

网状空间结构的造型和透型

胡学仁

网状空间结构的造型和选型

胡学仁

(同济大学)

提 要

本文叙述网格(网壳、网架)和索网结构在型体理论方面的发展,介绍设计、生产的流程图,论述任意曲面网状结构建造的可能性。论述对自然造型研究的意义,植物的叶型、花型对大跨度建筑的启示,索网和网壳结构的关系。最后根据我国生产技术条件,发展网状结构和合理选择型体提出建议。

一、近年来网状空间结构型体理论的发展

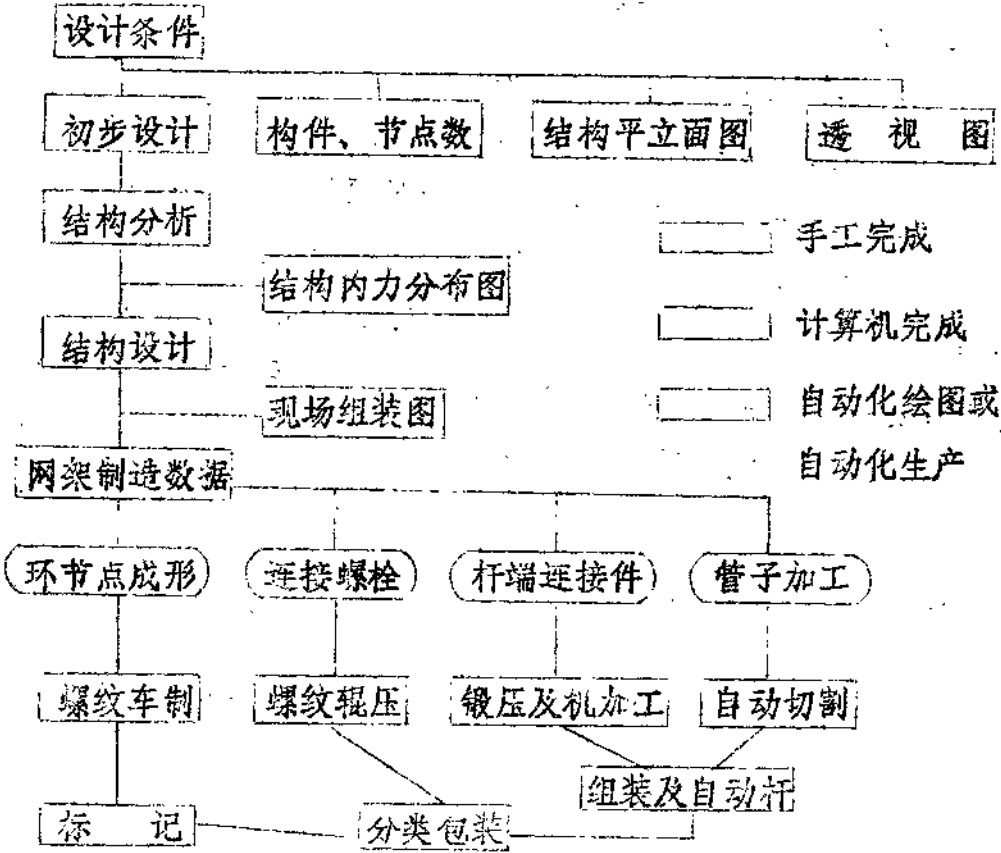
在选择大跨度和大空间建筑的型体时,各种网状空间结构,如网格(网壳和网架)和索网结构,由于能较好地满足建筑功能要求,具有优美的建筑造型,同时能充分发挥材料强度和取得合理的经济效益,因此这些结构已经成为空间结构中最流行的建筑型体。

网格结构中,以平板式网架应用最多,各类穹顶网壳、柱型网壳和鞍形网壳等也都建造过大量型体优美、经济合理的建筑。这类平面和曲面的网格结构若采用合理组合的方法以后,还可发展出更多型体〔1〕、〔6〕。然而对想象力丰富的建筑师来说,常常还会感到不敷其造型或选型的应用。他们希望更自由地创造型体,摆脱目前一些常规的平面或典型的曲面,以达到更理想的程度。

相当长一段时间内,即使有些合理的建筑方面提出的要求,也常常难以满足。因为首先遇到结构分析上的困难。工程师对非典型的曲面、不规则的边界,或遇有复杂荷载时,用解析的方法分析其

内力，有可能会束手无策。只有近代计算技术足够发展的条件下，壳体结构离散成足够多的块体，其结点位置也可任意选择，因此已经具备计算任意型体薄壳的条件；网格结构采用刚接或铰接杆系结构分析理论，其精确的内力一般也都可迎刃而解，剩下的问题可能是某些类型的网壳还必需进行稳定性的校核。

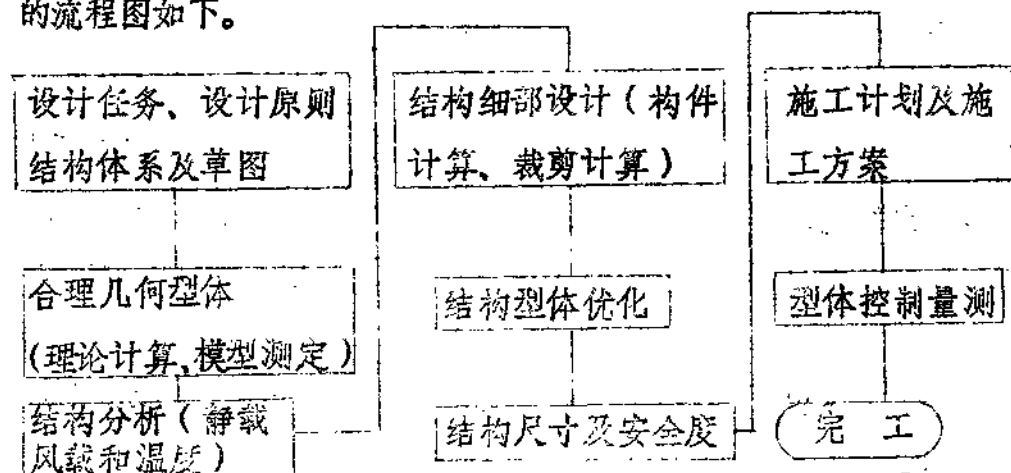
其次遇到的是施工构造上的困难。各种曲面的网壳，特别是一些不能展开的曲面，用杆系来组合时会出现数量庞大的不规则构件，构件长度，节点方向角，屋面上的围护构件等尺寸各不相同，使制造和施工十分麻烦。近代生产自动化的发展对网状结构制造厂也得到显著的成效。下图表示网格结构采用自动化生产以后的流程图（2）。



由图可知，在设计过程中，已经把网格制造资料自动记录在磁带上，制造时以此移放到相应的螺栓球车床上，就自动车制出精确的角度，在管子切割机上切出精确的长度，再进行管端连接件的连接等，最后各自进行标记，装运等。因此一个结构即使构件、节点数千种，也不致发生生产上的错误〔2〕。

索网结构优美的型体对建筑师具有很大的吸引力。然而索网结构并不象网格结构那样可以自由地选型。柔性的索网只能在一定的边界支承，一定的予张力和一定方向的荷载下才能成为几何形状不变，具有相当刚性的曲面结构，其形状确定要比常规的结构复杂得多。

直到60年代末，虽然不少大型索网结构已经建造成功，但是还没有其型体计算精确方法，甚至也有认为是不可能的〔4〕，工程设计中，型体主要凭藉试验（尺寸1:75，至1:200）。建成的索网结构中残留着大量的花篮螺丝，施工时确定形体的困难是可想而知的。经过20多年努力，索网结构型体的计算也已取得相当成功。确定其荷载和变位关系的力集度法被认为是一种有效方法〔4〕。结合结构优化理论、复盖材料的裁剪理论、新的测量技术和仪表的创造和应用，使这类结构发展到新的阶段。当今网索结构设计和施工的流程图如下。



索网结构造型理论的成功对网格结构的造型也有重要作用。因为索网结构的倒置形式理论上是网壳结构更合理的形式,这种网格构件可以组成无弯矩作用的最轻巧的网格构。

因此,在目前的理论水平和技术条件下,可以认为已知具备建造任意型体空间结构的条件,使网格或索网结构取得理论上最为经济合理的效果。

二、空间结构的造型研究

形态万千的自然界蕴藏着无穷优美的可供选用的建筑造型。因此近代建筑师对自然结构的研究发生浓厚的兴趣。

近代崇尚自然的建筑思想具有进步意义。它重新提出科学技术和艺术的关系。建筑未必以表现科学发达,实力雄厚等,因为科学进步也带来核威胁、污染等对自然生态的破坏。因此未来的建筑应更多表现与自然万物的融洽和协调,最近日本新建 EXPO 85 Suntorg Pavillion 大跨度展览建筑是模仿山丘建造的,是力图反映这种建筑思想的代表(8)。

研究自然结构更重要的理由是自然界启发人们建筑的灵感和曲面造型的能力。人们通过仿生学的研究,可从中寻求更理想的结构。近年来著名的建筑师 Frei Otto 写过三本专著:《自然—知识—建筑》、《自然结构》和《自我修养(建筑师)》;西德司徒加德大学悬索结构研究所和 SFB64 组织有大量有关专题报告,(1)(7)。许多国家的建筑师从山川地形(3)、原始建筑、蚁穴、贝壳等研究建筑形体,从海螺、植物分枝研究节点,从蛛网、叶脉、昆虫翅膀等研究网络分布,取得一定成效(4)。

作者认为以植物的叶型和花型来研究大跨度结构的型体具有一定的价值。特别是几种大叶型植物,在生存竞争时,更显得力图增

大其叶面和保持其叶型的能力。它并不依赖增加其厚度，而采用加劲、网络、减轻负荷和选择合理曲面等多种方法。

莲王的叶面直径达 2-3m，飘浮水面，任凭风浪吹打，是因为叶面上生长着一圈垂直叶面的周边，形成空间作用，并且叶的背面还具备粗大的茎脉和较微纤的叶脉网络。棕榈、蒲葵类植物则以叶的褶皱如同折板结构，跨越空间。生长在热带森林中的电背竹，其肥厚的叶面周围呈散裂状，叶中央还有孔，以达到减轻重量，卸除风雨负荷和增加通风的作用。

柔薄的花瓣常常是依靠其型体的曲面或折皱来增加刚性的比比皆是。一株盆栽的巧角型大瓣月季花在冬季可维持其花型达 20 天，而普通的平瓣月季几天就雕谢，花瓣前端的巧角曲面有明显的空间作用。这里略举一些花叶的形态分类：

平板型	莲王
球形曲面	郁金香、风铃草、荷花、虞美人，
筒形	君子兰、凌笼草、凌霄
园锥形	马蹄莲、苍兰
鞍形	构骨（叶）、牵牛、朱顶红。

柔薄的花瓣或叶面其复盖的面积，与人类设计的建筑结构相对地比较，若采用可比的指标 L/Et ， L 为复盖的跨度， E 为其弹性模量， t 为其厚度，则自然界的创造能力常超越人类的设计能力。这一点，美国学者 W. Stadler 认为自然界的进化过程是彻底地完成了—个优化设计。在连续体力学中，其优化表现为结构的质量最轻，受荷时变形能最小〔5〕。

除了研究自然造型以外，人工的空间曲面的造型方法是解决工程问题更为直接和重要的手段。这种造型方法是在实验室内完成的。目前主要是对柔性材料在一定荷载下曲面的研究。它包括：

- (1) 皂膜在各种周边支承下自重作为荷载的型体研究；
- (2) 张紧的金属薄膜在点支承条件下，变形研究；
- (3) 塑料膜或金属薄膜在充气或吸气荷载下的型体等。

这些研究目前都尽可能接近实际工程条件，并取得相当精确的结果，还作为理论计算的校核。索网和网格结构曲面可以从薄膜近似地离散化而得到。在进一步要求时，再进行索网和网格结构的试验研究。

三、网状结构型体的合理选择

可以认为目前已经具备建造理论上十分合理的任意形体的空间网状结构，在某些特殊要求的工程中可以发展应用。各种建筑形体方面的合理要求，都能更好地满足。然而一般的大跨度结构选型时，既要受力合理，还更多地考虑建造方便，省钢和经济等因素。理论上合理的、建筑优美的型体，在一定条件下，未必能很快付诸实现。其中对大跨度结构影响较大的是屋面材料、节点方法和自动化生产条件等。因此，以下几个步骤可能是可以考虑的。

(1) 在合理曲面的基础上发展平板网格的组合结构。组合的块件可大可小，块件大的如四坡屋顶网格结构，块件小的可组成任意曲面。这种结构的主要优点是：兼有一定的壳体结构的空间作用，可减小结构层高度；网格是平板型，制造最为方便，块件可以工厂制造不用装配节点，只需要进行块件之间的拼装；屋面上可以采用大型的轻质压型钢板或夹芯板，施工非常方便；另外建筑的排水坡度与结构上平面相平，节省构造上耗费的钢材。

(2) 曲面网格结构可首先发展单曲面的网格，由于这类网格是一种可以展开的曲面，不规则的构件最少。这类网格有圆柱网壳、圆锥网壳、折板式网壳等，这种结构也可相互组合，变化很多。由

于结构的一个方向是直线，制造时可以不作切段，减少节点用钢量。网架二边的边缘构件可以施加予应力。在工厂中采用时，还可设置悬挂吊在。

(3) 其他曲面型式的网格也都有一定的优点，根据需要发展应用。鞍形曲面网壳最接近薄膜受力曲面，球形穹顶网壳刚性最好，跨越空间尺寸最大，并节省材料。这二类结构的曲面是不可展开的，有可能使构件规格种类繁多，但是注意其构造规律，如鞍形曲面是由直线组合而成可做到杆件规格少，节点略多。穹顶网壳如分圈改变斜杆也可减少不同规格的构件。

(4) 索网结构中，鞍形曲面与其周边构件相互平衡，没有结构以外的拉索支承，是一个十分成功的建筑形体。目前我国需要发展精确的计算理论，发展一些柔性的复盖材料。进行复盖物裁剪、结构量测技术方面的研究，在我国也是很必要的。

网状空间结构丰富的几何造型可以对不同的建筑物提供合理型体。因此目前除了平板网架以外，在一定场合发展网状壳体和索网结构是有必要的，特别是一些大型公共建筑它可以增添城市独特风貌，也可取得较好经济效果。

参 考 文 献

1. Z.S.Makowski Space Structures of today and tomorrow, A Brief review of thier present development and a glance into their future Use, Third International Conference on Space Structures, 1984.
2. T.Shimizu, T.Kitajima, Y.Mikimi, F.Matsushita and T.Yamaguchi, The design and Construct-ion of Steel Space Structure Covering main exhibition Site at Expo 85 Tsukuba, Japan, Third International Conference on Space Structures, 1984.
3. B.S.Benjamin, Architectural and Structural evolution on dome Shelters. Third Interna-tional Conference on Space Structures, 1984.
4. K.Linkwitz, Formfinding and analysis of cable net Structures, Weltgespannte Fläch-entragwerke, 3 Internationales Symposium Stuttgart, 1985.
5. W.Stadler, Natural Strutural Shape (Aunif-ied Optimal Design Philosophy) Weltgespan-nte Flächentragwerke. 3 Internationales Syposium Stuttgart 1985.
6. 胡学仁 空间网状结构的研究和开发, 国际学术动态 1985 年第三期。

7. 胡学仁 国外大跨度建筑研究动向, 国际学术动态1986年第一期。

8. Keizo Satake Expo'85 Tsukuba Suntory
Pavillion Weitgespannte Flächentragwerke,
3rd Internationales Symposium, Stuttgart,
1985.