

# 多重动态子结构分析的计算机 绘图原理及其程序实现

王国瑾 金通光  
(浙江大学)

## 摘 要

本文描述了用于多重动态子结构分析的计算机绘图原理和算法,并阐明了软件 SVGRS 的实现过程和功能。本原理对一般的结构分析的计算机绘图具有普遍意义。

**关键词:** 结构分析,子结构,计算机绘图

## 一、引 言

作为以图形的方式向计算机用户输出客观世界的拓扑信息及几何信息的一个重要手段,计算机绘图在工程技术领域中的应用日趋广泛。即使在人机交互式图象显示设备开始普遍使用的今天,计算机绘图仍以其形象、清晰、易于保管存档、易于携带交流、易于按图施工等显著特点而受到人们的青睐。

七十年代后期,随着有限元应力分析法的深入发展,结构分析应用计算机绘图学应运而生<sup>[1]</sup>。它紧密地配合着大型复杂结构的种种应力分析方法,既可作为大量原始数据准备工作正确程度的一种辅助检验手段,又可作为结构分析计算结果的一个直观综合报告,集纷繁庞杂的数据于一图,让工程技术人员一目了然。正因为如此,凡是一个成功的结构分析程序库,必定都配有功能齐全、使用灵活的绘图系统,一并交付用户使用。例如,曾被列为国际上著名五程序之一的结构分析 SAP 程序<sup>[2]</sup>,就带有一个绘图软件包。结构分析与绘图系统集成为一体,相辅相成,在现代工程应用中发挥着巨大的作用。

由 Hurty 提出,后经 Craig 改进为固定界面形式的模态综合法<sup>[3]</sup>,十余年来在应力分析中使用极为广泛。在此基础上,恽伟君等推导了分层多重动态子结构法<sup>[4-7]</sup>,其基本思想是把一个复杂结构分成若干个子结构,再把这些子结构分成更小的子结构,从而使特征值方程阶数大为降低,有效地减少整体结构动态特性的计算时间。这一方法的正确性和优越性已被工程实例的多次试算所证实。

为了快速检查分层多重动态子结构分析的数据准备工作,也为了形象地纪录并解释这种子结构分析法的计算结果,把每个子结构的各阶振型与变形前的初始位置作直观的

比较,让子结构变形前后的几何信息快速地反馈给用户,笔者对结构分析的计算机绘图原理进行了研究,并以此为基础,研制了子结构分析的绘图软件 SVGRS。其主要作用是绘制主结构及任何子结构的网格轴测投影图。本软件功能齐全,使用方便,语句精炼,计算时间很短,绘图形式多样,适应性强,便于移植和扩充,且可联机或脱机操作。它不仅可与分层多重动态子结构法的软件配套成一个集成化的体系,且可用于其他类型的结构分析法的绘图输出,因而对结构分析的计算机绘图具有普遍意义。

## 二、结构网格图绘制原理

所谓结构网格图,系指结构剖分单元的边界线图,即相邻节点之间的连线图。其原始输入信息分以下两大类。

1. 结构描述信息: (1)几何信息——变形前后节点的空间坐标; (2)拓扑信息——各子结构所含的单元序号,各单元所含的节点序号,各节点之间的连接关系等。

2. 绘图控制信息——绘图的种类、形式、位置、比例、投影角、坐标铅垂轴方向、节点标注方式等。

子结构的定义方式,采用子结构本身包含的单元序号来定义。这样定义既简洁明了,又可保证子结构的类型、个数均不受限制,且可定义子结构的子结构,即子结构的层数不受限制。

画笔运动路径的选择,遵循以下五原则:

(1) 每条节点连线只画一次,不准重复。

(2) 画笔连续画线的路径尽可能长,即抬笔次数尽可能少。

(3) 画笔的出发点,先是低序号节点,直到由该节点出发的所有连线都画完,才转到比它高一档序号的节点作出发点。

(4) 画笔的连线方向,始终是由低序号节点指向高序号节点,

(5) 不求取画笔运动的最短路径(如一笔画)为目标,而以计算绘图信息的总时间较短为最终目标。这是因为前者往往要消耗大量机时而推迟出图时间。

网格图的数据结构是绘图软件的核心问题,其合理性首先表现在易于检索。因为画笔出发点及连线的确定都依靠检索,检索是本软件实施过程中的基本操作,检索的快慢就直接影响软件的效率。多重动态子结构法的优点是节省计算时间,绘图当然必须快速响应。为此,笔者设计了下面两个重要数组作为画笔运动信息的基础。

1. 整型数组  $\{LP(M, J)\}$ ,  $M = 1, 2, 3, 4$ , 表示第  $J$  号单元所含节点的顺次序号数。以矩形拓扑单元为例,该数组既指明了  $J$  号单元含有  $LP(M, J)$  ( $M = 1, 2, 3, 4$ ) 号节点,又指明了  $LP(M, J)$  号节点与  $LP(M + 1, J)$  号节点 ( $M = 1, 2, 3$ ),  $LP \times (4, J)$  号节点与  $LP(1, J)$  号节点是分别相连的。该数组由结构分析程序提供。

2. 整型数组  $\{NP(K, I)\}$ , 表示与第  $I$  号节点相连的所有节点号。它们毋须按大小排序,只须满足  $NP(K, I) > I$  即可,该数组根据  $\{LP(M, J)\}$  产生。

由于这两个数组的列序号  $J$  与  $I$  分别是单元序号与节点序号,因而大大简化了检索手续。以图 1 所示的结构为例,  $LP$  与  $NP$  之数值分别如下表:

| $J$        | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |  | $I$        | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|---|---|---|---|---|---|--|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $LP(1, J)$ | 5 | 1 | 4 | 1 | 2 | 1 |  | $NP(1, I)$ | 2 | 6 | 4 | 8 | 6 | 7 | 8 |   |
| $LP(2, J)$ | 6 | 2 | 3 | 5 | 6 | 2 |  | $NP(2, I)$ | 5 | 3 | 7 |   | 8 |   |   |   |
| $LP(3, J)$ | 7 | 6 | 7 | 8 | 7 | 3 |  | $NP(3, I)$ | 4 |   |   |   |   |   |   |   |
| $LP(4, J)$ | 8 | 5 | 8 | 4 | 3 | 4 |  |            |   |   |   |   |   |   |   |   |

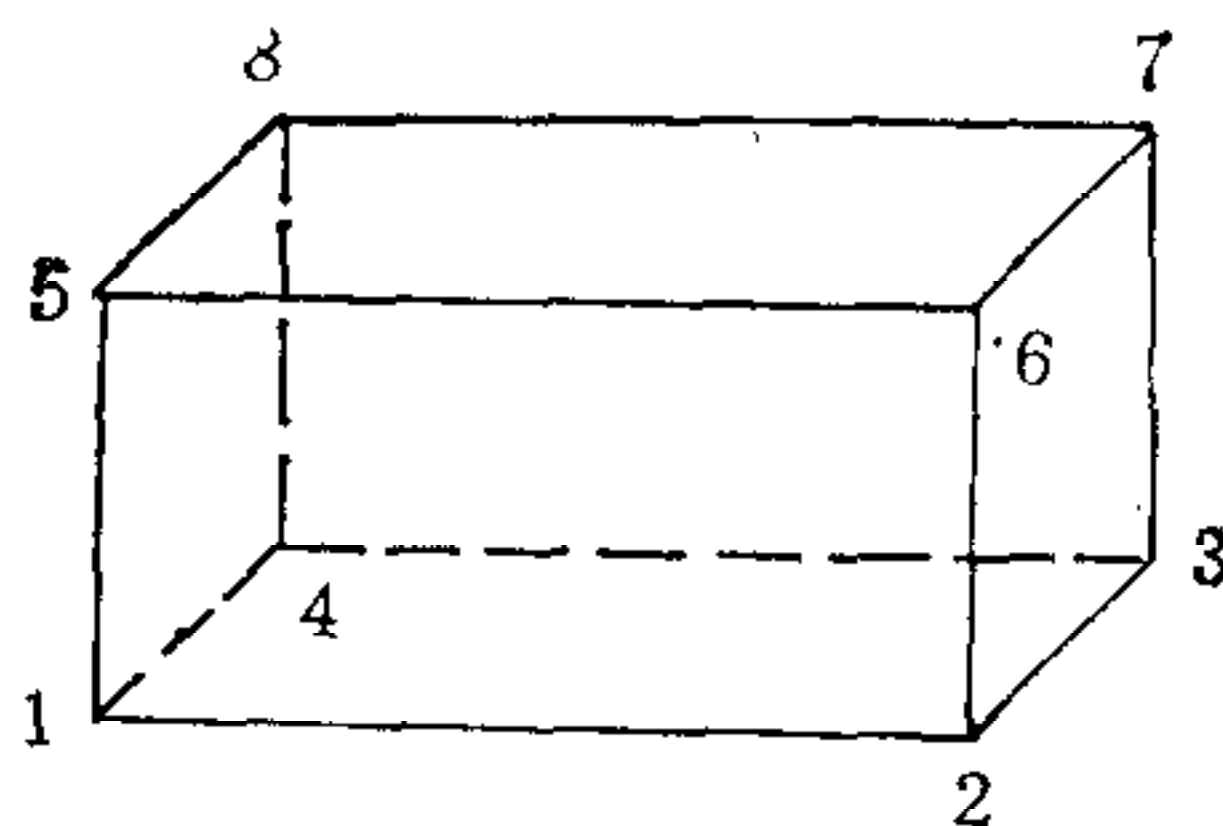


图1 立方体结构的节点布置

最后画笔按下列节点号运动:

1, 2, 6, 7, 8; 1, 5, 6; 1, 4, 8; 2, 3, 4; 3, 7; 5, 8.

当然,由数组  $NP$  去生成画笔运动程序,还需要若干技巧. 另外要说明的是三维网格在图上以二维形式输出, 根据结构分析对绘图的要求和工程习惯, 这里采用了正轴测投影.

### 三、绘图软件功能及实例

“SVGRS”绘图软件是在杭州汽轮机厂的 SIEMENS 7.738 机和 BENSON 1320 型绘图仪上研制成功的. 它具有下述功能:

(1) 按照有限元网格的拓扑信息和几何信息绘制变形前后的主结构或任一子结构的轴测投影网格图. 从节点位置或节点连接关系是否差错, 检查原始数据准备是否正确, 从而可作为结构分析程序的前置程序; 从结构的振型图可形象地看出结构的动态特性, 从而可作为结构分析程序的后置程序.

(2) 可同时输入若干个主结构的信息进行处理; 对同一主结构可连续绘制不同的子结构, 任一子结构下又可绘制隶属于它的子结构; 对同一主、子结构, 还可连续绘制不同比例尺寸及不同投影方向(便于对复杂子结构局部放大或对三维结构选择最佳投影方位)的网格线图; 变形前后两图可合画于一纸或分开画, 网格节点可不标或标出; 有限元可为矩形拓扑单元、三角单元或杆单元, 还可扩充以增加节点.

(3) 只要变更有关画笔运动、抬笔、落笔的几条相应语句, 就可将软件移植到别的绘图仪上予以实现.

### 参 考 文 献

- [1] Frey, A. E., Hall, C. A. and Porsching, T. A., An Application of Computer Graphics to Three Dimensional Finite Element Analyses, *Computer & Structures*, Vol. 10, Nos. 1/2(1979), 149—154.

- [2] Desai, C. S. and Abel, J. F., Introduction to the Finite Element Method, 1972.
- [3] Craig, Fixed Interface Methods with Reduction of Interface Coordinates, NASA, 1979.
- [4] Yun Weijun, Duan Genbao and Hu Zhonggen, Super-element Method of Modal Synthesis and its Application to Dynamic Calculation of Ship Structure, ANNUAL OF THE CHINESE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTURE AND MARINE ENGINEERING, Vol. 1, 1982.
- [5] 恽伟君, 朱农时, 李林, 分层多重动态子结构法及其应用, 机械强度, 1(1983), 1—30.
- [6] 交通部上海船舶运输科学研究所, 船舶振动预报课题报告, 1986年6月.
- [7] 王文亮, 杜作润, 结构振动与动态子结构法, 复旦大学出版社, 1985.

## PRINCIPLE AND IMPLEMENTATION OF COMPUTER PLOTTING FOR MULTIPLE DYNAMIC SUBSTRUCTURE ANALYSIS

WANG GUOJIN      JIN TONGGUANG

(Zhejiang University)

### ABSTRACT

In this paper, principle and algorithm of computer plotting for multiple dynamic substructure analysis are described. The realization process and functions of the software SVGRS are also illustrated. This principle is suitable for general structure analysis.

**Key words:** Structure analysis, Substructure, Computer plotting