

大型渡槽抗震概论

张艳红 编著

地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

大型渡槽抗震概论/张艳红编著. —北京:地震出版社, 2004.12

ISBN 7-5028-2596-7

I. 大... II. 张... III. 渡槽—抗震设计 IV. TV672

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 115581 号

地震版 XT200400260

大型渡槽抗震概论

张艳红 编著

责任编辑: 蒋乃芳

责任校对: 张晓梅

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68467972

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版(印)次: 2004 年 12 月第一版 2004 年 12 月第一次印刷

开本: 850 × 1168 1/32

字数: 158 千字

印张: 5.875

印数: 001 ~ 500

书号: ISBN 7-5028-2596-7/TU·179 (3224)

定价: 20.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 大型渡槽抗震	(3)
1.2.1 大型渡槽的结构特点	(3)
1.2.2 工程抗震设防标准	(6)
1.2.3 大型渡槽结构抗震分析的关键问题	(8)
1.3 结构动力学基本概念	(17)
1.3.1 静力法	(17)
1.3.2 拟静力法	(18)
1.3.3 反应谱法	(19)
1.3.4 动态时程法	(24)
第二章 重大工程地震动输入	(32)
2.1 引言	(32)
2.2 设计地震动	(33)
2.3 人工地震波合成	(37)
2.3.1 单点人工地震波合成	(37)
2.3.2 多点人工地震波合成	(40)
2.4 场地地震反应分析	(42)
第三章 大型渡槽地震反应分析	(47)
3.1 引言	(47)

3.2	多点输入结构地震反应·····	(47)
3.3	结构-地基系统动力反应·····	(49)
3.3.1	集中质量显式有限元的内点计算·····	(50)
3.3.2	人工边界点的计算·····	(56)
3.3.3	多次透射公式的稳定实现·····	(59)
3.3.4	考虑介质随机性的结构-地基系统 动力反应·····	(61)
3.4	槽身与水体的动力相互作用·····	(65)
3.4.1	解析法·····	(67)
3.4.2	有限元法·····	(77)
3.4.3	试验研究·····	(80)
3.5	结构-桩-土动力相互作用·····	(89)
3.6	大型渡槽静力分析及静动反应组合·····	(94)
3.6.1	渡槽的静力反应·····	(95)
3.6.2	渡槽的静动反应组合·····	(105)
第四章	大型渡槽模拟地震振动台试验·····	(110)
4.1	引言·····	(110)
4.2	试验设备·····	(110)
4.3	动力试验的相似定律·····	(115)
4.4	大型渡槽模型试验·····	(120)
第五章	大型渡槽隔震·····	(138)
5.1	引言·····	(138)
5.2	隔震机理与隔震装置·····	(139)
5.2.1	叠层橡胶隔震支座·····	(142)
5.2.2	铅芯橡胶隔震支座·····	(145)
5.2.3	球型隔震支座·····	(147)
5.2.4	隔震支座的耐久性·····	(151)

5.3	隔震渡槽地震反应分析	(152)
5.3.1	单自由度反应谱法	(153)
5.3.2	多自由度反应谱法及动力时程 分析方法	(155)
5.4	渡槽隔震分析实例	(157)
5.4.1	渡槽工程概况	(157)
5.4.2	隔震渡槽的抗震性能目标	(159)
5.4.3	渡槽隔震研究	(161)
参考文献		(172)
后记		(181)

第一章 概 论

1.1 引 言

渡槽是输水跨越山谷、河流、道路等的交叉建筑物，具有水头损失小、施工和运行管理方便等特点，是一种重要的水工建筑物。在我国正在进行的大规模、长距离、跨流域的南水北调工程中，特别是在其中的中线工程中，需要建设一批大型渡槽。与农田水利工程中常见的渡槽不同，南水北调中线工程中的渡槽结构规模很大、输水流量也大，例如：设计中穿过洛河的渡槽总长885m，三槽共宽28.2m、高7.0m，设计流量为 $335\text{m}^3/\text{s}$ ；穿过漕河的渡槽总长2700m，单槽宽12.8m、高7.3m，两槽中心线距离14.0m，设计流量为 $160\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量为 $190\text{m}^3/\text{s}$ ，均为十分罕见的大型输水工程。这些大型渡槽的安全使用将直接影响到南水北调中线工程的正常运行，特别是在遭遇地震时，大型渡槽的安全性十分重要。本书结合南水北调中线工程介绍大型渡槽抗震的若干问题。

众所周知，地震是严重危害人类安全的一大自然灾害。20世纪以来，造成巨大灾害的地震不断发生，死亡万人以上的地震就有三十次之多，例如：1923年日本关东地震(M 8.2)、1976年中国唐山地震(M 7.8)、1989年美国 Loma Prieta 地震(M 7.0)、1994年美国 Northridge 地震(M 6.7)、1995年日本阪神地震(M 7.2)、1999年土耳其地震(M 7.8)、1999年台湾集集地震(M 7.6)等，每一次地震灾害不仅造成大量人员伤亡以及建筑物、设

备、设施等的破坏与倒塌，还导致严重的次生灾害，造成巨大的经济损失和社会影响。

我国是世界上地震活动最强的国家之一。南水北调中线工程从加高坝体、扩大库容后的丹江口水库引水，沿唐白河流域西侧过长江、淮河两流域分水岭方城垭口后，经黄淮海平原西部边缘，在郑州以西孤柏嘴(后改为李村)处穿过黄河，沿京广铁路西侧北上。中线工程穿越我国东部华北地震区中的华北平原地震带，该带历史上多次发生 7 级以上地震，例如，1679 年三河、平谷曾发生过 8 级大地震，1976 年唐山地震更是 20 世纪损失最惨重的地震。南水北调中线工程是解决华北水资源危机的一项重大基础设施，大型渡槽是中线工程中重要的交叉建筑物，鉴于工程对社会及国民经济的重大影响，特别是其中长距离的大型输水建筑物——渡槽结构的复杂性，一旦遭受震害，将可能造成巨大的损失。因此，研究大型渡槽的抗震问题，并采取安全、经济、可靠的减震措施，以有效减轻地震灾害的影响，具有十分重要的现实意义。

对大型渡槽结构而言，国内外对其在地震作用下的动力反应和抗震安全评价的成果及运行经验都比较匮乏，至今为止，国内尚无规范对渡槽的抗震设计进行明确的规定。我国原水电部 1978 年颁行的《水工建筑物抗震设计规范》(SDJ10—78)的编制说明中指出：“渡槽等水工建筑物，由于缺少动力特性资料及实际运用经验，尚不能在此《规范》中概括，有待于进一步积累资料，于今后修订时逐步补充”。此后的 10 多年间，由于缺乏工程支撑和基础性研究长期滞后等因素，有关渡槽抗震问题的研究工作进展缓慢。1997 年由中国水利水电科学研究院主持，会同国内有关科研、设计部门和高校修编完成、水利部于 1997 年颁行的《水工建筑物抗震设计规范》(SL203—97)中，仍未列入渡槽抗震设计的相关条文。在过去的十年间，一些设计、科研部门及高校曾针对特定的渡槽设计方案进行了地震反应分析(中国水利水电科学研究院研究报告，2002，2003，2004a；王博，

2000; 李遇春, 1998), 但大型渡槽在抗震设防标准、分析方法和安全评价准则方面仍处于“无章可循”的状态, 这使得这类重大工程结构存在由于设计缺陷而导致其在强震时酿成严重灾害的隐患。因此, 随着南水北调工程的逐步展开以及对南水北调工程中大型渡槽抗震研究的深入, 结合实际工程的特点, 对大型渡槽抗震的关键技术问题进行分析 and 总结, 是十分必要的, 此也即为作者写作本书的主要目的。

1.2 大型渡槽抗震

本节介绍大型渡槽的结构特点以及大型渡槽抗震的一些关键问题。

1.2.1 大型渡槽的结构特点

渡槽主要由输水槽身、支承结构、基础(或桩基)、进出口建筑物等几部分组成。图 1.2.1 为一典型的大型渡槽纵剖面图。

以下介绍大型渡槽各主要结构的构造型式和特点:

一、支承结构和基础

渡槽支承结构将上部槽身荷载传递到基础。在渡槽的设计中, 采用的支承结构有梁式、拱式、桁架式、组合式等多种型式, 其中, 梁式渡槽和拱式渡槽比较常用。南水北调中线工程采用的大都是梁式渡槽。

梁式渡槽的支承结构可为重力墩、空心重力墩、排架等, 其上设置支座(如普通盆式支座, 高烈度地震区可选择采用隔减震支座), 渡槽槽身搁置在支座上。

在南水北调中线工程中, 大型渡槽的延绵距离长, 单跨跨度大, 如: 设计中穿过洛河的渡槽全长超过 800 m, 槽身段长 680m, 共 17 跨, 单跨跨度达到 40m。对这些大型渡槽而言, 不

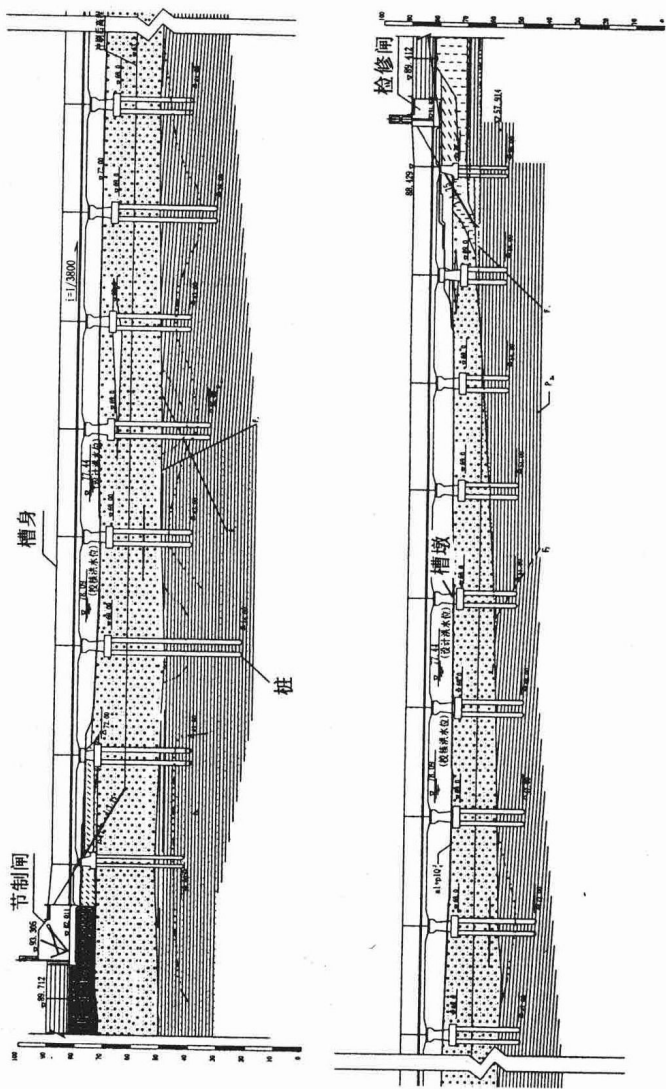


图 1.2.1 某波槽纵剖面图

同槽墩所处地基条件往往不同，槽墩高度也会随地形起伏变化而异，应研究地震作用下结构与地基的动力相互作用问题及沿不同槽墩的地震多点输入问题。此外，作为交叉建筑物的渡槽大多建于软弱土层上，通常采用桩基础支墩，此时，槽墩下的钢筋混凝土桩体和周围砂土的非线性接触边界和动态相互作用问题也十分复杂。

二、槽身

槽身的作用是输水。大型渡槽槽身常设置两个或三个过水断面，断面型式有矩形、U形或梯形等。渡槽运行方式可为单槽过水、双槽过水或三槽过水。渡槽槽身多为混凝土薄壁结构，一般由较薄的板和壳组成，有些渡槽槽身底部还设有横梁、纵梁、横肋等，槽身上部设置拉杆。

根据每节槽身支点位置不同，梁式渡槽又分为简支梁式、连续梁式等。简支梁式渡槽的结构简单，施工安装也较方便，其缺点是单跨跨中弯矩较大，底板受拉。连续梁式渡槽槽身较简支梁式受力条件好，但其施工困难，当各支点产生不均匀沉降时，槽身将产生较大的附加弯矩，还可能产生扭曲应力，故应用较少。在南水北调中线工程中，大型渡槽多采用简支梁型式。

由于渡槽结构长期处于水环境中，槽身的防渗、防漏成为其设计中十分突出的一个问题。对简支梁式渡槽而言，防渗、防漏问题包括两个方面，即槽身的抗裂止水、相邻跨段槽身之间的止水。为了满足渡槽防渗、防漏的要求，槽身设计常采用预应力钢筋混凝土结构型式，相邻跨段槽身之间设有止水缝。因此，合理的预应力配筋方案以及预应力施工技术、止水缝结构的设计及施工十分重要。

渡槽内有大量的水体。对大型渡槽而言，水体的质量一般大于槽体结构自身的质量。在地震作用下，水体与槽身之间产生动力相互作用，这一相互作用对整体渡槽的振动特性、渡槽结构的地震反应也将产生重要的影响。

三、进出口建筑物

进出口建筑物包括节制闸、检修闸等，其作用是在渡槽或上、下游填方渠道发生事故时能进行停水检修，或为了上游分水等目的。

以下结合大型渡槽的结构特点，对大型渡槽的工程抗震设防标准以及渡槽结构抗震分析的一些关键问题进行介绍。

1.2.2 工程抗震设防标准

工程抗震设防标准的确定是工程抗震研究的第一步。所谓工程抗震设防标准，是指适于工程设计用的地震动参数，它是结构抗震分析的依据。设防标准的确定是一个十分复杂的过程，涉及工程地震学、地质学、工程学、社会学、经济学等多个学科。

工程抗震设防标准和工程场地地震安全性评价密切相关。地震安全性评价是依据地震地质、地震活动性以及工程场地条件，对地震地面运动的各个参数(如：加速度峰值、反应谱、持续时间等)进行评价，它包括地震地质问题、地震问题、工程地震问题几个方面。

工程抗震设防标准的确定还应综合考虑工程的重要性、投资强度、社会发展和环境影响等多个方面的因素。也就是说，工程场地地震安全性评价给出的地震动参数并不等于设防标准。

可见，工程抗震设防标准的确定受工程结构抗震安全性和投资经济性两个方面的制约。低估设防标准，一旦遭受重大震害而失事，会导致严重的后果；而高估设防标准，为了满足结构的抗震要求，将需要过大的投入，产生浪费。特别值得注意的是，我国近几十年来多次大震的发生均出现在预期的低烈度区，因此，大型结构工程抗震设防标准的选择应十分审慎。

大型渡槽是一种重要的交叉建筑物，其抗震设防标准对工程的抗震安全性和投资经济性同样具有十分重要的影响。目前，尚无规范对大型渡槽的抗震设防标准给予明确的规定。

在对南水北调中线中的大型渡槽进行抗震分析时，主要是依据南水北调中线工程沿线地震加速度图(图 1.2.2)确定工程区的设



图 1.2.2 南水北调中线工程沿线地震加速度图

计地震加速度，并对照国家质量技术监督局《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001)确定场地的特征周期 T_g ，地震动的其他参数则结合《水工建筑物抗震设计规范》(SL203—97)(以下简称水工规范)给定，如：设计反应谱最大值的代表值取为 2.25(水工规范规定的水闸、进水塔及其他混凝土建筑物的取值)。

1.2.3 大型渡槽结构抗震分析的关键问题

确定了设计地震动参数后，即可对渡槽结构进行抗震分析。大型渡槽的震害经验少，目前，其抗震分析主要以数值计算和模拟地震振动台试验为主。以下介绍大型渡槽结构抗震分析的几个关键问题。

一、多点输入问题

地震时，地面运动过程不仅是时间的函数，而且与空间变化相关联。对大型渡槽这类跨度较大的结构进行地震反应分析时，忽略地面运动的空间变化将可能给结构反应计算结果带来较大的误差。

沿大跨渡槽各支点(槽墩)地震输入不同的原因有以下几个方面：

(1) 渡槽结构的平面尺寸很大，地震波到达各槽墩的时间不同，使得各槽墩的地震动输入产生时间滞后，即相位差。

(2) 由于地震波在传播过程中产生反射、折射和干涉、叠加、弥散等现象，导致各支点地震动相干损失。

(3) 渡槽各槽墩处的局部地基条件存在较大的差别。

考虑多点输入的影响，研究大型渡槽等大跨结构的地震反应时需涉及两个方面的问题，即：确定各支点的输入地震动时程，建立多点输入地震反应分析方法。

确定多点输入地震动时程最简单、最直接的方式是基于强震观测资料。目前，世界各地已设置了许多差动台阵，如：EI

Centro 差动台阵、东京国际机场台阵、SMART-1 台阵等，并取得了大量的强震记录。然而，由于已建或待建的结构工程在场地类型、未来可能经受的地震震级、震中距、震源深度等方面与取得记录的场地存在较大差异，已有的强震数据远不能满足实际工程的需要，因此，需要研究地震动的空间变化规律。

基于地面运动的空间变化规律研究结构地震反应，最早采用的是行波法(Mindlin et al., 1950; Dibaj et al., 1969)。这种方法假定地震波沿地表面以一定的速度传播，各点地震记录的形状没有任何变化，只有时间滞后(也可考虑幅值衰减)。行波法能考虑各点间地震动的相位变化，但却不能反映各点间地震动的波形差异。自从有了台阵记录以后，人们才开始研究各测点间真实地震记录的相互关系，并引入随机过程理论中的相关函数模拟各测点间地震动的相关性(Harichandran et al., 1986; Loh et al., 1990)。根据相关函数反映的地震动的频谱特性可生成多点地震动输入时程(Hao et al., 1989; 屈铁军, 1995)，有了多点地震动时程，就可以进行结构动力反应分析了。

根据给定的多点输入地震动时程求解结构反应的方法，最常用的是相对运动法(Dibaj et al., 1969)。相对运动法的基本思想是将结构的总位移分解成两部分：拟静力位移、动力位移。拟静力位移可通过在结构振动方程中去掉动力项后采用静力方法计算求得；将拟静力位移代回动力方程中，可确定结构的动力位移。拟静力位移和动力位移之和，即构成了结构的总位移。

另外一种模拟多点地震动输入的方法是所谓的反演—正演分析法(陈厚群等, 1990)。在这一方法中，根据地表某一点的地震记录，经过反演分析确定基岩上的地震动时程，然后，根据基岩地震动时程经过正演分析获得地表各点的输入地震动。目前，在使用透射理论结合有限元方法(廖振鹏, 2002)研究大跨结构与地基的动力相互作用时，也是采用与此相同的道理(张艳红, 1999)考虑沿结构与地基交界面上各点的不均匀地震输入问题的。

二、结构与地基动力相互作用问题

早期的结构动力反应分析是基于刚性地基假定进行的,这一假定忽略了地基的变形影响,对坚硬地基上的柔性结构物尚可行,但在涉及大型渡槽、高坝、大型桥梁、核电站等时,由于结构物整体刚度、跨度以及重量很大,特别当地基较柔时,刚性地基的假定显然不合理。此时,需要考虑结构与地基动力相互作用的问题。

研究结构与地基的动力相互作用,一个关键问题是无限地基的模拟。最简单的方法是 Clough(1980)提出的无质量地基模型,即截取一定范围内的无质量地基,并沿基底均匀输入地震波,其实质相当于在结构与地基接触边界上施加一组弹簧。这一模型由于对问题处理方法简单至今仍被广泛采用。但是,该模型不能考虑无限地基辐射阻尼的影响,也无法反映结构与地基交接面上各点地震输入的不均匀性。

模拟无限地基的一个重要方法是边界元法。较早应用有限元与边界元耦合方法分析结构与地基动力相互作用的学者有 Chopra 等(1992)、Dominguez 等(1992)、Macklerle (1996)。张楚汉等(1996)提出采用有限元—边界元—无限边界元耦合方法研究无限地基的辐射阻尼效应,并采用子结构法求解耦合系统的运动方程。在采用边界元、无限边界元方法进行分析时,无限地基对结构动力响应的影响是采用地基的动力刚度来表示的,无限边界元用来模拟远场地基,以减少离散范围并反映地基的无限性。在边界元法中,辐射条件在其基本解里自动精确满足,因而,这一方法具有较高的精度。但是,由于动力刚度是频率的函数,原则上讲,这一方法仅适合于频域分析。实际应用中常将频域中的地基动力刚度经曲线拟合法转换成时域三参数模型,然后再将此三参数模型与结构有限元模型相耦合,在时域中求解。

近年来,采用直接法研究结构与地基的动力相互作用问题得

到发展。所谓直接法,是指将结构、地基及其周围的部分无界土(即近场区)用有限元法或有限差分法离散,并引入局部人工边界模拟近场区与外部无限区域之间波动能量的交换。在直接法中,无限地基的模拟是通过截取一定范围的地基并设置局部人工边界来实现的。近几十年来,已有多种形式的人工边界被提出,例如: Lysmer 等(1969)提出的粘性阻尼边界以及 Lysmer(1978)随后加以改进而成的与频率无关的近似阻尼边界、White 等(1977)提出的统一边界、Smith(1974)和 Cundall 等(1978)提出的叠加边界、Lysmer 等(1972)提出的协调边界、Clayton 等(1977)与 Engquist 等(1977)提出的旁轴近似边界、廖振鹏等(1982, 1984)提出的透射边界等。各种边界条件都有其优缺点(Givoli, 1991),但所有边界条件都是为力求能够更好地使各角度的入射波在边界上完全透射,即无反射。

透射理论及多次透射公式(Multi-Transmitting Formula, 简记为 MTF)是基于各种单侧波动的一般过程建立的(廖振鹏, 2002),这一边界条件可以不加修改地用于由各种运动微分方程和实际边界条件控制的二维和三维波动问题,特别是与有限元方法相结合,在解决近场波动问题中十分有效。透射理论在实际工程中得到了广泛应用,陈厚群院士在“八五”期间(中国水利水电科学研究院研究报告, 1995)将这种方法引入拱坝与地基动力相互作用分析中,作者及合作者在“九五”期间(中国水利水电科学研究院研究报告, 1999)结合 300m 级小湾拱坝的抗震研究,较好地解决了人工边界的稳定性问题(廖振鹏等, 2002; 张艳红, 1999),所编制的程序在实际中得到了应用。之后,作者还针对数值模拟的计算效率、随机介质中的波动问题,提出了解决方案(张艳红等, 2001, 2004a, b)。应该说,采用透射理论结合有限元方法求解大型渡槽与地基系统的动力相互作用问题是一种可行且十分有效的数值计算方法。

三、渡槽槽身与水体动力相互作用问题

渡槽结构的一个重要特点是槽身内存在着大量的水体，一般来说，水体的质量大于槽体结构自身的质量。地震作用下，槽身与水体之间产生动力相互作用，这种流固耦合现象使得渡槽结构的地震反应问题变得十分复杂。对于类似渡槽形式的结构，采用计算手段研究结构与水体在地震作用下的反应时，常采用的方法有解析法和有限元法。

解析法(居荣初等, 1983)一般是通过寻找拉普拉斯方程满足给定边界条件的解来实现的。对于几何形状比较规整、边界条件比较简单的情形，如：圆柱形容器、矩形容器、圆环形容器等常能得到动水压力的严格解析解。但是，对于几何形状复杂的容器，严格解析解变得十分复杂，甚至无能为力。基于严格解析解的物理意义，简化算法得到发展，如分析贮液容器中动水压力的 Housner 模型(Housner, 1957)、分析大坝动水压力的 Westergaard 模型(Westergaard, 1933)等。简化算法是从工程角度出发的，形式简单，一般能满足所需精度的要求。

有限元法是对连续体结构进行离散化的计算方法。当水体由于地震波的作用而受到扰动后，流场内任一点的压力或流速势均满足二维或三维的波动方程。在给定水体与结构接触的流固耦合边界条件及水体的其它边界条件后，可采用数值方法分析水体与结构的动力相互作用问题。

解析法和有限元法是采用不同的数学手段研究流固耦合问题，在给定相同模型和边界条件的情形下，有限元计算结果和解析结果应是一致的，这可以作为相互之间进行校核、检验的依据。

比较解析法和有限元法也可知，解析法一般只能对简单的几何模型和边界问题进行分析，而有限元法则比较方便、灵活，其表达式统一，具有很强的适应性，可方便地处理各种复杂模型(如材料非均质、非线性问题)，并能方便地表达各种边界条件。然而，有限元法涉及到对大量固体单元和流体单元的数值模拟及