

空 间 结 构 系 列 丛 书

空间格构 结构设计

钱若军 杨联萍 胥传熹

KONGJIAN
GEGOU
JIEGOU
SHEJI

东南大学出版社

空间结构系列丛书

空间格构结构设计

钱若军 杨联萍 胥传熹



东南大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括概论,空间格构结构的类型、型式和造型,结构及节点构造设计原则,节点构造,空间格构结构的分析,杆件及节点的强度和稳定验算,结构的性状及工程实例等部分。全书详尽地介绍、阐述了设计方法和构造要点。

本书可作为科研、设计以及工程技术人员的专业参考书,也可作为高等院校本科高年级学生及研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

空间格构结构设计/钱若军,杨联萍,胥传熹编著. —南京:
东南大学出版社,2007.2

ISBN 978-7-5641-0668-3

I. 空… II. ①钱…②杨…③胥 III. 空间结构—结构设计 IV. TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 019722 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:江 汉

全国新华书店经销 南京京新印刷厂印刷

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:34.75 字数:867 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5641-0668-3/TU·97

印数:1~3000 册 定价:70.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向读者服务部调换。电话:025-83792328)

空间结构系列丛书编委会

主 任 董石麟

委 员 (以姓氏拼音为序)

曹 资 邓 华 顾 明 罗尧治

马克俭 钱基宏 钱若军 王人鹏

夏绍华 胥传熹 薛素铎 杨联萍

袁行飞 赵基达 赵 阳 张 渊

周 岱

责任编辑 张 莺

序

自从英国著名学者马考夫斯基教授创建“空间结构”的概念以来,空间结构在国外和国内都得到了飞速的发展,尤其是我国,在空间结构领域内取得了举世瞩目的成就。

我国空间结构的设计和研究可以追溯到 20 世纪 50 年代,当时一些高校和科研机构(如中国建筑科学院等),对空间结构中的一些主要类型,如薄壳、网架、网壳和悬索等空间结构都进行了研究,并建造了一些具有代表性的工程。在 70 年代末 80 年代初,空间结构在我国逐步得到了系统、全面、深入的研究。同时,在一些体育建筑、交通建筑、会展建筑和能源建筑等各方面,建造了大量的各类空间结构。因此,空间结构成为当前结构中的主要类型,尤其是在大跨度建筑中,格外体现了空间结构的优越性和适用性。

20 世纪 80 年代以来,我国高等学校研究结构的学者们对空间结构所涉及的基本理论、计算技术、设计方法和施工构造等各方面都进行了研究。多年来,在国家自然科学基金,省、市、部级科研基金及有关建设部门的资助下,完成了大量的科研项目。这些科研成果有力地推动了我国空间结构的发展,促进了空间结构设计与施工技术水平的提高。

随着空间结构研究的深入,近十多年来在我国出版了一系列有关空间结构的专著和译著。无疑,这些著作的出版有力地推动了我国空间结构的教学、研究和应用。但是,随着研究的日益深入,应用的日益广泛,有必要将空间结构的有关基础理论、计算方法、设计和施工等方面的新的成果进一步加以总结和推广,有必要把空间结构的理论更加系统化,把空间结构的设计和施工更加条理化。为此,我们将陆续撰写和出版空间结构系列丛书,内容涉及空间结构的计算理论、稳定理论、抗震分析理论、风工程理论、数值分析方法、计算机辅助设计以及空间格构结构、张力结构、铝结构设计施工。

在系列丛书中,倾注了老中青专家和硕士生、博士生的研究心血,汲取了广大工程师的设计和施工经验。我们相信,随着系列丛书的陆续出版,将进一步推动我国空间结构的发展。希望对有志于从事空间结构研发的广大从业人员有所帮助。

董石麟
浙江大学教授
中国工程院院士

前 言

空间格构结构是由各种功能元件通过节点连接起来的结构体系。由于其随形成型,可适用于各种不同的建筑物中,因此得到了极为广泛的应用。很多空间格构结构成为一种建筑标志,其实它更是科学和技术的标志。空间格构结构脱胎于常用的结构和技术,成熟于基本结构或基本结构体系,又不拘泥于传统的基本结构或基本结构体系,发展于集成体系。出自于自然,超于自然。一个成功的空间格构结构设计必出自于具有深厚技术素养的工程师之手,他借助于数值分析来实现一种符合力学原理的形象。因此,空间格构结构必然蕴含着结构哲学和结构概念。

空间结构是英国瑟利大学马考夫斯基教授在 20 世纪 50 年代所定义的结构类型,当时所定义的空间结构主要是指空间杆系结构,其中包括空间铰接杆系和空间刚接杆系。从此以后,英国、德国、法国、美国、日本等一些国家的学者和厂商在空间结构的分析和设计、制造和安装等方面作了大量的研究和开发。几十年的研究、设计和工程实践的积累使得空间结构成为结构领域中的一个重要和广泛应用的结构类型,甚至空间结构被认为是一个国家建筑学科综合技术的象征。国内外对空间结构从基础理论、分析方法、计算机技术、材料和工程学等方面都作了大量的研究,其中包括空间杆系结构的静动力分析、线性和非线性分析的理论,也包括了结构稳定分析、结构形态分析等研究。这些空间结构的理论研究也促使了基础理论的深入发展,譬如,90 年代以来逐步完善了机构理论的研究。基础理论、计算方法和计算技术的研究及提高,使得空间杆系结构的设计、制作安装水平有了长足的进步。可以说,国外对空间结构做到了精确分析、精心设计和精密制造。

在空间结构的理论研究发展的同时,国内外出现了大量的优秀设计,这些成功的设计,综合体现和反映了理论水平、设计概念与理念以及制作技术的水平。在空间结构的发展过程中,一些著名的制造商也起了不可忽视的推动作用,其中像德国的 MERO 公司等,这些制造商开发研制了各种各样的结构体系,使得空间结构在工业、民用、军事等各个领域中得到充分的应用,在体育、交通、会展等大型公共建筑中得到实施。

在空间结构的发展过程中,国内外学者都总结整理了各种结构类型及形式,使得广大工程师对空间结构有了具体的了解,从而使这些不同类型及形式的空间结构被广泛地应用。马考夫斯基教授就主持编纂了《平板型网架结构的分析、设计与施工》,《球面网壳的分析、设计与施工》,《圆柱面网壳的分析、设计与施工》等重要著作,这些著作将一堆空间杆系霎时间条理化了,读者从中真切地看到其布置的变化规律及结构韵律。之后,大量的文献都涉及网架、网壳、悬索结构等空间杆系结构的造型、分析计算和节点构造以及结构性能的研究。20 世纪 60 年代董石麟院士已经对平板型网架结构开展了理论研究,70 年代天津大学刘锡良教授撰写了我国第一本空间结构的专著《平板型网架结构》,不遗余力地推广空间结构,从而系统地将国外的空间结构引入中国。自此以后,国内开展了空间结构的大量研究和应用。在我国,一些著名学者如张维嶽、沈世钊、曹资、尹德钰、刘善维、胡学仁、严慧、马克俭、关富玲、肖焱、陈扬骥、赵惠麟和张毅刚等教授进行了大量富有成效的研究并作出了显著的贡献,取得了很多引人注目的成果。近年来,很多出类拔萃的年轻学者如赵基达、薛素铎、夏绍华、钱基宏和赵阳等教授对空间

结构的各个领域进行了深入研究并取得了具有独创性的成果;柯长华、杨叔庸、冯远、范重、董明和朱忠义等杰出的工程师在他们并不一定都是巨大但却颇具匠心的设计中体现了创造性和功力。作者的研究和本书的撰写得益于前辈的教诲和各位学者的成果。

本书旨在介绍和讨论空间格构结构的设计、技术和应用,从浩瀚的文献中提炼出精要的部分。作者始终认为科学与技术是两个完全不同的概念范畴,技术的发展极大程度地依赖于科学的进步,而科学要发展,又极大程度地从技术的应用中获取新的观念。本书中阐述的空间格构结构的技术并未涉及这些技术的理论基础,尤其是设计中的重要环节即结构分析的理论基础,有关分析中的理论可参阅有关各种专著或作者撰写的《空间结构非线性分析》、《结构系统的稳定分析》及《空间结构分析计算机方法》等著述。但是为了便于应用,在本书中,对目前所采用技术的理论基础的适用范围作了阐述。

在本书中,首先强调结构的造型而突破了传统分类和形式的归类。由于现在对空间结构分类和形式归纳的传统方法已不敷应用,随着应用的需要,结构的平面、跨度已越来越大,外形越来越复杂,在应用中不可避免地会突破传统的概念和条理。结构的造型是空间杆系结构也就是空间格构结构设计的主要内容。造型体现了几何、力学和构造,从随形到无形,从无形到有型,使得空间杆系结构无所不能。话虽如此,传统的结构分类的形式经过多年来的研究已经成为空间杆系结构中的基本结构形式,这些基本结构形式依然可以成为现代空间格构结构造型的基本出发点,所以本书中强调的第一个观点是要从千变万化中找出千篇一律,由此千篇之一律创造出千变万化。

本书中阐述的另一个观点是结构设计应该是一个创造性的劳动,因此任何一项设计应该是基本原理、基本概念的应用而不是形式上的翻版,所以本书中即使对一个很简单的结构型式和构造也希望穷尽物理,从而能了解其本质上的规律,得到创造性的运用。

在空间格构结构的设计中,结构分析自始至终成为设计的重要内容和环节,而结构分析的准确性是基于其所采用的基本理论,根据理论所建立的数学力学模型、数值分析方法和计算机技术,所以要了解结构分析,首先要了解其分析模型。但是,结构分析过程都必须借助计算机技术,这不同于采用某一个公式进行计算,所以在本书中虽然并不专门讨论空间格构结构的理论基础,但对分析模型的基本条件、基本假定、适用范围和建立模型的基本根据作了阐述,便于在选择分析模型时参考。理论研究和科学发展的难度并不等于技术应用的难度,在应用某一个技术的过程中并不涉及任何理论或任何科学。然而,只有不断发展科学,深化理论,在具有深度的理论上才能得到技术的很快发展,所以在空间格构结构设计中采用更新、更精确的理论为背景的技术是非常重要的。

空间格构结构设计包含着形象思维和逻辑思维的过程,它必须借助于先进的工具和手段,在现代空间格构结构设计中已经广泛地采用了计算机技术,然而在以往的应用中主要用于结构分析和结构绘图。在本书中通过对空间格构结构定义和对结构描述方式的讨论,有可能通过计算技术进行结构造型。事实上从国外先进的 CAD 系统中可看到,结构的几何建模和物理建模已成为 CAD 技术中很重要的方面,而不是简单地绘图。本书中给出的对结构的定义和描述方式正是有助于对结构外形的数学建模。本书仅仅提出这些概念,具体的实施将在作者的空间格构结构 CAD 系统的专著中详细讨论。作者在本书中只是强调一个观念,用数学模型去表达一个结构几何并用数学模型来创建和变换结构几何是一个很有效的方法。

作者认为结构设计主要是结构的性能设计,而不是单纯的构造设计,除了从形体上构思之外,更重要的是应该考虑所欲设计结构的工作原理及破坏机理。结构设计是对一个几何体进

行性能设计的过程,如果一个结构缺乏结构性能,那这个结构仅仅是一个几何,而如果一个结构没有良好的结构性能,就不能认为这结构是很优秀的结构。结构设计应该从结构的力学性能出发,而不宜从构造出发,因为构造应服从结构性能要求,而不是结构满足构造。所以本书中除了对分析模型作一般性介绍以外,还另辟章节对基本结构的力学性能进行分析比较,这些可使设计人员逐步建立设计概念。结构设计实际上是一个传力路线的设计,或者是一个结构的刚度设计,使得结构的传力简捷清晰,刚柔相济。

由于空间格构结构往往用于一些平面和支承条件都极为复杂的结构中,在系统地选择传力路线的设计时,体系中各结构的相互协同是一个很复杂的问题,而且没有定式,但能从看似复杂的系统中悟出一种简洁的表示,往往可以获得理想的成功。因此在空间格构结构的设计中除了应深谙其技术基础以外,应用概念也是很重要的,而且已成为设计技术的境界。在作者陪同日本著名学者川口卫教授来华访问期间,不断与其讨论了结构与自然的命题,我们认为一个最“简单”的结构往往是一个最“好”的结构。川口先生很推崇中国道德经中所阐述的宇宙观,车旅途中对此寻章觅句。现代结构与传统的由柱子支承梁的简单方法是完全不同的,简单地说,结构不是材料的堆砌,力的传递是结构必须具备的功能,简捷有效地传力符合结构的自然原理。

本书分为概论,空间格构结构的类型、型式和造型,结构及节点构造设计原则,节点构造,空间格构结构的分析,杆件及节点的强度和稳定验算,结构的性状以及工程实例等部分。全书详尽地介绍、阐述了设计方法和构造要点。本书可作为科研、设计以及工程技术人员的专业参考书,也可作为高等院校本科高年级学生及研究生的教学参考书。

在长期的空间格构结构研究的过程中,得到了国家自然科学基金委、上海市建设技术发展基金会的资助。赵红华、聂国隼副教授对结构的分析研究作出了突出的贡献,曾银枝、林智斌、梁峰、熊天齐、崔家春等博士、硕士的杰出的才华为本书增色生辉,邱枕戈工程师为本书做了大量的工作。本书在撰写过程中还得到了同仁和同学的大量帮助,在此,谨表谢忱。由于作者的水平有限,谬误之处在所难免,敬请读者批评指正。

钱若军 杨联萍 胥传熹
2005 年春于上海 枝经堂

目 录

1 概论	1	2.1.1 构造单元几何	13
1.1 概论	1	2.1.2 结构的基本构造单元	14
1.1.1 结构设计	1	2.2 结构的基本构件及其截面型式	15
1.1.2 结构属性	1	2.2.1 基本构件	15
1.2 空间格构结构的基本概念	2	2.2.2 基本构件的变换	15
1.2.1 格构结构	2	2.3 基本结构	16
1.2.2 基本结构及基本空间结 构体系	2	2.3.1 拱与环	16
1.2.3 集成体系结构	3	2.3.2 桁架	17
1.2.4 张力集成体系结构	3	2.3.3 张弦桁架	17
1.3 结构的描述,拓扑和几何的基 本概念	3	2.3.4 索桁架	17
1.3.1 结构拓扑和几何的基本 概念	3	2.3.5 树结构	20
1.3.2 结构拓扑的一般规律	4	2.4 基本空间结构体系	20
1.3.3 结构拓扑点和拓扑图	4	2.4.1 网架	20
1.3.4 整型名义坐标系	5	2.4.2 网壳	21
1.3.5 工程结构的构件布置规律	6	2.4.3 索及索杆结构体系	22
1.4 空间格构结构的概念设计	7	2.4.4 膜结构	22
1.4.1 拓扑设计	7	2.5 基本格构几何及空间结构体系	22
1.4.2 形状设计	7	2.5.1 单层柱面网格及网壳	22
1.4.3 结构控制	8	2.5.2 单层球面网格及网壳	25
1.4.4 设计策略	8	2.5.3 单层双曲面网格及网壳	30
1.5 结构的破坏形式	8	2.5.4 单层折板	36
1.5.1 结构破坏特征	8	2.5.5 双层平板型网格及网架	39
1.5.2 结构的弹、塑性变形和材料 的破坏	9	2.5.6 双层柱面网格及网架	43
1.5.3 失稳的特点或特征	9	2.5.7 双层球面网格及网架	48
1.6 结构的变形和稳定性分析	10	2.5.8 三向及三角锥和六角锥 体系	54
1.7 杆件和节点的强度和疲劳验算	11	2.6 集成体系结构	57
1.8 空间格构结构的极限承载力	11	2.6.1 基本构件集成的体系结构	58
2 空间格构结构的类型、型式和造型	13	2.6.2 基本结构集成的体系结构	58
2.1 空间格构结构的基本单元和 几何	13	2.7 空间格构结构的造型和选型	59
		2.7.1 结构的造型和选型方法 概论	59
		2.7.2 基本结构体系的变换	71
		2.7.3 基本结构体系的集成	74

3 结构及节点构造设计原则	78	3.4 材料的选用	103
3.1 结构设计一般原则	78	3.4.1 结构中常用材料的特性 ...	103
3.1.1 空间格构结构的布置原则 ...	78	3.4.1.1 常用材料	103
3.1.2 空间格构结构的选型原则 ...	79	3.4.1.2 铸钢的原材料化学成分和机械力学性能	104
3.1.2.1 根据平面和曲面形状的结构选型	79	3.4.1.3 锚具的合金铸钢的原材料化学成分和机械力学性能	106
3.1.2.2 形状特征、支承、荷载条件及结构性能对选型的影响	80	3.4.1.4 不锈钢	106
3.1.2.3 节点、屋面等体系对选型的影响	81	3.4.1.5 连接材料	107
3.1.3 支撑系统	81	3.4.1.6 承重结构常用铝材	114
3.1.4 设计参数	82	3.4.2 材料选用的一般原则	116
3.1.5 构件截面	83	3.4.3 钢管经过冷热弯曲后材料性能	117
3.1.6 预应力设计	85	3.4.3.1 冷、热弯钢管材性试验研究概况	117
3.1.7 结构之间的协同	86	3.4.3.2 试验结果	119
3.1.8 结构分析中的单元剖分	87	3.4.3.3 小结	123
3.1.9 动态设计和模型修正	88	3.5 空间格构结构的设计	123
3.1.10 结构刚度设计	89	3.5.1 设计的内容和一般过程 ...	123
3.1.11 空间性能	89	3.5.2 设计网架结构的一般过程	124
3.2 节点设计一般原则	89	3.5.3 设计网壳结构的一般过程	125
3.2.1 节点的类型	89	3.5.4 设计桁架结构的一般过程	127
3.2.2 节点的连接	90	3.5.5 设计索结构的一般过程 ...	127
3.2.3 节点设计原则	91	3.5.6 设计膜结构的一般过程 ...	129
3.2.4 节点分析及强度验算原则 ...	91	3.5.7 概念设计	130
3.3 荷载和作用	92	4 节点构造	131
3.3.1 荷载	92	4.1 机械连接节点	131
3.3.1.1 概述	92	4.1.1 螺栓球节点	131
3.3.1.2 荷载与作用	92	4.1.2 Temcor 节点	134
3.3.2 荷载和作用的取值	93	4.1.3 螺栓板节点	134
3.3.2.1 缺损引起的等效节点初内力	93	4.1.4 销接节点	134
3.3.2.2 温度变化的作用	94	4.2 焊接节点	135
3.3.3 抗震分析和减震设计	95	4.2.1 焊接板节点	135
3.3.3.1 抗震分析	95	4.2.2 焊接空心球节点	136
3.3.3.2 Pushover 分析模式	98	4.2.3 焊接空心鼓节点	138
3.3.3.3 抗震和减震设计	99		
3.3.4 抗风设计	101		
3.3.5 抗雪、雨水设计	102		
3.3.6 消除温度变化作用的影响	102		

4.2.4 焊接管节点	139	4.5.2 MERO 典型支座形式	204
4.2.4.1 焊接圆管节点	139	4.5.3 SBP 支座形式	211
4.2.4.2 焊接方管节点	142	4.5.4 Temcor 支座节点形式	216
4.2.4.3 拼接接头	145	4.5.5 Space Structures 支座	216
4.3 节点体系	147	4.5.6 索结构支座	217
4.3.1 MERO 体系	147	4.5.7 减震支座	219
4.3.1.1 MERO 螺栓球节点体系	148	4.6 锚具及销轴节点	220
4.3.1.2 MERO MS 节点体系	149	4.6.1 概述	220
4.3.2 Nodus 体系	157	4.6.2 锚具和索体的锚固与配合	220
4.3.3 Catena 体系	159	4.6.2.1 锚具与索体的锚固方式	221
4.3.4 Temcor 体系	159	4.6.2.2 热铸锚具	221
4.3.5 Tridimatec 体系	160	4.6.2.3 冷铸锚具	222
4.3.6 UNIBAT 体系	160	4.6.2.4 挤压锚具	223
4.3.7 巴组体系	161	4.6.3 夹具	224
4.3.8 NS 体系	161	4.6.4 连接件及紧固件	226
4.3.9 S. D. C 体系	162	4.6.5 索的连接节点构造形式	226
4.3.10 Tridetic 体系	162	4.6.6 质量控制与销轴和销孔	228
4.3.11 方管体系	164	的公差配合	228
4.3.12 HARLEY 体系	165	4.7 铸钢节点	230
4.3.13 Unistrut 体系	166		
4.3.14 Space Structures 体系	167	5 空间格构结构的分析	232
4.3.15 Catena 体系	169	5.1 空间格构结构的分析模型的概述	232
4.3.16 法国 Alain Lobel Architecte 体系	169	5.1.1 概述	232
4.3.17 索结构节点体系	172	5.1.2 结构理论中的基本假定	232
4.4 围护结构构造	175	5.1.2.1 平截面(平法线)假定	233
4.4.1 屋面的一般构造形式	175	5.1.2.2 单向应力假定	233
4.4.1.1 彩色钢板压型板分类	176	5.1.2.3 小挠度假定及静力等效	233
4.4.1.2 屋面板型的选择原则	177	原理	233
4.4.1.3 连接件	177	5.1.2.4 理想次弹性材料假定	234
4.4.1.4 连接构造和一般节点	178	5.1.2.5 圣维南原理	234
4.4.2 MERO 屋面体系	185	5.1.2.6 叠加原理	235
4.4.3 Space Structures 屋面体系	195	5.1.2.7 拉、压、弯、剪和扭的耦	236
4.4.4 Temcor 屋面体系	196	合作用及 $p-\Delta$ 效应	236
4.4.5 玻璃结构屋面	197	5.1.2.8 小应变	237
4.4.6 墙面	198	5.1.3 线性和非线性	237
4.5 支座构造	202	5.1.4 分析模型的类型	238
4.5.1 国内常用典型支座形式	202	5.1.5 算法	239

5.2 空间铰接杆模型	240	5.6.3.1 球面网壳	281
5.2.1 线性空间两节点铰接直 线杆模型	240	5.6.3.2 柱面网壳	282
5.2.1.1 基本假定	240	5.7 边界条件	282
5.2.1.2 单元的模型	240	5.7.1 弹性约束	283
5.2.2 非线性空间铰接杆模型 ...	242	5.7.2 固定和强迫位移	283
5.2.2.1 非线性空间两节点铰 接直线杆模型	242	5.7.3 斜边界	284
5.2.2.2 非线性空间两节点铰 接曲线杆模型	243	5.7.3.1 斜边界的基本概念	284
5.2.2.3 非线性空间五节点铰接 单元	246	5.7.3.2 网壳结构的斜边界	286
5.3 空间梁模型	248	5.7.4 接触边界	288
5.3.1 六个自由度的空间梁	248	5.8 结构病态,小夹角	289
5.3.2 考虑拉、压、弯、剪、扭的 耦合作用的空间梁	251	5.9 预应力分析	290
5.3.3 几何非线性空间梁单元 ...	253	5.9.1 概述	290
5.3.4 考虑拉、压、弯、剪、扭的 耦合作用的几何非线性 空间梁单元	257	5.9.2 找形分析	292
5.3.5 考虑拉、压、弯、剪、扭的 耦合作用的材料非线性 空间梁单元	259	5.9.3 预应力分析方法	293
5.4 膜和平面问题模型	262	5.9.4 零预应力态分析	294
5.4.1 基本假定	262	5.10 分析模型的选择	296
5.4.2 膜结构和平面应力的分析 模型	262	5.10.1 结构分析简图和分析模 型的选择	296
5.5 空间实体模型	266	5.10.1.1 结构分析简图	296
5.5.1 空间四面体实体线弹性 单元	266	5.10.1.2 分析模型选择的一般 原则	297
5.5.2 空间四面体实体几何非 线性单元	270	5.10.1.3 基本结构分析模型的 选择	300
5.5.3 空间四面体实体材料非 线性单元	272	5.10.2 边界约束的选择	301
5.6 空间梁单元分析模型中的变换	274	5.10.2.1 确定边界条件的一般 原则	301
5.6.1 节点自由度及自由度凝聚	274	5.10.2.2 理想边界条件	302
5.6.2 主从关系	274	5.10.2.3 弹性约束和支座沉降 ...	304
5.6.3 材料主轴	281	5.10.2.4 节点细部分析时的边 界约束	304
		5.11 分析方法的选择	304
		5.11.1 线性分析	305
		5.11.2 非线性分析	305
		5.11.3 非线性屈曲分析	305
		5.11.4 模态分析	306
		5.11.5 机构位移分析	307
		5.11.6 极限承载力分析	307
		6 杆件及节点的强度和稳定验算	308
		6.1 杆件、节点强度和稳定验算的 一般规定	308

6.2	中国规范中杆件强度和稳定 验算的规定	309	6.3.3.2	美国规范中对称截面 拉弯构件的验算公式 ...	323
6.2.1	中国规范中轴心拉压杆 件的强度验算公式	309	6.3.3.3	美国规范中非对称截 面拉弯及压弯构件的 验算公式	324
6.2.1.1	中国规范中稳定系数 的计算规定	309	6.3.4	美国规范中梁的局部稳 定验算公式	324
6.2.1.2	中国规范中轴心拉压 实腹杆件的强度验算 公式	309	6.4	英国规范中构件强度验算的 规定	325
6.2.1.3	中国规范中轴心拉压 格构式杆件的强度验 算公式	311	6.4.1	英国规范中的设计强度 要求及截面分类	326
6.2.2	中国规范中拉弯和压弯 杆件的强度和稳定验算 公式	312	6.4.1.1	英国规范中的设计强度 要求	326
6.2.2.1	中国规范中单向拉弯 和压弯杆件的强度验 算公式	312	6.4.1.2	英国规范中的截面分类	326
6.2.2.2	中国规范中双向拉弯 和压弯杆件的强度验 算公式	314	6.4.2	英国规范中轴心拉压构 件的强度验算公式	330
6.2.3	中国规范中梁的局部稳 定验算公式	315	6.4.2.1	英国规范中轴心受拉 构件的强度验算公式 ...	330
6.3	美国规范中杆件强度验算的 规定	316	6.4.2.2	英国规范中轴心受压 构件的强度验算公式 ...	330
6.3.1	美国规范中的设计强度 要求及截面分类	316	6.4.3	英国规范中拉弯和压弯 构件的强度验算公式	331
6.3.1.1	美国规范中的设计强度 要求	316	6.4.3.1	英国规范中拉弯构件 的强度验算公式	331
6.3.1.2	美国规范中的截面分类	317	6.4.3.2	英国规范中压弯构件 的强度及稳定验算公式	331
6.3.2	美国规范中轴心拉压构 件的强度验算公式	319	6.4.4	英国规范中梁的局部稳 定验算公式	332
6.3.2.1	美国规范中轴心受拉 构件的强度验算公式 ...	319	6.5	欧洲规范中构件强度验算的 规定	333
6.3.2.2	美国规范中轴心受压 构件的强度验算公式 ...	319	6.5.1	欧洲规范中的设计强度 要求及截面分类	334
6.3.3	美国规范中拉弯和压弯 构件的强度验算公式	323	6.5.1.1	欧洲规范中的设计强度 要求	334
6.3.3.1	美国规范中对称截面 压弯构件的强度验算 公式	323	6.5.1.2	欧洲规范中的截面分类	334
			6.5.2	欧洲规范中轴心拉压构 件的强度验算公式	338

6.5.2.1	欧洲规范中轴心受拉 构件的强度验算公式	338	6.7.3	英国规范中的机械连接 强度验算	349
6.5.2.2	欧洲规范中轴心受压 构件的强度验算公式	339	6.7.4	欧洲规范中的机械连接 强度验算	351
6.5.3	欧洲规范中拉弯和压弯 构件的强度验算公式	339	6.8	规范中规定的焊接强度验算 公式	352
6.5.4	欧洲规范中构件的稳定 验算公式	340	6.8.1	中国规范中的焊接强度 验算	352
6.5.4.1	欧洲规范中受压构件 的稳定验算公式	340	6.8.2	美国规范中的焊接强度 验算	354
6.5.4.2	欧洲规范中受弯构件 的稳定验算公式	340	6.8.3	英国规范中的焊接强度 验算	354
6.5.4.3	欧洲规范中压弯构件 的稳定验算公式	340	6.8.4	欧洲规范中的焊接强度 验算	355
6.6	疲劳验算	341	6.9	关于稳定系数	356
6.6.1	中国规范中的疲劳验算	341	6.10	焊接空心球节点	356
6.6.2	美国规范中的疲劳验算	342	6.10.1	概述	356
6.6.3	英国规范中的疲劳验算	343	6.10.2	焊接空心球承载力设计值	357
6.6.4	欧洲规范中的疲劳验算	344	6.11	焊接空心鼓节点	358
6.7	规范中规定的机械连接强度 验算公式	345	6.11.1	鼓节点的焊缝	358
6.7.1	中国规范中的机械连接 强度验算	345	6.11.2	鼓节点的承载力	358
6.7.1.1	受剪连接	345	6.12	相贯焊接节点	359
6.7.1.2	受拉连接	346	6.12.1	概述	359
6.7.1.3	受剪、拉共同作用的连接	346	6.12.2	中国现行钢结构设计规 范中规定的相贯焊接节 点的强度验算公式	359
6.7.1.4	摩擦型高强度螺栓连接	346	6.12.2.1	一般规定	359
6.7.1.5	承压型高强度螺栓连接	347	6.12.2.2	构造要求	360
6.7.1.6	螺栓或铆钉数目的增加	347	6.12.2.3	杆件和节点承载力	361
6.7.2	美国规范中的机械连接 强度验算	348	6.12.3	加拿大的相贯焊接节点 的强度验算公式	368
6.7.2.1	螺栓的受拉或受剪强度	348	6.12.3.1	符号	368
6.7.2.2	承压型连接中受拉剪 共同作用	348	6.12.3.2	失效模式	369
6.7.2.3	摩擦型连接中的高强 螺栓	348	6.12.3.3	接头的有关参数和应 用范围	370
			6.12.3.4	接头的承载力计算公式	374
			6.13	锚、夹具的强度计算	382
			6.13.1	锚具设计	382

6.13.2	锚具的强度计算	384	7.2.2.9	斜置正放四角锥网架 ...	412
6.13.2.1	锚具的强度的简化计算	383	7.2.2.10	下承式斜置正放四角锥网架	413
6.13.2.2	锚具强度的有限元法分析	385	7.2.2.11	斜放四角锥网架	414
6.13.3	索夹夹紧力的计算	388	7.2.2.12	星形四角锥网架	416
6.14	铸钢节点设计计算的一般原则	390	7.2.2.13	加边桁架正放四角锥网架	417
6.14.1	铸件材料选择和几何形状设计的一般原则	390	7.2.3	性能比较	418
6.14.2	铸件强度分析的一般原则	390	7.2.4	长短跨度比的影响	420
7	结构的性状	392	7.2.5	高跨比、起拱、起坡的影响	421
7.1	结构性状	392	7.2.5.1	高跨比的影响	421
7.1.1	结构的性状	392	7.2.5.2	起拱、起坡的影响	423
7.1.2	影响结构性状的因素	392	7.2.6	荷载类型的影响	424
7.1.3	结构性状分析中坐标系的设置	393	7.2.7	边界约束的影响	426
7.2	矩形平面平板型网架结构静力性状	394	7.2.7.1	边界约束条件对结构静力性能的影响	426
7.2.1	矩形平板型网架内力及变形的一般规律	395	7.2.7.2	边界支承位置对结构静力的影响	427
7.2.1.1	均布荷载作用	395	7.3	单层球面网壳静力特性	428
7.2.1.2	集中荷载作用	396	7.3.1	引言	428
7.2.2	各种型式矩形平板型网架的静力性能	400	7.3.2	参数设置	429
7.2.2.1	两向正交正放网架	400	7.3.3	凯威特型球面网壳静力特性	430
7.2.2.2	两向正交斜放(有角偶柱)网架	402	7.3.3.1	节点位移分析	431
7.2.2.3	两向正交斜放(无角偶柱)网架	403	7.3.3.2	杆件内力分析	431
7.2.2.4	正放四角锥网架	405	7.3.3.3	荷载作用下结构的竖向变形	433
7.2.2.5	下承式正放四角锥网架	406	7.3.3.4	跨度对节点位移的影响	434
7.2.2.6	有边桁架下承式正放四角锥网架	407	7.3.4	LAMELLA 型球面网壳静力特性	434
7.2.2.7	抽空正放四角锥网架 ...	409	7.3.4.1	荷载作用下结构变形趋势	435
7.2.2.8	下承式抽空正放四角锥网架	410	7.3.4.2	跨度对节点位移的影响	436
			7.3.4.3	节点位移分析	436
			7.3.4.4	杆件内力分析	436
			7.3.5	凯威特型与 LAMELLA 型组合的单层球面网壳静力特性	439

7.3.5.1	荷载作用下结构变形趋势	439	7.4.4.1	型式3模型及其参数	467
7.3.5.2	跨度对节点位移的影响	440	7.4.4.2	型式3模型的分析结果	467
7.3.5.3	节点位移分析	440	7.4.5	型式4模型	469
7.3.5.4	杆件内力分析	440	7.4.5.1	型式4模型及其参数	469
7.3.6	SCHWEDLER型球面网壳静力特性	443	7.4.5.2	型式4模型的分析结果	470
7.3.6.1	荷载作用下结构变形趋势	444	7.4.6	型式5模型	472
7.3.6.2	跨度对节点位移的影响	444	7.4.6.1	型式5模型及其参数	472
7.3.6.3	节点位移分析	444	7.4.6.2	型式5模型的分析结果	473
7.3.6.4	杆件内力分析	445	7.4.7	型式6模型	475
7.3.7	不同型式的球面网壳结构的比较	447	7.4.7.1	型式6模型及其参数	475
7.3.8	矢跨比对单层球面网壳静力特性的影响	448	7.4.7.2	型式6模型两边支承的分析结果	476
7.3.9	集中荷载对单层球面网壳静力特性的影响	450	7.4.7.3	型式6模型四边支承的分析结果	479
7.3.9.1	荷载作用下结构变形分析	450	7.4.7.4	型式6模型两种边界约束结果比较	483
7.3.9.2	杆件内力分析	451	7.4.7.5	两种型式模型分析结果比较	484
7.3.10	边界条件对单层球面网壳静力特性的影响	453	7.4.8	型式7模型	485
7.4	单层柱面网壳静力特性	455	7.4.8.1	型式7模型及其参数	485
7.4.1	概述	455	7.4.8.2	型式7模型的分析结果	485
7.4.2	型式1模型	456	7.4.9	型式8模型	487
7.4.2.1	型式1模型及其参数	456	7.4.9.1	型式8模型及其参数	487
7.4.2.2	型式1模型两边支承的分析结果	457	7.4.9.2	型式8模型的分析结果	488
7.4.2.3	型式1模型四边支承的分析结果	460	7.4.10	型式9模型	489
7.4.2.4	型式1模型两种边界结果比较	463	7.4.10.1	型式9模型及其参数	489
7.4.3	型式2模型	464	7.4.10.2	型式9模型的分析结果	490
7.4.3.1	型式2模型及其参数	464	7.4.11	各种型式的性能比较	492
7.4.3.2	型式2模型的分析结果	465	7.4.12	长跨比对单层网壳性能的影响	493
7.4.4	型式3模型	467	7.4.13	边界约束对单层柱面网壳的影响	494
			7.4.13.1	拱支边界长度方向弹性约束对结构的影响	494

7.4.13.2	拱支边界拱跨方向线 刚度对结构的影响	495	8	工程实例	505
7.4.13.3	拱支边界处 Z 方向线 位移刚度对结构的影响	496	8.1	上海国际博览中心	505
7.4.13.4	XYZ 方向线位移刚 度对结构的影响	497	8.2	重庆袁家岗体育中心体育场 ...	507
7.4.13.5	拱支边界不同约束时 结构的 $P-W_{\max}$ 曲线	498	8.2.1	体育场概况	507
7.4.14	长度方向边界支承条件 对结构性能的影响	499	8.2.2	体育场屋面设计和分析 ...	508
7.4.14.1	长度方向边界线位移 刚度对结构性能的影响	500	8.2.3	体育场屋面施工过程	509
7.4.14.2	长度方向边界两种支承 条件下结构的 $P-W_{\max}$ 曲线比较	501	8.2.4	跳水、游泳馆概况	511
7.4.15	矢跨比对单层柱面网壳 的影响	501	8.2.5	跳水、游泳馆结构布置	513
7.4.15.1	长跨比为 3	502	8.3	佛山世纪莲体育中心	513
7.4.15.2	不同长跨比下矢跨比 对结构的影响	503	8.3.1	结构概况	513
			8.3.2	几何参数	514
			8.3.3	结构布置	515
			8.3.4	屋盖结构的实体模型	517
			8.4	广州国际会议展览中心	523
			8.4.1	工程概况与特点	523
			8.4.2	结构分析	524
			8.4.3	节点设计	525
			8.4.4	设计中的试验和研究	527
			8.5	昆明拓东体育场	530
			8.5.1	体育场概况	530
			8.5.2	结构特点	531
			参考文献		532