



拱坝体形优化设计 ——模型、方法与程序

Shape Optimization of Arch Dams:
Model, Method and Program



■ 孙林松 著



科学出版社

拱坝体形优化设计

——模型、方法与程序

孙林松 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在介绍拱坝的发展过程及体形优化设计研究现状的基础上,详细论述了拱坝体形优化设计的一般模型与方法、拱坝体形多目标优化设计、拱坝体形稳健优化设计以及考虑拱坝结构非线性特征的体形优化设计;介绍了拱坝体形优化设计软件 ADSO 的使用方法。

本书可供拱坝设计人员、研究人员使用,也可作为高等院校相关专业本科生、研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

拱坝体形优化设计:模型、方法与程序/孙林松著. —北京:科学出版社, 2017.10

ISBN 978-7-03-054734-7

I. ①拱… II. ①孙… III. ①拱坝-设计-研究 IV. ①TV642.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 245438 号

责任编辑:李涪汁 沈 旭/责任校对:彭 涛

责任印制:张克忠/封面设计:许 瑞

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年10月第一次印刷 印张:8 3/4

字数:176 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

拱坝是水利工程中最重要的坝型之一，它以结构合理与体形优美著称。拱坝体形设计是拱坝设计中具有战略意义的一个方面，它对拱坝的安全性和经济性有着重要的影响。拱坝体形优化设计是利用最优化方法与计算机相结合，寻求在特定设计条件下拱坝的最优体形。随着我国拱坝建设的发展，拱坝体形优化技术在拱坝设计中得到了广泛的应用，有力地提高了拱坝设计质量与效率。尤其是近年来，结合我国水电开发中的一批高拱坝所开展的体形优化研究，使我国在拱坝设计理论方面处于世界领先地位。

作者 10 余年来一直从事拱坝体形优化设计方面的研究，本书系统介绍了作者在这方面的研究成果，以期与从事拱坝设计与研究的专家学者共同切磋。

本书的第 1 章介绍了拱坝的发展过程及体形优化设计研究现状；第 2 章介绍了拱坝体形优化设计的一般模型与方法，包括拱坝体形优化设计模型的建立、加速微种群遗传算法以及三次样条线型拱坝体形优化设计等；第 3 章介绍了拱坝体形多目标优化设计模型以及基于模糊理论、灰色理论和博弈论的优化方法；第 4 章讨论了考虑基础变形模量不确定性的拱坝体形稳健优化设计，主要包括最大有限元等效应力的优化解法、拱坝体形稳健可行性优化以及基于应变能的拱坝稳健优化等；第 5 章介绍了考虑结构非线性的拱坝体形优化设计，主要包括拱坝结构非线性分析的线性互补-有限元方法和基于整体安全度的拱坝体形优化设计以及开裂深度约束下的拱坝体形优化设计；第 6 章介绍了拱坝体形优化设计软件 ADSO 的使用方法。

本书的相关研究工作得到了国家自然科学基金项目(90410011、51279174)以及江苏省高校优势学科建设工程资助项目的资助，本书的出版得到扬州大学出版基金的资助，作者在此一并表示衷心的感谢。作者还要特别感谢河海大学博士生导师王德信教授，多年来王老师对作者的科研工作一直给予极大的关心与帮助。

另外，作者还要感谢自己的研究生张伟华、孔德志、杜峰，他们也参与了相关的研究。

限于作者水平及研究深度，书中难免有不当之处，恳请读者及同行专家批评指正。

孙林松

2017年6月于扬州

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 拱坝建设的历史	2
1.2 拱坝体形的发展	4
1.3 拱坝体形优化设计研究进展	5
参考文献	7
2 拱坝体形优化设计模型与方法	9
2.1 拱坝体形的几何描述	9
2.1.1 拱坝几何模型的构造方法	9
2.1.2 拱冠梁的几何描述	10
2.1.3 水平拱圈的几何描述	11
2.2 拱坝体形优化设计数学模型	14
2.2.1 设计变量	14
2.2.2 目标函数	15
2.2.3 约束条件	15
2.2.4 数学模型及求解	17
2.3 结构优化的加速微种群遗传算法	18
2.3.1 遗传算法的基本组成	18
2.3.2 加速微种群遗传算法	21
2.4 三次样条线型拱坝体形优化设计	27
2.4.1 三次样条线型拱圈的构造	27
2.4.2 三次样条线型拱坝体形优化设计模型	30
2.4.3 工程算例	30
参考文献	33
3 拱坝体形多目标优化设计	35
3.1 拱坝多目标优化设计的数学模型	35
3.1.1 多目标优化问题的一般描述	35
3.1.2 拱坝优化的多目标函数	35
3.1.3 多目标优化问题的一般解法	36

3.2	基于模糊贴近度的拱坝体形多目标优化设计	38
3.2.1	模糊集与模糊贴近度	38
3.2.2	多目标优化的模糊贴近度解法	40
3.2.3	工程算例	41
3.3	基于灰色关联度的拱坝体形多目标优化设计	45
3.3.1	灰色系统与灰色关联度	45
3.3.2	多目标优化问题的灰色关联度解法	46
3.3.3	工程算例	47
3.4	基于博弈论的拱坝体形多目标优化	49
3.4.1	多目标优化的合作博弈模型与 Nash 仲裁解法	49
3.4.2	工程算例	49
	参考文献	51
4	拱坝体形稳健优化设计	53
4.1	基础变形模量不确定条件下的拱坝最大有限元等效应力	53
4.1.1	有限元等效应力计算	53
4.1.2	计算拱坝最大有限元等效应力的最优化模型	56
4.1.3	工程算例	58
4.2	考虑基础变形模量不确定性的拱坝稳健可行性优化	62
4.2.1	稳健优化设计与稳健可行性	62
4.2.2	考虑基础变形模量不确定性的拱坝体形稳健可行性优化设计模型	64
4.2.3	工程算例	64
4.3	基于应变能的拱坝体形稳健优化设计	67
4.3.1	基于应变能的拱坝体形稳健优化模型	67
4.3.2	坝体应变能对基础变形模量的灵敏度	69
4.3.3	工程算例	70
	参考文献	71
5	考虑结构非线性的拱坝体形优化设计	73
5.1	拱坝弹塑性有限元分析的线性互补方法	73
5.1.1	弹塑性分析的基本方程	73
5.1.2	弹塑性问题的互补变分原理	77
5.1.3	有限元离散与线性互补模型	80
5.2	拱坝横缝的线性互补模型与方法	89
5.2.1	横缝接触条件与本构模型	89
5.2.2	接触问题的增量描述与互补虚功方程	92

5.2.3	有限元离散与线性互补模型	94
5.3	基于整体安全度的拱坝体形优化设计	98
5.3.1	拱坝整体安全度分析方法	98
5.3.2	考虑整体安全度目标的拱坝体形优化设计	101
5.4	开裂条件下的拱坝体形优化设计	104
5.4.1	拱坝开裂分析的超级有限单元法	104
5.4.2	考虑开裂深度约束的拱坝体形优化设计	106
	参考文献	108
6	拱坝体形优化设计软件 ADSO 使用指南	110
6.1	软件结构与功能	110
6.2	软件使用方法与步骤	112
6.2.1	工程模块	113
6.2.2	初始体形参数模块	113
6.2.3	有限元网格剖分参数模块	116
6.2.4	材料参数模块	119
6.2.5	荷载工况模块	122
6.2.6	体形优化参数模块	125
6.2.7	功能选择模块	129
6.2.8	帮助模块	130
	参考文献	131

1 绪 论

拱坝是嵌固于基岩的空间壳体结构挡水建筑物，在平面上呈凸向上游的拱形，它借助拱的作用将水压力全部或部分传给河谷两岸的基岩。与重力坝相比，拱坝的稳定主要依靠两岸坝肩岩体的作用，而不是全靠坝体的重量来维持稳定。拱圈主要以受压为主，可充分利用混凝土等筑坝材料抗压性能好的特点。因此，拱坝是一种经济性和安全性都很好的坝型。根据国际大坝委员会的统计资料，目前全世界 15m 以上的大坝共有 58519 座，其中拱坝 2319 座，约占 4%；但 200m 以上的大坝中，近一半采用了拱坝坝型^[1]。表 1.1 给出了世界坝高前 20 座已建大坝。

表 1.1 世界坝高前 20 座已建大坝

序号	坝名	国家	最大坝高/m	坝型	建成年份
1	锦屏一级	中国	305	拱坝	2014
2	努列克 (Nurek)	塔吉克斯坦	300	土坝	1980
3	小湾	中国	294.5	拱坝	2012
4	溪洛渡	中国	285.5	拱坝	2015
5	大迪克桑斯 (Grande Dixence)	瑞士	285	重力坝	1962
6	因古里 (Inguri)	格鲁吉亚	272	拱坝	1980
7	瓦依昂 (Vajont)	意大利	262	拱坝	1959
8	糯扎渡	中国	261.5	堆石坝	2015
9	奇柯阿森 (Chicoasén)	墨西哥	261	土坝	1981
10	特赫里 (Tehri)	印度	260.5	土坝	1990
11	莫瓦桑 (Mauvoisin)	瑞士	250	拱坝	1991 加高
12	拉西瓦	中国	250	拱坝	2010
13	德里内尔 (Deriner)	土耳其	247	拱坝	2004
14	阿尔伯托·里拉斯 (Alberto Lleras)	哥伦比亚	243	堆石坝	1989
15	麦卡 (Mica)	加拿大	243	土坝	1972
16	奇比 (Gibi III)	埃塞俄比亚	243	重力坝	2013
17	萨扬舒申斯克 (Sayano-Shushenskaya)	俄罗斯	242	重力拱坝	1985
18	二滩	中国	240	拱坝	1999
19	埃斯梅拉达 (La Esmeralda)	哥伦比亚	237	堆石坝	1975
20	奥罗维尔 (Oroville)	美国	235	土坝	1968

1.1 拱坝建设的历史

人类修建拱坝具有悠久的历史,最早可追溯至古罗马时期^[2]。公元前 1 世纪修建于法国的鲍姆(Vallon de Baume)拱坝是目前发现的最古老的拱坝,坝高 12m,坝顶弧长 18m。3 世纪修建于葡萄牙的蒙特诺沃(Monte Novo)拱坝,坝高 5.7m,长 52m。成吉思汗西征占领了中东地区后,蒙古人在伊朗也修建了一些拱坝,如 1300 年建成的凯巴(Kebar)拱坝,坝高 26m;1350 年建成的库里特(Kurit)拱坝,坝高 60m,1850 年又加高到 64m,这个坝高纪录一直保持到 20 世纪初。在西班牙,1384 年竣工的阿尔曼扎(Almanza)拱坝,坝高 17m,底宽 16m,1586 年加高了 6m,同时拆除了部分坝体,底宽减小到了 11m,形象地反映了设计者已经逐步认识到由于拱的作用,坝体断面可以做得薄一些。1612 年意大利修建了邦达尔多(Pontalto)拱坝,当时坝高 5m,后来经过多次加高,1887 年坝高达到 39m。

早期的拱坝建设,人们只是凭借经验在实践中摸索前进。随着欧洲工业革命的发展和工程力学的诞生,人们开始用薄壁圆筒公式设计拱坝,其中具有里程碑意义的是法国工程师左拉(Zola)在 1847~1854 年用这种方法建成的高 43m 的左拉拱坝,这是世界上第一座经过应力分析设计的拱坝。其后,人们利用圆筒概念及其公式又设计、建造了一批中小型拱坝,如美国 1884 年建成的熊谷(Bear Valley)拱坝,澳大利亚 1856 年建成的帕拉马塔(Parramatta)拱坝、1880 年建成的 75 英里(75-Miles)拱坝等,其中后者是最早的混凝土拱坝^[3]。

到 20 世纪初,西欧和北美的工程师对固端拱法作了大量的研究,认为固端拱法能反映坝肩对拱圈的约束作用,用它进行拱坝设计比纯拱法更接近实际。从 20 世纪初到 40 年代,美国和西欧采用这种方法建造了一批拱坝。如意大利 1909 年建成的西斯蒙(Cismon)拱坝、1914 年建成的卡费罗(Carfino)拱坝,美国 1914 年建成的鲑鱼溪(Salmon Creek)拱坝等。后者也是世界上第一座变半径拱坝,坝高 51m。

圆筒法和固端拱法只反映了拱圈的作用,而没有反映各层拱圈之间的相互作用。1889 年美国的维切尔(H. Vischer)和瓦格纳(L. Wagener)在校核熊谷拱坝应力时,提出了所谓的拱冠梁法,即在拱冠处设置一根悬臂梁,根据梁和各层拱圈在交点处径向变位一致的条件,将水荷载在拱和梁之间进行分配。10 多年后,该方法被用于设计探路者(Pathfinder)拱坝和比尔牛(Buffalo Bill)拱坝。1917 年瑞士工程师格伦纳(H. E. Gruner)把拱冠梁法发展为径向变位调整的多拱梁分载法,并用于设计了瑞士的第一座拱坝——蒙特沙尔文斯(Montsalvens)拱坝,这也是世界上第一座非圆弧拱坝,其水平拱是一个悬链曲线,从拱冠到拱端逐渐加厚。20 世纪

20~30 年代, 为了准备修建坝高 221m 的胡佛(Hoover)拱坝, 美国垦务局在萨凡奇(J. L. Savage)的领导下, 对多拱梁分载法进行了改进。1925 年, 伏格特(F. Vogt)增加了考虑坝基弹性变形的计算方法; 1929 年, 海因兹(J. Hinds)等在径向变位调整的基础上增加了切向变位调整和扭转角调整; 1930 年, 柯恩(F. D. Kim)等给出了基于单位荷载变位通过试算求得变位一致的计算方法, 即试载法(trial load method); 1934 年, 霍克(J. G. Houk)又进一步增加了水平扭转角的调整。

基于拱梁分载的概念, 美国工程师本着拱梁并重的思想, 为了减小或消除梁底上游垂直拉应力, 往往使梁的厚度越接近地基越急剧增加。1930 年建成的达布洛(Diablo)拱坝就是一个典型的代表; 胡佛拱坝底厚 201m, 坝体断面接近重力坝, 这一方面表明了美国人对首次超越 200m 坝高的谨慎, 另一方面也是他们拱梁并重设计理念的体现。欧洲工程师更富有开拓和创新精神, 他们认为拱坝应该以拱为主, 为了解决梁底拉应力的问题, 可以切除梁底受拉区的混凝土而不是加大梁的厚度。1935 年法国坝工专家柯因(A. Coyne)根据这个原则在设计 90m 高的马里奇(Marege)拱坝时, 切除了底宽 7m 的坝踵混凝土, 出现了第一座既有水平曲率又有垂直曲率的双曲拱坝。而世界上第一座同时具有上游倒悬和下游倒悬的典型的双曲拱坝, 是意大利 1939 年建成的奥雪莱塔(Osigletta)拱坝, 该坝同时也是第一座周边缝拱坝, 坝高 76.8m。

双曲拱坝是公认的一种较优的拱坝体形, 20 世纪 50~60 年代, 在欧洲得到了很大发展。瑞士建成了近 40 座拱坝, 其中包括第一座坝高超过 200m 的双曲拱坝——莫瓦桑(Mauvoisin)拱坝, 该坝 1957 年建成时坝高 237m, 1991 年加高到了 250m。意大利建成的 100 多座混凝土坝中, 拱坝占 50%, 其中包括著名的瓦依昂(Vajont)拱坝, 坝高 262m, 1959 年建成。1963 年库区左岸发生大滑坡, 滑坡体体积有 2.7 亿 m^3 , 形成涌浪翻过大坝, 左、右岸漫流水深超过坝顶 100~260m, 瓦依昂拱坝经过严重超载后安然无恙, 仅左岸坝顶有一段长 9m、高 1.5m 的混凝土略有损坏, 充分显示了拱坝具有很高的安全储备功能。法国在此期间也修建了不少拱坝, 其中包括第一座失事的双曲薄拱坝马尔帕塞(Malpasset)拱坝。马尔帕塞拱坝坝高 66m, 1952 年开工, 1954 年建成。1959 年 12 月 2 日, 库水位接近坝顶时, 大坝突然溃决。马尔帕塞拱坝的失事使得以后的拱坝设计者更为审慎地对待坝基的地质勘探和地基处理^[4]。

20 世纪 60 年代以后, 美国一些较高的拱坝也普遍采用双曲体形, 如 1966 年建成的莫罗波因特(Morrow Point)拱坝, 坝高 143m; 1968 年建成的莫西罗克(Mossyrock)拱坝, 坝高 185m 等。日本和苏联修建的拱坝也越来越多。日本自 1955 年建成第一座高度超过 100m 的上椎叶拱坝后, 其他高于 100m 的拱坝基本上都是 60 年代修建的。苏联第一座双曲薄拱坝是 1960 年建设的高度为 69m 的拉扎努尔(Lajanura)拱坝, 此后修建的高拱坝大多数是双曲拱坝, 其中包括高 272m 的因

古里 (Inguri) 拱坝, 大坝 1961 年开工, 1980 年建成。

20 世纪 70 年代以后, 拱坝建设的重心转到了中国。中国具有悠久的修建堤坝和拱桥的历史, 修建拱坝的历史相对较短, 最早的拱坝是 1927 年建于福建厦门的上里浆砌石拱坝, 坝高 27m。中华人民共和国成立后, 1950~1970 年是中国修建拱坝的起步阶段, 建成坝高 20m 以上的拱坝约 80 座, 其中包括第一座高拱坝——坝高 87.5m 的响洪甸重力拱坝和第一座混凝土双曲拱坝——流溪河拱坝, 坝高 78m。1970 年以后, 中国的拱坝建设进入高速发展期。到 70 年代末, 已建成 30m 以上拱坝 300 余座; 到 80 年代末, 建成了凤滩、白山、龙羊峡、东江、紧水滩共 5 座百米以上的混凝土拱坝, 其中 1989 年建成的坝高 187m 的龙羊峡重力拱坝代表着 20 世纪 80 年代国内的坝工建设水平; 1998 年 10 月二滩水电站第一台机组并网发电, 标志着我国首座突破 200m 级的大坝——最大坝高 240m 的二滩拱坝正式建成, 这是中国拱坝建设的里程碑。根据国际大坝委员会 1999 年的统计资料, 全世界已建的坝高超过 30m 的拱坝共 1102 座, 其中中国有 517 座, 占全球 46.9%。进入 21 世纪后, 我国又先后建成了坝高 250m 的拉西瓦双曲拱坝、坝高 285.5m 的溪洛渡双曲拱坝、坝高 294.5m 的小湾拱坝、坝高 305m 的锦屏一级拱坝等一批 300m 量级拱坝。另外还有坝高 289m 的白鹤滩拱坝、坝高 270m 的乌东德拱坝等特高拱坝正在设计、施工中。目前已建成的世界坝高前 10 名的拱坝中, 中国的拱坝占了近一半。一系列的成就标志着我国在高拱坝的勘测、设计、施工和科研方面已走向了引领世界发展的新阶段^[5,6]。

1.2 拱坝体形的发展

早期的拱坝体形比较简单, 多为采用等厚度单心圆拱圈的单曲拱坝。随着拱梁分载概念的形成与发展, 双曲拱坝成为拱坝的主要形式。为了适应较为复杂的地形、地质条件, 20 世纪 50 年代, 人们开始了对新的拱圈线型的探索, 相继提出三心圆、对数螺旋线、抛物线、椭圆等线型拱圈。最早的三心圆拱坝是葡萄牙的渥迪凯拉 (Odeáxere) 拱坝, 坝高 41m, 1958 年建成; 目前最高的三心圆拱坝是黑山共和国境内的姆拉丁其 (Mratinje) 拱坝, 最大坝高 220m; 我国三心圆拱坝中最高的是坝高 155m 的李家峡拱坝。瑞士的老埃莫森 (Vieux Emosson) 拱坝是世界上第一座抛物线拱坝, 坝高 51m, 1955 年建成。抛物线拱坝是现代双曲拱坝中应用得最多的拱坝体形。我国的几座 300m 量级特高拱坝采用的都是抛物线拱圈。第一座椭圆拱坝同样也出现在瑞士, 是 1963 年建成的最大坝高 86m 的特莱斯 (Les Toules) 拱坝, 该坝上面大部分坝体是椭圆拱, 下部坝体是抛物线拱; 此后, 瑞士又陆续修建了几座椭圆拱坝, 如 1965 年建成的康特拉 (Contra) 拱坝、1974 年建成的埃莫森 (Emosson) 拱坝等, 其中前者坝高 220m, 是目前最高的椭圆拱坝。我国

2003年建成的江口拱坝也采用了椭圆拱坝^[7]。第一座对数螺旋线拱坝是法国的乌格朗斯(Vouglans)拱坝,坝高130m,建成于1968年。我国的拉西瓦拱坝在设计阶段研究了双心圆、三心圆、对数螺旋线、抛物线、椭圆和双曲线6种体形,最终选定为对数螺旋线,该坝最大坝高250m,是最高的对数螺旋线双曲拱坝。非圆弧形拱圈相对于圆拱更加扁平,到拱端处的曲率半径逐渐加大,使拱推力尽可能地指向岩体内部,有利于坝肩稳定。

随着拱坝体形优化设计研究的开展,我国学者又提出了几种新的拱坝体形。1988年,厉易生^[8]提出了一般二次曲线拱坝及其优化模型,该线型是圆弧、抛物线、双曲线、椭圆4种线型的一般形式。1994年,汪树玉等^[9]提出了用曲率半径方程描述的拱圈混合线型模型,包含圆弧、抛物线、双曲线、椭圆、对数螺旋线以及介于它们之间的各种线型。基于优化设计方法提出的这两种拱坝体形,使坝体在不同部位采用不同的拱圈线型,体形布置更加灵活,可以更大限度地发挥拱坝体形优化的潜力,经济效益显著。世界第一座混合线型拱坝是1997年6月建成的奇艺砌石拱坝,坝高36.5m;第一座混合线型高拱坝是坝高86.8m的大奕坑拱坝,于2000年8月浇筑完成。厉易生^[10]从非线性规划的可行域和最优解的关系出发,论证了拱圈线型的优越性排序,认为混合线型优于一般二次曲线,而一般二次曲线又优于椭圆、抛物线等其他单一线型。孙林松和张伟华^[11]以拱圈半中心角、拱轴线型值点坐标和拱端厚度为体形参数,构造出了三次样条线型拱圈,建立了以拱圈和拱冠梁体形参数为设计变量的拱坝体形优化设计模型,并将其应用到具体工程算例中,取得了较好的优化效果,显示了三次样条线型拱坝体形的优越性。

1.3 拱坝体形优化设计研究进展

拱坝体形优化设计就是用数学规划方法寻求在给定条件下的坝体最优体形。拱坝的体形是决定拱坝稳定和安全的因素之一,因此其优化设计具有很重要的现实意义。20世纪60年代末,R. Sharp利用数学规划法对拱坝体形进行优化设计,第一次将优化设计理论引入到拱坝设计中。1976年,朱伯芳院士在我国首先开始了拱坝体形优化设计研究。我国的拱坝优化设计虽然起步晚于国外,但由于研究工作紧密结合工程实际,经过近40年的发展,在理论和实践方面均取得了很大进步,目前已处于世界领先地位。世界上第一座采用优化方法设计的混凝土拱坝是1987年建成的浙江瑞垟拱坝^[12],最大坝高54.5m,坝顶弦长140m,为单心圆双曲拱坝。

常用的拱坝体形优化设计模型以拱坝体形参数为设计变量,以坝体混凝土、基础开挖总费用为目标函数,以安全要求及稳定要求作为约束条件。随着拱坝高

度的不断增高,人们更加关心拱坝的安全。孙林松等^[13]以最大拉应力为目标函数,建立了基于安全性的拱坝体形优化设计模型;谢能刚等^[14]根据实际结构在经济性和安全性等方面的要求,以坝体应变能为目标函数,并以高拱坝的静、动力优化为例,说明了应变能指标的有效性和多目标特征。

随着我国水电建设事业的发展和拱坝技术的提高,单纯以经济性或安全性为目标函数已经不能满足工程需要,厉易生^[15]提出了综合考虑安全性和经济性两个目标函数的拱坝双目标优化模型,并在有效解集的基础上论证了最经济模型和最安全模型的互等关系。孙文俊等^[16]提出了基于模糊贴近度的拱坝两目标优化设计方法,选取最大拉应力和最小体积作为优化目标,利用线性加权法计算非劣解,并根据模糊贴近度确定拱坝的最优体形。汪树玉等^[17]在拱坝体形优化设计时,将坝体体积、应力水平、高应力区深度以及强度失效概率等作为目标函数,采用理想点法求解,得到了比较满意的解答。谢能刚等^[18,19]以坝体体积、静力荷载作用下的坝体最大主拉应力和地震荷载作用下的能量为目标函数,并引入模糊数学的概念,构造了多目标优化设计的模糊评价函数。基于多目标优化设计与博弈的相似性,孙林松、谢能刚等^[20,21]还研究了基于博弈论的拱坝体形多目标优化设计方法。

拱坝体形优化设计中的约束条件包括几何约束、应力约束和稳定约束。几何约束主要包含变量界限约束、坝厚约束、保凸性约束以及上、下游倒悬度约束等,这些约束反映了坝体的布置、坝顶交通以及施工等方面的要求。应力约束和稳定约束主要反映了运行安全的要求,应力约束主要是要求坝体最大主拉(压)应力不超过允许值;稳定约束是对拱圈中心角、拱端推力角等提出一定的限制,以满足坝体的稳定性要求。随着拱坝高度的不断增加,坝踵开裂几乎不可避免,但拱坝是高次超静定结构,局部开裂并不影响拱坝的正常运行。20世纪末,黄文雄等^[22]提出了拱坝开裂约束的概念,并应用到坝体体形优化设计实践中。所谓拱坝开裂约束条件,是指当拱坝坝踵区主拉应力超过坝体材料抗拉强度后,坝踵附近开裂且裂缝向坝体的深度和广度发展,这时要对裂缝的可能发展范围加以限制,以保证大坝安全。孙林松等^[23]提出控制裂缝深度不超过容许值,并引入超级有限元为结构分析方法,实现了考虑开裂深度约束的拱坝体形优化设计,并取得了令人满意的效果。考虑到基础岩体变形模量有较大的不确定性,综合变形模量计算值会有一定误差,孙林松和孔德志^[24]利用稳健设计的思想,建立了考虑基础变形模量不确定性的拱坝应力稳健可行性约束条件。

拱坝体形优化设计属于非线性规划问题,传统的优化算法,如罚函数法^[25]、复合形法^[26,27]、序列二次规划法^[28,29]、广义缩减梯度法^[30]以及约束变尺度法^[31]等,在拱坝体形优化设计中均有所运用,并取得了较好的效果。随着数学方法的发展,遗传算法、神经网络等新兴的智能优化计算方法也在拱坝体形优化中得到了运用。如杨海霞^[32]将遗传算法用于抛物线双曲拱坝的体形优化设计,并与序列

二次规划法进行比较, 得出了遗传算法优于序列二次规划法的结论, 同时也指出采用遗传算法需要的结构分析次数很多, 有必要提高优化的效率, 减少结构重分析的次数。孙林松等^[33]结合三次样条曲线拱坝体形优化设计, 讨论了加速微种群遗传算法在拱坝优化设计中的具体实施方法, 证明了加速微种群遗传算法在拱坝体形优化设计中的可行性与有效性。刘德富等^[34]采用神经网络方法进行了拱坝体形参数的近似优化, 证实了该方法的可行性。徐明毅等^[35]在拱坝体形优化中利用人工神经网络整合各种复杂的约束条件, 并通过罚函数将约束优化问题转化为无约束优化问题进行求解。近几年, 伊朗的部分学者对采用粒子群优化方法进行拱坝体形优化也做了一系列研究^[36,37]。

参 考 文 献

- [1] International Commission of Large Dams. World register of dams[EB/OL]. http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp[2017-06-28].
- [2] James P, Chanson H. Historical development of arch dams: from Roma arch dams to modern concrete designs[J]. Australian Civil Engineering Transactions, 2001, CE43: 39-56.
- [3] Chanson H. The 75-Miles dam in Warwick: The world's oldest concrete arch dam[J]. Royal Historical Society of Queensland Journal, 1999, 17(2): 65-75.
- [4] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全: 拱坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [5] 朱伯芳. 中国拱坝建设的成就[J]. 水力发电, 1999, (10): 38-40.
- [6] 贾金生. 中国大坝建设 60 年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [7] 厉易生, 陈玉夫, 杨波, 等. 江口椭圆拱坝优化设计[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 221-225.
- [8] 厉易生. 二次曲线拱坝及其体型优化模型[J]. 水利学报, 1988, (7): 29-34.
- [9] 汪树玉, 刘国华, 魏文凯, 等. 拱坝非线性全过程分析与混合线形优化[J]. 水力发电, 1996, (9): 19-22.
- [10] 厉易生. 拱圈线型优选[J]. 水利学报, 1996, (1): 74-77.
- [11] 孙林松, 张伟华. 三次样条线型拱坝体形优化设计[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 47-51.
- [12] 厉易生, 范修其. 瑞垌拱坝优化设计[J]. 水利水电技术, 1985, (8): 7-12.
- [13] 孙林松, 王德信, 裴开国. 以应力为目标的拱坝体型优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 57-60.
- [14] 谢能刚, 孙林松, 赵雷, 等. 基于应变能的拱坝体型优化设计[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1342-1347.
- [15] 厉易生. 双目标优化的有效点集及拱坝双目标优化[J]. 水力发电, 1998, (11): 10-14.
- [16] 孙文俊, 孙林松, 王德信, 等. 拱坝体形的两目标优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(3): 39-43.
- [17] 汪树玉, 刘国华, 杜王盖, 等. 拱坝多目标优化的研究与应用[J]. 水利学报, 2001, 32(10): 48-53.
- [18] 谢能刚, 孙林松, 王德信. 静力与动力荷载下高拱坝体型多目标优化设计[J]. 水利学报,

2001, 32(10): 8-11.

- [19] 谢能刚, 孙林松, 王德信. 拱坝体型的多目标模糊优化设计[J]. 计算力学学报, 2002, 19(2): 192-194.
- [20] 孙林松, 张伟华, 谢能刚. 基于博弈理论的拱坝体形多目标优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 392-396.
- [21] 谢能刚, 孙林松, 包家汉, 等. 拱坝体型的多目标博弈设计[J]. 固体力学学报, 2007, 28(2): 200-206.
- [22] 黄文雄, 王德信, 许庆春. 高拱坝的开裂和体形优化[J]. 水力发电, 1997, (11): 26-29.
- [23] 孙林松, 王德信, 孙文俊. 考虑开裂深度约束的拱坝体形优化设计[J]. 水利学报, 1998, (10): 19-23.
- [24] 孙林松, 孔德志. 基础变形模量不确定条件下的拱坝体形稳健可行性优化设计. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 61-64.
- [25] 娄常青, 孙扬镰. 拱坝多种体型优化[J]. 水力发电学报, 1992, (1): 8-16.
- [26] 黎展眉. 双曲拱坝的优化及可视语言的应用[J]. 水力发电学报, 2006, 25(1): 24-29.
- [27] Li S Y, Ding L J, Zhao L J, et al. Optimization design of arch dam shape with modified complex method [J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(9): 804-808.
- [28] 杨仲侯, 杨海霞, 任青文. 高拱坝应力分析与形状优化设计程序系统[A]//姜弘道, 赵光恒, 向大润, 等. 水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M]. 南京: 河海大学出版社, 1992: 160-173.
- [29] Akbari J, Ahmadi M T, Moharrami H. Advances in concrete arch dam shape optimization [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(7): 3316-3333.
- [30] 张秀丽, 汪树玉. 拱坝优化及 GRG 法的应用[J]. 水力发电学报, 1989, (3): 20-33.
- [31] 刘国华, 汪树玉. 拱坝体形优化设计方法及工程应用[J]. 计算结构力学及其应用, 1999, 11(4): 461-469.
- [32] 杨海霞. 基于遗传算法的拱坝优化设计[J]. 水利水运科学研究, 2000, (3): 13-17.
- [33] 孙林松, 张伟华, 郭兴文. 基于加速微种群遗传算法的拱坝体形优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 758-762.
- [34] 刘德富, 李文正, 刘从新. 拱坝近似优化的人工神经网络方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, (4): 22-23.
- [35] 徐明毅, 陈胜宏, 张勇传. 基于人工神经网络的拱坝混合优化方法[J]. 湖北水力发电, 2004, (1): 18-21.
- [36] Seydpoor S M, Salajegheh J, Salajegheh E, et al. Optimal design of arch dams subjected to earthquake loading by a combination of simultaneous perturbation stochastic approximation and particle swarm algorithms [J]. Applied Soft Computing Journal, 2011, 11(1): 39-48.
- [37] Seydpoor S M, Salajegheh J, Salajegheh E. Shape optimal design of materially nonlinear arch dams including dam-water-foundation rock interaction using an improved PSO algorithm [J]. Optimization and Engineering, 2012, 13(1): 79-100.

2 拱坝体形优化设计模型与方法

拱坝体形优化设计在国外开始于 20 世纪 60 年代末期。我国从 20 世纪 70 年代中期开始了基于优化技术的拱坝体形设计研究, 经过近 40 年的努力, 在拱坝体形优化设计领域取得了长足的进步, 优化模型更加实用化。本章主要介绍拱坝体形优化设计模型的建立、加速微种群遗传算法以及三次样条线型拱坝的构造与优化设计。

2.1 拱坝体形的几何描述

进行拱坝体形设计就是要确定拱坝的几何形状与尺寸, 因此首先要建立拱坝的几何模型。

2.1.1 拱坝几何模型的构造方法

描述拱坝体形的几何模型可分为连续型几何模型和离散型几何模型^[1]。由于前者较为实用, 易被设计人员接受, 所以目前在拱坝体形设计中应用较多。连续型几何模型(图 2.1)可用下面四种方法来构造:

- (1) 用一个函数描述坝体上游面, 另一个函数描述坝体厚度。
- (2) 用一个函数描述坝体中面, 另一个函数描述坝体厚度。

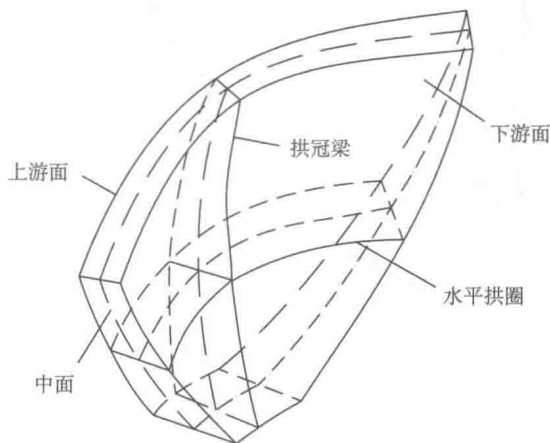


图 2.1 拱坝连续型几何模型