

城市水资源与水环境国家重点实验室资助

给水管网内余氯衰减模型及耐氯菌多样性分析

JISHUIGUANWANGNEIYULÜSHUAIJIANMOXINGJINAILÜJUNDUOYANGXINGFENXI

“十二五”国家重点图书



市政与环境工程系列丛书

钟 丹 袁一星 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

城市水资源与水环境国家重点实验室资助

“十二五”国家重点图书·市政与环境工程系列丛书

给水管网内余氯衰减模型 及耐氯菌多样性分析

钟 丹 袁一星 著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书以保障给水管网水质安全为目标,由实验室静态、动态实验及实际管网采样分析,深入论述了氯消毒过程的一系列科学问题,具有前瞻性和实用性。

本书共由 7 章组成,系统地探讨了余氯衰减规律,阐述了余氯衰减模型的建立、校核和验证过程,并针对氯消毒的重要影响因素——“生物膜”进行研究,探讨了生物膜的生长规律及耐氯菌的多样性,进而分析耐氯菌对氯消毒过程的影响及机理。

本书是关于氯消毒方面的一部理论专著,可作为市政及环境专业工程技术人员及高校教师、学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

给水管网内余氯衰减模型及耐氯菌多样性分析/钟丹,袁一星著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017. 8

ISBN 978-7-5603-6323-3

I. ①给… II. ①钟… ②袁… III. ①给水管道-管网-水质分析 IV. ①TU991.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 285254 号

策划编辑 贾学斌

责任编辑 张 瑞

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨圣铂印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 13.75 字数 330 千字

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6323-3

定 价 49.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

序

自国家住房和城乡建设部、国家发展和改革委员会联合颁布《全国城镇供水设施改造与建设“十二五”规划及2020年远景目标》以来,我国供水企业纷纷通过现有净水工艺的升级改造提高供水水质,以达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),但达标后的水通过给水管网输送至用户往往达不到要求,其原因为:通过净水工艺处理达标的出厂水在给水管网输送过程中受到“二次污染”。因此,给水管网二次污染的控制是直接影响供水水质安全的首要问题。

给水管网中余氯质量浓度及其变化,可反映供水水质的变化或水质是否安全,如何更好地发挥给水管网内余氯的“卫士”作用,明确余氯与管网内微生物之间的相互作用机制,进而保证水质安全是当前供水企业普遍关注的热点问题。

本书由对管网水质全面监测的目标引出供水管网水质模型的建立,又由此引出余氯衰减规律的研究和水质模型中余氯衰减模型的建立,并结合当前氯衰减模型存在的问题,建立了新的、更好的余氯衰减模型。之后,针对氯消毒的重要影响因素——“生物膜”进行研究,探讨了生物膜的生长规律及耐氯菌的多样性,进而分析耐氯菌对氯消毒过程的影响及机理。全书思路清晰,层层相扣,一步步将读者引入深层的思考。

作者全面考察了给水管网内余氯衰减规律,并通过大量的数据建立了余氯衰减自适应模型,对该模型进行校核、验证。将自适应模型与其他模型进行比较,结果显示,自适应模型可以更好地描述余氯衰减状况。

作者采用给水管网模拟实验和实际管网实验相结合的方式,对管网内生物膜及耐氯菌进行深入研究。探讨了生物膜的生长规律、影响因素及其对氯衰减的影响。选取典型城市的管网进行多点采样,分析管网内生物膜多样性,并对其进行分离、鉴定,得到给水管网内的优势菌。探究典型耐氯菌在不同存在条件下的形成、生长和传质特性,进而论述耐氯菌对氯消毒过程的影响及机理。

本书图表规范、结构合理、表述清晰严谨、内容完整有序,可作为市政及环境专业工程技术人员及高校教师、学生的参考用书。

中国工程院院士



2016年7月4日
于哈尔滨工业大学

前 言

给水管网是城市水系统的重要组成部分,亦是饮用水安全保障的关键环节。科技的进步、经济的发展使人们的环境意识不断增强,饮用水水质安全被人们越来越多地关注。

管道卫生学是近年发展起来的一门新兴交叉学科,它以保障给水管网供水水质安全为目标,利用卫生学方法、生物学方法、化学方法及计算机技术,研究给水管网水质变化规律,探求供水安全保障的各种原理和方法。

本书所论述的氯消毒问题是管道卫生学中的重要研究内容,管网内余氯衰减的模拟和控制也是水质安全保障的一项重要技术。近年来,我国给水管网余氯衰减的研究与实践,从理论上向更深的层次挖掘,从应用上向更广阔的范围拓展,人们开始追求更精确、适应性更强、能够更好地描述实际管网余氯衰减状况的模型,也开始通过更高的技术手段探求余氯衰减过程的各种影响因素。这些新的研究与实践充分显现了我国给水管网水质研究的进步与发展。

本书共由7章组成,系统地探讨了余氯衰减规律,阐述了余氯衰减模型的建立、校核和验证过程,并针对氯消毒的重要影响因素——“生物膜”进行研究,探讨了生物膜的生长规律及耐氯菌的多样性,进而分析耐氯菌对氯消毒过程的影响及机理。

中国工程院院士、哈尔滨工业大学张杰教授对本书的撰写给予了指导并作序,在此致以诚挚的谢意。

李阳青硕士、祝泽兵博士、李百玲硕士的研究成果丰富了本书生物膜和耐氯菌部分的内容。

同学、朋友及课题组的各位老师对课题的开展提供了无私的帮助与支持。

在此一并致谢!

以往诸多的研究与实践不是完善无误的,实验也有局限性,书中的计算与分析也难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016年7月4日

于哈尔滨工业大学

目 录

第1章 概论	1
1.1 研究背景	1
1.2 氯消毒的发展	1
1.3 本书的主要研究内容	2
第2章 给水管网水力及水质模型	4
2.1 管网水力模型	4
2.2 管网水质模型	12
第3章 给水管网余氯衰减规律及影响因素	28
3.1 余氯衰减反应器模型	28
3.2 实验流程及装置	32
3.3 实验分析方法	35
3.4 给水管网余氯静态衰减规律及影响因素	40
3.5 给水管网余氯动态衰减规律及影响因素	71
第4章 给水管网余氯衰减模型	74
4.1 净水工艺过程的液氯消毒技术	74
4.2 净水工艺过程的其他氯系消毒技术	77
4.3 给水管网内余氯衰减动力学机制	79
4.4 给水管网内余氯衰减模型	91
第5章 给水管网余氯衰减自适应模型	100
5.1 自适应模型的建立	100
5.2 自适应模型的校核	103
5.3 自适应模型的目标函数	110
5.4 自适应模型的性能分析	110
5.5 自适应模型的可靠性分析	114
第6章 给水管网内生物膜的生长规律	116
6.1 实验流程及装置	116
6.2 给水管网生物膜生长规律及影响因素研究	118
6.3 给水管网中生物膜对氯衰减的影响研究	125

第7章 给水管网内耐氯菌的多样性分析	134
7.1 给水管网内管壁生物膜生物多样性研究	134
7.2 供水系统耐氯性细菌的存在特性研究	151
7.3 给水管网内耐氯菌不同存在条件下的形成、生长和传质特性	162
参考文献	203
名词索引	209

第 1 章 概 论

1.1 研究背景

给水管网是城市水系统的重要组成部分。经过水厂处理达到国家水质标准的水需要经过复杂庞大的给水管网才能输送到用户。自来水流经的管线长度可达数十千米乃至数百千米,滞留时间可达数小时至数天,自来水在给水管网输送过程中如果受到二次污染,将会导致用户端水质下降,影响居民的身体健康,干扰正常的生活生产。

近年来,随着社会进步和人民生活水平的提高,居民对于饮用水的要求,已经不再局限于压力和水量等方面,而是更多地开始关注水质问题。国家新的水质标准对于饮用水的要求,也开始对用户水龙头水质提出了明确的要求。因此,当前,供水管网二次污染及防治技术的研究、保障供水水质、提高供水安全性已成为城市供水的重要课题。

1.2 氯消毒的发展

消毒不论在水处理过程中,还是在管网输送过程中,都对保持水质具有不可或缺的作用。20 世纪初期,人们开始采用氯作为饮用水消毒剂,至今,氯消毒已有一百多年的历史。1854 年,伦敦霍乱流行,John Snow 博士经过对流行病学的深入研究,确定水是这次疾病的传播媒体。1881 年,Koch 等人经研究发现,氯气可以灭活病菌。1904 年,英国某地区爆发了一次重大的水污染事件,该事件是由于饮用水污染而引发的严重伤寒流行。这次事件之后,为了对饮用水进行消毒灭菌,英国的水厂最先使用次氯酸钠作为消毒剂,对水厂的出水进行消毒。之后,世界各地的水厂也相继采用氯作为饮用水消毒剂,以达到灭菌的效果。1912 年,液氯消毒的应用得到了更大规模和更广范围的应用,很多大型水厂和设备开始采用液氯消毒,至此,氯消毒技术迅速发展。

与其他消毒剂相比,氯消毒方法主要具有如下优点:消毒效果良好,对细菌有很强的灭活能力;在水中能长时间地保持一定浓度的余氯,从而具有持续消毒能力;使用管理方便,易于储存、运输,成本较低,价格便宜。在对水体进行水处理和输送的过程中,使水中保持一定的余氯质量浓度,不仅可以抑制细菌生长繁殖,还可以防止水在管网的输送过程中受到二次污染。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006) 规定出厂水游离性余氯与水的接触时间至少为 30 min,其质量浓度不应低于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在管网末梢质量浓度不低于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

自 20 世纪 70 年代开始,氯仿等氯化消毒副产物相继在自来水中被检出,大量的研究结果表明,与对照人群相比,饮用氯消毒水的人群癌症的发病率明显升高。研究者认为,在氯消毒的消毒副产物中,大部分挥发性卤代有机物及非挥发性卤代有机物具有致突变性和致

癌性。因此,世界卫生组织和世界各国相关机构纷纷修改或制订新的水质标准。我国最新颁发的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中规定,三氯甲烷的质量浓度不超过 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,三溴甲烷的质量浓度不超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,一氯二溴甲烷的质量浓度不超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,二氯一溴甲烷的质量浓度不超过 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。自此,氯化消毒工艺的地位受到挑战,开始采用氯胺等消毒剂作为第二消毒剂维持给水管网中的消毒作用。

但目前,鉴于氯消毒的诸多优势,我国乃至世界范围内,水厂中使用的消毒剂仍以液氯为主。因此,对氯衰减规律的预测及模拟等方面的研究具有重要意义。

1.3 本书的主要研究内容

为了确保用户饮用合格的水,需要对管网水质进行监测,及时发现水质恶化点,以便采取解决措施。传统的对管网进行水质监测的办法主要是选择一些采样点,定期对管网水质进行监测,了解管网水质状况。但这种方式选定的管网水质监测点缺乏理论依据,采样方式老化,采集到的水样数据不能及时指导生产。因此,需要建立水质在线监测点,对水质进行实时监测,并且,通过计算机及其相关技术进行管网水质模拟,从而全面系统地了解整个管网水质分布的大致情况。然而要实现计算机模拟水质,则需要研究水在管网中的水质变化情况,掌握给水管网的水质变化规律,建立给水管网水质模型,并将其作为计算机计算的依据,实现计算机模拟,最终达到预测管网水质及指导控制管网水质恶化的作用。给水管网中余氯质量浓度可作为一种水质指示剂,大部分水质模型都是建立在给水管网中余氯的衰减动力学公式的基础上,比如余氯与消毒副产物之间的关系等。因此,建立准确的余氯衰减动力学模型是管网水质模拟的关键。

本书以保证给水管网的安全供水为研究目的,探讨了余氯衰减规律,研究了余氯衰减过程的建模及模型校核。针对当前氯衰减模型普遍存在的局限性,提出并验证了一种实用可靠的氯衰减半经验数学模型——管网余氯衰减自适应模型。

给水管网是由不同管材、不同管径及不同卫生条件的管道所构成的输配水系统,在输送的过程中,水不是直接沿着管壁流动,而是沿着管道内壁多年形成的“生长环”流动,流动的水体与“生长环”上的“生物膜”进行着传质、扩散、解析等过程,同时还进行着细菌的繁殖、死亡、脱落、灭活及再增殖等过程。因此,管道内壁的生物膜是影响供水水质乃至消毒剂消耗的重要因素。同时,随着水在管道内的流动,余氯与有机物、微生物、管材等发生物理、化学以及微生物等作用,管网水中及生物膜上的耐氯菌对余氯的这一系列反应起到了抵抗作用,对氯消毒过程产生影响。

本书针对耐氯菌普遍存在的现象进行实验室研究及管网采样分析,研究生物膜的生长规律及耐氯菌的多样性,进而分析耐氯菌对氯消毒过程的影响及机理。

本书的具体研究内容包括:

(1) 通过主体水静态实验,研究主体水中初始氯浓度、温度、TOC 浓度、二次加氯对余氯衰减规律的影响。深入研究水体混合对余氯衰减规律的影响,为余氯衰减模型的校核提供依据。研究二氧化氯消毒对余氯衰减的影响,为联合消毒的建模提供依据。通过短管实验研究给水管网的管材、铺设年代、管径、初始氯浓度、温度及 pH 对余氯衰减规律的影响,探讨了余氯衰减规律。

(2) 通过管道卫生学实验室的动态实验,研究流速、管径、初始氯浓度、pH 对余氯衰减规律的影响。选取一段实际管网,对管网中的管道属性、季节、水力工况进行研究测试,进一步讨论实际管网中余氯衰减的规律及影响因素。

(3) 针对目前的氯衰减模型普遍存在的局限性,提出并验证一种氯衰减半经验数学模型——管网余氯衰减自适应模型。采用6组氯衰减数据集对自适应模型、一级模型以及由Boccelli 等人建立的二级模型进行校核,并比较各模型的拟合情况。

(4) 针对给水管网中普遍存在的耐氯菌进行实验室研究及管网采样分析,研究生物膜的生长规律及耐氯菌的多样性,进而分析耐氯菌对氯消毒过程的影响及机理。

第2章 给水管网水力及水质模型

给水管网水质模型是指利用计算机模拟水质参数和某种污染物质在管网中随时间、空间的分布,或者模拟某种水质参数产生变化的机理。在管网拓扑结构的基础上,表达出某种物质变化规律的一种数学表现形式,通过模型求解,可以实时地模拟出管网内的水质状况。按照模拟系统的水力状态,配水系统水质模型可分为稳态水质模型和动态水质模型;按照研究所涉及的水质参数,水质模型可分为余氯衰减模型、消毒副产物模型和微生物学模型等。

虽然水质模型有很多种类,但它们都是以水力模型为基础的。水质模型以水力模型的结果作为它的输入数据,动态水质模型需要每一管道的水流状态变化和容器的储水体积变化等水力学数据,这些数据可以通过管网水力分析计算得到。大多数管网水质模拟软件都将水质和水力模拟计算合二为一,因为管网水质模拟计算需要水力模型提供的流向、流速、流量等数据,因此,水力模型是建立水质模型的基础,也直接影响水质模型的应用。

建立给水管网水力模拟系统的平台,可进行给水管网各种计算、分析,在已知给水管网各种水力工况的基础上研究给水管网水质状况,建立给水管网的水质模型,进行管网各种工况的水质计算与动态分析。

2.1 管网水力模型

给水管网是一个拓扑结构复杂、规模庞大、用户种类繁多、用水变化随机性强、运行控制为多目标的网络系统。以往,对地下管网的管理多属于经验性管理,难以直接进行实验或大量测试,实现科学的现代化管理十分困难。近年来,随着计算机技术和遥测技术的快速发展,使建立给水管网动态水力模型成为可能。根据输入的动态数据和静态数据,通过水力计算,模型可得到节点和管段的全部信息,及时了解整个管网系统的运行情况,为实现管网的实时水力、水质模拟打下良好的基础。

目前存在的供水管网水力模型主要有:宏观模型、微观模型和简化模型。

宏观模型根据水源及监测点等信息建模,在配水系统的大量生产运行数据的基础上,利用统计分析的方法,建立起来的有关管网参数间的经验数学表达式。它不考虑管网中各节点和各管段的所有状态参数与结构参数,从管网系统整体角度出发,直接描述与调度决策有关的主要参数之间的经验函数关系。该模型一般用于需要进行大量水力模拟计算的优化调度,所需数据少,建模快,计算效率高,但适应范围有一定限制。由于是根据管网中所设的测流点、测压点来建模,因而其输出量也只能是相应节点的压力及管段流量,无法了解整个管网的水力运行工况,因而对建立管网水质模型帮助不大。

微观模型考虑供水管网的网络拓扑结构,建立在连续性方程、能量方程以及压降方程的基础上。即建立与实际管网系统相对应的,可计算、可直观显示、可分析的管网数学模型。尽量完善地用数学模型描述管网中的各个元素,通过水力模拟计算来表征系统中所有供水

设施的运行状态。微观模型可获得所有管段、节点、水源的工况参数,以及各小时的静态模拟工况和动态实时工况,因而建立给水管网微观水力模型是建立管网水质模型的基础。

简化模型是在微观模型的基础上发展起来的。简化模型就是通过参数估计或水力分析,舍去微观模型中对管网工况影响较小的管线,减少微观模型中的节点数和管段数,从而提高管网水力模拟计算的速度,达到用小规模模型模拟大规模供水管网运行工况的目的。简化模型可缩短管网水力计算时间,从而缩短管网水质计算时间,但是会导致管网水力、水质计算精度下降。由于计算方法的不断改进及计算机性能的快速提高,管网水力、水质计算的速度大大加快,因而简化模型应用的必要性逐渐减小。

2.1.1 管网微观水力模型的建立

构建一个翔实的管网水力模型需要的参数很多,大体可分为静态参数和动态参数两大类。管网拓扑结构、管段长度、管径、节点标高等是相对稳定不变的,称为管网静态参数。阻力系数、节点流量、管网漏失量、监测点压力流量、供水点压力流量、水池水塔水位、水泵的关停、变速泵的实际运行转速等在不同的计算时段是变化的,称为管网的动态参数。当然,这种划分也不是绝对的,例如,管径随着管道内生长环的增长,实际管径也在逐渐缩小。对于阻力系数、节点流量等参数,如何准确地确定是一个很大的难题。在庞大的城市供水管网中,这些众多的参数所构成的数据库是海量的,其数据的准确与否对于管网模型的计算结果有很大的影响。

管网水力模拟包括以下几方面:

1. 图形模拟

将供水管网系统图形信息和资料信息,经过处理后录入计算机,组成一个能实现供水管网模拟的计算机模拟图形(包括管段、节点、水泵、阀门等附件)。同时建立相应的数据库,分类保存各类资料。

2. 属性模拟

属性模拟包括对管段、节点、水源、阀门等管网组成元素自身信息即属性的模拟。

3. 参数模拟

(1) 海曾 - 威廉 C 值。

给水管网经过多年运行,内壁腐蚀、粗糙度增加,致使管道过水断面面积变小,水头损失增大, C 值降低。为获得其初始估计值,采用“四点法”或“五点法”对不同年代、不同管径的典型管段进行了现场实测。

(2) 水泵特性曲线。

水泵投入使用后,由于长期的运行磨损以及技术改造等原因,致使实际的水泵特性曲线偏离样本曲线。为提高模型计算的准确性,优化水泵调度,在城市管网建模中,有必要对水泵的特性曲线进行实测。在保证供水安全的前提下,读取水泵在不同工况下的流量、水泵出口压力、吸入口真空度以及高程差,以水泵的流量为横坐标,扬程为纵坐标绘制曲线而成。

4. 状态模拟

建立的供水管网系统模型应该能够反映实际供水管网系统中水流的状态,而管网节点流量是随时间变化的,用水量随机性很强,管网漏失水量又受管网水压、高位水池水位变化的影响,同时阀门的开启度也直接影响管网的通水能力,这就需要对动态资料进行状态模

拟,这也是管网模拟仿真的核心内容。

(1) 总供水量。

可按组合预测模型预测日总供水量,由用水量变化曲线计算各时段用水量。

(2) 阀门开启度。

阀门开启度对运行工况影响很大,应准确估计其阻力系数。

(3) 用水量变化曲线。

按照用水规律,将用水量较大的用户进行分类,从每一类中选择有代表性的用户进行连续监测,将实测结果整理、分析,得到每一类用户的用水量变化曲线。

(4) 水泵状态模拟。

水泵的开启和调速泵的特性曲线是影响管网运行工况的关键因素。监测各时段的调速泵转速,求得该转速 n 与额定转速 n_0 的百分比 β ; 额定转速 n_0 时的流量扬程曲线为 $H = A + BQ + CQ^2$, 则调速泵转速为 n 时的流量 - 扬程曲线为 $H = \beta^2 A + \beta BQ + CQ^2$ 。

(5) 清水池动态水位。

清水池水位的误差将影响给水管网中的每个节点,且延时模拟计算时将累计影响到以后各时段,需掌握清水池在不同时段的水位变化。

5. 节点流量计算

给水管网动态水力模型是在大量现场实测数据、大用户现场读表数据和大用户每月读表抄见数据库的基础上完成的。

节点流量是一个计算值,是为进行水力模拟计算而虚拟的一个量。实际管网中沿线配水,且不均匀,随管径、位置、时段而异。由于用水不确定性和动态性以及节点流量的虚拟性,给节点流量计算带来很大难度。传统计算方法是简单地按管长或供水面积平均分配水量,不难发现这种计算与实际用水情况产生了偏差,影响了计算结果的准确性。为此,将节点流量分为大用户、小用户及漏失量等几部分,对影响不太大的小用户部分可按传统计算方法计算或按大用户方式处理。

6. 水力模拟计算

通过对以上静态和动态参数的模拟,可联立连续性方程、压降方程和水泵特性曲线方程求解。水力模拟计算是管网微观建模的核心,各分析模块都需以水力模拟计算为基础。考虑管网低水压和漏失影响,提出管网压力分析法,与现场监测数据相比较,其计算结果优于传统的管网流量分析法,克服了传统水力平差计算方法是建立在管网系统供水量大于需求量以及管网漏失量不随压力变化的假设之上的缺陷。

7. 现场实测

在参数模拟和状态模拟中,为了掌握管网的动态运行工况,需要进行现场测试工作。实测是为了保证模型的准确性。

(1) 用水量变化曲线的测试。

用户用水量变化规律的获得对于一个城市的供水行业来说至关重要。该参数在供水优化运行、制定城市优化供水策略方面都是必不可少的。而且对于水力模型的建立,用水量变化规律也是一个关键参数,在节点流量的计算、城市 24 h 用水比例的计算方面该数据都是必需的已知条件。归纳起来,用户用水量变化规律对于一个城市的供水行业来说具有以下 3 点重要意义:

① 在城市给水管网系统建模中,各类型用户的用水量及变化规律直接影响到模型的计算精度。

② 研究用水量变化规律是保证城市给水管网系统供水安全可靠的重要组成部分,保证用水户有足够的水量是城市给水管网系统必须完成的任务。

③ 研究城市给水管网系统用水量变化规律可以有效地指导生产、调度。如果按照城市用水量变化曲线规律供水,既能够完成供水任务,又能够节省运行费用。

(2) 管网压力的测试。

为了准确掌握城市的供水现状,模拟城市的供水状况,研究供水管网的压力变化是十分有意义的工作,而压力测试也是进行模型校核必需的工作,它为模型校核提供大量的基础资料。

进行压力测试主要是为了能够达到以下目的:

① 掌握管网正常工作时的压力分布状况。管网的压力分布状况是现有管网系统工作状况的反映,也影响管网漏失量,同时必须保证管网的服务水头。

② 了解管网中的异常事故以及造成的后果。管网监测点的异常变化,都有可能是管网异常事故发生的征兆,通过观察监测点信息,可以推断事故发生情况。同时,可以了解非正常供水时的压力分布情况以及由此造成的影响。

③ 获得管网工况的监测量,应用于管网的状态估计。管网模型实现后,水力模拟计算已经在给水管网的日常运行管理中得到应用,然而节点压力和管段流量可能与实际情况有差异,作为仪表监测值的节点压力、管段流量等虽有一定误差,但可靠得多。如何将这些监测资料应用于模型,把水力模拟计算与误差分析结合起来提供估计值的质量评判是布置监测点的目的之一。

设置测压点的意义在于:

① 设置测压点进行压力测试是辅助经验调度的需要,更是实现优化调度的需要。实现计算机模拟给水管网在线优化调度,首先应及时地为模型提供必要的运行状态资料。

② 设置测压点进行压力测试是漏失量控制的需要。如何有效地控制漏失量是供水公司迫切需要解决的问题,利用测压点能有效地控制漏失量。

③ 进行压力测试是模型的需要。城市供水管网模型建立后,模型初具功能。为了保证该模型更加准确地模拟供水管网的实际运行状态,需要使用实测所得的节点压力值与管网模型得到的节点压力值进行比较,调整模型,使实测值和计算值间的差值在允许的误差范围内,这样就可以使模型如实地反映城市供水管网的运行状态。

管网中的测压点应分布合理且具有代表性,并能反映整个管网供水压力的全貌。当出现管网压力分布不合理时,能及时调度各水厂的供水量和扬程,经济有效地调整供水压力分布。也只有这样布置的测压点,才有助于提高管网调度的业务质量,使管网压力能够适应用户的需要,不致压力过高或过低,造成供水量不足或浪费供水电耗。城市管网中的控制点应设测压点。所测压力通常是用水高峰时水量调度的重要指标,累积这些数据又是给水系统改造和扩建的必需资料。

(3) 管道阻力系数的测定。

众所周知,管道在运行一段时间后,其摩阻会发生变化,这种变化目前是无法通过数学计算来量化的。但是,管道的摩阻系数又是管道水力计算必不可少的参数。因此,为了提高

水力计算的精度和管网数学模型的准确性,须对管道的阻力系数进行实测。

管道阻力测试共有4种不同的实施方法,依据场地及管道附件的具体情况可以从中选择合适的方法进行测试。这4种方法为:两点法、三点法、四点法和五点法。其中两点法是利用水力学的管道比阻公式设计的测管道阻力的最基本方法,三点法为其改进方法,四点法、五点法是在三点法的基础上进行的二次改进。

(4) 阀门阻力系数的测试。

管网中的阀门在全开状态下可以忽略其局部阻力,但是通过调节阀门的开启度以控制管段中流量和压力的时候,阀门的局部阻力很大,是不能忽略的。为了对整个管网进行准确的模拟计算,必须掌握阀门不同开启度的通水能力和局部阻力。

阀门是通过改变其阻力来实现对流体控制的,通常情况下,阀门的个数占管网附件的比例很大。通过测定阀门开启度与相对流量的关系,画出其特性曲线。所谓相对流量即在某一开启度条件下的流量值与阀门全开时的最大流量之比,以便在实际运行调节过程中,能由开启度来指导流量的具体调节,或可根据阀门开启度来获得其流量信息。例如:要求流量达到80%时,有一对应开度作为调节手段。因此,获得阀门产生的局部阻力是管网水力模拟计算中不可忽视的任务。而由于阀门型号、大小、结构形式、使用时间的不同,决定阀门产生的局部阻力也有所变化。

利用伯努利方程,在获得压差、流速和测试两点的高程差后,可获得待测阀门在每一个开度下的局部阻力系数。利用回归模型用最精确和简便的方式对已有的实验资料进行拟合。此外,对获得的回归形式进行误差分析,最终获得阀门的 $k-\zeta$ 的数学描述。

由于阀门的种类与管径的差距,对于阀门的测试分为实验室测试与现场实际测试两种。选取管径较小的阀门进行实验室测量,同时选取管径较大的阀门进行现场实测。

2.1.2 管网水力模型的校核

1. 模型校核的目的与流程

给水管网系统的现状分析、优化改扩建远期规划、优化改扩建运行费用分析及水质模型的建立等均依赖于水力模型计算结果,若模型达不到一定的精度,误差过大,则基于模型的分析结果将会误导最终决策,因此,必须确保水力模型在一定精度范围内与实际管网运行特征相吻合。模型准确性的判断依据是监测点的模拟值和观察值之间的偏差。通过对水力模型的校核,可以提高模型的精确度和可靠性。

模型校核分两步进行:第一步,比较已知运行条件下(水泵运行工况、水池水位、减压阀状态等)压力和流量的模拟值与测量值;第二步,调整模型输入数据,减小模拟值与观测值的偏差,使其在一定范围内吻合。

管网模型的微观校核是指当模型计算得到的结果与现场监测点数据相差不大时,通过调整模型中的节点流量和阻力系数,减小模拟值与监测值之间的差异,使其在允许精度范围之内。给水管网系统微观模型校核是一个调整模型参数直至模型在一定精度范围内与实际管网特征相吻合的过程,也是一个完善模型、调整参数、反复进行水力模拟计算的过程。管网微观模型校核的总体思路是:首先比较监测点的监测值与模型计算值之间的差异,找出存在差异的原因,完善、修正模型,消除或减小差值,直至模型计算值与实测值在误差允许范围内。由于管网模型的复杂性,结合实际建模经验,将模型参数校核分为静态参数校核(预校

核) 和动态参数校核(微观校核) 两步,给水管网模型参数校核流程图如图 2.1 所示。

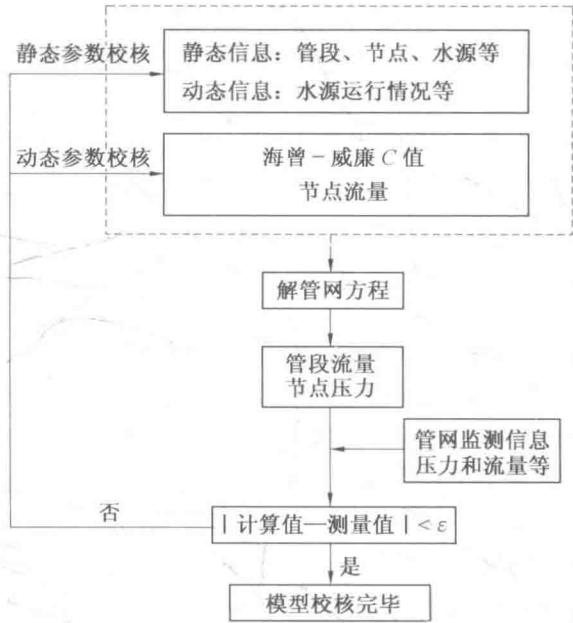


图 2.1 给水管网模型参数校核流程图

2. 影响模型精度的因素

建立于专业基础上的管网微观模型的模拟计算结果,不一定能与现场实测结果相吻合,导致它们之间产生偏差的原因很多,包括以下几个方面:

- ① 基础数据的准确性:给水管网系统模型的数据非常庞大,来自不同部门,经过逐级的归纳、统计、分析和处理,其中难免出现尚未发现的错误。
- ② 管网图简化不完善:大型配水管网系统包括成千上万条管段,一般忽略小管径管线。但管径小的管段不一定对水力条件影响小,而按管径的大小取舍的模型若去掉过多的关键性小管段,将影响模型的准确性。
- ③ 水泵特性曲线的影响:水泵长期运转导致水泵磨损以及技术改造等原因,导致水泵样本曲线与实际情况不符,而实验绘制的水泵曲线存在测量误差。
- ④ 节点流量的影响:节点流量是一个计算量,沿管线配水简化为节点配水与实际情况存在差异;且管网中不确定性因素很多,用水量的变化具有相当大的随机性,影响小用户以及漏失量的部分因素按权值分配,也有误差。
- ⑤ 管道阻力系数的不确定性:管道阻力系数的变化受铺设年代、管径、管材、流速的大小及变化、水质以及管道内壁腐蚀等影响,导致阻力系数呈不确定性。
- ⑥ 操作条件的不确定性:对管网的操作运行条件特别是一些阀门的开启度,甚至管线等了解不甚清楚等。
- ⑦ 测量设备所造成的测量误差:任何测量设备都带有仪器误差,还有人为的误差,以及随机误差等。

只有对以上影响因素做细致的分析,减小不合理因素对模型的影响,才能逐步提高模型的预测精度。

3. 模型校核标准

我国尚没有制定统一的标准,因为它与校核管网的规模、管网工况以及水源的特征等有关。

参考国外如英国 WRC 校核标准,结合中国的具体情况和课题组多年实践的经验,模型校核的标准主要包括以下几个部分。

① 水源(或水厂的供水干线)的供水压力、供水流量误差在 $\pm(2 \sim 3)\%$ 以内。

② 流量监测点:当主干管流量大于总用水量的 10% 时,误差取测量值的 $\pm 5\%$;否则,误差取测量值的 $\pm 10\%$ 。

③ 压力监测点:80% 的监测点的压力偏差在 $\pm 2\text{ m}$;50% 的监测点在 $\pm 1\text{ m}$;100% 的监测点在 $\pm 4\text{ m}$ 。

④ 分界线:模拟计算得到的管网压力分界线应与实际情况相吻合。

⑤ 供水趋势:模拟计算得到的供水趋势应与实际情况相吻合。

⑥ 压力分布:模拟计算得到的各节点水压分布情况应与实际情况相吻合,计算得到的高压区和低压区等应与实际情况相吻合。

可以在一种或多种工况下校核模型,为取得良好效果,一般校核的模拟时段至少应为连续 24 h。显然,完成校核所用的工况越多,模型越能反映出实际情况,但相应的难度也越大。由于模型是真实系统的一个近似,其中含有仪器等误差,因而取小于 0.5 m 的压力误差值是没有必要的。以上标准,也不是一成不变的,应根据实际情况决定。

为消除模拟计算与实测结果之间存在的偏差,许多学者对管网模型校核这一课题做了深入研究,包括灵敏度分析法、解析方法、求解管网非线性方程法、最优化方法、示踪剂和瞬态分析法等。但现有的校核方法在某种程度上尚不完善,有待进一步研究。实际上,预校核是决定实际管网模型实用性的关键环节;在没有进行预校核的前提下直接调整模型参数进行微观模型校核,往往导致模型失真,最终导致模型不能在允许误差内准确模拟实际管网的运行工况。

4. 静态参数校核(预校核)

若监测值与模型计算值之间的差异过大,则产生偏差的原因可能不仅仅是不确定的节点流量和管道阻力系数,还可能包括基础数据的准确性等,此时应进行微观模型的预校核。预校核是指当管网模型计算的模拟量与监测量差异过大时,通过管网水力模拟计算,核实基础资料的准确性、查找错误的一个全过程,具体包括以下几个过程:

(1) 进行管网水力模拟计算,查找管段信息和节点信息错误,核实网络拓扑结构的正确性等。

(2) 分析各节点水压的计算值,判断水泵特性曲线偏差、水池运行条件、边界条件和水泵开启情况的准确性。

(3) 核实阀门操作条件是否正确。

5. 动态参数校核(微观校核)

无论采用什么方法来消除监测点处的偏差,都应使被调整量尽可能符合管网实际情况。从另一个角度来看,无论是用公式计算得到的节点流量,还是通过现场实测得到的管道阻力系数 C 值,都是在前人的研究基础上通过反复实践或反复实验得到的,是一个良好的初始估计值。对它们的调整并不是越多越好,恰恰相反,而应是调整量越少越好。另外,考虑到实测压力时的具体条件和具体情况,现场监测值虽然是实测的,但也有一定误差,所以进