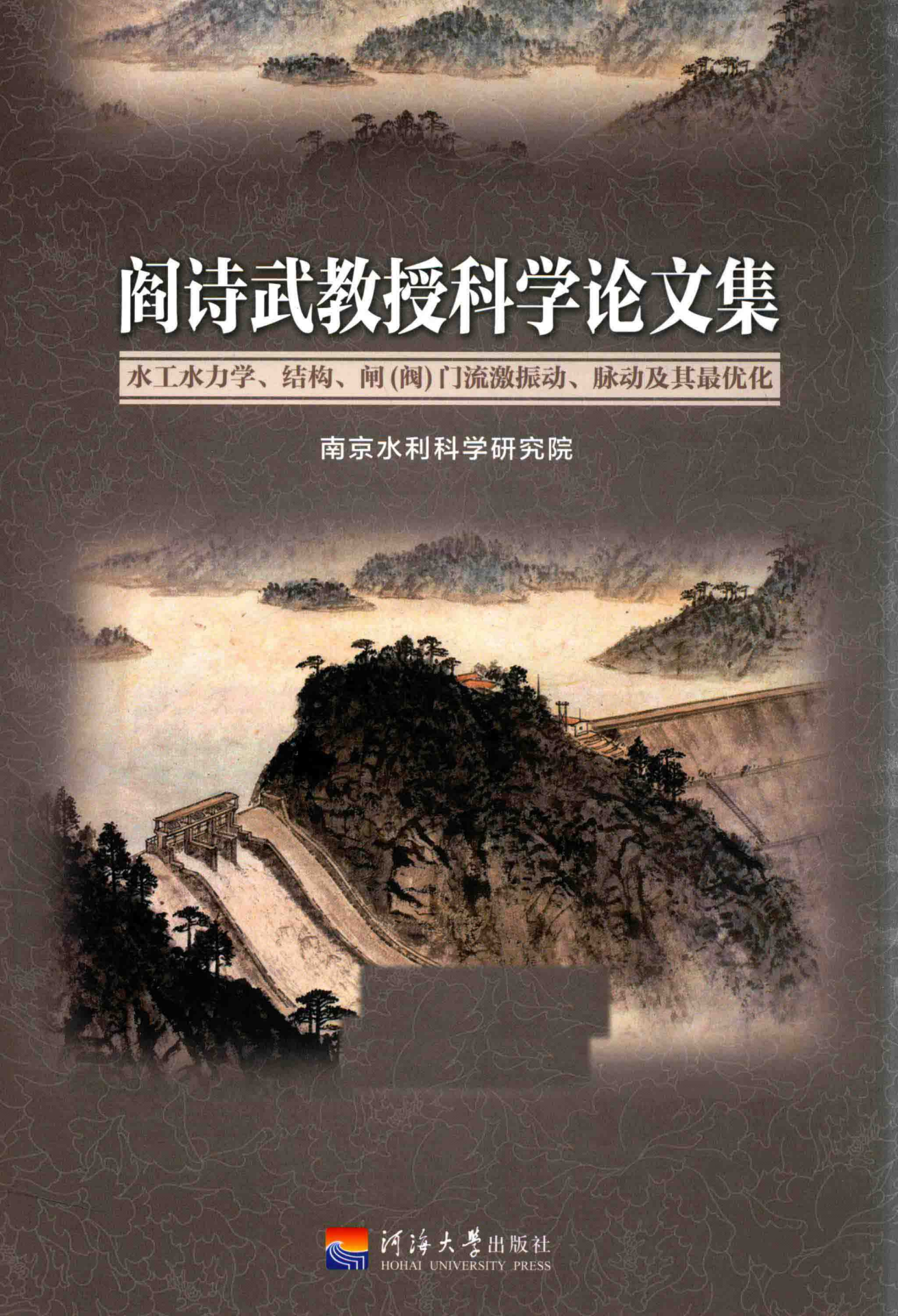




阎诗武教授科学论文集

水工水力学、结构、闸(阀)门流激振动、脉动及其最优化

南京水利科学研究院



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

阎诗武教授科学论文集

水工水力学、结构、闸(阀)门流
激振动、脉动及其最优化

南京水利科学研究院



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

阎诗武教授科学论文集 / 阎诗武著. —南京: 河海大学出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5630-3871-8

I. ①阎… II. ①阎… III. ①水利工程—文集 IV. ①TV-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 014219 号

书 名	阎诗武教授科学论文集
书 号	ISBN 978-7-5630-3871-8
责任编辑	谢业保 赵联宁
封面设计	张世立
出版发行	河海大学出版社
地 址	南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话	(025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)
经 销	河海大学出版社
排 版	南京新翰博图文制作有限公司
印 刷	南京工大印务有限公司
开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张	32.75
字 数	890 千字
版 次	2015 年 1 月第 1 版
印 次	2015 年 1 月第 1 次印刷
定 价	60.00 元

阎诗武教授简介

阎诗武,男,教授级高工,湖北人,1931年8月5日生,止于2013年10月5日。1956年毕业于华东水利学院(现河海大学)河川枢纽及水电站水工建筑系水工专业;1961—1963年在原校进修研究生基础课程;1988年4月22日—10月23日以及1990—1991年先后赴德、荷等国交访学习及合作研究。先后担任(入选)国际水力学会会员、中国水利学会会员、江苏振动工程学会常务理事、江苏水力发电工程学会理事、南京水利科学研究院技术委员会委员、水弹试验室负责人。1992年获国务院有突出贡献专家政府津贴。1986—1988年与1999年被选入国际名人录、江苏科技群英志与中国专家大辞典。先后获国家、水利部、交通部、电力工业部科技进步一、二、三等奖9次,在国内外发表论文百余篇。

阎诗武教授爱岗敬业、勤奋务实、重视基础理论及其应用研究。在承担国家“七五”“八五”科技攻关、科学基金、国家重点工程项目科学研究中,率先应用最大熵谱(MEM)、最小二乘模型(LSC)法估计水流压力脉动谱特征,应用模态分析技术识别闸门结构的振动模态参数,将有限元边界元与模态分析技术有机结合在一起研究结构的动力特性,采用信号处理与随机函数分布理论技术研究结构、闸(阀)门的流激振动与压力脉动,应用计算机仿真和计算机辅助设计技术(CADA)预估结构振动响应、并进行结构动态优化设计等,取得了一系列开创性成果。阎教授为南京水利科学研究院水弹性振动研究工作的创造人与奠基人,其成果在国内外该领域均处领先地位。

序 言

在南京水利科学研究院即将庆祝八十华诞之际,“阎诗武教授科学论文集”出版了。该集收录了阎诗武教授毕生从事科研工作的成果,涉及到水工水力学的诸多方面,特别是有关流激振动与脉动方面的理论与工程实践。

阎诗武教授 1956 年河海大学毕业,从事工作数年后,又在 1961 年至 1963 年困难时期,坚持在河海大学进修了研究生的基础课程;这为其以后的科研工作打下了坚实的基础。1988 年与 1990 年至 1991 年他先后两次被推荐作为访问学者,赴德国与荷兰有关科研机构进行合作研究,最终圆满地完成了出国考察进修任务。在他的辛勤努力下创建了南科院的水弹实验室,配置了先进的仪器设备,完成了多项工程委托与专题研究任务并培养了该专业的研究生。

我与阎诗武教授是多年的同事与朋友。有一次难忘的经历,那是在 1959 年至 1960 年期间,那时他正在水工试验棚一个高水头砖砌的水库旁专心致志地做某工程的闸门孔口出流试验,突然水库一侧边墙倒塌,猝不及防之际,砖头一下子把他整个身体压在地上,所幸他的头部附近正好有一截不高而且比较扎实的砖坎,阻挡而保护了他的头部,使他幸运的逃离一劫,否则当时就以身殉职了。可见当时条件的简陋和科研工作者的危险,只有以科研为己任,不畏困难、艰险的人才能够胜任啊!

阎诗武教授一生勤奋好学,工作踏实严谨,待人热情诚恳。今天能亲眼目睹其心血凝结的论文集的出版,倍感欣慰。他的辛勤科研劳动成果,不仅在理论上,在模拟技术及试验方法上均有创新,为促进我国水工水力学,水弹,流激振动领域的发展做出了贡献。

这是一本很有价值,内容丰富,理论联系实际参考文献。

最后感谢阎诗武教授的妻子陈宁珍老师为丈夫精心组织撰选的汇编,这本论文集才能够得以面世。

须清华

2014 年 11 月

前 言

二十世纪五十年代以来,我国水利、水电、水运工程发展迅速。在工程规划、设计、运行与科研中有关人员认识到水流激起的结构、闸(阀)门振动与压力脉动将影响到工程的安全与运行的问题,此问题逐渐引起工程界、科研界的广泛关注与重视。南京水利科学研究院多年来从事水利、水电、水运工程的试验研究工作。为确保工程安全、可靠,阎诗武教授在试验研究中辩证地将最大熵谱、模态分析、频谱分析、信号处理、最小二乘法、随机函数分布、灵敏度分析以及有限元边界元与模态分析结合等新理论、新技术、新方法应用于水利、水电、水运工程(诸如三峡、葛洲坝、新安江、二滩、水口、五强溪、小浪底、天生桥等数十项国家重大工程项目)中结构、闸(阀)门振动、脉动及其优化设计,在进行大量模型试验、原型观测的同时,对国内外已建工程进行调查研究分析和总结,解决了一些工程领域的理论与应用难题。阎诗武教授在几十年的科研工作中,撰写了百余篇的科研成果与论文,这些成果与论文除参加国内外高速水流、金属结构、信号处理与振动等方面学术会议交流,选入会议论文集外,并在国内外多种刊物上公开发表。这些作品反映了作者在研究水工结构、闸(阀)门流激振动与最优化设计领域,对理论、模拟技术及试验方法所进行的探索和创新。

阎诗武教授所取得的成果与成绩离不开南京水利科学研究院各级领导和同事的关心与帮助,以及水弹试验室全体同志的支持。此外在汇编此论文集过程中得到宗慕伟教授、赵建平高工的大力帮助,在此一并感谢。

本论文共选择 42 篇,由阎诗武教授的妻子陈宁珍老师撰选汇编出版。

本论文集可供从事水利、水电、水运工程的规划、设计、科研及运行的工程技术人员以及有关大专院校师生阅读参考。

南京水利科学研究院

目 录

《随机数据分析概要》(初稿)	1
水流压力脉动的谱分析及谱特征	59
皎口水库深水工作弧门振动初步分析	74
皎口水库底孔进口空蚀问题	82
水工水力学信号处理的基本途径	91
皎口水库底孔闸门振动的原型观测研究	103
水工弧形闸门的振动	120
二滩水电站中孔水力学问题的试验研究	134
水流压力脉动量测技术的发展	145
应用实验模态分析技术识别弧形闸门的模态参数	152
水流压力脉动的最大熵谱估计	159
水工弧形闸门的动特性及其优化方法	167
二滩拱坝泄水中孔工作弧门流激振动问题研究	177
从船闸阀门的振动问题谈三峡船闸分级的可行性	190
船闸建设的发展与阀门振动问题	200
五强溪船闸阀门结构的动特性优化与动态响应	208
流激巨型浮体扇形闸门的振荡	217
CADA 技术与拱坝动态优化设计	223
三峡船闸阀门结构动态优化设计与响应预估	229
高水头船闸阀门流激振动问题研究	240
三峡升船机塔柱结构的动特性及其优化设计研究	255
三峡升船机塔柱结构的抗震优化设计	276
泄水结构流激振动研究进展	287
巨型浮体闸门的非线性振荡	316
偏心铰弧门的流激振动问题	321
飞来峡溢流坝结构流激振动问题	329
溢流坝结构的水弹性振动问题	338
船闸阀门振动研究的发展与成就	344
船闸廊道输水阀门振动研究进展	351

泄水结构振动振源分析	361
水电站拦污栅的振动	370
三峡深孔弧门流激振动问题	375
A New Approach to Spectral Estimation for Hydraulic Pressure Fluctuations	380
Cavitation Damage to Inlet of Jiaokou Reservoir Bottom Sluice	388
Cavitation-induced Gate Vibrations Vibration De Vanne Due a La Cavitation	400
Dynamic Characteristics of Hydraulic Tainter Gates and Their Optimization	413
Dynamic Characteristics of Tainter Gates Used in Hydraulic Structures and Their Optimization	426
Identification of Modal Parameters of Tainter Gates for Hydraulic Structures	440
Main Points of Report about Hydraulics Problems at the Exits of Medium Head Outlets in Er Tan Hydroelectric Project	446
Maximum Entropy Spectral Estimation for Hydraulic Pressure Fluctuations	469
Self-excited Oscillations of a Floating Gate Related to the Gate Discharge Characteristics	479
Spectral Analysis of Pressure Fluctuations in Flow and Their Spectral Characteristics	487

未列入本文集的作品及合著作品

阎诗武, 流动激起的结构振动, 力学译丛, 1978(03).

阎诗武, 二滩水电站闸门振动初步分析, 水利水运科学研究, 1981(01).

阎诗武, 水工结构的动特性及其优化问题, 金属结构, 1991(06).

阎诗武, 空泡流场内压力脉动统计特征研究, 南京水利科学研究院.

阎诗武, 控制闸门弹性止水激起的大坝泄水底孔结构的振动, 水利水运译丛, 1982(02).

阎诗武, 高水头弧形闸门止水水工模型试验, 水利水运译丛, 1982(02).

阎诗武, 论闸门止水的自激振动, 水利水运译丛, 1982(02).

阎诗武, 国内外水工闸门止水结构的发展, 水利水运译丛, 1982(02).

阎诗武, 止水振动, 水利水运译丛, 1982(02).

阎诗武, 水工弧形闸门振动系统的振动参数与物理参数特征, 西安交通大学学报, 1982(12).

阎诗武等, 江苏嶂山闸弧形闸门振动及启闭力原观试验报告, 南京水利科学研究院(1966—1975)年研究报告汇编(水工部份), 1983.

阎诗武, 非恒定流压力谱估计的 LSL 算法, 1983, 南京水利科学研究院.

阎诗武, 新疆头屯河水库深水弧门振动试验研究报告, 1983, 1966—1978 年南科院研究报告汇编(水工部分), 1983.

阎诗武等, 二滩中孔出口段水力学问题要点报告, 四川水电发电, 1983(02).

- 阎诗武等,水动荷载激起的弧形闸门振动,(1985—1987),人民长江.
- 阎诗武,尾水闸门的振动现象及其对策,人民珠江,1985(03).
- 阎诗武,水口船闸充水廊道反弧门流激振动试验研究报告,通船问题学术交流,中国水力发电学会,通船专业委员会,西安 1989(10).
- 阎诗武,高水头船闸阀门振动——三峡船闸分级的可行性,南京水利科学研究院,1989(9).
- 阎诗武,船闸输水廊道阀门振动,船闸规范水力设计培训讲稿,1989.
- 阎诗武等,水口船闸输水廊道反弧门流激振动试验研究,南京水利科学研究院.
- 阎诗武、严根华、马萍章、骆少泽,葛洲坝 2[#] 船闸阀门振动原型观测,南京水利科学研究院,1990.
- 阎诗武,船闸阀门振动研究发展与成就,南京水利科学研究院,1990.
- 阎诗武,结构与介估相互作用理论及其应用,河海大学学报,1992 年(04).
- 阎诗武等,三峡船闸阀门流激振动综合研究,1992.
- 阎诗武等,三峡船闸阀门流激振动问题研究,1992.
- 阎诗武,我国研究闸门振动的发展与成就,南京水利科学研究院.
- 阎诗武,小浪底工程排沙间工作弧门流激振动研究,南京水利科学研究院,1994(03).
- 阎诗武,应用 CADA 技术进行闸门结构的动态优化设计,在全国水工金属结构专业与情报网大会上宣读,1994.
- 阎诗武等,高水头充泄水阀门体型及结构动力特性研究——非恒定流压力脉动的谱估计(“七五”三峡工程重大装备科技攻关项目),南京水利科学研究院,1992 年 1 月
- 阎诗武,空泡流场内压力脉动统计特征研究,南京水利科学研究院
- 阎诗武、马萍章等,五强溪船闸输水阀门流激振动试验研究报告,南京水利科学研究院,1991(04).
- 阎诗武、严根华、骆少泽、陈发展,三峡船闸采用正弧形闸门的可行性,南京水利科学研究院,1994(08).
- 阎诗武、严根华、骆少泽、陈发展,三峡船闸函弧形输水阀门流激振动初步研究,南京水利科学研究院,1994(08).
- 阎诗武、严根华、骆少泽、陈发展,三峡船闸反弧形输水阀门流激振动初步研究,南京水利科学研究院,1998(01).
- 阎诗武、骆少泽,三峡船闸输水阀门流激振动问题,南京水利科学研究院,1995(01).
- 阎诗武、骆少泽,乌鲁互挖工程泄洪排沙用弧门流激振动研究报告,南京水利科学研究院,1996(06).
- 阎诗武、蒋梁、骆少泽、陈发展,小浪底工程 1[#] 以流洞闸门水力学及流激振动研究报告,南京水利科学研究院,1996(06).
- 阎诗武、骆少泽,飞果峡溪流坝结构流激振动综合研究,南京水利科学研究院,1996(04).
- 阎诗武、骆少泽、陈发展、余伟桥、李代茂、骆小筑,溪流坝结构流激振动问题研究,应用力学,1997 专刊.

- 阎诗武、骆少泽,天生桥一级水电站放室洞工作闸门流激振动研究报告,南京水利科学研究院,1997(01).
- 严根华、阎诗武,水工弧形闸门动力特性的实验模态分析,水利水运科学研究,1990(03).
- 严根华、阎诗武,水口弧形闸门的水弹性耦合自密特性研究,水利学报,1990(07).
- 严根华、阎诗武,水口弧形闸门动力特性的实验模态分析,南京水利科学研究院,1990(09).
- P. A. Kolkman,阎诗武,浮体闸门的自激振荡,第廿一届国际水力学会议编入 IAHR,1991,马德里.
- 骆少泽、阎诗武,最大熵谱估计程序,南京水利科学研究院,1991(01).
- 严根华、阎诗武、骆少泽,抽水蓄能电站拦污栅振动试验研究,南京水利科学研究院,1992(01).
- 骆少泽、阎诗武,非恒流压力脉动的谱估计,水力发电学报,1992(01).
- 骆少泽、阎诗武,水流信号的最大熵谱估计程序及其应用,水利水运科学研究,1992(03).
- 严根华、阎诗武,水工泄水结构动态优化方法及其在弧门中的应用,水利水运科学研究,1992(06).
- 严根华、阎诗武,水工弧形闸门三维水弹耦合共振频率的数值计算,水利水运科学研究,1993(03).
- 严根华、阎诗武,二滩水电站泄水中孔水弹性振动研究,实验力学第 10 卷增刊,1993.
- 骆少泽、阎诗武,非恒定流压力脉动的谱估计,水力发电学报,中国水力发电工程学会,1993.
- 严根华、阎诗武、樊宝康,水工泄水结构振动模态分析与有限元综合法,振动、测试与诊断,1994(03).
- 严根华、阎诗武,三峡船闸输水阀门动态优化及动力可靠度分析,南京水利科学研究院,1995(01).
- 严根华、阎诗武、骆少泽、陈发展,高水头闸船阀门振动动力可靠研究,振动测试与诊断,1996(02).
- 骆少泽、阎诗武、陈发展,五强溪泄水闸工作弧门流激振动研究报告,南京水利科学研究院,1997(01).
- 骆少泽、阎诗武、陈发展,五强溪船闸输水阀门流激振动原型观测报告,南京水利科学研究院,1997(07).
- 骆少泽、阎诗武、陈发展、樊宝康,水口船闸输水阀门流激振动原型观测报告,南京水利科学研究院,1998(01).
- 骆少泽、阎诗武,水电站泄水结构动态特性的直接识别方法,南京水利科学研究院,1998(09).
- 严根华、阎诗武,流激闸门振动动态优化设计,南京水利科学研究院,1999(03).
- 严根华、阎诗武,小浪底工程工作闸门动力可靠性和动安全设计技术研究,南京水利科学研究院,1999(03).
- 樊宝康、阎诗武,基于动柔度法的门杆耦合,实验力学,1999(01).
- 严根华、阎诗武,流激闸门振动及动态优化设计,水利水运科学研究,1999(01).

严根华、阎诗武,弧形闸门结构的动力可靠性及抗震设计,水利水运科学研究,2000(03).

严根华、阎诗武、樊宝康、骆少泽、陈发展、汪志龙、蔡强洲、腾怒南,高水头大尺寸闸门流激振动原型观测研究,水力发电学报,2001(02).

陈发展、严根华、阎诗武,百年水利枢纽泄水中孔水力学及闸门流激振动研究报告,南京水利科学研究所,1999(09).

骆少泽、陈发展、阎诗武,东风水电站泄洪振动原型观测,振动工程学报(工程应用专辑),2001,10月.

Yan Shiwu, A Preliminary Vibration Analysis of High-head Radial Gate at Jiukou Reservoir, Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, No.1, 1981.

Yan Shiwu, Advance for the Calvert valve vibration study in Navigation Locks.

Yan Shiwu, Basic Approaches to Hydraulic Signal Processing for Hydraulics Structures, Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, No. 3, 1984.

Yan Shiwu, Cavitation Damage in the Bottom Sluice at the Jiakou Reservoir, Journal of Hydraulic Engineering, No. 3, 1983, Beijing.

Yan Shiwu, Cavitation—Induced Gate Vibrations, Journal of Hydraulic Engineering, vol.1. Oct-Dec, 1992.

Yan Shiwu, Cavitation—Induced gate Vibrations Vibrative De Vance Due A LA Cavitation.

Yan Shiwu, Development in Navigation—Lock Construction and Valve Vibration Problem.

Yan Shiwu, Field Observation of vibration in Bottom Sluice Gate at Jiakou Reservoir, Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, No.1. March, 1985.

Yan Shiwu, Flow-Induced Vibration of Radial Gate with Eccentric Pivot.

Yan Shiwu, Flow-Induced Valve Vibration In a high-Head Navigation Lock.

Yan Shiwu, Flow-Induced Vibration Problems of Radial Regulating Gate in Intermediate Output At Ertan Arch Dam.

Yan Shiwu, Hydraulic Model and Prototype Investigation on vibration and operating Forces of Tainter Gate Zhangshax sluice, Nanjing Hydraulic Research Institute, 1972.

Yan Shiwu, Identification of Model Parameters for Tainter Gate by Model Analysis Technique, Journal of Hydraulic Engineering, No.5, 1987, Beijing.

Yan Shiwu, Identification of Model Parameters for A Hydraulic Tainter Gate.

Yan Shiwu, Maximum Entropy of the Method Spectral Estimation for Hydraulic Pressure Fluctuations.

Yan Shiwu, Model Investigation on the Vibration for the deep-water gate of the Tatum River Reservoir in Xinjiang, Nanjing Hydraulic Research, Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1974.

Yan Shiwu, Main Points of Report About Hydraulic problems at the Exit of Medium Head Outlet in Ertan Hydroelectric Project, Nanjing Hydraulic Research Institute,

March, 1983.

Yan Shiwu, On tainter Gate Vibration, Metal Structure, No.5, 1985.

Yan Shiwu, Prototype Observation of Bottom sluice Gate Vibration at Jiaokou Dam, Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, No.1, 1983.

Yan Shiwu, Spectral Analysis and Characteristics of Spectrue for Pressure Fluctuations in fluid Flow, Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, No. 1981.

Yan Shiwu, Spectral Estimation of Pressure Rocture in unsteady flow, sixth IAHR symposium on strcheilic Hydraulic, 1992.5.

Yan Shiwu, The Enternal Development Trand On Gate Seal, Translation Collection of Nanjing Hydraulic Research Institute, No,2,1982.

Yan Shiwu, The International Sympostun on Hydraulic for High Dam; maximum Entropy spectral Estimation for Hydraulic Pressure Fluctuations.

Yan Shiwu, The development and Achievement in Scientific Research of value vibration in Navigation Locks.

Yan Shiwu, Tests and Studies on Hydraulics of middle—level Oriffices Ertan Hydroelectric Project, Sichuan Water Power, No, 2, June, 1987.

Yan Shiwu, Hydraulic Model and Prototype Investigation on Vibration and Operating Forces of the Tainter Gate Zhangshan Sluice, Nanjing Hydraulic Research Institute, 1972.

Yan Shiwu, Spectral Analysis and Charactersitics of spectrum for Pressure Fluctation in Fluid flow, Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, No.1. 1981.

Yan Shiwu, The External Development Trand on Gate seal, Translation Collection of Nanjing Hydraulic Research Institute, No.2, 1982.

Yan Shiwu, Basic Approaches to Signal Processing for Hydraulics of Hydraulic Structures, Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, No.3, 1984.

Yan Shiwu, Field Observation of Vibration in Bottom Sluice Gate at Jiaokou Reservoir, Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, No.1, March, 1985.

Yan Shiwu, Tests and Studies on Hydraulics of Middle-level oriffices of Ertan Hydroelectric Project, Sichuan water power, No.2, June, 1987.

Luo Shaoze and Yan Shiwu, Spectral Estimation of Pressure Fluctuations in Unsteady Flow, Sixth IAHR international Symposium on Stochastic Hydraulic Taipei Taiwan.

Wu Fusheng, Yan Shiwu, Vibrations Studies for Resersed Tainter in Hight—lift ship Locks, Proc. Vol Internation Symposious on Hydrualic Reserch in Nature and Lobortory, Wu han, China.

《随机数据分析概要》(初稿)

前言

随机数据的测量与分析已在相当广泛的领域得到普遍应用,其基本理论与分析设备已日趋完善。与其他领域相比,其在水利工程方面的应用较晚。水动力学一个最年轻的分支——随机水力学的形成,是随机函数理论与水动力学结合的一个明显证例。此前,已有相当文献引用了这一概念解释水力学的某些现象。波浪问题的研究中早已对海浪进行波谱分析;最近在泥沙、渗流与压力脉动以及水动力激起的结构振动方面,相当广泛地应用了随机函数理论。我国亦开始了这方面的研究工作,不少兄弟单位做过不少工作。我们前段时间曾结合工程问题开始分析水流压力脉动的某些特征。最近力学学会组织的随机数据分析方面的学术交流及讨论班无疑将对力学各领域的随机数据分析的普及起着积极的推动作用。随机数据分析的理论方法及有关专用设备的性能等方面的知识普及已成为当务之急。本文系结合前段时间的工作及学习心得,仓促完成,作为介绍的讲稿,如果能起到抛砖引玉的作用,将感到莫大幸慰,错误之处在所难免,请批评指正。

一、概述

(一) 数据的分类

数据与函数一样是一个抽象的概念,对不同的领域有其具体的物理含义。自然界物理量的描述往往要用数据表示其量级及运动变化的状况,社会科学中也存在类似现象。特别是各种不同领域中,试验及实际生产取得的大量力、电、声、光、磁等物理量的数据都存在如何描述的问题。显然,对不同性质的数据将有不同的描述方法。

一般可粗略地将这些数据分为确定性和非确定性或随机性的两大类。能用明确的数量关系式描述的数据称为确定性数据。例如,考察一个弹簧常数为 K , 质量为 m 的单质点的弹簧质量系统,如图 1 所示。假定弹簧上端固定在钢体上,质块 m 只能沿 x 轴移动,如果给质块 m 一个初位移而后放松,则质块 m 将在平衡位置附近来回振动。这样一个单质点弹簧系统的单自由度振动可以根据力学原理建立微分方程,其精确解为:

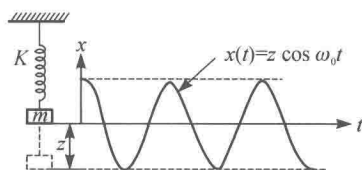


图 1 单质点弹簧系统

$$x(t) = x \cos \sqrt{\frac{t}{m}} t, \quad t > 0 \quad (1-1)$$

其变化规律见图 1 中的 $x(t)$ 曲线, 它可确定 $t > 0$ 的任何时刻刚体的精确位置, 即当物理参数已知时其运动状态可以预知。

但是, 大量的数据并非如此, 一般都不能用精确的方程表示, 也不可能预知, 这样的数据是随机性的。实际遇到的数据大都属这种类型。例如: 电子学中的噪声, 地面给汽车和拖拉机的作用力, 风对高层结构的作用, 湍流中的压力与流速的脉动, 海浪、地震对建筑物的激励以及爆炸对结构的作用等, 都属随机性的。水利工程中, 水动力对水工结构及波浪对结构的作用, 地震对水工结构的作用, 以及爆炸对结构的作用都是随机性的。因而, 在这三类随机荷载作用下, 结构必将产生随机振动。只有利用随机振动理论才可能确切描述这类振动问题。

综上所述, 自然界与社会上发生的现象虽多种多样, 但总可分为确定性或随机性的两大类。确定性的现象所表现的数据变化又可分为周期性和非周期性两大类; 而随机性数据又可分为平稳与非平稳两大类, 详见图 2。

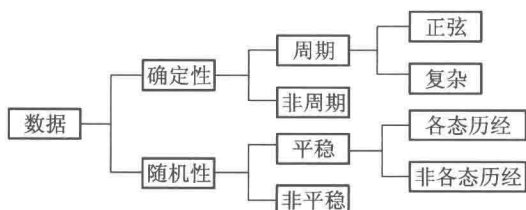


图 2 数据的分类

(二) 数据的描述

不同类型的数据将对应不同的描述方法。将分类叙述如下:

1. 确定性数据的描述

(1) 正弦波

我们首先来考查最简单和最基本的正弦波动。图 3(a) 所示的正弦波可用下式表示:

$$x(t) = A \sin \omega_0 t \quad (1-2)$$

式中: A 为振幅; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为振动的角频率; f_0 为频率, 表示单位时间内的振动次数; t 为时间。

对任意时刻 t , $x(t)$ 的值可精确地由式(1-2)确定, 其幅频特性见图 3(b)。有两个参数 A 及 f_0 即可完全确定 $x(t)$ 。

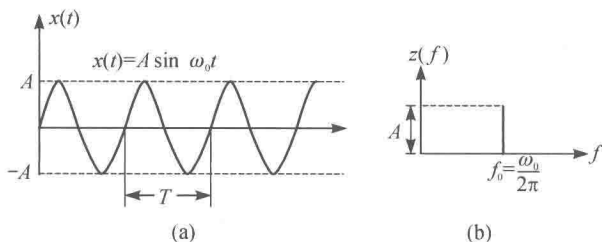


图 3 正弦波

(2) 周期性波

图 4(a) 所示为一复杂的周期性波动。可用以下函数表示:

$$x(t) = x(t \pm nT) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-3)$$

它在一段区间上由基波及其整数倍周期的波所组成。两相邻波峰或波谷之间的时间 T 称为周期, $\frac{1}{T} = f_1$ 称为基频, 当 $f_1 = f_0$ 时即为正弦波。一般, 这类复杂的周期波可用傅里叶级数表示:

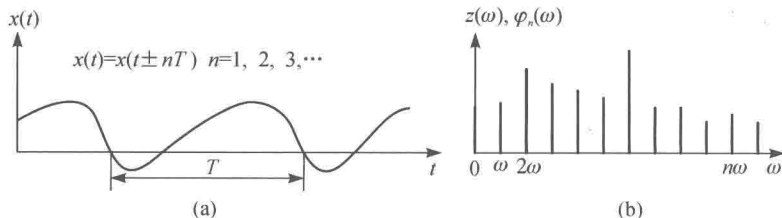


图 4 周期波

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \\
 &= x_0 + \sum_{n=1}^{\infty} x_n \cos(n\omega t + \varphi_n)
 \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中: $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ 为角频率,

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos n\omega t dt, \quad n = 1, 2, \dots \quad (1-5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin n\omega t dt, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$x_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt,$$

$$x_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2},$$

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right).$$

其物理意义是将复杂的周期波动分解为许多简谐波之和,这些简谐波动的频率与基频成整倍关系。式(1-4)中的 $x_n(n\omega t + \varphi_n)$ 称为 $x(t)$ 的一个谐波分量,其幅频特性见图 4 (b)。上述处理过程称为谐波分析,因而也可将复杂的周期波动理解为 n 个倍频关系谐波叠加的结果。

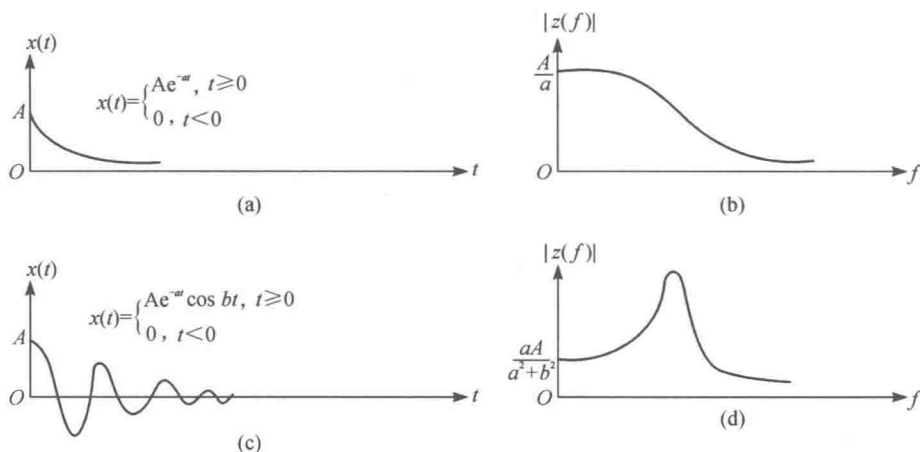


图 5 非周期波

(3) 非周期波

非周期波如图 5 所示。任一非周期波动 $x(t)$ 若绝对可积,即:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (1-6)$$

则 $x(t)$ 可用傅里叶积分表示:

$$x(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega t d\omega + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \sin \omega t d\omega \quad (1-7)$$

其中:

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cos \omega t dt, \quad B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \sin \omega t dt. \quad (1-8)$$

下面我们将式(1-4)级数开拓,可直观地推导出式(1-7)。

考查图 4(a),若适当调整 T 轴位置,可使式(1-4)中的系数 a_0 为零。图 4(b)中 $\varphi_n(a) \sim \omega$ 图第 n 个位置频率为:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} \cdot n = \omega \cdot n \quad (1-9)$$

第 n 个谐和频率和相邻谐和频率的间隔为:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1-10)$$

当周期 T 增大时,频率的间隔 $\Delta\omega$ 变小。当 $T \rightarrow \infty$ 时,图 4(b)中 $\varphi_n(\omega) \sim \omega$ 的离散性就连成一片,则 $x(t)$ 将不再表示周期现象,也就不能将其分解为离散的频率分量。

令 $a_0 = 0$, 将式(1-5)代入式(1-4)得:

$$\begin{aligned} x(t) = & \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos n\omega t dt \right) \cos n\omega t \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin n\omega t dt \right) \sin n\omega t \end{aligned} \quad (1-11)$$

利用式(1-9)和式(1-10),上式可写成:

$$\begin{aligned} x(t) = & \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \omega_n t dt \right) \cos \omega_n t \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin \omega_n t dt \right) \sin \omega_n t \end{aligned} \quad (1-12)$$

当周期 $T \rightarrow \infty$ 时, $\Delta\omega \rightarrow d\omega$, 求和变为求积分,而且,频率将在一个宽广的频带上变化,可将 ω_n 记为 ω 。因此,上式可写成:

$$\begin{aligned} x(t) = & \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt \right) \cos \omega t \\ & + \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin \omega t dt \right) \sin \omega t \end{aligned} \quad (1-13)$$

令:

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt, \quad B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin \omega t dt \quad \text{即(1-8)}$$

则得: $x(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega t d\omega + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \sin \omega t d\omega$ 即式(1-7)推导完毕。

我们称 $A(\omega)$, $B(\omega)$ 为 $x(t)$ 的傅里叶变换分量。而式(1-7)是 $x(t)$ 的傅里叶积分表达式或称为傅里叶逆变换。由于复数形式的傅里叶变换更加方便,实用上往往应用复数形式

的傅里叶变换。

应用熟知的欧拉公式:

$$e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta, e^{-i\theta} = \cos\theta - i\sin\theta \textcircled{1} \quad (1-14)$$

可得:

$$\cos\theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}, \sin\theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i} \quad (1-15)$$

定义 $x(\omega)$ 为:

$$x(\omega) = A(\omega) - iB(\omega) \quad (1-16)$$

将式(1-8)代入式(1-16),得:

$$\begin{aligned} x(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)(\cos\omega t - i\sin\omega t) dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i\omega t} dt \end{aligned} \quad (1-17)$$

我们称 $x(\omega)$ 为 $x(t)$ 的傅里叶变换。下面我们将讨论如何将式(1-7)表示为类似的紧凑形式。首先必须注意到式(1-8)中 $A(\omega)$ 是 ω 的偶函数, $B(\omega)$ 是 ω 的奇函数。因而 $A(\omega)\cos\omega t$ 和 $B(\omega)\sin\omega t$ 都是 ω 的偶函数,当 ω 变号时,它们都不变号。所以傅里叶积分式(1-7)有如下等效表达式:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega)\cos\omega t d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} B(\omega)\sin\omega t d\omega \quad (1-18)$$

由于 $A(\omega)$ 是 ω 的偶函数, $\sin\omega t$ 是 ω 的奇函数,于是:

$$\int_{-\infty}^{\infty} A(\omega)\sin\omega t d\omega = 0 \quad (1-19)$$

同理:

$$\int_{-\infty}^{\infty} B(\omega)\cos\omega t d\omega = 0$$

将式(1-19)加到式(1-18)中去,并不影响 $x(t)$ 的值。故可得:

$$\begin{aligned} x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega)\cos\omega t d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} B(\omega)\sin\omega t d\omega \\ &\quad + i \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega)\sin\omega t d\omega - i \int_{-\infty}^{\infty} B(\omega)\cos\omega t d\omega \end{aligned} \quad (1-20)$$

合并同类项可得:

$$\begin{aligned} x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} [A(\omega) - iB(\omega)](\cos\omega t + i\sin\omega t) d\omega \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(\omega)e^{i\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (1-21)$$

式(1-21)就是 $x(t)$ 的复数形式的傅里叶积分表达式。现将式(1-17)与式(1-21)重写如下,称它们为“傅里叶变换偶”:

① 式中 $i = \sqrt{-1}$ 。