥城体育馆、中国深圳机场候机大厅等少数工程类似外(其跨度规模相对较小),还很少应用于工程实际中,也未见关于这方面理论研究的文献。近年来,笔者及其课题组对

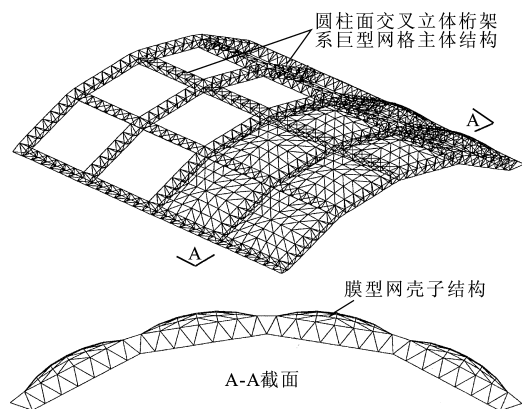


图 2 单层膜型网壳子结构圆柱面交叉立体桁架系巨型网络结构

Fig. 2 Cylindrical latticed intersected 3D beam system reticulated mega-structure with single layer latticed membranous shell substructures

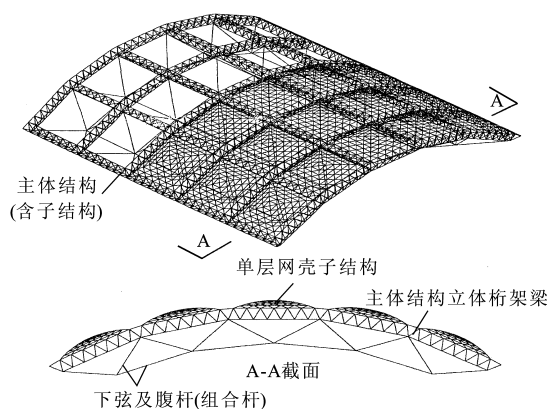


图 3 单层叉筒网壳子结构圆柱面混复合型巨型网络结构

Fig. 3 Cylindrical mixed reticulated mega-structure with single layer latticed intersected cylindrical shell substructures

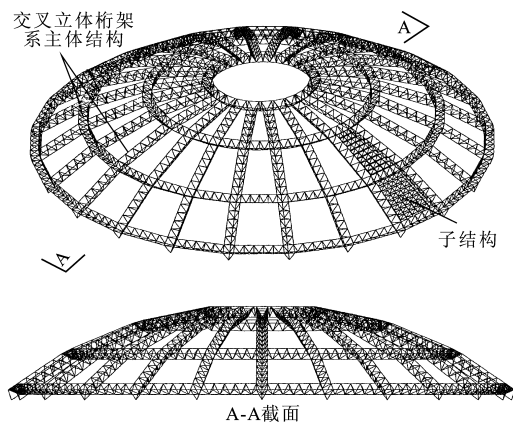


图 4 交叉立体桁架系球面巨型网络结构

Fig. 4 Spherical latticed intersected 3D beam system reticulated mega-structure

圆柱面巨型网络结构进行了一定程度的分析研究,

取得了一定的成果,主要包括 4 个方面。

2.1 圆柱面结构适宜跨度

双层圆柱面组合杆系巨型网络结构,采用两种形式比较合适:①子结构独立布置在主体结构大节点上,不考虑两者的协同承载,记为巨型网壳 1;②子结构铰连布置,主体结构不设上弦杆,考虑两者的协同承载,记为巨型网壳 2。笔者在文献[4]中对不同跨度的圆柱面网壳采用这两种巨型结构进行了优化计算并与普通网壳形式进行对比,结构上表层承受 1 kN/m^2 均布竖向载荷。图 5 描述了不同结构的用钢量随跨度的变化关系,可以看出:3 种形式的结构用钢量均随跨度的增大而增大,其中普通网壳结构的生长速度最快。在结构跨度小于 200 m 时,普通网壳结构的用钢量小于巨型结构;而跨度大于 200 m 时,普通网壳的用钢量变得迅速大于巨型网络结构;跨度超过 280 m 时,巨型网壳 2 的用钢量比巨型网壳 1 的大。因此,从经济角度考虑,在跨度小于 200 m 时应采用普通网壳结构;跨度大于 200 m 而小于 280 m 时应采用子结构铰连布置、主体结构不设上弦杆的巨型网络结构,考虑两者的协同承载;跨度大于 280 m 时应采用子结构独立布置的巨型网络结构,而不考虑两者的协同承载。

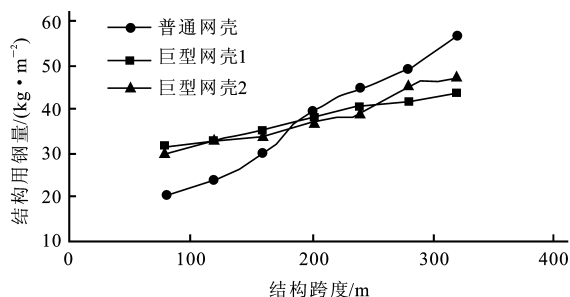


图 5 结构用钢量随跨度的变化关系

Fig. 5 Relation of steel weight vs span of structure

2.2 结构的静力与稳定性

圆柱面交叉立体桁架系巨型网络主体结构,而立体桁架梁本身是双层的网壳结构,但从全局的角度来看它仍是一个单层梁系网壳结构,因此主体结构仍存在稳定性问题。大网格内子结构可采用双层平板网架或单层网壳,当采用双层网架时,子结构不存在稳定性问题;而采用单层网壳时,子结构局部存在稳定性问题。笔者在文献[8]~[10]中分别对两种不同子结构情况进行了静力与稳定性研究。

首先着重分析了整个结构的稳定性能、失稳形式(局部失稳与整体失稳),并进行一系列的参数分析,研究了各参数及不同支承方式对结构的失稳形

式及极限载荷的影响。研究发现:主体结构两纵边上、下弦固定铰支,两端自由是最佳的支承方式;大网格尺寸宜取 20 m 左右;对单层网壳子结构情况,子结构的矢跨比宜取 $1/10 \sim 1/6$,主体结构矢跨比宜取 $1/6 \sim 1/5$,当主体结构的矢跨比较大时,子结构矢跨比应取小值,而主体结构矢跨比较小时,子结构矢跨比应取大值;对平板网架子结构情况,主体结构矢跨比不宜过小。

其次找出了不同跨度结构在整体与局部失稳临界状态下某些参数的取值规律,为设计时确保结构在各种载荷条件下不出现整体失稳提供了选择依据。当结构跨度较小时,立体桁架梁高度与杆件截面取较小值就能使结构以子结构首先屈曲而达到极限状态;随着结构跨度的增大,为保证结构首先出现子结构失稳,立体桁架梁的高度与主体结构杆件截面的取值逐渐增大,当跨度不超过 160 m 时,立体桁架梁高度基本上保持在不超过 5 m 的常规范围内,杆件截面也不是太大;当跨度达到 200 m 时,为避免杆件截面过大,可采用再分式腹杆或 3 层立体桁架梁以加大立体桁架梁高度而提高主体结构稳定性。

2.3 结构动力特性与地震响应

笔者在文献[11]、[12]中研究了平板网架子结构与叉筒网壳子结构圆柱面交叉立体桁架系巨型网格结构的动力特性,包括主体结构单独承载及其与子结构协同承载两种情况下的自振频谱规律、结构前面若干低阶振型特征等;就各方向首阶振型的出现次序及其对应周期值进行了主体结构矢跨比、长跨比、立体桁架梁高度、平板网架子结构高度、网壳子结构矢跨比、杆件截面、载荷等一系列参数分析,从而了解了不同参数变化对结构各方向刚度的影响。研究发现:主体结构单独承载情况下,结构首阶振型为纵向水平振型,说明其水平纵向刚度最小;而在协同承载情况下,结构振动主要沿竖向及拱向,除了个别振型外其余振型均很少出现纵向振动位移分量,说明在子结构的充填作用下,巨型网格结构的纵向刚度变得最为强大。

笔者在文献[13]中采用振型分解反应谱法分析平板网架子结构巨型网格结构的地震响应特性,首先研究了主体结构立体桁架拱、纵向立体桁架、子结构杆件动内力及动、静内力比值的分布规律。然后采用振型分解反应谱法对该结构进行抗震验算时所需的振型阶数进行了研究,并研究了不同方向地震波作用对结构动内力的影响,了解了对该结构进行抗震验算所需考虑的地震波作用方向及组合维数。

最后以结构杆件动内力峰值为指标进行了一系列参数分析。主要结论有:

(1)作为整个结构的主要受力构件,立体桁架拱的上弦及中下部下弦杆件动、静内力比值基本保持在 0.1 以内,说明此结构的抗震性能是比较良好的。部分上弦斜杆、横杆、腹杆及纵向立体桁架梁内各杆动、静内力比值虽然相对比较大,但其动、静内力均很小,完全有可能按构造要求来选择截面。

(2)综合考虑主体结构子结构,在用振型分解反应谱法进行抗震计算时,整个结构考虑 9 阶振型,主要受力构件动内力误差在 5% 以内,基本可以满足要求;条件允许时取前 16 阶振型进行组合,主要受力构件动内力误差可达 1% 以内。

(3)在进行抗震验算时,一般应考虑三维地震波的作用;协同承载情况下,由于子结构腹杆动、静内力均相对较小,杆件按构造要求设置,材料强度仍可能很富余,可重点对主体结构及子结构弦杆进行抗震验算,此时可只需考虑水平拱向与竖向二维地震作用。

笔者在文献[14]中推导了大跨空间结构几何非线性地震响应时程分析的计算过程,并编制了相应的计算程序。然后对圆柱面交叉立体桁架系巨型网格结构地震响应进行了几何非线性时程分析。针对巨型网格结构存在主体结构单独承载及与子结构参与协同承载两种情况,首先分析了立体桁架拱内关键节点及关键杆件的地震响应时程曲线,了解结构的地震响应基本时程特性;然后对结构进行了不同方向地震波作用下的时程对比分析;最后将振型分解为反应谱法与时程法两种结果进行了对比分析。研究发现:作为主要受力构件,立体桁架内不同位置杆件对不同方向地震波响应情况不同;该结构抗震验算需考虑三维地震作用;对于巨型网格结构,反应谱法可用作初步的抗震分析,最终还需用时程法进行验算。

2.4 结构简化分析方法

笔者在文献[15]中针对交叉立体桁架系巨型网格结构杆件节点多、计算工作量大的特点,提出了超级有限元与子结构相结合的简化求解方法:采用 3 节点立体桁架超级元来处理主体结构中的立体桁架,用子结构法来处理大网格内的子结构。文中推导了超级元刚度矩阵及子结构参与协同承载时对整体结构的刚度贡献。经编程对比计算分析表明:该法计算精度高,误差基本保持在 5% 以内,计算工作量较完全有限元法明显降低,且可考虑子结构的参与协同承载,是分析巨型网格结构的一种比较优越

的方法。

3 巨型网格结构体系的研究展望

巨型网格结构体系是一种经济、合理、适用、性能优越的结构体系,但要达到工程应用的目的,还有许多理论问题和关键技术必须解决,如主体结构节点的构造与受力性能等。具体可从5个方面进行研究:

(1)在已有研究的基础上,进一步完善巨型网格结构的形体分析:①不同曲面形式(球面、椭圆抛物面)主体结构的合理形式与构成及支承方式;②不同主体结构大网格内子结构的合理形式;③主体结构与子结构的合理组合及两者之间的连接方式。

(2)研究巨型网格结构的满足精度要求的简化分析模型,如连续化或半连续、半离散化模型。

(3)巨型网格结构受力性能和破坏机理研究:①非线性抗风性能研究;②结构破坏机理研究,包括强度、地震、风振与失稳破坏机理,整体失稳与局部失稳的关系;③抗震、抗风、稳定实用控制技术。

(4)结构的设计理论研究:①考虑空间作用及两者协同承载的实用分析与设计方法;②结构形体及构件优化设计方法;③结构非线性抗震、抗风实用分析方法;④主体结构、子结构及两者之间的连接构造方法研究,包括节点连接形式及其计算方法、超大尺寸焊接球节点的受力性能;⑤结构计算机辅助设计系统的开发,包括可视化建模(前处理)、标准巨型网格结构模型的自动生成、结构计算分析、后处理、施工图绘制。

(5)巨型网格结构的施工技术研究:①构件标准化制作程序优化研究;②钢构件标准化运输单元体系研究;③构件或连接件的工厂制作、现场装配技术研究;④标准构件现场吊装装配方案优化设计研究。

4 结 语

巨型网格结构能满足空间结构向超大跨度发展的需要,而且内力传递路径简单、明确,受力性能良好,能充分发挥材料性能,同时能节省用钢量。因此,在空间结构迅速发展、超大跨度建筑结构时代即将到来之际,又逢中国奥运会与世界博览会申办成功,急需大量场馆建设,同时,随着中国经济的发展与国际地位的提高,各种形式的国际性盛会定会陆续在中国举行,一流的场馆建设必不可少,因此该结构体系必定有着很好的应用前景,是未来超大跨度空间结构的理想形式。

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.
- [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.
- [3] 尹德钰,刘维善,钱若军.网壳结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [4] 贺拥军,周绪红,董石麟.圆柱面杆系巨型网格结构的计算方法与优化分析[J].建筑结构学报,2001,22(5):53—58.
- [5] 董石麟,赵 阳,周 岱.我国空间钢结构发展中的新技术、新结构[J].土木工程学报,1998,31(6):3—14.
- [6] 李燕云,王斌兵.超大跨度筒壳的理论研究[J].空间结构,1998,5(2):36—40.
- [7] 郑廷根,付光耀.国外巨型钢结构工程实例与启示[J].钢结构,1999,14(2):49—53.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 贺拥军,周绪红,董石麟.膜型网壳子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.
- [11] 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动力特性研究[J].建筑科学,2003,19(5):10—15.
- [12] HE Yong-jun, ZHOU Xu-hong, DONG Shi-lin. Research on dynamic property of cylindrical latticed intersected 3D beam system reticulated mega-structure with single layer latticed shell substructure[A]. Proceedings of the Eighth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts[C]. Beijing: Science Press, 2004. 785—791.
- [13] HE Y J, ZHOU X H, DONG S L, LI J. Research on seismic response property of cylindrical latticed-intersected-three-dimensional-beam-system reticulated mega-structure with double layer grid sub-structures[A]. Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'05) [C]. Oxford: Elsevier Ltd, 2005. 1 229—1 234.
- [14] 贺拥军,周绪红,董石麟.圆柱面巨型网格结构地震响应时程分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2005,32(3):41—46.
- [15] 贺拥军,周绪红,董石麟.交叉立体桁架系巨型网格结构的超级元与子结构相结合计算法地震响应时程分析[J].工程力学,2005,22(3):5—10.