

计算机在土木工程中的应用丛书

Jiegou Fenxi Shiyong Chengxu

结构分析实用程序

匡文起等 编

人民交通出版社

前 言

本书按中国土木工程学会计算机应用学会丛书编委会的要求，由匡文起、张玉良、刘凤阁、辛克贵四人编写，全书由匡文起修改定稿，张玉良参加了修改定稿工作。书中所列各项计算机程序均使用 FORTRAN 语言编写，并在 M-150 机和 FELIX-C 512 机上调试通过，为了便于更多的同志应用，又在 PC-88 微型计算机上运行通过。书中所有程序均有详细的框图和使用说明，并有例题演示。本书可以作为工程技术人员学习结构分析程序设计的读物，也可以作为高等院校结构矩阵分析课程的参考书。

本书承寿楠椿副教授审阅，龙驭球教授、王道堂副教授对本书的编写提出了许多宝贵意见，个别章节曾征求过谭浩强副教授的意见。在编写过程中还参考了清华大学结构力学教研组各位老师编写的程序，我们在此对上述同志致以深深的谢意。

由于编写时间短促，水平有限，本书一定还存在不少问题，敬请读者批评指正，以便进一步提高。

感谢人民交通出版社编辑同志卓有成效的合作。

编 者

1985年6月

各地新华书店经售

北京通县向阳印刷厂印

开本：850×1168 1/32 印张：7.25 字数：159千

1987年10月 第1版

1987年10月 第1版 第1次印刷

印数：0001—14,000册 定价：3.05元

02-158-160-8

统一书号：15044·1909

内 容 提 要

全书共五章：结构矩阵分析和程序设计的要领，平面桁架的实用程序，平面刚架的实用程序，网架结构的实用程序和线性方程组的解法。讲解了上述各种结构形式的基本原理和公式推导，详细介绍了它们的源程序和使用说明，并附以例题。

本书全部程序使用 FORTRAN 语言编写，并在 IBM-PC 及其兼容机上以及 M-150 机、FELIX-C512 机上通过运行，因此可以在微型计算机和大、中型计算机上使用。

本书内容充实，容易入门，可以引导读者从理论学习走向在计算机上实际应用。

本书可供土木工程、公路工程、桥梁隧道、建筑结构、市政工程等工程技术人员及有关院校师生使用和参考。

• • • • •

《计算机在土木工程中的应用丛书》编委会：

主 编：龙驭球(清华大学，教授)

副主编：王道堂(北方交通大学，副教授)

编 委：傅作新(华东水利学院，副教授)

赵超燮(北京工业大学，副教授)

沈康辰(上海海运学院，副教授)

出版说明

随着计算机的飞速发展，作为一种精确、迅速、有效的计算工具，计算机已经在许多方面发挥了重要作用，并且愈来愈受到重视。中国土木工程学会计算机应用学会，为了进一步推动计算机在土木工程中的应用，在人民交通出版社的大力支持下，决定编辑、出版《计算机在土木工程中的应用丛书》。

本丛书将介绍土木工程各专业中计算机应用的有关知识及应用程序与实例。我们希望本丛书能成为通俗易懂、结合专业及便于应用的读物，并可作为土木工程技术人员在职进修的材料。我们也希望通过本丛书，能帮助更多的工程技术人员掌握和应用计算机。

由于计算机应用的范围愈来愈宽广，我们打算继续选择读者需要的题材陆续编辑出版。欢迎广大读者向本丛书编委会反映你们的意见和要求。

《计算机在土木工程中的应用丛书》编辑委员会

1987.1.14

目 录

第一章 结构矩阵分析和程序设计的要领	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 矩阵位移法计算连续梁的实用程序	(6)
第三节 程序的阅读、使用与扩展	(29)
第二章 平面桁架的实用程序	(35)
第一节 平面桁架矩阵位移法基本原理	(35)
第二节 平面桁架的框图与程序	(45)
第三节 计算实例与程序的扩展	(65)
第三章 平面刚架的实用程序	(72)
第一节 平面刚架矩阵位移法的基本原理	(72)
第二节 平面刚架程序设计中的几个问题	(90)
第三节 平面刚架的框图和程序	(99)
第四章 网架结构的实用程序	(143)
第一节 基本计算理论	(143)
第二节 网架结构的框图与程序	(166)
第五章 线性方程组的解法	(205)
第一节 高斯消元法	(205)
第二节 半带存贮和带消去法	(210)
第三节 分解法	(214)
参考文献	(222)

第一章 结构矩阵分析 和程序设计的要领

第一节 概 述

1.1.1 结构分析的计算机化

在房屋、桥涵、堤坝的设计工作中，必须对结构进行计算与分析。这个工作量很大。以前由于计算工具的限制，一项大型结构的分析计算工作往往需要很多时间。5~10次的超静定结构用一般计算尺很难求得精确的计算结果，更不用说10次以上的超静定结构了。即使使用电动计算机和模拟计算机计算高次超静定结构仍然十分困难。在结构分析中应用了电子数字计算机之后，不但节约了大量的时间和人力，而且结构分析的深度、广度和详细程度都是前所未有的。同时，既可以计算结构在工作状态下承受各种荷载时的内力和变形，又可以对结构在吊装过程中的各种不利受力状态进行逐一的分析，使得结构在整个建造和架设的过程中，按照预先制定的计划顺利进行，避免出现应力过大或失稳等事故，在这方面国内外已有不少成功的例子。

目前，电子数字计算机(以下简称计算机)的使用正以惊人的速度发展着，近几年来特别是微型计算机和小型计算机的销售量越来越大，价格越来越便宜，其中软件在成本中的比重越来越大。有人预测到2000年全世界平均几个人就可以拥有一台计算机(注意，不是计算器)。

考虑到上述两方面的情况，现在大力提倡使用计算机进行结构分析和计算是必要的和及时的。

1.1.2 结构分析的程序设计

对于一个受复杂荷载作用的深梁或水坝，要求出它的应力分布，一次就要计算成千上万个数据。从确定解题方式、设计程序流程图，到使问题内容或解题计划变为计算机能够接受的指令或语句系列这样一个过程，就叫做程序设计(或程序编制)。

程序设计要使用专门的语言，我国结构分析的程序设计工作在50年代以机器语言为主，这种语言使用起来很繁琐而且不易记忆。在60年代和70年代初期以用 ALGOL 语言为多，此后逐步广泛使用 BASIC 语言和 FORTRAN 语言。BASIC 语言的优点是语言结构简捷、容易学习、记忆和使用，因为它是一种对话式的语言，特别有利于初学者(BASIC 是 Beginner's Allpurpose Symblic Instruction Code 的缩写，意思是初学者通用符号指令代码)。现已为广大的高等学校，一些有条件的中等学校以及其他方面的初学者所广泛采用，并已编制出大量的供教学 and 实际应用的结构分析程序，这些程序已在很多单位使用，所以不应低估 BASIC 语言在推广计算机应用中的作用。笔者就曾经用 BASIC 语言进行过科学计算，效果还是良好的。但 BASIC 语言在使用上有它的局限性，例如有些微型机 BASIC 语言数组不能过大，计算结果精确度尚嫌不足等等，因此在较大型的结构分析计算中，必然会用到 FORTRAN 语言(或其他种类的高级语言)，故本书全部计算程序均用 FORTRAN 语言编写。

FORTRAN 语言本身也处在发展和不断丰富过程之中，考虑到我国大多数计算机所配备的软件的现状，本书以 FORTRAN—IV 语言编写程序，要求读者懂得 FORTRAN—IV 的基本用法，至于比较复杂的技巧问题可以在使用本书的过程中和以后的学习中逐步掌握。

1.1.3 结构分析的两类程序

用算法语言(FORTRAN—IV 是一种算法语言)编写的结构

分析程序可以分为两大类。

一类叫大型通用程序，这类程序规模很大，语句为数万句、数十万句甚至更多，它有很大的单元库和多种计算及绘图功能，能解决量大而复杂的计算问题，但是也存在两个问题，第一，一般使用者很难读懂它的程序文本，因而很难灵活的运用和改进它。第二，它所用的机时较多。

第二类就是一般实用程序，这类程序规模较前者为小，语句一般在数千句以内，它是针对一项或至多几项结构计算问题而编制的，此类程序应用上有针对性，比较节省机时，读者在一定的参考资料的协助下可以读懂程序文本，并可以进一步改进或扩大该项程序的使用范围。

近年来我国已经有多项大型通用程序在编制之中，例如大型通用程序FEXI—JIGFEX已经投入使用。由国外引进的大型通用程序有SAP—5, NONSAP, ASKA等多种。以SAP—5为例，目前通行的程序文本可以计算11种单元(包括杆系问题、二维问题和三维问题)的静动力分析，可以计算多种荷载工况和组合，我们曾用此项程序做过桁架、刚架、空间组合结构、壳体结构、平面问题、三维问题等的计算，并分析了结构的动力特性和温度应力，效果均良好，计算的精确度较高，但有些问题所用机时过多(例如三维问题)。

本书介绍的是各类杆系结构的实用计算程序，编写的指导思想是既要讲清道理又要使程序有实用价值，力图使读者根据本书所提供的程序文本和使用说明很快就可以上机计算各类杆系结构的实际问题，并给扩展这些程序的功能和今后阅读、使用其它更大规模的程序打下基础。

我们主张结构计算方面的工作人员既要自己有能力编写一些实用的程序，又要掌握至少一种大型通用程序的使用。前者为编制、阅读、扩展、使用更复杂的程序打下基础，而后者则为快速计算大型工程问题提供了有效手段并可用它核对自编程序的计算结果。

1.1.4 本书各章写法及符号的使用

每一章针对一种杆件结构：叙述其计算原理和公式提要，源程序，使用说明，例题及计算结果分析讨论等内容。各章之间在程序使用的难度上由浅入深，由第一章入门(最好能边学习边上机)，然后学习第二章，第三章……，逐步加深对程序编制技巧的认识，最后一章集中讲解本书用到的几种线性代数方程组的解法。编写力求简明，阅读不要图快，其实简单的程序也往往五脏俱全，把它读透了，再去编制复杂的程序也是完全办得到的。

本书程序中所用各项主要标识符是相同的，例如NJ代表结点数，NE代表单元数等等，注意这一点会给阅读程序带来一些方便。但是由于各项程序计算的内容不同所以一定还有一些新的标识符出现。故在每一项程序的使用说明里，我们都对用到的标识符加以说明。

程序中输入信息一般集中在程序前边紧接在标题之后，先输入控制数据再输入其他数据，一律采用 READ 语句。输出信息规格整齐清晰，并附有一定的英文说明。

本书框图符号使用的规定如下：

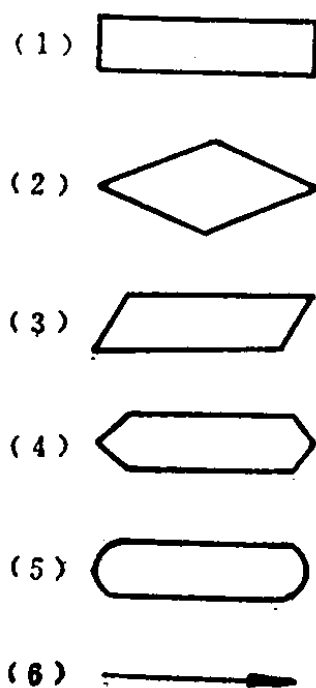


图 1-1

- (1) 矩形框，表示各种处理功能，例如进行四则运算等等。
- (2) 菱形框，表示在几个可以选择的路径中，判断选取某一路径。
- (3) 平行四边形框，表示信息的输入或输出。
- (4) 两头尖的框，表示循环。
- (5) 半圆边的框，表示流程开始、结束或暂停。
- (6) 箭头，表示流程的路径或方向。

本书矩阵的表示方法如下：

矩阵 $\left[\quad \quad \right]$

行阵 $[\quad]$

列阵 $\left\{ \quad \right\}$

对角阵 $\left[\quad \right]$

分块矩阵 $\left[\begin{array}{c|c} & \\ \hline & \end{array} \right]$

第二节 矩阵位移法计算连续梁的实用程序

1.2.1 计算方法概述

杆系结构分析中的有限元法通常又称为结构矩阵分析方法。结构矩阵分析的位移法在解算静定问题和超静定问题中均可使用。

现在以连续梁为例说明用矩阵位移法解算问题的全部过程。

连续梁的计算简图见图 1-2。连续梁共有 n 跨，各跨的长度为 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ 。各跨的线刚度 i 可以不同， $i = \frac{EI}{l}$ ，其中 E 为弹性模量， I 为惯性矩， l 为各跨跨度。连续梁的左端和右端可以是简支端，也可以是固定端。

一、单元刚度矩阵

先导出连续梁中一个单元的单元刚度矩阵，首先对图 1-3 所示单元①的结点进行编码，称为结点局部码，左端为 $\bar{1}$ ，右端为 $\bar{2}$ 。

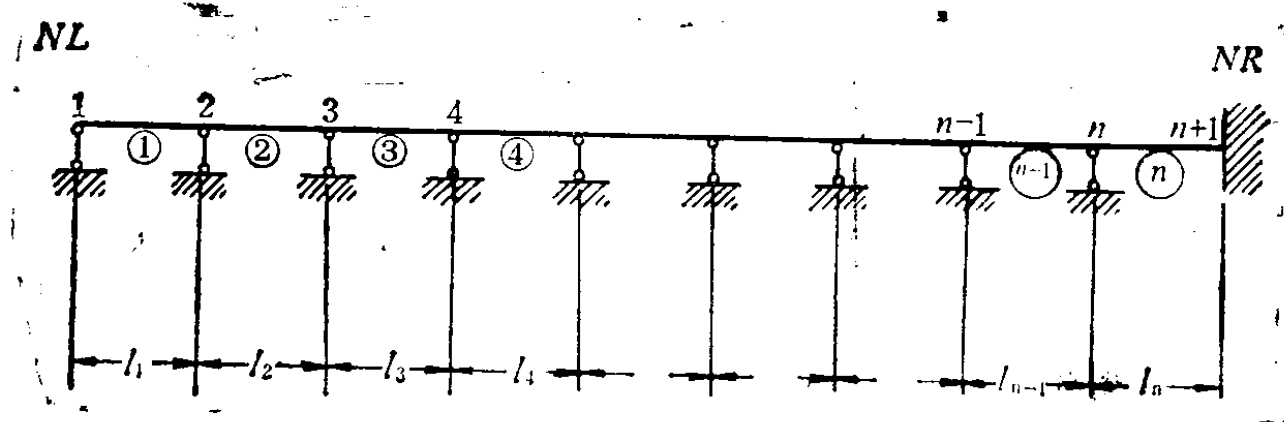


图 1-2

结点 $\bar{1}$ 的杆端力矩为 m_1^e ，转角为 θ_1^e ，结点 $\bar{2}$ 的杆端力矩为 m_2^e ，转角为 θ_2^e 。杆端力矩和结点转角均规定以顺时针方向为正。上述各量之间的关系即结构力学中连续梁的转角位移方程，其表达形式如下：

$$\begin{cases} m_1^e = k_{11}^e \theta_1^e + k_{12}^e \theta_2^e \\ m_2^e = k_{21}^e \theta_1^e + k_{22}^e \theta_2^e \end{cases} \quad (1.1)$$

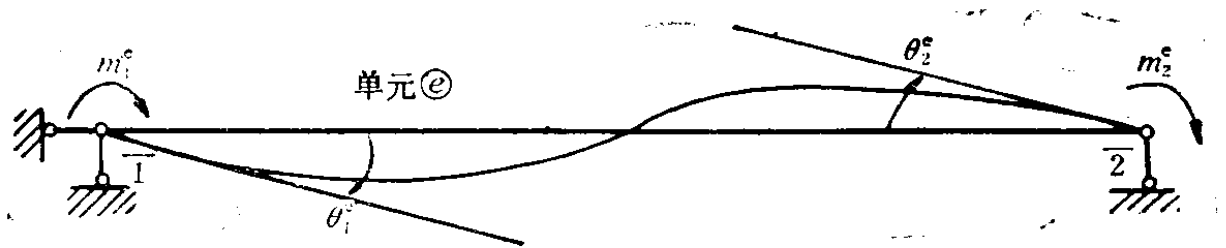


图 1-3

k 称为刚度系数，在连续梁中有如下关系：

$$\begin{cases} k_{11}^e = k_{22}^e = 4i_e \\ k_{12}^e = k_{21}^e = 2i_e \end{cases} \quad (1.2)$$

(1.1)式用矩阵方法表示如下：

$$\begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{Bmatrix}^e = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}^e \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}^e \quad (1.1)'$$

上式中

$$\begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{Bmatrix}^e = \{m\}^e \text{ 叫单元 } e \text{ 的杆端力矩向量。}$$

$$\begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}^e = \{\theta\}^e \text{ 叫单元 } e \text{ 的结点转角向量。}$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}^e = [k]^e \text{ 叫单元 } e \text{ 的刚度矩阵。}$$

二、整体刚度矩阵

一个结构物的整体刚度矩阵可以通过各个单元刚度矩阵的集

合而求得，下面推求连续梁的整体刚度矩阵。

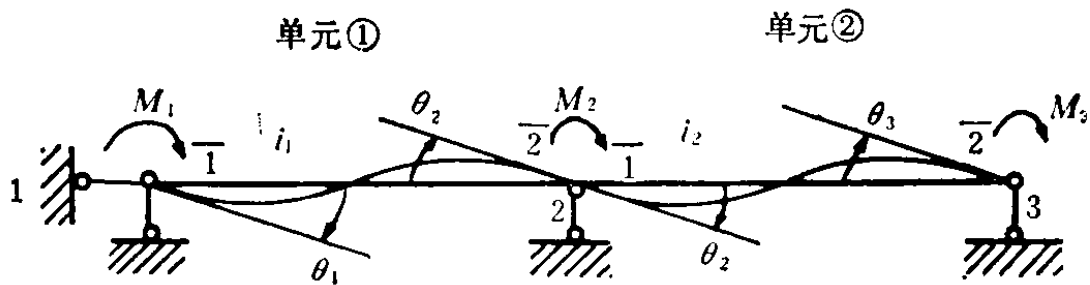


图 1-4

图1-4为两跨连续梁，具有单元①和单元②，图上注有两种编码，即结点局部码(单元①的 $\bar{1}$ 和 $\bar{2}$ ，单元②的 $\bar{1}$ 和 $\bar{2}$)和结点总码(在整体分析中使用，连续梁每一个结点具有一个编码，本图中结点总码为1，2，3)

$$\theta = \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} \text{ 为各结点转角, 顺时针为正.}$$

$$M = \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{Bmatrix} \text{ 为各结点外力偶, 顺时针为正, 这里用大写字母表示, 以区别于杆端力矩.}$$

他们之间的关系为:

$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} \quad (1.3)$$

简写为

$$\{M\} = [K]\{\theta\} \quad (1.3)'$$

其中的 $[K]$ 叫做整体刚度矩阵， K_{ij} (在(1.3)式中 $i=1,2,3$ ， $j=1,2,3$)叫做整体刚度系数，这里也用大写字母 K 表示，以区别于

单元刚度系数。

整体刚度系数由单元刚度矩阵中的刚度系数导出，整体刚度矩阵的形成，这里用刚度集成法。关键在于把结点局部码和结点总码一一对应起来，图1-4所示连续梁单元①的结点局部码 $\bar{1}$ 对应的结点总码为1，单元①的 $\bar{2}$ 和单元②的 $\bar{1}$ 对应的结点总码为2，而单元②的 $\bar{2}$ 对应的结点总码为3，这个对应关系可以列表如下，

	单元①		单元②	
	左结点	右结点	左结点	右结点
结点局部码	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
结点总码	1	2	2	3

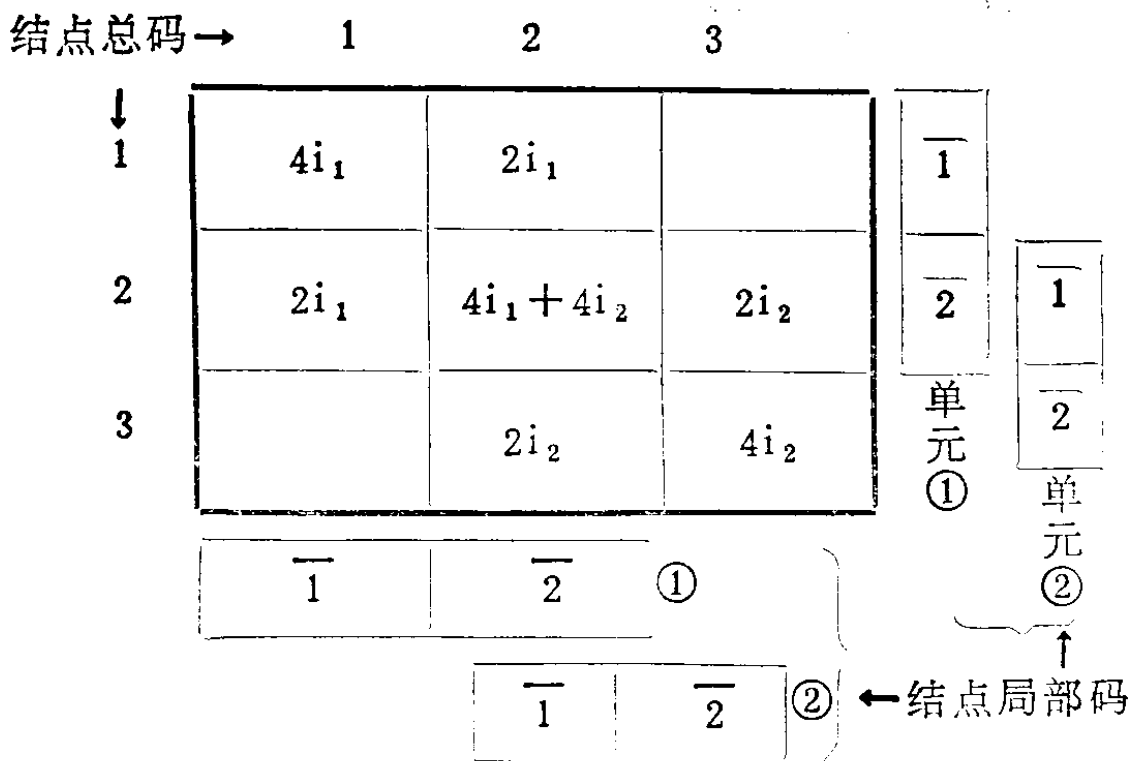
图1-4所示单元①和单元②的线刚度分别为 i_1 和 i_2 ，因此可以得到两跨连续梁的刚度方程如下：

$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4i_1 & 2i_1 & 0 \\ 2i_1 & 4i_1 + 4i_2 & 2i_2 \\ 0 & 2i_2 & 4i_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} \quad (1.4)$$

此结构的整体刚度矩阵为

$$[K] = \begin{bmatrix} 4i_1 & 2i_1 & 0 \\ 2i_1 & 4i_1 + 4i_2 & 2i_2 \\ 0 & 2i_2 & 4i_2 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

在整体刚度矩阵中结点局部码和结点总码的对应关系如下：



上面就是用刚度集成法求整体刚度矩阵的基本原理。

此种关系既然适用于两跨连续梁结构，而两跨结构与 n 跨结构在此种关系上并无差别，因此极易得出 n 跨连续梁结构的刚度方程

$$\left\{ \begin{array}{c} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{array} \right\} =$$

$$\begin{bmatrix}
 4i_1 & 2i_1 & & & & \\
 2i_1 & 4i_1+4i_2 & 2i_2 & & & \\
 & 2i_2 & 4i_2+4i_3 & 2i_4 & & \\
 & & & & 0 & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & 0 & 2i_{n-2} & 4i_{n-2}+4i_{n-1} & 2i_{n-1} & \\
 & & & 2i_{n-1} & 4i_{n-1} &
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 \theta_1 \\
 \theta_2 \\
 \theta_3 \\
 \vdots \\
 \theta_{n-1} \\
 \theta_n
 \end{Bmatrix}
 \quad (1.6)$$

(1.6)式的简写形式亦为

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

其中整体刚度矩阵 $[K]$ 是一个三对角线矩阵。为了编制程序的方便我们分析一下 $[K]$ 中各元素 K_{ij} 的特点。在主对角线上各元素

$$\begin{cases}
 \text{头一个元素} & K_{11}=4i_1 \\
 \text{中间各元素} & K_{jj}=4i_{j-1}+4i_j \quad (j=2,3,\dots,n-1) \\
 \text{最后一个元素} & K_{nn}=4i_{n-1}
 \end{cases}
 \quad (1.7)$$

两条副对角线上各元素

$$K_{j,j-1}=K_{j-1,j}=2i_{j-1} \quad (j=2,3,4,\dots,n)
 \quad (1.8)$$

三、非结点荷载及两端支承条件的处理

先讨论荷载问题。上一段中提到的荷载(外力偶)均作用在连续梁的各个结点上，通过下述的步骤可以将非结点荷载转化为结点荷载。以图 1-5a 所示的结构为例，首先在各结点加约束阻止结点的转动，这时在单元①，②产生的固端力矩 FM (如图 1-5 b 所示)为

$$\begin{Bmatrix} FM_1 \\ FM_2 \end{Bmatrix}^{(1)}, \begin{Bmatrix} FM_1 \\ FM_2 \end{Bmatrix}^{(2)}$$