

城市给水处理厂能耗研究进展

王 圃¹ 龙腾锐¹ 陆 柯¹ 李 肖²

(1 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2 重庆市水务集团, 重庆 401147)

摘要 综述了近年来有关给水处理厂的能耗及节能的研究现状。由于缺乏对城镇给水处理厂典型工艺中各单元能耗的全面研究和相应的理论, 造成分析方法和评价手段滞后于实际的应用和发展, 因此化学、热力学及能源工程学等基础学科与给水处理厂各工艺的交叉和融合是必然趋势, 这一趋势将促使给水处理厂能耗研究系统化, 并推动节能工作的深入开展。

关键词 给水处理厂 能耗 研究进展

Advances in research of energy consumption of urban waterworks

Wang Pu¹, Long Teng-rui¹, Lu Ke¹, Li Xiao²

(1. Key Laboratory on Three Gorge Reservoir Region's Eco-Environment of
Chongqing University, Ministry of Education, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Water Supply Group Ltd., Chongqing 401147, China)

Abstract: The recent researches on energy consumption of urban waterworks are reviewed. However, due to lack information of full investigation on the energy consumption of each unit in waterworks physically and theoretically, so the analytical methodology and estimation measures are lag to the demand of practical application. It is thought that conjunction of chemistry, thermodynamics and energy engineering to the water purification has to be an inevitable trend. By this way the study on energy saving for waterworks will be promoted to a new stage of systematic and profound advances.

Keywords: Waterworks; Energy consumption; Advances in research

城市自来水行业的能源消耗非常大, 2001 年为 572.94 万 t 标准煤, 同年全国能源消费总量为 130 297 万 t 标准煤^[1], 供水行业占了约 0.5%, 因此对城市给水处理厂进行能耗研究的意义很大。目前国内外对城市给水处理厂能耗的研究基本上都集中在泵站工程方面, 而对给水处理方面的能耗研究相对较少。总的来看, 给水处理厂能耗方面的研究大大落后于与工艺相关机理和应用的研究。泵站工程的能量研究侧重于两个方面: 泵站工艺方面的研究和优化调度方面的研究。对于水处理过程中的能耗分析, 由于其理论涉及化学热力学、化学动力学、物理化学、能源工程学及水处理工艺学, 属多学科的综

合和交叉; 加之水处理系统工艺的复杂多样, 水质随不同地域和季节动态变化较大, 因此对其相应理论的建构存在一定的难度。另一方面, 由于在选择工艺流程时, 处理效率通常是设计者考虑最多的关键因素, 而与能耗相关的运行费用只是作为一般因素来对待。因此, 分析国内外在城市给水处理厂能源利用方面的进展, 是进行该领域系统研究的基础。

1 泵站的能耗分析与优化

给水处理厂水泵机组所消耗的电能占水厂总耗电量的 90% 以上, 由于各种条件的限制, 我国泵站工程普遍存在着效率不高, 能源单耗大, 制水成本高等问题, 致使泵站工程效益较低; 因此进行能耗方面的研究意义较大。国内外对泵站进行系统优化时主要通过两条途径。一条途径是对泵站进行工艺设计

建设部 2001 年科技项目 (2001-45)。

优化,其实质就是水泵的优选,通过优化后提高泵站机泵效率,达到节能目的;另一途径是对泵站进行运行优化调度,其实质是在城市用水量和供水量发生变化的情况下,使泵站运行始终处于较优的工作状态,达到节能目的。

1.1 泵站工艺优化

国外水泵优选方法包括启发式方法,如采用高效的水泵组合方式或是用储水池来削弱高峰流量对泵站的冲击性,进行这类研究的有 Chao (1979), Cligenpeel (1983), Aptowicz (1987), Lackowitz 和 Petretti (1983), Brailey 和 Jacobs (1980)。还有更严谨的方法:用数学方法优化选择水泵。如 Lindell E. Ormsbee (1994) 的动态规划算法 DG (dynamic programming)^[2]。

Chen (1988) 认为在没有水塔的供水系统中,动态规划算法适用于选出真正可以提供最优连续流量的水泵,而 Little 和 McCroddden (1989) 则发展出一种 DG 算法来选择水泵最优组合。这一算法的目标函数中既包括能耗项,也包括高峰流量项。

Timothy D. Hirrel (1989)^[3] 提出利用图解法进行水泵的优选,该法在考虑用水量变化的基础上确定水泵的流量和扬程,但它不适合于复杂泵站。

B. Ulanicki 和 J. P. Rance (1993) 等人用多个约束条件来选择水泵。每一个约束条件都对待选水泵进行一次筛选,只有符合所有约束条件的水泵,才被列入优选结果^[4]。这种方法被称为优化枚举法。这种算法也可以找到全域最优解,但是计算时间太久。

国内学者采用的选泵方法主要是整数规划法和图解法。整数规划法^[5]是将流量-时间曲线分成不同的供水阶段。用枚举法为每一阶段选适合的泵,再将各阶段可能的水泵型号进行排列组合,列出所有可能方案,比较这些方案的年费用值,年费用值最小的就是最优解。但该法计算量太大,所有方案都要计算年费用值。图解法是根据系统特性曲线和水泵特性曲线,找到高效段符合系统水量水压的水泵。这种方法的优点是计算简单,容易理解,但仅适用于简单泵站的水泵选取。

1.2 泵站工程的优化调度

国外采用的水泵优化调度的方法比较多。Dreizin 等人于 1971 年提出了动态规划算法 DG

(dynamic programming), 后来发展出来的泵站实时运行算法大都是该方法的应用。Sterling 和 Coulbeck (1975), DeMoyer 和 Horwitz (1975), Sabet 和 Helweg (1985) 都曾经用 DG 法来构造算法,应用于相对简单的系统;而 Carpentier 和 Cohen (1984), Zessler (1984) 则将实时控制策略应用于较复杂的系统。还有用离散的最优化算法降低水泵运行费用,例如 Holland (1975), Goldberg (1989), Wang (1991), Simpson (1994), Ritzel 等人 (1994) 所采用的基因算法 (GA), Dougherty 和 Marryott (1991, 1993), Kuo 等人 (1992) 引入的烟火算法。A. B. A. Sakarya (2002) 在优化运行中还考虑到水质的影响。这些研究者将新的算法运用于大城市复杂供水泵站的优化。这些算法虽然适用范围很广,但由于所需要的计算时间太长,不适于在线控制的实际应用。

S. Pezeshk 等人 (1996) 提出了适合在线控制的方法:适应性搜索最优化方法 ASA (adaptive search algorithm)。ASA 通过用系统特性系数搜寻全域最优解获得近最优起始状态的方法来缩短求解时间。每一次循环都将泵和管道特性系数更新一次,而且加入一系列新的最优泵,从而产生一个新的更高效的泵组合形式。这种方法的主要优点是:可以实时求解;可以处理大型的、复杂的系统;便于使用。该方法的缺点是不能产生全域最优解,因为目标函数是非凸结构的。

Paul W. Jowitt 等人 (1989) 将线性规划运用于制定水泵 24 h 内的最优运行时间安排。将所有水泵的耗电量设为各台水泵的运行时间、水量、扬程的线性函数,系统的特性系数、各水泵的极限流量、扬程作为约束条件,求函数的最小值。Keith W. Little 和 Brian J. McCroddden 在此基础上发展了混合整数线性规划 MILP (mixed-integer linear programming)。他们建立了一个相应于使用时间安排 TOU (time of use) 的最优化模型。模型的目标函数是规定每一种泵或泵组合的运行小时数,使得总的能量消耗(其中包括商业能源,需要性消耗以及发电机运行消耗)最小。模型的约束条件是满足供水系统的平均、最大、最小需水量以及相应扬程要求。

国内的运行优化方法有动态规划法、非线性规划法和线性规划法等。动态规划法需要将状态变量

离散化。离散点越多,精度越高,但是计算时间越长。由于水泵的特性曲线成线性,所以用非线性规划较难实现,而且难以得到全局最优解。

综合国内外研究情况可知,泵站优化调度属于经济运行问题,通常采用等微增率法和动态规划法求解。等微增率法是一种传统的优化方法,通常要求优化问题的目标函数具有连续性,可微性和单峰性,但它仅给出最优化问题的必要条件,并且遇到泵站机组特性曲线较复杂,机组台数较多的情况,其求解往往很困难。动态规划法用于泵站优化调度的优点是它可以针对实际运行中工况时刻变化的特点,进行分阶段作出决策,从而使整个过程达到最好的活动效果。但它需要在各机组的所有工况范围内一一比较,才能求得最优策略,许多不可能是最优策略的机组组合也要计算,大大增加了工作量,国内外学者已提出了不少方法进行改进,如离散微分动态规划方法(DDDP)^[5],逐步优化算法(POA)^[7],动态规划法逐次渐进法(DPSA)^[8]等。但这些扩展方法也有缺点,如很难保证收敛到全局最优解等。由于给水处理厂泵站系统能量定量方法明确,因此优化方法丰富,同时也说明泵站系统的节能方法并不单一,应根据实际情况结合运用。从研究方向来看,笔者认为将能量工程的分析方法引入进行分析不失为一种有益的尝试。

2 给水处理厂能耗的审计与管理

国外的学者对于给水厂能耗的管理作了大量的研究。美国 Thomas M Walski^[9]提出水厂的能量最优化可能和其他工况要求冲突,这些工况包括①满足用户用水的需求。②事故时用水的要求,比如火灾或因为泵站不能运转而导致供水中断等。那么这时候管网中储水池中的储水量如果满足泵站节能的要求就会减少事故时的水量保证。③水质的保证。主要是指水池中的水与管网中水的交换以避免水质恶化。这说明能量的优化必须在许多工况要求满足的情况下进行。

能耗调查研究是节能途径和手段的基础。在这方面美国的 Harish Arora 和 Mark W. Lechevallier^[10]受 AWS 的委托对其下属的三个水司进行了能量调查和审计。他们对各水司采用的节能措施(多水源水厂的供水系统进行规划,改进管理,

更换机泵,安装节能灯,安装变频驱动器,安装高效电机,在用水低峰期使用备用电机等)进行调查。计算出每项措施的节能量,每年节约的费用,该项措施的一次性投资,偿还期等,并最终评价出该项措施的经济性。这样可推断出整个 AWS 的能耗和节能水平。并以此作为可靠的基础数据,指导水厂的节能技术改造。

为了便于管理,最终还需要建立一套易于水厂操作的能耗指标以便对水厂的能耗水平进行评价,以指导水厂的节能工作。我国供水企业^[11]长期以来普遍实行的是 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{千 m}^3$ 和 $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{千 m}^3 \cdot \text{MPa})$ 两种指标,经过多年的运行,它们已暴露出诸多弊端。在新指标研究方面美国的 Pelli. T, Hitz HU^[12]提出了结构性指标和质量指标来评价供水系统的能耗。结构性指标用于评价用户的空间分布和水源位置对总能耗的影响。质量指标用于评价供水系统的效率(泵的效率,高位水池的位置和管网中的漏损)对总能耗的影响,这样水厂管理人员就能评价供水系统多大程度上节约了能量。该方法能在一定程度上弥补过去所用指标的不足,既体现了机泵的效率,又反映了管网的因素,因此对供水企业的节能可以产生积极影响。

3 给水处理过程中能耗的分析

迄今为止,国内外对城市给水处理能耗的研究非常有限,这一领域的进展滞后于与水质特性相关的机理和应用研究。纵观近 10 多年国内外的进展,给水处理能耗的有关研究主要集中在处理厂工艺的优化方面。

钟淳昌^[13]分析了给水处理中的各种能耗。给水处理构筑物节能通常是节约水头损失,故往往又与净水效果相关联;有时多一些水头损失,可以提高处理水质。因此在这种情况下节能应该说是综合性的,而不能单纯看某一方面。他对给水处理厂的各处理单元的能耗的衡量方法作了分析,并从能量的观点分析了各反应处理设备的能耗情况,提出了在不同的情况下适宜采用的构筑物形式,同时提出了一些节能措施。研究结果主要是根据经验得出的,研究局限在定性方面,在定量分析和理论方面有待深入,但这些有益的尝试为给水处理方面能量研究提供了一些思路。

目前我国的城市水厂多采用比较简单的加药混合方式与设备,少数水厂采用了机械搅拌混合装置^[11]。这些装置一般都是考虑采用无法随原水的变化而调节的水力混合装置,当原水水质、处理水量变化时,这些装置往往不能满足工艺处理要求,从而导致给水水质下降。欧、美、日给水厂通常采用快速机械搅拌($G = 700 \sim 1\,000\text{ s}^{-1}$, $t \leq 1\text{ min}$),混合快速、均匀,且机械搅拌能随原水水质、加药量和药剂种类的变化而作相应的调整来达到最佳处理效果。赵树君^[14]用管式微涡初级混合设备(混合时间 $3 \sim 30\text{ s}$)取代原混合效果欠佳的静态混合器;通过增大 G 值,提高水流中颗粒的碰撞和传质速率,使混合时间缩短而混合效率提高,使后续絮凝设备能高效率运作,从而大幅降低处理出水的浊度,提高了单位设备的处理能力。

水处理中的絮凝是一个复杂的物理化学和流体力学作用的过程。其效果由原水水质、药剂投加和水力条件三因素所控制,当原水水质一定且药剂投加合理时,决定因素则是絮凝池的水力条件。水力条件除受水流边界制约影响外,主要受输入水流的能耗分布情况影响。李镜明^[15]对机械絮凝池的工况进行了连续流模型试验,并将试验结果作出归纳整理,然后在哈里斯絮凝动力学方程的基础上,提出了 G 值分布的数学模式及其应用方法。黄其龙等^[16]以哈里斯(Harris)的絮凝理论为基础,计及絮体的破碎,首先提出了絮凝池的残余浊度变化速度方程。运用因次分析推导出能耗分配的数学模型。并用高岭土配制的悬浊液进行了絮凝模型试验,其结果经计算机模拟后表明:数学模型较好地反映了絮凝的耗能过程。武道吉等^[17]在综合前人的基础理论和研究成果的基础上,提出最佳絮凝控制指标为 G 和 Eu ,并阐述了絮凝工艺设计、运行的要点和主要参数的选用。不难发现近年来国内外对高效絮凝的研究十分重视,而高效絮凝通常采用两种方法实现:一种是增加扰流装置以提高能耗的有效利用率;另一种是把能耗合理地分配到反应池的各档中去。展望该研究领域,定量研究絮凝过程有效能耗的分布,是高效絮凝池研究的方向。

我国给排水工作者曾对各类沉淀池与澄清池运行的电耗进行过比较^[18],电机驱动的按实耗功率计

算,水力形式的换算成所需水泵与电机功率,结果见表1。

表1 各种池型的电耗比较

池型	水量 /万 m^3/d	水头 损失 /m	折算为 功率 /kW	机电设备 实耗功率 /kW	总功率 /kW	按万 m^3/d 计算的总 功率/kW
平流式沉淀池	6	0.4	3.9	0	3.9	0.65
加速澄清池	1.2	0.5	0.97	1~1.6	1.97~2.57	1.63~2.14
真空脉冲澄清池	3	0.584	2.84	2.72~4.48	5.56~7.32	1.86~2.44
斜管沉淀池	6	0.45	4.38	0	4.38	0.73
悬浮澄清池	1	0.7	1.14	0	1.14	1.14

从表1可知,平流式沉淀池消耗的动力最少,其次是斜管沉淀池,再次是悬浮澄清池,三者都不需要机电设备。真空式脉冲澄清池消耗的功率最大。

过滤在给水处理过程中所占的能耗较大,因此诸多研究的目的是为了进一步提高出水水质同时降低能耗。田一梅等^[19]对我国水厂中常用的两种滤池:双层滤料+高速水流反冲洗,均质滤料+气水反冲洗分别做模型试验,以确定其过滤的数学模式,并进行运行优化的分析对比,发现均质滤料滤池更好。景有海等^[20]将粒状材料组成的滤床抽象为由无数条毛细管道组成的管束,将过滤过程描述为水流在毛细管道中流动时的管壁吸附过程,从而推导出均质滤料过滤过程的水头损失计算模型。邓彩玲等^[21]通过中试和生产性试验,对煤砂双层滤料滤池的气水反冲洗、表面助冲和单纯水洗进行技术经济分析。表面助冲使双层滤料滤池的煤层得到有效的冲洗,对容易积泥的煤砂混层的冲洗效果不够理想。气水反冲洗能充分清洗整个滤层,使滤池的初始过滤水头损失减少26%,运行周期平均延长3h,周期产水量增加12.76%,生产率提高1.21%,洗水率降低50.3%。和其他两种方法相比,它的冲洗耗水量和能耗量小,表面助冲次之。气水反冲洗和单纯水洗相比可节省冲洗水电费54%。陈冬毅^[22]对月浦水厂气水反冲洗滤池设计参数和运行情况进行了系统的追踪分析,旨在优化气水反冲洗滤池的运行以提高水质和节约能耗,同时为今后气水反冲洗滤池的设计和运行管理提供借鉴。在试验的基础上,唐友尧^[23]建立了滤池过滤水头与出水浊度的数学模式,并求得满足水质要求的最大过滤水头损失值,从而求得过滤周期。

给水厂的清水池具有蓄存调节水量和满足氯化消毒接触时间的作用,以往设计从容量方面考虑较多,而很少注意抬高池内水位的节能效果。长沙市第八水厂的清水池设计采用异水位,以抬高池内水位使清水池具有水量调蓄和抬高水位双重作用,节能效果显著^[24]。

在对整个给水处理系统优化方面,田一梅、张宏伟^[25]根据试验,对水处理系统各单元处理过程的模拟仿真进行研究。首先在深入分析处理过程的基础上,结合系统运行的状态模拟与优化控制,选择了表征系统的特征参数;其次,采用统计回归方法,建立了既反映处理过程内在规律,又容易求解的混凝、沉淀、过滤等一系列数学模型;最后建立了相应的软件系统。崔福义、石明岩^[26]通过宾县水厂生产性实验,对水处理系统运行工况与费用的基本关系进行了研究,证明了最经济沉淀水浊度这一概念的存在。他们通过试验确定了原水水质一定时,沉淀水浊度与投药量,单位排泥水量以及滤池反冲洗水量的关系,继而提出最经济沉淀水浊度的概念。试验证明,虽然该浊度值同原水水质条件相关,但在原水变化不大时,在生产上实现高效经济运行是可能的。

4 节能研究的主要发展趋势

纵观国内外研究现状,节能研究局限于某个环节,缺乏对城镇给水处理厂典型工艺中各单元能耗的全面研究,缺乏能量分析手段和评价方法,因此热力学等相关学科的理论和方法的引入势在必行,新的节能材料、设备和技术的开发利用是未来发展的趋势。可以预见只有建立较为完善的理论和开发新的节能设备和技术,才能从根本上解决在节能研究和应用中存在的问题,更好地推动我国给水处理厂节能技术的发展。

参考文献

- 1 中国统计年鉴 2002. 北京:中国计划出版社,2003
- 2 Lindell E Ormsbee. Optimal control of water supply pumping systems. Water Resour Planning and Mgmt, ASCE, 1994, 2:237~240
- 3 Timothy D Hirrel. System curves and pump selection. AWWA, 1989, 7:67~72
- 4 B Ulanicki, J P Rance. Computer-aided optimal pump selection for water distribution network. J Water Resour Planning and Mgmt. ASCE, 1993, 5:542
- 5 Lindell E Ormsbee. Optimal control of water supply pumping systems. AWWA, 1989, 1:30~34
- 6 Nopmongtol. Multi-level incremental dynamic programming. Water Resources Research, 1976, 12(6):610~615
- 7 Howson H R. A new algorithm for the solution of multistate dynamic programming programs. Math Programing, 1975, 8(1):136~141
- 8 Bellman R E. Adaptive control process: A guided tour. Princeton: Princeton Univ Press, 1961
- 9 Thomas M Walski. Tips for saving energy in pumping operations. AWWA, 1993, 7:49~53
- 10 Harish Arora, Mark W LeChevallier. Energy management opportunities. AWWA, 1998, 2:40~51
- 11 汪光焘. 城市供水行业 2000 年技术进步发展规划. 北京:中国建筑工业出版社, 1993
- 12 Pelli T, Hitz H U. Energy indicators and savings in water supply. AWWA, 2000, 6:55~62
- 13 钟淳昌. 降低净水系统能耗的措施. 中国给水排水, 1991, 7(7):43~48
- 14 赵树君. 涡旋混凝低脉动沉淀技术用于水厂改造. 中国给水排水, 1998, 14(5):44~46
- 15 李镜明. 机械絮凝池 G 值分布的研究. 中国给水排水, 1990, 6(1):4~7
- 16 黄其龙. 絮凝池能耗分配的数学模型研究. 武汉工业大学学报, 1990, (3):43~51
- 17 武道吉. 水处理絮凝工艺的优化设计和运行. 中国给水排水, 2002, 18(1):61~64
- 18 城市给水净化技术经验. 北京:中国建筑工业出版社, 1978
- 19 田一梅. 滤池运行优化的对比研究. 中国给水排水, 2002, 18(7):51~53
- 20 景有海. 均质滤料过滤过程的水头损失计算模式. 中国给水排水, 2000, 16(2):9~12
- 21 邓彩玲. 煤砂双层滤料滤池冲洗方式比较. 给水排水, 1997, 23(5):20~22
- 22 陈冬毅. 气水反冲洗滤池的优化运行. 中国给水排水, 2001, 27(4):55~58
- 23 唐友尧. 一种合理确定滤池过滤周期的方法. 给水排水, 2001, 27(7):30~33
- 24 罗惠云. 大中型水厂清水池的节能设计. 中国给水排水, 2002, 18(4):65~66
- 25 田一梅, 张宏伟. 水处理系统运行状态数学模拟的研究. 中国给水排水, 1998, 14(4):10~13
- 26 崔福义, 石明岩. 宾县水厂处理系统的优化运行研究. 中国给水排水, 2000, 16(7):8~10

©E-mail: WPU2120@sina.com

收稿日期:2004-07-01