

WANGJIA WANGQIAO SHEJI YU SHIGONG

网架网壳 设计与施工

丁芸孙 刘罗静 朱洪符 胡 浩 编著

中国建筑工业出版社

网架网壳设计与施工

丁芸孙 刘罗静 朱洪符 胡浩 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

网架网壳设计与施工/丁芸孙, 刘罗静, 朱洪符, 胡浩
编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006
ISBN 7-112-08137-8

I. 网... II. ①丁...②刘...③朱...④胡...
III. ①网架结构-结构设计②网架结构-工程施工③钢结构-结构设计④钢结构-工程施工 IV. TU356②TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 022414 号

本书根据编者几十年的实践经验, 涉及网(壳)架和钢结构中的大部分内容, 在吸收消化基本理论的基础上, 对工程中的各种问题的产生, 不同的解决方案及方法进行阐述。便于钢结构的技术人员参考。

本书着重介绍的是工程技术人员工作过程中遇到的实际技术问题及所需要的知识, 不重于公式推导, 而重于概念清楚; 如对有关规范规定的来龙去脉, 问题的争议所在和不同观点的正确理解和处理办法。并对规范及科研成果中有关学术性专用术语及理念用编者实践中体会的概念与原则摘其精华, 试图用通俗语言加以诠释。对规范中未提及、不明确、欠合理、不协调的部分根据编者工程经验探索提出灵活处理的意见。

本书可供钢结构设计、制作、安装等技术人员使用。

* * *

责任编辑: 赵梦梅

责任设计: 赵明霞

责任校对: 张树梅 王雪竹

网架网壳设计与施工

丁芸孙 刘罗静 朱洪符 胡浩 编著

*

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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 33¼ 字数: 806 千字

2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月第一次印刷

印数: 1—3500 册 定价: 55.00 元

ISBN 7-112-08137-8
(14091)

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>

作者简介

丁芸孙 1929年8月生，浙江湖州人，1951年毕业于上海交通大学土木系。现任中国航空工业规划设计研究院顾问总结构师，中国金属结构协会钢结构委员会资深专家，空间结构委员会委员，国际薄壳及空间结构协会会员。

曾设计多边形层架获全国科学大会奖。曾主持参与设计近千座钢结构工程，其中有的工程是国内跨度最大及较先进的结构。空军36厂1号机库40m网架是国内第一个设计与试验研究的螺栓球网架，为全国推广螺栓球创造了条件，获得航空部科技二等奖，全国优秀设计金质奖。北京东城少年宫球壳、中原化肥厂58m跨筒壳、深圳体育场环形看台、珠海体育场88m球壳，均是国内当时最先和最大的网（壳）架结构。厦门太古飞机库五座155m及157m拱和预应力拉杆网架的杂交结构，获航天部科技进步二等奖，全国优秀结构设计一等奖，全国优秀设计银质奖。打入国际市场的有阿拉伯联合酋长国阿布扎比游泳馆、保龄馆，约旦哈桑体育场等十几个工程，并培养硕士研究生多名。因设计有突出贡献而享受国务院颁发政府特殊津贴。

朱洪符 高级工程师，原任徐州通域集团公司副总工程师（总工艺师）主持矿山设备制造工艺工作。20世纪90年代初起，转轨主持钢结构、钢网架制作、安装施工和检验工作，坚持学习，为企业钢结构发展不懈努力。例如，与同济大学教授钱若军一道，开发研究网架大力节点结构试验成功，开发研究大型膜结构用索的结构与张拉工艺，取得实用成果。

1996年，参加上海市标准《网架结构技术规范》（DBJ 08-59-96）制定工作，以第九名起草人获得上海市科技进步一等奖；2000年，参加上海市工程建设规范《网架与网架工程质量检验及评定标准》（DGJ 08-89-2000）制定，为第四主要起草人。

1997年，参加国家标准《钢结构螺栓球节点用高强螺栓》制定。

2000年，由徐州市建设机械金属结构协会策划，主编出版《轻钢结构及网架制作、安装、涂装技术规程》一书，获得徐州市钢结构行业企业好评。

胡浩 1968年12月出生，江苏徐州人，大专学历，工程师。1990年7月毕业于南京机械高等专科学校机械工程系焊接结构设计与工艺设备专业，同年8月分配到徐州矿山设备制造厂（现徐州通域空间结构有限公司）从事技术工作。任副总工程师、研究所所长。任职期间主要从事网架和钢结构的工艺研究与设计；轻钢结构工程的结构设计；新产品的市场调研与开发。

序

近年来钢结构得到前所未有的发展,相对的人才缺乏和建设速度的矛盾越来越突出,如何提高钢结构人才的技术水平与经验是当前迫切要解决的问题。《网架(壳)及钢结构设计与施工》一书出版是编著者们将他们几十年的经验介绍给钢结构工程技术人员,希望在提高人才素质上能起一些作用。

目前钢结构方面科技书籍不少,但本书由第一线从事钢结构几十年经验的设计与施工单位工程师撰写,将他们的实践经验独立写出专著,还是为数不多的。

本书的特点是:

1. 本书内容来自实践。网架(壳)与钢结构工程实际遇到的问题比较多的包含在内,而这些问题关起门来是想不出来的,只有实践中才能提供,因此本书内容是非常有益的。

2. 本书将实践中出现的问题,结合编著者们的实践经验,并吸收了专家教授的论著,取其精华,加以消化,通俗地介绍了问题的由来,不同观点讨论的焦点,问题的解决,且论述其概念,尤其对规范的理解及灵活应用,提供了宝贵的经验。本书也提供了专家教授的论述线索,解决了有问题找资料的困难。

3. 本书介绍的范围也比较广,从设计到施工,从结构计算、构造到吊车节点、防腐防火,除了高层、重型厂房钢结构、张拉索膜结构等外,网架、网壳、门式刚架、多层框架等多数钢结构都包络在内,便于出差在外,缺乏参考之苦。

4. 本书不限于钢结构专业,其他交叉学科如地震、风荷、吊车甚至门架、地基等基本知识及一些基本数据均作了介绍,免得到处翻找,尤其对非结构专业改行从事搞钢结构科技人员更有参考作用。

我了解编著者丁芸孙研究员,他是我国最早从事设计、研究、推广空间钢结构的著名专家之一,设计了厦门机场太古飞机库等多座大跨度空间钢结构工程。他钻研好学,几十年来所遇到技术问题从不放过,要弄懂为止,向一切有经验的人请教,因此积累了非常丰富的经验。朱洪符高级工程师是一位工厂企业的副总工程师,长期在生产第一线工作,有丰富的实践经验。相信本书的出版,对网架、网壳、钢结构的设计、施工和推广应用会起到积极的促进作用。

董石麟

2005年11月于杭州浙江大学

前 言

编著者 1975 年即从事网（壳）架及钢结构工程实践，30 年来主持及参与的工程近千座，多次参加“网（壳）架技术交流培训班”介绍网（壳）架的实践经验，并参与了“门式刚架”及“网架高强螺栓国家标准”、“网架质量检验标准”的编制，在此基础上编写此书。

本书设计部分考虑现有网（壳）架及钢结构教科书、参考书甚多，而参阅本书的多为具备一定基础知识和经验的设计、施工、监理、业主代表等专业技术人员，因此不再重述基本知识。而网（壳）架的计算有限元及程序均有专文参考，本文也不赘述。

本书着重介绍的是工程技术人员工作过程中遇到的实际技术问题及所需要的知识，不重于公式推导，而重于概念清楚，如对有关规范的来龙去脉，问题的争议和不同观点的正确理解和处理办法。并对规范及科研成果中有关学术性专用术语及理念用编者实践中体会的概念与原则摘其精华，试图用通俗语言加以诠释，没有多少理论创新，实为读书笔记。对规范中未提及、不明确、欠合理、不协调的部分根据编者工程经验探索提出灵活处理的意见，对于个别执行有一定困难的规范“黑体字”提出预警及迂回的办法。

由于网（壳）架及钢结构设计涉及知识面广，交叉学科多，不少非结构专业也从事本行业，因此本书将介绍荷载、可靠度、钢材性能、焊接、预埋件、抗震、吊车节点轨道及配套工程，如屋面、涂层防火等问题的基本概念与知识，并附一些不易找到的必要数据与公式，以求本书内容与必要的常用规范及手册结合，争取满足日常所需，以便随手可查。本书尽量列出出处，如深入研究，可找出参考文献。

本书制作安装部分也与设计部分一样，着重在工程实践。本书除介绍施工、制作、安装外，将介绍市场、调研、信息、建厂的设备配置、加工模夹具、标书、合同竞标及验收资料等内容。对老企业改进，新企业介入可少走弯路。

书中难免有引用专家教授著作中某些内容未能详细说明出处，敬请原谅。

本书设计部分编写中参考摘录了很多专家教授的专著及论文并请教有关问题，特别是王国周、陈绍藩、蓝天、董石麟、尹德钰、刘锡良、沈士钊、曹资、陆锡麟、陈继祖、沈祖炎、李少甫、徐国彬、严慧、张毅刚、柴昶、邵卓民、蔡益燕、陈扬骥、牟在根、周文瑛、陈昕、郭彦林、石永久、罗尧治、陈志华、甘明、舒兴平、郝际平、刘锡霖、罗永佳、蔡克、赵希平、付克祥等专家教授的指教一并致谢。

在设计部分，由于编者工程经验局限，不可能包括方方面面，如重型吊车厂房、高层钢结构、张拉索膜等内容未涉及，由于编者水平有限，错误之处难免，敬请指正。

本书的出版还承蒙中国金属结构协会杜宗翰会长，钢结构委员会张爱兰主任，顾文婕副主任，董石麟院士，徐州金属结构协会郭兴堂秘书长，徐州通域集团刘宪生总经理等领

导支持，深表感谢。

本书编印得到毛静、康留琛、丁静协助，以表感谢。

设计部分由丁芸孙、刘罗静编写；

施工部分由朱洪符、胡浩（徐州通域空间结构公司）编写。

目 录

设计篇	丁芸孙 刘罗静 编著
第 1 章 网(壳)架及钢结构确保安全性的重要性	3
1.1 钢结构的可靠度分析说明采用多次超静定的网(壳)架结构是确保安全的 重要措施	3
1.2 吃透规范来龙去脉, 正确灵活的理解与处理设计施工中问题是安全使用、 经济合理的重要保证	9
第 2 章 网(壳)架的形式	12
2.1 网(壳)架的外形处理	12
2.2 网(壳)架的几何不变性分析	15
2.3 网壳的形式简述	16
第 3 章 网(壳)架及钢结构设计计算	23
3.1 荷载与作用	23
3.2 计算方法简述	41
3.3 稳定	43
3.4 网(壳)架支座假定与支座设计	62
3.5 温度应力与支座不均匀沉陷	86
3.6 抗震设计简述	90
3.7 吊车疲劳与悬挂吊车的轨道节点	101
第 4 章 支撑系统	122
4.1 支撑的传力路线	122
4.2 屋盖水平支撑	122
4.3 柱间支撑	122
4.4 杆件的计算长度和允许细长比	126
4.5 减少轴压杆件自由度的支撑	130
4.6 支撑的节点构造	131
第 5 章 杆件与节点的设计	134
5.1 钢材、杆件设计	134
5.2 焊接	152
5.3 焊接空心球节点	165
5.4 螺栓球节点	178
5.5 高强螺栓板节点和螺栓连接	192

5.6	钢管相贯节点（直接焊接）圆、矩形（方）钢管	203
5.7	铸钢节点	257
5.8	混合节点	259
5.9	组合网（壳）架	262
第6章	验收标准、加固处理及试验，预警	264
6.1	挠度验收	264
6.2	施工安装验算	265
6.3	杆件旁弯，试验和加固处理	266
6.4	预警	271
第7章	大跨度钢结构	273
7.1	大跨度飞机库的设计	273
7.2	大型仓库、大型公用建筑会展中心、体育场馆设计	295
7.3	预应力钢结构	306
第8章	门式刚架与多层框架	315
8.1	门架及多层框架设计	315
8.2	门架和多层框架节点	322
8.3	门架及多层框架的构造	332
8.4	楼面设计	336
第9章	围护结构	338
9.1	围护结构的发展	338
9.2	压型钢板	338
9.3	彩色钢板的防水	341
9.4	压型钢板的承载力	345
9.5	屋面的保温隔热与采光	347
9.6	屋面蒙皮效应	348
9.7	檩条在向上风吸力下的下翼缘受压失稳	349
第10章	不锈钢及铝合金网（壳）架	357
10.1	不锈钢网（壳）架	357
10.2	铝合金网（壳）架	359
第11章	钢结构的防腐保护和防火	364
11.1	油漆涂层	364
11.2	镀层	365
11.3	钢结构的防火设计和防火涂层	366
第12章	钢结构设计概念与合理选型	374
施工篇	 朱洪符 胡浩 编著	
第13章	网架结构（零件、部件、构件）制作	381
13.1	螺栓球节点网架 螺栓球	381
13.2	螺栓球节点网架 杆件（组合）	387

13.3	螺栓球节点网架 支座	403
13.4	螺栓球节点网架 支托	407
13.5	螺栓球节点网架 高强度螺栓	408
13.6	螺栓球节点网架 六角套（套筒、无纹螺母）	410
13.7	焊接球节点网架 焊接空心球	411
第 14 章	网架结构材料表面保护（涂装）	414
14.1	材料表面保护（涂装）方法的选择	414
14.2	涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级	419
14.3	涂装施工	421
第 15 章	网架结构安装	423
15.1	安装方法选择	423
15.2	网架安装	433
15.3	脚手架的搭设与验收	441
15.4	网架施工、安装检验和试验、整体交工验收工作程序	457
第 16 章	钢结构制作	463
16.1	下料	464
16.2	调平、矫正	468
16.3	边缘加工	470
16.4	制孔	471
16.5	焊接结构件组装	473
16.6	焊接结构件焊接	477
16.7	手工电弧焊	479
16.8	二氧化碳（CO ₂ ）气体保护焊	481
16.9	埋弧自动焊	484
16.10	钢结构件连接和固定接头处理	491
第 17 章	轻型房屋钢结构安装	494
第 18 章	网架结构产品设计（开发）控制管理	502
18.1	设计（开发）控制程序	502
18.2	设计（开发）输入及其评审内容	508
18.3	设计（开发）输出规定	510
18.4	设计（开发）输出标识和追溯性规定	511
18.5	设计（开发）验证内容	512
18.6	设计（开发）制图规则	514
第 19 章	网架结构产品营销管理	517
附录 A		519

设计篇

丁芸孙 刘罗静 编著

第 1 章 网（壳）架及钢结构确保安全性的重要性

1.1 钢结构的可靠度分析说明采用多次超静定的网（壳）架结构是确保安全性的重要措施

1.1.1 网（壳）架及钢结构可靠度的重要性

(1) 网（壳）架及钢结构一般跨度较大，而且多为公用建筑、重要建筑，下面人员众多，设备贵重，结构在头顶上，人命关天不像机械设备坏了不危及人命。

(2) 结构在高空，出了问题极难加固不像机械设备坏了可修理。

(3) 由于结构可靠性的重要，因此业主非常重视设计施工如何保证质量安全。如果出了事将涉及设计施工的根本信誉，信誉全失，摔了跤就爬不起来。

1.1.2 钢结构可靠度的表达

可靠度有三个水准。

第一水准是定值法。定值法即是凭经验给一个定值的安全度即 K 。最早的定值法是允许应力表达 $[\sigma] = \frac{\sigma_t}{K}$ ，即从试验得到材料强度，然后除以凭经验的 K 得到允许应力，一般 $K = 1.4 \sim 1.7$ 。允许应力法对于受弯构件等应力分布不均匀情况，设计则较保守，超载，变异性等同看待不合理，安全系数往往决定于安全度最小构件，因此探索用极限荷载法（最大荷载）。^[4]

破损阶段即从试验得到破坏值然后以破坏荷载除以 K 得到允许的承载力即标准荷载。因此安全度反映在荷载上，而钢结构由于照顾原有习惯一直沿用允许应力法。

第二水准是半概率法即半理论半概率法。

由于第一水准 K 完全根据经验定，既笼统又不科学。随着统计学的发展，前苏联提出三系数法使安全度前进了一大步，即荷载系数、匀质系数和工作条件系数也就是界限状态设计，即荷载超载达到最大可能的荷载，材料强度考虑匀质达到最坏可能的低强度、而工作条件系数又反映了工程重要性，计算假定不符合实际程度等不利因素，在各方面假定最不利情况下称为极限状态。极限状态分两类：一类为承载能力极限状态，结构杆件接头强度破坏、倾覆、转为机动体系、失稳等；另一类是丧失使用极限如外观变形、局部损坏（包括裂纹）、振动或其他影响使用。现在重点介绍的是一类中强度破坏的极限状态。但三系数法是以荷载和材料分别用概率统计求得三系数法，没有根据不同结构，不同构件重要性，加以区别对待，具有不相当的安全度，材料匀质系数的概念重复，取材料强度标准值时考虑了材料匀质，而计算强度时又乘以材料匀质系数，钢材废品限值与概率无关，工

作条件系数也缺乏客观依据和科学方法。^[4]

现在规范极限状态是以概率论为基础的设计方法也叫近似概率法。其特点是以结构失效概率来判别结构可靠度, $R-S \geq 0$, S 为结构作用效应; R 为结构抗力。结构失效的概念即在结构设计基准期内不得进行大修、但不是不能使用, 设计基准期为 50 年。

根据长期实际工程经验、统计及校准的结果, 结构的失效概率大致为 10^{-5} 、这个概率相当于人们心理上可以承受的事故发生率, 如打针、游泳, 其失效概率也接近 10^{-5} 。但没有人因危险而不打针、不游泳, 因为这个风险是可以接受的。什么事情都没有绝对可靠的, 一切都有概率。过去天气预报, 报“晴”是不科学的, 现在预报降水概率 10% 就比较科学。而失效概率又用可靠度指标 β 来表达。通过运算 R_t (失效概率) $= 1.1 \times 10^{-4}$, $\beta = 3.7$; $R_t = 1.3 \times 10^{-5}$, $\beta = 4.2$ 。如二级建筑当延性破坏时要求 $\beta \geq 3.2$, 脆性破坏 $\beta \geq 3.7$ 。结构可靠度指标 $\beta = 2.7 \sim 4.2$ 。

为什么是近似概率法。由于统计的局限、仅在荷载和材料强度的设计取值上分别考虑了各自的统计变异性、不是所有因素都能采用概率法, 即使荷载及材料的统计也不可能做得非常完善、工程中许多因素不能用统计, 很多人为主观因素, 不少经验成分。因此只能称近似概率法或半概率法。如过去钢材标准强度 3 号钢即用废品限值 240 N/mm^2 , 废品限值仅是钢厂人为定的, 考虑质量及经济合理的出厂标准, 与概率无关。现在钢材标准强度即以钢材保证 97.8% 强度不超过此值。Q235 标准强度即 235 N/mm^2 , 虽然数值接近废品限值那只是巧合, 而混凝土标准强度即按正态分布 95% 保证率采用。

钢材设计强度是标准强度除以抗力系数, 抗力系数是考虑不可预见的因素凭经验定的, 有的资料解释为统计所得但缺乏根据, 实际上大多是人为定的。荷载部分由于平均值标准差变异系数实测数据比钢材更难以统计。有的活荷载取 $f_k = \mu_t - 2\sigma_t$, f_k 为标准值; μ_t 为平均值; σ_t 为标准差, 保证率 97.73%^[4]、不少荷载即沿用了过去经验。如风载即取 50 年一遇的 10 分钟风载平均值。有的如自重虽可统计, 但因为标准差很少, 概率统计后值与平均值相差很小, 干脆自重标准值即取了平均值。至于荷载设计值 (即作用设计值) 所需要的荷载系数 (即作用分项系数) 依靠统计更难。不少还是根据使用经验用校准法求得结构的可靠度失效概率, 通过运算再反求出作用分项系数。

目前的水平只能半概率即是我们现行规范的第二水准。即是以概率理论为基础的极限状态设计法, 只采用一阶原点矩 (平均值 μ) 和二阶中心矩 (方差 σ^2) 称为一次二阶矩法。由于引入了线性化近似假定所得 β 尚属近似值, 近似概率法的优点是大量随机因素的主要因素是经过概率统计得出, 但概念不如“许可应力”简单明了, 也未考虑随机变量间关系, 还有一些变量的统计值具有主观性, 目前折合为安全度: 我国 Q235 $K = 1.41$, Q345 $K = 1.45$, 美国房屋 1.67、桥梁 1.8, 英国 1.68, 德国、日本 1.5。^[4]

抗力分项系数我国规范 Q235 为 1.087, Q345 为 1.11。欧盟为 1.1, 美国、日本为 $\frac{1}{0.85} = 1.17$, 数字都差不多。而荷载分项系数我国为 1.2、1.4, 欧盟为 1.35、1.5, 英国 1.4、1.6, 综合比其他国家略低, 略低的主要原因是“统一标准”而不是钢结构规范。^[5]

第三水准是全概率法。这是理想的水准也是达不到的水准, 所有因素全部用概率统计是不可能的。很多人为主观的思维是无法统计的。国外很多重要的结构设计规范仍未采用可靠度设计方法, 有的观点是结构设计是面向复杂多样的复杂群体, 在安全度上需要考虑

的不确定性非常复杂，并不是统计数学的概率所能科学描述和处理的，有时反而在安全概念上造成某些混乱，可靠指标和虚拟的失效概率有时造成不可揣摩和模糊不清，不如安全度直观便于处理安全问题。

1.1.3 如何评价网（壳）架的可靠度

1.1.3.1 网（壳）架空间结构可靠度优于平面结构受到质疑

过去认为网架是高次超静定结构，局部杆件虽破坏，由于塑性内力重分布，不会倒塌，有很大的安全储备。第二次世界大战中有的网架炸了一个洞仍安然无恙。因此认为网架不会破坏。而美国哈特福德（Hartford）体育中心 $109.7\text{m} \times 91.4\text{m}$ 矩形网架的倒塌，使人们提出了网架会不会“渐近破坏”的问题。从国外研究看，认为网架危险的杆件是压杆，压杆失稳会引起连锁反应，但对于螺栓球节点最担心的还是一个螺栓断了会引起什么后果？现根据国内外资料作一些分析。

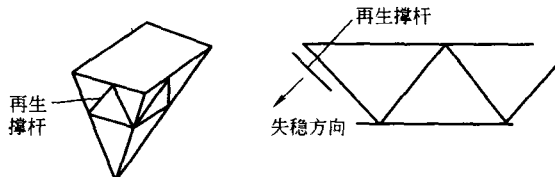


图 1.1.1

根据 E. A. Smith 的报告，肯定了哈特福德体育中心倒塌事故的原因，是由于设计错误以及支撑连接失稳和承包者

修改不当而引起的。这些错误使再生支撑杆在网架边缘处起不到支撑作用，加之上弦的支撑处节点又产生了较大偏心，从而导致倒塌见图 1.1.1。虽然对于如何屈曲还是众说纷纭，有的认为 4 个角钢十字形抗扭刚度低，扭转屈曲为主因，有的认为偏心未能减少计算长度为主因。^[2]但显然，哈特福德体育中心的倒塌主要是由于设计错误，不是网架“渐近破坏”的问题。

但由此倒塌事故对弹性分析作为设计计算方法有了争议。哈特福德网架“渐近倒塌”的实例加之 10 年来计算机技术飞快发展，因而发展了可用于双层网架非线性分析的技术。一些研究，如 Meiboarne 大学发表的一些重要的五种双层网架不稳定性研究，集中探讨了脆性杆件的非弹性反应。研究表明，原来认为网架的钢材是延性材料，会具有超过弹性极限负荷的承载能力。因此，弹性分析提供保守的设计。然而事实上却不是这样。关键是构件能否维持越来越大的变形下的荷载。假如一个结构的弹性负荷是作为轴向力传递的构件不是很粗，又不是很细长，由于塑性弯曲产生的构件是第二类失稳引起构件承载力突然损失，形成内力重分布。假如其他构件能随此重新分布，并能支撑增大了的外荷载就能保证不倒塌。假如重分布引起其他构件破坏，则会“渐近破坏”形成“多米诺效应”，不具有超过其“弹性极限荷载”的保留强度。

1.1.3.2 分析表明网（壳）架经过塑性重分布多次超静定网（壳）架的可靠性是优于平面结构的。

分析重分布的一种技术叫“追踪分析法”。

这个概念与“充分支撑”的概念雷同。“充分支撑”的概念就是说要保证一根柱不失稳时，并不需要中间加一个不动支座，只要具有一定刚度与强度的弹性支撑即可以保证不失稳。这种弹性支撑叫“充分支撑”。设一“理想柱”失稳为两个半正弦波，中点 $y'' = \frac{M}{EJ} = 0$ ，失稳力 $P_c = \frac{\pi^2 EJ}{(l/2)^3}$ 。如在 B 点同一弹性支承且具有一定刚度 K 时，柱子失稳力

仍保持 P_c 。参见图 1.1.2, 从平衡式推导 $\sum M_B = 0$:

$$\frac{K_d}{2} \times \frac{l}{2} = P_c d \quad K_d = \frac{4P_c d}{l}$$

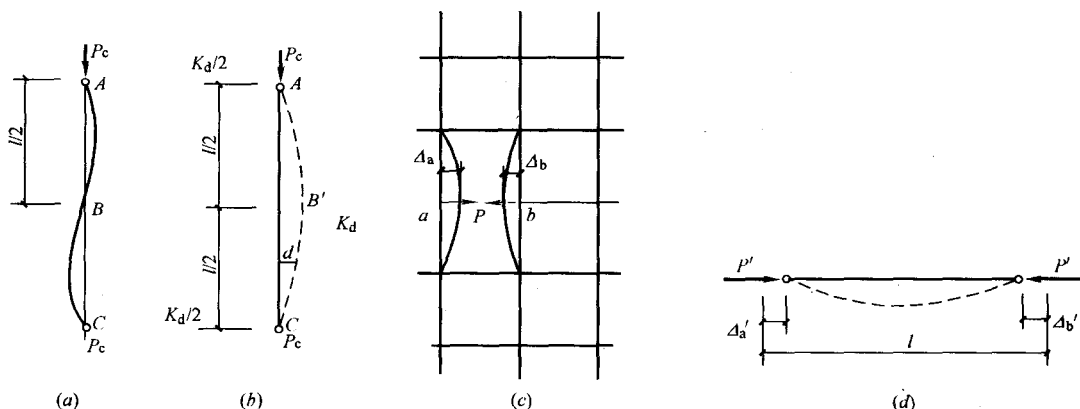


图 1.1.2

K_d 即“充分支撑”所要求的弹簧常数。所以“追踪分析法”的概念，即在网架中将超过极限荷载的构件从结构中除去，代以相反的杆件残余力 P 作为一个相等相反的力在网架上使 a 、 b 之间产生变形 $\Delta_1 = \Delta_a + \Delta_b$ ，再验算 a 、 b 杆在 P' 力作用下在非线形阶段所产生的杆件缩短 $\Delta_2 = \Delta'_a + \Delta'_b$ 。如果 $\Delta_1 \geq \Delta_2$ ，则说明 ab 杆即使在 P' 力作用下产生了非线性变形，但在网架计算中仍可以一如往常地假定此杆能承受力 P 而存在，也说明不会产生内力重分布。如果 $\Delta_1 < \Delta_2$ ，则说明 ab 杆已不能充分在网架中起到应起的作用，只能用迭代的办法将 P 降为 P' 。一直凑到 P' 作用下的 $\Delta_1 = \Delta_2$ 。这样，即说明 ab 杆只能承受 P' 力，将形成内力重分布使 ab 杆件附近的杆件力有所增加。通过“追踪分析法”的分析，初步探索了网架杆件进入非线性变形阶段的内力重分布问题，而且验证了哈特福德倒塌的结构，计算分析的破坏的第一根杆件及依次破坏的杆件同实际调查的破坏次序比较相符。

Δ_1 及 Δ_2 是由杆件后期压弯效应求得，属于几何非线性，将此效应引入一种增量，包括挠曲为 $l/1000$ 。

从以上非线性极限承载力分析，多次超静定结构一根杆件断了会引起塑性重分布。如果相邻其他杆件能承担由塑性重分布所增大的内力，结构即不会逐个破坏随之倒塌，反之就会引起连锁破坏，甚至倒塌。

这个方法在国内也进行了研究，即将发生受拉屈服或受压失稳的杆件退出工作，在其两端节点处施加该杆件的反向残余力（拉杆的残余力就是它的屈服力。压杆则是杆件失稳后的残余力），即不考虑这些杆件刚度矩阵后，寻找新的屈服或失稳杆件，反复进行直到形成局部机动体系。由于杆件力学模型建立趋于成熟，其他荷载增量等数值分析方法使网架非线性极限承载力的分析日益成熟。

但关于非线性破坏性能的试验研究尚比较少，而利用一般模型结构试验分析，由于误差配合不好、节点偏心、接头滑动等因素，作为非线性分析其有效性值得怀疑。因此非线性的试验要非常小心，消除接头偏心及残余应力。专门的焊接系统才能进行非线性分析研究。国外从这些试验中，甚至发现对称的结构其弹性性能却呈非对称性。这是因为结构本

身总是有缺陷,缺陷就形成非对称的承载力。同时也发现有的整个结构破坏较突然,持续不到30s。因此说明,在某些情况下,弹性计算的脆性杆件不能过分自信一定不会出现“多米诺”效应。

当然内力重分布的计算用“追踪分析法”还是相当复杂的。极端的情况就是将达到极限荷载的杆件完全取消来计算内力重分布,这样的算法叫“杆件除去法”,是偏于安全的。Mero 计算规程就这样要求。螺栓直径大于33mm的网架,要考虑受力最不利处断去一根拉杆。然后重新计算,经内力重分布的相邻杆件如果是拉杆,其内力可以降低1.8倍验算;如相邻杆件是压杆,其内力可以降低1.5倍。这就相当于拉杆安全度要求 ≥ 1 ,压杆安全度要求 ≥ 1.25 。

目前采用结构“可靠指标” β 作为衡量安全度的尺度, β 又与结构功能失效概率 R_f 有对应关系。而 R_f 一般为 10^{-5} ,即以人们可以接受的事故概率为准。如打针、游泳等均为 10^{-5} 失效概率。相应的 β 约为3.5~4.0。但在断去一根杆件、内力重分布的情况下,其失效概率究竟应多少,是很复杂的问题。因为失效概率的容忍程度是心理学问题,不能以数学式表达。而一根杆件破坏后,又涉及体系失效概率,是正在研究的问题,有的资料介绍, β 以2.0为宜,而目前Mero规程提出了一根杆件破坏,只要满足安全度 $K \geq 1$ 即可。以 $\beta=3.5$ 与 $\beta=2.0$ 的相应关系来比较,与 $K=1.8$ 及 $K=1.1$ 的关系是接近的。

非线性分析可以发现真正的极限承载力,当然应考虑到杆件初始挠曲,节点偏心,节点滑动,横截面面积变化,配合不好,所有这些因素都影响应力分布。因此目前通过非线性分析要精确地预测承载力也很困难,但可以期待。由于对非线性结构特性研究的兴趣不断增加,一定会解决单个杆件破坏对承载能力的影响。

根据以上分析验算,断一根杆件是一种检验网架整体安全的办法之一,但仅在一些特别重要结构才有必要。而目前关于网架极限承载能力的试验,国内外兴趣也比较大,国外也做过一些足尺试验,如英国的国家塔试验站,做了严格控制的足尺试验,尺寸20.4m $\times$ 18m试验证明,试压到122.5%才开始屈服,最大荷载压到206%,试件没有倒塌,只是有些杆件坏了。

在波兰华沙,用于工业建筑的Mostostal体系双层网架也在1975~1977年做了试验,尺寸是12m $\times$ 18m、24m $\times$ 29m和30m $\times$ 30m,试验测定挠度接近于弹性线性分析结果。虽然试验变形较高于理论值,但在许多杆件中试验的应力还是符合理论计算的,只是在上下层连接的斜杆件有些不够满意。而18m $\times$ 18m网架由于配错了材料,超载下(即计算荷载下)即达流限;12m $\times$ 18m网架大部分受力杆件达屈服,但仍未破坏,只有杆件屈服到使体系转为机动不稳定时才丧失承载力。分析计算是按极限状态并考虑了弹塑性,特别考虑了滞后压屈和断面一侧塑性、两侧塑性的情况。试验发现永久变位达最大变位的30%~50%。

另外,英国希思罗机库也做了网架足尺的现场试验。加荷到110%。试验曾准备用水加荷,但用水加载会使水集中于挠度较大的跨中,不符实际情况,并造成恶性循环,使网架提早破坏,所以试验用了垃圾箱加载。试验结果也说明网架按弹性分析计算是安全的。

如何来评价网架整体安全问题,目前大家都比较感兴趣。从过去芜湖空军36厂网架断一根杆的验算及安庆石化公司网架断一根杆的验算结果看,按Mero的要求,基本上都能满足,不会引起整体倒塌。按Mero要求所作的验算是偏于安全的。因为Mero规定,