



流动电流混凝控制技术在我国的 application 与发展十年回顾

崔福义 李圭白

摘 要: 本文对近 10 年来我国流动电流技术在水处理混凝投药控制领域的研究与应用情况进行了简要的回顾, 并就应用中的一些技术要点进行了概括与总结。

关键词: 流动电流; 混凝; 控制

<>1. 概述

流动电流是胶体的电动现象之一, 是指在机械力作用下, 胶体双电层中扩散层的反电荷离子定向迁移而产生电场的现象。流动电流可以描述水中胶体杂质的荷电特征, 作为表征胶体稳定性的指标, 因此将之应用于以电中和脱稳凝聚为主的水处理混凝过程控制是可能的。一系列的研究证实, 投药混凝后水中胶体的流动电流值确实与混凝剂投量以及经混凝沉淀处理后水的浊度相关^[1], 这为以流动电流为参数进行混凝控制提供了直接的依据。

国外在 60 年代中期制成了在线式流动电流检测器, 随后经过一系列改进, 于 80 年代初开始在水处理混凝控制领域实现生产应用。

我国自 1989 年发表第一篇有关论文起^[2], 对流动电流混凝控制技术的研究与应用也有近 10 年的历史了。近 10 年来, 我国在流动电流的基本理论、工艺技术研究、专用设备国产化开发、应用推广等方面, 都取得了十分显著的进展, 特别是在应用技术方面取得了丰硕的成果, 使得该项技术的应用日益广泛而普及。流动电流技术已被列入我国“城市供水行业 2000 年技术进步发展规划”^[3], 成为水处理混凝控制的主导技术之一。

本文拟就我国近 10 年来在此领域的主要进展进行简要回顾与总结。

2. 基本发展历程

2.1 起步阶段——引进设备的首次应用

1989 年, 崔福义发表了国内第一篇流动电流用于水处理混凝控制方面的研究论文, 介绍了他在国外进行的有关中试研究情况, 从而开始了我国的流动电流投药混凝控制技术研究。

最初的应用研究由哈尔滨建筑工程学院(哈尔滨建筑大学前身)分别同杭州自来水公司、大庆供水公司合作进行。流动电流检测器由美国进口, 控制部分以 80286 长城微机为主构成, 采用流动电流单参数简单反馈控制系统, 基本上沿用了国外的控制方案(图 1)。控制模式为周期控制。经过近 2 年的研究与调试, 这两项应用成果于 1991 年先后通过技术鉴定, 流动电流混凝控制技术在我国的首次应用成功, 我国成为应用该技术的第 6 个国家^[4-5]。

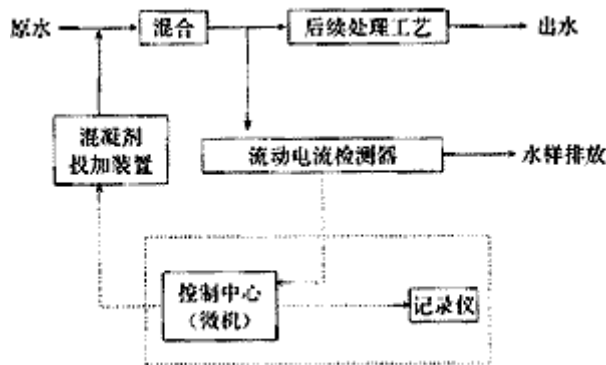


图1 流动电流单参数控制系统

由于当时引进的检测器属初级产品, 控制部分的普通微机连续运行也存在一些问题, 因此这两套设备运行几年后已逐步被新型产品更换。但首次应用所取得的开创性成果, 为后续研究奠定了基础, 意义是很

大的。

2.2 国产设备的开发研制

在研究中越来越深地感受到,流动电流检测器是该技术的核心设备,单纯依赖进口问题较多,包括引进的设备在性能方面不能完全适应中国的水质、处理工艺特点;在维修、技术服务方面难以配套;价格较高等。这些因素都在一定程度上制约了流动电流技术的应用推广。因此在引进设备进行生产应用研究的同时,国产设备的开发研制也列入了工作日程。哈尔滨建筑工程学院的研究人员经过3年的努力,终于解决了一系列难题,于1992年研制成功了国产第一台流动电流检测器,并在牡丹江四水厂试用成功^[6],取得良好的效果,我国由此成为国际上制造该种仪器的第三个国家。

此外,在配套仪器设备的研制方面也取得了重要进展。研制成功了专用的测控仪,采用PID算法进行调节控制,调控效果好,仪器稳定可靠;研制成功了专用的变频调速设备,可以根据控制系统的指令,调节投药泵的转速,改变投药量。至此,全部国产化的混凝投药控制系统已经配套形成,达到了国际上的先进水平。

2.3 设备的改进与发展

在应用中,对仪器的设计、加工也在不断的改进完善,迄今已形成了流动电流混凝投药控制设备产品系列,不仅可以进行简单的生产过程监测(SC-2000型)或单参数的简单控制(SC-3000型),也可以适应某些水厂的特殊需要,增加浊度反馈部分,进行双参数的复合控制,使系统的工作更加可靠(SC-4000型)^[7]。SC-4000型流动电流控制系统在国际上是一个首创,其控制系统见图2。首台SC-4000型控制系统已于1994年在沈阳第八水厂试用成功,随后又在武汉、黄石、荆沙、昆明、成都等地获得成功应用。

2.4 基础理论研究及工艺技术体系的形成

与生产应用、设备开发同步,流动电流及其在混凝控制中应用的基本工艺理论和工艺技术研究也在持续地进行。这些研究为应用研究提供理论依据,并不断解决应用研究中提出的新问题。这些研究包括:流动电流基本理论研究,流动电流检测技术研究,流动电流与混凝过程的相关性及相关规律研究,流动电流混凝控制工艺研究,流动电流技术的适用性研究,流动电流系统的设计、配套、调试技术研究,等等。这些研究取得了一系列的成果,为大规模生产应用进行了技术准备。科研与生产相结合,逐渐形成了有中国特色的流动电流混凝控制工艺技术体系^[1]。



图2 SC-4000型复合控制系统

2.5 大规模推广应用

随着国产设备的开发成功与不断完善、流动电流投药混凝控制工艺技术的日臻成熟,自1994年起,流动电流技术逐渐在国内水厂进入大规模的应用阶段。迄今已有愈百台国产设备在全国各地水厂应用,其范围覆盖了全国大部分省市自治区。同时,还有一些水厂从国外进口了相当数量的同类设备。对于这样一种国内许多人尚不熟悉的高新技术产品,应用中所能提供的技术支持、技术服务等十分重要。采用国产设备在这方面具有明显的优势。而且国产设备是专门针对我国的水源水质、水处理工艺及应用条件进行研究设计的,因此绝大多数国产设备都获得了良好的使用效果,取得显著的社会效益和经济效益。

大规模的生产应用也在不断丰富完善着流动电流技术体系,取得的成果不断扩大,应用技术达到了规范化,在运行技术方面积累了丰富的经验,在效益分析方面也取得了大量的数据。

3.对水质的适应性

我国地域辽阔，水源水质复杂多变。特别是有些地表水流域地区存在地表覆盖不好、水土流失严重、环境污染等问题，水质状况不好，受环境因素(如风、雨等气候条件)影响很大，水质常有大而急剧的波动。原水水质条件较许多西方国家要恶劣得多，因而使水处理混凝投药自动控制系统的应用具有更大的难度，对控制技术与设备的性能也提出了更高的要求。国产设备成功地迎接了挑战，表 1、2 列出了在 1996 年对国产设备部分用户进行的调查结果。现就几种典型的水质条件分述如下。

3.1 水源种类

已应用的水源种类包括江、河、水库、湖泊等多类地表水源。从统计结果上看，在各类水源水质中的应用都是成功的(个别特殊水质例外，后面还将提及)。

3.2 原水浊度

应用中涉及的原水浊度在 3.0~4500 度之间。其中有的水厂原水浊度不仅变幅大，而且变化快。如牡丹江四水厂，在一小时之内的浊度变幅达上千度。原水浊度高时，给应用带来一定的困难，主要是易于对取样、检测系统造成堵塞、干扰等，需采取适当的预处理措施，必须加强清洗维护，并且在流动电流检测器的构造上加以改进。实践证明，在上述原水浊度变幅内，国产设备可以满足使用要求。同时也注意到，在浊度变化幅度大的条件下，以 SC-4000 型的效果更为理想。

表 1 部分国产设备用户原水水质调查表

用户的地理位置	用户的水源类型	使用期间的原水水质特征值	
东北、华北地区	江 水	浊度/度	11.0~4500.0
		pH 值	6.4~7.2
		高锰酸盐指数(最大)/mg/L	25.4
	水库水	浊度/度	4.0~1800
		pH 值	6.7~8.5
		高锰酸盐指数(最大)/mg/L	11.6
华东、中南、西南地区	江 水	浊度/度	5.1~2300
		pH 值	6.5~7.9
		高锰酸盐指数(最大)/mg/L	14.5
	湖泊、水库水	浊度/度	3.0~1700
		pH 值	6.5~7.5
		藻类含量(最大)/个/L	1.3 亿

3.3 藻类

研究表明，在水中含有大量藻类的情况下，流动电流仍随混凝剂量的变化有相应的响应，二者存在相关性。

许多南方水源水中含藻问题普遍，如深圳沙湾水厂，原水取自深圳水库，最高浊度仅有 60 度，含藻量最多可达 1.3 亿个/升。这种低浊、高藻的原水水质，给水处理及过程控制带来非常大的困难。而自从该厂使用国产流动电流自动投药设备后，不仅提高了水质保证率，而且可以节约 28.6%。类似的还有深圳龙岗水厂、武汉东湖水厂、昆明三水厂等，都是典型的高含藻水，应用国产流动电流设备都取得了良好效益。

表 2 部分国产设备用户设备使用情况调查表

指标	评价			
	优秀	良好	好	差
操作易掌握情况	16	2		
取样系统可靠性	12	6		
检测系统可靠性	14	4		
控制效果	14	4		
易于维护情况	11	5		2

说明：表中的数字为相应评价的水厂数；收到回函总数为 18 家水厂。

3.4 有机污染物

有机污染物会对流动电流系统造成干扰。主要表现在：(1)有机物改变了水中胶体的表面特性，产生胶体保护现象；当有机物浓度较高时，电中和脱稳凝聚作用弱化，流动电流技术失去依据；(2)有机物对流动电流的检测造成干扰，它可能改变检测器探头的表面特性，对探头造成污染，使测定值发生偏差。对此专门进行的实验研究证明，在水中高锰酸盐指数不超过 10~20mg/L 时，随有机物浓度的升高，虽然检测、控制的灵敏度下降，控制设定值有所升高，但仍能进行有效控制。通常给水水源中有机污染物浓度超过上述数值的情况很少，况且对一个特定的水厂，原水中的有机物浓度一般变幅不大，因此对仪器的灵敏度加以适当调整补偿，控制系统可以正常工作。实际应用也证实了这一点。

3.5 其他物质

应用水厂的原水 pH 值在 6.4~8.5 的范围内，控制系统工作正常。虽然 pH 值的变化会对系统设定值产生影响，但对于一个特定的水源，其 pH 值是很少变化的，因此等于 pH 值事实上对控制系统工作无影响。

油类物质对流动电流检测可造成干扰，主要是能沾污检测器的探头，妨碍正常测定、导致检测灵敏度下降；油类物质还同有机物一样，改变胶体杂质的混凝特性。实验室研究表明，在含油量不超过 5~20mg/L 情况下，流动电流技术可以应用，对此还需在实践中进一步进行验证。各种表面活性剂都会对流动电流的检测造成干扰，硫化氢的存在也对检测有干扰。

应用中发现，水中干扰物质浓度不稳定造成的影响最大。如某水厂水源上游有工厂排放含油类污染物质，排放是不连续的，以夜间排污为主，其时原水中含油量上升，导致该厂流动电流控制系统夜间灵敏度下降，控制失效，白天将探头清洗去除油污后，工作正常。

未发现水中的各种无机离子成分对流动电流控制系统有明显干扰。虽然这些物质的浓度变化较大时会改变流动电流设定值，但对于特定的原水而言，一般其浓度是较为稳定的，因此不会影响控制系统工作。

4.对混凝剂的适应性

从流动电流混凝投药控制的原理出发，凡属电解质类混凝剂，如硫酸铝、三氯化铁、聚合铝、聚合铁等，其混凝过程以胶体电中和脱稳凝聚为主，该技术即是适用的。在实践中，混凝剂多属此类。以铝盐为混凝剂的水厂较多，国产设备应用的效果普遍良好。采用铁盐为混凝剂的水厂以河南新乡一水厂为典型，其水源是黄河水，经水库预沉后年最高浊度为 300 多度，最低 10 几度，由于受造纸厂废水污染，氨氮经常超过 5mg/L。在应用中，对水样进行一定的前处理，解决了铁盐中的铁质在检测器上沉积的问题，得到了较高的灵敏度，出厂水浊度合格率提高了近 20 个百分点，节药率达到 20%以上。

流动电流检测器对混凝剂浓度有检出极限。据研究，该检出极限同水中浊度有关，还与混凝剂种类有关。在常规条件下，该检出极限所包含的有效检测范围在几个至几百毫克/升之间(商品重量，后同)。这一范围覆盖了实际生产中可能的混凝剂投加量。

有些水厂使用的混凝剂质量不稳定，有效成分浓度或聚合度常有变化。在常规投药控制方式下，这一现象会产生问题。但流动电流技术是以水中胶体脱稳程度为标准，而无须控制混凝剂总量或有效成分含量，



这是该技术的一个重要优点。应用中还发现,有的水厂因故连续向溶液池内放水。这实际上相当于混凝剂浓度不断降低的变浓度投药过程,这时常规投药是难以使混凝工况稳定的,而流动电流技术却很好地发挥了作用,随着混凝剂浓度的下降,控制系统不断地增加混凝剂体积流量,从而保持流动电流检测值的稳定,相应地沉淀后水的浊度也保持稳定。因此,也正是流动电流这一控制技术解决了上述的生产实际问题,实现了准确控制投药。

近年,有些水厂应用了无机盐与有机高分子复合混凝剂。此种混凝剂中的有机高分子添加量虽不多,但它的存在降低了流动电流检测器的灵敏度,在此情况下不宜采用该技术。

5.对水处理工艺的适用性

5.1 对水处理工艺系统的适应性

型的水处理工艺由混合、反应、沉淀、过滤等环节组成。流动电流技术主要都是应用于该工艺条件下,以保证沉淀水浊度稳定于某一目标值为目的。大量的应用实例证明,流动电流技术完全适合于这种工艺条件。此外,流动电流控制技术在混合-澄清池-过滤池工艺中也得到成功应用。

在一些特殊水质条件下,例如处理含藻水或低浊水,有的水厂采用混凝-气浮-过滤工艺,应用流动电流技术控制投药,也取得了良好效果。昆明五水厂即是一例。

在直接过滤工艺中,目前国内尚无流动电流技术应用实例。从直接过滤原理来看,其过滤效能更加依赖于水中胶体杂质的表面荷电特性,因此改变胶体的表面特性是该处理工艺投药混凝的基本目的。这一工艺原理恰好与流动电流混凝控制原理相符合。在实践方面,国外的有些水厂就是在直接过滤工艺中以流动电流技术控制混凝投药,皆获得成功。在国内,还需对该类应用的效能进一步加以探讨。

5.2 对混合设施的要求

通常,流动电流检测器的取样点设于投药混合之后。为了保证控制的有效性,要求充分混合而时间又不应过长,宜采取快速混合形式。

5.3 对投药设备与调节形式的要求

常规的投药设备有重力式投加和水泵投加两类。

重力式投加系统采用阀门调节方式,由于阀门规格、质量等问题,至今尚无成功的先例。

采用水泵变速调节能取得满意的效果。对离心泵采用变频调速调节时,需掌握好离心泵的工作条件,否则将使调节精度大为降低。采用离心泵,系统的投资较小,但控制的精度、稳定性等都不如计量泵。计量泵应是投药的首选设备。对计量泵还可采用变频调速与调行程的双调节方式,但这种方式投资较大。

5.4 对水量及其水量变化的适应性

在国产设备的应用实践中,应用水厂规模由几千 m^3/d 到上百万 m^3/d 不等,表明该技术对各种规模的水厂都是适用的。

水量的变化会反映到控制系统中,表现为流动电流值的变化。一般当流量的瞬时变化不很大时,凭流动电流单一因子就可有效地进行投药量调节,对此已有许多应用实例。有的流量变幅达48%,仍实现了有效的控制^[1]。当然,在有条件时,在控制系统中增加流量参数应能取得更为稳定迅速的控制效果。

还应注意,流量的变化即处理系统负荷的变化,即使在混凝剂单耗(相应地流动电流值)不变的情况下,有时沉淀后水的浊度也会变化,这就要求调整混凝剂单耗,也就是流动电流设定值应有相应的调整。对此单纯靠增加流量检测是不易解决的。在流量变化较大的情况下,若对出水稳定性要求较高,宜采用SC-4000型设备。如镇江金山水厂,水量变化最大可达50%~66.7%,采用SC-4000型设备,其沉后水浊度波动仅为1.0NTU左右,药量调节及时,水质合格率达100%。

6.控制系统设计与运行管理中的若干问题

流动电流混凝投药控制系统能否正常工作,不仅取决于设备本身的质量,还依赖于全系统的正确设计与正确使用维护。

6.1 取样系统的设计



正确取样是进行正常控制的前提。对水样的基本要求是：（1）对整体有良好的代表性。取样前，混凝剂与原水已经充分混合；取样口应位于水流横断面的合理位置上。（2）不应含有对测定造成干扰的物质，如大量粗大的泥沙、漂浮性杂质、气体等；不应形成大的絮凝体。（3）水样流量应稳定，不中断。相应地，在取样系统的设计上，应注意：（1）取样位置适当，取样口形状设计合理。（2）尽量减少取样系统的时间滞后，取样管路不应太长，管径不应过大。（3）防止取样系统堵塞。（4）对水样预处理。（5）尽量用重力式自流取样，只在确有必要时才采用取样泵。（6）取样系统应有冲洗装置。

遵循上述原则，就可保证取样系统正常工作，这已在大量的应用实践中得到证明。

6.2 水样的预处理

水样预处理装置应能去除测定干扰物质，并能连续工作，保证检测器不中断工作。一般要求有除沙、排气、拦截漂浮物等功能。良好的预处理装置可以对检测器起到保护作用，延长其使用寿命、减少维护工作。哈尔滨建筑大学开发研制的预处理装置已定型化，使用效果良好。

6.3 控制系统设计、安装与调试

流动电流混凝控制系统的设计、安装与调试是应用技术中最主要的内容之一，是稳定正常运行的基础。系统的设计应统筹考虑，既要保证系统的可靠性、灵敏性，又要照顾到维护、管理的方便性，各水厂的实际情况不同，其设计形式也各有千秋。控制系统能否及时跟踪水质、水量等因素的变化、保证水处理工况稳定，在很大程度上取决于工作参数是否合适。有些用户发现流动电流测量值不稳定、控制系统反应迟钝或波动较大等现象，相当一部分都是由于设计、安装或调试问题造成的。此方面成功与失败的实例都很多。

6.4 运行中的维护管理

6.4.1 设定值的变化

流动电流是一个相对值。流动电流设定值一般根据对沉淀水浊度的要求确定，其正确与否关系到控制的结果。在运行中，流动电流设定值是可能发生变化的。其原因有如下两类：（1）水质、水理工况等发生大的变化，如流量的很大变化、水温大的变化等，都会使工艺系统的处理能力变化，需要通过调整设定值来加强混凝或减弱混凝（加大或减少混凝剂单耗）；（2）流动电流检测器在使用过程中的磨损、脏污等，会使检测信号发生漂移、波动或灵敏度降低。

6.4.2 设定值的调整与检测器维护

针对设定值变化的前一种原因，应在使用中加强观察，必要时人工更改设定值或采用 SC-4000 型设备。对后一种原因，应考虑加强维护工作，如坚持对检测器探头定期清洗、强化水样预处理、必要时更换检测器探头。对探头的清洗，一般可以用清水，严重污染时用生产厂家指定的洗液。不可乱用洗液，否则将损坏探头。

7. 技术经济分析

据对用户的调查，使用流动电流技术进行投药混凝控制，除了具有投资小、设备少、使用方便灵活等特点外，在保证处理水质、减少混凝剂消耗方面的效益也是明显的。仍以前述 18 个国产设备用户的调查统计结果为例。

在保证水质方面，沉淀水浊度合格率平均提高了 9.5 个百分点。在节药方面，平均节约 26.1%。由于成套控制设备的投资与相应水处理系统的规模关系不大，所以水处理系统规模越大、控制设备的投资效益越好，投资回收期越短。例如，按上述平均数据测算，一套 10 万吨/日的水处理系统，年节约药费 18.55 万元，采用国产设备（SC-3000 型）相应的投资约 12 万元，即投资回收期约 0.65 年。

参考文献

1. 崔福义，李圭白著，《流动电流及其在混凝控制中的应用》，黑龙江科学技术出版社，第一版，1995 年。
2. 陈卫、崔福义、曲久辉，流动电流及其技术的研究与发展（上），《中国给水排水》，10（3），4-8，1994 年。



- 3.陈卫、崔福义、曲久辉, 流动电流及其技术的研究与发展(下), 《中国给水排水》, 10(5), 15-17, 1994年。
- 4.崔福义, 混凝剂投加的优化自动控制--检测器法的试验研究, 《给水排水》, (3), 2-8, 1989年。
- 5.汪光焘主编, 《城市供水行业2000年技术进步发展规划》, 中国建筑工业出版社, 1993年。
- 6.崔福义、洪觉民、李圭白、陈保华, 流动电流单因子凝聚投药自动控制生产性试验研究, 《给水排水》, (5), 2-6、46。崔福义、李圭白、曲久辉, 1991年, 流动电流的原理、测定与应用, 《给水排水》, (4), 45-50, 1991年。
- 7.崔福义、李圭白、柏蔚华、范翠玲, 流动电流混凝投药控制技术中的应用, 《中国给水排水》, 8(5), 16-19, 1992年。
- 8.曲久辉、崔福义、李虹、王福珍, 新型流体电荷传感器的研究与应用, 《哈尔滨工业大学学报》, 26(2), 89-92, 1994年。
- 9.崔福义、曲久辉、李虹、李圭白, 国产流动电流投药控制系统的基本性能与应用评价, 《给水排水》, 20(8), 42-47, 1994年。
- 10.崔福义、陈卫、李虹, 流动电流串级投药控制系统的特性评价, 《中国给水排水》, 11(2), 30-33, 1995年。
- 11.杨万东、李虹、姚启义、李圭白, 流动电流串级调节投药控制技术的生产试验, 《中国给水排水》, 12(5), 14-16, 1996年。
- 12.崔福义、李圭白, 流动电流法混凝控制技术, 《中国给水排水》, 7(6), 36-40, 1991年。
- 13.CUI Fuyi、QU Jiuhui、YANG Wandong and LI Guibai, Effective detection range of SCD and its applicability for coagulant dosage control, Proceedings of ISSE, 256-262, 1992年。
- 14.曲久辉、李圭白、崔福义、李虹, 流动电流检测器的检测机理及其数学模式——SCD混凝投药控制系统相关因素研究(I), 《哈尔滨建筑工程学院学报》, 26(5), 61-67, 1993年。
- 15.曲久辉、崔福义、李虹、李圭白, 水中胶体电荷的流动电流检测原理及其应用, 《黑龙江省石油化工学术文萃》, 黑龙江科技出版社, 1993年。
- 16.曲久辉、崔福义、李虹、李圭白, 水处理协同平衡过程的流动电流变化特征, 《黑龙江省石油化工学术文萃》, 黑龙江科技出版社, 193-194, 1993年。
- 17.曲久辉、李圭白、崔福义, 流动电流的基本特征——SCD混凝投药控制系统相关因素研究(II), 《哈尔滨建筑工程学院学报》, 27(2), 50-55, 1994年。
- 18.曲久辉、崔福义、李虹、王福珍, 流动电流与z电位相关模式研究, 《哈尔滨工业大学学报》, 26(1), 63-67, 1994年。
- 19.曲久辉、崔福义、李虹, 流动电流混凝投药控制系统的适用条件, 《中国给水排水》, 11(3), 18-21, 1995年。
- 20.崔福义、李圭白, 离心式投药泵的变频调速调节, 《给水排水》, 21(1), 39-43, 1995年。
- 21.杨振海、邹志红、崔福义, 流动电流的非正弦特性, 《中国给水排水》, 12(4), 37-39, 1996年。
- 22.杨万东、杨振海、李虹、崔福义, 流动电流检测器取样流量的分析与研究, 《哈尔滨建筑大学学报》, 29(4), 52-56, 1996年。
- 23.崔福义、张燕, 生活有机污染物对流动电流特性的影响研究, 《哈尔滨建筑大学学报》, 29(5), 68-72, 1996年。
- 24.曲久辉、李圭白、崔福义, 单因子水处理混凝投药在线监控系统的设计原则与综合性能研究, 《工业水处理》, 16(3), 22-24, 21, 1996年。
- 25.曲久辉、崔福义、李圭白, 混凝剂的水溶液形态与流动电流的相关特性分析, 《环境科学学报》, 16(2), 167-172, 1996年。