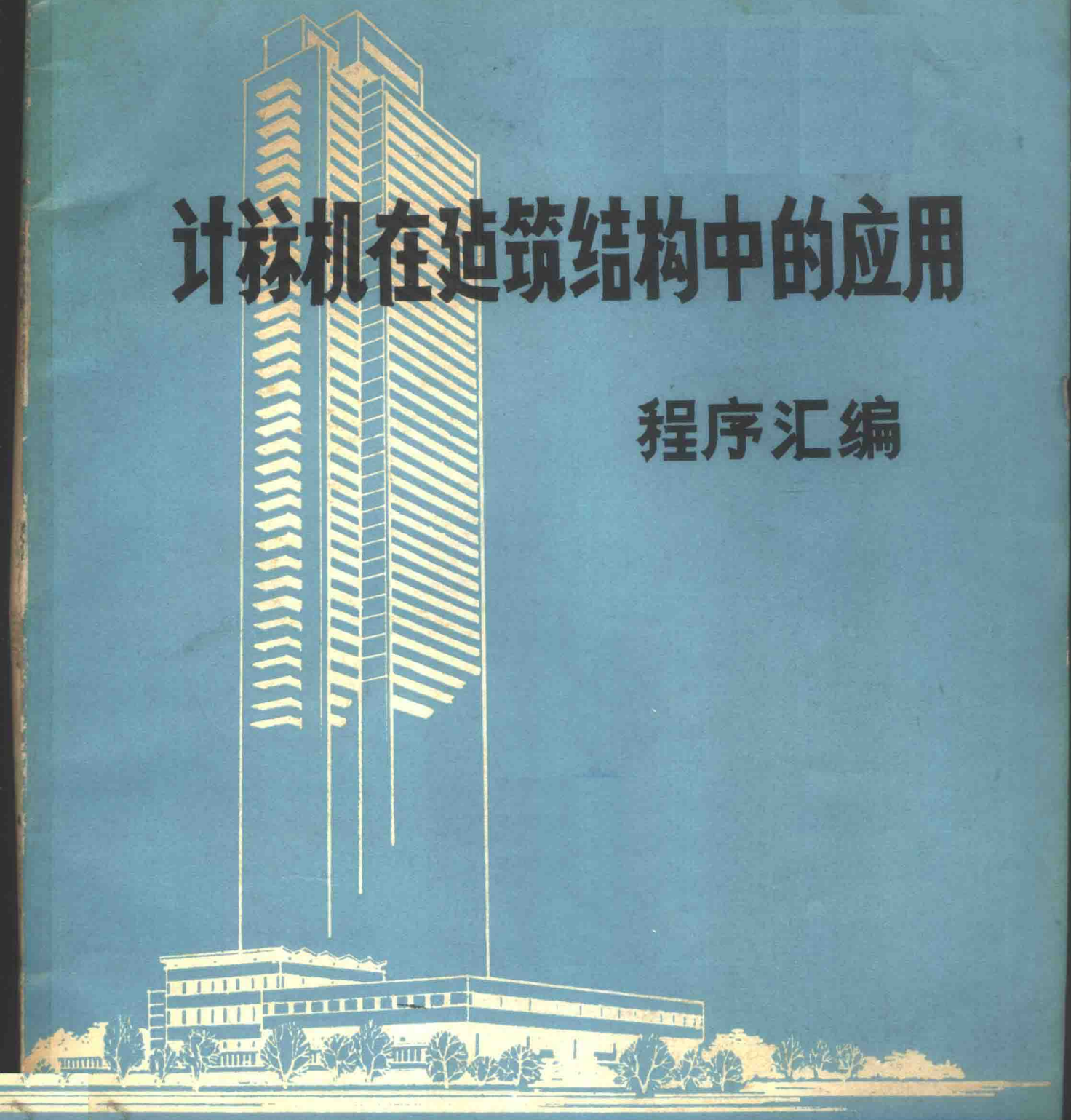


计算机在建筑结构中的应用

程序汇编



上海工业建筑设计院

前 言

计算机在我国开始应用到建筑结构设计上,虽然时间不长,但发展速度很快。为了在本世纪末实现四个现代化,计算机的应用显得更为迫切。

目前,我国土建设计中应用计算机日益广泛,不仅用来计算内力,而且用来参与设计的某些过程,如抗震、荷载及内力的组合,配筋截面选择等工作,并取得了一定的效果。

在毛主席革命路线指引下,我院自 1974 年以来,在院党委领导下及兄弟单位的协作下,为适应工程设计的需要陆续编制了一批程序并分别投入使用。

这里所选编的程序,均为土建筑工程设计中经常应用的程序。这些程序经过前一时期的使用证明是较为方便,且易于为设计人员所掌握。

我们提供这些程序希望广大使用者能掌握这些程序的使用条件,工作情况,计算原理等,俾能熟练地应用这些程序,在设计中发挥更大的作用。

每一个选编的程序均着重叙述了解决该类问题的力学处理及数学模型,并列出了程序工作粗框图和较详细的使用说明。为应用方便,还各附填表例题。源程序均由 ALGOL60 算法语言写成,适用于 TQ-16 计算机,对于使用其它类型机器的,也可译成其它相应的语言。

本汇编集中,平面框架程序,格式基础梁程序,三维有限元程序系与复旦大学共同编写,高层建筑框架——剪力墙空间协同程序系在建委建研院原编程序基础上改写并补充了地震,组合、配筋等功能。其余程序均为我院自行编写。在编写过程中得到我院及兄弟单位广大科技人员的大力协助,特此感谢。

由于我们业务水平较低,经验不足,再加上平日设计任务较重,以致来不及对程序结构作进一步完善及精炼,此外,肯定还存在不少缺点和错误,这些有待于同志们在应用或校阅过程中不断提出意见,以便进一步改进,这是我们所最诚恳希望的。

编 者

1978.1.

目 录

一、平面框架内力分析,荷载组合,配筋通用计算程序.....	1
二、单层工业厂房排架程序.....	58
三、高层建筑框架——剪力墙空间协同工作抗震计算荷载组合,配筋通用程序	99
四、高层杆系——薄壁结构的空間工作程序.....	153
五、空间桁架结构内力分析荷载组合通用程序(用带).....	194
六、空间桁架通用计算程序(用鼓).....	219
七、格式条形基础程序(附圆池计算).....	237
八、正交异性弹性地基板程序.....	265
九、地基最终沉降量计算程序.....	287
十、桩基的三维分析程序.....	299
十一、空间等参有限元素法分析程序.....	318
十二、多功能组合结构通用程序.....	348
附录: TQ-16 机操作使用说明	

一、平面框架内力分析、荷载组合， 配筋，通用计算程序

李为镒* 陈勃昌* 朱民声 盛佐人

概 述

框架是工业及民用建筑中经常遇到的结构物，在我院所承担的工业及民用建筑设计任务中，框架结构占相当大的比重。过去由于在土建结构计算中没有应用电子计算机，只能手工计算。长期以来，一直沿用弯矩分配法及卡尼法(连续代入法)或其他一些简化方法。弯矩分配法的数学实质是松弛法介位移动方程，而卡尼法是用赛德尔迭代法来介位移动方程。它给设计人员带来了繁重的计算工作量，使设计周期拖得很长，既费时又不精确，远远不能适应形势发展的需要。

为了使框架计算能从繁琐的手工计算方法中解放出来，1974年9月份，我们和上海复旦大学计算机科学系计算数学教研组共同协作开始编制平面框架计算通用程序。1975年6月，我们在复旦大学719机上完成了平面框架程序的编制工作，经过考核试算即投入生产使用。实践证明，用电子计算机进行框架计算具有速度快，精度高的优点，75年10月我们在719机程序的基础上，编写了TQ-16“平面框架”计算通用程序，对其中地震力计算部份按“工业与民用建筑抗震设计规范”(TJ11-74)的要求作了修改，并根据“工业与民用建筑结构荷载规范”(TJ9-74)的要求增加了荷载组合，目前已正式投入使用。

在程序编写过程中，我们对“数据填表符合结构设计人员习惯要求，输入数据少，输出结果符合规范要求”这几方面作了较多的考虑，因此使用本程序算题，输入数据较少，只需提供一些必要的的数据，如层高、跨度等，计算机即自动形成梁柱的编码及其几何尺寸。对截面尺寸，荷载，凡是有重复相同的部份，也只需填写最简单的说明，由计算机自动展开形成各根杆件的惯性矩及其相应的荷载。实践证明，这样做是行之有效的，可以减少大量原始数据的输入。

二年多来我们已用本程序计算了数百榀框架，但由于我们水平有限，其中必有不少错误和考虑不周之处，我们衷心的希望各单位在使用过程中提出宝贵的意见，以便作进一步的修改和完善，更好的为社会主义建设服务。

(一) 程序的功能：

1. 本程序可计算由正交杆件组成的平面框架，考虑杆件的弯曲变形，但不考虑轴向变形。
2. 在外荷载作用下可求出：
 - (1) 每根梁二端的最大，最小剪力；
 - (2) 每根梁若干个等分截面上弯矩的正、负包络；
 - (3) 每根柱下、上二端的八组内力组合结果；

(4) 每根梁、柱的配筋率及钢筋面积。

3. 本程序可处理下列各种荷载:

- (1) 全均布荷载;
- (2) 局部均布荷载;
- (3) 梯形荷载;
- (4) 集中荷载;
- (5) 杆件节间弯矩和集中力;
- (6) 结点弯矩和集中力;
- (7) 风荷载;
- (8) 地震荷载;
- (9) 桥式吊车或悬挂吊车荷载;
- (10) 可由(1)~(6)种荷载叠加组合成的其他类型荷载。

4. 本程序可进行抗震计算, 根据“工业与民用建筑抗震设计规范”(TJ11-74)的要求可计算框架的自振周期及地震荷载作用下的结构内力, 按照“钢筋混凝土结构设计规范”(TJ10-74)给以配筋。

5. 本程序根据“工业与民用建筑结构荷载规范”(TJ9-74)第一章第三条的规定对下列四种情况:

- (1) 静载 + 活载 + 吊车荷载;
- (2) 静载 + (活载 + 风载 + 吊车荷载) $\times 0.9$;
- (3) 静载 + 风载;
- (4) 静载 + 地震荷载 + 活载 $\times 0.7$;

进行荷载组合, 并取其最不利组合。

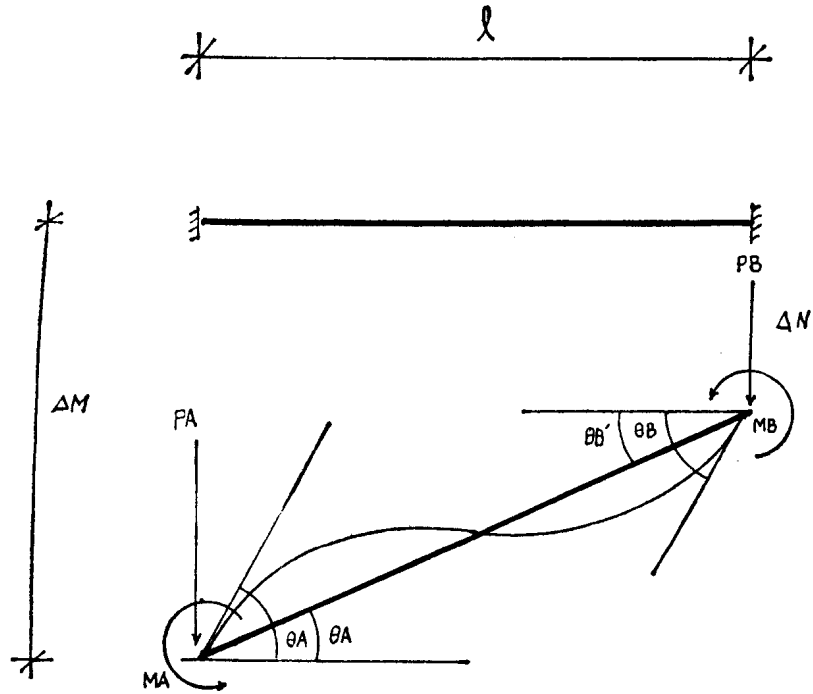
(二) 基本原理及数学描述:

本程序是根据刚度矩阵法的基本原理进行编制的。所谓刚度矩阵法的实质就是结构力学中的变形法。编制程序时将框架离散成单一的杆件, 建立每一根杆件的单元刚度矩阵, 然后根据杆件结点上的变形协调条件和力的平衡关系, 以及支座约束的情况, 利用刚度集合的方法将单元刚度矩阵迭加成结构的总刚度矩阵。然后求解结点的位移, 当位移求出后再返回去解出杆件的内力。

(1) 单元刚度矩阵的建立:

对于一根二端刚接的杆件, 杆端分别有角位移 θ_A, θ_B 以及线位移 Δ_m, Δ_n , 则可列出杆端内力的位移方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_A = \frac{4EI}{l} \theta_A + \frac{2EI}{l} \theta_B - \frac{6EI}{l^2} \Delta_m + \frac{6EI}{l^2} \Delta_n \\ M_B = \frac{2EI}{l} \theta_A + \frac{4EI}{l} \theta_B - \frac{6EI}{l^2} \Delta_m + \frac{6EI}{l^2} \Delta_n \\ P_A = -\frac{6EI}{l^2} \theta_A - \frac{6EI}{l^2} \theta_B + \frac{12EI}{l^3} \Delta_m - \frac{12EI}{l^3} \Delta_n \\ P_B = \frac{6EI}{l^2} \theta_A + \frac{6EI}{l^2} \theta_B - \frac{12EI}{l^3} \Delta_m + \frac{12EI}{l^3} \Delta_n \end{array} \right.$$



上式写成矩阵形式 即:

$$[M]^e = [K]^e [\theta]^e$$

式中:

$$[K]^e = \frac{EI}{l} \begin{bmatrix} 4 & 2 & -\frac{6}{l} & \frac{6}{l} \\ 2 & 4 & -\frac{6}{l} & \frac{6}{l} \\ -\frac{6}{l} & -\frac{6}{l} & \frac{12}{l^2} & -\frac{12}{l^2} \\ \frac{6}{l} & \frac{6}{l} & -\frac{12}{l^2} & \frac{12}{l^2} \end{bmatrix}$$

为单元的刚度矩阵,上标 e 表示为单元矩阵

$$[\theta]^e = \begin{bmatrix} \theta_A \\ \theta_B \\ \Delta_m \\ \Delta_n \end{bmatrix} \quad \text{为单元位移矩阵}$$

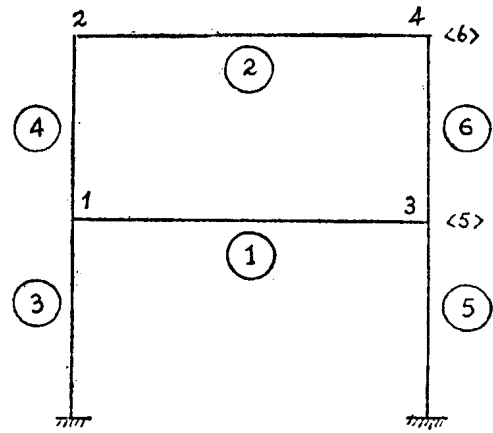
$$[M]^e = \begin{bmatrix} M_A \\ M_B \\ P_A \\ P_B \end{bmatrix} \quad \text{为单元内力矩阵}$$

对于二端有柱支承的梁,在不考虑柱的轴向变形的情况下,可以把相应的行列去掉,因此梁的单元刚度矩阵为:

$$[K]^e = \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix} \frac{EI}{l}$$

(2) 结构总刚度矩阵的形成:

刚度矩阵法是建立在弹性理论的基础上, 所以它必须满足结点相容条件和平衡条件。这样我们就可以把各杆件的单元刚度矩阵, 按其下标相同加起来, 迭加成总刚度矩阵, 为此我们将框架根据独立变形的个数, 按照一定的规律对结点进行编号, 这里我们约定: 角位移的编码规则为: 自下而上, 从左到右地编; 线位移的编码规则为: 从左到右, 自下而上地编, 而且序号是紧接着角位移的下标序号, 例右图, 角位移的编号为: 1, 2, 3, 4; 线位移的编号为 5, 6。这样:



① 号杆的单元刚度矩阵为:

$$[K]_1^e = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{13} \\ K_{31} & K_{33} \end{bmatrix}$$

② 号杆的单元刚度矩阵为:

$$[K]_2^e = \begin{bmatrix} K_{22} & K_{24} \\ K_{42} & K_{44} \end{bmatrix}$$

③ 号杆的单元刚度矩阵为:

$$[K]_3^e = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{15} \\ K_{51} & K_{55} \end{bmatrix}$$

④ 号杆的单元刚度矩阵为:

$$[K]_4^e = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{25} & K_{26} \\ K_{51} & K_{52} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix}$$

⑤ 号杆的单元刚度矩阵为:

$$[K]_5^e = \begin{bmatrix} K_{33} & K_{35} \\ K_{53} & K_{55} \end{bmatrix}$$

⑥ 号杆的单元刚度矩阵为:

$$[K]_6^e = \begin{bmatrix} K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix}$$

叠加成总刚度矩阵:

$K_{11} + K_{11} + K_{11}$	K_{12}	K_{13}		$K_{15} + K_{15}$	K_{16}
K_{21}	$K_{22} + K_{22}$		K_{24}	K_{25}	K_{26}
K_{31}		$K_{33} + K_{33} + K_{33}$	K_{34}	$K_{35} + K_{35}$	K_{36}
	K_{42}	K_{43}	$K_{44} + K_{44}$	K_{45}	K_{46}
$K_{51} + K_{51}$	K_{52}	$K_{53} + K_{53}$	K_{54}	$K_{55} + K_{55} + K_{55} + K_{55}$	$K_{56} + K_{56}$
K_{61}	K_{62}	K_{63}	K_{64}	$K_{65} + K_{65}$	$K_{66} + K_{66}$

同理,对于具有 n 个变形的框架,则可以建立 n 阶的矩阵

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{n1} & K_{12} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{22} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix}$$

根据麦克斯威尔位移互等定理可见 $K_{ij} = K_{ji}$,因此总刚度矩阵是一个对称矩阵,为了节省计算机的存贮单元,我们只存放了一个上三角形矩阵

$$\begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1n} \\ & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ & & K_{33} & \cdots \\ & & & \ddots \\ & & & & K_{nn} \end{bmatrix}$$

(3) 结点力向量的形成:

总刚度矩阵 $[K]$ 形成后,结点力向量 $\{M\}$ 及位移变形向量 $\{\theta\}$ 可建立关系式如下:

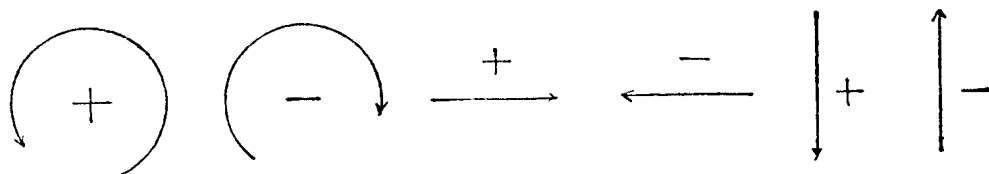
$$[K]\{\theta\} = \{M\}$$

其中

$$\{M\} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \vdots \\ M_n \end{bmatrix}$$

如转角自由度个数为 DS 个,侧移自由度个数为 WS 个,则 $\{M\}$ 中,前面 DS 个为转角自由度编码对应的不平衡弯矩,后面 WS 个为与侧移自由度对应的不平衡水平力。当荷载作用于结点间,则应转化为等效结点荷载。其方法为,求出杆件在一组节间荷载作用下的固端反力及固端弯矩,反号后即为等效结点荷载。

力和变形用同一符号,其正负符号规定如下:



根据上述符号规定可得出杆件在各种节间荷载下的固端反力和固端弯矩。

① 集中荷载:

(1-1) 简支反力:

$$Q_A^0 = -P \frac{l-a}{l}$$

$$Q_B^0 = -P \frac{a}{l}$$

(1-2) 简支跨中弯矩:

$$M_x^0 = \begin{cases} -Q_A^0 x & \text{当 } x < a \text{ 时} \\ -Q_B^0 (l-x) & \text{当 } x \geq a \text{ 时} \end{cases}$$

(1-3) 固端弯矩:

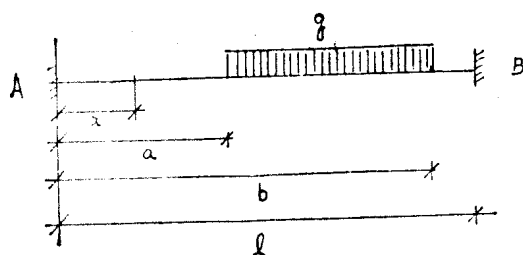
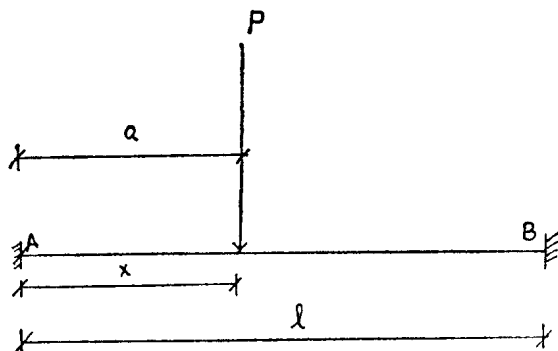
$$M_A^F = -\frac{P}{l^2} (l-a)^2 a$$

$$M_B^F = -\frac{P}{l^2} (l-a) a^2$$

(1-4) 固端反力:

$$Q_A^F = Q_A^0 - \frac{M_A^F + M_B^F}{l}$$

$$Q_B^F = Q_B^0 + \frac{M_A^F + M_B^F}{l}$$



② 均布荷载:

(2-1) 简支反力:

$$Q_A^0 = -q(b-a) - Q_B^0$$

$$Q_B^0 = \frac{-q(b^2 - a^2)}{2l}$$

(2-2) 简支跨中弯矩:

$$M_x^0 = \begin{cases} -Q_A^0 x & \text{当 } x < a \text{ 时} \\ -Q_A^0 x - \frac{q}{2} (x-a)^2 & \text{当 } a \leq x < b \text{ 时} \\ -Q_B^0 (l-x) & \text{当 } x \geq b \text{ 时} \end{cases}$$

(2-3) 固端弯矩:

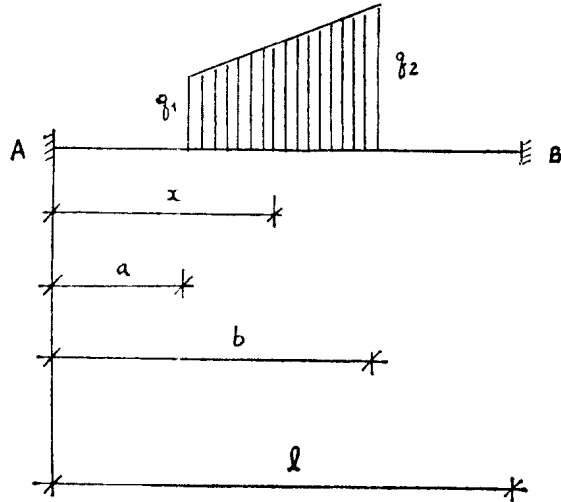
$$M_A^F = -\frac{q}{4l^2} \left[-b^2 \left(2l^2 - \frac{8}{3}lb + b^2 \right) + a^2 \left(2l^2 - \frac{8}{3}la + a^2 \right) \right]$$

$$M_B^F = -\frac{q}{4l^2} \left\{ -(l-b)^2 \left[2l^2 - \frac{8}{3}l(l-b) + (l-b)^2 \right] \right. \\ \left. + (l-a)^2 \left[2l^2 - \frac{8}{3}l(l-a) + (l-a)^2 \right] \right\}$$

(2-4) 固端反力:

$$Q_A^F = Q_A^0 - \frac{M_A^F + M_B^F}{l}$$

$$Q_B^F = Q_B^0 + \frac{M_A^F + M_B^F}{l}$$



③ 梯形荷载:

(3-1) 简支反力:

$$Q_A^0 = -\frac{b-a}{6l} [(3l-2a-b)q_1 + (3l-2b-a)q_2]$$

$$Q_B^0 = -\frac{b-a}{6l} [(2a+b)q_1 + (2b+a)q_2]$$

(3-2) 简支跨中弯矩:

$$M_x^0 = \begin{cases} -Q_A^0 x & \text{当 } x < a \text{ 时} \\ -Q_A^0 x - \frac{(x-a)^2}{2} \left(q_1 + \frac{x-a}{b-a} \frac{q_2-q_1}{3} \right) & \text{当 } a \leq x < b \text{ 时} \\ -Q_B^0 (l-x) & \text{当 } x \geq b \text{ 时} \end{cases}$$

(3) 固端弯矩:

$$\text{令 } K_1 = \frac{q_1}{b-a}; \quad K_2 = \frac{q_2}{b-a}$$

$$M_A^F = \left\{ \frac{K_1(l-b)^3}{l^2} \left[\frac{l(l-b)}{3} - \frac{l+(l-b)}{4} \cdot (l-b) + \frac{(l-b)^2}{5} \right] \right. \\ - \frac{K_1(l-a)^3}{l^2} \left[\frac{l(l-b)}{3} - \frac{l+(l-b)}{4} \cdot (l-a) + \frac{(l-a)^2}{5} \right] \\ \left. + \frac{K_2(l-a)^3}{l^2} \left[\frac{l(l-a)}{3} - \frac{l+(l-a)}{4} \cdot (l-a) + \frac{(l-a)^2}{5} \right] \right\}$$

$$M_B^F = -\frac{K_1 b^3}{l^2} \left[\frac{lb}{3} - \frac{l+b}{4} b + \frac{b^2}{5} \right] + \frac{K_1 a^3}{l^2} \left[\frac{lb}{3} - \frac{l+b}{4} a + \frac{a^2}{5} \right] \\ - \frac{K_2 a^3}{l^2} \left[\frac{la}{3} - \frac{l+a}{4} a + \frac{a^2}{5} \right] + \frac{K_2 b^3}{l^2} \left[\frac{la}{3} - \frac{l+a}{4} b + \frac{b^2}{5} \right]$$

(3-4) 固端反力:

$$Q_A^F = Q_A^0 - \frac{M_A^F + M_B^F}{l}$$

$$Q_B^F = Q_B^0 + \frac{M_A^F + M_B^F}{l}$$

④ 集中弯矩:

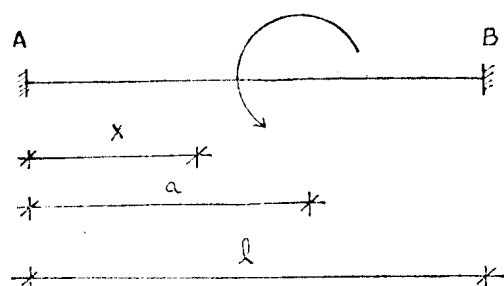
(4-1) 简支反力

$$Q_A^0 = -\frac{M}{l}$$

$$Q_B^0 = +\frac{M}{l}$$

(4-2) 简支跨中弯矩:

$$M_x^0 = \begin{cases} -Q_A^0 x & \text{当 } x < a \text{ 时} \\ -Q_B^0 (l-x) & \text{当 } x \geq a \text{ 时} \end{cases}$$



(4-3) 固端弯矩:

$$M_A^F = \frac{M(l-a)}{l^2} \cdot (3a-l) = +Q_A^0 \frac{l-a}{l} \cdot (l-3a)$$

$$M_B^F = \frac{Ma}{l^2} \cdot (2l-3a) = +Q_B^0 \frac{a}{l} (2l-3a)$$

(4-4) 固端反力:

$$Q_A^F = Q_A^0 - \frac{M_A^F + M_B^F}{l}$$

$$Q_B^F = Q_B^0 + \frac{M_A^F + M_B^F}{l}$$

每组荷载按上式公式求出 M_A^F 、 M_B^F 、 Q_A^F 、 Q_B^F ，反号后，按相应自由度编号累加，即得结点力向量 $\{M\}$ 。

上式公式中计算简支反力仅仅是为了下面几步计算的方便，而计算简支跨中弯矩是为了形成梁的弯矩包络图。

(4) 总刚度矩阵求逆及求解变形向量:

当总刚度矩阵 $[K]$ 及节点力向量(荷载矩阵) $\{M\}$ 形成后，即可根据关系式:

$$[K]\{\theta\} = \{M\} \quad \text{来求解变形向量(位移矩阵)} \{\theta\}。$$

总的变形向量 $\{\theta\}$ 求解后，即可找到每一根杆件对应的单元位移矩阵 $\{\theta\}^e$ ，从而根据

$$[M]^e = [K]^e [\theta]^e \quad \text{求出梁或柱的杆端内力。}$$

求解线性代数方程组 $[K]\{\theta\} = \{M\}$ 的方法是多种多样的，这里我们是用求逆的方法来求解 $\{\theta\}$

即

$$\{\theta\} = [K^{-1}]\{M\}$$

令 $[\delta] = [K^{-1}]$, $[\delta]$ 即为结构的柔度矩阵, 采用求逆方法的好处是: 当框架的总刚度矩阵形成后, 求逆一次即得结构的柔度矩阵 $[\delta]$ 。当要计算多种荷载时, 只需改变 $\{M\}$ 后与 $[\delta]$ 相乘, 即可求出结构的位移向量 $\{\theta\}$, 而 $[\delta]$ 不被破坏, 仍可重覆使用, 特别是进行活荷载内力组合时, 更为方便。

关于大型线性代数方程组的求逆方法, 可参阅有关资料, 此处不再详述。

(5) 地震力的计算:

在形成总刚度矩阵时, 由于事先有意识的将侧移自由度编码安排在角位移自由度编码的后面, 因此当总刚度矩阵求逆后, 只需将与侧移自由度编码相对应的这一块子矩阵划出来, 即为结构的侧向柔度矩阵 $[A]$

如侧移自由度为 WS 个, 则

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{1WS} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{WS2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1WS} & a_{2WS} & \cdots & a_{WSWS} \end{bmatrix}$$

其中 a_{ij} 的意义为在 j 点作用有单位水平力在 i 点所产生的水平位移

而

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & & & 0 \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & m_{WS} \end{bmatrix}$$

为结构的质量矩阵, m_i 为第 i 楼层的质量

已知 $[M][A]$ 则可建立结构的动力方程, 即:

$$[A][M]\{X\} - \lambda\{X\} = 0$$

这里 $\lambda = \frac{1}{\omega^2}$, ω 为不考虑阻尼下自振圆频率, 这样就形成一个求解特征值的问题。 $\{X\}$ 为振幅向量, 但 $[A][M]$ 相乘后不再是一个对称的方阵, 故不能再用雅可比法来求上式的特征值, 而必须作进一步的变换。

为此令

$$[M] = [M]^{\frac{1}{2}}[M]^{\frac{1}{2}},$$

则

$$[A][M]^{\frac{1}{2}}[M]^{\frac{1}{2}}\{X\} - \lambda\{X\} = 0$$

$$[M]^{-\frac{1}{2}}[M]^{\frac{1}{2}}[A][M]^{\frac{1}{2}}[M]^{\frac{1}{2}}\{X\} - \lambda\{X\} = 0$$

等式二边乘以 $[M]^{\frac{1}{2}}$

则

$$[M]^{\frac{1}{2}}[A][M]^{\frac{1}{2}}[M]^{\frac{1}{2}}\{X\} - \lambda[M]^{\frac{1}{2}}\{X\} = 0$$

令

$$\{X'\} = [M]^{\frac{1}{2}}\{X\}$$

则

$$[M]^{\frac{1}{2}}[A][M]^{\frac{1}{2}}\{X'\} - \lambda\{X'\} = 0$$

这里

$$[M]^{\frac{1}{2}}[A][M]^{\frac{1}{2}} \text{ 为一对称矩阵}$$

故套用雅可比法过程后,即可求得 WS 个特征值及相应的特征向量 $\{X\}$ 。

对于平面框架来说一般只求得三个最大的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 及其相应的振型,再由关系式 $T_j = 2\pi\sqrt{\lambda_j}$ ($j=1,2,3$) 可求得结构的自振周期。

已知结构的自振周期及振型根据“工业与民用建筑抗震设计规范”(TJ11-74)附录一中的公式:

$$P_{ij} = C\alpha_j\gamma_j X_i(i)W_i$$

即可求出第一,二,三振型的水平地震荷载。

式中: P_{ij} : 作用在质量 i 的 j 振型水平地震荷载;

α_j : 相应于结构 j 振型自振周期的地震影响系数 α 值,可从规范第三章图 2 查得,当周期已知,程序即根据图 2 公式求出 α_j 的值;

$X_j(i)$: 结构 j 振型质点 i 的相对水平位移,即为与特征值 λ_j 相应的特征向量;

$$r_j = \frac{\sum_i X_j(i)W_i}{\sum_i X_j^2(i)W_i} \text{ 振型参与系数;}$$

W_i : 集中在质点 i 的重量即为 $[M_i]$;

C : 结构影响系数,一般取 $C=0.3$ 。

由水平地震荷载产生的结构内力则按下式确定:

$$S = \sqrt{\sum_j S_j^2} \quad (j=1,2,3)$$

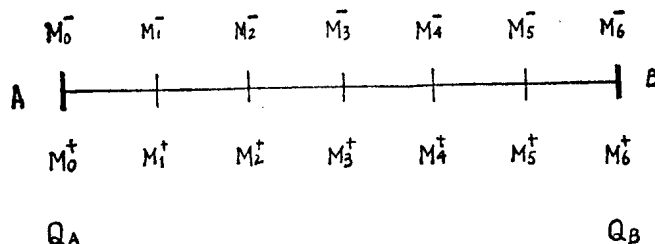
式中 S_j : 由 j 振型水平地震荷载产生的结构内力,其符号取第一振型时的内力符号。

上述规范附录中的方法要进行手工计算是比较困难,而对于计算机来说,通过求解特征方程,确定了结构的自振周期后,要实现上述的计算步骤是并不困难的。

(6) 内力组合:

(6-1) 梁的内力组合:

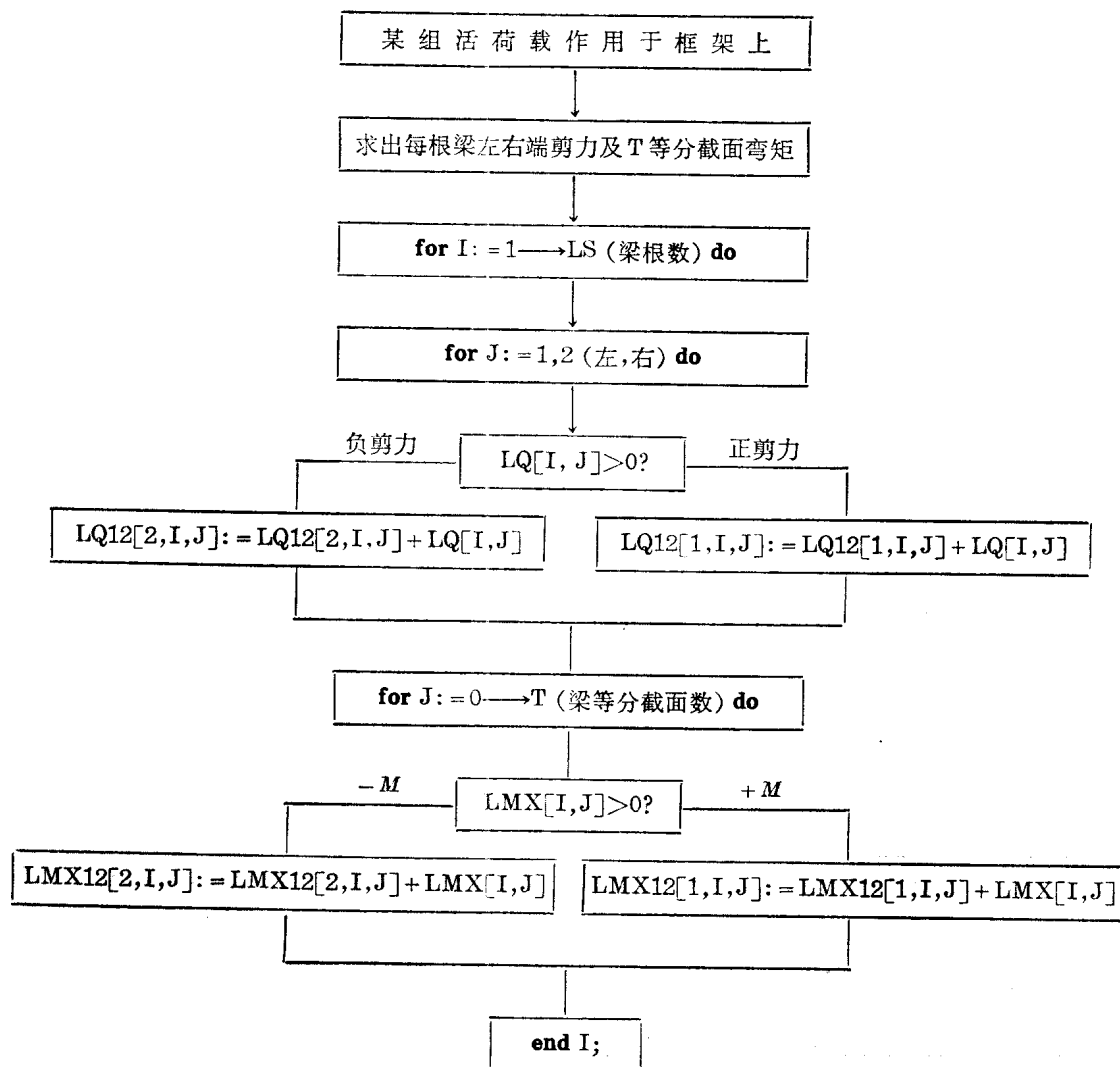
梁的内力组合是把每根梁分成 T 等分($T=2,4,6,8$, 或 10)求其正负包络图的数值及其二端的剪力 即:



$$M_x = M_{0x} - M_A \frac{l-x}{l} + M_B \frac{x}{l}$$

其中 M_A, M_B 是根据变形求出的杆端弯矩, M_{0x} 是简支跨中弯矩。

当活荷载作用于框架上时,梁内力组合的框图如下:(标识符见三)



(6-2) 柱的内力组合:

当活荷载作用于框架时,框架所有柱的下,上二端产生弯矩(M),轴力(N),和剪力(Q)。

首先以活载产生的弯矩(M)的符号为主来组合。对于第 K 根柱来说,程序把静载产生的 M 加上所有活载产生的正弯矩称为第 K 根柱的 $M_{\max}$,其相应的轴力 N 等于静载产生的轴力加上相应活载产生的轴力,相应的剪力等于静载产生的剪力加上相应的活载产生的剪力。

同理,对于第 K 根柱来说,程序把静载产生的弯矩加上所有活载产生的负的弯矩,称为第 K 根柱的 $M_{\min}$ 其相应的轴力 N 等于静载产生的轴力加上相应活载产生的轴力,相应的剪力等于静载产生的剪力加上相应的活载产生的剪力。

其次以活载产生的轴力(N)的符号为主来组合,对于第 K 根柱来说,则可以求出 $N_{\max}$, $N_{\min}$ 及其相应的弯矩,剪力。

当活荷载产生的弯矩 M 等于零时,有时其相应轴力 $N > 0$ 为不利情况,有时 $N < 0$ 为不利情况,因此对于 $M_{\max}$, $M_{\min}$ 所对应的轴力 N 和剪力 Q 都分成二组,一组记为 N^+ 和相应的

剪力 Q , 另一组记为 N^- 和相应的剪力 Q 。当 $M=0$ 时, 同时 $N>0$, 则把 N 加到 $M_{\max}$ 和 $M_{\min}$ 对应的二个 N^+ 上去, 对应的剪力 Q 加到这二组相应的 Q 上去。如果相应的 $N<0$ 时, 则把 N 加到 $M_{\max}$ 和 $M_{\min}$ 对应的二个 N^- 上去, 对应的剪力 Q 加到二组相应的 Q 上去。

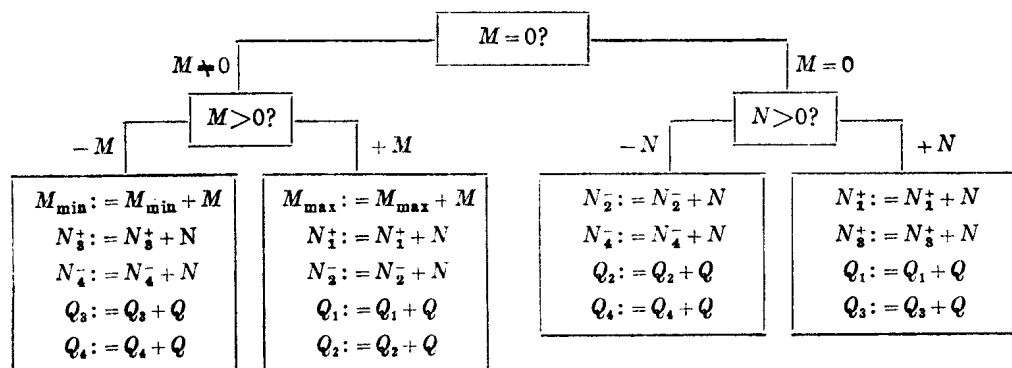
当活荷载产生的轴力等于零时, 同样按上述逻辑进行组合。

根据上述内力组合的逻辑, 可求出每根柱上(下)端的八组内力:

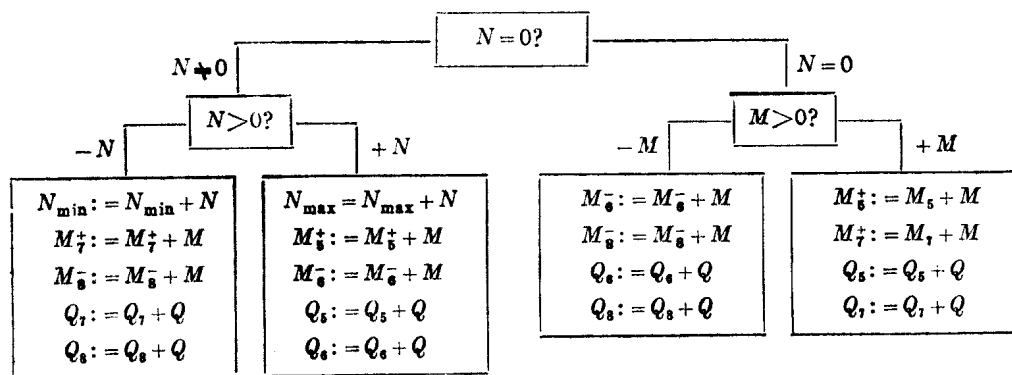
		相应的轴力	相应的剪力
第一组	$M_{\max}$	N_1^+	Q_1
第二组	$M_{\max}$	N_2^-	Q_2
第三组	$M_{\min}$	N_3^+	Q_3
第四组	$M_{\min}$	N_4^-	Q_4
相应的弯矩			相应的剪力
第五组	M_5^+	$N_{\max}$	Q_5
第六组	M_6^-	$N_{\max}$	Q_6
第七组	M_7^+	$N_{\min}$	Q_7
第八组	M_8^-	$N_{\min}$	Q_8

柱内力组合是由过程 LZH(1), ZZH(1) 来实现, 其框图如下:

以 M 的符号为主组合的框图:



以 N 的符号为主组合的框图:

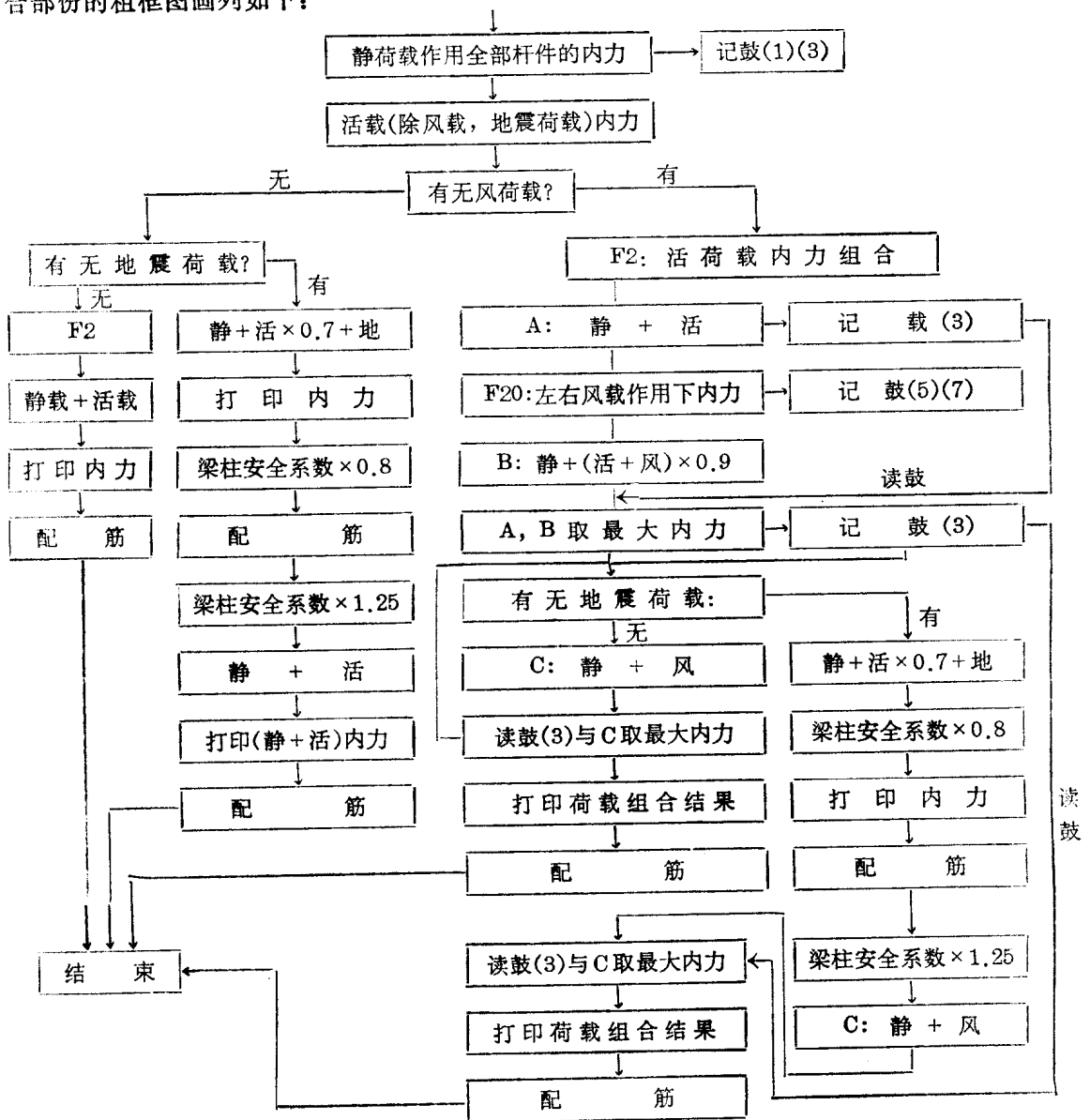


(7) 荷载组合:

根据“工业与民用建筑结构荷载规范”(TJ9-74)第一章第三条的规定当结构有静载, 活荷载, 风荷载, 吊车荷载, 或地震荷载作用时, 还需对下列四种情况:

- (1) 静载 + 活载 + 吊车荷载;
- (2) 静载 + (活载 + 吊车荷载 + 风荷载) $\times 0.9$;
- (3) 静载 + 风载;
- (4) 静载 + 地震荷载 + 活荷载 $\times 0.7$;

进行荷载组合,然后根据最不利组合结果进行配筋计算,TQ-16 计算机内存容量为 32768 单元,要进行荷载组合单纯依靠内存的存贮单元就显得不够了,为此,本程序在进行荷载组合时使用了外部设备—*1 鼓,*1 鼓的存贮单元为 14336 个,要存放静载、活载、风载、地震荷载作用下的全部杆件内力仍嫌不足,因此,*1 鼓中只记存静载作用下,左右风荷载作用下的全部杆件内力及不利组合的中间结果,对于活荷载(除风载,地震荷载)作用下的杆件内力不记鼓,当活荷载要乘以组合系数时,程序作了专门的处理,当然这样程序就显得比较复杂。现将荷载组合部份的粗框图画列如下:



(8) 配筋:

(8-1) 梁配筋对于正负包络图的每一断面的 M 值,

当 $|KM| \leq 0.4BH_0^2Rw$ 时,

$$\text{配筋率} \quad \mu = \frac{Rw}{Rg} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{|KM|}{0.5BH_0^2Rw}} \right)$$

$$\text{配筋面积} \quad FA = \mu BH_0;$$

$$\text{上式中:} \quad H_0 = H - 0.035;$$

B, H 为梁的断面尺寸;

Rw : 砼抗弯强度;

Rg : 钢筋计算强度;

K : 梁的强度安全系数;

(8-2) 柱配筋:

按对称配筋考虑:

有地震时, K (柱的强度安全系数) = $K \cdot 0.8$, 对柱的下上端按不利组合, 分别求出配筋面积及配筋率计算公式如下:

$$\bar{e}_0 = \frac{|M|}{N};$$

$$\text{偏心距有关系数} \quad \alpha_e = \begin{cases} 0.22, & \frac{\bar{e}_0}{H} \geq 1; \\ \frac{0.1}{0.3 + \frac{\bar{e}_0}{h}} + 0.143, & \frac{\bar{e}_0}{H} < 1; \end{cases}$$

$$\text{偏心距增大系数} \quad \eta = \begin{cases} 1, & \frac{l_0}{H} \leq 8; \\ \frac{1}{1 - \frac{KN}{10\alpha_e EJ} l_0^2}, & \frac{l_0}{H} > 8; \end{cases}$$

$$e_0 = \eta \bar{e}_0;$$

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= e_0 + \frac{H}{2} - a \\ e_2 &= e_0 - \frac{H}{2} + a \end{aligned} \right\} (\alpha = 0.035);$$

$$H_0 = H - 0.035;$$

$$F_{w0} = 0.002 \cdot B \cdot H_0;$$

$$FA_i = \begin{cases} \frac{KN \cdot e_2}{Rg \cdot (H_0 - 0.035)} & \text{当 } KN/Rw \cdot B < 0.07 \\ \frac{KN}{Rg} \cdot \frac{e_1 - H_0 \left(1 - \frac{KN}{2RwBH_0} \right)}{H_0 - 0.035} & \text{当 } 0.07 \leq \frac{KN}{RwB} \leq 0.55H_0 \\ \frac{KN e_1 - 0.4Rw \cdot B \cdot H_0^2}{Rg(H_0 - 0.035)} & \text{当 } \frac{KN}{RwB} > 0.55H_0 \end{cases}$$