

城市供水管网二次加氯研究进展*

马力辉 刘遂庆 信昆仑

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室 ,上海 200092)

摘要 传统城市供水管网一般在净水厂实行消毒以减少用户受到病原体及各种水传播疾病的危害。既要保证足够的氯残留 ,又要减少过量氯产生的气味和可能的消毒副产物 (DBPs) ,传统的消毒方法经常是不可能的。为了解决这对矛盾 ,二次加氯将会是个很好的解决策略。二次加氯的优势已经吸引了国内外许多专家学者的关注 ,对二次加氯的研究进展进行了综合的论述 ,从新的角度对现有的优化模型进行了分类 ,并比较和推荐了认为可行或相对较好的模型。

关键词 供水管网 水质 二次加氯 优化模型

A review of models for booster chlorination in water distribution systems Ma Lihui ,Liu Suiqing ,Xin Kunlun. (State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse ,Tongji University ,Shanghai 200092)

Abstract : Booster chlorination at selected points in the potable water distribution system is an attractive alternative to the conventional one stage chlorination at the water purification plant ; it is practiced to ensure a desirable residual free chlorine concentration in water received by all end users at a lower overall consumption of chlorine and less productions of harmful and/or taste-odor causing disinfectant by-products (DBPs). Available basic and improved booster chlorination models are presented ,sorted and compared in detail. It is recommended to consider specific conditions for the case of study in selecting a model for identifying the locations for booster chlorination and to employ a chlorine dose model based on the sum of square of differences between the set residual chlorine concentration and actual concentrations found at the booster chlorination stations.

Keywords : Water distribution system Water quality Booster chlorination Optimal model

在传统模式下 ,供水企业面临两难的选择 :一方面 ,由于氯在管网中长时间停留而发生衰减消耗 ,如果净水厂不增加过量的氯量 ,就不能满足管网中许多关键点的余氯浓度要求 ;另一方面 ,过高的氯浓度将会产生气味 ,从而增加消费者的投诉。另外 ,有研究表明 ,过量的氯会导致消毒副产物(Disinfectant By-Products , DBPs) ,这些物质将会危害人体的健康^[1-3]。

限制 DBPs 浓度 ,已经在美国、欧洲乃至中国变得越来越严格。因此 ,供水水质问题转化为调节余氯浓度 ,使其控制在相对可靠的范围内 ,低限保证充足消毒 ,高限限制 DBPs。

为保证供水管网中各处水质 ,二次加氯是种高效的余氯浓度控制策略。该方法系分布式的补给技术 ,通过在供水管网中的氯投加高效点再次投加或补充氯 ,改变氯的浓度分布 ,提高供水水质。这种方法与仅在水厂消毒的传统方式相比有如下优点 : (1)减少 DBPs 形成的可能^[4] (2)减少氯的总投加量 (3)导致供水管网消费节点限制范围内的余氯有更加均匀的时空分布 (4)减少从水厂到消费节

点的消毒时间 ,降低消毒终端产物 (5)增加系统抵御和应对事故或蓄意污染物侵害的稳固性。

近年来 ,应用二次加氯控制城市供水水质的潜在好处吸引了许多专家学者的关注。本文在对二次加氯基本假设和背景模型进行论述的基础上 ,从新的角度对现有的优化模型作了分类 ,并比较和推荐了笔者认为可行或相对较好的模型。

1 假 设

1.1 反应级数

目前 ,有关二次加氯研究的文献中都是假定氯衰减遵循一级反应。尽管在供水管网水质模拟中是常见的 ,而且基于反应物过量假设的实验研究 ,但是该模型应用于二次加氯时包含明显错误^[5]。Boccelli 等^[6]指出活性粒子模型(Reactive species model)在一次和二次加氯中将优于一级模型。如果采用更合理的反应动力学模型 ,线性模型关系将不再适用 ,而且优化问题求解将会更加困难。由于模型存在误差 ,由一级反应动力学模型推导出来的各种模型(如 I/O 模型) ,可以产生实际系统的次优解 ,在实际应

第一作者 :马力辉 ,男 ,1977 年生 ,博士研究生 ,研究方向为城镇供排水系统优化。

* 国家“ 863 ”高技术研究发展计划资助项目(No. 2004AA649410)。

用中取得足够好的效果。所以在实际应用中仍然采用一级反应动力学模型。

1.2 拟稳态

城市供水管网稳态模型假定管网水力要素(管段流速、流量、节点流量和水压等)和水质要素(物质浓度)都不随时间变化。城市供水管网中的水体流动呈现复杂的周期性,大多采用拟稳态模型对其进行研究,即将时段细分,单个研究时段是稳态的。通常假定水力条件、水压、流速、水池水位及加氯模式(净水厂和二次加氯中)等都呈周期性变化。节点的氯浓度如 Boccelli 所示呈现周期性的波动。实际城市供水管网呈现出很强的周期性元素和非周期变动,只要这些变动能够导致单个时段内产生稳态的影响系数和衰减系数,随后叙述的传统水质模型和 I/O 模型就能够得到应用。

2 背景

通过二次加氯改善供水水质,需要建立相应的水力模型和水质模型,在此基础上再进行二次加氯的优化模型应用。由于水力模型读者较熟悉,而部分水质模型是近些年才发展起来的,所以本文仅对水质模型进行简单的描述。

2.1 传统水质模型

管网水质模型是模拟水中物质随时间在管网中变化规律的模型。管网水质模型是在水力模型的基础上,利用计算机模拟水质参数或某种污染物在管网中随时间和空间的分布。管网水质模型主要的功能是可以跟踪管网水质的变化,评估管网水质的状况。

在单个管段中,氯分布状态可以按式(1)计算。

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} + v \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} = K_1 c(x,t) \quad (1)$$

式中 $c(x,t)$ 为管道中 t 时段 x 处的氯浓度, mg/L ; v 为水的流速, m/s ; K_1 为一级反应常数,为管道反应系数、质量传输系数和余氯衰减系数的函数, d^{-1} 。

现有的水质模型按求解方法可以分为两类:欧拉法和拉格朗日法。水质模拟技术计算精确,并且足够预测管网水质残留。但是,各种方法都尽力近似求解各管道中无数点的氯浓度,从而丢失氯输入/输出路径的关系。

2.2 I/O 模型

输入/输出(Input/Output, I/O)模型^[7,8]是种递归回溯方法,该方法可以从输出节点开始,找到何时投加氯到供水管网中。该模型通过相邻上游节点浓度指数衰减加权平均,表达特定时间节点氯浓度。

如果上游节点是加氯点,上游节点浓度即可获得;如果不是加氯点,可以运用同样的过程回溯到已知加氯点。I/O 模型在管网中从消费节点回溯到氯投加点,这便是递归过程的基础。依此方法可以建立输入节点和输出节点之间的关系:

$$c_i(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_u} \alpha_{ij}^k(t) u_j^k \quad (2)$$

式中 $\alpha_{ij}^k(t)$ 为时刻 t 、调度周期 k 输入节点 j (二次加氯点)对输出节点 i 的影响系数; $c_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的浓度, mg/L ; u_j^k 为二次加氯点 j 的投加浓度, mg/L 。

I/O 模型能比传统模型提供更基础的信息,如提供输入、输出节点之间的各路径关系,将其分解为相应的延时和影响系数。输出节点的行为能通过任何源节点来推求计算,这种数学形式的表达对应用有利,如反馈控制。另外, I/O 模型由于路径表达清楚,所以有助于理解水质过程。

3 二次加氯优化模型

二次加氯优化模型是一系列基于专业假设和方法而建立,通过优化方法求解的模型。根据决策变量的不同,该系列模型可分为优化布置模型和优化投加量的模型。优化布置模型可以分为覆盖模型 1、2 和优质水模型;优化投加量模型包括一次形式模型和二次形式模型。不同的想法可以有不同的组合方法,如 Prasad 联合优化布置模型中优质水模型和优化投加量模型中的一次形式模型组成多目标函数形式,可以同时实现二次加氯的点和量的优化。不同优化模型采用不同的优化算法获得优化解。到目前为止,遗传算法^[9,10]、多目标遗传算法^[11]、整数规划^[12,13]、线性规划^[14]、二次规划^[15]、混合整数线性规划^[16,17]、0-1 非线性规划^[18]和混合整数二次规划^[19]已经得到应用。

3.1 优化布置模型

3.1.1 覆盖模型 1

基于水力模型计算,在有限现场监测点的情况下, Lee-Deininger 算法可以根据用户用水量发现最佳的覆盖集,从而确定最佳的现场监测点^[20]。该方法实际是管网中的监测点应该覆盖最大的其他管网节点水量。引入“覆盖”或“覆盖节点”是为了建立联系,从而通过管网的其他节点的监测结果评价管网水质。如监测节点 i 从节点 j 获得足够的水,即节点 i 覆盖节点 j 。因此,可以通过节点 i 的水质浓度推导出节点 j 的浓度。

为了选择二次加氯点,需要象 Lee 和 Deininger 那样控制下游节点而不是上游节点。当选择一个节点为加氯点时,下游节点的水质可以通过一些假设而进行评价。借鉴以上方式可以建立优化问题为:

$$\max \sum_{i=1}^{n_b} c_i y_i \quad (3)$$

约束条件为:

$$\sum_{i=1}^{n_b} x_i \leq n_s \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n W_c(i, j) x_i - y_j \geq 0 \quad (5)$$

式中: x_i 为节点 i 的水量, m^3/d ; n_b 为所有可能设置二次加氯泵站的节点数; n 为节点数; n_s 为最大二次加氯泵站数; y_j 为是否在 j 点设置二次加氯点; 0 为不在该点设置, 1 为设置; y_j 为一个覆盖点, 0 为不覆盖, 1 为覆盖。

式(4)限制二次加氯点的最大数量。式(5)限制管网中不同的节点,通过这个约束,使得监测节点 j 至少由一个二次加氯节点 i 覆盖,可控制节点 j 的水量。

3.1.2 覆盖模型 2

覆盖模型 2 寻求确定最小化的二次加氯点,对于确定的节点和时段,这些加氯点能够提供完全的余氯覆盖。余氯覆盖序列由各个监测点和监测时段产生,并且保证各个监测点和时段至少由一个二次加氯点决定,因此导致完全覆盖。该模型的关键步骤是确定节点是否被覆盖。优化问题为:

$$\min \sum_{i=1}^{n_b} x_i \quad (6)$$

约束条件为:

$$\sum_{i \in N_j^k} x_i \geq 1 \quad j = 1 \dots n_m \quad k = 1 \dots K_n \quad (7)$$

$$N_j^k = \{i \mid c_j^k \geq c^{\min}\} \quad (8)$$

$$x_i = \{0, 1\} \quad i = 1 \dots n_b \quad (9)$$

式中: N_j^k 为监测点 j 在时段 k 的余氯覆盖集; c_j^k 为监测点 j 在时段 k 的余氯浓度, mg/L ; c^{\min} 为能够接受的最小余氯浓度, mg/L 。

覆盖集 N_j^k 包括可能的二次加氯点 i , 该加氯点的浓度为 c^{\max} , 并且由此推导出的各节点 j 在时刻 k 的余氯浓度大于 c^{\min} 。因此,覆盖集又可以定义为 $N_j^k = \{i \mid \alpha_{ij}^k \geq \eta = c^{\min}/c^{\max}\}$ 。残余参数 $\eta = c^{\min}/c^{\max}$ 是个衡量余氯残留的设计参数,直接影响着优化模型的位置和数量。

3.1.3 优质水模型

优质水模型基于管网水力和水质的模型。将余万方数据

氯在限制范围内的总用水量,代替节点数量,作为优化的目标函数。24 h 内优质水的总量称为总优质水量,所有节点的总优质水量必须在能够接受的浓度范围内。该模型表示为:

$$\max THQW = K \sum_{i=1}^n \sum_{t=0}^{23} V_i \quad (10)$$

约束条件为:

$$V_i = 0 \quad \text{当} \quad c_i < c^{\min} \quad (11)$$

式中: V_i 为节点 i 在 1 h 内的优质水消耗量, m^3/h ; K 为单位转换系数; $THQW$ 为管网中总优质水量, m^3/d 。

3.2 优化投加量模型

3.2.1 一次优化模型

假定一定数量的氯二次投加点,氯的定点和定量问题转化为最小化的氯总投加量,各节点以余氯浓度上下限为约束条件。最小化的投加氯量将会产生前面所述的许多优点如减少 DBPs 等,根据这一原则,目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} M_i^k \quad (12)$$

约束条件为:

$$c_j^{\min} \leq c_j^m \leq c_j^{\max}; \quad j = 1 \dots n_m \quad m = \mu \dots \mu + n_h - 1 \quad (13)$$

$$M_i^k \geq 0; \quad i = 1 \dots n_b \quad k = 1 \dots n_k \quad (14)$$

式中: M_i^k 为投加点 i 在投加周期 k 时段内总氯的投加量, mg/L ; c_j^m 为节点 j 在监测时间间隔 m 之后的余氯浓度, mg/L ; c^{\max} 为监测节点余氯的最大允许浓度, mg/L ; μ 为监测时间的开始; n_k 为水力循环时间步长数(等于监测时间步长数)。

3.2.2 二次优化模型

氯会随时间衰减,余氯在管网中的时空分布呈现很大的波动性。管网中余氯分布最好的方式便是均匀地达到某一期望水平,与期望余氯浓度的差值便成为衡量用户水质的标准。二次优化模型的表达形式如下:

$$Z(T_0) = \frac{1}{T_0} \sum_{t=0}^{T_0} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [c_i(t) - c^*]^2 \quad (15)$$

式中: T_0 为规划范围的时间长度, h; c^* 为期望的余氯浓度, mg/L 。

在给定氯衰减级数和固定投加点的情况下,该种方式的优化目标函数使模型更加接近实际。输出浓度依赖于二次加氯点的输入浓度,优化投加量问题转化成 T_0 趋于无限时投加量最小。

4 比 较

表 1 优化布置模型比较表

模型分类	覆盖模型 1	覆盖模型 2	优质水模型
模型基础	水力模型	1. 水力模型 2. I/O 模型	1. 水力模型 2. 传统水质模型
模型假设	拟稳态	1. 拟稳态 2. 氯衰减遵循一级反应	1. 拟稳态 2. 氯衰减遵循一级反应
理论依据	通过节点间的水量大小比例及水流路径建立整个管网节点间的水质关系	通过 I/O 模型建立供水管网中节点间的水质联系。	通过传统水力水质模型,直接构建节点间的水力水质联系。
优点	简单实用	路径关系清晰,水质过程表达准确	直观易于理解
缺点	水量信息代替水质信息,会产生偏差,如:不能体现管段两节点流量变化不大、水流时间很长而造成水质变化的局限性。	影响系数确定较为复杂,容易受到水力周期波动影响。	对水力、水质模型依赖性强,模型精度要求高。
模型应用	1. 文献[21] 2. 文献[22]	文献[12]	文献[11]

表 2 优化投加量模型比较表

模型分类	一次优化模型	二次优化模型
模型基础	I/O 模型	I/O 模型
实现功能	减少总投加量	1. 改善管网水质分布 2. 减少投加量
优点	模型求解简单	1. 易于理解水质和水力之间的关系 2. 不需要严格的水力周期,接近于实际应用 3. 引入期望余氯浓度,降低优化问题维度 4. 计算要求不严格
缺点	1. 易受水力周期影响; 2. 计算过程维度高; 3. 实际应用中,为满足要求需要做必要处理	计算量相对大
模型应用	1. 文献[13] 2. 文献[14]	1. 文献[15] 2. 文献[19]

覆盖模型 1、2 和优质水模型通过表 1 得到系统全面的比较信息。在具体应用中,可以根据需要选择模型。笔者认为,在水力水质模型基础好的单位可以应用优质水模型,但一般供水企业不具备好的模型条件,在我国还未见到成功应用的水质模型。覆盖模型 1 相对粗糙但实用,在目前需相对准确水力建模的机构可以应用,覆盖模型 2 与后面所述的优化投加量模型,包含相同的模型机理可以相互融合,如单独确定位置可以使用。如果采用组合模式既优化二次加氯点位置又优化投加量,建议用覆盖模型 1 代替。

另外,笔者认为可以考虑尝试借鉴国外 Tryby 等^[23]、国内张怀宇等^[24]和伍悦滨等^[25]提出的,用节点水龄来确定供水管网水质(或水质监测点)的

方法,确定二次加氯点,该方法尚未见到文献报道。

优化投加量模型中的一次形式和二次形式参见表 2,表中很明确地显示了二次形式的优越性。目前,计算求解已经不是模型应用的瓶颈了。所以通过比较,笔者建议使用二次形式的优化投加量模型。

5 结 论

为保证供水管网中各处水质,二次加氯是种高效的余氯控制策略。通过在供水管网中的氯投加高效点,再次投加、补充氯,从而改变管网余氯分布,提高供水水质。二次加氯的优化问题,可以根据不同假设和理论建立优化模型,运用优化方法进行求解。

本文对当前存在的优化模型,从新的角度进行

了系统的描述、分类和比较。经过分析比较,笔者建议在二次加氯优化布置模型中,根据实际情况选用优化模型,在优化投加量模型中,二次形式模型比一次形式模型具有较大的优势,所以推荐使用。

参考文献

[1] Bull R J ,Kopfler R C. Health effects of disinfectants and disinfection by-products[M]. Denver :American Water Works Association Research Foundation ,1991.

[2] Bielmeier S R ,Best D S ,Guidici D L ,et al. Pregnancy loss in the rat caused by romodichloro-methane[J]. Toxicol. Sci. ,2001 ,59 (2) 309-315.

[3] Waller K ,Swan S H ,DeLorenze G ,et al. Trihalomethanes in drinking water and spontaneous abortion[J]. Epidemiology ,1998 ,9 (2) 134-140.

[4] Boccelli D L ,Tryby M E ,Uber J G ,et al. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems[J]. Water Resources Planning and Management ,ASCE ,1998 ,124(2) 99-111.

[5] Tryby M E ,Boccelli D L ,Koechling M T ,et al. Booster chlorination for managing disinfectant residuals[J]. Journal of American Water Works Assoc. ,1999 ,91(1) 95-108.

[6] Boccelli D L ,Tryby M E ,Uber J G ,et al. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions[J]. Water Research 2003 ,37 2654-2666.

[7] Zierolf M L ,Polycarpou M M ,Uber J G. Development and auto-calibration of an input-output model of chlorine transport in drinking water distribution systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology ,1998(6) 543-553.

[8] Shang F ,Uber J G ,Polycarpou M. Input-output model of water quality in water distribution systems[J]. Water Res. ,2000 ,26 (2) 1-8.

[9] Ucaner M E ,Ozdemir O N. Application of genetic algorithms for booster chlorination in water supply networks[C]//Proceedings of World Water & Environmental Resources Congress. Philadelphia , Pennsylvania 2003.

[10] Ostfeld A ,Salomons E. Optimal scheduling of pumping and chlorine injection under unsteady hydraulics[C]//Proceedings of World Water & Environmental Resources Congress. Salt Lake City ,UT ,U S 2004.

[11] Prasad T D ,Walters G A ,Savic D A. Booster disinfection of water supply networks : multiobjective approach[J]. Water Resources Planning and Management 2004 ,130(5) 367-376.

[12] Subramaniam P ,Tryby M ,Uber J. Set covering models for locating booster chlorination stations in water distribution systems[C]//Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management Held in Minneapolis. Minnesota , 2000.

[13] Berry J ,William E H ,Phillips C A ,et al. A general integer-programming-based framework for sensor placement in municipal water networks[C]//Proceedings of World Water & Environmental Resources Congress. Salt Lake City ,UT ,U S 2004.

[14] Constans S ,Bremont B ,Morel P. Using linear programs to optimize the chlorine concentrations in water distribution networks [C]//Joint Conference on Water Resources Engineering and Wa-

ter Resources Planning & Management Held in Minneapolis. Minnesota 2000.

[15] Propato M ,Uber J G. Linear least-squares formulation for operation of booster disinfection systems[J]. Water Resources Planning and Management 2004 ,130 (1) 53-62.

[16] Tryby M E ,Uber J G. Development of a booster chlorination design using distribution system models[C]//Proceedings of the 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference Held in Tempe. Arizona ,U S ,1999.

[17] Tryby M ,Boccelli D M ,Uber J ,et al. Facility location model for booster disinfection of water supply networks[J]. Water Resources Planning and Management 2002 ,128(5) 322-333.

[18] Propato M ,Uber J G ,Shang F ,et al. Integrated control and booster system design for residual maintenance in water distribution systems[C]//Proceedings of World Water & Environmental Resources Congress. Orlando Florida 2001.

[19] Propato M ,Uber J G. Booster system design using mixed-integer quadratic programming[J]. Water Resources Planning and Management 2004 ,130 (4) 348-352.

[20] Lee B H ,Deiniger R A. Optimal location of monitoring stations in water distribution system[J]. Journal of Environmental Engineering ,1992 ,118 (1) 53-62.

[21] Harmant P ,Nace A ,Kiene L. An algorithm to optimize booster chlorination in water distribution network[C]//Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management Held in Minneapolis. Minnesota 2000.

[22] Nace A ,Harmant P ,Villon P. Optimization of location and chlorine dosage of the booster chlorination in water distribution network. Proc. of water distribution systems analysis[J]. Water Res. 2001 ,35 2000.

[23] Tryby ,M E ,Uber J G. Representative water quality sampling in water distribution systems[C]//Proceedings of World Water & Environmental Resources Congress. Orlando ,Florida 2001.

[24] 张怀宇 ,赵洪宾 ,吴文燕 ,等. 市政给水管网水质监测点的优化选址[J]. 给水排水 ,1996 ,22(10) 5-8.

[25] 伍悦滨 ,赵洪宾 ,张海龙. 用节点水龄量度给水管网的水质状况[J]. 给水排水 ,2002 ,28(5) 36-37.

责任编辑 :贺锋萍 (修改稿收到日期 2005-09-28)

习近平书记赞扬楠溪江环境保护工作

2006 年 5 月 31 日 ,浙江省委书记习近平专程去永嘉看望为民好支书郑为民 ,沿着楠溪江驱车到山坑乡后九降村途中 ,一路江水如碧 ,山色似黛 ,习书记赞不绝口 ,并高度评价了永嘉县楠溪江保护工作。楠溪江国家级风景名胜区水秀岩奇瀑多村古滩林美 ,名闻遐尔 ,同时也是永嘉县人民赖以生存的母亲河。永嘉县委县政府长期以来十分重视对楠溪江的保护 ,坚持在该流域禁止建立污染型工业 ,加强对高速公路、康庄工程等大型建设项目环境评估和运行日常管理 ,仅建设诸永高速公路的环境保护资金投入就达到 3200 万元 ,还实施“楠溪江保清方案”和“畜禽禁养区管理实施方案” ,使楠溪江水环境得到切实保护。