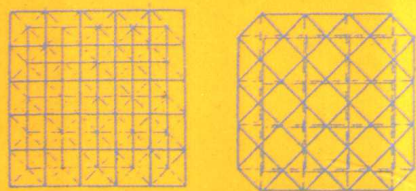




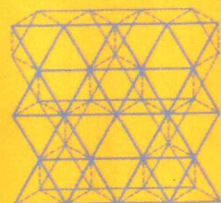
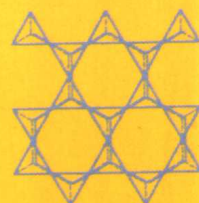
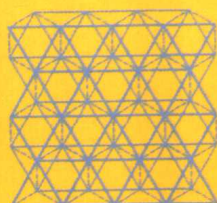
*Analysis,
Design
and Construction
of
Double-layer Grids*

刘锡良 主译著
陈志华 等译著

平板网架



分析、设计与施工



Z · S · Makowski 原书主编

天津大学出版社

平板网架分析、设计与施工

ANALYSIS, DESIGN AND
CONSTRUCTION OF DOUBLE-LAYER GRIDS

刘锡良 主译著

陈志华等 译著

Z. S. Makowski 原书主编



天津大学出版社

内 容 提 要

《平板网架分析、设计与施工》(Analysis、Design and Construction of Double - Layer Grids)是当代国际空间结构著名专家、英国萨里大学(Surrey University)土木工程系空间结构研究中心马考夫斯基(Z. S. Makowski)教授主编的。

书中阐述了平板网架的发展、类型、分析计算、极限状态分析、编程所需的形式代数理论、近似的拟板法、有限差分法、实验分析、制造与施工,已工业化和商业化的著名网架体系和节点、网架的防火性能、防腐处理等问题。书中反映了英、美、法、德、新西兰等国家发展网架结构几十年来的科研成就。书后还附有译著者在平板网架方面的部分科研成果,其中有些已纳入我国网架结构规范,在国内推广应用。

本书可作为高等院校结构专业本科生及研究生教材,也可供结构工程师、建筑师以及从事建筑设计、制造及施工的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

平板网架分析、设计与施工/刘锡良译著. - 天津:
天津大学出版社, 2000.4
ISBN 7-5618-1278-7

I. 平... II. 刘... III. 板-网架结构-研究
IV. TU356

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 14587 号

出 版 天津大学出版社
出版人 杨风和
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
印 刷 天津市宝坻县第二印刷厂
发 行 新华书店天津发行所
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 20
字 数 500 千
版 次 2000 年 4 月第 1 版
印 次 2000 年 4 月第 1 次
印 数 1-4000
定 价 26.00 元

前 言

本书是由国际著名空间结构专家、英国萨里大学(Surrey University)土木工程系空间结构研究中心主任马考夫斯基教授(Z. S. Makowski)主编的,是网架结构领域内容比较全面的一本专著。在1966~1993年间,他曾主持召开过四次大型国际空间结构学术会议,第五次会议将在2002年召开。

本书介绍的是空间结构中应用最广的平板网架,内容涉及理论分析、设计计算、试验研究以及典型结构体系和节点等问题。书中的形式代数理论对现在及将来空间结构的编程有较大帮助;介绍的各种成熟的商业化网架体系及节点对我国21世纪网架结构的发展有很大的借鉴意义;书中关于网架结构的防火和防腐研究对我国的工程实践亦有较大的借鉴价值;网架的极限承载能力分析、结构的运动(机动)不稳定性以及网架的典型试验与制作在书中也有详尽的叙述。这些内容均对读者有较大的帮助。

多年来,本人在指导研究生过程中,除使用自编的“平板网架设计”(1979年版)一书及其他有关中文参考书外,国外资料主要以该书为主。为了更好地发挥该书的作用,在征得作者同意的情况下,特组织人力翻译此书,同时对该书的内容进行了相应的调整和删改,并在书后加进了平板网架方面的基本知识,及译者近年来的部分研究成果。相信该书的出版将对我国空间结构的进一步发展会起到一定的推动作用。

该书由刘锡良主译著,陈志华等译著;历届研究生刘向阳、赵剑利、王晓波、王剑峰以及尹越、韩庆华、丁阳、程万海、潘延东等同志参加了该书的译校工作;刘健、徐玉平、王霭东、马成林等同志也参加过试译工作。

由于水平有限,不当之处,敬请指正。

刘锡良

1999.12

目 录

第一章 平板网架结构发展述评	(1)
第一节 引言.....	(1)
第二节 商品化的预制网架体系.....	(5)
第三节 平板网架工程实例.....	(10)
第四节 工程设计的有关问题.....	(18)
第五节 平板网架结构的效能.....	(18)
第六节 边界条件.....	(26)
第七节 不同类型的支承对平板网架中应力分布的影响.....	(37)
第二章 平板网架分析	(44)
第一节 结构分析方法.....	(44)
第二节 刚度法.....	(47)
第三节 计算机技术.....	(53)
第四节 线性有限元方法在平板网架中的应用.....	(55)
第五节 结论及算例.....	(64)
第三章 平板网架的极限状态分析	(67)
第一节 引言.....	(67)
第二节 一般理论研究.....	(68)
第三节 一个简单平板网架破坏的模型模拟.....	(69)
第四节 PASF——关于空间桁架破坏分析的一个计算机程序.....	(77)
第四章 平板网架的形式代数理论	(87)
第一节 形式代数的基础.....	(87)
第二节 形式图.....	(91)
第三节 形式函数.....	(98)
第四节 图形处理.....	(115)
第五节 节点编号.....	(126)
第六节 术语表.....	(132)
第五章 网架结构的拟板法	(135)
第一节 单层网架的拟板法.....	(136)
第二节 两向网架实例.....	(142)
第三节 交叉梁系平板网架的拟板法.....	(159)
第四节 角锥平板网架的拟板法.....	(159)

第五节	八种平板网架的拟板法分析及其比较	(162)
第六节	用拟板法进行平板网架初步设计	(175)
第六章	规则网架的有限差分法理论	(186)
第一节	理论假定及其应用范围	(186)
第二节	位移对称的规定	(187)
第三节	刚度矩阵的对称性	(188)
第四节	单连接的单步移动对称	(189)
第五节	周期解的边界条件	(190)
第六节	单连接的双步移动对称	(191)
第七节	双连接	(192)
第八节	工程结构中近似于“隔板支承”的条件	(192)
第九节	周期解的优点	(200)
第七章	平板网架的实验研究	(201)
第一节	实验模型	(201)
第二节	模型材料	(201)
第三节	节点连接	(202)
第四节	结构的相似性	(202)
第五节	应变测量	(203)
第六节	模型制作	(205)
第七节	解析结果和实验测定结果	(208)
附录 A		(213)
附录 B		(215)
第八章	平板网架的设计与施工	(216)
第一节	对建筑的初步考虑	(216)
第二节	网架的基本几何尺寸	(216)
第三节	初步设计	(221)
第四节	最终设计	(221)
第五节	施工	(222)
第九章	空间板体系	(225)
第一节	空间板体系简介	(225)
第二节	制造	(230)
第三节	装配与安装	(231)
第四节	应用	(233)
第五节	产品性能	(236)

第十章 诺得斯体系	(239)
第一节 结构形式.....	(239)
第二节 计算方法.....	(245)
第三节 设计手册.....	(247)
第四节 技术服务.....	(251)
第五节 现状及未来的发展.....	(251)
第十一章 米罗体系	(253)
第一节 米罗体系的应用范围.....	(253)
第二节 米罗体系的构件.....	(259)
第三节 网格选型.....	(263)
第四节 结构分析.....	(267)
第五节 表面防护.....	(269)
第六节 防火.....	(270)
第七节 施工.....	(270)
第十二章 模数空间结构的工业化	(274)
第一节 空间结构的防火性能.....	(274)
第二节 平板网架的结构体系.....	(274)
第三节 结构与建筑功能.....	(283)
第四节 结构楼板.....	(284)
第十三章 中国网架的构造和节点	(296)
第一节 网架结构的应用范围和优点.....	(296)
第二节 网架的结构体系.....	(297)
第三节 网架的杆件.....	(300)
第四节 螺栓球节点.....	(301)
第五节 焊接空心球节点.....	(304)
第六节 工程实例.....	(308)

第一章 平板网架结构发展述评

第一节 引言

新计算理论、新结构材料及新工业技术的发展对现代建筑产生了深远的影响,其中一个非常显著的特征就是空间结构的大量应用。空间结构能够满足建筑效果的要求,同时本身具有多方面的优越性。许多年以前,结构工程师们就认识到空间结构比传统的平面结构节省材料,并且,如果设计合理的话,预制的空间结构可以大大降低造价。

空间结构形式多种多样,它们各自的承载性能及分析方法互不相同。平板网架结构是空间结构的典范,也是最为常用的空间结构形式之一。现在世界上平板网架结构经常用于大跨度的工业建筑、体育馆、教堂、会议厅和展览中心等。

平板网架包括两组或更多组平行的桁架,桁架与桁架之间相互正交或斜交以承受垂直于网架平面的力。由于这种联结方式作用在结构处的集中荷载不仅由直接承重杆件来承受,而且其它杆件也要分担,这些杆件可能离荷载作用点很远。这样,直接受荷杆件的应力就减小,间接受荷杆件的应力就增加,从而在整个结构上形成了均匀的应力分布。事实上,结构性能的优劣通常要依据其传递荷载的范围或广度来判定。

在土木工程中用过各种类型的单层平板网架。图 1.1 为两向、三向、四向网格的结构型式。其中最常用的是正交正放网格,其杆件相互正交并且垂直于承重墙。

正交斜放网格由和墙斜交的梁组成。由于这种网格形式的刚度大,结构变形小,在工程中经常采用。

正交斜放网格和正交正放网格的基本区别是:前者的梁长 L 是变化的,因此,即使所有梁的截面尺寸相同,抗弯刚度 EI 相同,而它们的相对刚度 $\frac{EI}{L}$ 却区别很大。这就意味着那些角部的短梁,由于相对刚度大,为较长斜梁提供了中间支座,这些较长斜梁变成了两端带悬臂的支承于下沉支座上的连续梁。这种布置很大程度上减少了正交斜放网架中间梁的跨中弯矩。

比较两种类型网架的弯矩梁图可知,在简支正交正放网架中弯矩值大于正交斜放网架的弯矩值而且同号,正交斜放网架中较长的梁承受正负弯矩的作用。正交斜放网架的刚度大是因为梁内力大致沿均布荷载作用下简支板的主应力迹线分布的,正交斜放网架中的梁是布置在最需要的地方,因此,正交斜放网架的挠度总是比不带有角梁的正交正放网架的挠度为小。

通常三向网架形式多用于较大跨度和承受较大集中荷载的结构。三向网架的应力分布较两向网架均匀,但用料较多。为了经济起见,有时采用一种混合型的网架,即把普通三向网架中的杆件间隔抽掉,从而就形成了由等边三角形和正六边形组合的新颖结构。

再进一步简化就能得到六边形网架。但这种形式很少采用,一般主要用于建筑装璜上。

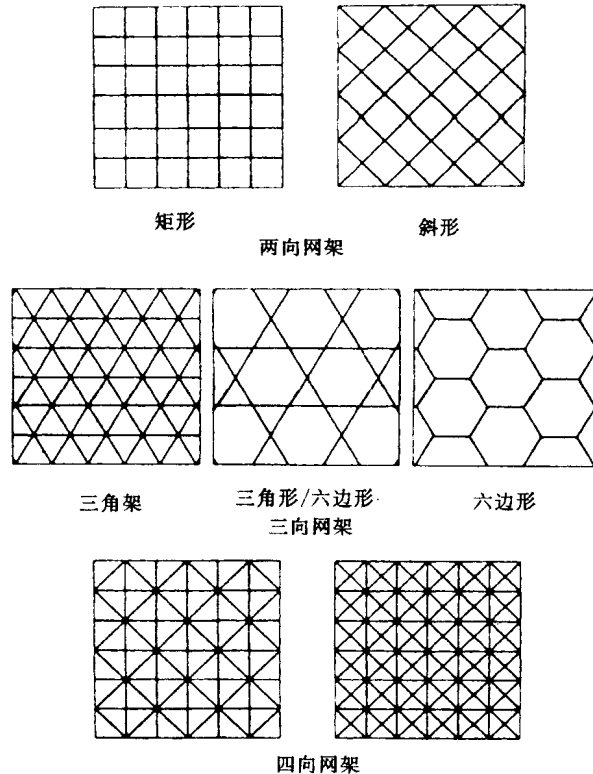


图 1.1 单层网架的基本形式

四向网架是矩形网架和斜形网架的迭加或组合,在实际工程中有所应用。

一般单层网架净跨不宜超过 10m。跨度再大时,采用平板网架更合适,但不宜超过 100m,大于 100m 就不经济了。

平板网架由两个单层网架组成(这两个网架形式不必一样),网架的上下两层互相平行,并以竖杆和斜腹杆连接起来。

平板网架属于骨架结构范畴,由大量汇交于节点的直杆组成。

单层网架主要承受弯矩的作用,而平板网架的杆件主要承受轴力,弯矩的消除导致杆件的强度得以充分利用。

由于平板网架可用于楼盖和屋盖结构,所以在实践中是一种特别主要的结构形式。又因为它具有以下优点,因此很快得到普遍应用。

(1)属典型的三维结构,外荷载可传递到各个方向。

(2)平板网架通常是高次超静定结构,在较大集中荷载作用下,任何单根受压杆的屈曲都不会导致整个结构的倒塌破坏。

(3)因刚度大所以挠度较小。

(4)分析和实验都表明平板网架比传统结构有更好的耐火性。

(5)平板网架可由在拼装台上精确预制的拼装单元装配而成,从而保证安装精度和速度。一些商业化的平板网架体系完全可以自我校准。由于构件的尺寸较小,从而在很大程度上简化了装卸、运输和安装。

(6)平板网架具备可扩展、可拆换及支座位置几乎任意的特点。这就使设计者在选用网架形式及柱位置时有很大的灵活性。在移去或移动某些柱子时都不会破坏框架的结构整体性。

(7)网架的底层和顶层之间的空间可用来安装和维修机械及电气设施,如供热、制冷和通风等。

(8)由于采用干施工法,平板网架的建造可在任意的气候条件下进行。

(9)经验表明平板网架能比其它任何结构体系更好地抵抗空袭或恐怖者的袭击和爆炸。它还能较好地抵抗水平地震力。

(10)平板网架令人愉快的规则形式提供了极富吸引力的外观,并成为许多建筑设计中极具魅力的一种风格。这也是许多建筑师在教堂、会议厅、展览中心的设计中不采用虚饰的吊顶而让网架下面暴露在外的原因。

为了经济起见,平板网架应最大限度地工厂内制作和组装,杆件的长度及强度有一定的偏差也是允许的。简洁的节点形式更是网架制作中很重要的一个方面。

运输中小拼单元的简易性、经济性以及现场的安装速度都是很重要的因素,拼装单元及连接的数量应尽量减少。

过去 20 年里最为显著的发展变化是逐渐形成了各种形式的平板网架体系。建筑师和工程师表现出的极大兴趣加快了平板网架的发展,大量商业化的预制网架体系已投入市场。

平板网架基本上有以下两种基本类型。

(1)交叉桁架系网架——由竖向桁架相交组成规则网架。这种类型在美国技术文献中有时被称为直接型网架,它由相似的两个平行网格组成,一层在另一层正上面,顶底两层网格方向完全一致。

(2)角锥型网架——由预制的锥体骨架组成,这些锥体的底面呈三角形、正方形、五边形或六边形。角锥型网架包括错动型和差异型两种网架形式。前者是由两个具有相同形式的平行网格组成,一个网格是把另一个网格在平面上平移而得到,但方向保持相同;后者是两个平行网格形式不同,但相互协调形成规则的形式。

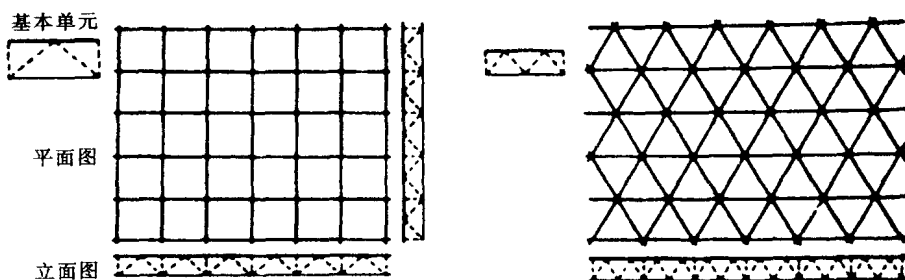
图 1.2 给出了平板网架最常用的六种形式,此外还有许多可能的变化形式,有时为了建筑需要或其它特殊原因而采用。

在预制网架中,尺寸的模数取决于许多因素,如跨度、荷载、屋面体系、节点形式、建筑造型、运输设施及施工工艺等。对一般的商品化产品而言,较多用到的是跨度为 30~40m 的网架,其杆件长度通常在 1.20~1.50m 左右(例如,标准空间板(Space Deck)屋盖单元的长度为 1.20m,单杆体系(Unistrut)单元长 1.22m。

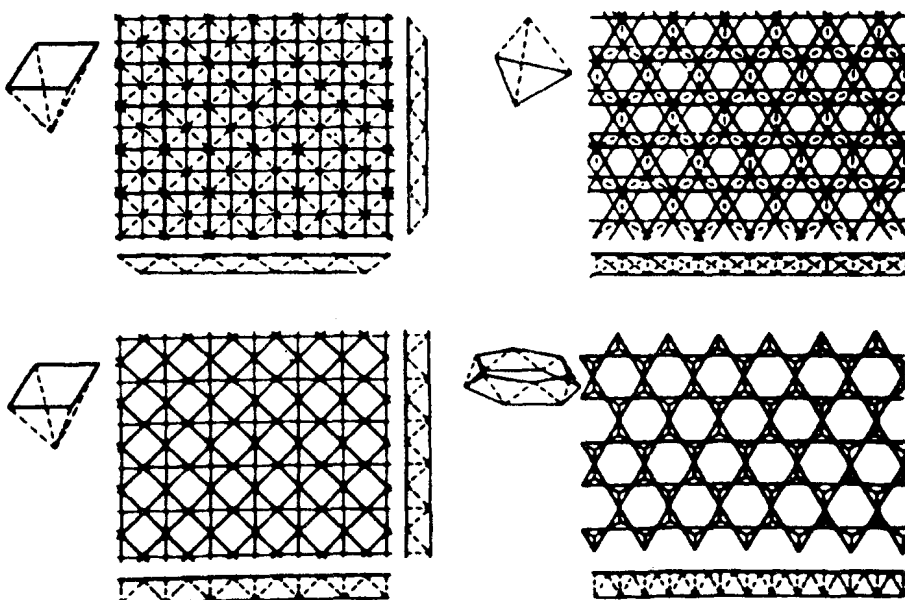
节点形式的选择主要根据是连接方式(螺栓连接、焊接或特殊的机械连接),它也受杆件形状的影响(钢管、T 形钢、角钢或宽翼缘工字钢),通常每种类型构件都有不同的连接技术与之相适应。焊接连接可得到最大强度。但在可由半熟练工人施工的预制结构中,通常采用螺栓连接。

一些简单的螺栓连接可能很浪费材料,因为孔洞在很大程度上减少了承载截面面积。但可以在车间制出简单的连接件,并焊接在预制单元上,然后在现场用高强螺栓连接,这就利用了杆件的全截面面积,Russ 体系、Unibat 体系和 Petroff 体系就是极好的例子。

回顾近来的发展可以看出寻求预制平板网架理想节点的探索还在继续。虽然已研制



交叉桁架系网架



角锥型网架

图 1.2 平板网架的主要形式

出了的许多种新型连接,但大多数太复杂且太昂贵,很少经受得住时间的考验。

利用一种可以进行三维加荷及尺寸测试的特殊拼装台,Stewarts 和 Lloyds 有限公司对适用于管材空间结构的各种节点形式进行了广泛的测试。Mannesmannröhren-Werke 股份公司公布了两向和三向平板网架的 Oktaplatte 焊接球节点的强度试验结果,试验是在 Karlsruhe 工业大学做的。近来也有些文章给出了加肋空心球节点试验细节,试验是在 Bucharest 建筑研究院做的。

节点的造价是影响平板网架最终造价的重要因素之一,适用于预制结构体系的节点应具有重复性、制作简单、易于大批量生产并且可以传递交汇于节点的各杆件的力。

螺栓球节点因其具有独特优点,在全球应用很广。许多管材结构的设计者都认为使圆管本身加工量最少是很重要的。最简易的方法是在管端垂直切下,再把它焊在杆端连接件上。但也存在许多其它技术问题,如设置管托、卷边、整平、杆端减缩和开槽等,由于

这些都是制作中的二次加工问题,从而增加了造价。

管材结构的一个优点是杆件外径可以是常量,从而简化了施工和节点形式。考虑到结构内力的变化而调整杆件尺寸时,通常只需保持管外径不变,而只改变壁厚。

理想的解决方式是得到一个能够承受同样大小拉力和压力的杆件,这在铰接结构中很难达到,因为杆铰接端引起了长细比的减小。可是,有些连接,例如 NODUS 体系,把管件设计成两端固支的压杆,从而提供了较强的约束。

一些体系,如 Oktaplatte 焊接球体系,每个节点上用两个半球和一块分隔肋板焊接而成,这就可以把半球和管用全焊接连接,格板在拼装前预制好,然后在工厂或现场用间隔垫圈作为误差调整板把节点装在一起。空心球的概念已经发展成了半球形式,尽管它连接的杆数有明显的限制,这种体系的应用(如 Segmo)在实际中已很普遍。

单个的螺栓连接在有些体系中经常用到,但一般是用于小跨度,并在某些情况下为了保证节点最大强度需要附加焊接。杆件尺寸经常决定了节点的形式,最后的方案经常由杆件的交角和保证施焊决定。

特殊工程和大跨度工程通常采用焊接连接,并可能节省连接材料(如复杂的节点板),实际经验证明,对净跨超过 70m 的平板网架,螺栓连接要比焊接昂贵。

对各种体系造价的比较表明,每个节点所属的面积平方米数是影响结构相对造价的一个最主要的因素。一位美国设计者 Kenneth C. Naslund 提出,一个好的设计其每个节点的平方英尺率在 200 到 450 之间,也就是说对于净跨为 200 英尺到 300 英尺(61m 到 91.5m)、弦杆长为 20 英尺到 30 英尺(6~9m)的双层网架比较经济。

有些体系为了避免网架上层杆件受弯而在节点上采用了特殊的支承系统以支承屋面材料,然而,大多数体系中,通常把屋面板直接放在网架上弦杆上。许多设计者建议弯曲应力和拉压应力的最优比率为 1:1 或更少,在焊接设计中,通常取 70% 的节点间距离作为压杆的有效长度。

第二节 商品化的预制网架体系

从世界范围内考察得知,目前约有几十家公司正努力实现平板网架的制作专业化,其中有许多结构就是由模数统一的单元组成,有的是用简单连接件把等长杆装配起来的预制体系。

据可靠记载,研究多层预制网架的试验是由电话发明家、著名的 Alexander Graham Bell 提出的;1906 年他同几位同事成立了航空实验委员会,试图把轻型飞机及双翼飞机制成三向预制结构;1907 年他用等长的杆及相同简单的节点建造了几个试验多层网架。他的网架是以预制四面体单元为基础的。其报告中就涉及到了这种预制空间网架的“异常”强度,他似乎是第一位说明怎样用可大量生产的单元制造简单、轻质、高强结构的工程师。他也注意到通过工业化和预制的方法来降低造价是可行的。

第一个成功地运用于工业建筑上的商品化平板网架体系是由 Ing. Max Mengerhausen 博士开发的,他于 1942 年把米罗(MERO)体系投放市场。这种体系用了一种特殊的连接件使得多到 18 根杆可同时连于一个节点上而不产生偏心。米罗体系在应用中有很强的灵活性,并且已经用在数以千计的造型及用途各异的结构中。

毫无疑问,米罗体系的成功和优点促使许多设计者重视了平板网架结构,并开发出了

一系列的其它体系。例如：

Oktaplatte	Russ system
Unistrut	Tessep
Space Deck	Baukastensystem
Octatruss	M-dec
Up-Right	IVAP
SDC systeme	Weimar
Triodetic	Berlin
Pyramitec	Cash
Tridimatec	Segmo
Pyramroof	Herisson
Unibat	Ohbayashi system
BX-58 grid	Treillis Pavlic
Space grid	Procédés Dziewolski
Nenk	Système Petroff
Varitec	Tosa-Spacedek
Catena	Proce' de PLR
Tridilosa	Ercim
Moduspan	Dolleans
Met-Ram	SAE-SMB'Tous Azimuts'
Tubaccord	SNCI-YZ-YOD
Geobau	Système Bouco
Multicube	Square grid deck
Mace	NODUS
Tetragrid	TRIDI 2000
Bamford	System Zachod

实际上还有很多种其它体系,但因为节点体系的构造太复杂,很多体系都没能取得商业上的成功。

预制平板网架的名单中最成功的是米罗(MERO)体系、单杆体系(Unistrut)、空间板体系(Space Deck)、毂式体系(Triodetic)、平屋顶体系(Unibat)、菱形桁架体系(Diamond Truss)和诺得斯(NODUS)体系。

一、米罗体系

这个体系在 1942 年首次使用,战后很快得到普及。开始它主要是用于临时性的展览建筑中,但近来它已相当普遍地用于许多永久性的工业建筑、教堂和会议厅中。米罗体系早已进入国外市场,用于建造德国本土以外的大跨度结构。按时间顺序讲,米罗预制体系可能是最早、最成功的预制平板网架商品化体系。

二、单杆体系

这个体系是由美国密歇根州 Wayne 市的 Attwood 开发公司开发的,用以配合大生产

技术,为房屋提供标准化的通用结构部件。这种结构重量轻并可用扳手或其它简单工具很快地安装在一起。结果证明用它建造的房屋不仅经久耐用,设计上也可灵活多样。其可扩性和可拆卸性是这个体系的固有特征。

第一个采用这个体系的建筑是 1944 年在密歇根州 Wanye 市的某个公司的厂房。1949 年, Charles W. Attwood 请密歇根州大学的工程研究所帮助他进一步开发这个体系以将它用到低造价的学校建筑上。他们合作后,做了大量的实验,最后得到的单杆体系于 1955 年投放市场。从那时起,成千个学校、工业建筑及仓库、展览厅、超级市场等采用了单杆体系,它也成为美国市场上最流行的结构体系之一。

该公司专门生产两向平板网架,标准模数的网架尺寸是 1.22m 见方。

单杆体系由长度一样、截面一样的网架杆件组成,标准杆件是用 12 号标准钢带轧成的槽钢做的,并用 1/4 英寸厚的轧制钢板制成完全相同的节点装配起来。网架顶层和底层的节点完全一样,杆件两端只用一个螺栓就把杆件连接在节点上。所有杆件都在特制的拼装台上安装,这样安装误差很小,使得单个杆件的安装很容易进行。应当说单杆体系是自我找平、自我校准的。

对正常荷载,就采用标准单元,对大应力区域需进行加固,只在结构原标准单元上加一些附加截面就可以了。因此,对大荷载和大跨度结构,不需改变基本装配部分。网架可在空中安装或地面装配完后用起重机或千斤顶提升就位。

施工时使用电套筒扳手。使用这种扳手,一个四人小组的平均装配速度是每 1.5m² 用 40 分钟。

该体系的名称最近已改为 Moduspan 体系。

三、空间板体系

该体系大约 1955 年在英国开始使用,并且是英国第一个商业化平板网架体系。以后它又不断地发展,现在已成为世界上的主要体系之一。

第一个海外空间板结构是 1954 年在缅甸建造的。从那以后,全世界采用这种结构的工程共 1000 多个,尽管其中有许多改进了设计和杆件的性能,但也只是原体系概念的发展,其基本原理一直没变。

该体系的基本原理之一是作到标准化。不同强度的要求是通过改变单元不同的组装形式、而不是改变单元本身来达到的。

以一种容易运输和安装的简单四角锥为基础,空间板网架具有相当高的强度、较轻的重量和通用性。

这种网架有两种高度:1.20m 和 0.75m,每种高度有三种类型的单元。

(1)轻型单元由一个开口正方形底面的锥体组成。四个管状斜腹杆一端接到由角钢做的 1.20m 正方形上弦框的四个角点上,另一端则连接在一个铸件节点上,这个铸件节点是左旋、右旋,并且是凸凹螺纹的,用来连接四个可调拉杆。

(2)剪切单元和轻型单元相似,但用实心斜腹杆和较大截面角钢框常用于支座附近或支座上。

(3)强剪切单元用更强的斜腹杆,是用于承受更大荷载时的支座节点。

单元施工时顶点朝下,角钢框互相对接后用螺栓连起来。底层用的是高强钢的拉杆。拉杆的松紧螺扣校正合适,以使网架安装完成后的调整屋面起拱简单易行。这对大跨结

构来说特别重要,在这方面,空间板体系优越于许多其它类型的平板网架。

迄今为止,空间板体系顺利完成的最大跨度已达 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 以上。钢结构的自重随所用的轻或重的单元数量而变化,对于跨度小于 $32.4\text{m} \times 32.4\text{m}$ 的结构,自重每平方米 $20 \sim 25\text{kg}$ 内变化

空间板结构体系中的 Claw 体系,主要用于学校和办公楼,是 Nenck 体系自然的发展,并且是 0.75m 高空间板单元的标准。在 $255\text{kg}/\text{m}^2$ 的附加荷载下,楼面的净跨以 $14.4\text{m} \times 13.2\text{m}$ 为模数。在标准的 $76.5\text{kg}/\text{m}^2$ 的附加荷载下,屋顶的跨度以 $22.8\text{m} \times 22.8\text{m}$ 为模数。

四、榫式体系

这个体系是由加拿大 F. Fentiman and Sons 有限公司开发出来的,当看到商业利益后,组建了称为榫式结构有限公司的子公司。

榫式体系依靠一种不用焊接、螺栓或铆接的连接方式。这种节点采用了一种压制榫,其中可以插入经过杆端加工处理的任何截面形状的杆件,这种连接可以用于任何类型的三维骨架结构,铝制榫有导缝或键槽,连接杆的杆端平压或精压得与键槽配套,用自动锤把杆件插入壳中。

尽管形状复杂,但压制技术使得造价低廉,因此这种连接可用于许多类型的平板网架。原来只有铝结构用此体系,但自从实验证明用两种不同类型的材料不会引起电解的麻烦后,现在许多空间结构都选择用钢管和铝榫节点。简单的拉伸实验表明,榫节点应力平均达到了铝管极限强度的 92% ,钢管极限强度的 91% 。

榫式结构的优点是:杆件制造精确,装配快速简便。

榫式结构以只供货或供货并安装经营两种方式销售于加拿大和全世界,当结构以只供货方式售出时,还要派一个现场监理来指挥施工,建筑工人的费用由购买者承担。由于榫式结构的连接是纯机械的,安装只需很少工人,所以现场安装费用很低。

从 20 世纪 60 年代早期起,世界上就开始有了榫式结构的建筑,其种类包括体育馆、商业中心、工厂、剧院、教堂、雨棚和展览厅等。

榫式连接的精巧外观成为建筑结构的一种极具魅力的风格。铝榫结构相对轻的自重和易于搬运的单个部件使运输特别是海外运输极为方便和经济。现场搬运和施工也极为简便,通常不用起重机。榫式平板网架净跨长已达到 33m ,用于长不超过宽的 1.5 倍的屋顶时最有效。基本模数可以为大约 2.7m 见方以内的任何尺寸。高度通常是平面模数尺寸的 70% 。

五、平屋顶体系

法国在大量的工业建筑中采用了 Monsieur S. du Chateau 设计的预制平板钢网架做屋盖,他研制开发了 SDC, Tridimatec, Pyramitec 及平层顶(Unibat)体系。

Tridimatec 体系指的是两向或三向的交叉桁架系网架,是一种对轻载中等跨度非常经济的结构体系。对重载大跨结构,S. du Chateau 更愿用 Pyramitec 体系。这种体系由预制的四面体或以正方形或正六边形为底的正锥体组成。预制单元用高强螺栓连在一起,底层由末端压平的管件在一个节点用一个竖向螺栓连接起来组成,有许多采用这种体系的建筑跨度已达 50m 。

S. du Chateau 体系里最成功的是平屋顶体系。它由锥体单元组成,锥体单元互相连接成一个稳定的三维平板网架,其中上层是斜向而下层是两向矩形网架,亦即斜放四角锥网架。在上层每个角上用一个水平螺栓把标准单元连接到相邻的单元上,而底层是用单个竖向螺栓将两向正放网格与标准单元连接起来。把一个标准的上下两层都平行于边界的矩形网架与平屋顶体系的形式比较分析表明,当和传统的矩形体系产生相同的挠度时,平屋顶体系用料少。这个性能的差别是由于形成平屋顶上层的斜放网架的刚度大。法国教育部选用了这个结构体系作为预制学校建筑的结构方案,自 1970 年以来,诸多的多层建筑以及体育馆、游泳池等用了这种体系。

平屋顶体系不仅在法国采用,在美国、英国也得以采用(特别是由 Robert Frazer and Sons 有限公司建造的)。以上提到的公司建造的典型平屋顶结构实例有在 Mildenhall 为皇家空军建的货运站大楼,结构覆盖面积为 $60\text{m} \times 89\text{m}$,用了 580 个模单元,钢结构总重为 283t。

另一个最有特色的平屋顶结构是伦敦希思罗(Heathrow)机场英国航空公司的可拆卸 BA 停车场,获得了 1971 年 Cominco Galvanized 钢结构设计奖。又在 1972 年获得了英国钢铁总公司钢结构设计奖。这个世界上第一个用平板网架建造的多层停车场,可存放 325 辆汽车,并且证明是非常经济的。

六、菱形桁架体系

日本许多松下空间网架专业公司中,最著名的是东京的巴组(Tomoegumi)铁工所。它拥有在主任设计师(Fujio Matsushita)博士领导下的专业空间结构分部。

该公司在日本及国外各地建造了大量的空间钢结构,他们擅长于设计和建造八种类型的结构,其中包括:穹顶(三种类型)、柱面壳(三种类型)、双曲抛物面壳(一种类型)及三向平板网架(一种类型)。

他们的平板网架注册的商标称“菱形桁架”,表示一种由相同的三角形组成的特殊空间网架,它是由预制的大尺寸杆件组成的三向网架。

施工是一个接一个地形成三角形来实现的,装配时不用拆卸脚手架。菱形桁架体系已用于大跨结构,如飞机库、汽车棚、厂房、仓库、体育馆、会议厅、学校等。

日本发展空间钢结构是很显著的,过去日本是一个无空间钢结构国家之一,而如今早已拥有许多空间结构专业公司。巴组铁工所是最大的一个公司,有先进的制造设备和高素质的工程技术人员队伍(工程师和建筑师)。

七、诺得斯体系

诺得斯体系是由英国钢铁公司的管材部在 1972 年开发的,并很快显示了它对建筑业突出的影响。不仅在英国,而且也在其它国家,大量的建筑都是用诺得斯体系建造的,包括伯明翰的国际展览中心(NEC)这样复杂的结构,到目前为止国际展览中心还是采用诺得斯体系最大的单项工程,它包括总共 93 个完全相同的网架,每个 $30\text{m} \times 30\text{m}$,网架覆盖总面积为 $83\,300\text{m}^2$ 。

诺得斯节点的研制成功是位于 Corby 的英国钢铁公司管材部研究中心数年的研究及大量试验的结果。诺得斯的主要特性就是所有制作全在车间进行。这样,现场结构安装只需要最简单的安装技术,使节点安装不会出错,因此施工是确保质量的。

在 Corby 研究中心进行的诺得斯节点试验是各向同时加载的,这些试验使节点达到屈服强度,测出了最大工作荷载,并发现由于节点的构造,诺得斯节点上杆件承受压力要比承受拉力高 15%,这种节点设计合理,适用于自动焊接工艺。

在诺得斯体系提供给建筑业前,公司设计制造并试验了一个足尺寸模型结构。这个结构在测试完以后,英国钢铁公司把它赠送给了瑟雷大学的土木工程系,并用它建成了空间结构研究中心,其覆盖面积为 $30\text{m} \times 30\text{m}$,网架高为 1.5m,布置形式是上正下斜。

地面施工完成后,整个屋盖提升起来放在柱上,在 Corby 加载试验时,上弦悬吊了水箱做为模拟荷载,水箱逐渐充水产生一个相当于自重加 1.5 倍超载的总荷载,这个荷载持续了 24 小时,撤去荷载后,记录到只有 4% 的残余变形。

第三节 平板网架工程设计实例

除了大批用商品化预制体系建造的平板网架外,还有大量专门设计和制作的节点和结构用于特殊的工程上。

平面尺寸为 $60\text{m} \times 196\text{m}$ 的阿姆斯特丹的展览厅采用的钢管平板网架就是一个典型例子。其覆盖面积为 $11\,460\text{m}^2$,屋盖网架由 16 个单元组成,每个单元的尺寸为 $15\text{m} \times 38\text{m}$,整个屋盖支承于 16 根柱上,空间网架排成四行,每行四块,全用 10.6m 宽、4.8m 高的升高块沿 60m 方向连接起来,结构上的总荷载为 $150\text{kg}/\text{m}^2$,包括了 $50\text{kg}/\text{m}^2$ 的雪荷载和钢结构自重的 $35\text{kg}/\text{m}^2$ 。

另一个实例为比利时 Bornem 的 Brown Boveri 仓库,它是边长 41.48m 的正方形,分成四个正方块,每块支承于角柱上。此屋顶是一个标准单元为 2.44m 的正方形的三角格构梁空间网架体系。在地面上组装焊接三角形空间桁架形成网架的标准单元,然后用一个简单的带螺纹的部件联接起来,节点体系基本上是一个用扳手拧紧的长螺栓。

在美国,无数的会议厅和礼堂兼体育场所都是用平板网架建造的。一个典型的实例是加利福尼亚大学洛杉矶分校建造的 Edwin W. Panley 体育中心,其覆盖面积为 $91\text{m} \times 122\text{m}$ 。这个空间网架由 108 个四面锥组成,网架下层杆件联接四面锥的顶点,并平行于建筑的周边,相互连接的锥单元的平面尺寸完全一样,但高度有变化,屋面从中心的 9m 倾斜到边上的 5.5m,屋顶形成排水坡度。使用两向平板网架建造的体育馆建筑的另一个相似的工程实例是南卡罗来纳大学的体育馆。

预制体系的商业公司总是梦想在同一场地上建造由许多完全一样的展厅组成的综合性展览馆建筑。一个极有代表性的例子就是在巴西 Sao Paulo 的 Anhembi 公园里用铝管建造的两向平板网架,它是世界上最大的铝结构,覆盖面积为 $260\text{m} \times 260\text{m}$,在现场是作为一个整体提升上去的。该结构是传统的方形网格网架,其中的斜杆形成以正方形为底的锥体,节点间距为 3.3m,高度为 2.4m。为了减少支座点的局部反力和空间网架“板”的有效跨度,柱子向上延伸出成组的四个支承臂,常被称作树状支承。每组支承于一个上下铰接于一个方向上的双肢架上,把所有的双肢架布置得面向建筑中心,就可以提供足够的刚度来抵抗作用于双肢架上荷载方向的水平力,同时允许整个屋面自由径向伸缩。