

GANGJIEGOU
KUANGJIAOXI

钢
结
构
框
架
体
系

高等分析与
系统可靠度设计

GAODENG FENXI YU
XITONG KEKAODUSHEJI

李国强 刘玉姝 赵欣 著

中国建筑工业出版社

GANGJIEGOU KUANGJIAOXI

钢结构框架体系

高等分析与 系统可靠度设计

GAODENG FENXI YU
XITONG KEKAODU SHEJI

李国强 刘玉姝 赵欣 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构框架体系高等分析与系统可靠度设计/李国强等著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2006

ISBN 7-112-08767-8

I. 钢… II. 李… III. ①钢结构: 框架结构—结构分析

②钢结构: 框架结构—系统可靠性—研究 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 106375 号

本书全面、系统地介绍了钢结构框架体系高等分析与系统可靠度设计的理论与方法, 内容包括: 考虑轴力和剪切变形交互影响的等截面和楔形钢梁单元弹性刚度方程、组合梁弹性刚度方程、框架钢梁柱截面屈服与滞回模型、组合梁截面滞回特性与模型、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、节点域和梁柱连接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、平面框架体系的稳定、非线性分析和地震反应分析、空间框架体系分析模型、结构系统可靠度概念与分析方法、钢结构框架体系系统可靠度评价与系统可靠度设计方法。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、教学的人员参考。

* * *

责任编辑: 赵梦梅

责任设计: 董建平

责任校对: 张景秋 王金珠

钢结构框架体系高等分析与系统可靠度设计

李国强 刘玉姝 赵欣 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京天成排版公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 字数: 481 千字

2006 年 10 月第一版 2006 年 10 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 40.00 元

ISBN 7-112-08767-8

(15431)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

钢结构框架体系不仅可用于多高层民用建筑结构,还能用于单层、多层工业建筑结构。由于钢结构具有重量轻、强度高、延性和抗震性好、施工速度快等优点,钢结构在我国工程建设中的应用越来越广泛。目前,我国单层工业厂房几乎均采用门式钢刚架结构,且越来越多的多层商业建筑、高层办公楼、酒店等采用钢框架体系结构,特别近年我国政府积极推进多高层钢结构住宅的发展,在全国已建有几十幢多高层钢结构框架体系住宅。可以预见,随着我国经济实力的进一步增强和技术水平的不断提高,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。

国内外现行钢结构框架体系设计一般按如下两个步骤进行:①进行结构线弹性分析,确定结构各构件内力;②基于构件极限状态可靠度理论,进行构件极限承载力验算。这种结构设计方法存在以下两方面的不足。首先在结构分析方面,经典框架结构线弹性分析只考虑结构构件弯曲变形、剪切变形和轴向变形影响,对钢结构框架体系的一些特殊影响因素,如框架梁柱节点域剪切变形、梁柱连接变形、支撑屈曲、构件截面变化(楔形构件)等没有考虑,此外,也不考虑结构材料非线性、几何非线性和初始缺陷(残余应力、初始几何变形等)的影响。其次在结构设计验算方面,由于构件达到极限承载力状态时一般处于弹塑性状态,采用结构弹性状态分析所得内力与结构验算所处弹塑性状态的内力必定不一致,因而构件设计的可靠度并不是其真实的可靠度。

为解决现行钢结构框架体系设计存在的问题,国际上提出了结构高等设计(Structural Advanced Design)或结构直接设计(Structural Direct Design)的概念。所谓结构高等设计或直接设计,是以结构高等分析所得结构整体承载能力为基础的设计,而要获得结构的整体承载能力,需进行结构二阶非线性分析(同时考虑几何非线性和材料非线性),并考虑影响结构承载性能的其他重要因素(如结构初始缺陷等),而这种分析则称为结构高等分析(Structural Advanced Analysis)。

近20年,国内外在钢结构框架体系的高等分析方面取得了许多成果,但要将结构高等设计用于实际工程还需解决结构系统可靠度分析与评价问题,因为只有基于结构整体承载极限状态的可靠度(即结构系统可靠度),结构高等设计才具有明确可靠度意义,而在这方面国际上却少有进展。针对这一问题,我近年开展了一些研究工作,取得了一些实质性进展,初步建立了基于系统可靠度的钢结构框架体系高等设计方法,其中我指导的博士生李进军、刘玉姝也做出了较重要的贡献。

十年前,我与我的博士生导师沈祖炎教授(中国工程院院士)在总结我们研究成果的基础上,合作出版了《钢结构框架体系弹性及弹塑性分析与计算理论》一书,这本书实际上是关于钢结构框架体系高等分析方面的内容。最近十年来,我指导研究生又在下列方面取得了研究进展:①楔形构件刚架非线性分析;②组合梁单元弹性刚度、滞回模型和弹塑性刚度;③带初始缺陷梁单元的刚度;④带内部塑性铰梁单元刚度;⑤结构系统可靠度计算与

评价方法；⑥钢结构框架体系系统可靠度设计方法。本书则总结了我们近二十年在钢结构框架体系高等分析与系统可靠度设计方面的研究成果，并引用了部分国内外相关他人成果，汇集成册。

本书以杆系有限元法为基础，较全面、系统地介绍了钢结构框架体系高等分析与系统可靠度设计理论。全书分两篇共十九章，其中第一篇十五章介绍了钢结构框架体系高等分析相关内容，第二篇共四章介绍了钢结构框架体系系统可靠度设计相关内容。本书大纲的拟定和全书的统稿由我负责，其中第三章、第七章第六节、第八章第五节、第十二章第三节由李进军执笔，第四章、第六章、第七章第八节由赵欣执笔，第七章第七节、第九节、第十八章和第十九章由刘玉姝执笔，其余各章节由我执笔。本书的编排由刘玉姝负责，并得到了下列研究生的帮助，他们是胡宝琳、李武波、胡大柱、高辉、陈超政、张杨，我代表全体作者对他们为本书所做的贡献表示衷心地感谢。

由于我们水平和知识范围有限，书中不当与错误之处，敬请读者批评指正。

李国强

2006年7月

符号意义

除文中另有定义外，本书采用的符号的物理或数学意义如下：

一、变量

A	截面面积
A_f	H形或箱形截面翼缘面积
A_w	H形或箱形截面腹板面积
D	位移
D_c	框架柱的侧移刚度(称为 D 值)
E	拉伸弹性模量
F	荷载，作用力
f	作用力
f_y	屈服应力
G	剪切弹性模量
H	结构总高度
H_i	楼层 i 层高
h_c	柱截面高度
h_g	梁截面高度
I	惯性矩
i	杆件线刚度($i = \frac{I}{l}$)
K	刚度
k	刚度，刚度矩阵元素
l	梁、柱、支撑长度
M	弯矩，力矩
M_p	极限屈服弯矩(塑性弯矩)
M_{pN}	考虑轴力影响的极限屈服弯矩
M_s	初始屈服弯矩
M_{sN}	考虑轴力影响的初始屈服弯矩
M_y	剪切力矩
M_{yp}	剪切屈服力矩
N	轴力(受拉为正，受压为负)
N_{cy}	轴压屈曲荷载
N_E	Euler(欧拉)临界力

N_p	轴压屈服荷载
P	荷载
Q	剪力
q	均布荷载/强化系数
q_0	三角形荷载的幅值
R	恢复力参数
t	时刻, 时间
t_f	H 形或箱形截面翼缘厚
t_p	节点域板厚
t_w	H 形或箱形截面腹板厚
u	楼层水平位移
u_g	水平地面运动
V	楼层剪力
W	截面抵抗矩
w	节点竖向位移
y	杆件挠曲变形
Γ	屈服函数
γ	剪应变, 节点域剪切变形
δ	位移
Δ	框架层间位移
η	计算长度系数
θ	转角
λ	杆件长细比
μ	截面剪切形状系数
μ_p	失效概率的均值
ζ	阻尼比
σ	正应力
σ_s	屈服应力
σ_p	失效概率的方差
ε	正应变
ε_y	屈服应变
τ	剪应力
τ_s	剪切屈服应力
φ	梁柱连接转角(梁柱间相对转角)
Φ	曲率参数($\Phi = \left \frac{\phi}{\phi_p} \right $)
ϕ	曲率
ϕ_p	与 M_p 相应的弹性曲率($\phi_p = \left \frac{M_p}{EI} \right $)

ϕ_{pN}	与 M_{pN} 相应的弹性曲率 $\left(\phi_{pN} = \left \frac{M_{pN}}{EI} \right \right)$
$\{\phi\}$	振型向量
χ_p	截面塑性形状系数
ω	圆频率
ρ_σ	材料屈服强度的相关性系数
ρ_w	构件弹性抵抗矩的相关性系数

二、上标

T	向量转置，矩阵转置
---	-----------

三、下标

b	支撑
c	柱
e	弹性
G	几何非线性
g	梁
H	水平向
k	楼层序数
o	楼层参考点
p	塑性，弹塑性，极限屈服
s	屈服，初始屈服
t	受拉
u	卸载
u, v, w	坐标轴(整体)
x, y, z	坐标轴(局部)
γ	节点域
1, 2	单元两端(不带节点域)
i, j	单元两端(连带节点域)

四、算子

d	微分，增量
Δ	增量
Σ	求和

目 录

第一篇 钢结构框架体系高等分析

第一章 概论	1
第一节 钢结构框架体系的种类	1
第二节 钢结构框架构件形式	3
第三节 钢框架的梁柱连接形式	4
第四节 钢框架的节点域变形	5
第五节 钢结构框架体系的主要分析问题和分析方法	6
第六节 钢结构框架体系单元种类	7
参考文献	7
第二章 等截面梁单元弹性刚度方程	9
第一节 方程的一般形式	9
一、受拉梁单元	9
二、受压梁单元	12
三、方程的级数展开	13
四、带初始几何缺陷的梁单元	14
第二节 方程的特殊形式	16
一、忽略剪切变形的影响	16
二、忽略轴力的影响	18
三、忽略轴力和剪切变形的影响	19
第三节 方程的应用示例	19
一、排架	19
二、简支梁	21
参考文献	22
第三章 楔形梁单元弹性刚度方程	23
第一节 引言	23
第二节 Timoshenko-Euler 楔形梁单元	24
一、平衡微分方程	24
二、刚度方程	25
第三节 数例验证	27
一、刚度矩阵对称性验证	27
二、静力挠度验证	27
三、弹性临界力验证	28

四、自由振动频率验证	28
五、多项式项数的影响	29
六、结构算例	29
第四节 小结	30
参考文献	30
附录 A	32
附录 B	33
第四章 组合梁单元弹性刚度方程	34
第一节 组合梁的受力特点与分类	34
第二节 共同作用效应对组合梁弹性抗弯刚度的影响	35
一、无共同作用时组合梁抗弯刚度	35
二、完全共同作用组合梁抗弯刚度	36
三、部分共同作用组合梁抗弯刚度	37
第三节 钢—混凝土组合梁单元弹性刚度方程	38
一、基本假定	38
二、部分共同作用组合梁平衡微分方程的建立	39
三、组合梁单元刚度方程	40
四、等效节点荷载	44
第四节 算例分析	46
第五节 待进一步研究的问题	47
参考文献	48
第五章 框架钢梁柱截面屈服与滞回模型	50
第一节 单向受弯梁截面的屈服	50
第二节 单向受弯柱截面的屈服	51
第三节 双向受弯柱截面的屈服	52
一、初始屈服面方程	52
二、极限屈服面方程	53
三、极限屈服面方程的近似表达式	56
四、扭矩对屈服面方程的影响	57
第四节 滞回模型	59
一、反复加载与滞回特性	59
二、梁截面滞回模型	59
三、单向受弯柱截面滞回模型	61
四、双向受弯柱截面滞回模型	61
第五节 梁柱截面受力与变形状态判别	62
参考文献	62
第六章 组合梁截面滞回特性与模型	64
第一节 往复荷载下钢材和混凝土的本构关系模型	64
一、钢材应力-应变关系滞回模型	64
二、混凝土应力-应变关系滞回模型	65

第二节 弯矩-曲率滞回曲线计算	67
一、计算假定	67
二、截面划分	68
三、截面弯矩-曲率关系的计算	68
第三节 弯矩-曲率滞回特性	70
一、组合梁弯矩-曲率滞回曲线特征	70
二、组合梁弯矩-曲率滞回曲线的典型阶段	71
第四节 弯矩-曲率滞回关系影响因素	71
一、混凝土翼板厚度(h_c)	72
二、混凝土翼板宽度(B_c)	73
三、钢梁梁高(h_s)	74
四、截面材料总强度比(γ)	74
五、钢材屈服极限(f_y)	76
六、混凝土抗压强度(f_{ck})	76
七、小结	78
第五节 弯矩-曲率滞回模型	79
一、骨架线模型	79
二、滞回规则	81
参考文献	83
第七章 梁单元弹塑性刚度方程	85
第一节 塑性铰理论	85
一、单元一端形成塑性铰情形	86
二、单元两端形成塑性铰情形	88
第二节 Clough 模型	89
第三节 广义 Clough 模型	90
第四节 弹塑性铰模型	90
第五节 弹塑性铰模型与(广义)Clough 模型的对比	94
一、单元仅端 1 屈服情形	94
二、单元两端均屈服情形	95
三、数例	96
第六节 残余应力的影响与楔形梁单元的处理	97
一、残余应力对塑性沿截面扩展的影响	97
二、残余应力对塑性沿杆长方向扩展的影响	98
三、楔形梁单元的处理	99
第七节 带有内部塑性铰的梁单元	99
第八节 组合梁分段变刚度模型	101
一、组合梁分段变刚度模型	101
二、分段梁单元刚度方程	103
第九节 应用示例	106
一、等截面门式钢刚架	106

二、变截面门式钢刚架	107
三、Vogel 门式钢刚架	108
四、Vogel 六层钢框架	109
五、跨中有集中荷载的单层刚架	111
六、梁上有均布荷载的单层刚架	111
七、跨中有集中荷载的四层钢框架	112
八、两跨三层组合梁钢框架	112
参考文献	114
第八章 柱单元弹性及弹塑性刚度方程	116
第一节 柱单元的受力与变形	116
第二节 双向受弯柱单元的弹性刚度方程	116
第三节 双向受弯柱单元的弹塑性刚度方程	118
第四节 单向受弯柱单元的弹性及弹塑性刚度方程	121
第五节 楔形柱单元的轴向刚度	122
一、弹性刚度	122
二、弹塑性刚度	123
第六节 试验验证	123
一、试件	123
二、加载装置与测点布置	126
三、加载方案	127
四、试验的理论分析	130
五、分析与实测的对比	131
参考文献	132
第九章 节点域和梁柱连接受力性能及其对框架梁柱刚度影响	133
第一节 节点域的受力性能	133
一、节点域的受力及弹性刚度	133
二、节点域剪切变形与剪切力矩的弹塑性关系	135
第二节 节点域剪切变形对框架梁、柱刚度的影响	135
一、连带节点域框架梁单元刚度方程	136
二、连带节点域单向受弯柱单元刚度方程	138
三、连带节点域双向受弯柱单元刚度方程	139
第三节 梁柱连接受力性能	140
一、半刚性连接的约束关系	141
二、半刚性连接的滞回关系	145
第四节 梁柱连接变形对框架梁刚度的影响	147
一、连带连接框架梁单元刚度方程	147
二、连带连接及节点域框架梁单元刚度方程	148
第五节 示例	149
一、节点域对框架侧移的影响	149
二、梁柱连接对框架侧移的影响	153

参考文献	155
第十章 支撑单元弹性及弹塑性刚度方程	156
第一节 普通支撑的受力与滞回特性	156
第二节 普通支撑弹性及弹塑性刚度的理论分析方法	157
第三节 普通支撑的滞回模型	161
第四节 防屈曲支撑滞回特性与滞回模型	163
第五节 支撑的刚度方程	164
参考文献	165
第十一章 剪切梁及其弹性与弹塑性刚度方程	167
第一节 偏心支撑框架与剪切梁	167
一、偏心支撑框架	167
二、剪切梁的条件	167
第二节 剪切梁的滞回模型	168
第三节 剪切梁的刚度方程	170
参考文献	171
第十二章 平面框架体系弹性稳定分析	172
第一节 一般分析方法	172
第二节 等截面框架柱计算长度	173
一、框架柱计算长度概念	173
二、计算假定与计算简图	174
三、计算长度计算公式	175
四、计算长度简化计算公式	179
五、计算长度的修正	179
六、剪切变形对计算长度的影响	181
七、计算示例	182
第三节 变截面框架柱计算长度	186
一、不同边界条件下的楔形压杆	186
二、门式钢刚架楔形柱	188
参考文献	191
第十三章 平面框架体系非线性分析	193
第一节 一般分析方法	193
一、受载分类	193
二、承载力极限状态的判别准则	194
三、分析步骤	195
四、基本单元与基本未知量	195
五、第一类受载的结构分析	195
六、第二类受载的结构分析	196
七、数例	196
第二节 考虑 $P-\Delta$ 效应的近似计算	198
一、近似计算公式	198

二、示例	200
第三节 考虑 $P-\Delta$ 效应的简化计算模型	200
一、简化模型的建立	200
二、数例	202
参考文献	203
第十四章 平面框架体系地震反应分析	204
第一节 一般分析方法	204
一、结构的运动微分方程	204
二、结构运动微分方程的求解	205
三、结构的质量、刚度、阻尼矩阵的确定	208
四、算例	209
第二节 半刚架分析模型	210
一、分析假定与半刚架折算规则	210
二、半刚架梁单元刚度方程	212
三、算例	213
第三节 剪弯层分析模型	215
一、模型的等效刚度	215
二、模型的层间剪切屈服参数	217
三、示例	218
第四节 支撑框架结构简化分析模型	221
一、支撑框架的分解与简化	221
二、纯框架的层间刚度矩阵	222
三、纯支撑体系的层间刚度矩阵	222
四、算例	223
参考文献	223
第十五章 空间框架体系分析模型	224
第一节 空间杆系模型	224
一、局部坐标转化为整体坐标	224
二、楼面的无限刚性要求	227
三、结构的总体刚度方程及静力凝聚	229
第二节 平面子结构模型	230
一、平面子结构在整体坐标下的刚度方程	230
二、空间框架的总体刚度方程	233
三、算例	233
第三节 综合离散模型	234
一、综合离散法的基本思想	234
二、广义单元分析	236
三、广义结构刚度方程	239
四、结构分析步骤	240
五、算例	241

参考文献	243
------------	-----

第二篇 钢结构框架体系系统可靠度设计

第十六章 结构设计方法概论	244
---------------------	-----

第一节 确定性方法	244
-----------------	-----

一、容许应力设计法(Allowable Stress Design, 简称 ASD)	244
--	-----

二、塑性设计法(Plastic Design, 简称 PD)	245
--------------------------------------	-----

第二节 结构构件可靠度设计法	245
----------------------	-----

第三节 结构系统可靠度设计法	247
----------------------	-----

参考文献	248
------------	-----

第十七章 结构系统可靠度计算	250
----------------------	-----

第一节 结构可靠度基本概念	250
---------------------	-----

一、结构的功能要求	250
-----------------	-----

二、结构的功能函数	250
-----------------	-----

三、结构极限状态	251
----------------	-----

四、结构可靠度	251
---------------	-----

五、可靠指标	252
--------------	-----

第二节 结构可靠度分析的实用方法	254
------------------------	-----

一、中心点法	254
--------------	-----

二、验算点法	259
--------------	-----

第三节 随机变量间的相关性对结构可靠度的影响	261
------------------------------	-----

第四节 结构系统可靠度概念与上下界	262
-------------------------	-----

一、基本概念	262
--------------	-----

二、结构系统可靠度的上下界	264
---------------------	-----

第五节 结构系统可靠度计算的随机抽样半解析法	265
------------------------------	-----

一、方法的原理	265
---------------	-----

二、随机抽样	266
--------------	-----

三、计算近似概率密度函数的指数多项式法	268
---------------------------	-----

第六节 示例	269
--------------	-----

一、钢梁截面的受弯弹性极限承载可靠度	269
--------------------------	-----

二、门式钢刚架的极限承载可靠度	272
-----------------------	-----

参考文献	274
------------	-----

第十八章 钢结构框架体系系统可靠度评价	276
---------------------------	-----

第一节 钢结构框架体系结构抗力的随机性	276
---------------------------	-----

第二节 荷载的随机性	278
------------------	-----

第三节 典型钢结构框架体系系统可靠度评价	279
----------------------------	-----

一、随机变量相关性的影响	279
--------------------	-----

二、在竖向荷载作用下结构的系统可靠度评价	280
----------------------------	-----

三、在水平和竖向荷载作用下结构的可靠度计算	282
-----------------------------	-----

第四节 结构系统可靠度评价对比	283
-----------------------	-----

参考文献 284

第十九章 钢结构框架体系系统可靠度设计方法 286

 第一节 基于系统可靠度的结构设计 286

 一、目标可靠度指标 286

 二、荷载和荷载组合 287

 三、实用设计公式 287

 第二节 随机变量相关性对分项系数的影响 292

 第三节 结构系统可靠度设计与其他设计方法的比较 294

 一、门式钢刚架结构 294

 二、多层钢框架结构 297

参考文献 301

第一篇 钢结构框架体系高等分析

第一章 概 论

第一节 钢结构框架体系的种类

钢结构框架体系在单层厂房门式刚架(图 1-1a)、电厂锅炉刚架(图 1-1b)、矿山采矿井架(图 1-1c)、近海石油钻井平台(图 1-1d)以及多、高层民用建筑(图 1-1e)中有着广泛的应用。根据结构的立面形式,钢结构框架可分为:①纯框架(图 1-2)、②中心支撑框架(图 1-3)、③偏心支撑框架(图 1-4)、④框筒(图 1-5)。

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。为克服支撑屈服对结构承载力特别是抗震的不利影响,中心支撑框架可采用防屈曲支撑。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。

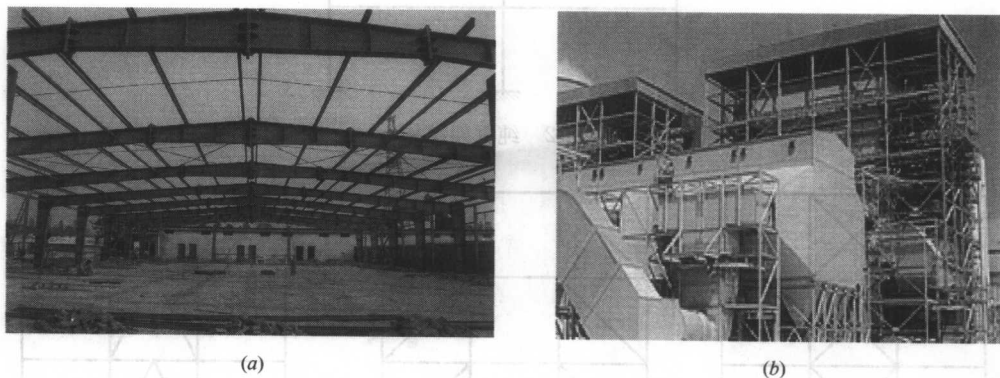


图 1-1 钢结构框架体系在工程中的应用(一)

(a)门式刚架;(b)锅炉刚架