

# 剪力墙刚度优化分析的计算机程序

—为普及微型计算机而作

王全凤

(土木工程系)

## 一、问题的提出及其数学模型

对于如何确定框架-剪力墙高层结构中剪力墙的刚度,国内国外都有论述。在震条件下、剪力墙刚度是不是越大越好? 现在的答案比较明确。不是,而是有一个合适的刚度,这就是结构的优化问题,随着时间的推移,这个观点被愈来愈多的人接受。为了有代表性起见,我们以变刚度的框架-剪力墙结构为例来说明这一点。至于如何确定此类结构剪力墙的合适刚度,正是参考文献〔1〕所详细涉及的内容。这里的变刚度指的是剪力墙抗弯刚度和框架的剪切刚度呈阶梯形变化,这样可以人为地沿结构高度划分计算单元,使单元内剪力墙抗弯刚度和框架剪切刚度为常数。本着这个目的,一个确定剪力墙最优刚度的数学模型应该被建立,即:首先用微分方程法导出结构单元矩阵,根据相邻两个计算单元的协调条件导出传递矩阵,再以结构基础边界条件为初始值,通过传递矩阵从下而上传导到结构顶部,接着由其顶部边界条件求出第一单元位移和内力;从而可求出考虑剪力墙弯曲、剪切变形时结构的变形和内力。根据这些解,确定了包括位移和几何约束在内的约束条件。再根据反应谱理论确定目标函数(地震荷载),最后以剪力墙有效刚度作为设计变量,建立了确定剪力墙最优刚度的数学模型:

求剪力墙有效刚度  $B_w$ , 使得地震荷载为最小,并满足约束条件

位移约束

$$\begin{cases} Y_{max} \leq Y^* \\ Z_{max} \leq Z^* \\ B_w \leq 0 \end{cases}$$

几何约束

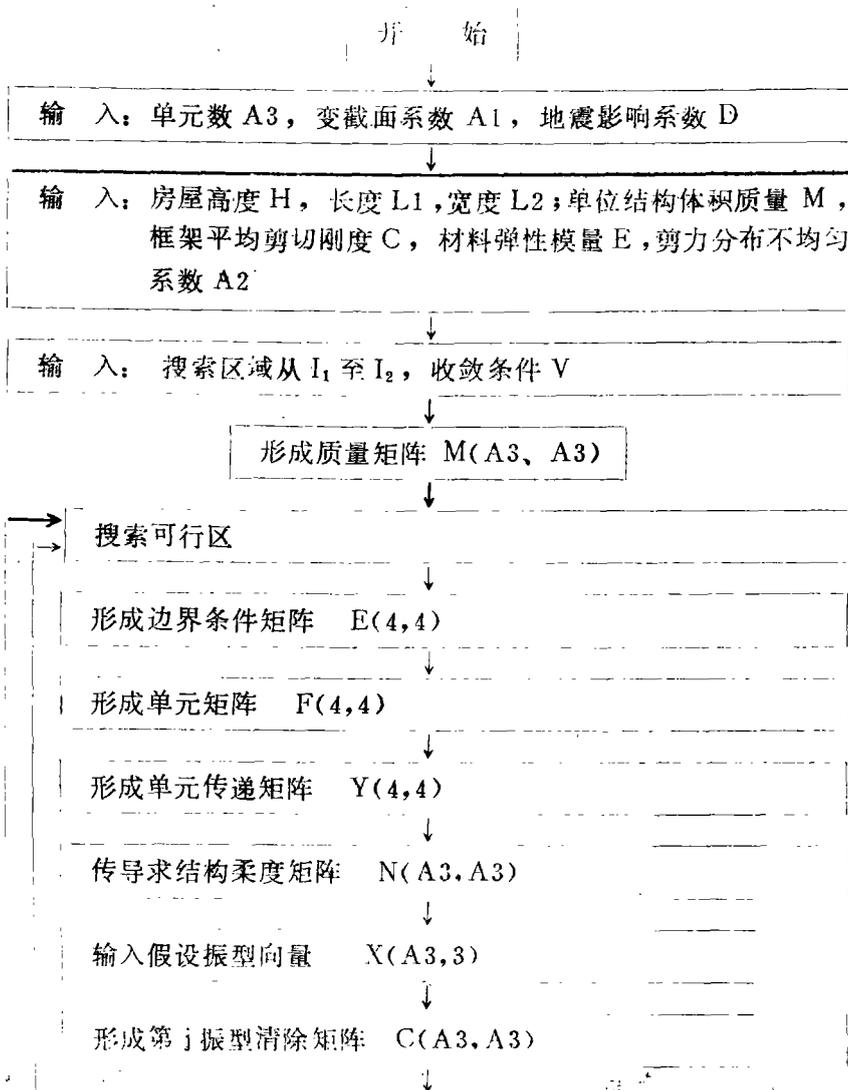
$$\begin{cases} K_1 \cdot Q_{max} \leq 0.2 R_a t_1 \cdot (B_1 - t_1) \\ K_1 \cdot (Q_z)_{max} \leq 0.3 R_a b_1 \cdot h_1 \\ \sigma_0 \leq 0.75 R_a \\ K_1 \cdot M_{max} \leq 0.4 R_w b_2 \cdot h_2 \cdot h_2 \end{cases}$$

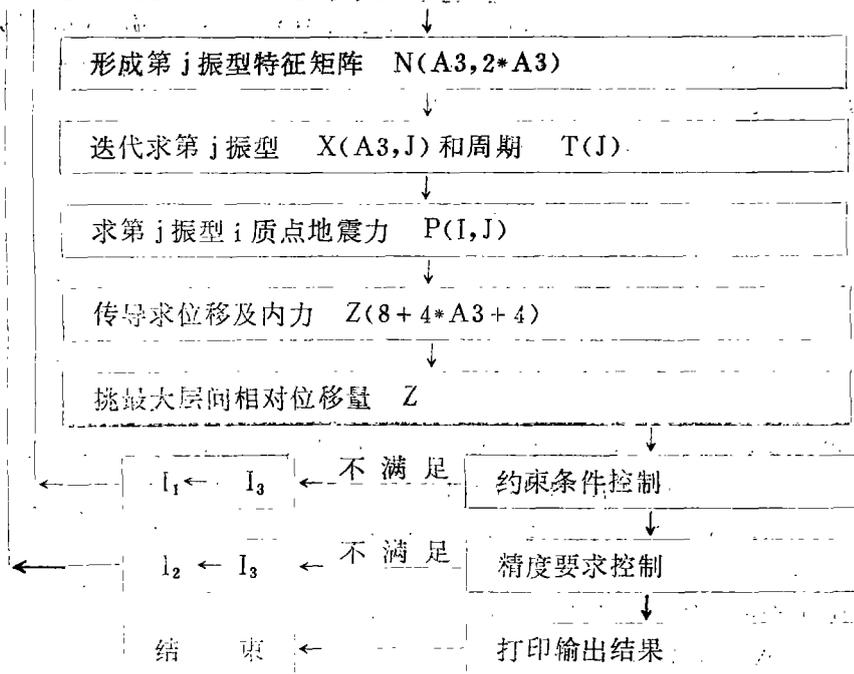
式中  $Y_{max}$ 、 $Z_{max}$  ——房屋最大水平与层间相对位移;  $Y^*$ 、 $Z^*$  ——  $Y_{max}$  与  $Z_{max}$  的允许

值;  $K_1$  ——安全系数;  $Q_{max}$  ——每道剪力墙承受最大剪力;  $R_c, R_w$  ——混凝土的抗压与抗弯设计强度,  $t_1, B_1$  ——剪力墙的厚度与长度;  $(Q_z)_{max}$  ——最大柱节点区剪力;  $b_1, b_2$  ——柱与梁截面的宽度;  $h_1, h_2$  ——柱与梁截面的高度;  $\sigma_c$  ——柱的平均压应力;  $M_{max}$  ——框架梁承受最大弯矩。

## 二、数学模型的解——框图设计

上述数学模型是属于非线性规划问题,由于目标函数的导数很难求得,本文用直接搜索法求解。又因为目标函数与设计变量的关系是单调增函数关系,用两分法进行一维搜索求最优解比较方便,搜索区间可由经验估计,收敛条件由设计所需精度决定。设  $I_1$  为不可行设计,  $I_2$  为可行设计,  $I_3 = (I_1 + I_2)/2$ ,  $I_1, I_2, I_3$  均为搜索过程中剪力墙有效惯性矩某一个量值。程序框图如下:





### 三、程 序 说 明

5	A3 = 7: A1 = 0.75: D = 0.135	输入基本参数
10	DIM A(3*A3), L(2*A3), H(2*A3), X(A3, A3), B(2*A3+1), D(3*A3), P(3*A3, A3), K(115, 5)	数
15	DIM M(2*A3, 2*A3), N(2*A3, 2*A3), C(2*A3, 2*A3), Y(5, 5), E(5, 5), R(115)	组
20	DIM Z(115), Q(115), F(5, 115), S(A3), G(3* A3), T(A3), I(A3)	定
25	H = 42.0: L1 = 38.16: L2 = 10.92: M = 0. 0246: C = 15298: A2 = 1.2	义
30	I1 = 0.01: I2 = 50.0	输 本
40	LPRINT	入 数
50	I3 = (I1 + I2) / 2: E = 2.6E + 6: G = 0.42 * E	基 据
140	FOR I = 2 TO A3 - 1: M(1, I) = M * 5.6 * L1 * L2: NEXT I: M(1, 1) = M * 7 * L1 * L2: M(A3, A3) = M(A3 - 1, A3 - 1) / 2	形 成 质 量 矩 阵
170	FOR I = 2 TO A3: L(I) = 5.60: NEXT I: L (1) = 8.4	输 入 单 元 长 度 向 量

搜索可行区

	185 I(1)=I3 : I(2)=A1*I3 : I(3)=I(2) : I(4)=I(3) : I(5)=A1*I(4) : I(6)=I(5) : I(7)=I(6)	输入单元剪力 墙惯性矩向量
	200 FOR I=1 TO 3*A3 : P(I,1) : NEXT I	
	205 U=1 : FOR A=1 TO A3 : FOR B=A TO A : GOSUB 800 : NEXT B : FOR B=1 TO A : N (A,B)=Z(4*B+9) : PRINT "N("A;","B;") ="N(A,B) : NEXT B, A	形 成 柔 度 矩 阵
	265 FOR I=1 TO A3 : FOR J=1 TO A3	
	270 IF J>=I GOTO 280	
	275 N(J,I)=N(I,J) : NEXT J	
	280 NEXT	
搜	300 FOR I=1 TO A3 : FOR J=1 TO A3 : N(I, A3 + J)=0 : FOR K=1 TO A3	形 型 成 特 基 征 本 矩 振 阵
素	305 N(I, A3+J)=N(I, A3+J)+N(I,K)*M(K,J) : NEXT K	
	310 PRINT "N("I;","A3+J;")="N(I, A3+J) : NEXT J, I	
	325 GOSUB 1000 : T(1)=T	
可	330 FOR I=1 TO A3 : X(I,1)=X(I,3) : PRINT" X("I;","1;")="X(I,1) : NEXT I	求基本振形 及周期
	335 FOR I=2 TO A3 : C(I,1)=1 : NEXT I : FOR J=2 TO A	形 型 成 清 第 除 二 矩 振 阵
行	340 C(1,J)=-M(J,J)*X(J,1)/(M(1,1)*X(1,1)) : NEXT J	
	345 GOSUB 1100 : GOSUB 1000 : T(2)=T	求第二振形 及周期
	360 FOR I=1 TO A3 : X(I,2)=X(I,3) : PRINT "X("I;","2;")="X(I,2) : NEXT I	
区	375 FOR I=3 TO A3 : C(I,1)=1 : NEXT I : C (1,1)=1	形 型 成 清 第 除 三 矩 振 阵
	380 FOR J=3 TO A3 : C(2,J)=-M(J,J)*(X(1,1) *X(J,2)-X(1,2)*X(J,1))/(M(2,2)*(X(1,1)*X (2,2)-X(1,2)*X(2,1))) : NEXT J	
	385 GOSUR 1100 : GOSUR 1000 : T(3)=T	求第三振形 及周期
	390 FOR I=1 TO A3 : X(I,7)=X(I,3) : PRINT "X("I;","3;")="X(I,3) : NEXT I	
	395 FOR I=1 TO 2 : C(I,1)=1 : NEXT I : FOR I=4 TO A3 : C(I,1)=1 : NETX I	形 型 成 清 第 除 四 矩 振 阵
	400 FOR J=4 TO A3 : C(3,J)=-M(J,J)*((X(1,3) *X(2,2)-X(1,2)*X(2,3))*(X(1,2)*X(J,1)	

	<pre> -X(1,1)*X(J,2))-X(1,2)*X(2,1)-X(1,1) *X(2,2))*(X(1,3)*X(J,2)-X(1,2)*X(J,3))) 402 C(3,J)=C(3,J)/(M(3,3)*((X(1,3)*X(2,2)-X (1,2)*X(2,3))*(X(1,2)*X(3,1)-X(1,1)*X(3, 2))-X(1,2)*X(2,1)-X(1,1)*X(2,2))*(X(1, 3)*X(3,2)-X(1,2)*X(3,3)))) NEXT J 405 GOSUB 1100 : GOSUB 1000 : T(4)=T 410 FOR I=1 TO A3 : X(I,4)-X(I,3) : X(I,3)= X(I,7) : PRINT "X("I;"",4)-"X(I,4) : NEXT I 420 FOR J=1 TO 4 : D(A3+J)=0 : D(2*A3+J) =0 : FOR I=1 TO A3 425 D(A3+J)=D(A3+J)+M(I,I)*X(I,J) 430 D(2*A3+J)=D(2*A3+J)+M(I,I)*X(I,J)*X (I,J) : NEXT I 435 D(J)=D(A3+J)/D(2*A3+J) : PRINT "D ("J;"")="D(J) : NEXT J 440 FOR I=1 TO A3 : FOR J=1 TO 4 445 P(I,J)=X(I,J)*D(J)*0.325*D*M(I,I)*9.81/T (J) PRINT "P("I;"",J;"")="P(I,J) : NEXT J,I 470 FOR J=1 TO 4 : P(2*A3+1,J)=0 : FOR I=A3 TO 1 STEP -1 : P(A3+I,J)=P(A3+I+ 1,J) : P(A3+I,J)=P(A3+I,J)+P(I,J) : PRINT "P("A3+I;"",J;"")="P(A3+I,J) : NEXT I,J 520 FOR I=1 TO A3 : P(2*A3+I,1)=0 : FOR J= 1 TO 4 : P(2*A3+I,1)=P(2*A3+I,1)+P(A3 +I,J)*P(A3+I,J) : NEXT J : P(2*A3+I,1)- SQR(P(2*A3+I,1)) : NEXT I : Q0=P(2*A3+ 1,1) : FOR I=1 TO 4 : LPRINT "T("I;"")=" T(I) : NEXT I 525 U=4 : A=A3 : E=1.69E+6 : G=0.42*E : GOSUB 800 535 P(2*A3+1,2)=0 : Z(12)=1 : Z(4*A3+7) =-Z(4*A3+7) 540 Z(10)=P(2*A3+1,2)/(G*12*I3/(A2*L2*L2)+ C) : FOR I=1 TO A3 : P(2*A3+I,2)=-Z(4*I +11)-F(3,4*I+2)*Z(4*I+6)-F(3,4*I+3)*Z (4*I+7))*S(I)/(L(I)*G(I)) </pre>	<p>形 型 成 清 第 除 四 矩 振 阵</p> <hr/> <p>求 第 四 振 型 及 周 期</p> <hr/> <p>求 参 各 与 振 系 型 的 数 的 振 型</p> <hr/> <p>求 各 振 型 各 质 点 地 震 荷 载</p> <hr/> <p>求 楼 层 各 地 震 振 型 的 剪 力</p> <hr/> <p>组 合 地 各 震 楼 剪 层 力</p> <hr/> <p>换 等 算 效 各 地 楼 震 层 荷 载</p>
--	---	--

↑	545	IF I(<)1 GOTO 560	
	550	IF ABS(P(A3+I,5)-P(2*A3+I,2))/P(2*A3+I,2)<V/1000 GOTO 560.	换算各楼层
	555	P(A3+I,5)=P(2*A3+I,2): PRINT "P=" P(2*A3+I,2): GOTO 540	等效地震荷载
搜	560	F(1,4*I+4)=P(2*A3+I,2)*L(I)*(1-G(I)/S(I))/C: F(2,4*I+4)=P(2*A3+I,2)*(1-G(A3+I))/C: F(3,4*I+4)=-P(2*A3+I,2)*L(I)*G(I)/S(I)	由等效地震荷载求各单元位移向量
索	565	FOR J=1 TO 4: Z(4+J)=0: FOR K=1 TO 4: Z(4+J)=Z(4+J)+F(J,4*I+K)*Z(4*I+4+K): NEXT K: Z(4*I+8+J)=Z(4+J): PRINT "Z("4*I+8+J;")="Z(4+J): NEXT J,I	
可	570	FOR I=9 TO 4*A3+12: R(I)=Z(I): NEXT I: FOR I=1 TO A3: LPRINT "P("I;","1) =P(2*A3+I,2): NEXT I	
行	650	IF Z(4*A3+9)/H>1/700 GOTO 680	结构最大侧移限制
	652	Y=Z(4*A3+9)/H	
	655	Z=0: FOR K=10 TO 4*A3+10 STEP 4	选择间
区	660	IF ABS(Z)>ABS(Z(K)) GOTO 665	相对最大层位移
	662	Z=Z(K): PRINT "Z="Z	
	665	NEXT K	
	670	IF Z>1/600 GOTO 680	层间相对位移限制
	672	IF (I2-I3)/I3<10*V GOTO 690	计算精度控制
	675	I2=I3: GOTO 687	
	680	I1=I3	搜索求解
	687	LPRINT "I="I3,"Q0="Q0,"Y="Y,"Z="Z: GOTO 40	
	690	S=0	
	695	FOR I=1 TO A3: S=S+S(I)*L(I): NEXT I: S=S/H	求加权刚度特征值
	700	FOR K=10 TO 4*A3+10 STEP 4: Q(K)=0: FOR W=1 TO U: Q(K)=Q(K)+(C*K(K,W))*(C*K(K,W)): NEXT W: Q(K)=SQR(Q(K)): NEXT K	求受剪框架承载力
	705	X=1: GOSUB 800: FOR W=1 TO U: P(A3,W)=P(A3+1,W): NEXT W: A(A3)	求剪力墙承受剪力

	= A(A3+1) : FOR I=0 TO A3 : H(I) = 0 : FOR W = 1 TO U : H(I) = H(I) + ((P(A3+I, W) - C*K(4*I+10, W)) * A(A3+D)) * ((P(A3 +I, W) - C*K(4*I+10, W)) * A(A3+I)) : NEXT W : H(I) = SQR(H(I)) : NEXT I	求剪力墙承 受剪力
710	FOR K = 11 TO 4*A3 + 11 STEP 4 : LPRINT" M(" (K - 11) / 4 ; ") = "R(K), "Q(" (K - 11) / 4 ; " = "Q(K - 1), "Q(" (K - 11) / 4 + A3 ; ") = "H((K - 11) / 4) : NEXT K	打 印 输 出
715	LPRINT "H="H, "L1="L1, "L2="L2, "C="C	
720	LPRINT "Q0="Q0, "Y="Y, "Z="Z, "I="I3	结 果
725	LPRINT "S="S, "T1="T(1), "T2="T(2), "T3 ="T(3), "T4="T(4)	
730	END	主程序结束
300	FOR W = 1 TO U : FOR I = 1 TO 4 : FOR J = 1 TO 4 : E(I, J) = 0 : NEXT J, I : E(2, 2) = P(A + 1, W) / (G * 12 * I3 / (A2 * L2 * L2) + C) : A4 = E(2, 2) : E(3, 3) = 1 : E(4, 4) = 1	形成边界条 矩阵件
805	FOR I = 1 TO A : A(I) = G * 12 * I / (A2 * L2 * L2) : A(I) = A(I) / (A(I) + C) : A(A + I) = A(I) : IF X() = 1 GOTO 810	求剪切变形影响系 数并给出考虑剪切 变形的条件
807	E(2, 2) = 0 : A4 = E(2, 2) : A(I) = 1	
810	S(I) = L(I) * SQR(C * A(I) / (E * I(I))) : G(I) = (EXP(S(I)) - EXP(-S(I))) / 2 : G(A + I) = (EXP(S(I)) + EXP(-S(I))) / 2	求单元刚度特征值, 并给出双曲函数表 达式
815	F(1, 1) = 1 : F(1, 2) = L(I) * G(I) / S(I) : F(1, 3) = -(1 - G(A + I)) / C	
820	F(1, 4) = P(A + I, W) * L(I) * (1 - G(I) / S(I)) / C	形 成 的 单 元 矩 阵
825	F(2, 2) = G(A + I) : F(2, 3) = S(I) * G(I) / (C * L(I))	
830	F(2, 4) = P(A + I, W) * (1 - G(A + I)) / C : F(3, 2) = C * L(I) * G(I) / S(I)	
835	F(3, 3) = F(2, 2) : F(3, 4) = -P(A + I, W) * L(I) * G(I) / S(I) : F(4, 4) = 1	
840	FOR J = 1 TO 4 : FOR K = 1 TO 4 : Y(J, K) = 0	形 成 传 递 矩 阵
845	FOR N = 1 TO 4 : Y(J, K) = Y(J, K) + F(J, N) * E(N, K) : NEXT N, K, J	
850	FOR J = 1 TO 4 : FOR K = 1 TO 4 : E(J, K) = Y(J, K) : F(J, 4 * I + K) - F(J, K) : PRINT "F(" J ; ", "4 * I + K ; ") = "F(J, 4 * I + K) : NEXT K, J, I	

求各单元位移和内力子程序	860	Z(0) = -(Y(3,2) + Y(3,4))/Y(3,3)	
	865	Z(3) = Z(0) : Z(4) = 1 : Z(1) = 0 : Z(2) = A4	各振形第一单元解
	870	FOR J=1 TO 4 : K(8+J,W) = Z(J) : NEXT J	
	875	FOR I=1 TO A : FOR J=1 TO 4 : Z(4+J) = 0	
	880	FOR K=1 TO 4 : Z(4+J) = Z(4+J) + F(J,4*I + K)*K(K+4+4*I,W) : NEXT K	各振形其它
	885	K(I*4+8+J,W) = Z(4+J) : PRINT "K("I*4+4+J;","W;") = "K(I*4+4+J,W) : NEXT J,I,W	单元解
	890	FOR I=1 TO A+1 : FOR J=1 TO 3 : Z(4*I+4+J) = 0 : FOR W=1 TO U : Z(4*I+4+J) = Z(4*I+4+J) + K(4*I+4+J,W)*(K(4*I+4+J,W) : NEXT W	各振型解的组合
	895	Z(4*I+4+J) = SQR(Z(4*I+4+J)) : PRINT "Z("4*I+4+J;") = "Z(4*I+4+J) : NEXT J,I	
	900	RETURN	返回
	迭代求振形程序	1000	B(A3+1) = 0
1005		FOR J=1 TO A3 : X(J,3) = 1 : NEXT J	输入假设振型向量
1010		FOR I=1 TO A3 : B(I) = 0 : FOR J=1 TO A3 : B(I) = B(I) + N(I,A3+J)*X(J,3) : NEXT J,I	迭代求各振形
1015		FOR I=1 TO A3 : X(I,3) = B(I)/B(A3) : NEXT I	
1020		IF ABS(B(A3)-B(A3+1))/B(A3) < V/100 GOTO 1035	
1025		B(A3+1) = B(A3) : PRINT "B = "B(A3) : GOTO 1010	
1035		T = 2*0.8*3.14159*SQR(B(A3))	求周期
1040		FOR I=1 TO A3 : FOR J=1 TO A3 : C(I,J) = 0 : N(I,J) = N(I,A3+J) : NEXT J,I	形成各振型特征矩阵的准备
1045		RETURN	返回
子程序		1100	FOR I=1 TO A3 : FOR J=1 TO A3 : C(I,A3+J) = 0
	1105	FOR K=1 TO A3 : C(I,A3+J) = C(I,A3+J) + N(I,K)*C(K,J) : NEXT K	除外其它
	1115	N(I,A3+J) = C(I,A3+J) : NEXT J,I	基本
	1120	RETURN	返回

#### 四、程序的实现及其节约内存措施

本程序是在 TRS-80 微型计算机上实现, 这种微型机是美国 TANDY 公司 RADIO SHACK 分部的产品, 它是一种有较强功能的微型计算机。TRS-80 的系统软件有 BASIC, 磁盘 BASIC 及 FORTRAN 等, 其中尤其是 BASIC 语言在微型机中独具一格。一台计算机能解多大的题目在很大程度上取决于存储器有多大的内存。但任何一种计算机内存总是有限的, 而解算较大题目往往需要较大的内存, 因此尽可能地节约内存用量, 包括缩短程序长度和节约数据占用的空间是编本程序时考虑的主要课题。本文采取下面一些措施节约内存:

(1) 尽可能使用多语句程序行(在每两语句之间用冒号隔开), 因为每增加一个新语句标号要耗费内存。

(2) 尽量用同一标识符代表不同的量, 即一个变量或一个数组作多种用途。例如, 数组  $N(A3, A3)$  在本程序中即可代表结构柔度矩阵, 又可代表每一个振型特征矩阵。

(3)、程序中重复多次使用的表达式, 用一个中间变量寄存, 这样即节约内存又节约机时。

(4)、如果一个运算在不同地方多次用到, 使用子程序可节约内存空间。例如, 用迭代法求每个振型运算, 在程序中如果考虑四个振型叠加就要用到四次, 我们就编了一个子程序供调用。

#### 参 考 文 献

- [1] 王全风, 变刚度框架-剪力墙结构抗地震荷载剪力墙数量的优化分析, 建筑结构学报, 1983 年第 4 卷第 5 期。
- [2] 计声, 微型计算机实用手册, 海洋出版社, 1982 年 7 月第 1 版。
- [3] 朱绍声等, 微型计算机, 人民交通出版社, 1982 年 8 月第 1 版。