

国外当代结构设计丛书

空间网格结构

SPACE GRID STRUCTURES

JOHN CHILTO

[英] 约翰·奇尔顿 著
高立人 译

中国建筑工业出版社

国外当代结构设计丛书

空间网格结构

[英] 约翰·奇尔顿 著

高立人 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2003-1165 号

图书在版编目(CIP)数据

空间网格结构 / [英] 奇尔顿著；高立人译.

—北京：中国建筑工业出版社，2004

(国外当代结构设计丛书)

ISBN 7-112-06412-0

I. 空... II. ①奇...②高... III. 空间结构 IV. TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 027471 号

Space Grid Structures by John Chilton

First published

2000 by arrangement with Elsevier Science Ltd, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, OX5 1GB, England

Copyright © John Chilton 2000

本书经 Elsevier Science Ltd 授权我社在全世界出版、发行中文版

责任编辑：王 跃 丁洪良

责任设计：郑秋菊

责任校对：赵明霞

国外当代结构设计丛书

空间网格结构

[英] 约翰·奇尔顿 著

高立人 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京嘉泰利德制版公司

北京市铁成印刷厂印刷

*

开本：880 × 1230 毫米 1/16 印张：12 字数：450 千字

2004 年 8 月第一版 2004 年 8 月第一次印刷

定价：32.00 元

ISBN 7-112-06412-0

TU · 5661(12426)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址：http://www.china-abp.com.cn

网上书店：http://www.china-building.com.cn

前言

本书已酝酿了很长时间,最初的想法萌芽于七年前,当时我正在给见习建筑师教空间结构学,另外,我早期的博士研究课题就是空间网格结构。那时的学生请我推荐一本能从中学到有关空间网格结构的造型、设计参数、构造详图与施工的合适教材,后来我发现,虽然当时确实有不少论述结构性能及其分析的教材,但适合上述学生要求的却极其有限。当时我给学生推荐的是1968年由麻省理工学院出版社出版的一本“空间网格结构”(《Space Grid Structures》,与本书同名,作者是约翰·鲍雷戈(John Borrego)。可是,自此书出版至今已整整过去了30年,而空间网格结构技术在这期间已取得了很大的发展。因此我开始打算在90年代末创作一本对建筑师、结构工程师与施工技术人员都同样有用的教材,从中可以了解空间网格结构设计施工的基本知识与理念。

真正促使我实施这个想法的动力是来自于1993年,我在萨里(Surrey)大学参加第四届空间结构会议。在会上我试图与空间网格结构的先驱Stéphane du Château前辈交谈(遗憾的是前辈于当年去世,享年92岁),当时他直截了当地问我是结构工程师还是建筑师,我回答是结构工程师。就这样,他一开始与我谈话并不太热情,但当我补充解释说我在建筑学院教书后,他立即变得非常好说话,而且最后还送我一本他自己写的关于结构形态学的书,并在书上题词:

‘a Jean - John Chilton - pour l’inspirer des idées
pas comme les autres - avec toute ma sympathie’

Guildford

10.9.93

本书名选择“空间网格结构”是经过再三考虑的。在建筑师、结构工程师与建筑业其他人士以及施工行业中,术语“空间构架”(space frame)通常被用来描述由框架(frames)或桁架(trusses)组成的三维结构。其实,这所有的“空间构架”按工程理念来讲实际上却指的几乎都是“空间桁架”,而这两者之间的受力状态是完全不一样的。因此,用空间网格这名字来替代是比较能被广泛接受的,它不但能包含上述两种体系,还能用来描述这两种体系的共同特征。当然,在论及这两种体系的不同结构的受力特征时,还必须分别用空间构架和空间桁架这两种比较确切的工程术语。

第1章到第4章是叙述空间网格的发展史、几何形状、设计和施工。第5章是介绍过去30年建造的不同规模、不同材料与不同体系的空间网格结构的代表作,以此显示这种结构形式的广阔应用潜力。第6章是研究讨论可开合的与可折叠展开的空间网格应用,虽然这两类空间网格在60年代初就已开发,但直到最近才被广泛地应用于建筑工程。最后,在第7章略述了一些至今尚未被充分利用的空间网格概念及其一些有意义的开发,这些可能在不久的将来就会实现。

有些人认为空间网格的应用在70年代已达到最高峰,故会评论说这可能只是一本介绍历史代表作的书。然而,第5章所述的这些工程实例无不证明空间网格仍正在被广泛地应用于各种中等和大跨度的新型结构。虽然在发达国家空间网格的应用有可能会减少,但在发展中国家对空间网格的广泛应用仍有很大的潜力,那里的材料相应比较贵,而劳动力便宜,所以简易有效的结构是最需要的。

致 谢

首先,也是最首要的我必须向我的夫人 Gloria Llanos 表示衷心的感谢,她给了我永恒的支持和鼓励。如果没有她的支持和鼓励,我怀疑我未必能写成这本书。在我闭门写作时,她不仅容忍了多少个寂寞的夜晚与周末,还对本书的文字作了诸多的修正。

虽然我是独自写完了这本书,但远未达到本书目前这种水平。所以,我也要向剑桥大学工程系的Richard McConnel博士致以真诚的谢意,他是我的最初合作伙伴,在他的帮助下得到不少载入本书的资料,他花了不少时间对我的原始草稿作了校审,并提出了非常宝贵的建设性意见。

如果没有许多朋友的慷慨帮助,要完成这本书是很困难的。在这些作出贡献的朋友中,我尤其受惠于Graeme Barker先生,在第2章中所用的都是他那出色的三维计算机模拟空间网格几何形状的作品。而诺丁汉大学建筑环境学院的摄影师Glyn Halls先生帮助我制作了许多照片。我还要衷心感谢下列允许我复制他们的设计图纸和(或)照片的朋友与单位:ABBA Space Structures、建筑协会照片馆、British Steel Tubes Division、De Bondt、A.El-Sheikh、Félix Escrig、J.François Gabriel、Alastair Gardner、G.C.Giuliani/Redesco srl.、Glyn Halls、H.Hendriks、Pieter Huybers、N.M.T.Jackson、川口卫、L.A.Kubik、Matthys Levy、Mai Sky System Inc.、Carlos Márquez、

J.Martínez-Calzón、R.E.McConnel、Mero(英国)、Orona S.Coop.Ltda.、Fundación Piñero、Tony Robbin、Scogin Elam and Bray、清水建设株式会社、R.G.Satterwhite、Space Decks Ltd、竹之内京、R.Taylor、Peter Trebilcock、Ture Wester和叶祥荣建筑设计事务所。

在上述提供帮助的朋友中必须专门提及川口卫,他非常慷慨地提供了大量与他亲身有关的,尤其是用“庞大拱顶”方法安装建成的工程项目的资料、图表与照片。另外,我也非常感谢Roland Howarth和Richard Poráda(Space Decks Ltd)、Ane Yarza(Orona S.Coop. Ltda.)、Eddie Hole(British Steel Tubes Division)、Jane Wernick(Ove Arup)、K.杉崎(清水建设株式会社)和Stephen Morley(MODUS Consulting),他们提供我很多相关的设计图纸、照片及其资料。若我遗漏了任何曾帮助过我的朋友,我在此深表歉意。

最后,我想要感谢我的父亲,虽然他不是建筑师,也不是结构工程师,但他阅读了几乎全部手稿(在没有插图帮助了解的情况下),而我的母亲却能耐心地听我父亲给她朗读本书的每一个章节。我欠父母太多,如果没有他们的养育之恩、支持和鼓励,我将永远不会从事结构工程师的事业,也将不会有写这本书的机会。故谨以此书献给我的父亲和母亲。

目 录

前言	vii	3.5.1 空间桁架式模数单元	44
致谢	ix	3.5.2 空间构架式模数单元	49
		参考文献	51
第1章 空间网络的早期发展	1	第4章 设计与施工	52
参考文献	11	4.1 构件的结构受力特性	52
第2章 空间网络的几何形状——从三维的角度思索	12	4.2 不同支承条件的跨高比	53
2.1 为何采用双向受力结构?	12	4.3 支座节点构造与温度伸缩变形	53
2.2 长宽比	14	4.4 尺寸的精确度	54
2.3 空间桁架的稳定性	15	4.5 起拱	55
2.4 稳定的多面体形状	16	4.6 屋面与玻璃天窗	56
2.4.1 杆—节点结构多面体	16	4.7 安装的方法	56
2.4.2 板式结构多面体	17	4.8 空间网络的耐火性	58
2.4.3 杆—板组合结构	17	4.9 地震区域的空间网络	59
2.5 采用空间网络的优点	17	参考文献	60
2.6 不利因素	20	第5章 工程实例	61
2.7 网络的构造形式	21	5.1 日本1970大阪世博会喜庆广场空间网架	61
2.8 确切标示网络结构的各项参数	24	5.2 加拿大英属哥伦比亚贝拉库纳山谷纽萨楚姆别墅	64
2.9 复杂的几何形状——网壳	25	5.3 美国加利福尼亚花园丛林社区教会的水晶大教堂	67
2.10 支承方式	26	5.4 英国伯明翰国家展览中心和伯明翰国际音乐厅	69
2.11 分枝式柱帽的多点支承	27	5.5 日本滋贺信乐滋贺圣园明主样神殿	71
2.12 网架屋檐外形	28	5.6 美国纽约雅各布K.詹维史中心	72
2.13 多层空间网络	28	5.7 日本熊本县小国町小国体育馆	75
参考文献	29	5.8 英国斯坦史特机场FFV飞机维修库	78
第3章 材料和体系	30	5.9 西班牙巴塞罗那圣特霍地体育馆	81
3.1 空间网络的结构材料	30	5.10 美国亚利桑那州萨诺兰沙漠第2生物圈	88
3.2 空间网络体系	30	5.11 英国伯明翰国家室内体育场	89
3.3 “小部件”拼装体系	31	5.12 智利圣地亚哥AMB国际机场智利飞机维修库	93
3.3.1 球节点	31	5.13 西班牙帕拉富斯运动俱乐部	94
3.3.2 圆柱形节点	38	5.14 西班牙塞维尔1992世博会的空间网络结构	99
3.3.3 板节点	39	5.14.1 ONCE馆	100
3.3.4 “无结”节点	40	5.14.2 联合国馆	104
3.4 连续弦杆体系	41	5.15 英国德贝天鹰座中心区超市	104
3.5 模数单元体系	43	5.16 英国泰晤士河畔京士敦彭托中心的筒形拱顶商场	106

5.17 英国曼彻斯特机场 2 号候机楼	110		
5.18 英国斯凯格尼芬达锡岛金字塔建筑	112	第 7 章 未来的发展	156
5.19 圆木空间桁架	114	7.1 多面体的空间网格房屋	156
5.20 亚特兰大奥运游客华亭(未建项目)	118	7.2 高层建筑和巨型结构	156
5.21 意大利米兰交易会的新建展览馆	118	7.3 “挑战 2004”的“空中城市”	160
5.22 悉尼澳大利亚体育场	126	7.4 组合楼盖	163
参考文献	129	7.5 整体张拉与空间网格	164
第 6 章 可折叠展开与可开合的空间网格	131	7.6 杆和板组合成的水晶式几何形状	164
6.1 可折叠展开的空间网格	131	7.7 空间网格的发展前景	166
6.2 Emilio Pérez piñero(结构工程师)	131	参考文献	168
6.3 西班牙塞维尔 1992 世博会的委内瑞拉馆	135	附录	169
6.4 “庞大拱顶”安装方法	139	附录 1: 双向正交梁结构	169
6.4.1 日本神户世界纪念馆	142	附录 2: 制造厂家名录	169
6.4.2 新加坡室内体育场	144	参考文献	171
6.4.3 日本福井县靖江的阳光拱顶广场	146	名词解释	173
6.4.4 日本大阪县门真市三岛门真体育中心纳米海双曲拱壳	148	译后记	181
6.5 西班牙塞维尔圣帕布罗游泳池的折叠式顶罩	151		
6.6 可开合的屋顶结构	151		
6.6.1 加拿大多伦多穹苍	153		
参考文献	155		

第1章 空间网络的早期发展

建筑师与结构工程师一直在寻求解决空间整体结构问题的新思路,随着现代世界工业化的发展,对大跨度结构的功能要求也越来越强烈。空间网格结构无疑是建筑师和结构工程师们探索开拓这些新结构形式的有效工具,这主要归功于空间网络的广泛多样性及其灵活机动性。在讨论20世纪后期的空间网格设计和应用前,先让我们回顾一下三维空间结构的早期应用是有帮助的。

在18世纪中叶以前,建筑师和结构工程师所能采用的建筑材料仅仅是石头、木材与砖而已。当时供应较缺的金属材料主要只是用来作为其他建材的嵌缝填料。在这些当时广泛使用的建材中,石头和砖的抗压强度高,但抗拉强度低,只适合于建造诸如穹顶和穹窿之类的三维空间结构形式。中世纪的石瓦工匠们早已成功地造就了给我们后代留下深刻印象的穹窿建筑业绩。其中最大跨度的砖石双曲穹顶建筑属1588~1593年在罗马建造的圣彼得教堂和1420~1434年在佛罗伦萨建造的圣玛丽亚教堂,这两座建筑的底部直径都接近42m¹。质量好的木材具有一定的抗拉与抗压强度,但其自身可利用的原始长度与横截面都很有限。所以对于大规模的三维空间结构来讲,其木料的拼接势必成为主要的问题。不过,世界上最大的古代木建筑是日本奈良的东大寺庙,建筑平面57m×50m,高47m,该现存建筑建于1708年,是在被大火烧掉的原建筑的基础上重建的,甚至比原先的更大了些。尽管用这些建筑材料已建成了一些令人难忘的大尺寸结构,但它们的跨度还是受到局限,而且施工也极其繁琐。然而,随着工业革命的到来,铁与随后出现的钢材这些能满足较大跨度或高度及难度较大的结构要求的高强材料生产也变得越来广泛。几乎就在同一时期,数学技术已发展到能分析和预测结构的性能,而材料强度的测试判断能力也正在迅速提高。而且,随着火车时代的出现和商品生产工业化的到来,对诸如桥梁、火车站、仓库及工厂等大跨度结构的需求也随之增加。在铁与钢材的广泛使用和对大跨度结构需求的形势下,则势必自然跨入一个对新结构形式的开发时期,最初是用不同构造形式的平面桁架进行组合,最后才发展到三维空间网格。

包括绝大多数空间网格在内的许多结构形式的装配组件都是模数单元的,这模数单元组件的结构基本理念及其效

能可以用下面的实例来作戏剧性的说明。大约在150年前,伦敦为筹备1851年的世界博览会(The Great Exhibition)在海德公园兴建水晶宫(Crystal Palace)。当时,Fox Henderson公司和Joseph Paxton从提交履行契约合同书开始,到设计、工厂预制金属构架组件、装配,直至最后交付业主,整个过程才用了6个月的时间。这一成功之举或许会不断地鞭策着当今建筑工业的技术发展。

1897~1899^①年间用熟铁建成的巴黎埃菲尔铁塔(Eiffel Tower,原304m高,现已增到321m高,以建筑师古斯塔夫·埃菲尔的姓命名——译者注),作为一举世闻名的里程碑式结构,它为模数单元组装的三维空间金属结构的稳定性与耐久性提供了极佳的证明。当时建造这座铁塔只是用来作为纪念法国革命100周年的一种象征性的临时建筑(原计划在建成20年后拆除——译者注),但谁都没想到在经历100年风风雨雨后的今天依然堂堂地挺立着。遗憾的是,与埃菲尔铁塔相邻并几乎同期由Contamin和Dutert建造的114m跨的机动车辆展览馆却早已不存在了。像埃菲尔铁塔这样的结构无疑说明了用铁与钢材建造高层和大跨度建筑是完全可能的事,同时也激励建筑师和结构工程师在自己的工程项目中不断地自我挑战、创造更新和更有效的结构体系。

我们现在通常称为空间构架(space frames)或空间网格(轻型、坚固、工厂成批生产的模数单元组合空间结构)的最早工程实例很可能就是由著名的电话发明者Alexander Graham Bell(亚历山大·格雷厄姆·贝尔,1847~1922,生于苏格兰的美国人——译者注)率先开发的。在20世纪的头10年他曾试验用三角锥与四角锥的单元组件来装配空间网格(图1.1)。在他1903年登载于“国家地理杂志”²(National Geographic Magazine)关于鸢式结构(Kite Construction)的论文中,贝尔写道:

“当然,这四面体(即三角锥)单元组件的应用并不局限于鸢式和飞艇式构架结构,它适用于其他任何类型的结构,并能达到既轻型又有符合要求的强度的理想综合效益。正如我们能建造除砖以外的其他各种建材的房子一样,我们也能建造除四面体构架以外的其他各种结构,并同样具有轻型和合乎要求的强度,这就是可装配的单元组件的特色。”

^① 1897~1899,应为1887~1889,译者注。

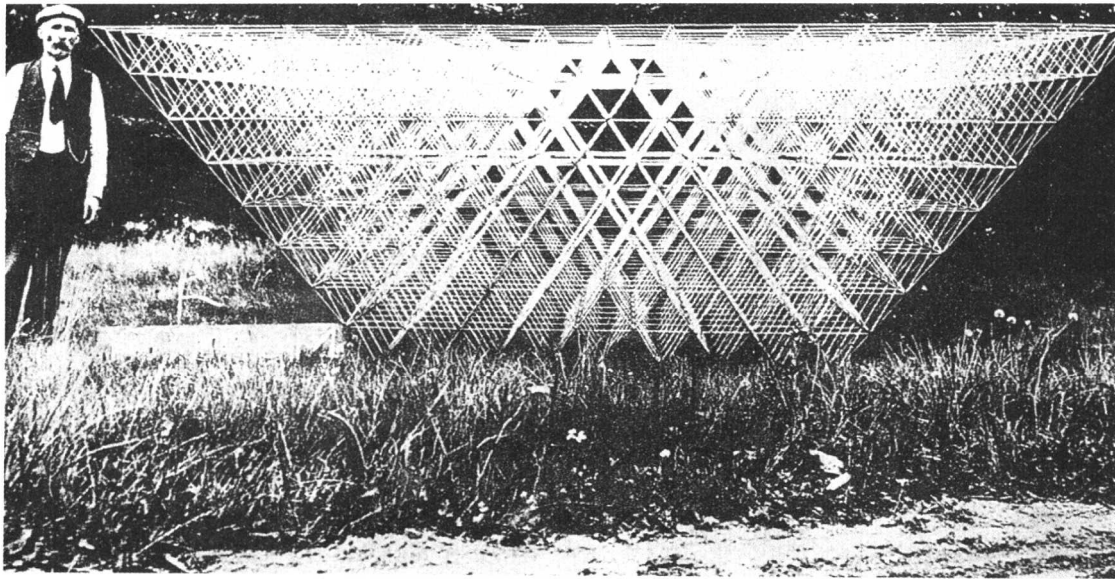


图 1.1
Alexander Graham Bell 于
20 世纪 10 年代所开发的
空间网格结构的早期试验

从上述引言中可看出, Bell 正确地评价了他的诸多由稳定四面体空间组件所装配组成的工程项目所显示出来的高强与轻型的双重特性。最早的空间钢网格结构是 Bell 于 1907 年用铸钢节点和钢管杆件在美国贝不列建成的瞭望塔(the observation tower)。

尽管 Bell 早在 20 世纪初就开发了轻型的三维空间桁架, 但直到 1943 年随 MERO 体系的问世才开始在建筑业中应用。MERO 体系可称之为第一个可广泛使用的商品化的空间网格体系, 是由 Max Mengerlinghausen(1903~1988)在德国开发的。它用的是最普通的空间桁架结构的方法, 将单独的管状杆件分别连接在球状的节点上。这种体系的艺术感染力及其流行一直持续至今, 现在已发展到有诸多可供选择使用的管杆件和球节点的系列产品。

建造双层网格的常用方法是采用预制装配式的模数单元组件。在 50 年代, Denings Chard 在英国开发了一种 Space

Deck 的双层网格体系, 用螺栓将预制的四角锥模数单元钢组件(平面尺寸 $1.22\text{m} \times 1.22\text{m}$, 高分别为 1.05m 或 0.61m) 栓接在一起。自此以来, Space Deck 体系已成功地广泛应用于楼、屋盖结构, 在具体的工程项目中只需对模数单元组件的尺寸与材料作稍微的修改与调整即可, 该体系将在第 3 章中作详细介绍。另一种也用于楼、屋盖结构的与 Space Deck 体系相类似的 Nenk 体系的模数单元组件的平面尺寸也是 $1.22\text{m} \times 1.22\text{m}$, 只不过是只有一种 600mm 的高度³。Nenk 体系是由英国早先的公共建筑工程部和 Denings 一起合作开发的, 并在 60 年代初用于军队的营房建筑中。它用于楼盖的跨度在正常楼面荷载情况下可以做到 12.2m (40 英尺), 而屋盖的跨度可以做到 26.8m (88 英尺)。空间网格结构的柱网布置除需满足设计的空间功能要求外几乎可以不受其他任何限制。将底部贴有聚苯乙烯或聚氨酯板条的预制混凝土楼面板嵌固在模数单元的上层方形网格内则形成楼面。

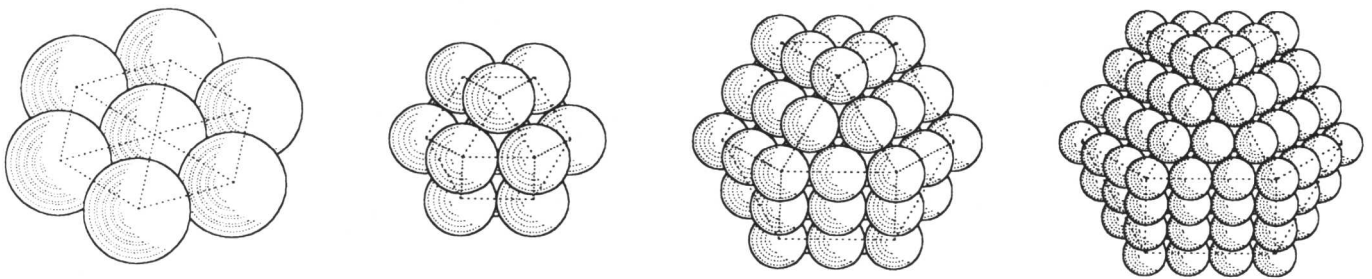


图 1.2
R. Buckminster Fuller 研究的多球紧贴捆团 (制图: John Chilton)

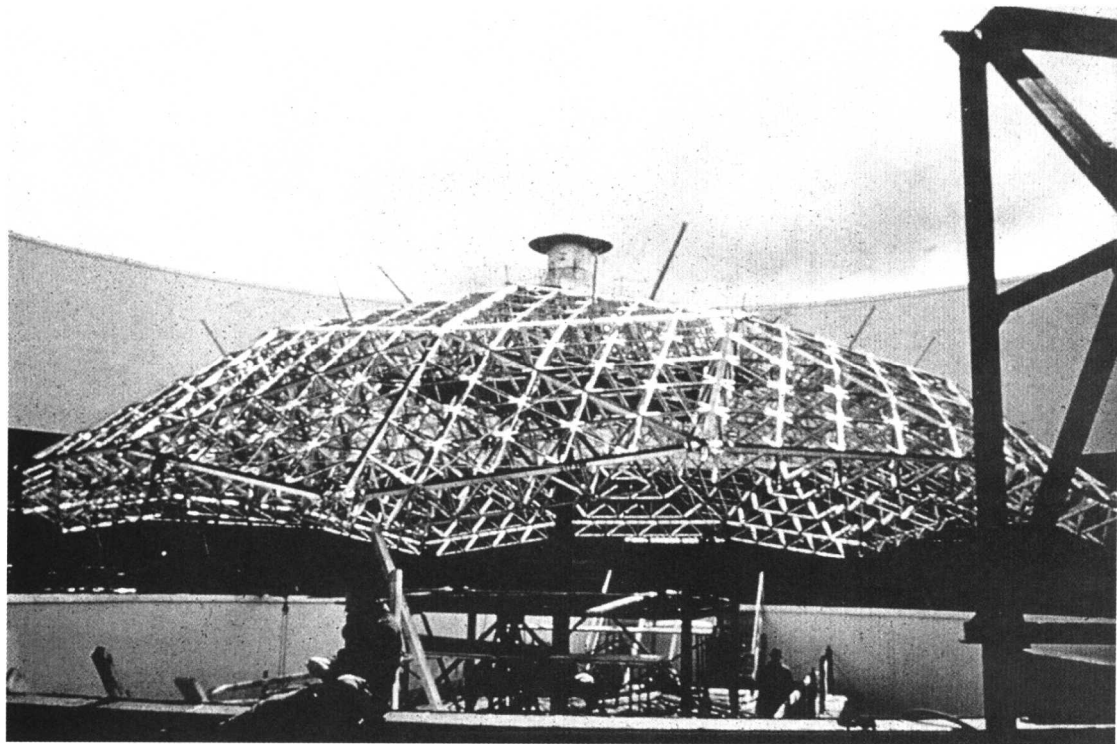


图 1.3
用20960根杆件建成的美国密歇根台奔市福特圆顶建筑的 Octet 穹顶网壳——R. Buckminster Fuller 开发

在 50~60 年代期间, 这些空间网格系列产品都已推广到世界各地。当时的建筑师们是在不断地探索这些模数单元网格的更新和更美观的造型; 而结构工程师们都在不断地试验着新的节点连接方法、相关材料及其构造形式。Richard Buckminster Fuller(1895~1981)在美国根据他的多球紧贴捆团的研究开发出一种 Octet Truss 体系^{4, 5, 6}。这 Octet Truss 的名字是由八面体与四面体(octahedron-tetrahedron)的头几个字母衍生出来的, 因为如果将许多球紧贴地捆绑在一起组成一个连续的整体, 则每个球起码会被 12 个以上的球紧贴地包围着, 将所有的球心用线连接起来则会形成八面体与四面体几何形状的轮廓线。(见图 1.2), 而空间网格的杆件即按照这些轮廓线布置。1953 年在密歇根州台奔市建造的福特圆顶建筑(Ford Rotunda Building)是用铝合金的 Octet Truss 网格构成的 28.4m 的穹顶网壳(图 1.3), 其总重才 8.5 吨。这种空间网壳没有用单独的节点构件, 而是在 X 型杆件的端部直接和与其相交的其他杆件用螺栓连接。在 1959 年纽约现代艺术馆(the Museum of Modern Art, New York)展示的 Buckminster Fuller 的成果中有一用 51mm 直径铝管建成的宽 10.7m、长 30.5m(由两个分别为 18.3m 与 12.2m 的悬臂组成)、高 1.22m 的 Octet Truss 体系的结构。

Konrad Wachsmann(1901~1980)于 1959 年奉命开发

一种用于美国飞机库的大跨度空间网格体系。任务要求这种大跨度体系在施工、建筑造型与建筑类型上应有很大的可变灵活性, 同时还要求这些配套的组件应该是可以拆卸的, 并可在相同或其他构造形式的建筑物上重复使用。

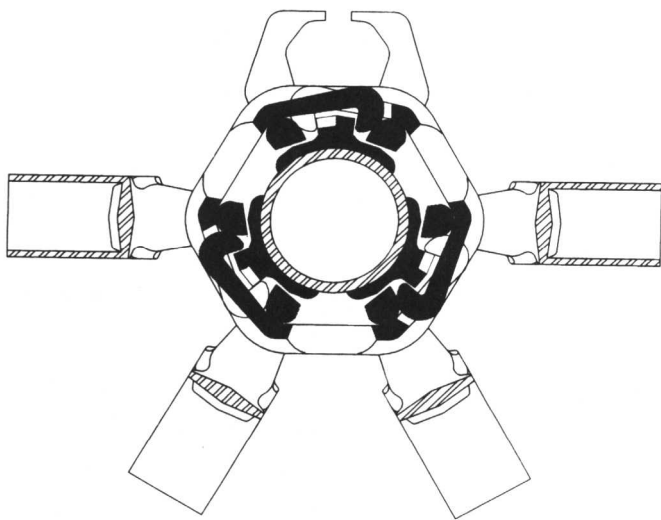


图 1.4
Konrad Wachsmann 的通用节点连接件, 用四个标准模锻构件组成, 每个节点可连接多至 20 根管杆件

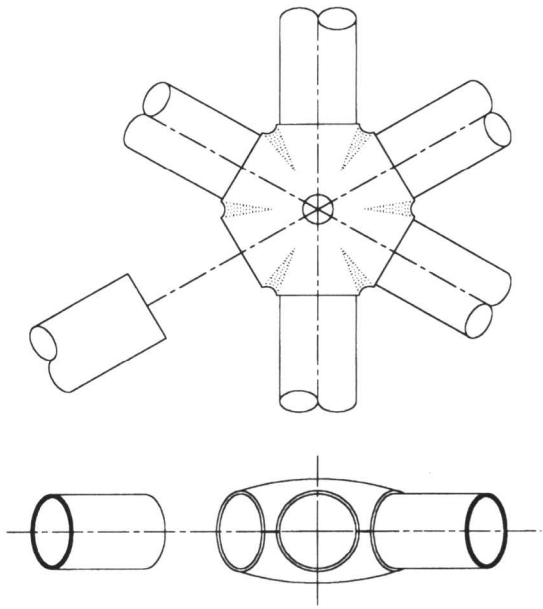


图 1.5(a)

Stéphane du Château 开发的三向 S.D.C. (1957), 需要在车间或工地将钢管杆件焊接在节点构件上 (制图: John Chilton)

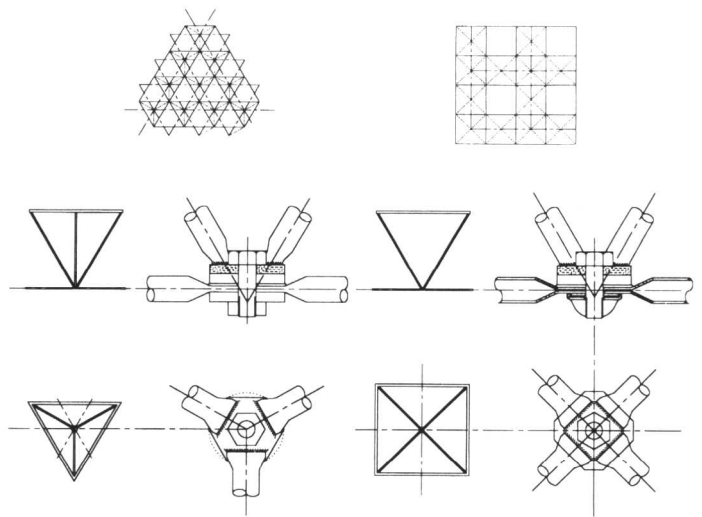


图 1.5(b)

基于三角形、正方形或正六边形底面的角锥体模数单元组件的Pyramitec体系, S. du Château 开发 (制图: John Chilton)

Wachsmann 体系⁷开发了一种比较复杂却又比较通用的由四个标准模锻构件组成的节点连接件, 其每一个节点可以连接多达 20 根管杆件, 见图 1.4。采用了两种管直径, 一种用于网格的上下连续弦杆, 每根长 9.1m, 用平头套管连接; 另一种直径较小的钢管用于斜腹杆。弦杆与斜腹杆之间的连接在工地现场仅需用一把锤子即能完成装配。同时必须用三片低碳钢楔通过槽口将节点连接件锁定在主弦杆的设计位置上。

在法国, Stéphane du Château (1901~1993) 于 1957 年开发一种需要在车间或工地将钢管杆件焊接在节点构件上的三向 S.D.C. (图 1.5a)。其后, 1960 年 du Château 又开发了一种基于三角形、正方形或正六边形底面的角锥体模数单元组件的 Pyramitec 体系 (图 1.5b)。这是 Unibat 体系的前驱 (1962 年开发, 见图 1.6), 两者所用的模数单元组件完全相同, 而 Unibat 体系只是在角部用螺栓连接在一起。^{8,9} Du Château 还在 1965 年开发了一种 Tridimatic 体系, 将预制的平面桁架与空心球节点用螺栓连接在一起。

在加拿大, 流行用铝合金作为杆件和节点材料的 Triodetic 体系于 1960 年作为商品技术由加拿大安大略省渥

太华的 Fentiman 公司正式推出。¹⁰ 该体系在管杆件的挤压成型、管杆件端部的压扁成楔上, 以及在带有与楔型管端吻合槽眼的挤压成型铝制锁芯节点上都有所创新 (图 1.7), 是从 1953 年起在原先的木制八面体或四面体网格基础上开始研制开发的。最早的工程实例是为加拿大皇家空军 (Royal Canadian Air Force) 开发了一种全部构件都可拆卸和重新装配的飞机库结构 (21m 宽、20m 长和 9.8m 高)。该飞机库的全部结构构件仅用了三只 1.5m × 1.5m × 3.7m (长) 的板条箱进行装运。这 1967 年蒙特利尔世博会的荷兰馆 (Netherlands Pavilion at Expo'67, Montreal), 74m 长, 22.5m 宽和 18.5m 高也都是用 Triodetic 空间网格结构建造的。全部构件都可以拆卸, 且整个装配过程没有使用脚手架。共用了约 52000 根直径分别为 38mm, 51mm 与 76mm 的铝合金管, 其中 5000 根 76mm 直径的管子专用于大负荷的杆件。另外还用了 17500 个铝制连接件。

出于对 Richard Buckminster Fuller 的创新成果的认可和对空间网格结构的接受, 1967 年蒙特利尔世界博览会的美国馆采用了直径 76mm 的 3/4 球面的拱顶网壳。该项目由 Fuller 和 Sadao 公司、Geometrics 公司以及 Simpson、Gumpertz and Heger 公司一起合伙设计。该拱顶是一种

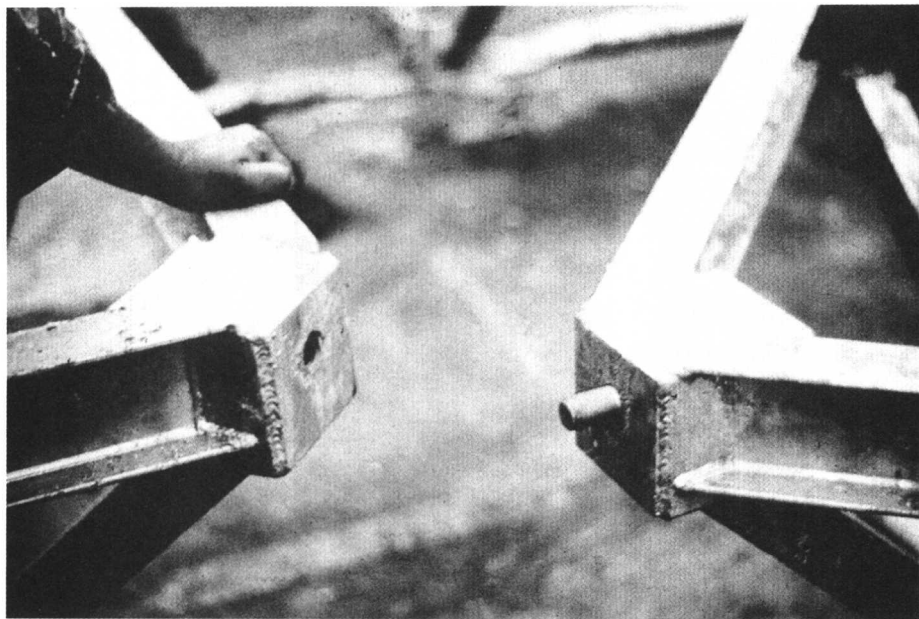


图 1.6
在角部用螺栓连接在一起的 Unibat 角锥体模数单元组件(照片: 经 R. Taylor 同意)

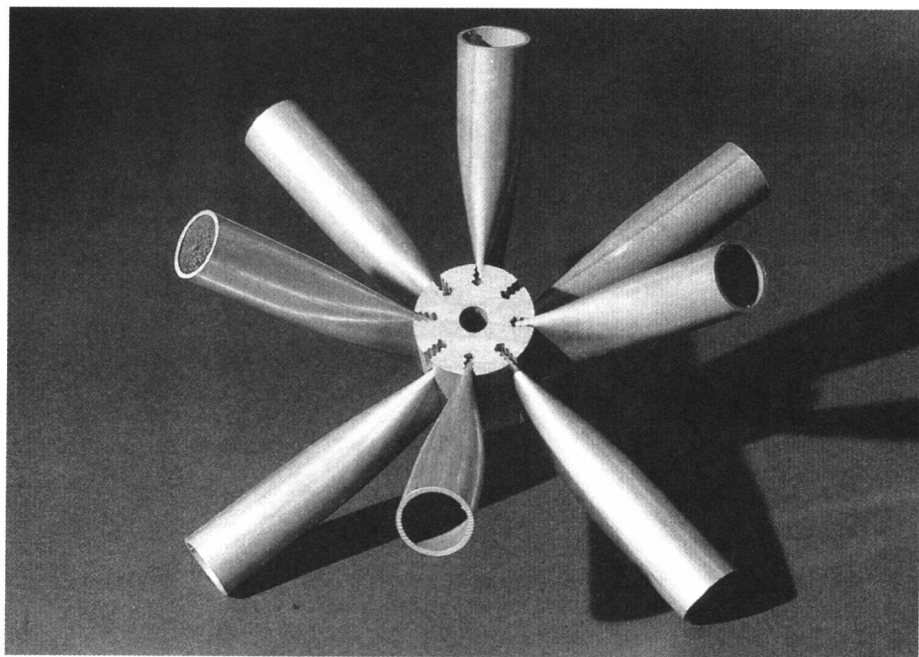


图 1.7
1960 年渥太华 Fentiman 公司推出的 Triodetic 体系, 用铝合金作为杆件与锁芯节点的材料(照片: 经 Glyn Halls 同意)

双层钢管空间网格结构, 外层是三角形网格, 里层则为六角形网格(图 1.8)。在蒙特利尔世博会上还有两座大型的主会馆——“探索者(Man the Explorer)”和“创造者(Mau the Producer)”, 也都是用模数单元的三维空间网格来建造的, 其建筑设计师是 CCWE 的 Affleck、Desbarats、Dimakopoulos、Lebensold 和 Sise。这些多层网格结构是早期尝试用小构件的

模数单元体系来建造巨型结构(mega-structures)可行性的工程实例。建造这两座主会馆(图 1.9)大约用了 400000 根由一对角钢组成的杆件, 250 万个螺栓和 100000 个连接节点, 钢结构总重 7500 吨。大墙和楼盖部分是用一种边长为 1m 的等边截角四面体几何形状的网格组装而成(见图 1.10a)。这截角四面体是少数几种规则的多层满装的多面体之一, 这

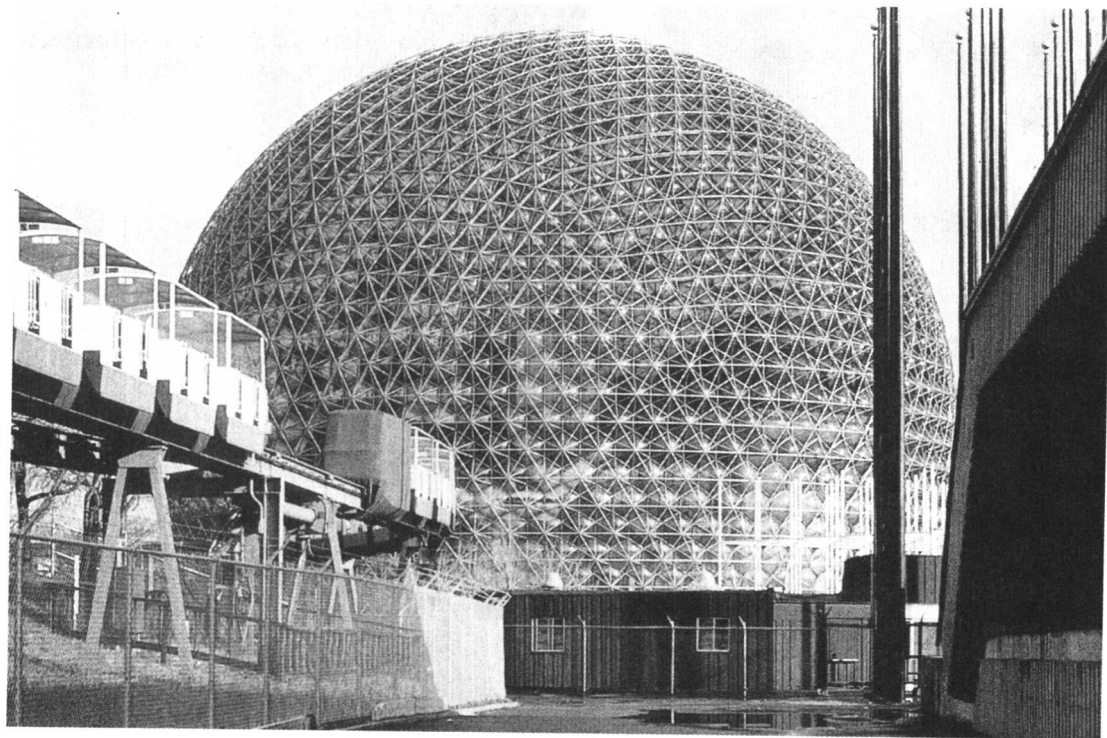


图 1.8
Richard Buckminster Fuller 设计的 $3/4$ 直径 76m 球面的
双层空间拱顶网壳——
1967 年加拿大蒙特利尔世
博会的美国馆(照片: 经
Alastair Gardner 同意)

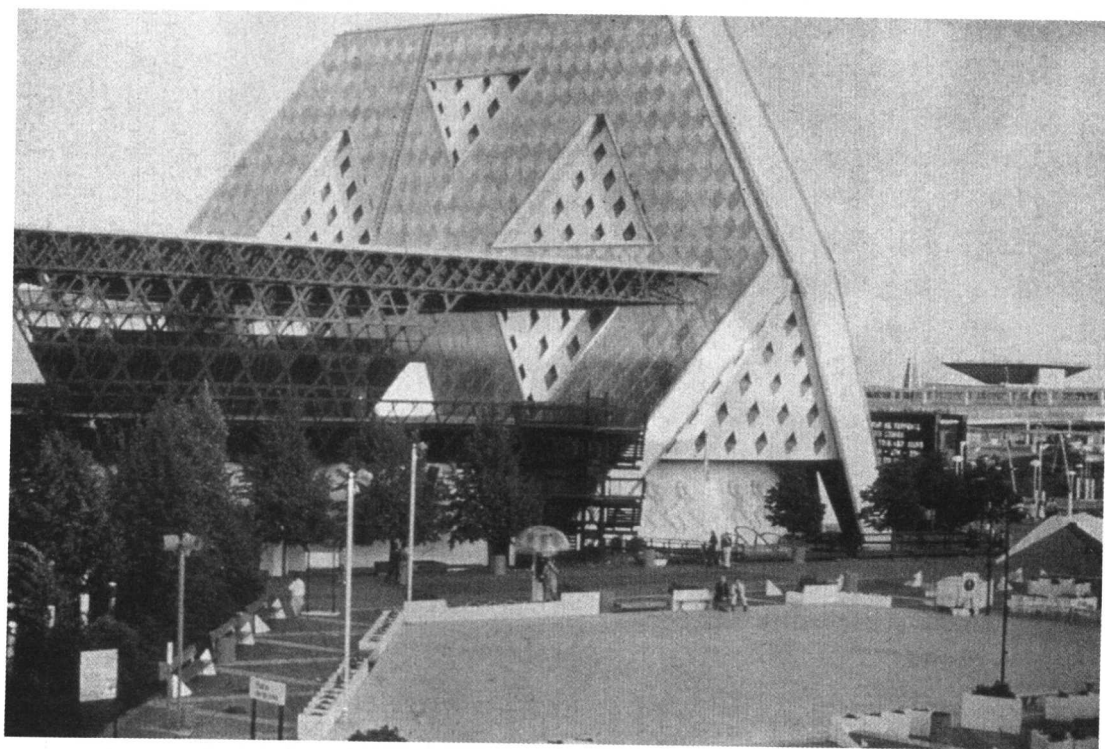


图 1.9
1967 年加拿大蒙特利尔世
博会的多层模数单元空间
网格结构“制造者”主会馆
(照片: 建筑协会照片馆
Kamlesh Parikh 摄)

样,这些基本的模数单元组件就可以相互拼接构成两个平行的表面(见图 1.10b)。这两座主会馆的楼盖网格结构的构造形式见图 1.10(c),而墙向里倾斜成 71° 的水平夹角,其标

准立面见图 1.11。

1967 年蒙特利尔世博会的交易中心是两座大小不一、而形体相同的竖向为长轴、底部截角的八面体多层空间网格

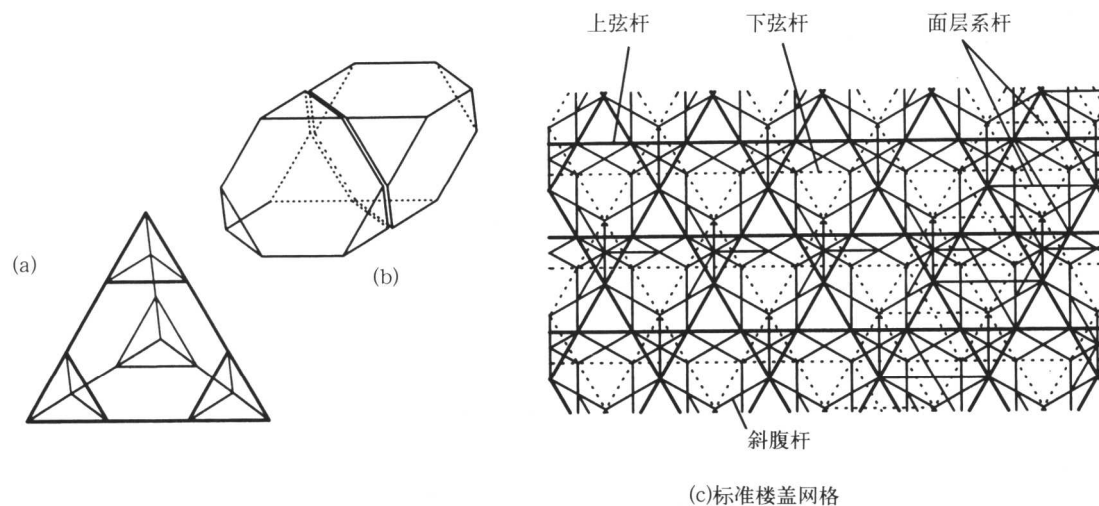


图 1.10

(a) 构成网格几何形状的截角四面体; (b) 拼接截角四面体构成平行表面; (c) 1967 年加拿大蒙特利尔世博会“探索者”与“制造者”两主会馆的楼盖网格构造形式(制图: John Chilton)

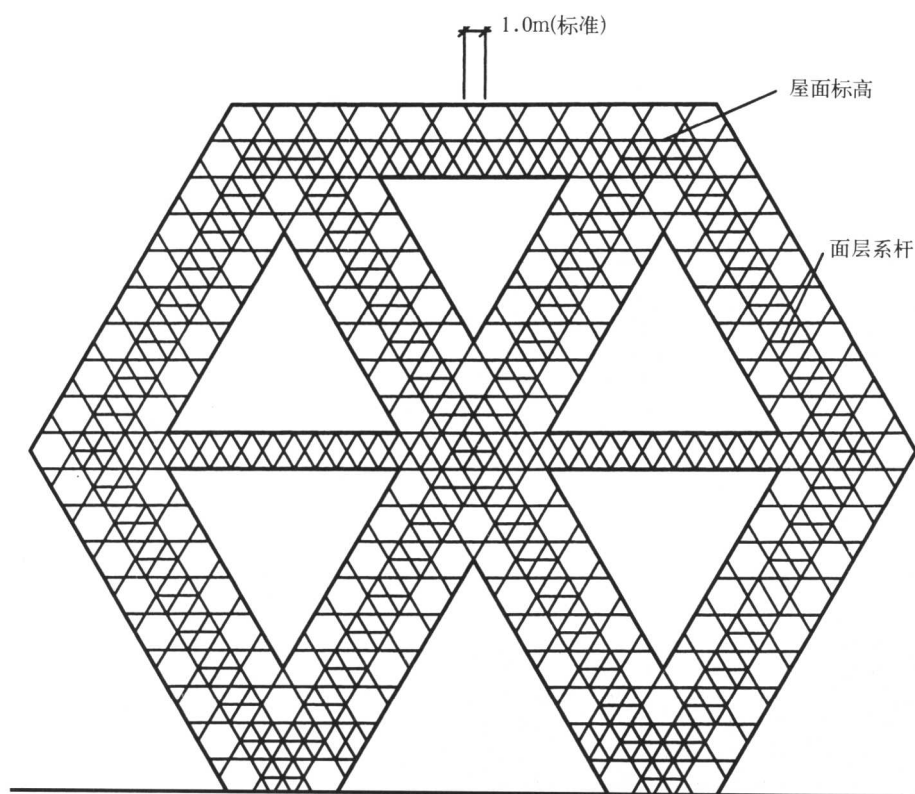


图 1.11

1967 年加拿大蒙特利尔世博会“探索者”与“制造者”两主会馆的标准墙结构立面图(制图: John Chilton)

结构。其中高 65.5m 的称为金字塔馆, 相邻较小的叫火山馆, 两馆之间架有一道空间网格的天桥¹¹, 见图 1.12, 两馆的平面与剖面见图 1.13。该项目的建筑设计师是 Sean Kenny 和 George Djurkovic, 结构设计是 Boyd Auger。空

间网格由总部设在蒙特利尔的加拿大铝业股份有限公司 (ALCAN) 提供。共用了 8500 根 4.9m 长、152mm 直径的铝合金管杆件, 在该结构中有四种不同的墙厚。其幕墙设在网格的内表面以充分展示它的外层空间网格。

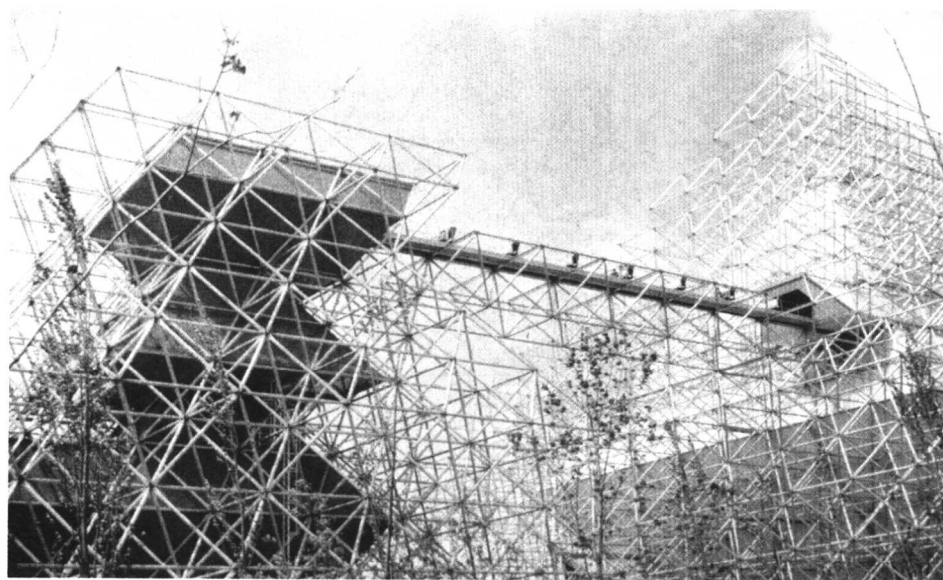
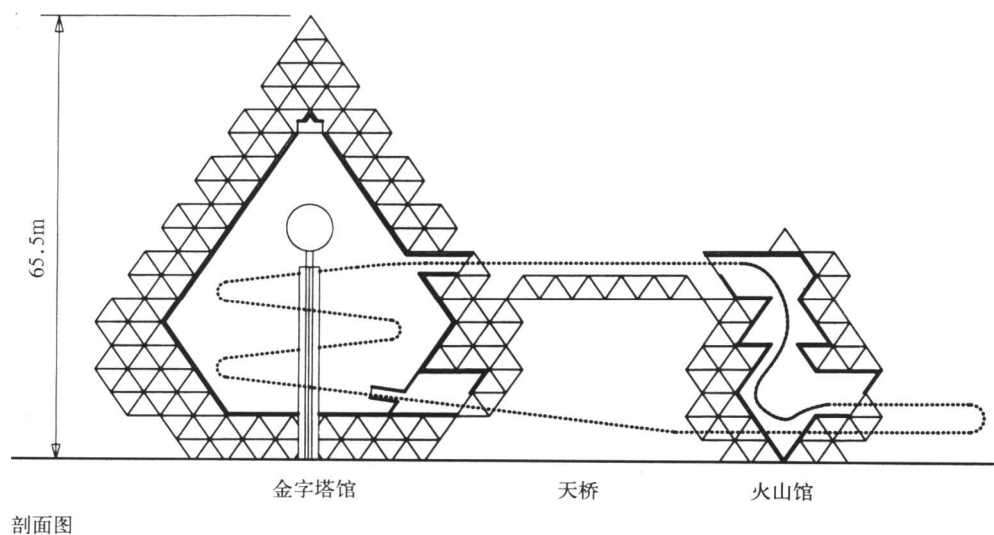


图 1.12

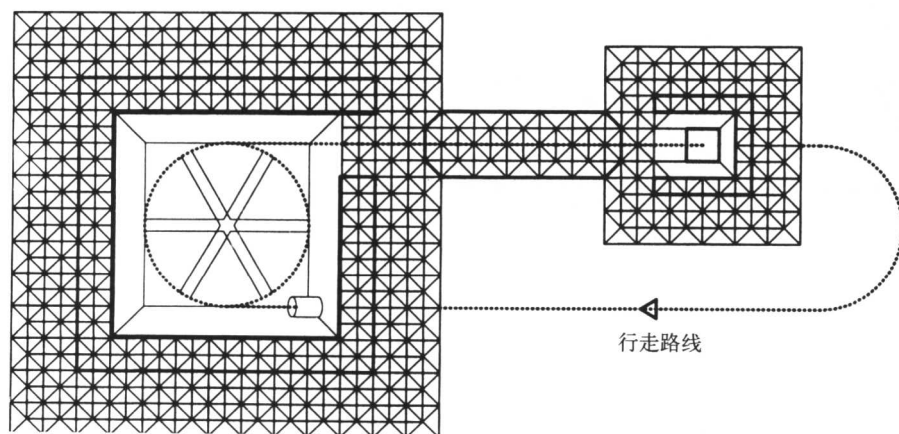
1967年加拿大蒙特利尔世博会金字塔——火山馆交易中心的多层铝合金空间网架(照片:建筑协会照片馆 E.H.Robinson 摄)



剖面图

图 1.13

1967年加拿大蒙特利尔世博会金字塔——火山馆交易中心的平面与剖面图(制图: John Chilton)



天桥标高处的平面图



图 1.14
科贝的Nodus空间网架模型(照片: 经British Steel Tubes & Pipes 同意)

几乎就在同一年代,电子计算机的广泛应用以及能比较精确分析空间网格结构的程序开发大大地增加了对采用较大型的和较大跨度结构的信心与把握。值得一提的是,就在那时候,结构分析的计算机软件功能还相对较差的那个年代,蒙特利尔世博会还专门组织人编制了一个全新的大型结构计算机分析程序来分析这个金字塔——火山馆交易中心的多层空间网格。

在60年代末和70年代初,大多数早期的空间网格系列产品几乎都被新开发的第二代系列产品所取代。当时的英国钢铁公司管材部,现称英国钢管公司(British Steel Tubes & Pipes)开发了Nodus体系,该体系有一种特制的比较简易的标准节点构件,以适用于他们定型生产的管杆件产品,并根据不同承载能力的需求生产不同的规格。所有规格的标准节点都必须取样在他们的科贝研究中心的专门设备上做破坏性试验,以检测它们的实际承载能力。同时还建造了一座全尺寸 $30.5\text{m} \times 30.5\text{m}$,高 1.52m 的空间网架结构模型(图1.14)进行实验,该结构模型在试验后被拆卸,并重新安装架立在英国吉尔福特的萨里大学(the University of Surrey),作为学校的空间结构研究实验室(图1.15)。

1968年在墨西哥城举办的奥林匹克运动会(Olympiad),建筑师Felix Candela、Antoni Peyri与Castenada

Tamborrel设计了一座用波纹铜板包覆的拱顶体育馆,其结构是由一系列的正交桁架拱所构成的一个 132m 跨度的双曲、双层空间网壳。¹²

1970年日本大阪世界博览会也展示了几座空间网格的结构,其中最有意思的就是位于会馆中心部位的象征大阪1970世博会主题的喜庆广场的 $291.6\text{m} \times 108\text{m}$ 仅支承在六根高出地面 30m 的柱子上的巨型空间网架,见第5章的图5.1。该网架的设计与安装将在第5章作比较详细的介绍。该工作项目的建筑设计是丹下健三(Kenzo Tange),结构设计是坪井善胜(Yoshikatsu Tsuboi),而悬浮在 7.6m 屋盖结构高度里面的展鉴品吊舱的设计人是黑川纪彰(Kisho Kurokawa)¹³。该世博会的有些馆都是由新生代建筑师们设计的,也都是采用了空间网格结构。例如,世博会塔(Expo Tower)是由菊武清则设计,而东芝馆和宝一美狮王馆也都是由黑川纪彰设计的。东芝馆(图1.16)的结构仅用了四种不同强度等级的总共1444个四面体模数单元组件。而宝一美狮王馆却是用了一种空间构架式的刚接模数单元组件装配成的立方形多层网架来建造的。其每一个模数单元组件用12根直径 100mm 的钢管预制弯成直角,然后每四根L型钢管为一束用节点板和弧型翼缘板将12根(分成三束——译者注)连接成一个三向等长的六肢臂。空间构架式模数单元组件之间的臂与臂的刚性

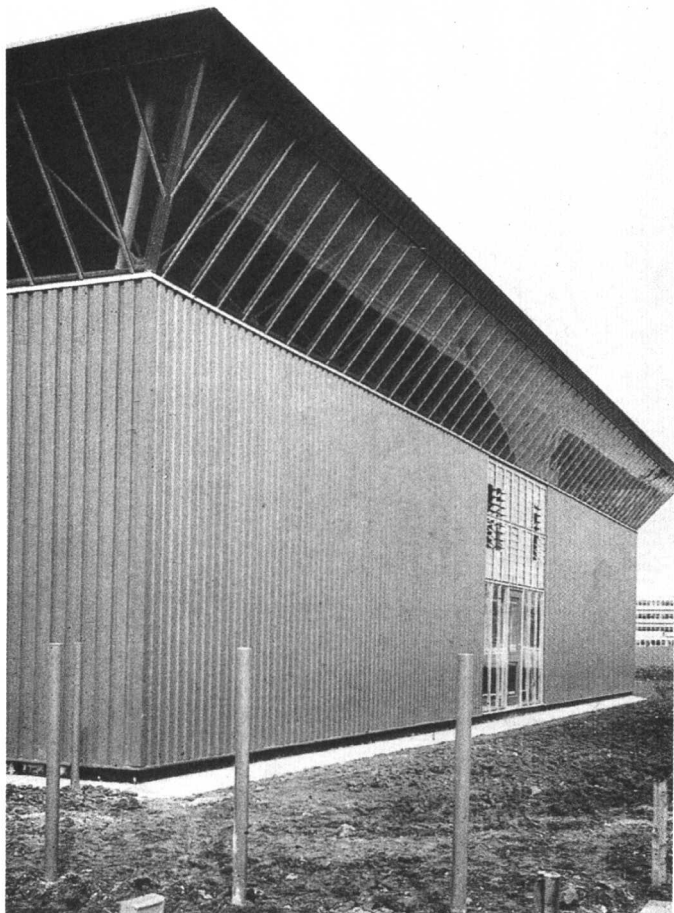


图 1.15

重新安装架立在英国吉尔福特萨里大学空间结构研究实验室的Nodus空间网架模型(照片: 经 British Steel Tubes & Pipes 同意)

栓接位置正好是构架梁柱的中点。总共用了约200个模数单元, 每个单元组件的外形尺寸是 $3.3\text{m} \times 3.3\text{m} \times 3.3\text{m}$, 这些模数单元的组装仅用了几天的时间。正因为这空间网格的模数单元组件和置于网格内的不锈钢展览品储仓都是预制装配的, 所以整个宝一美狮王会馆的安装也只用了个星期的时间。

建造于1970~1973年间的大跨度空间网格结构的标志性建筑是伦敦希思罗机场的英国航空公司飞机维修库(以前归BOAC所有), 由Z·S·Makowski及其同事一起设计¹⁴。飞机库屋盖是斜置的双层网格, 3.66m高, 在 $67\text{m} \times 138\text{m}$ 的平面范围内未设一根柱子。该空间网格结构没有套用任何专用系列产品的做法, 而是用工厂预制的钢管杆件在现场与网格的连接件栓接在一起。

在80年代, 没有单独节点构件的空间桁架的冷成型上下连续钢弦杆的应用导致了较廉价的轻型结构体系的发展。如起源于澳大利亚的Harley空间桁架体系对于中等跨度的建筑物来讲要比常规的门式框架更具有竞争力, 它在两个正交方向的连续弦杆都是“C”型截面, 在节点处背靠背地用螺栓连接在一起, 详述见第3章。

在80年代和90年代的初期, 英国分别推出了三种新体系, 其中的CUBIC Space Frame是一种空间构架式的模数单元体系; SPACEgrid体系是UNIBAT空间桁架体系的进化; 而Conder Harley空间网格体系则是澳大利亚Harley空间桁架体系的改进新版本。

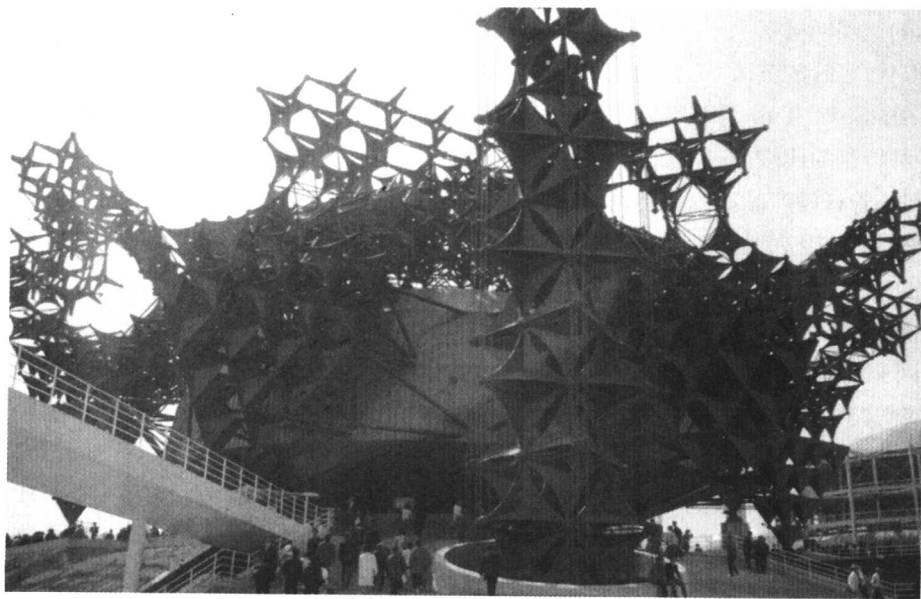


图 1.16

用四面体空间网格模数单元组件装配而成的1970年日本大阪世博会的东芝馆。建筑设计: 黑川纪彰(照片: 建筑协会照片馆Dennis Crompton摄)