



网架楼盖的设计与工程实践

姚发坤

# 网架楼盖的设计与工程实践

姚发坤

(长沙市建筑设计院)

## 一、概述

随着科学技术和生产的不断发展,人们对建筑物的使用提出了更高的要求。大跨度的灵活空间不仅为建筑师所喜爱,用户也普遍感到较小的柱网尺寸满足不了多功能的灵活使用,因此大跨度、大柱网尺寸的多层建筑越来越多,象多层体育馆、多层展览馆、多层商场、多层餐厅、多层工业厂房、多层仓库以及多层车库等大跨度的工业与民用建筑,给结构工程师在楼盖设计上提出了新的课题。传统的梁板柱体系、无梁楼盖、井式楼盖、密肋楼盖均不能满足大跨度大柱网的要求。80年代以来,国内外一些从事空间结构研究的专家和结构工程师们开始了致力于把网架结构用于楼盖的工作,这是网架体系在实践发展中的一种新的趋势。所以,我们也这样说,网架楼盖的产生与其他新结构的问世一样,是随着生产力的发展和人们社会活动——生产和生活的需要而产生而发展起来的。

在国外我们见到过一些网架楼盖,有的是将楼面桁架承重构件相脱离的制作方法,类似于一般网架屋盖。英国有空心板体系用到6~8层楼房,西德也有网架——平板组合结构。在我国,1981年上海石油采购供应站—金属材料中转仓库的屋盖采用网架——平板组合结构;同时,徐州、天津等地也相继搞了一些试点工程。1982年天津某催化剂仓库将网架——平板组合结构用于楼盖;1983年贵州工学院在食堂楼盖中采用井进行了模型试验;1985年作者在盖阳市贸易中心六层楼盖的设计中全部采用网架——

平板结构以后，又于1986年在长沙市纺织大厦的设计中第一次将网架——平板结构用于13层的高层建筑楼盖中。因此，我国的网架楼盖全部采用网架——平板组合结构。至目前为止，国内用于楼盖的网架，最大跨度已达38米，最高的有13层52.3米。

网架——平板组合结构的特点是把楼板作为网架的一部分，也就是说将砼楼板当作网架的上弦参与网架共同工作。其优点是：①充分利用两种不同材料的受力特性，增强了网架的整体刚度；②结构稳定性好；③减轻了楼盖的自重，有利于房屋抗震；④可以节省材料，综合经济效益好。

网架楼盖的出现解决了大跨度多层建筑的需要，引起了国内外建筑界的关注。随着我国国民经济的不断发展，人们对社会与环境的要求越来越多，网架楼盖在建筑技术上所发挥的作用将会更大。因此，加快对这一新课题的研究，在实践中更加完善，是我们共同的任务。

## 二、力学模型与计算方法

网架——平板组合结构按选用的力学模型进行结构计算有三条途径：

### (一) 组合结构的有限元法。

1. 基本原理：这种方法是把结构中的肋形板离散成能承受轴力，面力和弯矩的梁元和板元，腹杆和下弦仍作为只承受轴向力的杆元。这些单元用节点联接，组成统一的结构。图1所示一个单元的模型。 $\bar{x}\bar{y}$ 平面为参考坐标系位于联接点上。 $xy$ 平面为通过各构件单元形心的坐标系。平面 $xy$ 与 $\bar{x}\bar{y}$ 彼此平行并相距 $l_b$ 。

力学模型对节点的假定是：板元和梁元之间视为刚性联接，节点有三个线变位和三个角变位，杆元之间仍为铰接，节点只考虑三

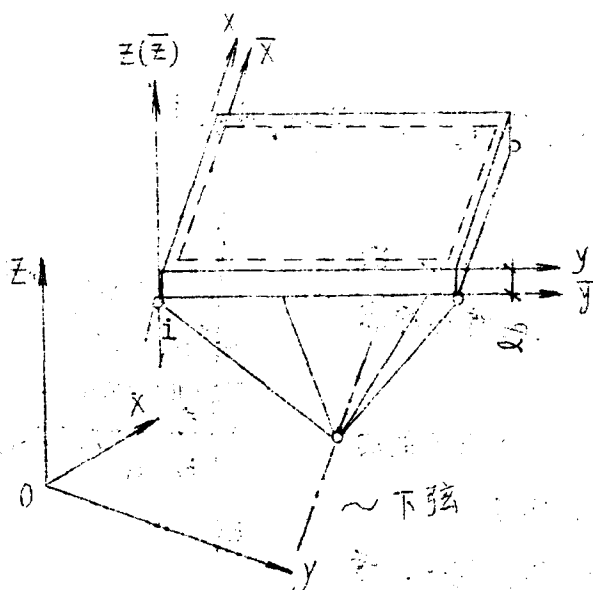


图 1

个线变位。上下两部分采用铰接。在计算时考虑了节点产生的偏心以及外节点荷载，这样就反映了网架——平板组合结构的实际工作状态，是精确可靠的计算方法。

结构分析按通常的方法，先求出板、梁和杆件各自的单元刚度矩阵，再应用坐标的平移变换求出板或梁单元相对参考坐标系的修正单元刚度矩阵，然后进行坐标的旋转变换，求出整体坐标系的单元刚度矩阵。根据位移相容条件，在整体坐标系中对每一节点建立平衡方程，这样就组成了以各节点的位移为未知量的整个结构的刚度矩阵，求出这些未知量后，利用变换即可求出各节点在局部坐标系中的位移。再利用局部坐标系的应力矩阵，即可求得各单元相应的内力。(1)

以图1节点1为例。坐标系如图2所示。

节点位移为：

$$\delta_1 = \{U_1, V_1, W_1, \theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}\}^T$$

节点力为:

$$F_i = \{F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}\}^T$$

2. 主要特点:

① 对于复杂的几何形状, 任意边界条件或不同的物理特性均容易处理;

② 对各单元可以选择不同的位移函数, 以适应其特点;

③ 概念明确, 格式统一, 适宜于计算机计算, 易于编制通用程序;

④ 不受结构类型及受荷状态的限制, 便于进行结构的多方案比较;

⑤ 计算结果精确, 配合模型试验可对其他近似法作出评价。

⑥ 要求计算机的容量大, 各单元节点位移个数不一, 给存贮、求解带来不便。因此, 到目前为止尚未见到适合于网架——平板组合结构特点的专门程序可供应用。

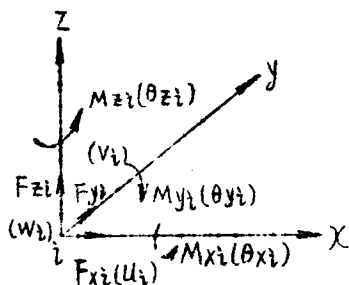


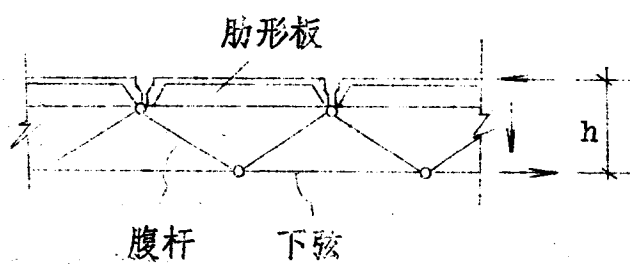
图 2

## (二) 拟夹层板法

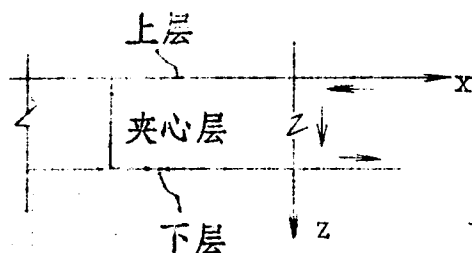
1. 基本原理: 这种方法是把结构中的肋形板作为上表层, 把腹杆和下弦板折算成夹心层和下表层, 从而使组合结构等化为一整块连续化的夹层板。根据文献〔2〕的论述, 上表层和下表层只承受层内的平面力而不能承受横向剪力; 而夹心层则又只承受横向剪力而不能承受平面力 (如图 3 所示)。

根据上述原理, 我们可以建立起拟夹层板的基本方程, 用解析法或其他方法求解基本方程, 便可算出组合结构的各构件的内力和变位。

2. 主要特点。



a. 网架 —— 平板结构剖面



b. 拟夹层板剖面

图 3 拟夹层板的计算模型

① 采用连续化的计算模型，可以运用平板弯曲理论来分析，概念清楚；

② 用解析法求解基本方程，编制内力和位移计算图表，可以采用手算而不需电子计算机运算；

③ 对于正交正放类平板——网架结构，当肋形板形式简单时建立夹层板的基本方程较为方便，周边简支的边界条件容易求解；

④ 计算结果与精确法相比误差不大，能满足具体工程精度的要求；

⑤ 考虑到网架形式和肋形板形式在实际工程中的多样性，使夹层板的微分方程变得比较复杂，对求解和编制计算图表带来不少困难，因此目前可供应用的现有成果还很少。

(三) 空间排架位移法。

1. 基本原理, 这种方法是和第二种连续化模型相反, 采用比较简化的离散化计算模型来分析网架——平板组合结构。将结构的平板部分, 根据各种不同形式的网架折算为四组或三组平面交叉杆系, 从而使这种比较复杂的组合结构转化为一个等代空间铰接杆系结构, 由一般空间桁架位移法直接进行计算〔3〕。

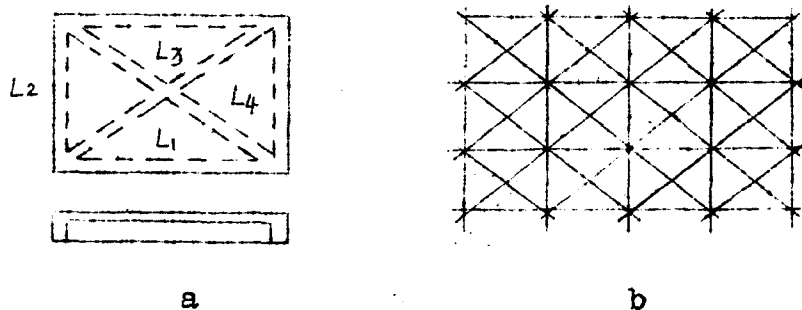


图4 肋形板等代杆系

图4-b为一肋形板等代为四组平面交叉杆系, 图4-a为带边肋和斜肋的平板。

计算模型采用了如下基本假定〔4〕〔5〕:

- ① 各节点铰接, 忽略了抗弯刚度, 不考虑次应力的影响;
- ② 应用小挠度理论, 不考虑几何非线性;
- ③ 组合结构按两种受力状态计算, 然后叠加;
  - a) 整体受弯, 用等效荷载法将荷载折算为节点荷载, 肋形板以格栅形式作为网架上弦只承受轴向力,
  - b) 肋形板在荷载作用下只起弯曲作用, 从而将荷载传到节点;
- ④ 杆件轴线相交于节点, 上弦节点与T形断面形心重合;
- ⑤ 内力计算时不考虑材料的塑性性能, 肋形板等代的上弦杆截面按T形断面考虑。

本方法的关键是将肋形板等代成平面杆系。首先按照等代杆件与实体平板应变能相等的原理求出等代杆件的截面积，便可按一般网架所采用的空间桁架位移法进行计算。求出上弦杆的内力后，再按刚度或截面积之比来分配肋中和平板等代杆系的内力，最后验算平板截面。文献〔3〕提供了各种网架形式的详细计算方法。

## 2. 主要特点:

① 采用离散化的计算模型，可以直接应用现成的网架程序进行电算，计算简便；

② 按变形能相等原理将平板等代成杆系，概念明确，理论可靠。易于建立计算公式，不受网架形式和肋形板多样化的影响；

③ 计算结果与模型试验比较接近，满足实际工程精度的要求。因此我国现有网架——平板组合结构的设计计算均采用这种方法；

④ 由于整体计算时只考虑平板薄膜力的影响，因此由求得的上弦杆内力确定平板截面后，还应按平板弯曲理论对平板在面力作用下的局部弯矩进行校核。

## 三、常用楼盖形式的比较

楼盖是直接承受楼面荷载并通过竖向支撑体系（墙或柱）传递到基础上去的房屋基本结构。在以往的工程实践中，常用的楼盖形式有无梁楼盖、密肋楼盖、井式楼盖和肋梁楼盖。这些楼盖形式的特点是，结构简单、传力明确，在一定的条件下满足结构受力的要求，安全可靠且经济性能较好。但是对于大跨度和大柱网的建筑物来说，就无法显示它们的优越性，有的则不可能做到。因而不得不被网架楼盖所代替。根据我们的设计经验，现将上述常用的楼盖作如下比较〔6〕。

（一）无梁楼盖：由于近年来采用了预制提升施工方法，因此无

梁楼盖用得较多。无梁楼盖与一般肋梁楼盖的主要区别是楼面荷载由板通过柱直接传给基础。这种结构传力简捷，而且增大了楼层净空。但由于没有主梁和次梁，钢筋混凝土板直接支承在柱上，因而楼板的厚度较大。只有当跨度小于6 m的正方形柱网时，无梁楼盖比较经济。当跨度超过6 m，跨中弯矩和支座外的冲切力急剧增加，使得楼板本身厚度和板内配筋率加大。相应地建筑物自重增加，地震荷载加大，结构综合经济效益不好。

(二) 密肋楼盖：与单向板肋梁楼盖受力特点相似，肋相当于次梁，但排得密，间距很小，因而称为密肋楼盖。由于密肋楼盖板与肋底面之间有空气隔层（当肋底面有吊顶时）或填充物，所以隔热、隔音性能较好。密肋楼盖材料用量较省，造价也很低。因此常在公共和一般民用建筑（特别是医院、学校、住宅等）中采用。但是，整体现浇的密肋楼盖肋的跨度不宜超过6 m；楼面荷载（包括自重）不宜超过 $600\text{kg/m}^2$ 。从而，给密肋楼盖的适用范围带来了很大的局限性。

(三) 井式楼盖：它是由肋梁楼盖演变而成，其主要特点是两个方向梁的高度相等，而且同位相交。梁布置成井字形，两个方向的梁不分主梁和次梁，共同直接承受板传来的荷载，板为双向板。井式楼盖宜用于正方形平面或长短边之比小于1.5的矩形平面，当楼面荷载较小时，楼盖跨度可以做得较大。但是井式楼盖造价较高，尤其当楼面荷载超过 $300\text{kg/m}^2$ 时，显得更不经济。因此井式楼盖宜少采用。

(四) 肋梁楼盖：常称为梁板柱体系。其传力途径是板→次梁→主梁→柱（或墙）→基础→地基。是工业与民用建筑中常用的楼盖形式。但是在肋梁楼盖中，板的砼用量占整个楼盖的50~70%，因此在一般情况下，板的厚度宜取薄些。从而使肋梁楼盖的跨度受

到限制。单向板的跨度以 3m 以下为宜；方形双向板的区格不宜大于  $5\text{m} \times 5\text{m}$ ；矩形双向板区格的短边不宜大于 4m。次梁跨度以 4~6m 为宜，主要跨度以 5~8m 为宜。当跨度增大时，不仅板厚增加，梁的高度加大很快，楼层净空减小，楼盖自重加大，综合经济效益不好。

(五) 网架楼盖：上述四种楼盖跨度一般在 6m 左右以下，楼面荷载在  $300\text{kg/m}$  以下方显得比较经济，有的本来造价就比较高。当跨度超过 10m，楼面荷载超过  $300\text{kg/m}$  时，各项性能指标均会显著下降，有的却无法做到。为了同时满足大柱网、大荷载、自重轻以及经济美观等要求，网架楼盖是一种较好的结构形式。其跨度不受限制，楼面荷载可以达到  $1000\text{kg/m}$  以下。当楼盖短边跨度在 40m 以下，楼面荷载  $500\text{kg/m}^2$  左右时，结构的经济效益较好。尤其对于重要有设备层的多层建筑物来说，网架的高度可以同时兼作设备层。同时，网架楼盖可以满足各种平面形式的功能要求。这些，都是其他楼盖形式所望尘莫及的。

#### 四、网架楼盖的实际应用

为了阐述网架楼盖的设计方法，本文结合“长沙市纺织大厦”工程实例，对采用空间桁架位移法计算网架——平板组合结构和网架楼盖的设计构造措施给予介绍。

##### (一) 工程概况：

长沙市纺织大厦位于长沙市最繁华的黄兴南路中段东侧，总建筑面积  $10230\text{m}^2$ ，层数 13 层，地下 2 层。西面临街为三层裙房，后退 6m 即为 13 层主楼，主楼总高度 52.3m。场地面积仅有  $28.7\text{m} \times 41.5\text{m}$ ，而底层建筑轴线平面为  $27.8\text{m} \times 35\text{m}$ 。在这么狭小的场地上建筑高层范围，在建筑史上是不多的。

功能要求除 11~12 层为办公用的小房间外,其余各层均为大跨度的商场、加工车间、仓库及大会议室。建设方要求中间不设或少设柱子。为此,结构设计采用大柱网的网架楼盖,垂直荷载由柱子承担,抗侧力结构采用框筒体系,基础为大直径的挖孔灌注桩,即承重又挡土。

网架楼盖按各层使用情况确定三个荷载等级即  $300\text{kg}/\text{m}^2$ 、 $500\text{kg}/\text{m}^2$ 、 $700\text{kg}/\text{m}^2$ 。柱网尺寸为  $12\text{m}\times 10\text{m}$ ,网架造型为抽空正放四角锥网架——平板组合结构,网柱尺寸为  $2000\times 2400\text{mm}$ ;结构高度  $1000\text{mm}$ 。网架为四点支承。

### (二) 结构选型与结构分析

在第三节中,我们介绍了常用楼盖形式的性能和适用范围,根据本工程的建筑要求,在结构初步设计时,对各种型式的楼盖列表比较如下:(表见下页)

从表 1 可以看出,当跨度较大时,网架楼盖的经济指标比其他楼盖都好,而网架楼盖的自重比其他楼盖都小得多。这样,柱和基础的尺寸都要相应减小,同时对于抗震层来说,地震荷载也相应减小,因而房屋的综合经济效益相对提高,充分显示了网架楼盖的优越性。这也是我们在长沙市纺织大厦中选用网架楼盖的依据。

对本工程网架楼盖的结构分析采用了空间桁架位移法。按照文献(3)提供的简化计算方法,把带肋板的平板部分折算成四组平面交叉杆系,然后将等代杆系与肋组成等代上弦杆,与腹杆和下弦杆构成一铰接空间杆系,忽略肋轴线对平板中面偏心矩的影响。同时,将作用在板面的荷载以等效集中荷载作用在节点上。这样就可按空间桁架位移法计算。

### (三) 结构计算:

#### 1. 计算简图:

各种楼盖主要性能比较表

表 1

| 名 称  | 自 重<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | 砼 量<br>(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) | 含钢量<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | 木材量<br>(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) | 造 价<br>(元/m <sup>2</sup> ) | 附 注                   |
|------|-----------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 无梁楼盖 | 1200                        | 0.048                                    | 50.35                       | 0.025                                    | 81.39                      | 含柱帽                   |
| 井式楼盖 | 1125                        | 0.045                                    | 63.23                       | 0.024                                    | 102.09                     |                       |
| 肋梁楼盖 | 850                         | 0.035                                    | 47.77                       | 0.018                                    | 77.13                      |                       |
| 密肋楼盖 | 750                         | 0.031                                    | 42.15                       | 0.016                                    | 68.02                      |                       |
| 网架楼盖 | 150                         | 0.005                                    | 30.92                       | 0.0028                                   | 73.7                       | 包括上弦板的制作,<br>安装、运输、灌缝 |

说明: ① 以上数据计算条件:  $q=500\text{kg/m}^2$ , (不含自重), 柱网尺寸为  $10\times 12\text{m}$   
② 网架制作价格按  $2500\text{元/吨}$  计算, 然后再加上平板部分的制作、安装、运输、灌缝费用。

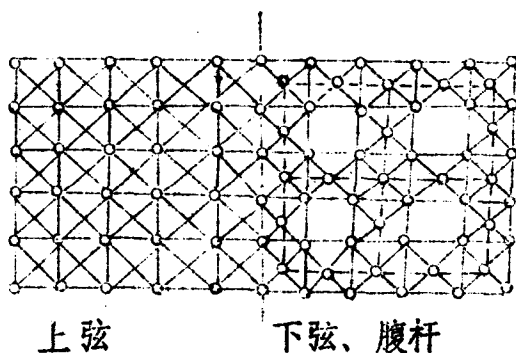


图 5

## 2. 将板系换算成杆系:

① 确定板的断面: 在板一杆换算之前, 首先要确定板的断面尺寸。一般按经验或参考现有工程进行假定, 也可以按四点支承的双向带肋板进行初步估算。总之板的断面力求准确, 以减少整体计算的次数。本工程采用如下断面形式:

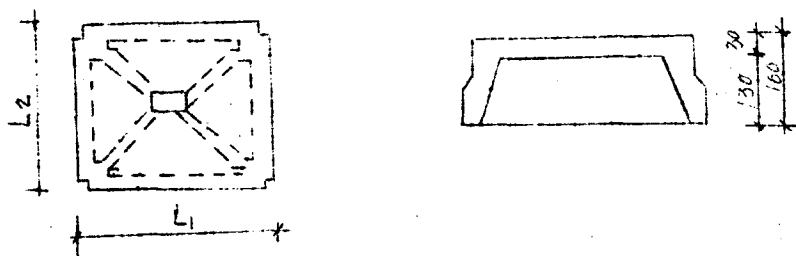


图 6

## ② 换算:

等代杆系截面积:

$$A_i = \eta \beta_i \delta l_i \quad (i=1, 2, 3, 4)$$

砼平板:  $\eta = 0.825$

$$\tan \theta = \frac{L_2}{L_1} = \frac{1980}{2256} = 0.87 \quad \theta = 41^\circ \quad \left( \frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{3} \right)$$

从文献〔3〕图2中查及:

$$\beta_1 = 0.55, \quad \beta_2 = 0.95, \quad \beta_3 = \beta_4 = 0.35$$

$$\therefore A_1' = 0.825 \times 0.55 \times 3 \times 225.6 = 307 \text{ cm}^2$$

$$A_2' = 0.825 \times 0.95 \times 3 \times 198 = 466 \text{ cm}^2$$

$$A_3' = A_4' = 0.825 \times 0.35 \times 3 \times 300 = 260 \text{ cm}^2$$

肋的截面积:

$$A_1'' = A_2'' = 195 \text{ cm}^2$$

$$A_3'' = A_4'' = 91 \text{ cm}^2$$

等代上弦杆面积:

$$A_1 = A_1' + A_1'' = 502 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = A_2' + A_2'' = 661 \text{ cm}^2$$

$$A_3 = A_4 = A_3' + A_3'' (= A_4' + A_4'') = 351 \text{ cm}^2$$

3. 计算等代网架: 按空间桁架位移法进行电算。计算结果, 下弦和腹杆即为杆件的真实内力, 可依据确定断面。上弦内力为肋形板的等代上弦杆内力。

将算得的等代上弦杆内力按刚度比来分配确定肋中和平板等代杆系内力。

$$\text{平板内力: } N_i = \frac{A_i}{A_i + A_i^0} \overline{N_i}$$

$$\text{肋中内力: } N_i^0 = \frac{A_i^0}{A_i + A_i^0} \overline{N_i}$$

任取一杆为例:

$$\text{已知 } \overline{N_i} = -12.5856 (\text{T})$$

$$\text{则 } N_i = \frac{307}{502} \times (-12.5856) = -7.6968 (\text{T})$$

$$N_i^0 = \frac{195}{502} \times (-12.5856) = -4.8389 (\text{T})$$

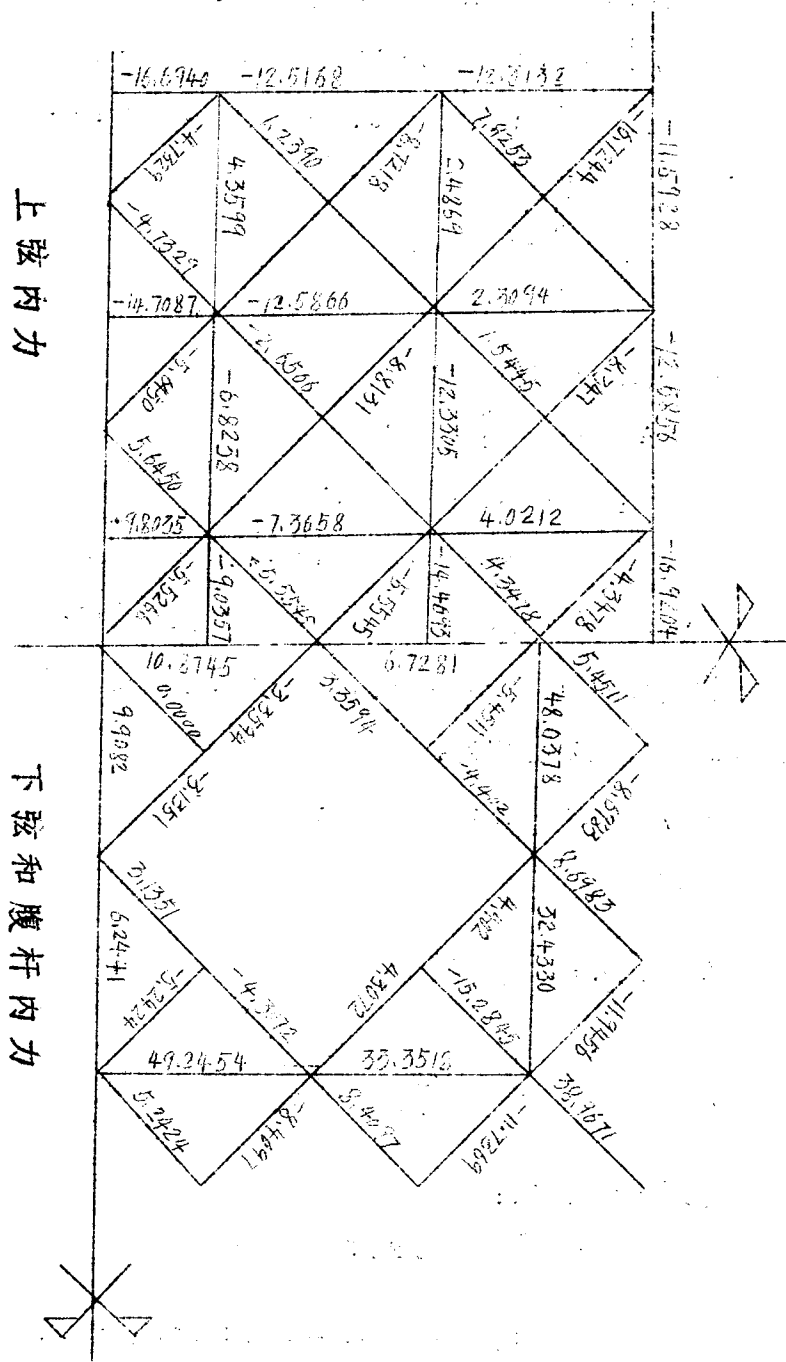


图 7

4. 求板的周边内力：以等代平面杆系内力  $N_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 来表示平板的内力有四种表达式，即：

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = T(1, 2, 3) \begin{bmatrix} \frac{N_1}{\beta_1 l_1} \\ \frac{N_2}{\beta_2 l_2} \\ \frac{N_3}{\beta_3 l_3} \end{bmatrix} = T(1, 2, 4) \begin{bmatrix} \frac{N_1}{\beta_1 l_1} \\ \frac{N_2}{\beta_2 l_2} \\ \frac{N_4}{\beta_4 l_4} \end{bmatrix}$$

$$= T(1, 3, 4) \begin{bmatrix} \frac{N_1}{\beta_1 l_1} \\ \frac{N_3}{\beta_3 l_3} \\ \frac{N_4}{\beta_4 l_4} \end{bmatrix} = T(2, 3, 4) \begin{bmatrix} \frac{N_2}{\beta_2 l_2} \\ \frac{N_3}{\beta_3 l_3} \\ \frac{N_4}{\beta_4 l_4} \end{bmatrix}$$

其中， $T$  称为内力变换矩阵，分别为：

$$T(123) = \frac{3}{8} \begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 0 \\ -\cot \theta & -\tan \theta & \frac{2}{\sin 2\theta} \end{bmatrix} ;$$

$$T(124) = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 0 \\ \cot \theta & \tan \theta & -\frac{2}{\sin 2\theta} \end{bmatrix} ;$$

$$T_{(134)} = \frac{3}{8} \begin{bmatrix} 3 - \cot^2 \theta & \frac{1}{2\sin^2 \theta} & \frac{1}{2\sin^2 \theta} \\ 1 - 3\cot^2 \theta & \frac{1}{2\sin^2 \theta} & \frac{1}{2\sin^2 \theta} \\ 0 & \frac{\sin^2 \theta}{4} & \frac{\sin 2\theta}{4} \end{bmatrix};$$

$$T_{(234)} = \begin{bmatrix} 1 - 3\tan^2 \theta & \frac{3}{2\cos^2 \theta} & \frac{3}{2\cos^2 \theta} \\ 3 - \tan^2 \theta & \frac{1}{2\cos^2 \theta} & \frac{1}{2\cos^2 \theta} \\ 0 & \frac{\sin 2\theta}{4} & \frac{\sin 2\theta}{4} \end{bmatrix};$$

任取一种计算（因为计算时，板的规格基本上一致，或者几种）

$$\begin{aligned} T_{123} &= \frac{3}{8} \begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 0 \\ -\cot 41^\circ & -\tan 41^\circ & \frac{2}{\sin 82^\circ} \end{bmatrix} \\ &= \frac{3}{8} \begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 0 \\ -1.15 & -0.87 & 2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1.125 & 0.375 & 0 \\ 0.375 & 1.125 & 0 \\ -0.43 & -0.33 & 0.75 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

设：  $N_1 = -8.33$     $N_2 = -4.0$     $N_3 = -1.4$