

* * * * *

* 一、空间平板网架结构 *

* 二、西德网架结构及其节点的应用和发展 *

* * * * *

天津大学土木系 刘锡良

一九八七年六月

目 录

一、空间平板网架结构

(一) 概 述	1
(二) 平板网架种类和设计要点	6
(三) 平板网架计标	12
(四) 节点构造和网架单元	34
(五) 网架吊装特点	44
(六) 网架今后发展和研究课题	46
(七) 平板网架例题	48
主要参考文献	51

二、西德网架结构及其节点的应用和发展

(一) 前 言	71
(二) 网架应用范围及网架形式的特点	72
(三) 网架节点体系的改进	74
(四) 对当前我国网架科研工作的一点建议	80

空间平板网架结构

天津大学 土木系 刘锡良

一、概 述

(一) 空间钢结构近年来广泛得到发展的原因

空间网结构是一种多次超静定结构，解算相当繁琐，手算几乎不可能。过去由于某些需要，也曾通过一些工程实例，但也都是采取极其近似的简化手算方法，进行内力分析，然后用加大安全系数的办法，选择截面，以弥补由于近似计算而带来的不准确，这样也造成了极大的浪费。因此，过去多年来空间网结构得不到发展。

近年来，所以发展很快，主要原因是电子计算技术的迅速发展，变手算为电算，不但解决了极其复杂的计算问题，而且解算速度快，精度高，同时还可以进行大量多种方案计算，这给发展空间网结构创造了极大的方便条件。另一个原因是空间结构的节点获得了良好的解决，如空心球节点，螺纹球节点等。空间网结构的每个节点，汇集了很多杆件，少则5至6根，多则18根以上，这样就需要有一种安全可靠，构造简单，施工方便的空间节点。以上两点都比较关键。其次一个原因就是高强度钢材获得采用，也推动了空间网结构的发展，如国内的16锰钢和16锰桥等，国外还有强度更高的钢材，已列入规范，或即将列入规范。高强度钢材对大跨度结构，更为适宜，减轻结构自重，节约钢材都起到很大作用。

(二) 空间网结构的分类

空间网结构一般分为三大类，即折板结构、悬索结构和网架结构。

折板结构是由许多实体或桁架式的折面组成直线形、梳子形、圆形形的，它既可用于钢结构、也可用于钢筋混凝土结构。我国用钢筋混凝土折板较为普遍，而钢结构的折板很少，主要耗费钢材，但在国外还有不少钢折板的实例。第二大类是悬索结构，1960年前后，我国曾盛行一个时期，但建成的实例不多，如直径94米的北京工人体育馆（圆形双层悬索屋盖——车轮形），80米×60米椭圆平面的浙江体育馆和24.6米×36.6米椭圆平面的天津大学健身房等。后两个工程都是采用空间曲梁负高斯曲率的马鞍形双曲抛物面的悬索屋盖。在国外悬索结构应用较多，特别大跨度结构中悬索结构的索网受拉，用高强度钢丝承受，支承钢索的受压构件，用钢筋混凝土承受，这样受力合理，更有效地利用材料的特点，从而达到节省钢材的目的。但我国高强度钢丝，供货尚有一定困难，施工稍复杂一些，特别是支持索网的边梁（环）或中间环，消耗钢材较多，如北京体育馆中间环为一个直径16米高11米的较大全钢结构，而边梁的钢筋混凝土截面又很宽很厚。浙江体育馆的空间曲梁截面宽200厘米、厚80厘米。第三大类为网架结构。网架结构是由许多杆件组成较复杂空间杆系结构，它分有平板型网架、筒形网架和穹窿。其中以平板网架近年来应用广泛，其优越性在下一小节专门叙述。筒形网架国外使用较多，由于网格拱起，弯曲受力较小，但需增设边缘构件，以承担两端产生的推力。这种结构我国只有两个工程采用，一个是1964年建筑的浙江寿昌县横山钢铁厂铁合金车间原料库（24米×60米），为五个基本长壳（12米×24米）组成。一个是即将兴建的本溪钢铁公司

1700 毫米热轧钢板车间板坯库屋盖 (30 米 $\times$ 240 米)，为由 20 个基本单元 (12 米 $\times$ 30 米) 组成，内並沒有 35 吨吊车。第三是因穹隆，它只有在特殊需要的情況下才用，一般未用较多。我国有几个工程未用的还不是网状因穹隆，而是肋形或肋环的因屋顶，如上海杂技场，广州中山纪念堂以及郑州体育馆等。

(三) 平板网架的优越性

网架结构中平板网架采用较多，其优越性大体归纳以下几点：

(1) 网架结构空间受力，可节约大号钢材，如采用更合理的截面 (如钢管) 和节点，则节约钢材更为显著。有的可达到同跨度钢筋混凝土结构中含钢量，既可减轻了重量，又节约了大号钢材、水泥和木材。

(2) 不但适合中小跨度，对大跨度结构更为有利。根据许多大跨度工程的设计与实践，在作比较方案时，平板网架方案经常是较优越方案。

(3) 建筑高度小，整体刚度好。同跨度下，网架建筑高度小 ($\frac{1}{15} \sim \frac{1}{20} l$)，这就带来一系列好处，如减小建筑物高度，节省空间等。建筑高度小，而整体刚度大，这对结构受力和使用均有利的。

(4) 抗地震荷载有利，钢网架自重轻、延性好，可吸收大号的 earthquake 能量。根据近年震区调查，平板网架工程均完全无损。

(5) 对承受集中荷载、非对称荷载、局部超载均为有利，并较好地承受提升时各点差异和地基不均匀沉降。

(6) 网架杆件和节点尺寸形状有大号相同，因此，可作成标准零件，杆件和单元，并可在工厂中成批生产，有利于提高

生产效率，降低造价。由于尺寸小，贮存、装卸、运输、拼装、吊装都很方便，网架可根据需要随时加大或缩小，同时非熟练工人亦可拼装。

(7) 网格尺寸小，可采用小规格和取材较易的杆件，并便于采用轻型屋面。

(8) 便于吊顶、贯穿管道、灯光等设备及安置横向或纵向悬挂吊车。

(9) 计算简便（精确法已有空间桁架法的通用程序，近似法也有图表可查用）。

(10) 屋面布置灵活，建筑造型好，轻巧、美观大方、便于建筑处理，为建筑设计人员所常用。

（四）国外应用概况

国外网架结构，已采用20多年，不仅用于大跨度，如体育馆、展览馆、游泳池、大会堂、超级商场等，而且在中小跨度的结构中，或临时性的结构中，也应用很广。大柱距大柱网的多层车间，很多采用了平板网架，特别值得注意的是在多层楼、房中的楼板也采用了网架结构，获得了良好的经济效果，不但在工业发达多钢多的国家，而且在缺钢的国家，也在大力推广平板网架。

国外网架多数已定型，商品化。根据本国的情况各个国家均有自己独特的网架典型节点、杆件和单元。如西德的卡罗（Mero）节点，和米罗杆。英国的空间板（Space Decks）单元，和诺得斯（Nodus）节点。美国的单杆（Unistrut）零件。法国的平板顶（Unibat）单元。加拿大的毅武（Triodetic）节点和东德的嵌楔式（U型U）节点等。

国外平板网架已作到很大跨度，几个典型例子，如表界上

得前跨度最大的瑞士苏黎世克洛滕喷气机机库 ($125\text{m} \times 128\text{m}$ 100 点支承) 的三层网架。美国洛杉矶加利福尼亚大学体育馆 ($91\text{米} \times 122\text{米}$)。英国—巴机库 $83\text{米} \times 171\text{米}$ 。日本大阪国际展览馆 ($108\text{米} \times 292\text{米}$, 支于 6 根柱上)。国外还建有一些网架群, 如西德在杜西迪夫 (Düsseldorf) 建造一个 102600米^2 的平板网群, 由 114 个单元组成, 每个单元 $30\text{米} \times 30\text{米}$ 支于 4 根柱上。

(五) 我国近年来应用情况

我国采用网架结构, 也有十几年的历史, 到目前为止, 据不完全统计已建成, 正施工和正设计的已将近 100 项工程, 其中已建成的有三分之二, 跨度有大到 110 米, 小到 10 米的小网架, 均取得了良好的经济效益。大跨度体育馆和广场, 就有十几座, 多采用三向或二向交叉桁架体系, 而多数采用了钢管空心球节点, 如上海体育馆 ($D=110\text{米}$), 江苏体育馆 (平面为八角形 $76.8\text{米} \times 88.68\text{米}$)。辽宁体育馆 ($D=91\text{米}$)。上海文化广场平面为扇形 $76.14\text{米} \times (82.8\text{米} + 138.16\text{米})$ 。福建体育馆 ($54\text{米} \times 67.5\text{米}$)。山东体育馆 ($62.7\text{米} \times 74.1\text{米}$)。保定体育馆 ($55.43\text{米} \times 68.42\text{米}$) 等。也有少数用四角钢截面、钢板节点, 高强度螺栓连接的, 如我国最大的首都体育馆 ($99\text{米} \times 112\text{米}$), 巴基斯坦体育馆 ($93.6\text{米} \times 93.6\text{米}$, 支在 4 根柱上) 等。另外中小跨度则多数采用斜放四角锥组成的空间网架, 如面向交叉桁架体系, 已建成的有几十座, 如中小型体育馆、俱乐部、礼堂、剧院、食堂、候车室等, 其中典型的有我国首先采用斜放四角锥网架空心球节点的天津市科委礼堂 ($14.84\text{米} \times 23.32\text{米}$), 河南南阳某工区车间 ($17.5\text{米} \times 25\text{米}$), 北京国际俱乐部 ($40\text{米} \times 40\text{米}$), 大同矿务局云岗俱乐部 ($25.48\text{米} \times 35.7\text{米}$), 上海师范学院球类房 ($31.5\text{米} \times 40.5\text{米}$), 石家庄兰球馆 ($36\text{米} \times 36\text{米}$),

上海体育馆和体育馆 (35米 $\times$ 35米) 等。其中多数采用钢管球节点四角锥网架, 也有采用钢管截面板节点和角钢截面板节点的。

另外有些平板网架具有某些特点, 如天津二七形馆的网架是采用铸造的空心球节点, 天津塘沽车站候车室网架采用空格三角锥, 呼和浩特铁路局俱乐部和北京全国工业学大庆展览馆 (15.6米 $\times$ 15.6米) 都采用了螺栓球节点。上海电视塔演播室 (26米 $\times$ 31.2米), 采用上弦为钢筋混凝土的杆件的网架, 山西大同云岗矿食堂 (18米 $\times$ 24米), 采用了斜放四角锥体系, 转45°形成上弦正放, 下弦斜放, 这样屋面板类型由三种减到一种。天津四化道食堂 (24米 $\times$ 54米) 本面为也比较大的一个工程, 但也取得了经济效果。

总之, 网架在我国正迅速发展, 特别是地震后的唐山地区, 一年来发展就更快了, 现已造成和正在施工和设计的已达十几座。

1978年1月5日至12日在天津市召开了全国第一次网架技术经验交流会, 相信今后我国网架的发展, 将会更加迅速。

二、平板网架种类和设计要点

(一) 平板网架种类

从支承情况分有周边支承、四点支承、多点支承、四点支承无限连续和悬臂等。

从网架层数分有单层、双层和多层。平板网架多采用双层, 在某些高矩较大处, 也有时采用多层。单层网架多用于曲面网架中。

从网架形式分, 可分为两大类。一为交叉桁架体系, 二为

空间桁架体系。

1. 交叉桁架体系——为由相互交叉的平面桁架而组成

(1) 双向正交正放网格 (如图1)

双向正交正放网格通常也称井字梁或网格梁。一般周边支承采用较少,因其受力和刚度均较其他类型网格为差,而且平面由许多方格组成为几何可变体系,这就必须设附加支撑(如虚线所示),增加了用钢量。根据研究分析得知这种型式对四点支承还是有利的,比用周边支承跨中最大弯矩和最小挠度都较小,其比例分别为6:7和5:7,因此,四支柱的援巴体育场网架和多支点的保定体育馆即采用了这种网格。

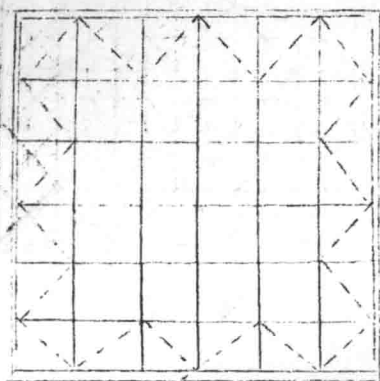


图 1

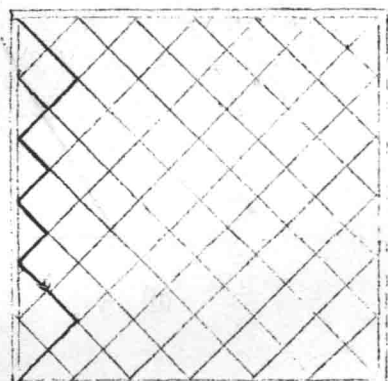


图 2

(2) 双向正交斜放网格 (如图2)

双向正交斜放网格,较正放的性能好,刚度大,它是由许多长桁架与短桁架组成。长桁架两端近支承处均有刚度较大的短梁支承着,对长桁架起锚固作用,在该处产生负弯矩,从而减小了跨中正弯矩。由于在近端部产生负弯矩,在网格四个角部的支承处产生的反力不是压力而是拉力,其数值往往很大,

致使柱顶上的拉力支座构造复杂。如将单柱改用二个，则拉力减小一半，使拉力支坐简化，北京国际俱乐部网架就采用了这种方案。

(3) 三向网格(如图3)

三向网格受力均匀，较以上两种型式刚度大，适用于较大跨度，我国几个最大跨度的体育馆和厂坊均采用这种型式。这种网格适用的平面为三角形，梯形和六边形，对圆形平面四周边缘则出现不规则的网格。这种网格杆件较多，每个节点汇集的杆件多达13根，因此耗钢量也较其他型式为高。

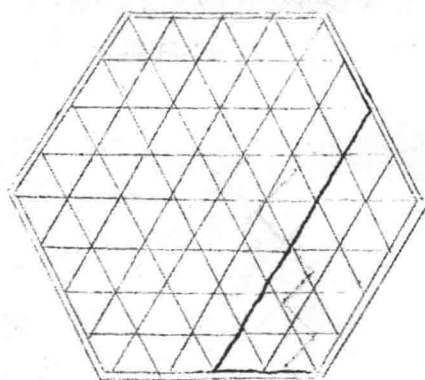


图 3

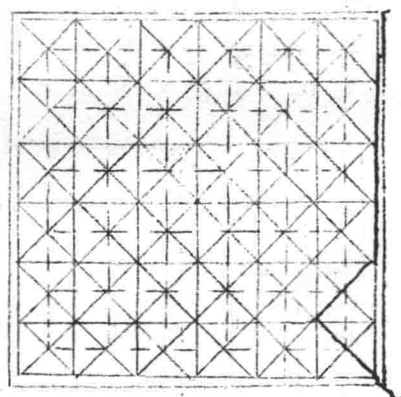


图 4

2. 空间桁架体系——由各种锥体组成的网架，如四角锥、三角锥和六角锥等，这种体系较交叉桁架体系空间受力性能好，刚度较大，为比较醒目的空间结构。

(1) 正放四角锥(如图4)

各四角锥锥底边与边相连，并平行边界而组成的网格为正放四角锥，其上下弦等长并错开半个网格。国内采用这种型式的较少，只有上海师院球类房和杭州歌剧院采用。上海航空俱乐部网架则采用这种型式的空格形式，在每个节点汇集的杆件均为

8根。

国外采用较多，如美国的空问板 (Space Decks) 单元，和美国的单杆 (Unitrat) 体系，即拼装成正放四角锥网格。

(2) 斜放四角锥 (如图5)

各四角锥之底角与角相连，并与边界成 45° 角而组成的网格为斜放四角锥。它是一种受力较好，杆件较少的一种网格，具有一系列优点。首先，网架上弦受压，杆件较短，而下弦受拉，杆件较长，这样布置是合理的。另外节点汇集杆件也较少，下弦为8根，上弦仅为6根。天津市科委礼堂网架于1966年首先采用了这种型式，由于采用了较合理的截面 (钢管) 和较好节点 (空心球节点)，耗钢量仅 6.26 公斤/米²。一般中小跨度多采用。对于大跨度工程实践，国内最大跨度的工程为大同矿务局体育馆 (42.4 米 $\times$ 58.4 米椭圆形平面)。我国现已建的网架工程有一半以上采用了这种型式。

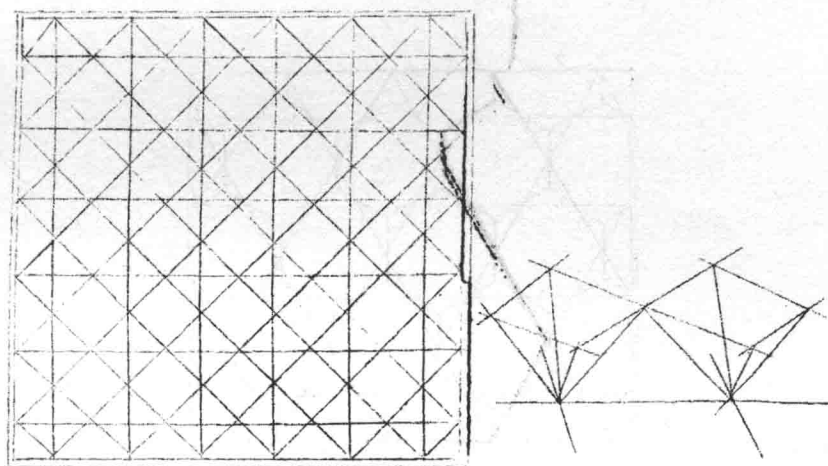


图 5

(3) 三角锥网格 (如图 6)

三角锥网格由三角锥组成,也就是四面体与八面体组合而成的网格。它受力均匀刚度大,每个节点汇集的杆件均为9根,如果网架高度选得合适,全网架杆件等长,如果节点都一样,给施工带来很大的方便。我国只有广州火车站候车室采用了这种网格并叫锥壳网,这样下弦形成许多三角形和大边形,而上弦仍为三角形。这种网架未用多久,有待进一步总结。

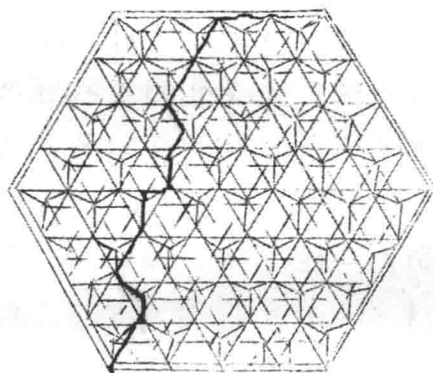


图 6

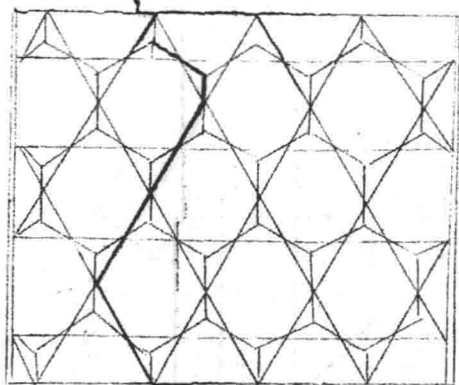


图 7

(4) 三角锥蜂窝型网格 (如图7)

它是最新的一种型式，很多国家都在进行研究。它与斜放四角锥有相似之处，上弦受压，杆件短，下弦受拉，杆件长，上下弦节点汇集的杆件数均为6根，为所有网架型式中最力的一种。我国唐山开滦矿务局曾在林西矿的工程中采用这种型式，耗钢量较斜放四角锥稍小一些，下弦内力比上弦内力约大一倍。

(5) 六角锥网格 (如图8)

这种网格国家建委研究院曾在南京车站候车室中准备采用，并进行理论与试验研究，后因材料供应关系改用其他方案，其上弦节点汇集12根杆件，构造复杂很少采用。

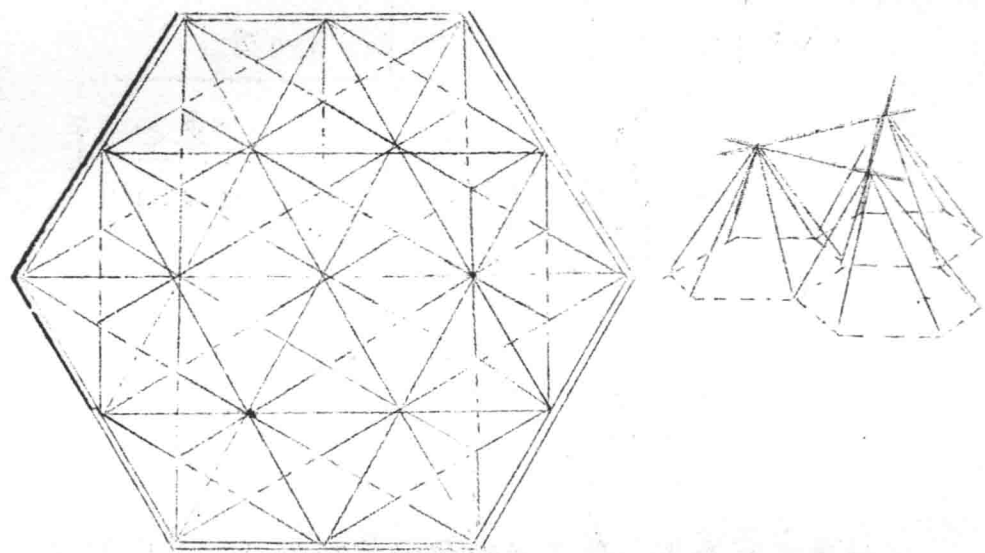


图 8.

(二) 设计要点。

1. 选型：根据建筑物的平面形式、尺寸，支承情况等因素，选取不同的网架型式。一般跨度较大时宜采用三向或三角锥网架；较小时宜采取二向或四角锥网架。我们曾对平面为

40米×40米，荷载为150公斤/厘米²，用五种不同型式的钢管球节点网架进行计算，其耗钢量（杆件未进行归类）见表1所列（如杆件进行归类网架自重 $g \approx (0.6 \sim 0.7) q$ ，此处 q —— 网架平面最小跨度）：

表1

型 式	耗钢量(公斤/米 ²)
双向正交正放	14.78
双向正交斜放	13.97
三 向	17.92
正放四角锥	13.50
斜放四角锥	11.78

表2

跨 度 (米)	采用网架数(个)
小于 20	5~7
20~40	7~10
40~80	10~14
80以上	14~20

从结果可以看出，除三向的耗钢量稍大外，其它都相差不多，而以斜放四角锥的耗钢量最低。

2、网架厚度

一般从采用最小跨度的 $1/12 \sim 1/20$ 为宜，最常用的为 $1/14 \sim 1/16$ 。

3、网架尺寸

腹杆斜度宜为 45° 左右，太平坦或过陡均对受力和构造不利。基于这个作法，建议见表2所列。

4. 起拱

对一般中小跨度的网架，因其刚度较大，可不必起拱。

5. 屋面坡度

一般可采取在上弦节点上立不同高度的小短柱的办法。也可上下弦同时起拱（坡度一般1~4%），其竖杆可垂直屋面，另一个方向的杆架倾斜，上下弦不在一垂直面，如竖杆垂直于地面，则上弦节点板复杂了，如采用钢管球节点，则无此问题。

6. 杆件截面

由于钢管具有承载能力高等一系列优点，应尽量选用钢管截面。为了进一步节约钢材，宜采用高强度钢材。

三、平板网架计算

平板网架计算一般分精确法和近似法两大类。

(一) 精确法

将网架结构理想化为空间铰接杆系桁架结构，用矩阵位移法（或称刚度法）进行分析。其计算模型属于离散型模型。这种方法适合于任何型式、任何边界条件的空间网架。其求解方法如下：

1. 根据位移法各节点平衡条件建立刚度方程求位移

$$\{P\} = [K]\{\Delta\} \quad (1)$$

式中： $\{\Delta\}$ —节点位移列阵，

如网架节点为 n ，

$$\text{则 } \{\Delta\} = \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_i, \Delta_n\}^T$$

$$\Delta_i = \{u_i \quad v_i \quad w_i\}^T \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

u_i, v_i, w_i 分别为节点 i 沿 x, y, z 方向的位移。

$\{P\}$ — 节点荷载列阵；

$$\{P\} = \{P_1 \ P_2 \ P_3 \ \dots \ P_i \ P_n\}^T$$

$$P_i = \{P_{ix} \ P_{iy} \ P_{iz}\}^T$$

P_{ix}, P_{iy}, P_{iz} 分别为节点 i 沿 x, y, z 方向的分力；

$[K]$ — 总刚度矩阵，由杆件单元刚度矩阵按节点编号的关系累加而得。

2. 根据求出的各节点位移求杆件内力

$$S_{ij} = \frac{E_{ij} F_{ij}}{l_{ij}} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i - u_j \\ v_i - v_j \\ w_i - w_j \end{Bmatrix} \quad (2)$$

(二) 近似法

各种不同形式的平板网架，有其不同的近似方法。其计算模型有属于连续化模型（如交叉杆架体系用差分或级数解其微分方程），也有属于离散性模型，建立差分方程式（如斜放四角锥以假想弯矩为未知数，正放四角锥以弦杆内力和挠度为未知数）。

1. 交叉杆架体系（网格梁）平板网架计算

(1) 弹性平板弯曲基本方程式（周边简支）

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{q}{D} \quad (3)$$

(中间一项是扭矩影响, 如忽略之则和梁中 $EJ \frac{d^4 w}{dx^4} = q$ 相似.)

式中: $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 板的柱状刚度

$\nu =$ 泊松比

首先解上式, 求以 x 和 y 为函数的 w 值, 然后再代入下列各式求 M 和 Q , 得出

$$M_x = -D \left(\frac{d^2 w}{dx^2} + \nu \frac{d^2 w}{dy^2} \right) \quad (4)$$

$$M_y = -D \left(\frac{d^2 w}{dy^2} + \nu \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \quad (5)$$

$$M_{xy} = -D(1-\nu) \frac{d^2 w}{dxdy} \quad (6)$$

$$Q_x = -D \left(\frac{d^3 w}{dx^3} + \frac{d^3 w}{dxdy^2} \right) \quad (7)$$

$$Q_y = -D \left(\frac{d^3 w}{dy^3} + \frac{d^3 w}{dx^2 dy} \right) \quad (8)$$

(2) 网格梁的偏微分方程式

将桁架假变成刚度相当的梁, 然后再按刚度相等的交叉(梁)桁架的近似理论求解。

① 双向正交(正放、斜放)刚度相等 ($\Delta x = \Delta y$; $EJ_x = EJ_y$)

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{q}{EJ_h} \quad (9)$$