

Gongshui Guanwang Xiandai Lilun
Yu Gongcheng Jishu Lunwenji

供水管网现代理论与工程技术论文集

刘遂庆 郑小明 主编
中国城镇供水排水协会
供水专业委员会管道技术部
科学技术委员会给水专业部

中国建筑工业出版社

供水管网现代理论与工程技术论文集

刘遂庆 郑小明 主编

中国城镇供水排水协会
供水专业委员会管道技术部
科学技术委员会给水专业部

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

供水管网现代理论与工程技术论文集/刘遂庆, 郑小明
主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2007

ISBN 978-7-112-01694-5

I. 供… II. ①刘…②郑… III. 给排水系统—管网—
文集 IV. TU991-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 155336 号

本书收录了 109 篇会议论文, 是从连续 7 年的城市供水管网科学技术联合研讨年会 300 余篇会议论文中精选出来的。分为 10 个专题: 第 1 篇给水管网规划和设计; 第 2 篇管网计量和流量管理; 第 3 篇管网数据检测与管理; 第 4 篇管网地理信息系统; 第 5 篇管网水力建模技术和应用; 第 6 篇管网水质保护与管理; 第 7 篇管网运行科学调度; 第 8 篇管网检漏和漏水控制; 第 9 篇管网二次供水管理和爆管事故控制; 第 10 篇管网维护与更新改造。

本书可作为从事供水管网管理与研究专业人员的工作或学习的参考书, 还可作为高等学校教师、本科生、研究生的参考书。

* * *

责任编辑: 王美玲

责任设计: 董建平

责任校对: 孟楠 王雪竹

供水管网现代理论与工程技术论文集

刘遂庆 郑小明 主编

中国城镇供水排水协会

供水专业委员会管道技术部

科学技术委员会给水专业部

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京市彩桥印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1 092 毫米 1/16 印张: 38½ 字数: 931 千字

2007 年 11 月第一版 2007 年 11 月第一次印刷

印数: 1—2 000 册 定价: 86.00 元

ISBN 978-7-112-01694-5

(14643)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书编委会名单

主任委员：刘遂庆 郑小明

委 员：赵洪宾 韩德宏 郭 智 王耀文 李 伟
曹增万 何维华 陈明吉 张明德 戴 婕
周玉文 吕 谋 许仕荣 沈裘昌 马福康
信昆仑 李树平

序

改革开放以来，我国城镇供水事业有了长足的发展，为国家的高速经济发展和人民生活水平不断提高提供了重要的基础设施保障条件。作为供水设施的重要组成部分，供水管网建设和运行管理科学技术的发展，已经成为我国城镇供水科学技术进步的重要标志之一。国内科研单位、供水企业及管理部门在供水管网设计和运行理论研究及新材料、新工艺、新技术的开发和应用等方面开展了卓有成效的工作，取得了丰硕的成果。

从1999年开始，中国城镇供水排水协会供水专业委员会管道技术部与中国土木工程学会水工业分会给水委员会管网研究会(2006年随中国城镇供水排水协会成立，分别改为供水专业委员会管道技术部与科学技术委员会给水专业部管网研究会)紧密合作，积极开展学术交流，逐年组织召开了“管道更新改造技术”、“管道漏损控制”、“城镇供水管道施工与养护技术”、“城镇二次供水技术和管理”、“管道新材料新工艺新技术应用”和“管网信息化技术应用”等系列型专题研讨会，汇集和交流了数百篇具有理论和实际应用价值的专业科学技术论文，有力地推动了供水行业的技术发展和进步，集中体现了我国供水管网科学技术进步的现状和发展方向。

为了进一步提高上述论文的专业应用价值和交流范围，研讨会主要组织者从数百篇交流论文中选出百余篇，编辑出版了本论文集，更加集中地反映了近年来国内供水管网科学研究和现代技术进步成果，具有重要的理论意义和应用价值。本论文集凝聚了供水行业和高等院校广大科技人员的辛勤劳动和智慧，将受到全国供水行业和管网科学技术工作者的欢迎，我谨对论文集的作者、编撰者表示感谢，并对论文集的发行致以祝贺。

中国水协会会长 李振东

2007年8月

前 言

在我国社会和经济建设高速发展的过程中，城市给水管网系统起着十分重要的作用，时刻展现出迫切的现代化科学技术需求，为城市供水规划设计、运行管理和人才培养及科学研究部门提出了光荣而艰巨的任务和协作攻关的平台。越来越多的领导决策人员和专业科技工作者，为我国城市供水管网现代化建设科学技术进步做出了艰辛的研究和积极的探索，为给水管网的现代化建设做出了不懈的努力，取得了丰硕的成果。

自 1999 年以来，中国城镇供水协会科技委员会管道技术部和中国土木工程学会给水委员会管网研究会(2006 年随中国城镇供水排水协会成立分别改为供水专业委员会管道技术部与科学技术委员会给水专业部管网研究会)在国内自发创建了产学研合作模式，举办城市供水管网科学技术联合研讨年会，已经连续七年，每年年会的参加人数均在 120 人左右，累计达近千人次。每年交流论文 50 篇左右，并连续编印了七本年会论文集，论文总数超过 300 篇。历届年会中，来自城市供水企业、规划设计单位和高等院校交流了在管网建设和管理领域中的高新技术需求、现代化建设经验和理论研究成果，加强了供水企业和科研教育单位的合作关系，为给水管网的现代化科学技术进步做出了积极贡献。

三百余篇给水管网专题论文，广泛覆盖了国内给水管网现代化建设和科学技术进步的理论研究成果和工程技术应用经验，凝聚了国内供水企业和科研设计单位的专家和工程技术人员的不辛努力和敬业精神，展现了国内城市供水管网建设的巨大成就，记载了国内城市供水管网科学研究和科学技术十年发展历史，特别是 2004 年至 2006 年的年会论文，体现了国内城市供水管网科学技术进步和水平，具有长远的借鉴意义和参考应用价值。为此，我们组织了一个编委会，从这三百余篇论文中选编了具有代表性的论文 109 篇，分成 10 个专题，编辑出版本论文集，以期进一步发挥年会论文的长效作用和价值，也是对七次管网联合年会的总结。在编辑过程中，以保持原论文内容和避免重复为准则，对部分论文进行了删减和修改，对个别来自同一单位且内容相近的论文进行了合并和整理，提高论文的质量和值，集中反映该单位的科技进步和成果。我们期望本论文集能够成为广大城市给水管网科技和工程技术人员在今后工作中的重要参考书。

中国城镇供水排水协会的成立，为我国城镇给水排水事业发展和现代化科学技术进步开辟了新时期，我们愿以本论文集表达对中国城镇供水排水协会成立的祝贺，并在本论文集选集的基础上，以更高的目标和更坚定的信心，为我国给水管网建设科学技术现代化，做出更大贡献。同时，向参加历年年会和积极撰写论文的领导、专家和工程技术人员表达诚挚的敬意和感谢。

《供水管网现代理论与工程技术论文集》编委会

2007 年 8 月

目 录

第 1 篇 给水管网规划和设计	1
1-1 给水管网水力分析与优化设计理论发展和技术应用	刘遂庆 信昆仑 1
1-2 给水管网优化设计虚流量理论与算法改进研究	方永忠 刘遂庆 10
1-3 给水管网优化设计混合遗传算法	葛 琳 许仕荣 16
1-4 城市供水需水量预测方法研究与应用	何 芳 王煜明 马力辉 22
1-5 给水管网系统性能评价方法研究	伍悦滨 赵洪宾 30
1-6 上海供水管网简况、问题及对策	郑小明 姚黎光 宋仁元 35
1-7 天津市供水管网运行管理模式初步探讨	郭 智 闫尚宏 姚慧健等 43
1-8 广州市应对水源突发污染的供水安全保障体系	刘晓飞 袁永钦 50
1-9 珠海咸期应急供水工程之输水系统介绍	韩梅平 刘万里 鲁傲岳 56
1-10 南宁市供水水源选择及应急供水对策	谭良良 聂国荣 梁侠津等 60
1-11 成都市 2010 年供水管网规划研究	李 伟 67
1-12 西安市城区 172 万 m ³ /d 给水管网扩改工程	孔繁涛 74
第 2 篇 管网计量和流量管理	77
2-1 流量计在自来水管网中的应用	李建军 77
2-2 大口径贸易结算计量器具选型浅析	李 凌 83
2-3 大口径水表实时监测的应用效果分析	吴天蒙 王 蕙 毛 风等 87
2-4 大口径水表远传监控在供水营销管理中的作用	刘 健 瞿国华 92
2-5 供水三级计量体系及在漏损控制中的作用	单海泉 96
2-6 总线直读式远传水表	吴 杰 100
2-7 HFC 网络远程抄表系统	郑小明 冯 益 杨文灿等 105
2-8 城市供水管网区域管理初步研究	周玉文 刁克功 吴 珊等 108
2-9 管网分区计量控制产销差初探	郑小明 113
2-10 深圳水务集团区域计量项目(DMA)建设	常永第 赵军锋 118
2-11 天津自来水营业计算机管理系统的开发 应用与展望	郭 智 刘 玛 钮祥莹等 122
第 3 篇 管网数据检测与管理	128
3-1 物理勘探技术在管线探测中的应用	李永光 128
3-2 GPRS 技术在管网压力监测系统中的应用	吴 杰 冯冬青 135
3-3 GPS 测量城市给水管网探讨	周玉文 冯 润 邓洪亮 140
3-4 GPS 在自来水管网管理中的运用初探	朱培元 单国平 周克梅 144
3-5 供水管网超低功耗水力水质数据采集仪开发	邓 涛 吴晨光 赵洪宾等 148
3-6 协方差分析在确定水泵特性曲线中的应用	马力辉 刘遂庆 153
3-7 供水泵站水泵性能现场测试技术探讨	何 芳 郭伍珍 吴 迪等 157

3-8	南京市供水调度 SCADA 系统开发与应用	尤博文 季 明	163
3-9	新一代供水管网远程监测系统及其应用展望	沈 强	168
第 4 篇	管网地理信息系统		175
4-1	城市供水信息管理决策支持系统设计和开发	张宏伟 牛志广 刘洪波等	175
4-2	城市供水管网档案系统的建立和管理	偶炯民	183
4-3	供水管网地理信息系统的开发和应用	耿为民 刘遂庆	191
4-4	给水管网 GIS “分层开发” 技术路线	刘遂庆	197
4-5	基于 ArcInfo 平台的城市地下管网信息系统	姜玲玲 马运涛	201
4-6	基于 Internet GIS 的武汉供水管网地理 信息系统	俞良协 邱文心 刘永启等	205
4-7	南京供水管网地理信息管理系统开发与应用	单国平 张兰芬 邵 方	212
4-8	宁波城市供水管网地理信息系统的开发与应用	任基成 蒋 敏	217
4-9	北京市市区配水管网地理信息管理系统升级改造	王耀文	222
第 5 篇	管网水力建模技术和应用		227
5-1	给水管网建模与科学调度软件技术应用	刘遂庆 信昆仑	227
5-2	基于 GIS 的管网动态水力模型的建立与应用	周玉文 何 敏 方 琦等	232
5-3	供水管网事故时的水力模拟计算与分析	周建华 赵洪宾	238
5-4	供水管网水力模型的更新维护	陈宇辉 何 芳	242
5-5	南京市供水管网实时模拟软件开发与应用	周克梅	248
5-6	佛山市给水管网计算机实时模拟软件开发 和应用	刘遂庆 曹国栋 王煜明等	252
5-7	天津市给水管网系统建模研究	赵洪宾 周建华 阎继民	257
5-8	烟台开发区供水系统模拟及应用研究	袁一星 邓 汇 魏希柱等	262
5-9	成都市供水管网动态模型的建立及应用	陈宇敏 林建国 李 伟等	267
5-10	给水管网系统中的水力瞬变分析	伍悦滨 刘遂庆	272
5-11	供水管网瞬态水力模型和计算方法研究	陈 凌 刘遂庆 李树平等	279
第 6 篇	管网水质保护与管理		286
6-1	给水管网水质的安全输配	赵志领 赵洪宾 阴沛军等	286
6-2	城市供水系统水质化学稳定性变化规律研究	许仕荣 方 伟 施 周等	292
6-3	供水管网模型在管网水质控制中的应用	李 伟 符 达 童雪丰	298
6-4	应用 PCR—DGGE 研究饮用水中微生物的多样性	吴 卿 赵新华	306
6-5	基于模糊数学的供水管网水质评价方法研究	王 强 刘遂庆 李树平	312
6-6	给水管网内壁腐蚀瘤物理化学特性研究	施 周 周 滔 方 伟等	318
6-7	供水管网腐蚀问题的预测方法研究	岳琳 张宏伟 牛志广等	324
6-8	生物膜的生长与影响因素	钟丹 赵洪宾 袁一星	330
6-9	给水管道“生长环”的结构及成因分析	徐雯雯 袁一星 李 欣等	335
6-10	供水管网余氯衰减模型研究	马力辉 林建明 宋新年等	343
6-11	松花江水质污染期间管网中余氯衰减 情况研究分析	俎 倩 侯秀勤 高金良等	349

第7篇 管网运行科学调度	356
7-1 供水管网优化调度软件开发模式	刘遂庆 王 强 356
7-2 南京市给水管网微观模型优化调度研究	周克梅 刘遂庆 363
7-3 供水科学调度在线决策系统的开发与应用	何 芳 曹国栋 何志勋等 366
7-4 供水科学调度系统在佛山市供水中的应用	吴 迪 何 芳 林建敏等 371
7-5 供水科学调度事件系统的研究与开发	王 强 刘遂庆 刘 勇等 379
7-6 基于 LabVIEW 的虚拟仪器在泵站现场模拟中的应用	周玉文 何 敏 刘江涛等 386
7-7 泵站调速改造方案的确定	金建华 赵 昕 方生馥 392
7-8 管网阀门远程调控系统研制与应用	袁洪涛 申元甲 施东文 398
7-9 PSO-BP 模型在城市供水调度决策中的应用	岳 琳 张宏伟 王 亮等 402
第8篇 管网检漏和漏水控制	408
8-1 供水管道检漏的主要方法和仪器	高 伟 408
8-2 管道漏水及防治技术	上海汇晟管线技术工程有限公司 415
8-3 给水管网漏损检测技术与理论研究简述	王鸿翔 张土乔 424
8-4 输水管线渗漏压力模型分析	贾 辉 张宏伟 牛志广等 430
8-5 供水管网泄漏探测技术及实践	贾成林 戴 盛 吴 徐等 435
8-6 管网泄漏监控系统 ZONESCAN 800 的应用	张俊杰 440
8-7 佛山市供水管网漏损数据分析及控制策略	韦增祥 曹国栋 杨舒灵等 444
8-8 汉阳区管网漏水普查工作总结与分析	向 菲 450
第9篇 管网二次供水管理和爆管事故控制	457
9-1 合理选用二次供水	宋仁元 457
9-2 几种合理的二次供水设备	戴永胜 461
9-3 市政给水二次加压节能途径讨论	聂国荣 466
9-4 利用峰谷电价和水池调节作用降低供水成本	张 剑 何 刚 曾文院 471
9-5 广州市二次供水存在的问题分析及其对策	郑力耘 黄焕成 朱牧野 477
9-6 深圳特区多层住宅小区二次供水经济运行分析	常永第 481
9-7 南京市二次供水方式初步探讨	周克梅 窦建军 姜 伟 487
9-8 自来水管爆裂的成因与对策	单国平 493
9-9 上海地区供水管爆裂原因和对策的再探索	曹增万 499
9-10 深圳地区给水管网抢修技术现状及对策	江贤新 崔 宇 504
9-11 石家庄市给水管网管理和实践	张洪利 张 强 张 清等 510
9-12 管网爆管事故空间分析研究	何 芳 刘遂庆 陈明吉等 517
9-13 管网爆管预测比例危险模型	吕科峰 信昆仑 刘遂庆 523
第10篇 管网维护与更新改造	528
10-1 关于预应力钢筒混凝土管(PCCP)的推广应用	何维华 528
10-2 给水用聚乙烯管(PE)管材在旧区管网改造中的应用	梁宇舜 梁志坚 533
10-3 玻璃钢夹砂管及其在管线工程的应用	薛元德 沈碧霞 周仕刚 538
10-4 管道闭路电视检视系统	派尔非开挖工程(上海)有限公司 541

10-5	阀门在给水管网系统中控制功能研究	曲世琳 赵洪宾 吴晨光等	544
10-6	给水管网中排气阀的选用和安装位置的确定	谢楚忠	548
10-7	管道锈蚀的调查分析	戴 英 徐一为	552
10-8	大口径钢质给水管道的防腐层选择与应用	王耀文	557
10-9	高密度聚乙烯管道衬装工程应用	段文字 赵 岩	569
10-10	高分子聚合物水泥砂浆涂衬非开挖 修复DN800管道	董 宪 张志浩 朱凤翔等	572
10-11	用翻衬工艺实现旧管线的更新改造	韩德宏 杨印臣 姜洪涛	578
10-12	胀管置换在自来水管网改造中的应用初探	吴国权 郑小明 张理河	583
10-13	大口径管道不锈钢薄板内衬修复 技术与工程实践	姚黎光 周建中 朱凤翔等	586
10-14	清洗喷涂技术在小区给水管网修复中的 应用	上海浦东自来水特种工程有限公司	590
10-15	深井阳极在输水钢管阴极保护系统中的应用	陈立成 任基成	594
10-16	福州市DN800原水管 HDPE 缩径法穿插修复工程	郑文芳	601

第 1 篇 给水管网规划和设计

1-1 给水管网水力分析与优化设计理论发展和技术应用

刘遂庆 信昆仑

(同济大学)

【摘要】 本文对给水管网水力计算和优化设计基本理论与方法的发展和现状进行了较为全面的综述,论述了管网优化设计数学模型和非线性数学规划的求解方法,并讨论了 Hazen-William 公式着中的阻力系数 C 在水力计算中的变化和影响,反映当前给水管网规划设计新理论和新方法的应用特点和发展方向。

【关键词】 给水管网;水力平差;优化设计;数学模型;非线性数学规划;水力摩阻系数

1 概述

给水管网系统是一个由各种管道、泵站、水塔、调节阀(阀门、减压阀、检查阀等)等多种设施构成的水输送系统,通过系统的合理设计及运行,可以将水从一个或几个水源点送至用户,工程投资巨大。不断提高科学的管网水力计算、优化工程设计和优化运行调度的理论研究和现代工程技术水平,是给水管网设计及科学研究人员长期追求的专业领域科学技术进步方向。

管网水力分析计算,起始于 1936 年,由 Hardy Cross 提出的误差校正算法,对环状网进行水力平差计算,并且成为至今仍在普遍应用的给水管网平差方法之一——Hardy Cross 法。随着计算机科学技术及其应用软件的发展,给水管网水力计算有了快速的发展,在理论及算法上日趋完善。对于给水管网水力分析和优化设计问题,国内外给水管网研究工作者已做了大量的研究和探索工作,并取得了丰硕的成果。计算机和计算技术的飞速发展,为管网设计与管理提供强有力的支持和推动。按照表 1 所示的阶段性进展,可以看出管网模型发展的显著变化。

管网模型发展历史 表 1

20 世纪 30 年代	Hardy-Cross 手工求解法
20 世纪 40 年代	管网虚流量优化设计
20 世纪 60 年代	管网平差计算机程序
20 世纪 80 年代	管网水力计算、优化设计及拟稳态模拟计算
20 世纪 90 年代	管网模拟计算软件集成设计及水质模拟系统,管网建模,管网 GIS
目 前	管网建模、优化调度、管网 GIS 软件市场化应用

20 世纪 30 年代开始应用 Hardy-Cross 管网水力分析方法,开创了管网水力分析的先河,可以对简单的管网系统进行节点水压和管段流量的人工求解,为管网优化设计奠定了坚实的基础。20 世纪 40 年代,McElroy 分析器用电子物理模拟的方法(电线、电阻、灯泡等)进行管网系统的水流运动模拟,开创了管网模拟的先例。20 世纪 50 年代,专用模型系统出现,可以对单水源管网系统进行节点水压和管段流量的计算,尚不能进行水泵分析。20 世纪 60 年代是管网模型大发展的前夜,是在高等院校进行基础研究的阶段,提出了大量的分析和计算方法,推出了一系列的计算机应用程序,如 Howard(加拿大)-Shamir(以色列)给水管网水力计算程序(1965),美国 Columbia 大学的 EPP-Flower 程序(1970)。1970 年代的大部分时间里,仍是局限于校园内的研究,主要在于软件的不断更新和升级发展,如美国 Kentucky 大学 Wood-Charles 程序(1972),美国 Utah 州立大学 Jeppson 程序(1976),并由软件开发公司推出一些程序,如 FFAST、WATSIM(1974)等。我国从 1970 年代初开始从事给水管网计算机应用软件研究,并推出了一系列实用程序,如给水管网水力计算程序——747、749、7512、767 等程序(同济大学杨钦教授等)。这一时期研究的重点在于水力分析和标准优化设计计算,并考虑水泵、阀门等水量调节设施,形成拟稳定状态水力模拟的完成数据模型。20 世纪 80 年代,管网计算机软件技术不断成熟和完善,软件开发走向工程化和商品化,研究人员及专业化软件公司进行软件的功能开发,这一时期的研究主要着重于工程应用和用户使用方便,并开始重视拟稳定状态水力模拟系统和 GIS、CAD 系统软件功能扩展。这一时期典型的程序系统如 AQUA(Akron 大学,1985)、WADISO(Gessler-Walski,1985)。1990~2000 年是软件系统蓬勃发展的时期,出现了大量的商品化软件,如 PIPE-FLO、WaterMap、FFAST-3、KYPIPE2、EPANET、WATNET、H2ONET、8M、STONER、SynerGEE 等,同济大学开发完成的软件有 HYPNW(1992)、WPNCAD(1994)、WDOC(1998)、WPNCAD(1998)、同济宏扬软件 HY-NetSimu 等。所有这些软件都从不同的角度进行管网系统的分析,并进行拟稳定状态水力模拟、水质模拟、CAD、AM/FM/GISs(自动图形/设施管理/地理信息)等功能的分析研究。

管网模型正向智能化、图形化方向发展,并为用户提供方便的界面和强大的功能。管网模型发展的趋势在于优化算法上的革命,即如何利用计算机强大的功能来实现更加快速、精确的分析。以管径优选法(Loubser 和 Gessler,1990)和遗传算法(Murphy、Simpson 和 Dandy,1993)为代表的优化算法可能会是管网优化技术真正走向市场的途径,以拟稳定状态模拟技术(Gessler 和 Walski,1989)进行管网系统优化调度,也开始进入了工程应用阶段。

2 给水管网水力计算和优化设计基本理论

管网水力计算的基本方程有三种,即管段方程、节点方程和环方程。这些方程都是从水流的连续性方程和能量方程转变而来。但在进行计算机求解时,采用节点方程的较多。在计算机小容量、小内存、低速度的时期,人们为了提高计算速度和问题求解效率,对算法又提出了多种改进方法,如牛顿法、改进牛顿法、基因遗传法等。

给水管网系统的平差设计计算,在算法上已十分成熟,不论采用哪一种方法,在目前的计算机硬件水平下,都可以满足用户的要求。在计算规模、计算速度和计算机精度上,随着计算机技术的发展,已不再是平差计算的约束问题。如 WDOC、WatNET、SynerGEE、

HY-NetSimu 等软件系统, 都可方便地解决成千上万根管段的平差计算问题。

2.1 给水管网平差计算

(1) 未知数和方程: 假设系统中有 P 个链(即管段、阀门、水泵等用于连接二个节点的设施), n 个节点和 r 个水源, 系统存在如下的未知量, 即 P 个链流量, $n-r$ 个水压, 总数为: $P+n-r$ 个未知数。这些未知数的求解, 可以通过如下的方程进行求解:

1) 连续性方程: 每个节点有一个水流连续性方程, 其形式为:

$$\sum q_{ij} + Q_k = 0 \quad i, j, k \in \{1, \dots, J\} \quad (1)$$

式中 q_{ij} ——管段流量;

Q_k ——节点流量;

i, j, k ——节点号;

J ——未知压力节点数。

2) 能量方程: 每个链有一个能量方程, 对于管段来说是管段的水头损失计算方程, 对于水泵来说是水泵特性曲线方程。管段的能量方程形式为:

$$h = sq^n \quad (2)$$

常用的是 Hazen-Williams 公式, 即:

$$h = \frac{10.67q^{1.852}}{C^{1.852}D^{4.87}}l \quad (3)$$

式中 h ——管段水头损失(m);

q ——管段流量(m^3/s);

l ——管长(m);

C ——系数;

D ——管径(m)。

水泵特性曲线的一般形式为:

$$H = H_0 + s_1 Q + s_2 Q^2 \quad (4)$$

式中 H ——水泵扬程;

H_0 ——水泵静扬程;

s_1, s_2 ——系数;

Q ——流量。

对于环状网的问题求解, 通常采用的能量方程是管网的每一个环中各条管段的水头损失之和等于 0, 即:

$$\sum (h_{ij})_L = 0 \quad (5)$$

式中 L ——环号;

i, j ——管段两端的节点号;

h ——管段的水头损失。

3) 方程的求解

节点方程的未知数是节点水压, 数量为 $n-r$ 个。利用管段流量和水头损失的关系, 可以求解管段流量:

$$q_{ij} = \left(\frac{H_i - H_j}{S_{ij}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

(2) 节点方程的线性化

节点法是通过预先假设管段流量, 求出每一节点的水头后, 再求出各管段校正后的流量, 判断是否使每一节点都满足连续性方程的要求。由于节点水压的不准确, 必然造成节点流量的不平衡。再通过对节点水压的校正, 判断连续性方程的满足情况, 直到满足要求为止。

以 Hazen-Williams 公式为例, 方程(2)通过引入校正流量, 线性化为:

$$H_j - H_k = s_i Q_i^n + n s_i Q_i^{(n-1)} q_i \quad (7)$$

式中 H_j, H_k ——管段 i 的上下游节点水压(m), $H_j > H_k$;

s_i ——管段 i 的摩阻系数;

Q_i ——管段 i 的初始流量(L/s);

q_i ——管段 i 的校正流量(L/s);

n ——系数。

$$\text{管段 } i \text{ 的新流量 } Q \text{ 为:} \quad Q = Q_i + q_i \quad (8)$$

因此, 通过式(7)和(8), 略去 q 后, 可以得到:

$$H_j - H_k = s_i Q_i^n + n s_i Q_i^{(n-1)} (Q - Q_i)$$

$$\text{即} \quad Q = \left(1 - \frac{1}{n} \right) Q_i + \frac{H_j - H_k}{n s_i Q_i^{n-1}} \quad (9)$$

把 $n=1.852$ 代入式(9), 得

$$Q = 0.46 Q_i + 0.54 \frac{H_j - H_k}{s_i Q_i^{0.852}} \quad (10)$$

通过建立水源点和非水源点的连续性方程, 我们就可以建立方程求解的系数矩阵, 采用线性方程进行求解即可。同时由于系数矩阵是对称正定的, 尤其对于大型管网系统更是如此, 可采用稀疏矩阵求解法进行问题的求解。

2.2 给水管网优化设计计算

管网优化设计计算, 主要是为了进行新建或扩建管网的规划设计和初步设计, 使其达到在投资(管径)及常年运行费用(水泵扬程)最小的情况下, 满足用户对水量和水压的要求。

管网优化设计计算, 是在建立经济模型和优化计算数学模型, 并提出多个约束条件后, 通过一定的数学算法, 得出最经济的管径及水泵扬程。

在以往的优化设计计算中, 许多学者采用的管线费用表达经济模型是:

$$C = \Sigma (a + b D_i^\alpha) L_i \quad (11)$$

式中 C ——管网总投资;

a, b 和 α ——拟合系数;

D_i ——第 i 条管段的管径;

L_i ——第 i 条管段的管长。

采用的优化计算目标函数是：

$$\min F = \left(\frac{100}{t} + p \right) \sum_{i=1}^m b D_i^a L_i + \frac{86 \gamma e Q \sum_{j=1}^L h_j}{\eta} \quad (12)$$

式中 t ——投资偿还期；

p ——折旧、管理、维修费用占总投资的百分数(%)；

e ——电费；

h ——水头损失；

i, j ——代表管段号；

L ——表示从起点到控制点处的一条路径的管段数；

m ——管段总数；

γ ——能量系数；

η ——水泵平均运行效率。

式(11)是通过一系列费用-管径(C_i, D_i)，进行最小二乘法曲线拟合后得出的，这一模型的优点为函数是连续的，便于在优化计算数学模型中应用；其缺点是在整个供水区域内，只能采用一个经济模型，不适用于供水区内存在不同区域费用指标的情况。

式(12)是标准优化法常用的数学模型，是一个静态模型，没考虑贷款利息及企业投资收益率变化情况，在市场经济的情况下，与实际需求有一定的差距。

给水管网系统标准优化法问题的求解，可归纳为如下的形式：

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^N f_i(x_i) \quad (13)$$

$$\text{s. t. } h(x) = \sum_{i=1}^N h_i(x_i) = 0 \quad (14)$$

$$g_i(x_i) \leq 0, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (15)$$

其中：

$$x = (x_1^T, x_2^T, \dots, x_N^T)^T, \quad x_i \in R^{n_i}, \quad \sum_{i=1}^N n_i = n$$

$$f_i : R^{n_i} \rightarrow R^l$$

$$h_i : R^{n_i} \rightarrow R^m$$

$$g_i : R^{n_i} \rightarrow R^{l_i}$$

式(13)中 $f(x_i)$ 表示时段 i 的管网运行费用和子网络 i 的投资费用，式(14)表示连续性方程的流量平衡约束和能量方程的压力平衡约束。

3 非线性规划方法

由于管网优化设计计算问题本身具有的非线性性质，因而也可直接采用非线性规划法解决，对于有泵站情况，经简化后的数学模型可写为：

$$\min \sum_{i=1}^n (a + bD_i^\alpha) L_i + \frac{86\gamma E}{\eta} \sum_{j=1}^m Q_j H_j$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} F(D, H) = 0 \\ \underline{H} \leq H \leq \overline{H} \\ \underline{D} \leq D \leq \overline{D} \end{cases} \quad (16)$$

式中 n ——管段数；

m ——水源泵站数；

a, b, α ——管段造价公式系数；

E ——电费换算系数；

γ ——能量不均匀系数；

η ——泵站总效率；

L_i ——管段长度；

Q_j ——节点流量；

H_i ——节点水头；

$\underline{H}, \underline{D}$ ——节点水头，管径上限；

$F(D, H) = 0$ ——节点连续性方程。

由 Hazen-William 公式， H_i 可以表示为 D_i 的非线性函数。于是上述问题转化为以 D 为决策变量的非线性规划问题，然而对于复杂系统 $F(D, H) = 0$ 将分解为相当庞大的约束集合，增加了用非线性规划法求解的难度。目前，大多数学者倾向于采用独立的水力计算程序求解该约束，这样会大大削减主干问题的约束个数，利于非线性规划方法的求解。具体到非线性规划算法，应用最广泛的是广义简约梯度法 (General Reduced Gradient)，其中以 Lasdon 和 Waren 于 1983 年开发的 GRG2 程序最为常用。水力计算程序使用最多的是 Wood 于 1980 年开发的 KYPIPE (University of Kentucky Model)。

对于模型中的约束 (2)，Lansey 和 Mays (1989, 1992)、Ning Duan (1990) 等采用了增广拉格朗日乘子的处理方法。

$$\text{设:} \quad F(D, H) = \sum_{i=1}^n (a + bD_i^\alpha) L_i + \frac{86\gamma E}{\eta} \sum_{j=1}^m Q_j H_j \quad (17)$$

目标函数改写为：

$$\text{mincost} = F(D, H) + \frac{1}{2} \sum_i \sigma_i \min \left(0, c_i - \frac{\mu_i^2}{\sigma_i} \right) + \frac{1}{2} \sum_i \frac{\mu_i^2}{\sigma_i} \quad (18)$$

其中： $c_i = \min(\overline{c_i} - \underline{c_i})$ ， $\overline{c_i} = \overline{H_i} - H_i$ ， $\underline{c_i} = H_i - \underline{H_i}$ ；

μ_i ——惩罚因子； σ_i ——拉格朗日乘子。

此时该目标函数所对应的约束只有 (3)，减少了问题的规模。同样，如果将管网可靠度看作 H, D 的函数，模型中可加入以下可靠度约束：

$$R(\underline{H}, \underline{D}) \leq R(H, D) \leq R(\overline{H}, \overline{D}) \quad (19)$$

该约束的求解也多采用独立子程序计算并以拉格朗日乘子的形式加入目标函数中以降低非线性规划问题的复杂程度，三者的关系如图 1 所示。

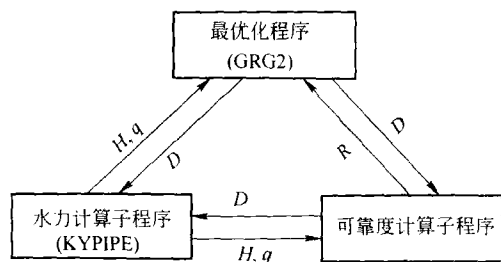


图 1 基于可靠度的管网优化模型

大量的研究者采用了 GRG2、KYPE 两个子程序分别处理最优化部分和水力计算部分, 因此各种非线性算法的主要分歧仍然落在可靠度计算子程序上。不同研究者分别采用了不同的度量方式(最小切割集法, Su Yuchun, 1988; RAPS 程序, Ning Duan, Lansey, Mays, 1990; 时间比例法, Cullinane, Lansey, Mays, 1992), 类似于线性规划方法, 不同算法在或是计算时间或是概念涵盖方面都有各自的缺点或长处而分别适用于解决某一特定类型的问题。

4 给水管网沿程水头损失计算摩阻系数的讨论

给水管网设计计算基本公式是流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 与水头损失 $h_f(\text{m})$ 之间的关系, 达西—韦伯氏(Darcy-Weisbach)水头损失计算公式如下:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (20)$$

式中 h_f ——由摩擦引起的水头损失(m);

λ ——无量纲的摩擦系数;

l ——管道的长度(m);

d ——管道的直径(m);

v ——水流流速, 值为 $Q/A(\text{m/s})$;

Q ——流量(m^3/s);

A ——管道面积(m^2);

g ——重力加速度(m/s^2)。

层流状态时, 摩擦系数 λ 与 Re 呈线性关系, $\lambda = 64/Re$ 。

紊流状态时, 摩擦系数 λ 是 Re 和管道相对粗糙度的函数。用柯列勃洛克—怀特(Colebrook-White)公式:

对于水力平滑区, 摩擦系数 λ 是 Re 值的函数:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\lg(Re\sqrt{\lambda}) \quad (21)$$

水力平滑区和完全粗糙区的过渡区:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}}\right) \quad (22)$$

完全粗糙区, λ 与 Re 值无关:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.14 - 2\lg(e/D) \quad (23)$$

在工程实践中, 习惯使用不变的管道摩阻系数, 应用舍维列夫公式、海曾—威廉公式等, 按照传统习惯和设计规范, 采用 $n=0.013$, $C=100$ 。忽视了管道的材料更新、管径的差异和水的流态的影响, 更忽视了摩阻系数的特定适用条件。其结果是在安全保障的理由下, 管道直径计算值过大, 泵站扬程计算值过高, 造成了极大的工程浪费。

以海曾—威廉姆(Hazen-Williams)公式为例, 说明如下:

$$h_f = \frac{10.67Q^{1.85}}{C^{1.85}d^{4.87}}l \quad (24)$$