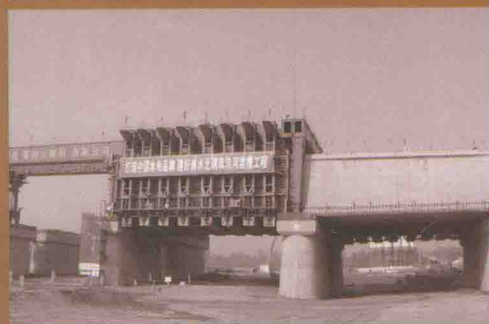
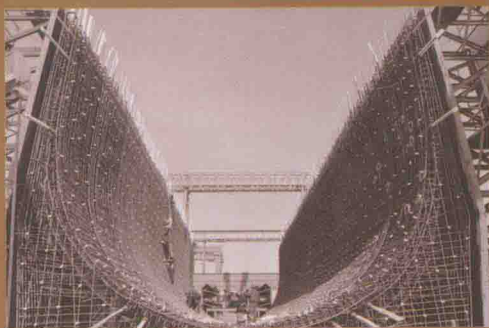


大型钢筋混凝土渡槽 施工期预应力场演化分析

DAXING GANGJIN HUNNINGTU DUCAO
SHIGONGQI YUYINGLICHANG YANHUA FENXI

马文亮 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

大型钢筋混凝土渡槽 施工期预应力场演化分析

DAXING GANGJIN HUNNINGTU DUCAO
SHIGONGQI YUYINGLICHANG YANHUA FENXI

马文亮 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分为9章,系统阐述了钢筋混凝土渡槽结构的发展概况,论述了钢筋混凝土渡槽结构的分析方法,研究了预应力钢筋混凝土渡槽有限元分析方法。结合南水北调淦阳河渡槽的实际工程,分析渡槽结构预应力张拉过程中次拉应力场和剪应力响应的演化规律,为淦阳河渡槽预应力施工过程中关键问题的解决及施工技术研究奠定工作基础。研究内容采用图表等形式表达,丰富易懂,研究成果为大型钢筋混凝土渡槽结构的设计和施工提供了一定的参考依据。

本书可为水工结构工程领域工程师、设计人员、施工技术人员和研究人员提供参考,也可供大中专院校水利工程相关专业师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型钢筋混凝土渡槽施工期预应力场演化分析/马文亮著. —北京:中国电力出版社,2015.9
ISBN 978-7-5123-8211-4

I. ①大… II. ①马… III. ①渡槽-钢筋混凝土结构-预应力-研究 IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第207578号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:王晓蕾 联系电话:010-63412610

责任印制:蔺义舟 责任校对:马 宁

汇鑫印务有限公司印刷·各地新华书店经售

2015年9月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·9.75印张·236千字

定价:48.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着我国水利工程的迅速发展，特别是南水北调工程的实施，大跨度的预应力薄壳渡槽得到了广泛的应用，渡槽逐渐向大型化、巨型化发展。在这样的工程背景下，国内外开展了各个方面的研究，研究成果主要集中在结构优化设计、动力分析、隔震、减震方法、机理研究、稳定性、模型试验、温度应力、冰荷载对渡槽结构的响应，以及新材料、止水、支座等方面。但是，在预应力施工过程中各因素引起剪应力场、次拉应力场的成因及演化、槽身混凝土内预应力场的演化及其对渡槽结构产生裂缝的响应研究成果很少。

预应力建立过程中由于渡槽各构件及新老混凝土之间的相互约束，在结构中引起施工次生应力场在所难免。大型薄壁渡槽如果在施工过程中忽视了预应力施工技术、方案等环节因素的影响，轻则由于预应力建立过程中结构产生次拉应力，使混凝土出现裂缝，重则将导致混凝土薄壁结构产生破坏。

本书梳理了渡槽结构的发展概论，阐述了渡槽结构分析方法，研究了预应力钢筋混凝土渡槽有限元分析方法。采用理论分析的方法，建立薄壁渡槽结构分析的计算模型，给出模拟施工环节因素的计算方案，分析施工技术因素对结构产生的影响，考察渡槽在施工环节因素影响下引发的结构次生应力，研究施工过程中各种复杂因素变化对结构应力增量影响的变化规律。通过研究，为大型预应力薄壁渡槽结构的施工提出适合薄壁渡槽结构的构造特征的实施方案。本书可为水工结构工程领域设计人员、施工技术人员和研究人员提供参考，也可供大中专院校水利工程相关专业师生学习和参考。

本书在成稿过程中得到了河南省水利勘测设计研究有限公司、河北省水利水电第二勘测设计研究院、中国水利水电第十三工程局有限公司、华北水利水电大学白新理教授和张多新副教授的大力支持与帮助，在此一并表示诚挚的谢意。

限于作者水平，书中内容难免有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

著者

2015年7月

目 录

前言

第 1 章 渡槽结构的发展概论	1
1.1 渡槽及大型渡槽	1
1.2 混凝土渡槽的分类及结构特点	2
1.3 渡槽结构的发展	4
1.4 渡槽结构的施工过程分析研究	8
第 2 章 渡槽结构分析方法	10
2.1 弹性理论	10
2.2 结构力学理论	11
2.3 梁格分析法	12
2.4 实用空间法	13
2.5 有限元理论	14
第 3 章 预应力混凝土渡槽有限元分析概述	17
3.1 预应力混凝土结构的基本概念	17
3.2 预应力损失的计算	20
3.3 有限元法原理及 ANSYS 软件简介	24
3.4 ANSYS 中预应力的模拟方法	26
3.5 ANSYS 中预应力建模过程	27
第 4 章 滏阳河渡槽工程概况及研究内容	29
4.1 滏阳河渡槽工程概况	29
4.2 研究背景与意义	30
4.3 研究内容	31
4.4 技术路线	33
4.5 研究目标	34
第 5 章 渡槽预应力筋布置及张拉步骤	35
5.1 预应力筋的布置	35
5.2 预应力筋的张拉步骤	35
第 6 章 渡槽预应力施工过程仿真分析	41
6.1 计算原则与参数	41
6.2 计算模型	42
6.3 分步求解技术	44
6.4 预应力张拉前槽身结构分析	45
6.5 预应力张拉过程中槽身结构分析	46

第 7 章 渡槽预应力施工过程槽身应力场分析	108
7.1 引言	108
7.2 渡槽计算路径的应力场分析	109
7.3 渡槽特征点的应力状态分析	129
第 8 章 渡槽预应力施工过程变形分析	138
8.1 槽身变形分析	138
8.2 路径上的变形分析	142
8.3 特征点的变形分析	144
第 9 章 总结	147
9.1 结论	147
9.2 建议	148
参考文献	149



第 1 章

渡槽结构的发展概论

1.1 渡槽及大型渡槽

渡槽是输送渠道水流跨越河渠、道路、洼地、溪谷等的架空输水建筑物，是水工建筑物中应用最广的立体交叉建筑物之一。除用于输送渠水外，还可供排洪、排沙、通航和导流等之用。当挖方渠道与冲沟相交时，为排泄冲沟来水和泥沙，不使山洪及泥沙进入渠道，可在渠道上面建排洪渡槽。在流量较小的河道上修建闸、坝，用上下游围堰拦断河道时，可在基坑上面架设导流渡槽，使上游来水通过渡槽泄向下游。

由于渡槽在跨越沟谷和河道时与涵洞相比能通过较大的洪水，一般不影响沟谷和河道的行洪，而与倒虹吸相比，渡槽槽身较短，施工较为简便，运行管理方便，更重要的是水头损失小，可以扩大灌溉效益，同时对有交通要求的地方，渡槽上面还可以做成交通便道等，因此渡槽得到了相当广泛的应用。

渡槽在我国已有悠久的历史。古代，人们凿木为槽，引水跨越沟谷，即为最古老的渡槽。渡槽又称高架渠，是一组由桥梁、隧道或沟渠构成的输水系统。用来把远处的水引到水量不足的城镇、农村以供饮用和灌溉，是输水渠道水流跨越河渠、道路、山冲、谷口等的架空输水建筑物，是灌区水工建筑物中应用最广的立体交叉建筑物之一，除用于输送渠水外还可供排洪和导流之用。

渡槽结构由槽身、支承结构、基础及进出口建筑物等部分组成。槽身搁置于支承结构上，槽身及槽中水的重力通过支承结构传给基础再传给地基。渡槽的下部支承结构由槽台、槽墩、排架、组合式墩架（有重力墩上立排架）以及基础所组成。当梁式渡槽与两岸填方渠道相连时，常采用重力式槽台。当承受拱架或大型钢筋混凝土渡槽时，则采用重力式或空腹式槽墩，而在多孔拱式渡槽中，为防止某一拱圈失事而引起的连锁反应，往往每隔 3~5 个槽墩就设一个加强墩。梁式渡槽大都支承在空腹独立支架、单排架或 A 形排架上。某些过河建筑物也有重力墩上再立排架而形成组合式墩架的。渡槽的基础形式应和支承结构形式相配合，主要有独脚无筋基础、双悬臂肋梁基础、井字形扩大底板基础、管柱和沉桩承台、爆扩桩基础和圆锥薄壳基础等多种。

目前，我国为了解决北方缺水问题，结合我国水资源分布“南多北少”的特点，提出

了跨流域调水工程,即南水北调工程。该工程干渠跨越河流、道路等有上千处,因此渡槽成为该工程中必不可少的立体交叉输水建筑物和关键性结构。

大型渡槽是指流量较大或跨度较大的渡槽。南水北调工程中的渡槽就属于流量和跨度都比较大大型渡槽。

1.2 混凝土渡槽的分类及结构特点

1.2.1 渡槽纵向支承结构及特点

1. 梁式渡槽

渡槽槽身直接搁置于槽墩或槽架上。槽身既能起输水作用,又能承受荷载起纵梁作用的称为梁式渡槽。梁式渡槽按支承点数目及布置位置的不同,又可分为简支、双悬臂、单悬臂和连续梁四种形式。

结构简单、施工与吊装方便是梁式渡槽的最大优点,也是多年来被大量使用的原因。但梁式渡槽的槽身起承重作用,所以其自重较重,跨中弯矩也比较大,这些原因导致了梁式渡槽的跨度较小,适用跨度一般在 20m 以内。正是梁式渡槽跨度小的这一主要缺点,在客观上促进了预应力技术在渡槽中的应用,预应力混凝土渡槽也是在梁式普通混凝土渡槽的基础上发展起来的。

梁式渡槽的槽身直接搁置于槽墩或槽架上,所以温度变化和地基不均匀沉陷都会引起槽身变形,影响过水,甚至可能发生漏水现象。而且在连续梁式渡槽中,如各个支点产生不均匀沉陷,槽身将产生较大的附加弯矩,还可能产生扭曲应力,对槽身受力不利。因此,梁式渡槽要有较好的地基条件。

梁式渡槽的槽身多采用钢筋混凝土结构。为节约钢材和水泥用量,改善结构的性能以减少截面尺寸、减轻自重、加大跨度,在渡槽工程中运用预应力钢筋混凝土及预应力钢丝网水泥结构。故在地形平坦、槽高不大,对跨度要求较小的情况下,一般采用梁式渡槽。

2. 拱式渡槽

拱式渡槽是一种轴线为曲线或折线形等非直线的结构。拱式渡槽在竖向荷载作用下两端的拱脚会产生水平推力,可以大幅度地减小跨中弯矩,条件是两拱脚处必须具有水平向的约束。另外,不同于梁式渡槽,其槽身不是承重结构,仅有输送渠水的功能性作用。其承重结构为主拱圈。拱式渡槽的支撑结构是由墩台、主拱圈及拱上结构组成的,这三种组成部分的相对位置主要是槽身搁置在拱上结构。其中是由主拱圈对墩台产生强大水平推力的。

拱式结构的受力原理主要是将拱上垂直荷载转变为轴向压力,并给墩台以水平推力,从而使拱内弯矩减小。基于这一优点,一般拱式渡槽的跨度都很大。主拱圈都具有明确的径向截面形式,其重心连线即为主拱的轴线。按照主拱圈径向截面形式的不同可将拱式渡槽分为板拱、肋拱、双曲拱和箱形拱等。按照铰数的不同,分为无铰、双铰和三铰。按轴

线形状的不同可分为圆弧线、二次抛物线形、折线形和悬链形等。另外,拱上结构还有实腹和空腹的区别,故还可分为不同的类型。

拱式渡槽的主要特点是主拱圈以受轴向压力为主,所受弯矩较小,拱式渡槽的跨度可达上百米。因此可以使抗弯强度低、抗压强度高的混凝土、砖等材料性能在此结构中得到充分发挥,可以很大限度地减少工程投资和节约材料。但是拱式结构对拱脚的约束条件要求很高,若支座部位产生过大的变形,主拱圈很容易会迅速破坏,且增大拱脚处约束的措施往往造价较高。故对于天然的又窄又深的山谷地形且两岸地质都为岩石,强度比较大时,比较适宜建大跨度的拱式渡槽。

3. 桁架式渡槽

桁架是将若干直杆的杆端用铰相互联结成的几何不变体系,外荷载作用于节点上,各杆只产生轴向力。桁架渡槽按支承结构分为上承式、下承式、中承式三种形式,其中上承式和中承式应用广泛。

下承式桁架渡槽是由拱和梁共同承担荷载,输水槽身置于桁架的下弦位置,因而受到较大的轴向拉力,由于槽身承受的轴向拉力将随跨度的增大而增大,故跨度不能过大。

上承式桁架渡槽槽身荷载通过竖杆传递给下弦杆,下弦杆在竖杆传来的节点荷载作用下产生拉力,下弦杆杆端内力传至地基,其应用较广泛,这种结构形式克服了下承式槽身受拉的弱点。

桁架式渡槽充分发挥了材料的性能。这种结构具有施工快、省材料、纵向刚度大和造价低、重量轻等优点。

1.2.2 渡槽槽身断面形式及其特点

渡槽槽身的断面形式通常分为四种:矩形槽身、U形槽身、梯形槽身和圆管形槽身。

1. 矩形箱槽身

矩形槽身整体刚度较大,纵向挠度较小,槽身预制施工比较简单。对于中、小流量渡槽,可以采用封闭式的矩形箱槽身。对大、中流量箱宽较大时,采用开口矩形槽身。矩形槽身的迎风面与背风面都是竖直的平面,对风的阻力较大,大跨径的矩形槽身渡槽对稳定不利。但对于大流量的渡槽,矩形槽身比较适合,而且可以采用多框架矩形槽身形式。

2. U形箱槽身

这种断面形式预制施工较复杂,但横向受力条件比较有利。由于迎风面的大部分成圆弧面,对风的阻力减小,抗风稳定性较为有利。

3. 梯形箱槽身

这种槽身断面形式预制施工较简单,但横向受力条件不利。由于迎风面与背风面都是倾斜的,对风的阻力较小,抗风稳定性有利。

4. 圆管形槽身

由于槽身全部为圆弧面, 横向受力条件与抗风稳定性都是最有利的。但施工较复杂。这种槽身可以用钢筋混凝土或预应力混凝土作材料, 对小管径的也可以用钢板作成钢管。水流流态可以是有压的, 也可以是无压的。

1.3 渡槽结构的发展

1.3.1 国外渡槽建设发展概况

1. 国外古代渡槽

世界上最早的渡槽诞生于中东和西亚地区。公元前 29 世纪前后, 埃及在尼罗河上修建考赛施干砌石坝, 坝高 15m, 坝长 450m, 是文献记载最早的坝, 并建渠道和渡槽, 向孟菲斯城供水。

公元前 700 余年, 亚美尼亚已有渡槽。公元前 703 年, 亚述国王西拿基立下令建一条 483km 长的渡槽引水到国都尼尼微。渡槽建在石墙上, 跨越泽温的山谷。石墙宽 21m, 高 9m, 共用了 200 多万块石头。渡槽下有 5 个小桥拱, 让溪水流过。公元前 700 年左右, 西亚的新亚述帝国曾建成长约 300m、宽 13m, 有 14 个墩座的巨型渡槽。

古希腊的许多城市建有良好的渡槽, 但古罗马人最为认真, 把供水系统看做是公共卫生设施的重要部分。罗马第一条供水渡槽是建于公元前 312 年的阿彼渡槽; 第 10 条也是最后一条则是公元 226 年建成的亚历山大渡槽; 最长最壮观的是建于公元前 114 年的马西亚渡槽, 虽然水源离罗马仅 37km, 但渡槽本身长达 92km。这是因为渡槽要保持一定坡度, 依地形蜿蜒曲折地修建。

国外古代比较著名的渡槽有建于公元前 814 年突尼斯迦太基 (Carthage) 古城遗址的迦太基渡槽、建于公元前 1 世纪的罗马渡槽、建于公元前 19 年的罗马高架渡槽桥加尔拱桥、建于古罗马图拉真大帝时代 (公元 53—117 年) 的西班牙塞哥维亚渡槽、建于 18 世纪以前的意大利渡槽、建于 1726—1738 年的墨西哥渡槽、建于 18 世纪末的墨西哥莫雷利亚渡槽、建于 1931 年的葡萄牙高架渠, 此外还有以色列渡槽、德国高尔兹莎多高架水道桥等。

2. 国外现代渡槽

国外现代渡槽的详细资料不多, 所建渡槽也比较少, 其中印度戈麦蒂渡槽是目前世界上已建的最大渡槽之一。

戈麦蒂渡槽位于萨尔达—萨哈亚克调水工程总干渠 163km 处, 是总干渠跨越戈麦蒂河的大型交叉工程, 也是目前世界上已建成的最大渡槽之一。总干渠设计流量 $357\text{m}^3/\text{s}$, 戈麦蒂河设计洪水流量 $4530\text{m}^3/\text{s}$, 渡槽总长 473.6m, 其中: 进口渐变段 37m, 槽身段 381.6m, 出口渐变段 55m。过水槽宽 12.8m, 高 7.45m, 由 9.9m 高的预应力混凝土纵梁、

加劲肋和横梁、上连杆组成的框架系统支承。左右纵梁顶部均设有 5m 宽的公路桥连接戈麦蒂河两岸交通。渡槽下部结构空心槽墩和基础沉井，槽墩长 18m，宽 3m，高 9m；沉井长 27m，宽 12m，深 35m。

西班牙藤普尔渡槽建于 1926 年，它是世界上最早的一座带挂梁的斜拉输水结构。它是由槽身（又称主梁，含悬臂梁与挂梁）、塔墩、斜拉索几个部分组成，槽身与塔墩为钢筋混凝土结构，钢质斜拉索外包混凝土以防生锈。该斜拉渡槽属双塔双面斜拉索，主跨长 60.3m，两侧边跨长 20.1m，主跨比值为 0.33。当斜拉结构边、主跨比值小于 0.4 时，如跨中采取连续梁式，跨中轴向拉力与弯矩均较大，因而采取带挂梁的形式，跨中轴向、挂梁端部弯矩也为零。

纽约市的给水系统和渡槽，是从老巴豆水库向城市送水的水工设施。这个渡槽，今天叫做老巴豆渡槽，在 1842 年每天大约可供水 34 万 m^3 。水库位于曼哈顿第 42 条街道（1890 年被废弃）和中央公园第 86 条街道南部（1925 年被废弃）。1883 年，政府组成委员会修造从巴豆分水岭的第二渡槽到另外的存贮水库。这个渡槽，命名为新巴豆渡槽，建设年限为 1885—1893 年，1890 年使用。现在各区的供水系统在原有的基础上都进行了加固，包括曼哈顿、布鲁克林、王后街和斯坦登岛自治市镇。

美国莫诺卡西渡槽沿切塞皮克和俄亥俄运河，长 152m，该七拱形的渡槽是运河上最美丽的景点之一。渡槽采用从苏嘎娄夫山附近挖掘的白色和桃红色石英砂岩修建，1829 年开工，1833 年完工。

加拿大布鲁克斯（Brooks）渡槽像一个巨大的蜈蚣，跨越沟谷绵延达 3.2km，宽 20m 的混凝土水道架设在宽阔的大草原之上。曾几何时，它满载宝贵的水浇灌着干涸的南阿尔伯塔大地，现在它已经成为人们的记忆。80 年前，渡槽由加拿大太平洋铁路灌溉公司建设，在广阔的灌溉网络中担当着重要的角色。渡槽的工程设计和施工技术，就是在今天也超出我们的想象。

英国旁特塞斯特渡槽是兰果嫩运河穿越底伊河谷的输水交叉建筑物，在兰果嫩北部，威尔士的东边，1805 年建成。

1.3.2 我国渡槽建设发展概况

1. 中国古代渡槽

渡槽在我国已有悠久的历史。古代，人们凿木为槽用以引水，即为最古老的渡槽。据《水经·渭水注》：长安城故渠“上承泂水于章门西，飞渠引水入城，东为仓池，池在未央宫西。”“飞渠”即为渡槽，建于西汉，距今约 2000 年。或说公元前 246 年兴建的郑国渠“绝”诸水即利用了渡槽，则渡槽见诸历史记载者就比长安城的飞渠更早。这说明渡槽在中国已有 2000 年以上的历史。

古代陕西关中地区大型引泾灌区—郑国渠是我国古代比较著名的渡槽，也是中国古代最宏大的水利工程之一。公元前 246 年（秦始皇元年）由韩国水工郑国主持兴建，约十年后完工。它位于泾水和渭水的交汇处，干渠西起泾阳，引泾水向东，下游入洛水，全长 150 余千米，其间横穿了好几道天然河流，可能使用了“渡槽”技术。郑国渠的建成，使关中

干旱平原成为沃野良田，粮食产量大增，直接支持了秦国统一六国的战争。

在今天宁夏回族自治区的古灌渠，创始于西汉元狩年间（公元前 122—前 117 年）的引黄灌区，当年曾实行大规模屯田，“皆引河及川谷（水）以溉田”。东汉也在这一带发展水利屯田。唐代宁夏引黄灌区有薄骨律渠、汉渠、胡渠、御史渠、百家渠、光禄渠、尚书渠、七级渠、特进渠等。

2. 中国现代渡槽

我国从 20 世纪 50 年代开始建造渡槽，目前国内已建的各类渡槽有很多。其中单槽过流量最大的为 1999 年新建的新疆乌伦古河渡槽，设计流量 $120\text{m}^3/\text{s}$ ，为预应力混凝土矩形槽。单跨跨度最大的为广西玉林县万龙渡槽，拱跨长达 126m。2002 年完成的广东东江—深圳供水改造工程在旗岭、樟洋、金湖的 3 座渡槽上采用了现浇预应力混凝土 U 形薄壳槽身，为国内首创。

洛惠渠是由我国水利大师李仪祉先生主持，著名水利专家李奎顺先生负责设计和施工的。洛惠渠总干渠上的曲里渡槽是我国最早的钢筋混凝土渡槽之一，全长 118m，高 24m，为单拱排架结构，总体结构分为 3 段，1934 年动工，1935 年建成，是洛惠渠的咽喉工程。几十年来输送水量 60 多亿 m^3 ，为灌区经济发展和人民生活改善起到了重要作用。

长岗坡渡槽是引镜、引太两条渠水灌入金银河水库的主要建筑物，渡槽设计过水流量为 $25\text{m}^3/\text{s}$ ，全长 3450m，共 132 跨，最大跨度 51m，最高 37m。

四川省隆昌县沱江石盘滩水轮泵提水灌溉工程干渠工程总长 108.81km。其中渡槽 133 座，长 16.093km，占干渠总长的 14.8%。渡槽的结构形式有 8 种，其中钢筋混凝土结构的有 5 种 7 座，石拱结构有 3 种 126 座。石拱渡槽中，除石肋拱和石肋双曲拱 9 座外，其余 117 座均为板拱结构，最大跨度 30m，最大高度 27m，最大过水流量 $6\text{m}^3/\text{s}$ 。1980 年后，配套工程相继完成，目前有效灌溉面积已达 1.5 亿余 m^2 。

河南省陆浑灌区总干渠上的东方红一号渡槽为混凝土双曲拱形渡槽，过水流量 $77\text{m}^3/\text{s}$ ，跨度 90m，1973 年建成并投入运用；铁窑河渡槽是陆浑灌区东一干渠跨越铁窑河的交叉建筑物，是该灌区最高的一座输水建筑物；口孜渡槽是陆浑灌区东一干渠跨越马涧河的交叉建筑物，是该灌区最长的一座输水建筑物。浙江里石门水库灌区渡槽群：峇溪渡槽为石拱渡槽，总长 225m，槽分 5 跨，每跨长 36m，1972 年动工，1978 年竣工；红旗渡槽原设计为混凝土排架渡槽，因水泥、钢材缺乏，改变为截面悬链线浆砌石拱渡槽，1977 年 9 月 15 日开工，1980 年 12 月竣工；天宫桃源渡槽为钢筋混凝土排架 U 形断面渡槽，全长 240m，分 24 跨。

军都山渡槽位于北京市延庆县，该渡槽全长 276m，主跨长 126m，是我国第一座跨度超过百米的大型斜拉输水建筑物，于 1988 年 7 月建成输水。

庄浪河渡槽是引大入秦灌溉工程东二灌渠最大规模的地面建筑物，渡槽横跨庄浪河、兰新铁路、甘新公路及明、汉两代长城，全长 2170m，设计引水流量 $21.5\text{m}^3/\text{s}$ ，灌溉面积 3.4 亿 m^2 。

江西省莲花九曲山渡槽是我国第一座半自锚式斜拉渡槽，槽身全长 155.53m，距谷底最大高度 52m。

位于四川省中江县兴安乡三村的长埡堂（现名长虹）渡槽，是人民渠七期主干下段主拱跨度最大的一座渡槽，该渡槽设计为主拱净跨 70m 的四肋三波钢筋混凝土双曲拱渡槽，全长 160m，高 28m，于 1975 年冬建成通水。

东深供水改造工程渡槽全长 3.9km，包括：新建旗岭渡槽，全长 637m，过河段采用 52.2m 跨径双肋无铰拱上承式渡槽，共 7 跨，两岸采用梁式渡槽，共 21 跨；新建樟洋渡槽、金湖渡槽，长度分别为 1.0km 和 2.3km，均为梁式渡槽，跨度分为 12m 及 24m 两种，钢筋按抗裂设计布置，12m 段采用横向后张无黏结 U 形预应力体系，24m 段采用横向后张无黏结 U 形预应力和纵向后张有黏结预应力体系。

深圳水库渡槽位于深圳水库大望桥上游，是水库东西侧两条输水隧洞互相联通的纽带，渡槽全长 530m，设计净断面 $4.2\text{m} \times 4.2\text{m}$ ，设计过水能力为 $24\text{m}^3/\text{s}$ 。

1.3.3 现代渡槽发展趋势

根据目前我国渡槽的发展状况，渡槽在横断面上，以 U 形和矩形槽应用较为广泛，特别是随着施工方法的改进，如采用预制吊装的渡槽，越来越广泛的采用各种更轻、更强、更巧、更薄的结构，即槽身趋向采用 U 形、半椭圆形、环形、抛物线形等薄壳结构或薄壁肋箱等。

在支承形式上，除梁式渡槽和拱式渡槽外，又发展了一种拱梁组合式，拱梁式渡槽是从 20 世纪 90 年代逐步发展起来的，是在折线拱和桁架梁渡槽的基础上，经过研究改进发展起来的一种新型渡槽结构形式。它具有结构轻巧、受力状态良好、外形美观、便于施工、安全可靠和经济适用等特点。如湖南岳阳地区的凉清渡槽，槽身全长 75.2m，由一跨 50.4m 的拱梁组合式结构与两端各一跨 12.4m 的简支结构组成。1990 年建成后投入使用，运行状况良好。

近几年来，先后出现了三铰片拱式、马鞍式、拱管式和桁架-梁组合式等过水结构与承重结构相结合的几种形式渡槽以及双悬臂两型桁架渡槽等，尽管有的形式还存在一些缺点，但却代表了渡槽结构形式向经济合理方向发展的一种趋势。

在材料使用上，在使用一般钢筋混凝土的基础上，趋于使用钢丝网水泥、高强度等级预应力混凝土，钢材采用高强钢丝、低合金钢等。采用这种材料后一是降低混凝土槽身的壁厚，能使混凝土的壁厚由过去的几十厘米减为十几厘米；二是由于渡槽槽身构件采用预应力工艺处理后，使渡槽在结构上发生了质的变化，抗裂性、抗震性和刚度大大提高，克服了钢筋混凝土过早出现裂缝的弱点，充分发挥了高强钢材的潜力，渡槽的断面和变形也相对减少，而跨度却显著地增大。

从施工方法角度出发，渡槽越来越趋于装配式，由于灌溉及用水事业的发展和地形的需要，大流量、大跨度的装配式渡槽逐年增多，并且这些大跨度、大流量的渡槽结构多采用预应力结构和拱架支承。小型壳槽则较多采用钢丝网水泥结构以有利于农村小型工地的运输和装配。

从施工工艺方面，预应力施工工艺逐渐广泛地被采用。槽身的张拉，小型壳槽则采用先张法，即在预制厂内固定的台座上成批张拉高强钢丝或钢绞线；大型槽身则采用后张法施工，以构件本身为台座。在采用装配式渡槽方面，由于吊装技术和设备的改进，构件的单

元重量也逐渐增大,以适应大断面、大跨度结构的需要。如湖北省 1973 年修建的排子河装配式渡槽,采用钢桁架梁垂直吊升巨型的槽身构件,起重量达 200t,提升高度达 50 多米。

斜拉渡槽作为一种新型输水建筑物,近几年在国内发展迅速,从各地已建成的斜拉渡槽来看,总体布置多采用双塔结构,因索塔高,荷载集中,施工难度大,特别是对小流量渡槽,当主跨过大时,主梁宽跨比小,其抗振、抗风性能较差。

目前,渡槽发展研究的总趋势是:适应各种流量、各种跨度特别是大跨度渡槽结构形式的研究;应用先进理论和先进手段进行结构形式优化设计;材料及施工技术的改进等。如斜拉式及悬吊式这类跨越能力最大的渡槽形式的研究;过水与承重相结合的合理结构形式的研究;利用电子计算技术及先进设计理论优选结构形式的研究;早强快干混凝土和纤维混凝土等材料以及新型止水材料的研制应用;构件预制工厂化及大型机械吊装等。有的已在逐步开展,有的在探索中,但是可以预见,渡槽工程在结构形式、设计理论、建筑材料以及施工技术等方面,将有一个新的发展。

综上所述,适应各种流量、各种跨度,特别是大跨度渡槽的结构形式已成为目前渡槽发展和研究的方向。这些研究主要有:新材料、新技术(如预应力)的应用研究,利用电子计算机及先进设计理论优化选择结构形式的研究,渡槽动力特性及隔震技术的研究,渡槽的动力优化设计和稳定性优化设计理论的研究,渡槽结构老化修复、补强技术的研究等。上述的研究工作有的在逐步发展,有的仍在探索中。可以看出,我国渡槽技术历经建国后各时期的发展,目前无论是在设计理论的研究、结构形式的多样性,还是建设的规模等方面均处于国际前列。可以预见,渡槽工程的结构形式、设计理论、建筑材料及施工技术和自动化设计等方面必将有一个新的发展。

1.4 渡槽结构的施工过程分析研究

渡槽结构的施工过程分析主要是采用三维有限元法和解析法两种研究手段建立不同形式的渡槽结构,然后对渡槽的内力、应力、变形、位移进行研究。

近年来渡槽结构在施工过程分析方面主要取得了以下一些研究成果:彭成山、张东东、张学菊主要对预应力渡槽有限元计算模型的建立进行了研究,重点在预应力筋等效分析模型在 ADINA 中的实现,即主要是模拟槽身混凝土单元及模拟预应力钢筋单元的选择,建立了两种模型来比较钢筋与混凝土有相对滑移和无相对滑移对结果的影响。李广民、任德记、高阳峰主要对渡槽预应力钢绞线有限元模型的建立方法进行了对比研究。王康平、张兰华、任德记、张京穗主要对漕河渡槽进行了数值分析,考虑了最不利温度作用与 7 种荷载工况,对漕河渡槽弧段作了系统的结构计算,在 3 个方向上均配置了预应力筋,最后采用有限单元法对槽身混凝土作了应力复核。曹广德、李同春主要针对常规等参单元法无法正确反映渡槽槽身薄壁结构弯曲变形及应力缺陷,引入了安得费格三维强化假定应变单元模式,对东改大型预应力渡槽采用三维有限元进行分析计算,依照试验渡槽的结构特征参数建立了 U 形槽三维有限元模型,用强化假定应变单元代替常规实体单元对东改大型预应力渡槽进行了有限元分析,并将计算结果与现场试验的计算结果进行了对比分析。黄平、姚威、彭辉对施加预应力锚索的渡槽结构应力变形特性进行了研究,得出,素混凝土渡槽

在纯自重情况下受力较均匀,但不能承受较大的拉力;施加预应力锚索对渡槽在自重、水荷载、风荷载下的拉、压应力及应变的分布有所改善,提高了结构的可靠性和稳定性。陆晓敏、赵引、任青文、李鹏构建了计算任意形状无黏结预应力钢绞线束由摩擦引起的内力沿程损失数值模型,并用于某渡槽环向钢绞线束的优化设置。李涛峰、李凤琴、杨春景主要研究针对渡槽横杆的受力状况,采用三维有限元技术,建立了渡槽槽身的力学模型。对不同高宽比渡槽和不同槽内水深下的渡槽横杆的轴力进行了计算分析,得出了不同高宽比和槽内水深对渡槽横杆轴力的影响规律。白新理、聂金荣、郭瑞卿、马文亮以双泊河矩形渡槽为研究对象,对其整体结构在施工期与运营期的应力、位移情况进行了分析,得出了槽身混凝土材料在不同受力阶段的力学行为变化规律,为今后类似渡槽的设计和施工提供了理论依据。马文亮、姬栋宇、白新理采用通用的有限单元计算软件,对沙河预应力U形薄壁梁式渡槽进行了受力分析,分析结果表明:U形截面渡槽由于槽身光滑、平顺,因此槽身应力分布均匀,拉应力值较低,人行荷载和风载对渡槽的位移和应力影响很小,在设计水位作用下,槽身结构的竖向位移比空槽大近1倍,说明水荷载对渡槽有巨大影响。赵顺波、管俊峰、黄承逵通过仿真模型与原型在弹性和弹塑性阶段的相似比,将钢筋混凝土多纵梁渡槽模型受力性能实测结果反演为原型受力状态。采用三维非线性有限元分析方法,计算了渡槽原型在自重荷载、设计水位荷载、校核水位荷载作用下的受力性能,并与原型反演值进行了对比,证明了渡槽模型试验测得的纵横梁和侧墙截面开裂荷载、应力及渡槽竖向位移和支座反力的合理性,反演计算后可用于正确评价渡槽原型的正常使用受力性能。



第 2 章

渡槽结构分析方法

2.1 弹 性 理 论

主横梁刚度平均分摊在桥长或桥宽的方向,作为各向异性的薄板进行分析。板的厚度 $t < (b/8 \sim b/5)$ 时称作薄板, b 为薄板短边长度。

板受力时,可以把每个荷载分解为两个方向的分量,即横向荷载和纵向荷载。横向荷载:垂直于中面的荷载。纵向荷载:荷载使板弯曲时引起的应力、形变、位移。可按薄板弯曲问题进行计算,可按平面应力问题进行计算纵向荷载作用;薄板弯曲时,中平面所形成的曲面称为弹性曲面,由平面内各点在横向(即垂直于中平面方向)的位移为挠度 w ,按位移求解薄板弯曲问题时,取为基本未知函数的是薄板的挠度 w ,薄板弹性曲面微分方程:

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = q \quad (2-1)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2-2)$$

式中 D ——薄板的弯曲刚度;

q ——薄板单位面积内的横向荷载;

E ——弹性模量;

t ——薄板厚度;

μ ——泊松比。

求解薄板的小挠度弯曲问题时,须按照板侧面上的边界条件,由这个微分方程求解挠度 w ,并求解应力分量。

$$\sigma_x = -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2-3)$$

$$\sigma_y = -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2-4)$$

$$\sigma_z = -\frac{Et^3}{6(1-\mu^2)} \left(\frac{1}{2} - \frac{z}{t} \right)^2 \left(1 + \frac{z}{t} \right) \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) \quad (2-5)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{Ez}{1+\mu} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2-6)$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1-\mu^2)} \left[z^2 - \frac{t^2}{4} \right] \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2-7)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1-\mu^2)} \left[z^2 - \frac{t^2}{4} \right] \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2-8)$$

求薄板横截面上的内力时可从薄板内取一个平行六面体，在 x 为常量的横截面上，作用着正应力和切应力。这些应力分量组成的内力整体满足边界条件，在 x 为常量的横截面上：

$$M_x = -\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2-9)$$

$$M_{xy} = -\frac{Et^3}{12(1+\mu)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2-10)$$

$$F_{Qx} = -\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2-11)$$

在 y 为常量的横截面上：

$$M_y = -\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2-12)$$

$$M_{yx} = -\frac{Et^3}{12(1+\mu)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2-13)$$

$$F_{Qy} = -\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2-14)$$

式中 M_x 、 M_y 、 M_{xy} 、 M_{yx} 、 F_{Qx} 、 F_{Qy} ——分别代表 x 、 y 面上的弯矩、扭矩和剪力。

板边支承在梁上与梁刚接，成为薄板的弹性支承边，如果梁的弯曲刚度较大而扭转刚度较小时，板边支承为简支边；梁的弯曲刚度较小而扭转刚度较大时板边支承为固定边。当板的长短跨之比 $l_2/l_1 \geq 3$ 时，板上荷载绝大部分沿短跨方向传到支撑梁上，可以仅考虑板在短跨方向的受力，称为单向板；当板的长短跨之比 $l_2/l_1 \leq 2$ 时，板上的荷载沿两个方向传到支撑梁上，计算时应考虑两个方向的受力，称为双向板，双向板根据弹性薄板小挠度理论的假定按弹性方法计算内力。

2.2 结构力学理论

运用结构力学方法对渡槽槽身结构进行受力分析时，采用梁理论对渡槽槽身纵向和横向结构进行简化，分别按梁受均布荷载进行受力分析。

1. 槽身横向结构计算

运用结构力学方法对渡槽进行分析时，采用梁理论对纵向和横向结构进行简化。无纵横梁箱形渡槽由底板、侧墙和顶板组成，考虑到渡槽兼做交通桥，顶板荷载考虑自重和车辆荷载，侧墙考虑风荷载和水荷载，底板考虑自重、水荷载和侧墙传递的内力，沿槽水流方向取 1m，槽身按照平面问题进行分析，计算简图如图 2-1 所示。