

ANSYS

结构分析单元与应用

王新敏 李义强 许宏伟 编著



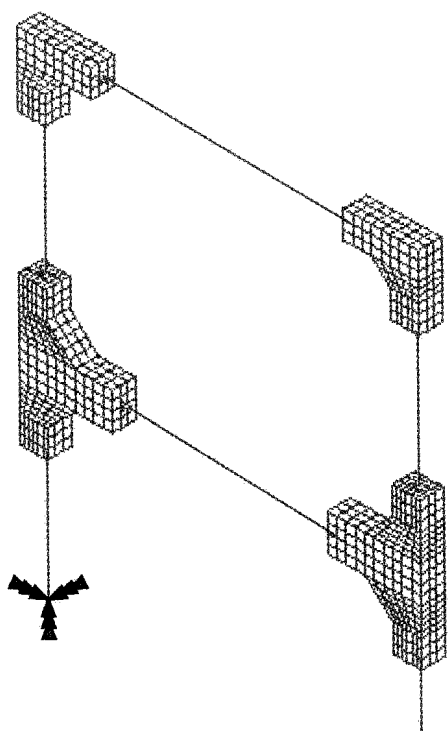
人民交通出版社
China Communications Press

ANSYS

结构分析单元与应用

ANSYS Jiegou Fenxi Danyuan yu Yingyong

王新敏 李义强 许宏伟 编著



人民交通出版社
China Communications Press

前 言

ANSYS 软件是国内外较为流行的大型通用商业有限元分析软件,其使用越来越普及,不仅在大专院校和科研院所广泛使用,而且在设计和施工单位也有较大的用户群。目前,市场上关于 ANSYS 软件基本操作方面的书籍很多,但尚无介绍 ANSYS“单元”方面的。

ANSYS 软件功能强大,集结构、流体、电磁等多物理场于一体,单元种类和单元数目众多。事实上,学会使用 ANSYS 软件并不难,获得特定计算模型的计算结果也不难,但计算结果是否与实际模型一致,或者说计算结果是否合理就很难判断了。计算结果合理与否的首要因素是计算模型的正确性,即边界条件和单元的选择。因此必须掌握 ANSYS 各类单元的特点、特性和使用方法,否则不仅劳而无功,也很难保证计算结果的正确性。因 ANSYS 单元庞大且受作者专业所限,本书仅介绍“结构分析”的主要单元。

本书主要介绍了结构分析常用的各类单元,如单元特点、输入与输出、特性与选项、应用注意事项等,同时介绍了典型单元的有限元基础知识,如单元所用形函数、单元矩阵和算法等内容。每个单元均配有算例和命令流文件,全书有近 200 个算例,且与 ANSYS 的 HELP 算例均不重复。本书既适用于 ANSYS 软件的初学者,也可作为 ANSYS 软件熟练应用者的单元手册。

全书共分 14 章,第 1 章介绍结构分析单元与分类;第 2~4 章分别介绍杆、梁及管单元;第 5~6 章分别介绍 2D 和 3D 实体单元;第 7 章介绍壳单元;第 8 章介绍弹簧单元;第 9 章介绍质量单元;第 10 章介绍接触单元与接触技术;第 11 章介绍矩阵单元;第 12 章介绍表面效应单元;第 13 章介绍几个特殊单元;第 14 章介绍 MPC184 单元。本书主要以 ANSYS10.0 为基础,同时结合 ANSYS11.0 增加了相关内容。

本书第 4 章和第 12 章由李义强编写,第 5 章和第 14 章由许宏伟编写,其余各章由王新敏编写。全书由王新敏校阅修正、统稿和编排。

因编者水平所限,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

作者 Email:stywxm@126.com。

作 者

2011 年 3 月

目 录

第 1 章 结构分析单元	1
1.1 单元的一般特性	1
1.2 单元分类	6
第 2 章 杆单元	11
2.1 LINK1 单元	11
2.2 LINK8 单元	15
2.3 LINK10 单元	20
2.4 LINK11 单元	25
2.5 LINK180 单元	29
第 3 章 梁单元	34
3.1 BEAM3 单元	34
3.2 BEAM4 单元	45
3.3 BEAM23 单元	55
3.4 BEAM24 单元	62
3.5 BEAM44 单元	70
3.6 BEAM54 单元	84
3.7 BEAM188 单元	89
3.8 BEAM189 单元	90
第 4 章 管单元	108
4.1 PIPE16 单元	108
4.2 PIPE17 单元	121
4.3 PIPE18 单元	125
4.4 PIPE20 单元	131
4.5 PIPE59 单元	139
4.6 PIPE60 单元	154
第 5 章 2D 实体单元	157
5.1 PLANE42 单元	157
5.2 PLANE82 单元	165
5.3 PLANE2 单元	170
5.4 PLANE25 单元	171
5.5 PLANE83 单元	176
5.6 PLANE145 单元	176
5.7 PLANE146 单元	181
5.8 PLANE182 单元	181
5.9 PLANE183 单元	186
第 6 章 3D 实体单元	187
6.1 SOLID45 单元	187

6.2	SOLID95 单元	191
6.3	SOLID92 单元	200
6.4	SOLID46 单元	200
6.5	SOLID191 单元	216
6.6	SOLID64 单元	218
6.7	SOLID65 单元	220
6.8	SOLID147 单元	235
6.9	SOLID148 单元	237
6.10	SOLID185 单元	237
6.11	SOLID186 结构实体单元	239
6.12	SOLID186 分层实体单元	242
6.13	SOLID187 单元	244
6.14	SOLSH190 单元	244
第 7 章	壳单元	251
7.1	SHELL63 单元	251
7.2	SHELL93 单元	263
7.3	SHELL43 单元	270
7.4	SHELL181 单元	274
7.5	SHELL281 单元	286
7.6	SHELL91 单元	286
7.7	SHELL99 单元	297
7.8	SHELL28 单元	309
7.9	SHELL41 单元	312
7.10	SHELL150 单元	319
7.11	SHELL61 单元	321
7.12	SHELL209 单元	322
7.13	SHELL208 单元	327
第 8 章	弹簧单元	328
8.1	COMBIN14 单元	328
8.2	COMBIN40 单元	338
8.3	COMBIN37 单元	346
8.4	COMBIN39 单元	354
8.5	COMBIN7 单元	361
第 9 章	质量单元	370
9.1	MASS21 单元	370
第 10 章	接触单元	375
10.1	接触概述	375
10.2	CONTA174 单元	386
10.3	CONTA173 单元	406
10.4	CONTA172 单元	407
10.5	CONTA171 单元	410
10.6	CONTA175 单元	411

10.7	CONTA176 单元	413
10.8	TARGE169 单元	419
10.9	TARGE170 单元	423
10.10	CONTA178 单元	426
10.11	CONTAC52 和 CONTAC12 单元	433
10.12	CONTA177 单元	433
10.13	多点约束(MPC)与装配	435
10.14	点焊	450
第 11 章	矩阵单元	456
11.1	MATRIX27 单元	456
11.2	MATRIX50 单元	459
第 12 章	表面效应单元	463
12.1	SURF153 单元	463
12.2	SURF154 单元	467
12.3	SURF156 单元	472
第 13 章	特殊单元	476
13.1	PRETS179 单元	476
13.2	MESH200 单元	482
13.3	FOLLW201 单元	484
13.4	COMBI214 单元	486
13.5	REINF265 单元	493
第 14 章	MPC184 单元	497
14.1	概述	497
14.2	MPC184-刚性杆和刚性梁单元	498
14.3	MPC184-滑块单元	502
14.4	MPC184-销轴连接单元	504
14.5	MPC184-万向节连接单元	511
14.6	MPC184-滑槽连接单元	514
14.7	MPC184-点面连接单元	518
14.8	MPC184-平移连接单元	520
14.9	MPC184-圆柱连接单元	523
14.10	MPC184-面连接单元	527
14.11	MPC184-焊接连接单元	530
14.12	MPC184-定向连接单元	531
14.13	MPC184-球铰连接单元	532
14.14	MPC184-广义连接单元	533
参考文献	536

第 1 章 结构分析单元

ANSYS 有七大类单元,分别为结构单元、热单元、电磁单元、耦合场单元、流体单元、网分单元、显式动力分析单元。一般结构分析仅使用结构单元,限于篇幅,本书主要介绍结构单元和网分单元,并将其称为“结构分析单元”。

1.1 单元的一般特性

单元的一般特性包括单元输入,单元结果输出,单元坐标系,节点和单元荷载,三角形、棱柱和四面体单元,壳单元等;至于非线性材料模型及其组合、具有广义平面应变选项的 18x 实体单元、几何非线性、u-P 混合算法单元、自动选择单元技术等内容不在这里介绍,而在各单元介绍中根据需要介绍。

1.1.1 输入参数

单元输入参数主要有单元名称、节点、自由度、实常数、材料性质、荷载、单元特性、KEYOPTS(关键选项)等,简单介绍如下。

(1) 单元名称

单元名称由两部分组成,其一是用不超过 8 个字符的名称定义的单元类型,其二是用“唯一”数字定义的单元序号,如 BEAM3=BEAM+3。用 ET 命令定义单元类型时,可采用单元名称或单元序号,如 ET,1,BEAM3 或 ET,1,3 均可。

(2) 节点

单元的节点用 I、J、K 等描述,在每个单元的单元几何中标出了节点的顺序和方位,详见本书其他章节。节点序列可在网格划分时自动生成,也可由用户通过 E 命令定义节点序列。节点号必须与单元描述中“Nodes”的列表顺序相符,节点 I 是单元的第一个节点号,节点顺序决定某些单元的单元坐标系方位。

(3) 自由度

每种单元类型都有一自由度集,该自由度集构成节点未知量,它们可为位移、转角、温度、压力等。所谓导出结果,如应力和热流等均是根据自由度结果计算得到的。用户不必明确地定义节点上的自由度,而是用与之相关的单元类型确定,因此单元类型的选择在 ANSYS 分析中是很重要的。

位移和转角自由度通常用 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ 表示,其意义分别为沿节点坐标系 x、y、z 的平动位移和绕节点坐标系 x、y、z 的转动位移。温度自由度为 TEMP,压力自由度为 PRES。

(4) 实常数

实常数用于计算单元矩阵,典型的实常数包括面积、厚度或高度、内径与外径等。实常数的内容由单元决定,每一种单元的实常数可能都不相同。实常数通过命令 R 输入,且输入的实常数顺序和数值必须与单元“实常数”列表相符,否则可能会导致输入不正确。对于杆、梁和壳单元检查实常数比较好的方法是打开单元形状(命令/ESHape),然后显示单元。

(5) 材料性质

每种单元都具有不同的材料性质,典型的材料性质包括弹性模量、密度、热胀系数等。ANSYS 用标识符定义每种性质,如 EX 表示单元坐标系下 x 方向的弹性模量、DENS 表示密度等。所有的材料性质都可为温度的函数,即随温度的变化而变化。

对正交各向异性材料,通常要输入单元坐标系下的如下材料性质。

①三个方向的弹性模量:EX、EY、EZ,量纲为“力/面积”。

②三个方向的主泊松系数:PRXY、PRYZ、PRXZ(或次泊松系数:NUXY、NUYZ、NUXZ),无单位。

③三个方向的热膨胀正割系数:ALPX、ALPY、ALPZ,(或热膨胀瞬时系数:CTEX、CTEY、CTEZ,或热应变:THSX、THSY、THSZ),热膨胀系数的量纲为“应变/温度”,而热应变的量纲为“应变”。

④剪切模量:GXY、GYZ、GXZ,量纲为“力/面积”。

⑤质量密度:DENS,量纲为“质量/体积”。

⑥刚度矩阵阻尼系数:DAMP,无单位,用命令 BETAD 输入。

⑦参考温度:REFT,用命令 TREF 输入。

⑧摩擦系数:MU,无单位。

⑨材料阻尼系数:DMPR,无单位。

以上除明确输入命令外,其余均用命令 MP 输入。

与热无关的某些材料性质是线性的,其求解仅需单步迭代。而类似应力—应变关系的材料性质是非线性的,其求解需要多次迭代。线性材料性质通过 MP 系列命令输入,非线性材料性质通过 TB 系列命令输入。

(6) 荷载

不同的单元类型有不同的表面荷载和体荷载。对于结构分析单元,其典型的表面荷载为压力(分布荷载),而体荷载仅为温度。每种单元的表面荷载和体荷载及其施加方法详见各单元介绍。

(7) 单元特性

在单元特性列表中给出了单元的附加分析能力,如应力刚化、大变形、塑性、蠕变、膨胀、单元生死等,绝大多数特性导致单元为非线性且需要迭代求解。在使用某个单元时,应查看该单元是否具有某方面的分析能力,如 2D 弹性梁单元 BEAM3 不具有塑性分析能力,因此该单元不能用于塑性分析,初学者经常犯此类错误。

(8) KEYOPTS

KEYOPTS 是 Key Options 的缩写,一般称为单元的关键选项,用于打开或关闭单元的各种选项。KEYOPTS 包括单元刚度矩阵选项、单元输出选项、单元坐标系选项等,在定义单元类型时一并定义。在单元介绍中,KEYOPTS 用序号表达,如 KEYOPT(1)、KEYOPT(2)等,可在命令 ET 中的 6 个顺序位置输入 6 个 KEYOPTS 的值,也可用命令 KEYOPT 单独输入,但 KEYOPT(7)及其以上的值必须采用命令 KEYOPT 输入。

一般地,ANSYS 均会给出 KEYOPTS 的缺省值,如用户不定义 KEYOPTS,则 ANSYS 就采用缺省值计算。若在不同的 ANSYS 产品或版本上运行命令流文件,即使与缺省值相同,也建议明确定义 KEYOPTS,因为不同产品或版本的缺省值可能不同。

1.1.2 结果输出

结果输出包括节点解(也称节点自由度解或基本解)和单元解(也称导出解),这些结果会写入输出文件或打印输出(.OUT)、数据库(.DB)和结果文件(.RST、.RTH、.RMG 或 .RFL)中。输出文件可以通过图形用户界面浏览,而数据库和结果文件的数据用于后处理。

输出文件包括节点自由度解、节点荷载、支承反力及单元解,这些都取决于命令 OUTPR 的设定。单元解主要是各个单元质心的结果,大多数单元的 KEYOPTS 可设置更多的结果输出,如积分点的结果等。

结果文件所包含的数据由命令 OUTRES 定义。在 POST1 中,用命令 SET 读入所需荷载步结果。面单元和体单元的结果通常用命令从数据库中得到,这些命令包括 PRNSOL、PLNSOL、PRESOL 和 PLESOL 等。

(1) 节点解

节点解包括节点自由度解(如节点位移和温度)与约束节点的反力解。

节点自由度解指整个模型中所有活动自由度的解,由所有活动单元相关的自由度集决定。命令 OUTPR, NSOL 和命令 OUTRES, NSOL 分别控制打印输出和结果文件输出。

所有约束节点的反力解通过命令 OUTPR, RSOL 和命令 OUTRES, RSOL 控制输出。

在求解过程以及求解完成后(尚未在 POST 中处理),节点自由度解和节点反力解均位于节点坐标系下。若输入时某个节点的节点坐标系被旋转了,则节点解也位于旋转的节点坐标系中。转动位移(ROTX、ROTY、ROTZ)的单位为“弧度”,谐分析中相位角的单位为“度”。

(2) 单元解

单元解主要指面荷载、质心解、表面解、积分点解、单元节点解、单元节点荷载、非线性解、平面和轴对称解、杆件力解等及其结果项。

单元解的结果项及其定义在各单元介绍中描述,单元输出表格中并没有列出所有的输出结果项。一般地,没有列出的结果项或不适用,或为零解。然而,除耦合场单元 PLANE223、SOLID226 和 SOLID227 外,耦合场力即使计算为零也列出。绝大多数的结果项都列在了单元输出表格中,某些没有列出的也写入了结果文件中。

绝大多数单元用两个表格分别描述输出结果和获取这些结果的方式,即单元输出说明表、单元 ETABLE 和 ESOL 的表项与序号。单元输出说明表(类似表 3-2)描述了单元的可能输出结果,并给出了哪些结果项在打印输出(O 栏)中有效,哪些结果项在结果文件(R 栏)中有效等。单元 ETABLE 和 ESOL 的表项和序号表(类似表 3-3)描述了命令 ETABLE 和 ESOL 中的表项和结果对应的序号。这里需要说明的是,表项 SMISC(Summable Miscellaneous)和 NMISC(Nonsummable Miscellaneous)分别表示可求和杂项与不可求和杂项。

对结构分析单元而言,表面压力输出的是单元节点上的输入压力。

质心解在列表输出时给出单元质心(或接近中心)的输出结果,如应力、应变和温度等。若使用大变形分析,质心位置会被更新。所输出的质心结果值采用单元积分点的平均值,矢量的分量方向与材料方向一致,分别是单元坐标系的函数,如 SX 的方向与 EX 方向相同。而在后处理中的 ETABLE 命令可利用单元的节点结果计算质心结果。

实体单元的某些自由表面的表面解可列表输出。所谓自由表面,是指与其他单元没有任何联系,并且没有任何自由度约束和节点荷载的表面。表面解输出对非自由表面或非线性材料是无效的,对杀死或激活单元也无效,且表面解输出不包括大应变效应。表面解的精度与位移精度相同,其结果不是从积分点结果外推到表面,而是根据节点位移、面荷载和材料性质等计算得到的。表面的横向剪应力假定为零,表面的正应力等于表面压力。表面解输出不宜为密集面或轴对称模型的零曲面。

一些单元的积分点解可列表输出。若使用大变形分析,积分点位置会被更新。在各单元介绍中给出了单元积分点的个数与位置。命令 ERESX 可设置积分点数据写入结果文件。积分点是很多单元的求解点,如 2D 和 3D 实体单元、壳单元等。

单元节点解不同于节点解,是指每个单元节点上的结果数据。单元节点解对 2D 和 3D 实体单元、壳单元等都适用,是一种导出结果,如应变、应力等。单元节点解通常是利用单元的积分点结果外推到节点上,特殊情况是单元积分点具有非零塑性、蠕变、膨胀等特性或 ERESX 设为 NO 时,此时单元节点解就是最近的积分点解;单元节点解的输出通常位于单元坐标系下。在“/POST1”中,用命令 PLNSOL 绘制所选择单元和节点的节点应力时,应力的连续云图穿过单元边界,云图采用单元节点解线性内插得到,而所显示的某个节点的某项结果取与该节点相连的所有单元的单元节点解中该节点的某项结果的平均值,因此 PLNSOL 虽然绘制的是节点的某项结果,但实际是通过单元节点解计算得到的。

单元节点荷载指作用在单元每个节点上的荷载或力,包括静荷载、阻尼荷载和惯性荷载等。与支承有关的单元节点荷载的计算,是通过与之相连的所有单元的该节点荷载求和,然后再与该节点外荷载(用

F 或 FK 施加的)相加得到,其值与该支承节点的节点反力相等,但符号相反。

由材料非线性引起的非线性应变采用最近的积分点结果,若存在蠕变,则在塑性校正之后蠕变校正之前计算应力,而弹性应变则在蠕变校正之后计算。

平面和轴对称解:2D 实体分析基于“单位厚度”计算,其结果也多基于单位厚度给出。当然,大多数 2D 实体单元也可以设置“厚度”。2D 轴对称实体分析基于 360° 计算,其结果也多基于 360° 给出。特别是对于轴对称结构分析,合力是指 360° 模型的合力,而 X、Y、Z 和 XY 分别对应径向、轴向、周向和平面内,总体坐标系的 Y 轴必须是对称轴,且应该在 X 轴的正象限建立结构模型。

杆件力解对大多数结构线单元都适用,其输出位于单元坐标系下,并且与单元自由度相对应,如 BEAM3 单元的杆件力有 MFORX、MFORY 和 MMOMZ。对许多梁单元和管单元杆件力,其计算方法为:沿单元长度方向取节点 I 到计算点一段杆件,利用该段杆件力的平衡条件,得到计算点的杆件力。在结构矩阵分析中,惯用术语是单元“杆端力”,它是单元刚度矩阵与单元节点位移的乘积,单元杆端力的方向与单元坐标系方向相同。而此处“杆件力”实际是“杆件内力”(也包括杆端内力),命令 ETABLE 中指杆件力,所以对于单元的 J 节点而言,J 节点的杆件力与 J 节点的杆端力相等,而 I 节点的杆件力与 I 节点的杆端力数值相等,但符号相反。

1.1.3 坐标系

(1) 单元坐标系

单元坐标系用于确定输入或输出参数的方向,如正交各向异性材料的方向、压力荷载方向及应力方向等。每个单元都有缺省的单元坐标系,详见各单元介绍,但一般设置如下。

单元坐标系采用右手正交法则。对于线单元(如 LINK 或 BEAM),缺省的 x 轴方向为单元 I 节点指向 J 节点。对于实体单元(如 PLANE 或 SOLID),缺省的单元坐标系一般平行于总体直角坐标系。对于壳单元,缺省时一般是 x 轴方向沿着单元的 I-J 节点,z 轴方向垂直于壳的表面(即与外法线方向相同,外法线方向以从单元节点 I-J-K 按右手法则确定),y 轴与 x 轴和 z 轴构成的平面垂直。

单元坐标系也可改变,如可通过命令 ESYS 设置面单元和实体单元的单元坐标系与既有局部坐标系平行,或者通过单元 KEYOPTS(如 PLANE42 单元)改变单元坐标系方向;当两个都设置时,以 KEYOPTS 为有效设置。某些单元还可相对于既有单元坐标系利用实常数将其单元坐标系旋转某个角度(如 SHELL63 单元实常数中的 THETA);当没有采用命令 ESYS 或 KEYOPTS 设定方向时,实常数中的角度则相对于缺省的单元坐标系方向。轴对称单元的单元坐标系仅可绕总体坐标系的 Z 轴旋转。

对于壳体单元,命令 ESYS 采用壳表面局部坐标系的投影确定方向。单元 x 轴方向由壳单元表面的局部 x 轴的投影确定,如果投影是一个点(或局部 x 轴与壳的法线夹角为零),则采用局部 y 轴的投影确定单元 x 轴方向,而单元其余两轴采用上述的缺省方向。对无中间节点的单元,投影在单元质心处计算,并假定在单元上其方向不变。对有中间节点的单元,投影在各积分点上计算,且在单元上其方向可能是变化的。对于轴对称单元,仅在 XY 平面的旋转有效。某些单元也允许通过用户子程序定义单元坐标系方向。

层单元用从单元坐标系的 x 轴旋转到各层的某个角度形成层坐标系,层的旋转角度通过命令 SECDATA 或 RMORE 输入。层单元的材料性质、应力和应变均基于层坐标系,而不是基于单元坐标系。

在单元介绍中的所有单元坐标系均假定没有执行命令 ESYS,单元坐标系以三轴符号显示,可用命令 PSYMB 或 PNUM 显示单元坐标系。三轴符号的显示不包括任何实常数中的角度效果,但单元 BEAM4 除外。对于大变形分析,单元坐标系以单元的刚体转动量基于初始单元坐标系进行旋转。

(2) 在节点坐标系下的单元定义

几个特殊单元需在节点坐标系下定义,如 COMBIN14 单元且 KEYOPT(2)=1~6、MASS21 单元且 KEYOPT(2)=1、MATRIX27 单元、COMBIN37 单元、COMBIN39 单元且 KEYOPT(4)=0、COMBIN40 单元等。这样便于控制单元方向,特别对两节点的单元具有重合节点的情况更为方便。但

当单元使用 UX、UY 和 UZ 自由度时,节点就不能重合,且当荷载不是平行于两个节点的连线时,单元因不能传递弯矩而导致弯矩不平衡;特殊情况是采用单元 MATRIX27,在其刚度矩阵中加入适当的弯矩项可包括弯矩行为。

当任一节点的节点坐标系被旋转后(如采用命令 NROTAT 旋转),需要注意:

①若单元节点有一个以上没有被同样旋转,可能造成力的失衡。

②加速度通常在总体直角坐标系中定义,但因节点坐标系与总体直角坐标系之间没有转换,作用于单元质量上的加速度在节点坐标系中仍然有效,这将产生不可预测的结果。因此,当单元有旋转了节点坐标系的节点时,不推荐施加加速度。

③质量和惯性释放的计算将不正确。

1.1.4 线性材料性质

线性材料性质可用命令 MP 输入,除 EX 和 KXX 必须输入非零值外,其余性质在没有输入时均采用缺省值,这里的 X、Y 和 Z 均指单元坐标系的方向。

结构材料性质必须是各向同性、正交各向异性或各向异性的材料。

对于各向同性材料:必须输入弹性模量(EX)。泊松比(PRXY 或 NUXY)缺省值为 0.3;如拟采用零值,需输入 PRXY 或 NUXY 为 0 或空;泊松比不能大于或等于 0.5。剪切模量(GXY)缺省值为 $EX/(2(1+NUXY))$,若要输入 GXY,则必须与 $EX/(2(1+NUXY))$ 相符,即输入 GXY 的唯一原因是确保所输入性质的一致性。

对于正交各向异性材料:若单元需要这些材料性质,则必须输入 EX、EY、EZ(PRXY、PRYZ、PRXZ 或 NUXY、NUYZ、NUXZ)和 GXY、GYZ、GXZ,这些性质没有缺省值。如对平面应力单元,当仅输入 EX 和 EY 且不相等时,程序会给出错误信息,提示因正交各向异性材料需输入 GXY 和 NUXY。

泊松比可用主泊松比(PRXY、PRYZ、PRXZ)或次泊松比(NUXY、NUYZ、NUXZ)输入。无论以何种方式输入,求解时主泊松比均转换为次泊松比,所得解也以次泊松比计算输出。

对于轴对称分析,X、Y 和 Z 标识符分别代表 R、Z 和 θ ,此时正交各向异性性质的输入应该遵循: $EX=ER, EY=EZ, EZ=E\theta$ 。而泊松比需要另外转换,若给定 R、Z 和 θ 性质已列规格化,则 $NUXY=NURZ, NUYZ=NUZ\theta=(ET/EZ)\times NU\theta Z$,且 $NUXZ=NUR\theta$;如果给定的 R、Z 和 θ 已行规格化,则 $NUXY=(EZ/ER)\times NURZ, NUYZ=(E\theta/EZ)\times NUZ\theta=NU\theta Z$,且 $NUXZ=(E\theta/ER)\times NUR\theta$ 。

各向异性材料性质、非线性材料模型及显示动力分析材料等可参考相关资料。

1.1.5 节点和单元荷载

荷载分节点荷载和单元荷载两种类型。节点荷载施加到节点上,与单元没有直接关系,而与节点自由度直接相关,分别用命令 D 和 F 施加(如节点位移约束和节点集中力荷载)。单元荷载指面荷载、体荷载和惯性荷载,总是与具体单元相关(即使在单元的节点上施加单元荷载)。某些单元也可能有“标记”,而这些标记虽不是荷载但会执行某种计算(如流—固耦合中的标记等)。

面荷载(如结构分析单元的压力、热单元的对流等)可以节点荷载形式施加,也可以单元荷载形式施加,如面荷载可施加到单元的一个面上,或更方便地施加到单元面的节点上。面荷载以节点荷载形式可施加更一般的渐变荷载。某些单元可施加多种面荷载,而有些可在一个单元面上施加多种面荷载。值得注意的是,施加在壳单元边上的面荷载以单位长度而不是单位面积为基础。面荷载用命令 SFE 和 SF 施加,SFE 可直接施加面荷载,而 SF 则以所选择节点构成的单元面施加。

对渐变面荷载,可在单元的节点上定义不同数值,用 SFE 命令施加。渐变面荷载的节点荷载数值顺序与单元输入参数表中所列面及节点顺序相同。

对结构分析单元而言,面荷载主要是压力(标识符 PRES),体荷载为温度。对某些结构分析单元而言,温度虽对单元荷载矢量无影响,但却影响材料特性。体荷载用命令 BF、BFE 和 BFUNIF 输入。

惯性荷载(重力和向心力等)对具有结构自由度和质量的单元适用,典型施加命令有 ACEL 和 OME-

GA。

对下列单元的初应力可设置为常数或者从文件中读取: PLANE2、PLANE42、SOLID45、PLANE82、SOLID92、SOLID95、LINK180、SHELL181、PLANE182、PLANE183、SOLID185、SOLID186、SOLID187、SOLSH190、BEAM188、BEAM189、SHELL208 和 SHELL209。可用命令 ISTRESS 对选定的单元施加常初应力,但仅适用于指定材料。也可用命令 ISFILE 读取文件中的初应力,此时可指定施加在单元质心或单元积分点,并且可施加在所选择单元的相同位置(如均为质心位置)或各个单元的不同位置(如分别为质心或单元积分点)。

1.1.6 三角形、棱柱和四面体单元

退化单元的特征面形状为四边形,但是它至少有一个三角形面。例如:三角形 PLANE42 单元、棱柱 SOLID45 单元和四面体 SOLID45 单元都是退化的形状。

退化单元通常用于粗糙网格和精细网格之间的过渡区域,如不规则和扭曲面建模等。无中间节点的四边形和六面体单元的退化单元,较有中间节点的四边形和六面体单元的退化单元的精度要低,通常不应用于应力梯度较大的区域。

但也有例外情况,对于严重歪斜或扭曲的单元,三角形壳单元则为首选。四边形单元不应歪斜,即两个相邻无中间节点的单元面夹角在 $90^\circ \pm 45^\circ$ 范围之外,或有中间节点的单元面夹角在 $90^\circ \pm 60^\circ$ 范围之外。当四个节点不在同一平面或发生了大变形时,四边形的 4 节点壳单元就会发生扭曲。扭曲用节点面上法线之间的相对角表达,如一个平面的所有法线平行,则相对角为零。若扭曲在允许值范围之内则发出警告信息,若扭曲超出允许值则求解中断。具有较大扭曲的四边形或六面体单元应用三角形或棱柱体单元替代。

1.1.7 壳单元

壳单元是专门模拟“薄壁结构”的一类单元,只有面内存在剪应力,且采用直线假定(即垂直于壳中面的法线在变形后仍为直线,但不一定垂直中面),因此壳单元在厚度方向上面内应变呈线性变化。厚度方向面内应变线性变化的假定对于具有不同材料性质的复合材料层壳单元的边缘不适用,为得到更为精确的应力分布应采用子模型技术。

何时采用壳单元合适并没有硬性规定,但若结构行为与壳相似,就可采用壳单元。ANSYS 并不检查单元厚度是否超过了宽度,因为这个单元可能是大模型的一个精细网格。如果模型的初始形状为曲面,半径厚度比就很重要,因为在厚度方向上的应变分布随该比率的减小而趋于非线性。除 SHELL51、SHELL61 和 SHELL63 单元外,所有的壳单元都计入剪切变形,这对厚壳单元很重要。

所有壳单元的单元坐标系 z 轴垂直壳面,单元 x 轴位于面内, x 轴的方向由下列之一确定:ESYS 命令、单元的 I-J 边或实常数。

在其计算结果出现疑问之前,各种单元均可发生不同程度的扭翘(用扭翘系数表示),如节点不在同一平面上的 4 节点壳单元就存在扭翘,而 8 节点壳单元可容许更大程度的扭翘,但其中间节点不能取消。

壳单元没有真正的面内转动刚度,为了求解的稳定性,采用几种方法在节点上增加了面内转动刚度,所以面内转动刚度绝不能承受荷载,即此转动刚度为“虚的”。

节点通常位于单元的中面上,可采用其他设置偏置节点,如命令 SECOFFSET、单元 KEYOPTS 或刚性线等。对具有初始曲率的结构,不管采用平面壳单元还是曲面壳单元,采用节点偏置时一定要谨慎。对曲面壳单元,增加周向单元网格的密度会对结果有所改进。

1.2 单元分类

ANSYS 具有许多单元类型,而每种类型又具有众多单元。这里仅将各类单元的特点和分组予以说明,而各单元的详细介绍见本书其后各章。

1.2.1 单元分类

ANSYS 单元分类如表 1-1 所示。

ANSYS 单元分类一览表

表 1-1

单元类型	维数	单 元
结构点单元		MASS21
结构线单元	2D	LINK1
	3D	LINK8, LINK10, LINK11, LINK180
结构梁单元	2D	BEAM3, BEAM23, BEAM54
	3D	BEAM4, BEAM24, BEAM44, BEAM188, BEAM189
结构实体单元	2D	PLANE2, PLANE25, PLANE42, PLANE82, PLANE83, PLANE145, PLANE146, PLANE182, PLANE183
	3D	SOLID45, SOLID64, SOLID65, SOLID92, SOLID95, SOLID147, SOLID148, SOLID185, SOLID186, SOLID187
结构壳单元	2D	SHELL51, SHELL61, SHELL208, SHELL209
	3D	SHELL28, SHELL41, SHELL43, SHELL63, SHELL93, SHELL143, SHELL150, SHELL181, SHELL281
结构实体壳单元	3D	SOLSH190
结构管单元		PIPE16, PIPE17, PIPE18, PIPE20, PIPE59, PIPE60
结构界面单元		INTER192, INTER193, INTER194, INTER195, INTER202, INTER203, INTER204, INTER205
结构多点约束单元		MPC184
结构层合单元		SOLID46, SHELL91, SHELL99, SOLID186, SOLSH190, SOLID191
显式动力单元		LINK160, BEAM161, PLANE162, SHELL163, SOLID164, COMBI165, MASS166, LINK167, SOLID168
黏弹实体单元		VISCO88, VISCO89, VISCO106, VISCO107, VISCO108
热点单元		MASS71
热线单元		LINK31, LINK32, LINK33, LINK34
热实体单元	2D	PLANE35, PLANE55, PLANE75, PLANE77, PLANE78
	3D	SOLID70, SOLID87, SOLID90
热壳单元		SHELL57, SHELL131, SHELL132
热电单元		PLANE67, LINK68, SOLID69, SHELL157
流体单元		FLUID29, FLUID30, FLUID38, FLUID79, FLUID80, FLUID81, FLUID116, FLUID129, FLUID130, FLUID136, FLUID138, FLUID139, FLUID141, FLUID142
电磁单元		PLANE53, SOLID96, SOLID97, INTER115, SOLID117, HF118, HF119, HF120, PLANE121, SOLID122, SOLID123, SOLID127, SOLID128, PLANE230, SOLID231, SOLID232
电路单元		SOURC36, CIRCU94, CIRCU124, CIRCU125
机电单元		TRANS109, TRANS126
耦合场单元		SOLID5, PLANE13, SOLID62, SOLID98, ROM144, PLANE223, SOLID226, SOLID227
接触单元		CONTAC12, CONTAC52, TARGE169, TARGE170, CONTA171, CONTA172, CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176, CONTA177, CONTA178
组合单元		COMBIN7, COMBIN14, COMBIN37, COMBIN39, COMBIN40, PRETS179
矩阵单元		MATRIX27, MATRIX50
无限元		INFIN9, INFIN47, INFIN110, INFIN111

续上表

单元类型	维数	单元
表面单元		SURF151,SURF152,SURF153,SURF154,SURF156,SURF251,SURF252
随动荷载单元		FOLLW201
网分单元		MESH200
钢筋单元		REINF265

注:1. 上表止于 V11.0 版本。

2. 某些单元类型定义时不能通过 GUI 方式定义,而需用命令 ET 定义。

1.2.2 结构分析单元

从应用角度出发,本书将结构分析单元的单元类型、名称、节点数、特性等说明列于表 1-2,这与 ANSYS 单元分类略有不同,后文将按表 1-2 的单元分类和顺序进行介绍。

结构分析单元名称及特性

表 1-2

类型	单元名称	单元简称	节点数	节点自由度	特性
杆单元	LINK1	2D 杆单元	2	U_{xy}	EPDGBCS
	LINK8	3D 杆单元	2	U_{xyz}	EPDGBCS
	LINK10	3D 仅拉或仅压杆单元	2	U_{xyz}	EDGBN
	LINK11	3D 线性调节器	2	U_{xyz}	EDGB
	LINK180	3D 有限应变杆单元	2	U_{xyz}	EPDGBCFVI
梁单元	BEAM3	2D 弹性梁单元	2	U_{xy}, R_z	EDGB
	BEAM4	3D 弹性梁单元	2+1	U_{xyz}, R_{xyz}	EDGB
	BEAM23	2D 塑性梁单元	2	U_{xy}, R_z	EPDGBCSF
	BEAM24	3D 薄壁梁单元	2+1	U_{xyz}, R_{xyz}	EPDGBCS
	BEAM44	3D 弹性变截面不对称梁单元	2+1	U_{xyz}, R_{xyz}	EDGB
	BEAM54	2D 弹性变截面不对称梁单元	2	U_{xy}, R_z	EDGB
	BEAM188	3D 一次有限应变梁单元	2+1	U_{xyz}, R_{xyz}, W_p	EPDGBCFVI
BEAM189	3D 二次有限应变梁单元	3+1	U_{xyz}, R_{xyz}, W_p	EPDGBCFVI	
管单元	PIPE16	弹性直管单元	2+1	U_{xyz}, R_{xyz}	EDGB
	PIPE17	弹性 T 管单元	2~4	U_{xyz}, R_{xyz}	EDGB
	PIPE18	弹性弯管单元	2+1	U_{xyz}, R_{xyz}	EDB
	PIPE20	塑性直管单元	2	U_{xyz}, R_{xyz}	EPDGBCS
	PIPE59	沉管或缆单元	2	U_{xyz}, R_{xyz}	EDGB
	PIPE60	塑性弯管单元	2+1	U_{xyz}, R_{xyz}	EPDPCS
2D 实体单元	PLANE42	4 节点结构实体单元	4	U_{xy}	EPDGBCSAF
	PLANE82	8 节点结构实体单元	8	U_{xy}	EPDGBCSAF
	PLANE2	6 节点三角形结构实体单元	6	U_{xy}	EPDGBCSAF
	PLANE25	4 节点轴对称一谐分析结构实体单元	4	U_{xyz}	EGB
	PLANE83	8 节点轴对称一谐分析结构实体单元	8	U_{xyz}	EGB
	PLANE145	8 节点四边形结构实体 p 单元	8	U_{xy}	E
	PLANE146	6 节点三角形结构实体 p 单元	6	U_{xy}	E
	PLANE182	4 节点结构实体单元	4	U_{xy}	EPDGBCFVIHT
	PLANE183	8 节点结构实体单元	8	U_{xy}	EPDGBCFVIHT

续上表

类型	单元名称	单元简称	节点数	节点自由度	特性
3D 实体 单元	SOLID45	8 节点结构实体单元	8	U_{xyz}	EPDGBCSFA
	SOLID95	20 节点结构实体单元	20	U_{xyz}	EPDGBCSFA
	SOLID92	10 节点四面体结构实体单元	10	U_{xyz}	EPDGBCSFA
	SOLID46	8 节点分层结构实体单元	8	U_{xyz}	EDG
	SOLID191	20 节点分层结构实体单元	20	U_{xyz}	EGA
	SOLID64	8 节点各向异性结构实体单元	8	U_{xyz}	EDGBA
	SOLID65	8 节点混凝土实体单元	8	U_{xyz}	EPDGBCFAR
	SOLID147	20 节点六面体结构实体 p 单元	20	U_{xyz}	E
	SOLID148	10 节点四面体结构实体 p 单元	10	U_{xyz}	E
	SOLID185	8 节点结构实体单元	8	U_{xyz}	EPDGBCFVIHT
	SOLID186	20 节点结构实体单元	20	U_{xyz}	EPDGBCFVIHT
	SOLID187	10 节点四面体结构实体	10	U_{xyz}	EPDGBCFVIHT
	SOLSH190	8 节点分层结构实体壳单元	8	U_{xyz}	EPDGBCFVIH
壳单元	SHELL63	4 节点弹性壳单元	4	U_{xyz}, R_{xyz}	EDGB
	SHELL93	8 节点结构壳单元	8	U_{xyz}, R_{xyz}	EPDGBSFA
	SHELL43	4 节点塑性大应变壳单元	4	U_{xyz}, R_{xyz}	EPDGBCFA
	SHELL181	4 节点有限应变壳单元	4	U_{xyz}, R_{xyz}	EPDGBCFVIHT
	SHELL281	8 节点有限应变壳单元	8	U_{xyz}, R_{xyz}	EPDGBCFVIHT
	SHELL91	8 节点非线性分层结构壳单元	8	U_{xyz}, R_{xyz}	EPDGSFA
	SHELL99	8 节点线性分层结构壳单元	8	U_{xyz}, R_{xyz}	EDG
	SHELL28	4 节点剪切/扭转板单元	4	U_{xyz} 或 R_{xyz}	EG
	SHELL41	4 节点膜单元	4	U_{xyz}	EDGBNA
	SHELL150	8 节点结构壳 p 单元	8	U_{xyz}, R_{xyz}	E
	SHELL61	2 节点轴对称一谱分析结构壳单元	2	U_{xyz}, R_z	EG
	SHELL209	3 节点有限应变轴对称壳单元	3	U_{xyz}, R_z	EPDGBCFVIHT
	SHELL208	2 节点有限应变轴对称壳单元	2	U_{xyz}, R_z	EPDGBCFVIHT
弹簧 单元	COMBIN14	弹簧—阻尼单元	2	UR 可选	EDGBN
	COMBIN40	组合单元	2	URPT 可选	ENA
	COMBIN37	控制单元	2~4	URPT 可选	ENA
	COMBIN39	非线性弹簧单元	2	URPT 可选	EDGN
	COMBIN7	铰连接单元	2+3	U_{xyz}, R_{xyz}	EDNA
质量单元	MASS21	结构质量单元	1	UR 可选	EDB

续上表

类型	单元名称	单元简称	节点数	节点自由度	特性
接触单元	CONTA174	3D8 节点面面接触单元	8	UTVM	EDBNO
	CONTA173	3D4 节点面面接触单元	4	UTVM	EDBNO
	CONTA172	2D3 节点面面接触单元	3	UTVA	EDBN
	CONTA171	2D2 节点面面接触单元	2	UTVA	EDBN
	CONTA175	2D/3D 点面接触单元	1	UTVMA	EDBNO
	CONTA176	3D 线线接触单元	2+1	Uxyz	EDBNO
	TARGE169	2D 目标单元	3	UxyRzTVA	EBN
	TARGE170	3D 目标单元	8	UTVM	EBN
	CONTA178	3D 点点接触单元	2	Uxyz	EN
	CONTAC12	2D 点点接触单元	2	Uxy	ENA
	CONTAC52	3D 点点接触单元	2	Uxy	ENA
	CONTA177	3D 线面接触单元	2+1	Uxyz	EDBNO
矩阵单元	MATRIX27	矩阵单元	2	Uxyz, Rxyz	EB
	MATRIX50	超单元	无输入	据单元	ED
表面效应单元	SURF153	2D 结构表面效应单元	2~3	Uxy	EDGB
	SURF154	3D 结构表面效应单元	4~8	Uxyz	EDGB
	SURF156	3D 结构表面线荷载效应单元	3~4	Uxyz	EDG
特殊单元	PRETS179	预紧单元	3	Ux	EN
	MESH200	分网单元	2~20	无	无
	FOLLW201	随动荷载单元	1	Uxyz, Rxyz	EDB
	COMBI214	2D 弹簧-阻尼轴承单元	2+1	U 组合	EDGB
	REINF265	3D 弥散增强单元	据单元	据单元	EPDGBCFVIH
MPC184 单元	MPC184	多点约束单元系列	2	Uxyz, Rxyz	ED, 仅刚性梁或杆增加 B

注:1. 表中自由度一栏中, Uxy: UX, UY; Uxyz = U: UX, UY, UZ; Rz: ROTZ; Rxyz = R: ROTX, ROTY, ROTZ; Wp: Wrap; T——TEMP; P——PRES; V——VOLT; M——MAG; A——AZ。

2. 表中特性一栏中, E——弹性 (Elasticity), P——塑性 (Plasticity), D——大变形或大挠度 (Large Deflection), G——应力刚化 (Stress Stiffness) 或几何刚度 (Geometric Stiffening), B——单元生死 (Birth and Dead), N——非线性 (Nonlinear), C——蠕变 (Creep), S——膨胀 (Swelling), A——自适应下降 (Adaptive Descent), F——大应变 (Large Strain) 或有限应变 (Finite Strain), V——黏弹 (Viscoelasticity), I——黏塑 (Viscoplasticity), H——超弹 (Hyperelasticity), T——单元技术自动选择 (Automatic Selection of Element Technology), R——开裂和压碎 (Cracking, Crushing), O——各向异性或正交各向异性摩擦。

第2章 杆单元

ANSYS用于结构分析的杆单元有 LINK1、LINK8、LINK10、LINK11 及 LINK180。显式动力杆单元有 LINK160 和 LINK167。

2.1 LINK1 单元

LINK1 称为 2D 杆单元,可模拟桁架、连杆、索和弹簧等。该单元可承受轴向拉压但不能承受弯矩,每个节点具有 2 个自由度,即沿节点坐标系 x 和 y 方向的平动位移,单元模型如图 2-1 所示。与之对应的 3D 杆单元为 LINK8 单元。

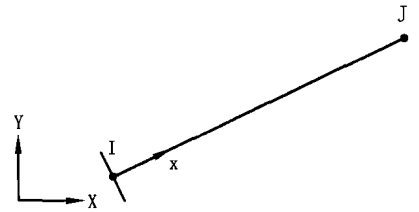


图 2-1 LINK1 单元几何

2.1.1 输入参数与选项

图 2-1 给出了单元几何、节点位置和单元坐标系,通过 2 个节点、横截面面积、初应变和材料属性定义该单元。单元的 x 轴方向为沿单元长度从节点 I 指向节点 J。单元的初应变 ISTRN 通过 Δ/L 给定, Δ 为单元长度 L (由 I 和 J 节点坐标计算)与零应变单元长度之差。

可在节点上输入温度或热流作为单元的体荷载。节点 I 上的温度 $T(I)$ 缺省为 TUNIF,节点 J 上的温度缺省为 $T(I)$ 。热流与温度的定义基本相同,但缺省值不再是 TUNIF 而是零。通过命令 LUMPM 定义质量表达形式,此设置对波的传播分析很有用。

LINK1 单元的输入参数与选项如表 2-1 所示。

LINK1 单元输入参数与选项

表 2-1

参数类别	参数及说明
节点	I, J
自由度	UX, UY
实常数	AREA——截面面积,ISTRN——初应变
材料属性	EX,ALPX(或 CETX 或 THSX),DENS,DAMP
面荷载	无
体荷载	温度—— $T(I), T(J)$;热流—— $FL(I), FL(J)$
特性	塑性、蠕变、膨胀、应力刚化、大变形、单元生死
KEYOPTS	无

2.1.2 输出数据

计算结果输出有两种形式:节点位移(全部节点解)和单元附加输出。

单元附加输出说明如表 2-2 所示,其中第一列为输出项名称,可通过命令 ETABLE 或 ESOL 定义并获得;第二列是对第一列的详细说明;第三列表示某一输出项是否在输出文件(.OUT 文件)中列出;第四列表示某一输出项是否在结果文件(.RST 文件)中列出。