

# 大型有限元软件

## MSC/NASTRAN

---

〔美〕H.G.西夫尔 著

崔俊芝 傅子智 詹世斌 徐家礼 译

国防工业出版社

# 大型有限元软件

## MSC/NASTRAN

〔美〕 H. G. 西夫尔 著

崔俊芝 傅子智 译  
詹世斌 徐家礼

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书是美国航空局研制的大型有限元软件 MSC/NASTRAN 的入门书, 本软件是解决大型工程的通用程序, 我国已在逐步引进和推广使用。

本书既介绍了 MSC/NASTRAN 的基本理论, 还介绍了该通用程序的有关性能和解决实际问题的具体方法。

本书介绍了与静力和正规振型分析有关的 MSC/NASTRAN 功能的全部内容, 即定义坐标系、节点和矩阵符号表示法、用 NASTRAN 解矩阵方程、弹性理论的基本方程、基于刚度的有限元公式、有限元形函数、NASTRAN 的现代单元库、指定材料特性、定义载荷和约束、控制特征值求解与结果显示。为便于读者理解上述概念, 本书还给出了有关数例和输入格式。

本书可供从事有限元方法应用和有限元软件开发的工程技术人员使用, 也可供有关专业的大学师生学习参考。

MSC/NASTRAN Primer  
Static and Normal Modes Analysis  
Harry G. Schaeffer  
Schaeffer Analysis, Inc.

1979

大型有限元软件 MSC/NASTRAN

〔美〕H. G. 西夫尔 著

崔俊芝 傅子智 董世斌 徐家礼 译

国防工业出版社出版

(北京市车公庄西路老虎庙7号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市顺义县印刷厂印装

850×1168  $1/32$  印张13 $1/8$  342千字

1988年4月第一版 1988年4月第一次印刷 印数: 00,001—2,270册

ISBN7-118-00229-1/TB7 定价: 3.85元

## 译者的话

众所周知，有限元方法是近三十年来现代科学和工程计算方法方面的一项重大成就，它已广泛应用于众多的工程技术行业和科学研究领域。有限元软件则是有限元方法及其应用的集中和完善的体现。

到目前为止，工程师和分析家已经研究和开发了数以千计的通用与专用有限元软件。由美国航宇局支持发展的 NASTRAN 则是最大的有限元软件之一，并享有盛名。为了向国内科学研究和工程技术界系统地介绍有限元软件技术，我们翻译了本书，并希望读者能通过对 NASTRAN 的了解，掌握有限元软件技术的核心，同时也为实际使用 NASTRAN 提供一套有用的资料。

本书不足之处是对有限元软件的前后处理技术叙述较少。应该指出，前后处理技术已成为有限元软件的重要技术，是衡量有限元软件性能的重要标志之一。目前，已经出现了若干个专门用于 NASTRAN 前后处理的软件，对此感兴趣的读者，可参阅有关文献。

在翻译过程中，我们对书中的错误作了认真的校正，对名词术语作了统一。由于译者水平有限，译文难免有误，敬请读者批评指正。

## 序 言(摘译)

线性结构分析已是一门成熟的技术，因为这项技术已被编成供计算机使用的程序，所以完全可以把这类技术称之为计算机化技术。

供结构分析用的计算机程序，是结构力学、计算机科学和数值分析领域中的边缘性科学。在实际工作中，为了更有效地使用这些技术，结构工程师还必须熟悉大型分析程序（如MSC/NASTRAN）的技术内容。

我们看到，熟悉以有限元分析为基础的通用程序的一些用户，虽然具有结构分析方面的初步知识，但缺乏数值分析或计算机方面的知识。因此，给用户造成了很大的困难。用户必须熟练掌握程序中的语言，以便顺利地执行程序，并按时交付费用。

非常糟糕的是，由于资料奇缺、原始材料有限和一系列来自程序的严重错误，而使用户受挫。当程序最终接受数据并算出结果时，用户可能会盲目地相信：只要程序运行，就会产生正确的结果，然而这是毫无道理的。事实上，工程师们的工作是在确认了计算机结果的正确性之后才真正开始的。

本书有两个目的。第一，是以MSC/NASTRAN为模型，介绍现行通用有限元程序系统的技术要点；第二，是叙述MSC/NASTRAN的语言以及静力和正规振型分析的功能。

本书所用的材料既不是新的，也不是原始的，只是在编排上不同于有限元教科书和MSC/NASTRAN手册，它是按功能而不是按字母顺序编排的。因此，所有与指定自由度或修正刚度矩阵有关的输入数据，均在第七章叙述。有限单元、材料特性和静力载荷将分别在第九、十、十一章中叙述。

在第一章里，介绍了NASTRAN程序的编排，还讨论了MSC/

NASTRAN中各种不同的数据卡片组。第二章介绍矩阵和下标符号。第三章是试图让读者更多地了解MSC/NASTRAN中的DMAP语言。

关于有限元法的理论基础，在第四至六章中讨论。而在第八章将介绍为逼近单元性状所用的形函数。

在第十二和十三章中，分别给出了MSC/NASTRAN在静力和正规振型分析中的用法。第十三章中还介绍了实特征值问题的解法，以及求解特征值的子程序。

本书介绍的MSC/NASTRAN材料，是于1979年春天写成的。由于软件-硬件环境在不断地发展和变化，因此，在一段时期里修改程序是难免的，以致于书中所引用的有些材料可能已经过时。

本书的材料，已作为有限元法和用MSC/NASTRAN进行静力和正规振型分析的短训班的教材。而在一般大学里，这些材料可分两个学期讲授。由于本程序给出了许多典型例题，而且又是基本的学习工具，因此在授课期间应当鼓励学生使用这些程序。

本书与《NASTRAN入门》（静力和正规振型分析）相类似，该书于1977年出版，反映了15.5级COSMIC NASTRAN。为了反映现行的MSC/NASTRAN版本，必须对原文中描述程序功能的部分作彻底改写。仔细比较这两本书后发现，第二、四、五、六章和第八章基本上没有变化，在这几章中，介绍了程序的技术问题。本书的其余部分是这次重写的，在编排结构上与原版类似。

Harry G. 西夫尔

## 目 录

符号表 .....	5
第一章 结构分析程序 NASTRAN .....	6
1.1 引言 .....	6
1.2 MSC/NASTRAN概述 .....	7
1.3 NASTRAN资料 .....	10
1.4 MSC/NASTRAN数据卡片组 .....	10
1.5 如何启用 MSC/NASTRAN .....	12
1.6 批数据卡片组 .....	15
1.7 结构批数据卡片总述 .....	17
1.8 工况控制卡片组 .....	22
1.9 执行控制卡片组 .....	33
1.10 参考文献 .....	43
第二章 矩阵与下标的符号表示法 .....	44
2.1 下标符号表示法 .....	44
2.2 矩阵符号表示法 .....	48
第三章 用MSC/NASTRAN解矩阵方程 .....	61
3.1 直接矩阵求解程序设计 (DMAP) .....	61
3.2 矩阵运算模块 .....	62
3.3 DMAP规则 .....	63
3.4 用户指定矩阵数据 .....	66
3.5 打印矩阵数据 .....	69
3.6 参数数据定义、加工与输出 .....	71
3.7 执行操作模块 .....	71
3.8 参考文献 .....	72
第四章 弹性理论的基本关系式 .....	73
4.1 运动关系式 .....	73
4.2 动力关系式 .....	81

4.3	本构关系	87
4.4	板弯曲理论	92
4.5	参考文献	97
<b>第五章 变分原理</b>		<b>98</b>
5.1	基于容许位移的变分原理	98
5.2	基于容许力的变分原理	103
5.3	参考文献	105
<b>第六章 基于刚度的有限元法</b>		<b>106</b>
6.1	节点位移和节点力	106
6.2	位移集合符号	107
6.3	单元刚度的物理解释	108
6.4	直接确定单元刚度	110
6.5	基于假定位移的变分公式	113
6.6	近似位移函数	114
6.7	单元的刚度矩阵	118
6.8	作功等效力系	122
6.9	单元的质量矩阵	124
6.10	参考文献	126
<b>第七章 总体分析方法</b>		<b>127</b>
7.1	总刚度矩阵	127
7.2	局部和总体坐标系	132
7.3	指定结构自由度	134
7.4	位移集合	152
7.5	约束说明	153
7.6	矩阵化简——OMIT 和 ASET	165
7.7	自由体支撑——SUPORT	168
7.8	子结构分析	171
7.9	柔度到刚度的变换——GENEL	173
7.10	参考文献	179
<b>第八章 有限单元的形函数</b>		<b>180</b>
8.1	对形函数的要求	180
8.2	多项式形函数	181
8.3	内插函数	185



8.4	矩形单元 .....	186
8.5	精心导出的函数 .....	189
8.6	等参数单元 .....	193
8.7	降阶参数壳元 .....	195
8.8	参考文献 .....	196
<b>第九章 MSC/NASTRAN的结构单元 .....</b>		<b>197</b>
9.1	引言 .....	197
9.2	定义单元特性 .....	198
9.3	标量弹性单元 .....	200
9.4	桁架单元——ROD .....	204
9.5	杆单元——BAR .....	209
9.6	梁单元——BEAM .....	227
9.7	曲梁或管单元——BEND .....	238
9.8	抗剪板元——SHEAR .....	247
9.9	壳单元 .....	251
9.10	体单元——HEXA和PENTA .....	265
9.11	约束单元 .....	271
9.12	全等单元 .....	286
9.13	参考文献 .....	286
<b>第十章 材料特性 .....</b>		<b>287</b>
10.1	与温度无关的材料 .....	288
10.2	与温度有关的材料 .....	295
10.3	参考文献 .....	300
<b>第十一章 静力外载荷 .....</b>		<b>301</b>
11.1	格点上的集中力 .....	301
11.2	标量载荷 .....	306
11.3	梁弯曲单元上的分布载荷——PLOAD1 .....	306
11.4	分布面力 .....	308
11.5	重力载荷 .....	311
11.6	向心加速度载荷 .....	312
11.7	组合载荷 .....	314
11.8	强迫位移——SPCD .....	314
11.9	强迫变形 .....	315

11.10	温度载荷说明 .....	316
11.11	格点温度说明 .....	317
11.12	轴向单元温度场说明 .....	318
11.13	二维单元温度场说明 .....	319
<b>第十二章 用MSC/NASTRAN进行静力分析 .....</b>		<b>321</b>
12.1	静力分析功能 .....	321
12.2	固定格式输入说明 .....	328
12.3	固定格式输出 .....	329
12.4	自动输出 .....	329
12.5	格点重量发生器 .....	334
12.6	平面桁架的静力分析 .....	335
12.7	静力分析的固定格式更换 .....	342
12.8	参考文献 .....	347
<b>第十三章 用MSC/NASTRAN进行正规振型分析 .....</b>		<b>348</b>
13.1	同步运动方程 .....	348
13.2	特征向量的性质 .....	350
13.3	特征值问题的标准形式 .....	352
13.4	单元惯性特性说明 .....	352
13.5	实特征值求解方法 .....	355
13.5.1	行列式法 .....	357
13.5.2	反幂法 .....	360
13.5.3	三对角线 (Givens) 法 .....	366
13.6	正规振型分析的NASTRAN数据卡片组 .....	368
13.7	消除矩阵奇异性 .....	370
13.8	减少动力自由度的方法 .....	372
13.9	举例: 未化简的正规振型和频率 .....	380
13.10	举例: 采用广义动力化简的加劲板 .....	392
13.11	正规振型的固定格式更换 .....	393
13.12	参考文献 .....	393
<b>附录A 批数据格式 .....</b>		<b>394</b>
A 1	短字段数据卡片 .....	394
A 2	长字段数据卡片 .....	395
<b>附录B 参数的用途 .....</b>		<b>397</b>

附录 C	静力和正规振型分析的批数据卡片汇总	400
C 1	定义标量自由度——SPOINT	400
C 2	定义总体坐标系	400
C 3	定义几何格点	400
C 4	格点重新编号	400
C 5	多点约束	401
C 6	单点约束	401
C 7	静态凝聚	401
C 8	自由体支撑	401
C 9	一般单元	401
C 10	标量弹性元	401
C 11	桁单元	402
C 12	均匀梁元	402
C 13	锥形梁元	402
C 14	曲梁元	402
C 15	抗剪板元	403
C 16	等参数壳元	403
C 17	等参数体元	403
C 18	全等单元	403
C 19	约束单元	403
C 20	材料特性	404
C 21	定义施加的载荷	405
C 22	定义集中质量	405
C 23	定义实特征值方法	406
C 24	定义广义动态化简	406
C 25	定义直接矩阵输入	406
C 26	原有的功能	407

## 符 号 表

下面列出了本书所用的主要符号，其他符号在它们出现时再予以定义。

矩阵用黑体符号表示。如果有下标，一般是用来表示与那个矩阵有联系的MSC/NASTRAN位移集合。因此，矩阵的阶次可由下标数字表示。第一个数表示行集合；第二个数表示列集合。例如， $M_{a_0}$ 是具有  $a$  行和  $0$  列的部分质量矩阵，符号上面带“ $\sim$ ”的记号表示特殊量，带“ $\cdot$ ”的记号表示对时间的导数。

### 矩阵和集合

- a 多项式系数集合 (方程8.1) 或加速度
- $a_{ij}$  方向余弦 (4.1.5节)
- B** 布尔变换矩阵 (方程7.2)
- b 由方程6.33定义
- C** 柔度矩阵 (方程4.72)
- c 约束力
- $c_i$  一个矩阵的第  $i$  行里的有效列数 (7.3.5节)
- D** 微分算子矩阵 (方程6.2.9) 或刚体变换矩阵
- E** 弹性矩阵 (方程4.64)
- E<sub>r</sub>** 抗弯刚度矩阵 (方程4.93)
- E<sub>ijkl</sub>** 弹性张量 (4.3.1节)
  - e 应变的物理分量 (方程4.66)
  - $e_i$  初应变 (4.3.6节)
  - $e^{\circ}$  参考面应变 (方程4.79)
- F** 力
- f 柔度矩阵 (7.9节)
- G** 变换矩阵

- $G_1, G_2, G_3, G_4$  分别表示与薄膜、抗弯、抗剪以及薄膜与弯曲耦合有关材料矩阵 (方程9.41)
- $I$  单位矩阵或惯性张量
- $i_1, i_2, i_3$  坐标方向上的单位向量
- $J$  变换的雅可比 (Jacobi) 矩阵 (8.6.2节) 或特征值问题标准型的变换矩阵 (方程13.30)
- $k$  刚度矩阵 (6.2节)
- $L$  下三角形矩阵 (2.2.2.5节)
- $L_{ij}$  拉格朗日大位移应变张量 (方程4.12)
- $l_{ij}$  拉格朗日小应变张量 (方程4.14)
- $M$  系统质量矩阵 (方程13.4) 或合力矩阵 (4.82)
- $m$  单元质量矩阵 (方程13.2)
- $N$  形函数 (8.2节)、合力 (方程4.83) 或定义力的方向 (方程11.2)
- $n$  表面的单位法向量, 矩阵表示形式
- $n_i$  表面的单位法向量, 下标表示形式
- $P$  节点力集合 (6.2节)
- $P(m)$  直至  $m$  次的多项式函数集合 (方程8.1)
- $Q$  剪切实力向量 (方程9.42)
- $R$  变形体内材料点的位置 (4.1节) 或MPC关系式里的系数矩阵 (7.5.1节)
- $r$  未变形体内材料点的位置 (4.1节)
- $S$  单元刚体变换矩阵 (7.9节) 或柔度矩阵 (10.1.4节)
- $T$  表面力集合 (6.5节)
- $U$  上三角形矩阵 (2.2.2.5节)
- $u$  节点位移集合 (6.2节)
- $v$  位移向量或定义有限单元局部坐标系所使用的方位向量 (9.5.1.1节)
- $v_i$  位移向量的下标表示形式
- $v^*$  边界上指定的位移 (方程5.30)

- X 体力  
Y 指定的位移

### 特殊符号

- M 振型质量矩阵 (方程13.28)  
K 振型刚度矩阵 (方程13.28)

### 标量

- A 面积  
C 自由度  
D 抗弯刚度 (方程4.94)  
E 弹性模量  
G 格点或标量点的识别号  
I 惯性矩  
 $I_{yy}, I_{xx}, I_{zy}$  面积惯性矩  
J 扭转常数  
 $K_y, K_z$  剪切系数  
L 长度  
M 力矩或由经验确定的乘和加的时间 (7.3.5节)  
m 质量  
 $Q_x, Q_y$  剪切实力  
q 分布的表面压力 (4.4.1节)  
t 时间或厚度  
U 内部应变能 (方程4.19)  
 $U_0$  内部应变能密度 (方程5.17)  
 $U^*$  内部余能 (方程5.31)  
V 势或梁的剪切实力或体积  
( $u, v, w$ ) 位移的标量分量 (方程4.76)  
W 功或波阵面 (7.3.5节)  
 $W_e$  外力功  
 $W_i$  内力功

## 希腊符号

- $\alpha$  热膨胀系数 (4.3.6节)  
 $\delta_{ii}$  科罗内克  $\delta$   
 $\sigma$  应力向量 (方程4.37) 或应力分量 (方程4.66)  
 $\sigma_i$  应力向量, 下标表示形式  
 $\sigma_{ii}$  应力向量, 下标表示形式  
 $\sigma^*$  边界上指定的应力向量 (方程5.21)  
 $\lambda$  拉梅 (Lame) 系数 (方程4.70), 特征值或变换矩阵  
 $\nu$  泊松比  
 $\mu$  拉梅系数 (方程4.70)  
 $\kappa^*$  参考曲面的曲率 (方程4.81)  
 $\theta$  转角  
 $\rho$  密度  
 $\epsilon$  误差  
 $(\xi, \eta, \zeta)$  内部坐标  
 $\phi$  特征向量  
 $\omega$  圆频率或角速度向量  
 $\omega_i$  旋转向量分量 (方程4.24)

## 下标

- $a$  分析集合  
 $b$  广义动态化简中所保留的物理自由度集合  
 $c$  广义动态化简中的广义自由度集合  
 $e$  表示第  $e$  个单元  
 $f$  自由位移集合  
 $g$  全部自由度集合  
 $i$  表示第  $i$  个节点  
 $l$  保留集合  
 $m$  用多点约束方程消去的集合  
 $n$  通过多点约束消不掉的集合

- o 通过静态凝聚所略去的集合
  - r 消除刚体运动的集合
  - s 由单点约束指定的集合
  - w 具有空列的部分集合  $a$
  - x 具有非零矩阵系数的部分集合  $a$
- ( $x, y, z$ ) 表示坐标方向上的分量



# 第一章 结构分析程序NASTRAN

## 1.1 引言

NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis) 是美国国家宇航局 (National Aeronautics and Space Administration, 简称 NASA) 为满足对通用有限元程序的需要而设计和发展的。为了便于普及, 该程序原来是与计算机无关的。但由于字长、覆盖结构和系统输入输出子程序有差异, 脱离计算机是不实际的。于是, 便依据三种使用最广泛的计算机发展了不同的NASTRAN文本。

NASTRAN 最早于 1969 年由计算机软件管理与信息中心 (COSMTC) 发行出版。最初的程序是可以买到的, 一直到 COSMIC 发行 16.0 级文本。但自此以后, COSMIC 的发行物只限于租用。

除了 NASA 所提供的 NASTRAN 文本 (通常称为 COSMIC/NASTRAN) 外, 还有几个专利的 NASTRAN 文本。这些文本中, 大家最熟悉的是 MSC/NASTRAN, 它是由 MacNeal-Schwendler 公司发展和提供的。

MSC/NASTRAN 和 COSMIC/NASTRAN 的共同点是 15.5 级 NASTRAN。两个文本是独立发展的。虽然表面上很相似, 但程序是不同的。

由于下述原因, MSC/NASTRAN 可作为 NASTRAN 的标准文本:

1. 广泛的用途;
2. 先进的特性;
3. 能满足用户的要求。