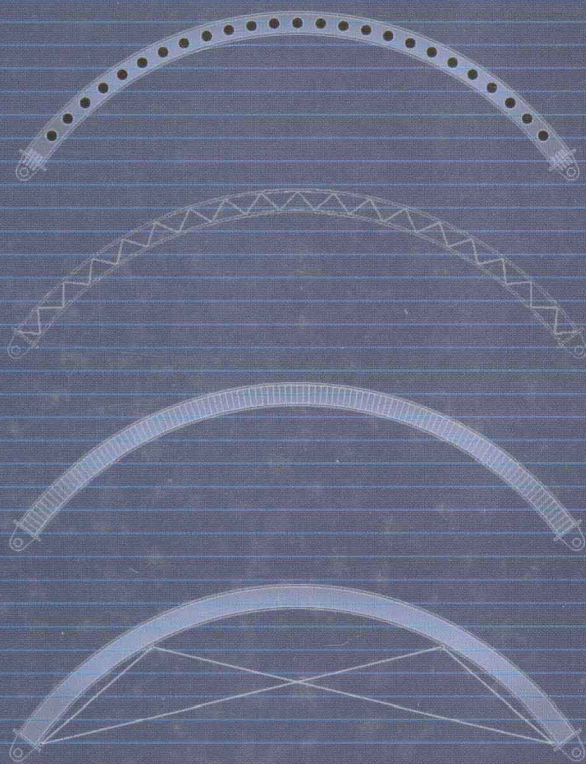


DESIGN FUNDAMENTALS
AND APPLICATION OF
CONTEMPORARY STEEL
ARCH STRUCTURES



现代拱形钢结构 设计原理与应用

郭彦林 窦超 著



科学出版社

现代拱形钢结构 设计原理与应用

郭彦林 窦超 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了拱形钢结构设计中涉及的关键问题,包括拱形钢结构的基本类型、受力特点和荷载效应分析、稳定性概念、稳定理论及设计方法、动力特性及抗震性能、特殊形式钢拱的稳定性能以及拱形钢结构的制作、安装和施工分析等,重点介绍了拱形钢结构平面内和平面外稳定理论和设计方法的研究现状及最新研究进展。本书的部分研究成果纳入了《拱形钢结构技术规程》(JGJ/T 249—2011),为工程设计中结构与节点选型、荷载效应分析、强度及稳定性计算、制作安装及工程验收等提供了指导。

本书可作为钢结构设计和施工人员的参考资料,也可供高等院校土木工程高年级本科生和结构工程专业研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代拱形钢结构设计原理与应用/郭彦林,窦超著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-038607-6

I. ①现… II. ①郭… ②窦… III. ①钢结构-结构设计 IV. ①TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 217122 号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:马英菊
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013年9月第一次印刷 印张:20 1/2

字数:469 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137154

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

拱是一种古老的结构形式,它以改直为曲的方法把直梁的受弯状态改变为受压状态,从而使石材结构得以跨越更大的空间。早在 1500 年前隋朝建成的赵州桥,跨度达到 37m,就是一个创纪录的杰出范例。进入近代后,钢筋混凝土和钢材成为结构工程的主要材料,拱形结构仍然以它的优良性能继续发挥作用,而且结构形式不断发展,跨度不断增大。

钢材的强度高,而且还在持续提高。钢构件的截面尺寸小,使钢拱结构的设计面临两个重要问题:保证稳定承载力和对内力进行二阶分析。钢拱的稳定问题有许多和直杆结构不同的特点:拱轴曲线的类型(圆弧、抛物线和悬链线等)和矢跨比的取值对它的性能有很大影响,而这些因素在直杆结构中并不存在;拱在轴线压力作用下的压缩变形会使拱的曲率和弯矩发生变化,也是拱结构特有的现象;拱肋接受荷载的方式不同,导致面外稳定计算需要区分荷载是否保向。所有这些特点导致拱结构稳定计算的复杂性,以致始终未能形成一套完整而成熟的稳定计算方法。

1991 年美国结构稳定研究会出版的《金属结构稳定·世界观点》第二版针对拱的稳定写到:“规范关于拱承载力的规定,应该涵盖各类拱结构的各个方面。当前还未建立起合理而细致的规则”。时隔 20 年后,局面仍然没有根本性的改变。本书的出版对填补这一空白做出一定贡献。全书重点论述钢拱的稳定性能、设计理论及方法,兼及它的动力特性、抗震性能和施工过程分析。稳定计算既包括面内和面外整体稳定,还涉及许多局部稳定问题。结构形式既有实腹拱,又有腹板开孔拱和桁架式拱。此外,书中还论述了索拱结构、拱墙结构和波形钢板拱,内容十分全面。

合理的设计方法奠基于对结构性能的深入了解,本书对此给予充分注意。拱结构一般不会仅承受弯矩,然而了解它在正、负弯矩作用下的不同响应,有助于掌控弯矩和压力共同作用下二者的相关关系。设计公式的精确度需要试验验证,本书建议的面内和面外稳定计算公式先和大挠度弹塑性有限元分析结果进行比较,后者又和试验结果做出比较,证明了建议公式的可靠性和适宜性。

本书除介绍国内外已有研究成果外,主要反映郭彦林教授带领几届博士生持续研究的成果。这些成果综合在一起形成了一本系统性强、论述深入的拱结构专著,反映我国学者在结构工程前沿辛勤耕耘的收获,值得钢结构从业人员一读。这本书也反映我国博士研究生教育的可喜成绩:既培养了人才,又推动了学科发展,并对经济建设提供了有益资料。

陈绍蕃

2013 年 7 月

前 言

拱形结构是一种古老而又独特的结构形式,其拱轴线的曲线形式与拱脚的水平推力使结构受力转化为以截面受压为主,从而提高了材料的承载效率。随着我国钢结构的迅速发展,拱形结构以实腹式截面钢拱、腹板开孔钢拱、钢管桁架拱及波形腹板钢拱等结构形式广泛应用在建筑结构与桥梁工程中。

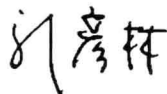
拱形钢结构的设计主要包括选型设计(轴线、拱脚、截面及矢跨比等)、整体稳定设计(平面内外稳定设计及面外支撑设计)、局部稳定设计以及抗风与抗震计算等。与直构件相比,拱形钢结构表现出的稳定问题十分突出且相当复杂,其稳定性和失稳机理受轴线形式、矢跨比、长细比、拱脚约束、截面形式、荷载条件、面外支撑等诸多因素影响。可以说,拱形钢结构的稳定性已不是构件层面的问题,而是结构层面的问题。

近十年来,作者的课题组对拱形钢结构稳定理论及设计方法开展了大量的研究工作,取得了系列研究成果。在这些研究工作的基础上,本书对拱形钢结构设计所涉及的关键问题进行了系统的阐述与总结,包括拱形钢结构的基本类型、受力特点和荷载效应分析、稳定性概念、稳定理论及设计方法、动力特性及抗震性能、特殊形式钢拱的稳定性能以及拱形钢结构的制作、安装和施工分析等,重点对拱形钢结构的平面内和平面外稳定理论和设计方法的研究现状及最新研究成果进行了介绍,旨在使读者能通过本书对拱形钢结构有更为全面和深入的了解。其中关于拱形钢结构稳定性设计的内容,既有理论研究又包括数值分析和试验研究,同时对国内外研究现状、成果与发展动态给出了较为全面和详细的论述。

书中的部分研究成果纳入了《拱形钢结构技术规程》(JGJ/T 249—2011),为工程设计中结构与节点选型、荷载效应分析、强度及稳定性计算、制作安装及工程验收等提供了指导。

书中吸纳了作者的课题组近年来对拱形钢结构的研究成果,包括研究生窦超、赵思远、郭宇飞、林冰、黄李骥、王高宁等的研究工作,也参考了同行的研究成果与论著。在本书的撰写过程中,澳大利亚新南威尔士大学 Y. L. PI 教授提出了许多宝贵意见,在此一并感谢。

由于作者的理论水平以及工程经验有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。



2013年7月

目 录

第 1 章 拱形结构的发展与现状	1
1.1 拱形结构的应用与发展	1
1.2 结构特点	7
1.3 结构设计的关键问题	12
1.3.1 结构体系选型	12
1.3.2 结构细部设计	13
1.3.3 结构稳定性设计	13
1.3.4 结构振动控制	14
1.3.5 地震作用及抗震设计	14
1.3.6 施工方案和施工控制	14
参考文献	15
第 2 章 拱形结构的基本类型、受力特点和荷载效应分析	17
2.1 引言	17
2.2 拱形结构的基本类型	17
2.2.1 结构形式	17
2.2.2 节点形式	19
2.3 拱形结构的基本受力特点	20
2.4 荷载及荷载组合	22
2.5 一阶与二阶分析	23
2.6 拱脚支承结构水平刚度的影响	26
2.7 组合体系拱桥	28
2.7.1 结构体系受力特点	28
2.7.2 移动荷载和影响线	30
参考文献	31
第 3 章 拱形钢结构稳定问题的基本概念及分类	33
3.1 引言	33
3.2 拱形钢结构的失稳类型	34
3.2.1 平面内失稳	34
3.2.2 平面外失稳	35
3.2.3 稳定问题分类	36
3.2.4 稳定分析方法	37
3.3 拱形钢结构的失稳机理	41
3.3.1 平面内稳定	42

3.3.2	平面外整体稳定	42
3.3.3	局部稳定	44
	参考文献	46
第4章	拱形钢结构线弹性屈曲理论	49
4.1	平面内屈曲荷载	49
4.1.1	平面微元拱段的平衡微分方程	50
4.1.2	几何方程	50
4.1.3	截面内力与变形的关系	50
4.1.4	圆弧拱的平面内屈曲方程	50
4.1.5	静水压力作用下的屈曲荷载	52
4.1.6	均布保向力作用下铰支拱的屈曲荷载	55
4.1.7	均布向心力作用下铰支拱的屈曲荷载	56
4.1.8	平面内屈曲荷载的比较和讨论	57
4.1.9	平面内屈曲的计算长度系数法	59
4.2	平面外屈曲理论	61
4.2.1	曲线构件微元段的一般平衡方程	62
4.2.2	均匀受压铰支圆弧拱的弹性屈曲荷载	65
4.2.3	均匀受弯铰支圆弧拱的弹性屈曲荷载	70
4.2.4	两端固支拱的弹性屈曲	72
4.2.5	不等拱脚端弯矩作用下圆弧拱的弹性屈曲荷载	80
4.2.6	压弯圆弧拱的弹性屈曲性能	83
4.3	钢管桁架拱的线弹性屈曲	86
4.3.1	桁架结构的截面刚度	86
4.3.2	面内弹性屈曲荷载	91
4.3.3	平面外弹性屈曲荷载	92
	参考文献	98
第5章	拱形钢结构平面内稳定承载力设计方法	100
5.1	引言	100
5.2	平面内稳定承载力的研究现状	101
5.3	有限元计算方法	102
5.3.1	有限元模型	102
5.3.2	几何初始缺陷及残余应力	103
5.4	平面内弹塑性稳定性能	103
5.4.1	整体稳定性能	103
5.4.2	局部稳定性能	107
5.4.3	平面内失稳破坏机理	111
5.5	实腹式截面钢拱的平面内稳定承载力设计方法	113
5.5.1	均匀受压拱	113

5.5.2	压弯钢拱	118
5.5.3	板件局部稳定设计	120
5.6	腹板开孔铰支圆弧钢拱	121
5.6.1	腹板开孔钢拱的孔洞优化	121
5.6.2	腹板开孔钢拱的等效计算模型	122
5.6.3	局部稳定性设计	123
5.6.4	稳定承载力 $N-M$ 相关设计公式	124
5.7	铰支圆弧钢管桁架拱	125
5.7.1	钢管桁架拱的换算长细比	125
5.7.2	弹塑性稳定承载力设计方法	126
5.8	平面内稳定承载力的试验研究	130
5.8.1	实腹式截面钢拱	131
5.8.2	钢管桁架拱	140
5.9	索拱结构	153
5.9.1	结构性能	153
5.9.2	车辐拱	156
	参考文献	161
第 6 章	拱形钢结构平面外稳定承载力设计理论	163
6.1	引言	163
6.2	平面外稳定承载力问题的研究现状	164
6.2.1	无支撑钢拱的稳定理论	164
6.2.2	有面外支撑钢拱的稳定设计方法	167
6.3	钢拱的平面外稳定承载力设计理论和方法	168
6.3.1	有限元数值方法	168
6.3.2	均匀受压圆弧拱的平面外稳定承载力设计	170
6.3.3	拱脚端部弯矩作用下圆弧拱的平面外稳定承载力	174
6.3.4	压弯圆弧拱的平面外稳定承载力设计方法	182
6.4	钢管桁架拱的平面外稳定承载力	192
6.4.1	均匀受压桁架拱的平面外稳定	193
6.4.2	均匀正弯矩作用下桁架拱的平面外稳定	194
6.4.3	相关稳定性	195
6.4.4	一般荷载作用下的稳定承载力	199
6.5	有面外支撑钢拱的平面外稳定性能及承载力	202
6.5.1	弹性稳定性能及支撑刚度	202
6.5.2	平面外弹塑性稳定分析的几何初始缺陷	210
6.5.3	面外支撑非均匀布置的钢拱平面外弹性屈曲性能	215
6.6	拱墙结构平面外失稳机理与设计研究	222
6.6.1	拱墙结构的失稳机理	222

6.6.2	拱墙结构的弹性屈曲分析	223
6.6.3	某火车站站房拱墙结构	225
6.7	实腹式截面拱的平面外稳定承载力试验	228
6.7.1	试验装置及参数	228
6.7.2	平面外稳定承载力试验结果	235
6.7.3	数值计算与试验结果分析	241
	参考文献	244
第7章	拱形钢结构的动力特性及抗震性能	249
7.1	引言	249
7.2	拱形钢结构的自振特性	249
7.2.1	平面内振动	249
7.2.2	空间振动	251
7.3	拱形钢结构的抗震性能	252
7.3.1	地震作用	252
7.3.2	地震作用下拱形钢结构的动力响应	253
	参考文献	259
第8章	波形钢拱结构的稳定性能	260
8.1	引言	260
8.2	波形拱板结构	260
8.2.1	组成与成型过程	260
8.2.2	受力特性和破坏机理	261
8.2.3	计算和设计方法	263
8.2.4	波形拱板试验研究	264
8.3	波浪腹板钢拱	265
8.3.1	波浪腹板构件的应用背景	265
8.3.2	波浪腹板构件的受力特点	267
8.3.3	波浪腹板钢拱的受力及失稳机理	270
	参考文献	275
第9章	拱形钢结构的制作、安装与施工分析	276
9.1	引言	276
9.2	基本制作方法及工艺要求	276
9.3	复杂形式的钢拱制作工艺	277
9.3.1	腹板开孔钢拱	277
9.3.2	波浪腹板钢拱	278
9.4	基本安装方法及技术要求	279
9.5	施工方案与施工过程分析	280
9.6	工程实例	282
9.6.1	工程背景	282

9.6.2 施工方案比选	283
9.6.3 两种施工方案对结构成型内力的影响	285
9.6.4 一体化有限元结构分析模型及算法实现	287
参考文献	292
附录 A 拱形钢结构拱脚推力计算系数	294
附录 B 实腹截面钢拱平面内稳定曲线参数	295
附录 C 实腹截面钢拱平面内稳定系数	297
附录 D 圆弧形铰支钢管桁架拱平面内稳定曲线的系数	307
附录 E 圆弧形铰支钢管桁架拱平面内稳定系数	308
附录 F 拱形钢结构制作及安装偏差限值规定	314

第 1 章 拱形结构的发展与现状

1.1 拱形结构的应用与发展

拱形结构是一种古老的结构形式，其发展历史伴随着人类社会文明的进步。从力学角度看，结构的发展都遵循着一个基本的客观规律——将外荷载产生的弯矩转化为构件的轴向拉压力，从而不断地提高结构的承载效率^[1]。拱是结构与建筑的完美结合——在竖向荷载作用下支座产生水平推力，凭借其曲线拱轴线将弯矩转化为轴压力，实现空间的跨越，从而与梁柱等直构件在受力性能上存在本质差别，因此也被称为推力结构。拱形结构在提供良好建筑效果及充足内部空间的同时，以其较高的承载效率广泛应用于现代大跨空间建筑结构和桥梁结构中。建筑材料、结构形式及设计计算理论、建造技术的革新和应用，使得拱形结构不断地向前发展。

首先在建筑材料方面，拱形结构经历了由圬工拱（生土拱、砖石拱）到钢筋混凝土拱（钢-混凝土拱）及钢拱的发展过程。如今在建筑结构领域，大多采用钢拱结构，而在桥梁结构领域中钢筋混凝土拱、钢管混凝土拱及钢拱均较为常见。圬工拱主要依靠自身重量在拱肋中产生较大的轴力作用，从而使截面处于轴压状态来抵抗外荷载，因而其自重大、跨越能力较小。典型代表为图 1.1 (a) 所示的我国赵州桥，跨度约 37.0m，矢高约 7.23m，为世界首座敞肩式单孔弧形石拱桥。2000 年建成的山西晋城丹河新桥，跨度达 146m，矢跨比约 1/4.5，是目前世界上跨度最大的石拱桥 [图 1.1 (b)]。



(a) 赵州桥

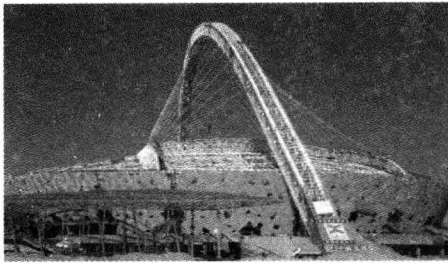


(b) 丹河新桥

图 1.1 石拱桥

钢筋混凝土拱（钢-混凝土拱）以抗压强度高的混凝土材料为主，配置承受拉力的钢骨架，二者共同作用，较大地提高了跨越能力。我国重庆万州长江大桥，跨度约 420m，矢跨比约 1/5，拱肋采用钢管混凝土劲性骨架外包混凝土，是世界跨度最大的钢-混凝土组合拱桥。但总体来看，钢筋混凝土拱由于自重大，当跨径进一步增大时施工难度增大、经济性降低。随着钢结构的发展，拱形钢结构因其自重轻、材料强度高及抗拉性能好、结构效率更高、造型美观多样、施工安装快速方便等优点，在建筑结构和桥

梁工程中得到了广泛应用。例如鄂尔多斯东胜体育场 [图 1.2 (a)], 其主结构为悬链线形的矩形截面立体钢管桁架拱, 通过两侧的拉索悬吊着屋盖的部分重量, 主拱整体倾斜 6° , 跨度约 330m, 矢跨比约 0.4。图 1.2 (b) 所示的重庆朝天门大桥采用中承式钢管桁架拱, 主拱跨度约 552m, 矢跨比约 0.23, 是世界上最大跨度的钢拱桥。



(a) 鄂尔多斯东胜体育场



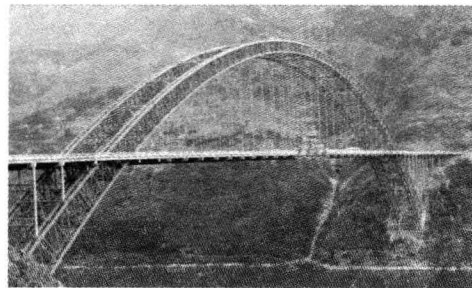
(b) 重庆朝天门大桥

图 1.2 拱形钢结构

虽然拱形钢结构具有上述优点, 但其耐候防腐及稳定问题突出、细部构造复杂, 导致造价相对较高。例如对于大型钢箱截面, 为保证其板件局部稳定, 需要选用较大板厚或设置大量加劲肋。因此, 近些年来钢管混凝土拱在桥梁领域得到了迅速发展。在钢管混凝土拱中, 一方面混凝土受到钢管约束使其强度和延性得到提高, 另一方面填充混凝土延缓或避免了外包钢管的局部屈曲, 同时钢管的劲性骨架作用使其施工比混凝土拱更为方便, 因此具有较好的经济效益; 但自重过大仍是其与混凝土拱共有的缺点。图 1.3 (a) 所示的旺苍东河大桥是我国首座钢管混凝土拱桥, 主拱采用实腹式哑铃形断面, 跨度约 115m, 矢跨比约 $1/6$ 。巫山长江大桥 [图 1.3 (b)] 是目前世界上跨度最大的钢管混凝土拱桥, 主拱为矩形截面的桁架拱, 弦杆填充混凝土, 跨度约 460m, 矢跨比约 0.26。



(a) 旺苍东河大桥

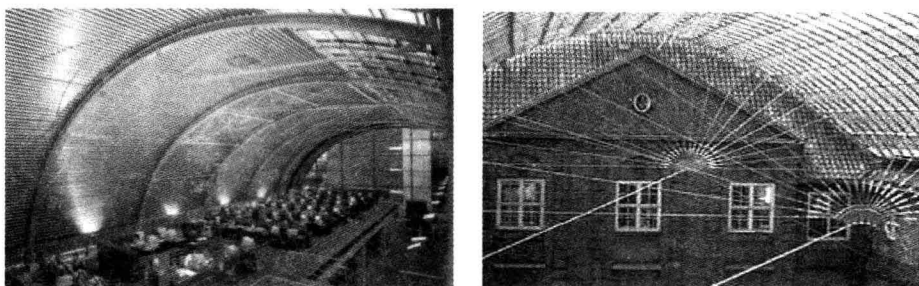


(b) 巫山长江大桥

图 1.3 钢管混凝土拱桥

在结构形式方面, 单就拱肋而言, 钢筋混凝土拱多为矩形截面或多室箱形截面, 钢管混凝土拱肋一般采用圆管、矩形管或哑铃形截面。而拱形钢结构由于加工制作灵活, 具有实腹式截面拱 (包括腹板开孔拱、波形腹板拱)、桁架拱以及索拱等多种形式。腹板开孔拱继承了拱和开洞构件的特点, 除了结构承载效率较高外, 常用于管线通道或结

构造型和通透性有要求的情况。普通实腹截面钢拱在加工过程中采用冷弯成型时,平腹板将承受拉压力并产生塑性变形,导致材性劣化及局部屈曲等缺陷,因而出现了波形腹板钢拱。波形腹板的面内轴向拉压刚度很小,因此易于在板平面成型为拱形板件,加工精度和质量容易控制。此外,由于波浪腹板的面外刚度很大而在运输安装过程中不易变形,腹板可以做得高而薄,从而节约材料^[2~5]。钢管桁架拱结合了拱与桁架的双重优势,通过格构的方式将拱轴线的弯矩转化为弦杆的轴力,因而比实腹式截面拱具有更高的承载效率,常用于超大跨度空间结构中。此外,针对钢拱结构对反对称初始缺陷敏感及半跨荷载作用下承载力低、刚度弱的问题,在拱肋中增加拉索或撑杆而形成索拱结构。索拱可根据设计需要由拉索、撑杆或索盘与其他任何形式的拱肋进行组合,利用拉索的牵制作用或撑杆的支承作用,来有效提高结构的整体刚度及承载力、降低钢拱的缺陷敏感性、减小支座推力,甚至可以消除钢拱的整体失稳而转变为由强度控制其结构设计。但索拱结构中拉索的增加将减小拱的内部空间(净矢高);因此需根据使用功能合理选择。图1.4(a)所示的英国泰晤士河谷大学学术资源中心是弦张式索拱的典型应用,而图1.4(b)的德国汉堡历史博物馆玻璃屋顶采用了车辐式索拱结构。



(a) 泰晤士河谷大学学术资源中心

(b) 汉堡历史博物馆玻璃屋顶

图 1.4 索拱结构

与建筑结构中拱肋本身作为主要承力构件的情况不同,桥梁结构中的拱桥一般由拱肋、桥面、吊索(杆)或立柱以及拱肋间横向风撑等形成整体结构体系,桥面由横梁、纵梁、桥面板和(或)拉杆组成。拱桥按照组成方式的不同可分为上承式、中承式和下承式三种,按照对基础的作用又可分为有推力拱桥和无推力拱桥,如图1.5所示。其中上承式拱桥大部分属于有推力结构体系,需建造在基础条件较好的场地,并且所需高程(从拱脚到桥面)较大,因此从现有工程来看主要应用在山区等地形地貌复杂的地区。中承式和下承式拱适用于城市道路及平原地区,可依靠桥面的纵梁(拱梁组合桥)或与桥面结构分离的水平拉杆(拉杆拱桥)来承担拱的水平推力,设计成无推力拱桥以减轻基础的负担。总体来看,钢筋混凝土拱桥中以上承式拱居多,而钢拱桥梁中则以中承式和下承式拱为主。根据统计资料^[6],我国45座钢拱桥中,上承式拱3座,占总数的6.7%;中承式拱28座,占总数的60.0%;下承式拱12座,占总数的26.6%;另外,双层式拱3座,占总数的6.7%。此外,拱桥通常采用双拱肋的设计方案,拱肋之间在面外横向(即垂直于拱轴线平面)有一字形、K形或X形风撑相连接。还可采用双拱肋向内斜靠的“提篮拱”,以增加结构的面外稳定性。当然,如果设计允许也可采用单

拱吊挂桥面的形式，或两拱肋之间不设风撑，以达到开阔视线的效果。此外对于拱桥结构体系，拱肋、桥面以及吊杆或立柱之间的连接关系和相对刚度变化对荷载的分配和各部分的受力有较大影响，合理设计使之协同作用，可对结构的内力、刚度、稳定性起到明显的改善作用，从而优化整体受力性能。对于中、下承式拱桥中的吊索，要求具有稳定的弹性模量（低松弛）、良好的耐疲劳和抗腐蚀能力。吊索的布置形式有平行式和斜交叉式等，其中平行式吊索的构造简单、施工方便，为大多数桥梁所采用；斜交叉式吊索能够加强拱肋与桥面纵梁的共同作用，提高结构的整体刚度，降低拱肋和纵梁的弯矩幅值，减小吊索连接部位的应力集中现象，同时便于维护换索。对于桥面而言，其结构整体性即防局部倒塌破坏能力，以及车桥系统振动控制，是设计中的两个重点问题。

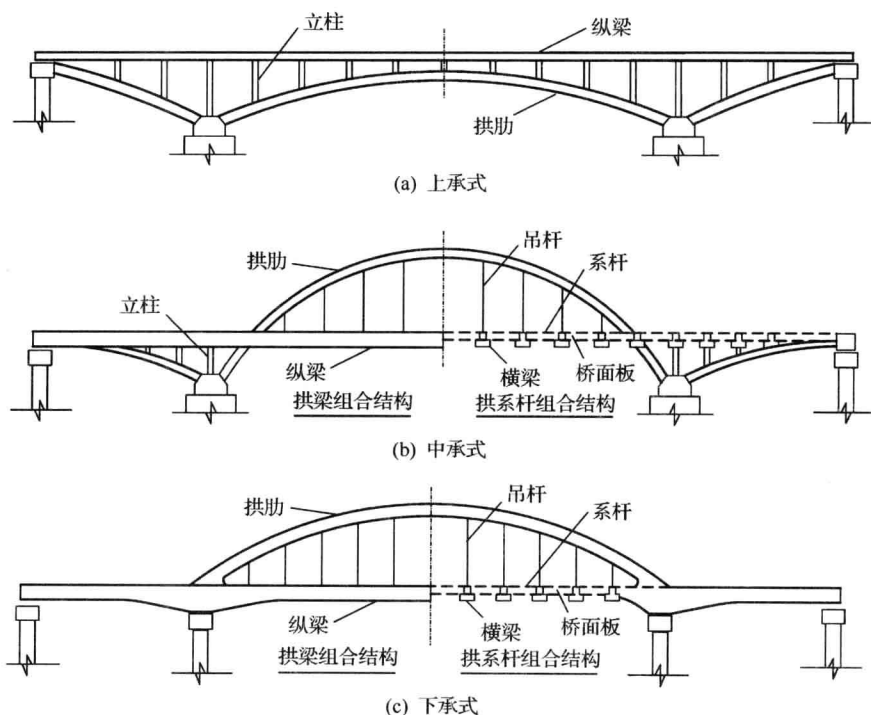


图 1.5 拱形桥梁结构示意图

图 1.6 (a) 所示为美国新河谷大桥，采用上承式变截面钢管桁架拱，主拱跨度约 518m，拱肋通过立柱支撑着上部桁架梁，拱脚立于两侧基岩之上。图 1.6 (b) 所示的上海卢浦大桥是典型的中承式钢结构拱桥，主拱跨度约 550m，由内倾的提篮式钢箱拱肋、正交异性桥面板、倾斜钢吊杆、拱上立柱及拱肋之间横向一字形和 K 形风撑组成，并在主桥的纵向布置了水平拉杆，以平衡拱肋的水平推力，形成无推力体系，以适应上海的软土地基。图 1.6 (c) 的重庆菜园坝大桥同样为中承式拱桥，由约 420m 中跨的拉杆主拱和两边跨各约 112m 的预应力混凝土三角形刚架结构组成三跨无推力刚构-拉杆拱桥。其主拱在桥面以上采用钢箱截面拱肋，在桥面以下则采用钢筋混凝土拱肋，降低造价且利于抵抗船舶撞击作用，二者在桥面部位对接形成混合结构。与上述平行吊杆的

拱桥不同,图 1.6 (d) 所示的德国费马恩大桥为下承式拱桥,采用了吊杆斜向交叉布置的尼尔森体系。



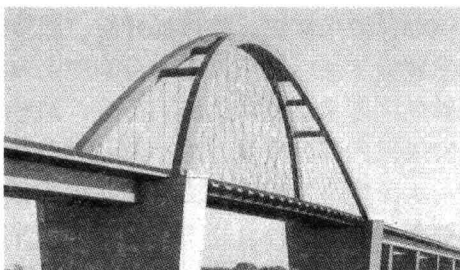
(a) 美国新河谷大桥



(b) 上海卢浦大桥



(c) 重庆菜园坝大桥



(d) 德国费马恩大桥

图 1.6 拱形桥梁工程

伴随着新材料和新结构形式的出现,相应的设计理论和建造技术也亟需进一步发展。在设计理论方面,随着现代计算机技术的迅速发展以及大型结构分析软件的普及使用,通用有限元方法使得针对拱形结构的计算能力得到大幅提升,能够解决很多结构设计中的具体问题。但是在深入掌握结构受力性能及失效机理的研究基础上,提出相应的结构计算与设计理论,提炼得到反映有关参数影响规律的简化设计方法和设计公式,无论在理论创新还是实践应用方面都具有重要意义,能够有力地促进拱形结构的推广和发展。总体来看,拱形结构的设计理论主要包括以下几个方面:①结构体系的概念设计与创新研究;②结构稳定性理论及设计方法研究;③结构动力性能研究。首先,结构体系的概念设计与创新是一个涵盖面广且十分重要的内容,直接决定了拱形结构未来的发展活力。具体到细节包括结构形式的创新,如从单拱结构到拉杆拱和索拱、从平行拱肋到提篮式拱、从单一的混凝土或钢结构到组合结构等,以及细部节点的创新,即新型连接节点、活动及限位节点等。此外还有结构抗灾变能力方面的创新,如耗能元件设计、减震隔震设计等。其次,随着高性能、高强度材料的应用,拱的稳定问题愈加突出,成为结构设计中的关键因素。线性稳定理论以线性化的方法求解临界荷载,以掌握结构失稳的主要影响参数;非线性稳定理论能够跟踪考察结构屈曲前变形的影响以及屈曲后性能,揭示其实际破坏机理及实际承载能力。对实际结构设计而言,考虑几何大变形、材料弹塑性的稳定承载力分析,并在此基础上提炼出稳定承载力计算的实用设计方法具有更直接的实践指导意义。再次,现代拱形结构的跨度不断增大,其振动问题不可忽视。

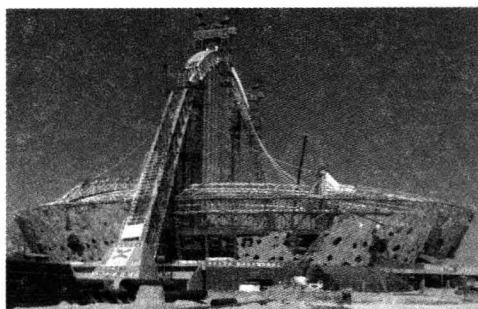
例如大型桥梁结构中移动车辆与结构自身的车桥耦合振动问题、大型拱形结构的地震反应问题以及动力失稳问题等,都需要对拱形结构的振动特性以及在典型动力荷载下的动力响应进行研究并提出相应设计方法。必须看到,以上三点研究内容是相互联系、相辅相成的:只有真正把握了拱形结构的受力特点、稳定性能和动力特性,才能在结构体系层面上有的放矢地进行概念设计与创新;只有在结构体系中有明确的概念设计,才能使得拱形结构从根本上具有实现优良受力性能的可能。

拱形结构体系的大型化和复杂化给其安装就位带来诸多挑战,基于大量拱形结构的工程建设,一系列建造技术应运而生。总体来看,建造技术包括自架设法和非自架设法两大类。自架设法即不需要或少采用辅助施工设施或临时结构来进行拱的安装,例如逐步悬臂施工法,先前安装完毕的构件段可作为将要安装构件段的支撑体系,即通过悬臂单元的不断延伸最终形成整体结构。非自架设法借助临时辅助结构进行主体结构的安装,例如分段吊装法、整体提升法、旋转起扳法、转体施工法等。在各种施工方法中,逐步悬臂施工法适用于拱肋本身刚度比较大的桁架拱,即先前安装的悬臂桁架拱段要具有足够的刚度来支持后续施工荷载,如悉尼港大桥;也可使用简单辅助措施如拉索来承受悬臂拱段的部分重量,减小其悬伸长度,如美国狱门桥 [图 1.7 (a)]。对于建筑结构中的大跨度拱形结构,当有充足的作业面时,可采用分段吊装法,如图 1.7 (b) 所示的鄂尔多斯东胜体育场主拱的安装。此方法操作性强,易于控制;但支撑胎架用钢量较大,相邻拱段之间对接困难,高空焊接作业量大,误差积累效应大。针对上述问题,设计施工人员提出了整体提升法。澳门多功能体育馆的屋盖主桁架拱采用将主拱在跨中分割、跨中同步提升及两拱脚对拉的施工方案^[7] [图 1.7 (c)],通过计算给出提升点竖向位移与拱脚水平位移的最佳协调比例,保证桁架拱与塔架柱的受力和变形控制在安全范围内。对于在拱下没有足够施工作业面的情况,旋转起扳法是一个可供选择的安装方法,如图 1.7 (d) 所示。这种方法具有自动化程度高、施工效率高、减小施工误差和装配内力等优点。在起扳过程中,需要建立一个由斜拉起吊索、A 形支承架以及背索等形成的自适应平衡体系。在 A 字形架顶部,安装穿心式液压千斤顶并通过千斤顶张拉斜拉起吊索,实现钢拱的整体旋转起扳,直至达到设定位置。对于跨越河流、山谷的拱形桥梁,近些年来旋转施工法应用较多 [图 1.7 (e)]。此方法将在障碍物上空的作业转化为在岸上或近地面作业,具有对交通影响小、施工一体化程度高的优点。广州丫髻沙大桥便在分段吊装、整体浮运吊装和转体施工等备选方案中选定了竖转加平转的转体施工方案,其技术先进、安全度高、工期短,取得了良好的社会和经济效益。

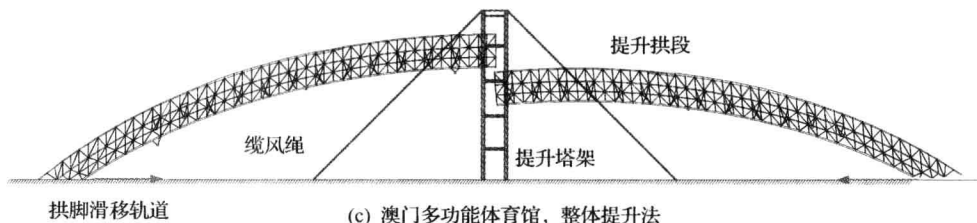
除拱形结构的建造技术本身外,与之配套的施工分析方法和控制理论也受到了人们的高度重视。安装就位是一个结构不断产生和生长、连接和就位的动态过程,不同施工方法导致的内力和变形发展变化过程、竣工时刻结构中的锁定内力有较大不同^[8]。例如拱形结构悬臂施工中的合龙前后、分段吊装施工中的拆撑前后等,施工中的受力体系和受力状态往往与一次成型的结构设计状态存在显著的差异。施工分析方法和施工控制理论实现了施工过程的可控性,其主要目的在于:①选择适当的施工方案,在保证安全性、经济性和方便性的同时,使得结构在施工过程及竣工完成时的受力最为有利。②确保在施工过程中,结构在不利工况作用下安全可靠。③把握结构竣工状态的锁定内力。



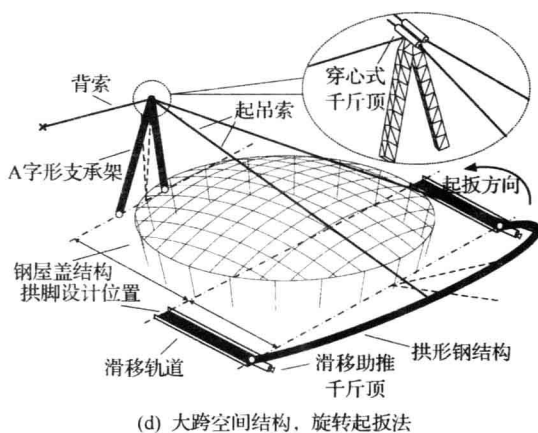
(a) 美国狱门桥, 悬臂施工法



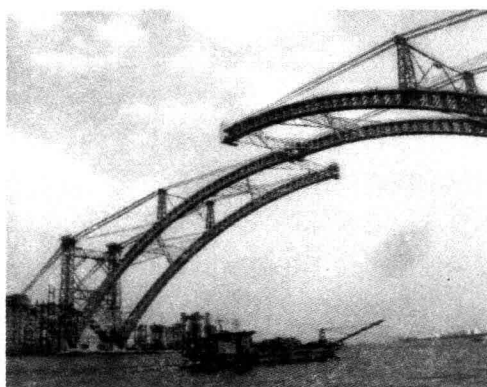
(b) 鄂尔多斯东胜体育场, 分段吊装法



(c) 澳门多功能体育馆, 整体提升法



(d) 大跨空间结构, 旋转起扳法



(e) 广州丫髻沙大桥, 转体施工法

图 1.7 拱形结构的施工建造技术

④准确控制结构位形(线形), 确保顺利对接或合龙等, 保证竣工形态与设计位形吻合。施工计算与施工控制的疏忽可能导致施工阶段存在安全隐患、结构无法顺利安装、竣工状态的內力和位形不满足设计要求, 或累积过大的附加內力, 形成巨大安全隐患潜伏在结构之中。

1.2 结构特点

推力结构是拱的主要受力特征, 即利用其曲线拱轴线将外荷载产生的弯矩转化为轴向压力, 因此在拱轴线平面内的竖向荷载尤其是全跨竖向荷载作用下的弯矩远小于同跨