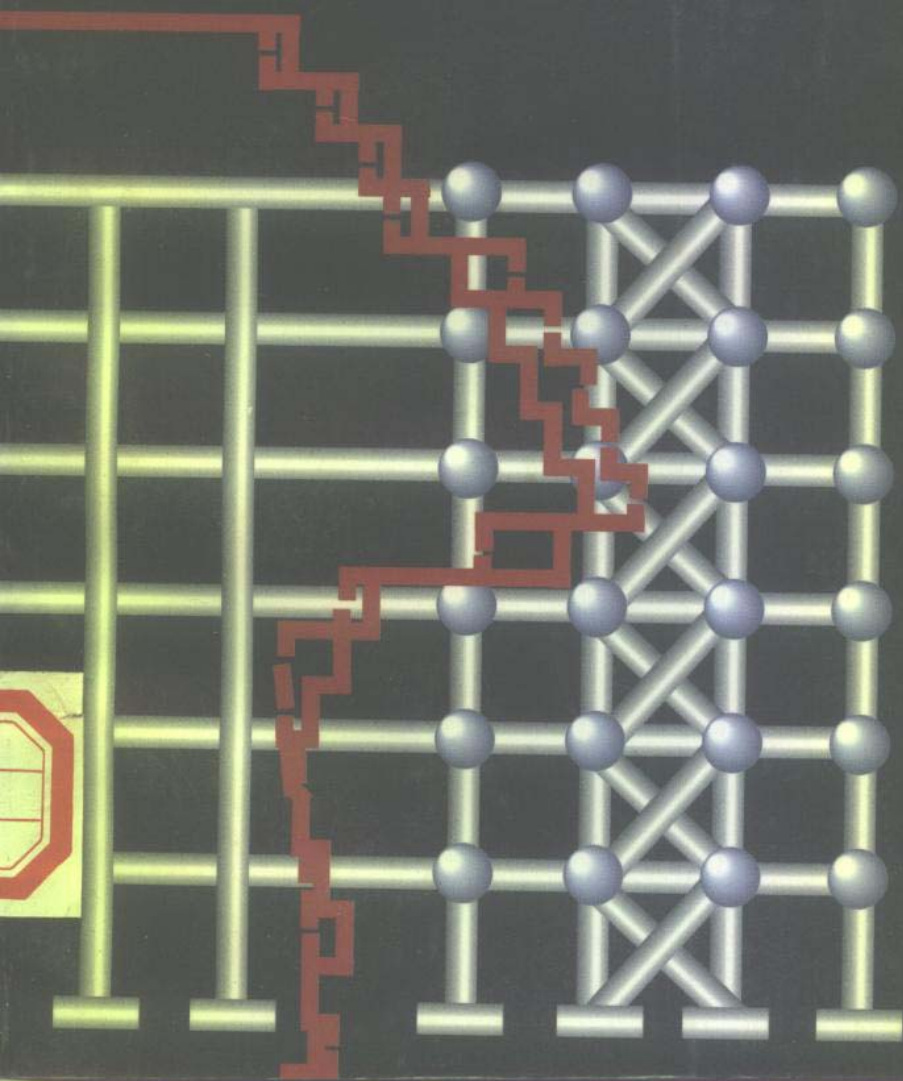


钢结构框架体系弹性及 弹塑性分析与计算理论

李国强 沈祖炎 著



上海科学技术出版社

**钢结构框架体系
弹性及弹塑性分析与计算理论**

李国强
沈祖炎 著

上海科学技术出版社出版、发行
(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所经销 常熟市文化照相制版彩印厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 8 字数 207 000

1998 年 6 月第 1 版 1998 年 6 月第 1 次印刷

印数 1 - 2 000

ISBN7-5323-4498-3/TG·112

定价: 12.30 元

如遇印装质量问题,可直接向承印厂调换

地址:常熟市梅李镇通江路 21 号 邮编:215511

D-26/04

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了钢结构框架体系的弹性及弹塑性分析与计算理论,内容包括:考虑轴力和剪切变形交互影响的梁单元弹性刚度方程、框架梁柱截面屈服面方程与滞回模型、梁单元弹塑性刚度方程、空间柱单元弹性及弹塑性刚度方程、梁柱连接和节点域受力性能及其对框架梁柱刚度的影响、支撑和剪切梁单元弹性及弹塑性刚度方程,平面框架体系的弹性稳定、非线性反应和地震反应分析以及空间框架体系分析模型。本书着眼于工程应用,实用性较强。书中各部分理论均配以相应的计算示例或数例,直观地说明理论的实际运用,并得出一些对实际工程计算与设计有用的结论。本书可供从事钢结构设计、研究和教学的人员参考。

前 言

长期以来,我国钢结构主要用于重型工业厂房与大跨度房盖,多高层建筑几乎全部采用钢筋混凝土结构或砖混结构。1985年上海采用钢框架体系建造14层的金沙江大酒店和深圳采用钢框架—混凝土剪力墙体系建造43层的深圳发展中心大厦,标志着我国多高层民用建筑采用钢结构的开始。目前,我国已建或在建的多高层钢结构民用建筑达26幢,正在设计准备开工的还有多幢。

钢结构框架体系不仅可用于多高层民用建筑结构,还能用于多层工业建筑结构,包括海洋平台结构、电厂锅炉支承结构、煤矿井架结构等。由于钢结构具有重量轻、强度高、延性大、抗震性能好、施工速度快、构件截面小、结构净空和跨度大、综合经济指标好等优点,因此,目前发达国家(如美国、日本、英国等)在多高层建筑中采用钢结构框架体系非常普遍。从我国近几年多高层钢结构建筑的迅速发展可以预见,随着我国经济实力的增强和技术水平的提高,钢结构框架体系必将越来越广泛地应用,成为我国主要的结构体系之一。

与钢筋混凝土框架结构相比,钢结构框架体系有其自身的特点,如:框架梁柱剪切变形与几何非线性的交互作用、梁柱半刚性连接、节点域剪切变形、支撑的屈曲影响、结构的整体稳定等。这些特殊问题在经典的框架结构分析理论均无阐述,而本书则将解决这些问题。

本书以杆系有限元法为基础,全面、系统地介绍了钢结构框架体系的弹性及弹塑性分析与计算理论。全书分十二章,其中第一章为概论,介绍了钢结构框架体系的种类、主要特点、主要分析问题以及分析方法。第二至第八章为单元分析理论,主要介绍了考虑轴

力和剪切变形交互影响的梁单元弹性刚度方程、框架梁柱截面的屈服与滞回模型、平面梁单元和空间柱单元弹塑性刚度方程、梁柱连接变形和节点域剪切变形对框架梁柱刚度的影响以及支撑和剪切梁单元弹性及弹塑性刚度方程。第九至第十二章为结构分析理论,讨论了钢结构框架体系的主要分析问题——弹性稳定、非线性分析和地震反应分析以及一般分析方法和实用分析模型。

本书汇集了作者十余年在钢结构框架体系分析与计算理论方面的研究成果,同时引用了国内外有关的最新资料。全书由李国强教授执笔,陆焯、楼国彪两位研究生帮助绘制了插图。由于作者学识有限,书中不当、错误之处,敬望读者不吝指正。

作 者

1996年11月

目 录

第一章 概论	1
第一节 钢结构框架体系的种类.....	1
第二节 钢框架的梁柱连接形式.....	2
第三节 钢框架的节点域变形.....	3
第四节 钢结构框架体系的主要分析问题和分析方法.....	5
第五节 钢结构框架体系单元种类.....	6
第二章 梁单元的弹性刚度方程	7
第一节 方程的一般形式.....	7
一、受拉梁单元.....	7
二、受压梁单元.....	12
三、方程的级数展开.....	13
第二节 方程的特殊形式.....	15
一、忽略剪切变形的影响.....	15
二、忽略轴力的影响.....	17
三、忽略轴力和剪切变形的影响.....	18
第三节 方程的应用示例.....	18
第三章 框架梁柱截面屈服与滞回模型	22
第一节 单向受弯梁截面的屈服.....	22
第二节 单向受弯柱截面的屈服.....	23
第三节 双向受弯柱截面的屈服.....	26
一、初始屈服面方程.....	26
二、极限屈服面方程.....	26
三、极限屈服面方程的近似表达式.....	32
四、扭矩对屈服面方程的影响.....	33
第四节 滞回模型.....	35

一、反复加载与滞回特性	35
二、梁截面滞回模型	36
三、单向受弯柱截面滞回模型	38
四、双向受弯柱截面滞回模型	39
第五节 梁柱截面受力与变形状态判别	41
第四章 梁单元弹塑性刚度方程	42
第一节 塑性铰理论	43
一、单元一端形成塑性铰情形	43
二、单元两端形成塑性铰情形	46
第二节 Clough 模型	47
第三节 广义 Clough 模型	48
第四节 弹塑性铰模型	50
第五节 弹塑性铰模型与(广义)Clough 模型的对比	55
一、单元仅端 1 屈服情形	55
二、单元两端均屈服情形	56
三、数例	57
第五章 柱单元弹性及弹塑性刚度方程	60
第一节 柱单元的受力与变形	60
第二节 双向受弯柱单元的弹性刚度方程	61
第三节 双向受弯柱单元的弹塑性刚度方程	62
第四节 单向受弯柱单元的弹性及弹塑性刚度方程	63
第五节 方程的试验验证	69
一、试件	69
二、加载装置与测点布置	72
三、加载方案	73
四、试验的理论分析	79
五、分析与实测的对比	79
第六章 节点域和梁柱连接受力性能及其对框架梁柱刚度影响	84
第一节 节点域的受力性能	84

一、节点域的受力及弹性刚度	84
二、节点域剪切变形与剪切力矩的弹塑性关系	87
第二节 节点域剪切变形对框架梁、柱刚度的影响	88
一、连带节点域框架梁单元刚度方程	88
二、连带节点域单向受弯柱单元刚度方程	91
三、连带节点域双向受弯柱单元刚度方程	93
第三节 梁柱连接受力性能	95
一、半刚性连接的约束关系	95
二、半刚性连接的滞回关系	102
第四节 梁柱连接变形对框架梁刚度的影响	104
一、连带连接框架梁单元刚度方程	104
二、连带连接及节点域框架梁单元刚度方程	107
第五节 示例	107
一、节点域对框架侧移的影响	107
二、梁柱连接对框架侧移的影响	113
第七章 支撑单元弹性及弹塑性刚度方程	117
第一节 支撑的受力与滞回特性	117
第二节 支撑弹性及弹塑性刚度的理论分析方法	118
第三节 支撑的滞回模型	125
第四节 支撑的刚度方程	127
第八章 剪切梁及其弹性与弹塑性刚度方程	130
第一节 偏心支撑框架与剪切梁	130
一、偏心支撑框架	130
二、剪切梁的条件	130
第二节 剪切梁的滞回模型	132
第三节 剪切梁的刚度方程	134
第九章 平面框架体系弹性稳定分析	136
第一节 一般分析方法	136
第二节 计算长度法	137
一、框架柱计算长度概念	137

二、计算假定与计算简图	139
三、计算长度计算公式	140
四、计算长度简化计算公式	145
五、计算长度的修正	146
六、剪切变形对计算长度的影响	148
第三节 示例	149
一、侧移刚度约束对框架柱计算长度的影响	149
二、计算长度法示例	151
三、计算长度的修正示例	153
第十章 平面框架体系非线性分析	156
第一节 一般分析方法	157
一、受载分类	157
二、承载力极限状态的判别准则	157
三、分析步骤	159
四、基本单元与基本未知量	159
五、第一类受载的结构分析	160
六、第二类受载的结构分析	161
七、数例	161
第二节 考虑 $P-\Delta$ 效应的近似计算	165
一、近似计算公式	165
二、示例	166
第三节 考虑 $P-\Delta$ 效应的简化计算模型	168
一、简化模型的建立	168
二、数例	171
第十一章 平面框架体系地震反应分析	172
第一节 一般分析方法	172
一、结构的运动微分方程	172
二、结构运动微分方程的求解	174
三、结构的质量、刚度、阻尼矩阵的确定	178
四、算例	180

第二节 半刚架分析模型	181
一、分析假定与半刚架折算规则	182
二、半刚架梁单元刚度方程	184
三、算例	185
第三节 剪弯层分析模型	189
一、模型的等效刚度	190
二、模型的层间剪切屈服参数	193
三、示例	195
第四节 支撑框架结构简化分析模型	198
一、支撑框架的分解与简化	198
二、纯框架的层间刚度矩阵	199
三、纯支撑体系的层间刚度矩阵	200
四、算例	201
第十二章 空间框架体系分析模型	203
第一节 空间杆系模型	203
一、局部坐标转化为整体坐标	204
二、楼面的无限刚性要求	209
三、结构的总体刚度方程及静力凝聚	211
第二节 平面子结构模型	213
一、平面子结构在整体坐标下的刚度方程	213
二、空间框架的总体刚度方程	217
三、算例	218
第三节 综合离散模型	220
一、综合离散法的基本思想	220
二、广义单元分析	223
三、广义结构刚度方程	228
四、结构分析步骤	229
五、数例	230
符号意义	234
参考文献	238

第一章 概 论

第一节 钢结构框架体系的种类

钢结构框架体系在电厂锅炉刚架、矿山采矿井架、近海石油钻井平台以及多、高层民用建筑中有着广泛地应用。根据结构的立面形式,钢结构框架可分为①纯框架(图 1-1)、②中心支撑框架(图 1-2)、③偏心支撑框架(图 1-3)、④框筒(图 1-4)。

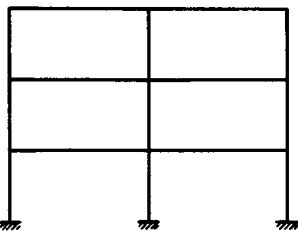


图 1-1 纯框架结构

纯框架结构延性好,但抗侧力刚度较差。中心支撑框架通过支撑提高框架的刚度,但支撑受压会屈曲,支撑屈曲将导致原结构承载力降低。偏心支撑框架可通过偏心梁段剪切屈服限制支撑受压屈曲,从而保证结构具有稳定的承载能力和良好的耗能性能,而结构抗侧力刚度介于纯框架和中心支撑框架之间。框筒实际上是密柱框架结构,由于梁跨小、刚度大,使周围柱近似构成一个整体受弯的薄壁筒体,具有较大的抗侧刚度和承载力,因而框筒结构多用于高层建筑。

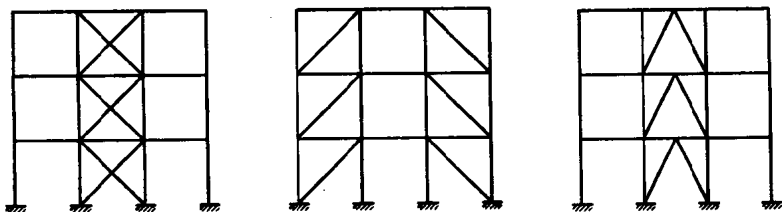


图 1-2 各种中心支撑框架结构

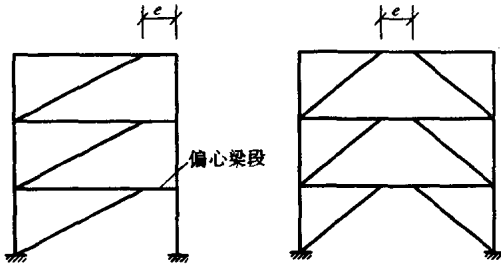


图 1-3 偏心支撑框架结构

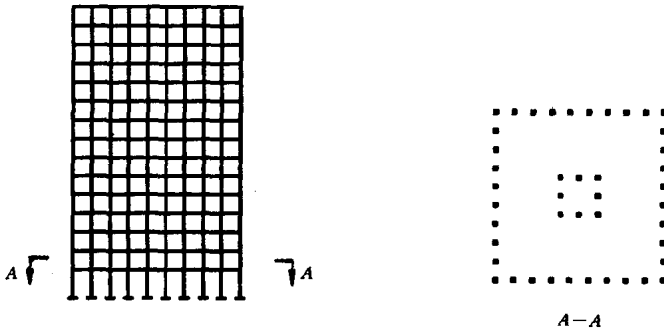


图 1-4 框筒结构

第二节 钢框架的梁柱连接形式

根据受力变形特征,钢框架梁柱连接可分为三类。

(1) 刚性连接 梁柱间无相对转动,连接能承受弯矩(图 1-5a)。

(2) 铰支连接 梁柱间有相对转动,连接不能承受弯矩(图 1-5b)。

(3) 半刚性连接 梁柱间有相对转动,连接能承受弯矩(图 1-5c)。

图 1-6 是钢框架梁柱各类连接的典型构造形式,其中半刚性连接框架是钢结构框架体系所特有的。

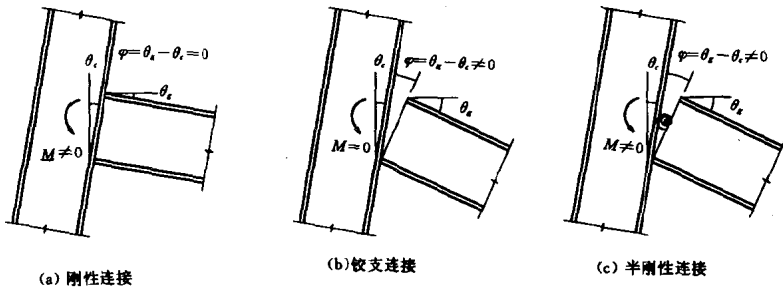


图 1-5 钢框架梁柱连接的受力与变形

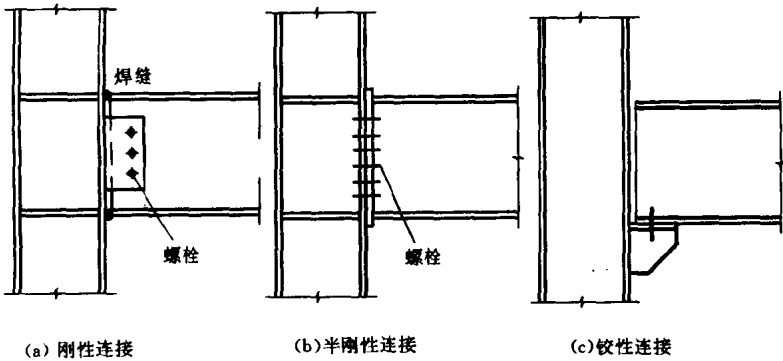


图 1-6 钢框架梁柱连接的典型构造形式

第三节 钢框架的节点域变形

钢框架的节点域是指梁柱结合部分的区域,如图 1-7 所示。在与节点域相邻梁端和柱端反力作用下,节点域可能产生以下几种变形(图 1-8):①伸缩变形;②弯曲变形;③剪切变形。

由于梁的约束,钢框架节点域变形以剪切变形为主,而伸缩变形和弯曲变形很小,可以忽略。图 1-9 是由试验得到的节点域变形情况。

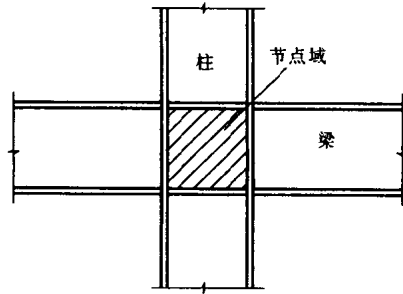


图 1-7 钢框架节点域

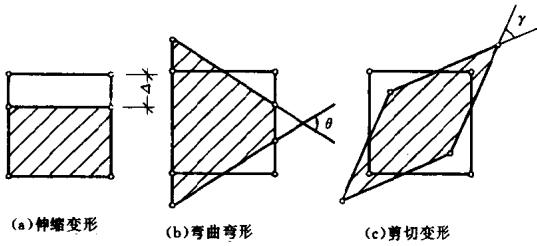


图 1-8 节点域的变形

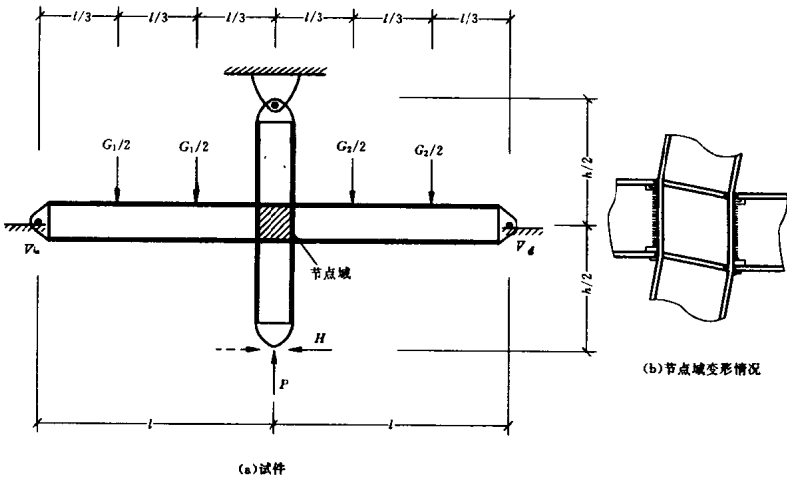


图 1-9 钢框架节点域试验

第四节 钢结构框架体系的主要分析问题和分析方法

从结构设计的需要,钢结构框架体系的主要分析问题有:①各种荷载作用下结构线弹性内力与变形分析;②竖向荷载作用下结构的弹性稳定分析;③结构非线性反应与极限承载力分析;④结构弹性与弹塑性地震反应分析。

其中①是结构常规分析问题,本书将主要介绍后三个问题的分析。

传统的结构分析方法如力法、位移法以及弯矩分配法可用于钢结构框架体系的线弹性分析,然而当框架的规模较大时(层数和跨数较多)或进行结构非线性分析时,传统的结构分析方法已不再适应。随着计算机的发展,基于有限单元思想的结构矩阵分析方法得到了普遍应用,对于钢结构框架体系,可采用杆系有限元方法分析,步骤如下:

(1) 划分单元 一般以整根框架梁、框架柱及支撑为单元。如进行结构弹塑性分析,框架梁的塑性变形可能出现在跨间时,可在发生塑性变形处增设节点而细分单元。如考虑节点域变形对钢框架性能的影响,节点域也需当作独立单元。

(2) 建立单元刚度方程 单元刚度(简称单刚)方程为单元节点位移与单元节点力间的关系。对于杆系单元,单刚方程为杆端变形与杆端力间的关系,这种关系可用矩阵和向量的形式表示: $[k]\{\delta\}=\{f\}$,其中变形向量 $\{\delta\}$ 的系数矩阵 $[k]$ 称为单元刚度矩阵。进行结构线性分析时, $[k]$ 为常数矩阵,进行结构非线性分析时, $[k]$ 与单元的受力状态和变形状态有关。

(3) 建立结构的总体刚度方程 由单元刚度方程,根据单元节点与结构节点的对应关系及结构各节点的力平衡条件,可组装形成结构总体刚度(简称总刚)方程。

(4) 确定结构变形 引入边界条件,求解结构总刚方程,可获得结构各节点的变形。

(5) 确定单元内力 由单元节点与结构节点的对应关系及结构各节点的变形,确定各单元的变形,再由单元刚度方程求得单元节点力向量 $\{f\}$ 。

显然,采用杆系有限元方法进行钢结构框架体系弹性及弹塑性分析的关键步骤是单元刚度方程的建立,而其它分析步骤属有限元方法的通用步骤。

第五节 钢结构框架体系单元种类

为便于钢结构框架体系的分析讨论,本书采用以下单元术语。

(1) 梁单元 指不考虑轴向变形的单向受弯杆单元。一般框架梁主要单向受弯,且所受轴力较小,加上楼板或楼面支撑的作用,其轴向变形很小,可当作梁单元。另结构分析时,如忽略框架柱的轴向变形影响,则平面受力框架柱也可当作梁单元。应该指出,梁单元虽不考虑轴向变形,但可考虑轴力对单元刚度的影响。

(2) 柱单元 指考虑轴向变形的单向受弯杆单元或双向受弯杆单元。一般框架柱当作柱单元。如结构分析时考虑框架梁的轴向变形影响,则框架梁也可当作柱单元。另不发生受压屈曲的支撑(如偏心支撑),亦可当作柱单元。

(3) 支撑单元 指仅考虑轴向变形的二力杆单元。一般框架体系中的支撑主要受轴力,可能发生受压屈曲,可当作支撑单元。

(4) 剪切梁单元 指以剪切变形为主且发生剪切屈服的梁单元。偏心支撑框架结构的偏心梁段需当作剪切梁单元。

(5) 节点域单元 特指仅考虑剪切变形的框架梁柱节点域单元。

第二章 梁单元的弹性刚度方程

第一节 方程的一般形式

梁单元是采用杆系有限单元法进行框架结构分析的基本单元,其弹性刚度方程在很多关于结构分析的论著中均能找到。但常规梁单元的弹性刚度方程很少同时考虑以下两种因素的影响:①单元剪切变形影响;②单元中轴力的影响。

对于钢结构框架体系,以上两种因素影响有可能都不能忽略,需同时考虑。下面以平衡微分方程为基础,建立同时考虑轴力和剪切变形影响的梁单元一般弹性刚度方程。

一、受拉梁单元

梁单元的受力、变形如图 2-1 所示。在弯矩、剪力和轴拉力共同作用下,单元的横向变形 y 包含弯曲变形 y_M 和剪切变形 y_Q 两部分

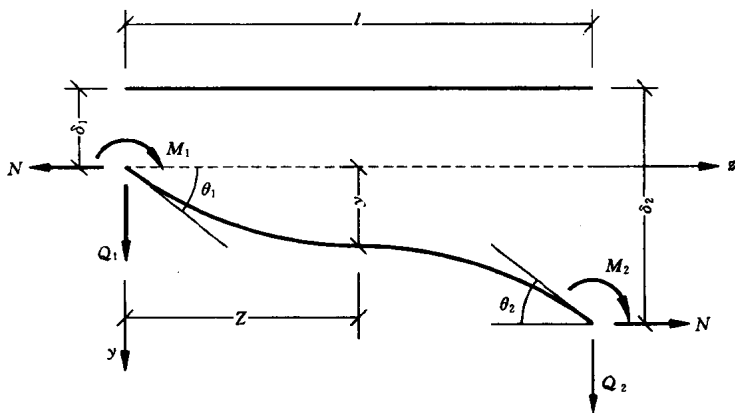


图 2-1 梁单元的受力与变形