

微型机结构计算机软件系统

之十八

组合结构分析

何春发 祁东风 编

北京科技协作中心

计算机软件部

一九九二年五月

组合结构分析程序 SAC 使用手册

SAC 是依据有限元原理编制的组合结构静动力分析通用程序。它适用于机械结构，土木建筑，交通能源等部门的单一结构或组合结构。它由杆，梁，平面应力，薄板或薄壳及三维元等十五种类型元素组成。

本程序的特点是：

- (1) 通用性强，应用广泛。
- (2) 填写数据简单，便于用户。对二维连续体及球壳可采用自动剖分的方法，其余情况可采用压缩数据方式。
- (3) 采用变带宽方式存贮及自动分块求解的方法，适合于中小型计算机。
- (4) 对于梁板组合结构采用了较合理的组合模型。
- (5) 对总刚半正定型采用了特殊处理方法，效果较好。
- (6) 静力分析采用平方根法；动力分析采用谱分析，振型选加法和逐步积分三种形式。
- (7) 输出结果可人工填写少量参数进行控制，自由地选择输出项目，从而避免过多的打印和漏印。
- (8) 在 PC386 机上，由于采用了最新的32位高级编译软件，解题规模可提高到 5000个单元。

全部数据填写共分十二部分，全部用自由格式输入。

- (一) 标题
- (二) 总控制参数
- (三) 节点坐标及节点信息
- (四) 边界关联信息 (*)
- (五) 刚度数据
- (六) 几何数据
- (七) 类信息及单元关联信息
- (八) 节点约束信息
- (九) 节点载荷

- (十) 节点位移修正坐标 (*)
 - (十一) 求特征值与特征向量的参数 (*)
 - (十二) 动力反应控制参数 (*)
- 带 (*) 的是可选项, 根据需要才填。

本程序的计算部分已通过了大量考题及计算实例, 它的前后处理部分现正在开发之中。由于时间有限, 程序中不足之处在所难免, 欢迎各位专家、工程应用人员提出宝贵意见。

(一) 标题

一行1-72列的字符串(如填写题目名或计算日期等)。

(二) 总控制参数:

(1) 输入八个整形数

MI, MN, KN, KD, NP, NL, NH, NY

(2) 输入十个打印控制参数

IDP(I), I=1, 10

(3) 若NL ≠ 0, 输入5个整形数

KL(I), I=1, 5

(注1)

ML: 结构划分总类数。如果单元型号、刚度、几何数据及非节点载荷一样, 可分为一类。但是, 为了减少单元关联信息填写, 除上述四个条件外, 每类单元关联信息可压缩填写的分为一类, 不能压缩填写的另分一类。原则上, 可分为一类单元分成多类不出错, 不能分为一类的单元分为一类则出错。

MN: 总节点数(人工部分节点)。

KN: 刚度数据总数, 刚度数据每组由三个数组成--E(弹性模量), ν (泊松比), ρ (质量或重量密度, 取 $\rho < 0$ 为重量密度, $g=980$)。如(E, ν , ρ)相同, 只存一组, 若有N组, 则 $KN = 3 \times N$ 。

KD: 几何数据总数。几何数据存放个数与单元的类型有关(参看表1), 只存不相同各组。

NP: 当NH=0时, 表示静力求解外加载荷工况数; 当NH>0时, 表示动力求解特征值的个数。(十一中用NF表示)

NL: ≠ 0 时为结构有自动剖分单元, 否则没有。

NH: = 0 时为静力求解;

= 1 时只求特征值与特征向量;

= 2 为动力谱分析;

= 3 为振型迭加法;

= 4 为逐步积分。

NY: $\neq 0$ 为节点编号优化; 否则不优化。

{注2} IDP (1) $\neq 0$, 印出输入初始数据, 否则不印 (以下同)

IDP (2) $\neq 0$, 印出散开后节点坐标。

IDP (3) $\neq 0$, 印出散开单元关联信息。

IDP (4) $\neq 0$, 印出散开节点自由度。

IDP (5) $\neq 0$, 印出散开等效节点载荷。

IDP (6) $\neq 0$, 印出单刚, 质量矩阵等。

IDP (7) $\neq 0$, 印出总刚矩阵。

IDP (8) $\neq 0$, 检验特征值与特征向量误差。

IDP (9) $\neq 0$, 有附加节点位移交换, 处理总刚半正定时用, 详见 (九)。

IDP (10) $\neq 0$, 待补充。

{注3}: 当有二维自动剖分单元时 ($NL \neq 0$), 要填如下五个参数:

KL (1): 输入结构中, 一单元关联最多节点数, $KL (1) = 0$, 程序自动生成。

KL (2): 自动剖分单元中人工初始部分单元关联边界的总数。

KL (3): 自动剖分粗单元加密后一边的节点数, $KL (3) \geq 3$ 。

KL (4): 自动剖分单元区域内开孔的个数。

KL (5): 自动剖分单元中月型单元 (型号 12 或 13) 的个数。

除了 KL (1) 可填 0 外, 其余要按实际填写。

(三) 节点坐标及节点信息

用户可任意选择一个结构的直角坐标系, 给出节点坐标。如果用户对取用一个直角坐标系不方便, 用户可规定若干个附加坐标系来填写节点坐标。附加坐标系可以是直角坐标系 (x, y, z) 或柱坐标系 (r, θ, z) 或球坐标系 (r, ϕ, θ) 。

在附加坐标系中, 节点坐标的填写分两部分数据:

(1) 填写附加坐标系中的节点坐标;

直角坐标系与柱坐标系按 (x, y, z) 或 (r, θ, z) 分量的序号填写, 每组

有如下两部分数据:

(a) M_0, M_1, N_0, N_1

(b) P_1, P_2, \dots, P_N 或 P_1, P_2 (P_1 个数由 M_1, N_1, N_2 决定)

{注1} 1. $M_0=1, 2, 3$ 分别对应 x, y, z 或 r, θ, z 。

2. N_1 为一排节点数, N_2 为排数。

$M_1=1, 2, 3, 4$ 分别对应如下四种情况。

1) $M_1=1$; 表示一排 N_1 个节点对应同一坐标分量, N_2 排要给出 N_2 个坐标分量值, 即给出 (b) 中的 P_1, P_2, \dots, P_{N_2} (如 $N_2 > 10$, 每行只填 10 个数, 余下擱行)。

2) $M_1=2$; 表示一排 N_1 个节点对应不同 N_1 个坐标分量值, N_2 排对应同一排 N_1 个坐标分量值, 即给出 (b) 中的 P_1, P_2, \dots, P_{N_1} (如 $N_1 > 10$, 每行只能填 10 个, 余下擱行)。

3) $M_1=3$; 与 $M_1=1$ 相同, 只不过 N_2 个坐标分量是等差的, 相邻只差一个增量 ΔR , 对应 (b) 中只给 P_1 (第一个坐标分量) 及 P_2 (相邻增量 ΔR)。

3) $M_1=4$; 与 $M_1=2$ 相同, 只不过 N_2 个坐标分量是等差的, 相邻只差一个增量 ΔR , 对应 (b) 中只给 P_1 (第一个坐标分量) 及 P_2 (相邻增量 ΔR)。

对于球坐标系, 其网格是自动生成的, 节点编号也是自动生成的。以球壳的球心为原点, 从球壳的中心编号, 向外一环一环的网线与从中心点发出的射线相交组成网格。每一环由用户分成若干个区域 (通常 90° 为一区域), 在同一区域内相邻两环相差一个节点 (如图一所示)。不管球壳如何细分, 只需填写如下几个数据:

a) $-2, M_1, N_1, N_2$

b) $R, \phi_0, \theta_0, \theta_n$

M_1 : 一环区域个数;

N_1 : 第一环节点数;

N_2 : 环数;

R : 球半径;

ϕ : 球壳边缘与中心半径垂直的底面夹角;

θ_0, θ_n : 底面之起末角度。

附加坐标系可以是圆板坐标系, 也采用自动生成的方法。与球坐标填写不同的是:

(a) 中的 -2 改为 -3 , (b) 中只填 R, θ_0, θ_n 三个实数, 其余同球坐标系。

(c) 坐标结束信息

$0, M_1, 0, 0$

M1: 附加坐标系的个数。

(注2) 柱坐标, 球坐标都为附加坐标系。直角坐标系只能有一个, 多于一个的也为附加坐标系。每个附加坐标系对总坐标系有一个变摆, 它由 (a), (b), (c) 三部分组成。

(a) K_0 ($K_0 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$)

$K_0 = 0$: 附加坐标系为直角坐标系;

$K_0 = +1$: 柱坐标系;

$K_0 = +2$: 球坐标系;

$K_0 = +3$: 圆板坐标系。

(b) X_A, Y_A, Z_A, α 或

$X_B, Y_B, Z_B, X_C, Y_C, Z_C$

X_A, Y_A, Z_A 为附加坐标系的原点在总坐标系的坐标;

X_B, Y_B, Z_B 为附加坐标系 X 轴上一点在总坐标系的坐标;

X_C, Y_C, Z_C 为附加坐标系 Y 轴上一点在总坐标系的坐标。

当 $K_0 = 1, 2, 3$ 时 (b) 中按上述提供三个节点坐标。

如果是柱坐标或球坐标或圆板坐标且子轴与总坐标子轴一致时, 这时 (b) 为 X_A, Y_A, Z_A, α 。其中 α 为计算 \ominus 角起始线与总坐标 X 轴的夹角, 且 $K_0 = -1$ 或 -2 或 -3 。

(c) 对附加坐标系所属的结点号

I_1, I_2, I_3 (I_1, I_2 为起末节点号, I_3 为相邻节点号增量)

.

.

.

0, 0, 0 (结束)

例 1: 一球壳, 坐标填写如下

1) -2, 4, 8, 4 $M_1 = 4, N_1 = 8, N_2 = 4$

2) 30.0, 50.0, 0.0, 360.0 $R = 30^\circ, \phi_0 = 50^\circ, Q_0 = 0^\circ \theta N = 360^\circ$

3) 0.1, 0.0 $M_1 = 1$ (一个附加坐标系)

4) -2

5) 0,0,0,0

6) 1.57,1

7) 0,0,0

变瓣节点号 1~5 7

(结束标记)

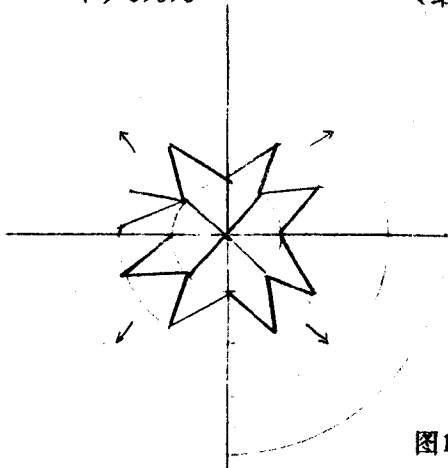
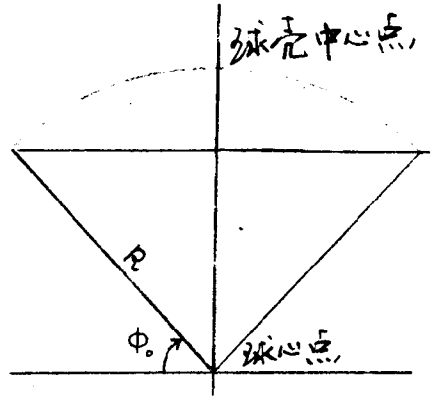


图1



例2 直角坐标系 (X, Y方向等间距网格)

1) 1, 4, 10, 7

2) 0.0, 5.0

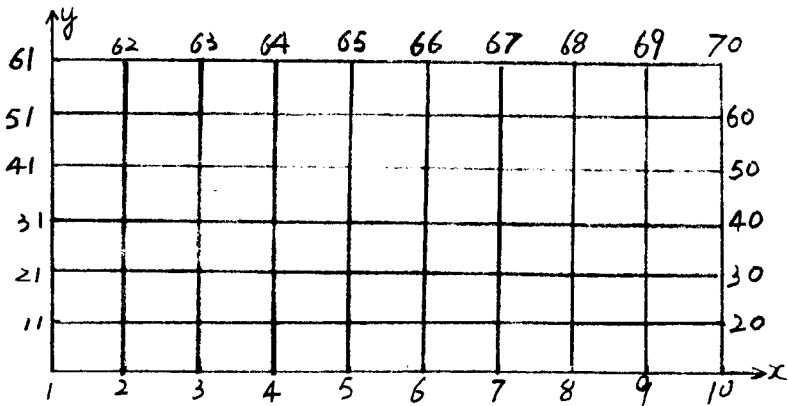
3) 2, 3, 10, 7

4) 0.0, 6.0

5) 3, 1, 70, 1

6) 0.0

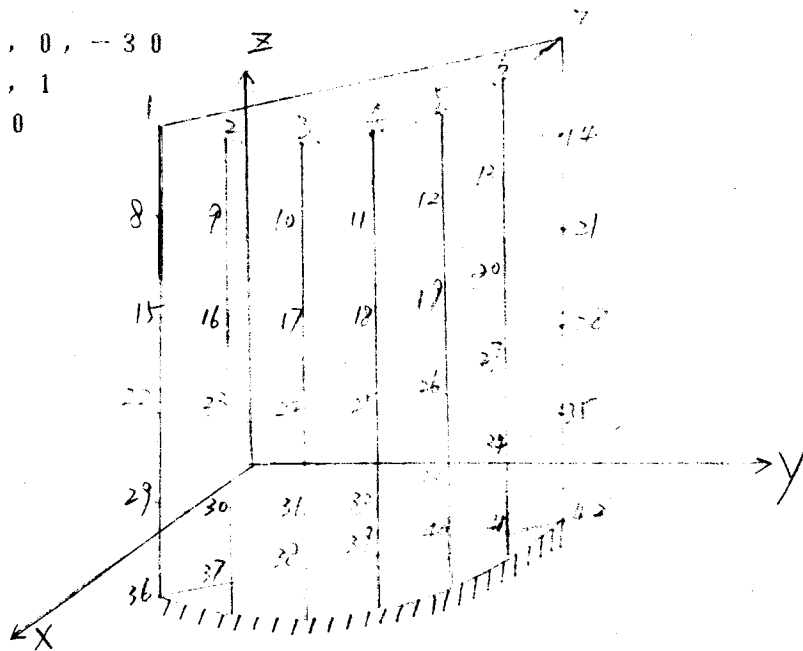
7) 0, 0, 0, 0 (无附加坐标变瓣)



图二直角坐标

例 3

- 1) 1, 1, 4 2, 1
- 2) 2 0, 0
- 3) 2, 4, 7, 6
- 4) 0, 3 0
- 5) 3, 3, 7, 6
- 6) 2 5, -5 0
- 7) 0, 1, 0, 0 (有一附加坐标系)
- 8) -1
- 9) 2 0, 2 0, 0, -3 0
- 10) 1, 4 2, 1
- 11) 0, 0, 0

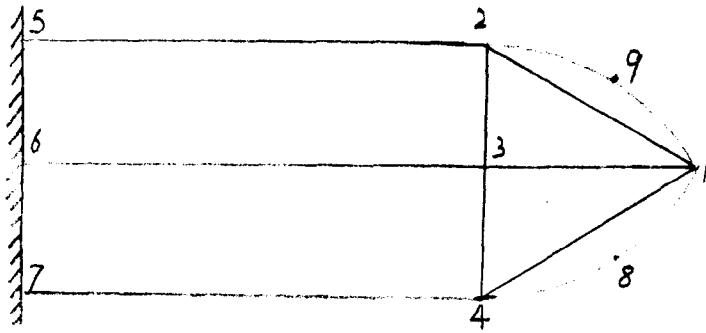


图三 柱坐标

(四) 边界关联信息

本组当有二维自动剖分时才填。每边给出二个关关节点号, 先填号小的, 再填号大的

例 4, 如图四二维问题, 共有 10 个边界 (曲边不计), 要填写 1, 2, 1, 3, 1, 4, 2, 5, 3, 6, 4, 7, 2, 3, 3, 4, 5, 6, 6, 7。



图四：二维问题

(五) 刚度参数

$E_1, \nu_1, \rho_1, E_2, \nu_2, \rho_2, \dots, E_{KN}, \nu_{KN}, \rho_{KN}$

刚度参数每组三个，相同的只存一组， E, ν, ρ 分别为弹模，泊松比，质量密度或重量密度。

(六) 几何参数

几何参数每组各型号不同，如表 1 所示

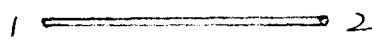
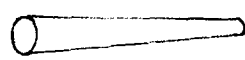
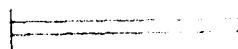
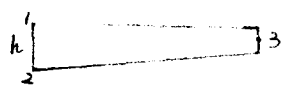

表 1 几何参数

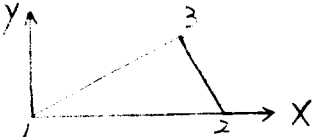

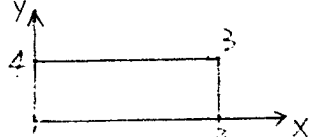

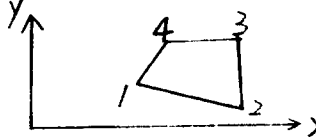
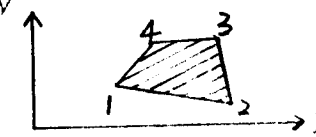

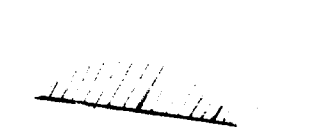
序号 / 型号	01	02	03	04	05	06 -- 13	14 -- 15
1	F	F1	F	F	F	t(板厚)	0
2		F2	I_z	I_z	I_z		
3		I1	D_y	H	I_y		
4		I2	K	K	I_x		
5		K			D_y		
6					D_z		
7					K		

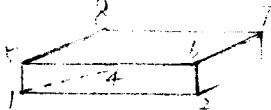

其中 F 为杆梁横截面积, I_x, I_y, I_z 为梁元 x, y, z 轴的惯性矩。
 F_1, F_2 及 I_1, I_2 为变截面梁两端的横截面积与惯性矩。 H 为平面梁的高度,
 D_y, D_z 为 y, z 轴的偏心, K 为剪切参数, 即 $K = F / A_s$, A_s 为受剪有效
 横截面积。

- (1) 对管截面 $K = 1.88$
- (2) 对矩形截面 $K = 1.2$
- (3) 对工字形截面 $K = 1.1$
- (4) 对型截面 $K = 1.128$

表 2 单元类型

型号	简图	说明
01		铰接杆单元
02		变截面平面梁元
03		等截面平面梁元
04		三节点平面梁元
05		空间梁元

0 6		平面应力三角形元
0 7		三角形板壳元
0 8		平面应力矩形元
0 9		矩形板壳元
1 0		平面应力任意四边形元
1 1		任意四边形板壳元
1 2		平面应力月型元
1 3		板壳月型元

14		八节点三维等参数元
15		四节点三维等参数元

(七) 类信息及单元关联信息

对每类单元要填写如下四部分:

(1) * (占一行, 表示一类开始)

(2) IF, KLL, KE1, KE2, KPO, IR1, IO, II, N1, N2,
AN1, AN2, K0

(3) 当 $KPO \geq 1$ 时, 要填 KPO 组如下参数 (见注 2)

I, IT, ID, P1, P2

(4) IA1, IA2, IA3, IA4…… (单元关关节点号)

(注 1) 关于 (2) 中各参数:

IF: 单元型号, 表 2 中给出的十五种, 其中型号 12, 13 只能应用于自动剖分的粗分单元。

KLL: 该类单元个数。

KE1: 取刚度数据起始号。

KE2: 取几何数据起始号。

KPO: 取非节点载荷组数。

IR1: 对某些型号单元规定应力输出形式。(见注 3)

IO: $\neq 0$, 要求该类每一单元自动剖分。

II: $= 0$, 该类每一单元的刚度矩阵完全一样。

这样程序只计算一个单元的刚度矩阵代替其余各单元的刚度矩阵。

N1, N2: 当该类单元关关节点号压缩填写时, N1 为一排单元数, N2 为排数。

AN1, AN2: AN1 为同一排相邻两单元节点号差, AN2 为相邻两排对应单元的节点号差。

当 $N1 \neq 0$ 时, 该类只填一单元关关节点号, 其余单元接 N1, N2, AN1, AN2 散开。

当 $N1 = 0$ 时, 该类要填 KLL 个单元关关节点号, 这时 N2, AN1, AN2 不用。

$K0$: 当为 0 时对 03 型, 05 型的梁单元, 两端 12 个自由度的松弛代码 $T(i) = 0, 1$ 由用户给出。当给 $T(i) = 1$ 时消除该自由度, 用来处理一端铰接的情况。

(注 2) 关于非节点载荷:

L : 载荷工况号;

$P1, P2$: 载荷参数;

IT : 非节点载荷类型;

ID : 作用边号。

(1) 01—05 型杆梁单元

$IT = 1, 2, \dots, 11$, 共 11 种。

$IT = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 代表作用的为 x, y, z 方面集中载荷或力矩

$P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z$ 。

此时 $P1$ 为载荷大小, $P2$ 为作用点到 A 端 (起始点) 距离。

$IT = 7, 8, 9$ 为 x, y, z 方向分布载荷, $P1, P2$ 为两端载荷密度。上述载荷 $P1$ 的正负号与单元局部坐标系相同。

$IT = 10, 11$ 为重力与温度力, 对重力作用时, $P1$ 为重力比重,

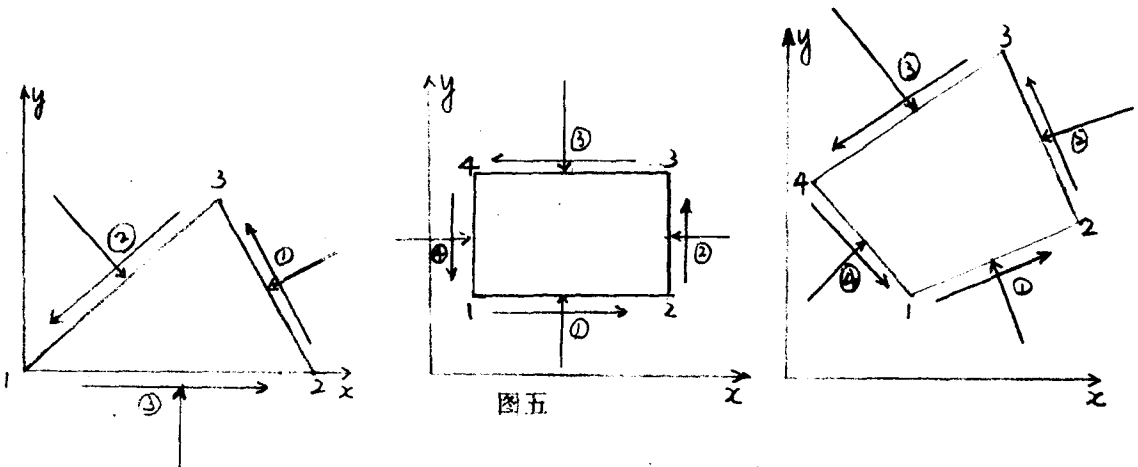
若 $P1 = 0$, 重力比重由刚度数据中的 ρ 给出, 要求总体坐标 Z 为重力方向。

对温度力, $P1 = \Delta T$ (温升), $P2 = \alpha$ (热膨胀系数)。

(2) 06, 08, 10 型平面应力单元

$IT = 1, 2$ 分别代表作用在切向边上与垂向边上的集中载荷,

此时 ID 为作用边号



正负号规定如图五，箭号方向为正，①，②，③，④为边号。

P_1 为载荷大小， P_2 为作用点到该边的A端距离。

$IT = 7, 8$ 为切向与垂向分布载荷， $ID = 1, 2, 3, 4$ 为作用边号（如图五所示）， P_1, P_2 为两端载荷密度。

$IT = 9, 10$ 为 y, z 方向的体积力， P_1 为载荷密度，若 $P_1 = 0$ ，载荷密度由刚度数据中的 ρ 给出。

$IT = 11$ 为温度力， $P_1 = AT$ （温升）， $P_2 = \alpha$ （热膨胀系数）。

$IT = 3, 4, 5, 6$ 为错误类型。

(3) 07, 09, 11型板壳单元

$IT = 1, 2, 3$ 分别为作用在ID边上的切向，垂向（与板面平行）的集中载荷及垂直板面的集中载荷。 P_1 为载荷大小， P_2 为载荷作用点到A端距离。

$IT = 7, 8$ 为作用在ID边的切向与垂向分布载荷， P_1, P_2 为载荷大小，作用边号与方向规定同（2）中的平面应力问题。

$IT = 9$ 为垂直板面分布载荷。对07, 11型只能为均布载荷； P_1 为载荷密度，对09型 P_1, P_2 为（1）边与（3）边载荷密度。

$IT = 10, 11$ 为体积力与温度力，对体积力必须选总体坐标 z 为重力方向，其余同（2）中规定。

(4) 14, 15型三维单元

$IT = 6, 7, 8, 9, 10, 11$ 六种非节点载荷。

$IT = 6$ 为作用在ID面上的分布载荷。 P_1 为载荷密度。

$IT = 7$ 为静水压力， P_1 为流体重度， P_2 为流体表面的纵坐标（规定为重力方向）。

$IT = 8, 9, 10$ 为 x, y, z 方向重力，重力密度由刚度数据中的 ρ 给出， P_1, P_2 无用。

$IT = 11$ 为温度力。 $P_1 = AT$ （温升）， $P_2 = \alpha$ （热膨胀系数）。

面号的规定如下：

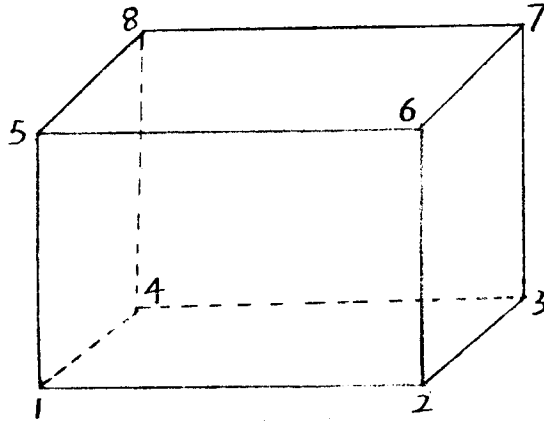
(a) 六面体（图六）

1号面为（1, 2, 6, 5）

2号面为（3, 4, 8, 7）

3号面为（2, 3, 7, 6）

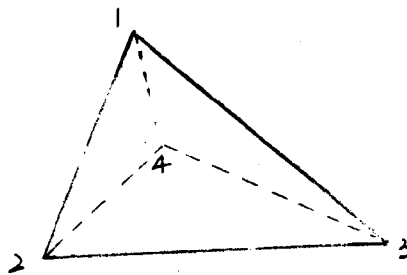
- 4号面为 (1, 4, 8, 5)
- 5号面为 (5, 6, 7, 8)
- 6号面为 (1, 2, 3, 4)



图六

(b) 四面体单元 (图七)

- 1号面为 (2, 3, 4)
- 2号面为 (3, 4, 1)
- 3号面为 (4, 2, 1)
- 4号面为 (2, 3, 1)



图七

(注3) 关于应力输出规定IR1:

(1) 01~05型, IR1无用, 可填任意数

(2) 06, 07型, IR1=0输出三角形形心点应力。

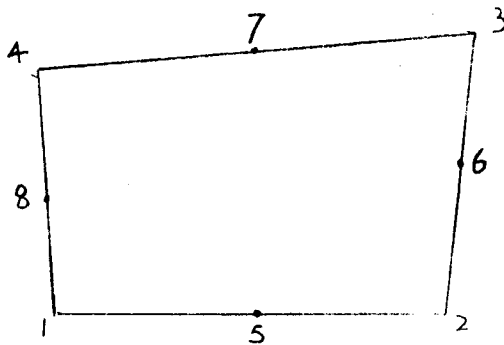
(3) 08, 10型, IR1=0输出形心点应力。

IR1=1, 2, 3, 4……8输出图八中表示的节点应力及形心点应力。

(4) 09与11型

IR1=0, 输出形心点的弯矩应力。

IR1=1, 2, ……8, 输出图中相应节点及形心点的应力。



图八

(5) 14型

IR1=0, 只输形心点的应力。

IR1=1, 2, ……8输出相应节点号IR1的应力。

IR1=9, 10, …14输出相应(1), (2), ……(6)号面中心处的应力

(6) 15型

IR1=0, 1, 2, 3, 4相应输出形心点及(1), (2), (3), (4)号面中心的应力, 五种情况只能任选一种。

(注4) 对于球壳单元, 可使用自动剖分, 编号的规则如图一, 类信息可如下填写

(a) 把球壳自动分成若干个三角形板壳单元, 只填类信息中(1), (2), (3), 省略单元关联信息。要求(1)中的KLL填0, N1为一区域内第一环单元个数的负值, N2为环数。AN1为区域个数, AN2为球壳中心点起始编号。

若 N_2 为负值, 表示每环区域为 360° 的闭环, 否则为开环。

如图一的信息可填写如下

(1) *

(2) 7, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, -2, -3, 4, 1, 1

(3) 1, 9, 0, -2, 0, -2, 0 (如 (2) 中 $KPD=0$, (3) 也不填)

对圆板平面区域自动剖分也同上填写, 非自动剖分的填写同原来规定。

(八) 节点约束信息

在空间坐标系 (如直角坐标系) 一个节点, 最多有六个自由度 ($U, V, W, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)。当某一个节点至少有一个自由度 (位移或转角) 被约束时, 必须给出该节点的约束信息。节点信息按组填写, 每组二行。

(1) λ ($\lambda=1, 2, 3, 4, 5$)

(2) $U, V, W, \theta_x, \theta_y, \theta_z, N_1, N_2, N_3$

(注) $\lambda=1$ 时表示节点约束信息, N_1, N_2 为约束起末节点号, N_3 为节点号增量。

$\lambda=2, 3, 4, 5$ 为自动剖分单元约束信息。

$\lambda=2$ 对应自动剖分时, N_1 表示其边界个数具有此自由度, N_2 与 N_3 无用。

$\lambda=3, 4, 5$ 时对应自动剖分单元为三角形, 矩形及梁元或月型单元, N_1 表示单元个数, N_2, N_3 无用。单元的次序同类信息。

(2) 中的 u, v, w, Q_x, Q_y, Q_z 为三个线位移及转角自由度 (= 0 自由, = 1 约束)。

(3) 0

以 0 结束全部约束信息。

(注) 自动剖分时, 全部粗分单元的边界及内部部应给出自由度约束信息。

(九) 节点载荷

载荷参数每组填写如下:

(1) L, N_0, N_1, ND, IX, P

其中