

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 7 月 2 日 (02.07.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/133611 A1

(51) 国际专利分类号:
C02F 9/06 (2006.01) C02F 101/20 (2006.01)
G06F 17/50 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/072269

(22) 国际申请日: 2019 年 1 月 18 日 (18.01.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201811622305.0 2018 年 12 月 28 日 (28.12.2018) CN

(71) 申请人: 中南大学 (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国湖南省长沙麓山南路 932 号, Hunan 410083 (CN)。

(72) 发明人: 阳春华 (YANG, ChunHua); 中国湖南省长沙麓山南路 932 号民主楼, Hunan 410083 (CN)。

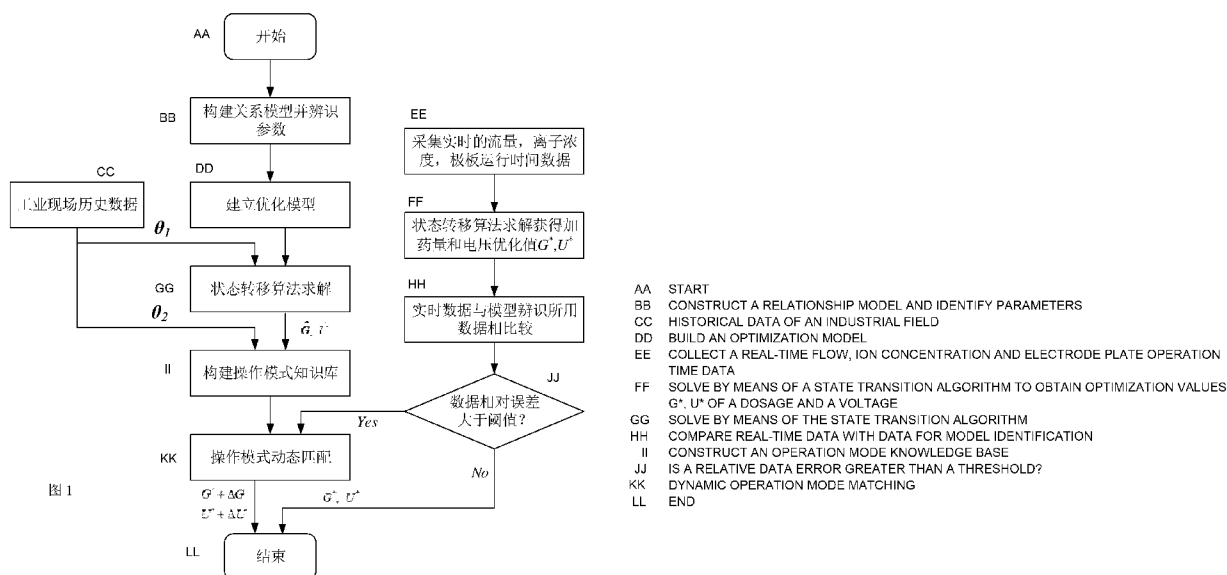
张凤雪 (ZHANG, FengXue); 中国湖南省长沙麓山南路 932 号民主楼, Hunan 410083 (CN)。朱红求 (ZHU, HongQiu); 中国湖南省长沙麓山南路 932 号民主楼, Hunan 410083 (CN)。李勇刚 (LI, YongGang); 中国湖南省长沙麓山南路 932 号民主楼, Hunan 410083 (CN)。李文婷 (LI, WenTing); 中国湖南省长沙麓山南路 932 号民主楼, Hunan 410083 (CN)。蒋晓云 (JIANG, XiaoYun); 中国湖南省长沙麓山南路 932 号民主楼, Hunan 410083 (CN)。

(74) 代理人: 长沙市融智专利事务所 (CHANGSHA RONG ZHI PATENT AGENCY); 中国湖南省长沙雨花区人民中路 308 号, Hunan 410011 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,

(54) Title: HEAVY METAL WASTEWATER PURIFICATION CONTROL METHOD BASED ON DYNAMIC OPERATION MODE MATCHING

(54) 发明名称: 一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法



(57) Abstract: A heavy metal wastewater purification control method based on dynamic operation mode matching. The method comprises: constructing relationship models for a heavy metal ion concentration and a dosage and a cell voltage during a neutralization and sedimentation process and an electrochemical process; with dosage and power consumption minimization as the objective, constructing a multi-objective coordination and optimization model; constructing an operation mode knowledge base; using the multi-objective coordination and optimization model to obtain optimization values of the dosage and the cell voltage under real-time input conditions; determining whether operation matching is required; and if matching is required, matching operation modes in the operation mode knowledge base to acquire coordination values of the dosage and the cell voltage and adjusting the optimization values to obtain control values of the dosage and the cell voltage, and if matching is not required, taking the optimization values of the dosage and the cell voltage as the control values and performing controlling and adjustment. By means of the method, more rational and accurate values of

CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

a dosage and a voltage can be determined, and the high energy consumption and high material consumption caused by manual addition can be avoided.

(57) 摘要: 一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法, 包括: 构建中和沉淀过程、电化学过程中重金属离子浓度与加药量、槽电压的关系模型; 以加药量和电耗最小为目标构建多目标协调优化模型; 构建操作模式知识库; 以及利用目标协调优化模型得到实时输入条件下加药量、槽电压的优化值; 并判断是否需要进行操作匹配; 若需要匹配, 则匹配操作模式知识库中的操作模式获取加药量、槽电压协调值并调节优化值得到加药量和槽电压的控制值, 若不需要匹配, 将加药量、槽电压的优化值作为控制值并进行控制调节。通过该方法可以更合理和准确的加药量与电压值, 避免人工添加而造成的高能耗、高物耗。

一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法

技术领域

本发明属于废水处理过程优化与控制技术领域，具体涉及一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法。

背景技术

有色金属工业废水是我国主要的重金属污染源，对环境保护与人类生命安全造成重大威胁。因此，我国对重金属废水的稳定达标排放有着严格的要求。中和沉淀-电化学废水处理过程是一种大规模深度处理重金属废水的有效方法。中和沉淀过程的预处理效果可实现废水的大规模净化，满足我国有色金属企业大流量废水的处理需求；电化学过程通过电极反应和离子迁移可实现重金属的深度净化，且无需添加药剂，避免了二次污染，是一种绿色净水技术。

中和沉淀过程和电化学过程通常利用添加药剂和改变电压来实现重金属离子的去除。因此，药剂的添加量和电压设定量是废水处理过程的最为关键的控制参数，其控制精准度不仅直接影响着出口废水能否稳定地达标排放，还与企业的经济效益息息相关。加药量过多，电压调节过高，造成药剂和电能的浪费，增大了废水处理过程的生产成本；而加药量过少，电压过低，则造成出口废水中的重金属离子无法稳定达标。

重金属废水实际处理过程中，操作人员根据入口流量和浓度凭经验调节加药量和电压。但废水来源广、水质水量波动大而造成工况波动大，且吸附反应与电化学反应机理复杂且关联耦合，造成操作人员难以及时正确地确定药剂剂量与电压值，无法实现两种工序协调配合完成重金属的稳定去除。不合理的药剂添加和电压设定，使得出口重金属离子波动较大，甚至无法及时排放需二次处理，造成了资源和人工的浪费。

因此，分析出口重金属离子浓度与加药量和电压的关系，研究药耗与电耗的优化方法，且在工况波动下实时确定最优加药量与电压设定值，对于废水稳定达标排放，降低企业资源浪费具有极其重要的意义。

发明内容

本发明的目的是提供一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法，用于确定重金属废水处理过程中更合理和准确的加药量与电压值，避免人工添加、调节而造成的高能耗、高物耗，以及处理后的废水不能稳定达标的问题。

本发明提供的一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法，包括如下步骤：

S1：分别构建中和沉淀过程中重金属离子浓度与加药量、电化学过程中重金属离子浓度与槽电压的关系模型，并基于历史数据进行关系模型的参数辨识；

所述重金属离子浓度与加药量的关系模型用于表示沉淀反应池中沉淀反应池出口重金属离子浓度与加药量的关系；所述重金属离子浓度与槽电压关系模型用于表示电解槽中电解槽出口重金属离子浓度与槽电压的关系；

S2：将加药量和电耗最小以及出口重金属离子浓度达标设定为优化目标并构建多目标协调优化模型；

其中，重金属废水净化过程为先进行沉淀反应后进行电化学反应，所述出口重金属离子浓度达标表示电解槽出口重金属离子浓度小于或等于预设的可排放重金属离子浓度上限值；所述电耗表示在电解槽内电化学反应消耗的电能，所述电耗与槽电压相关；

S3：定义输入条件和操作参数并基于历史数据中各个输入条件对应的操作参数构建操作模式知识库；

其中，输入条件包括中和沉淀过程废水流量，沉淀反应池入口重金属离子浓度以及电解槽运行时间；所述操作参数包括加药量协调值和槽电压协调值，所述加药量协调值、槽电压协调值分别为：同一输入条件下历史数据中加药量、槽电压的实际操作值与利用所述多目标协调优化模型得到的加药量、槽电压的优化值之差；

一个输入条件及其操作参数构成一个操作模式，所述操作模式知识库包括各类输入条件下的最优操作模式，所述最优操作模式为同一输入条件下加药量协调值和槽电压协调值最小的操作模式；

S4：获取现场实时输入条件，并将实时输入条件代入步骤 S2 中所述多目标协调优化模型得到实时输入条件下对应加药量、槽电压的优化值；

S5：根据实时输入条件判断是否需要进行操作匹配；

若需要，则根据实时输入条件匹配操作模式知识库中的操作模式获取实时输入条件匹配的操作参数，再依据获取的操作参数调节实时输入条件下加药量、槽电压的优化值得到加药量、槽电压的控制值并进行控制调节；

其中，依次计算实时输入条件下与操作模式知识库中各类输入条件的最优操作模式的相似度，并选取相似度最小的最优操作模式的操作参数作为实时输入条件匹配的操作参数；

若不需要，将实时输入条件下的加药量、槽电压的优化值作为加药量、槽电压的控制值并进行控制调节。

本发明以中和沉淀过程与电化学反应过程的机理模型为基础构建了重金属离子浓度与加药量、槽电压的关系模型，从反应机理推导了其理论关系模型，再基于运行的历史数据对关系模型的参数进行辨识得到完整的关系模型；再基于实际需求将加药量和电耗作为优化目标构建了多目标协调优化模型，而基于此多目标协调优化模型可以得到实时输入条件下的加药量、槽

电压的优化值，解决了因人工经验操作造成药耗和电耗浪费的问题。本发明进一步的基于历史数据和优化值构建了操作模式知识库，提出了操作模式动态匹配的方法得到实时输入条件下加药量、槽电压的协调值并调节优化值，解决了因入口工况波动造成的出口重金属离子波动较大，出口废水品质不稳定等问题。这是由于构建关系模型并进行参数辨识的使用的历史数据的工况与当前实时工况可能存在较大波动，因此得到的当前实时输入条件下的优化值还需要进一步调整才与当前工况更相符，本发明通过历史数据与优化值构建的操作模式知识库可以有效地降低工况波动而带来的影响。

进一步优选，步骤 S1 中所述重金属离子浓度与加药量的关系模型是根据中和沉淀过程吸附动力学原理与物料平衡原理构建，如下：

$$V_1 \dot{C}_{M^{2+},1} = Q_1 (C_{M^{2+},1}^0 - C_{M^{2+},1}) - k_1 (C_{M^{2+},1})^p G$$

式中， V_1 为沉淀反应池体积， $\dot{C}_{M^{2+},1}$ 为沉淀反应池中重金属离子浓度的变化， $C_{M^{2+},1}^0$ 为沉淀反应池入口重金属离子 M 浓度； $C_{M^{2+},1}$ 为沉淀反应池出口重金属离子 M 浓度； Q_1 为中和沉淀过程废水流量； G 为加药量； k_1 和 p 为中和沉淀过程的辨识参数。

在流程工业中物料平衡原理为：物质的变化量=物质的流入量-物质的流出量-物质的反应量；吸附动力学原理来描述物质的反应量，譬如采用弗罗因德利希方程来进行表示，其弗罗因德利希方程即为单位量的药剂所吸附重金属的量（即反应掉的重金属量）与重金属平衡状态的浓度存在以下关系式： $k(C_{M^{2+},1})^p$ ，则添加 G 量的药剂，反应掉重金属离子量为 $k_1(C_{M^{2+},1})^p G$ ；基于该原理本发明构建出上述关系模型。

进一步优选，所述重金属离子浓度与槽电压的关系模型是根据法拉第定律与物料平衡原理构建，如下：

$$\begin{cases} V_2 \dot{C}_{M^{2+},2} = Q_2 (C_{M^{2+},2}^0 - C_{M^{2+},2}) - k_2 q_{max} \frac{K_L C_{M^{2+},2}}{1 + K_L C_{M^{2+},2}} \frac{iS}{zF} \\ U = k_3 + \frac{d}{\sigma} i + k_4 \ln i \end{cases}$$

式中， V_2 为电解槽体积， $\dot{C}_{M^{2+},2}$ 为电解槽中重金属离子浓度的变化， $C_{M^{2+},2}^0$ 为电解槽入口重金属离子 M 浓度， $C_{M^{2+},2}$ 为电解槽出口重金属离子 M 浓度， Q_2 为电化学过程废水流量， i 为槽电流密度， q_{max} 为 1 摩尔氢氧化铁的吸附能力， K_L 为朗缪尔常数， S 为电极板面积， z 为电荷转移数， F 为法拉第常数， U 是槽电压， d 是极板间距， σ 是电导率， k_2 ， k_3 ， k_4 均为电化学过程的辨识参数。

在流程工业中物料平衡原理为：物质的变化量=物质的流入量-物质的流出量-物质的反应

量；法拉第电解定律为：在电极界面上发生化学变化物质的质量与通入的电量成正比。因此将其两者进行结合通过数学推理得到上述关系模型。

利用现场采集的历史数据（流量、重金属离子浓度、加药量、槽电压等）对关系模型采用最小二乘法进行参数辨识得到 k_1 和 p 、 k_2 、 k_3 、 k_4 ，由于最小二乘法是参数辨识时常用技术手段，因此对其实现过程不进行具体描述，其在本发明用模型输出值与真实值误差最小来优化待求解的辨识参数，即利用上述公式计算的出口重金属离子浓度与历史数据中真实离子浓度误差最小。

进一步优选，所述多目标协调优化模型如下所示：

$$\begin{aligned} \min J_1 &= \min G \\ \min J_2 &= \min E \\ s.t. &\begin{cases} E = nUIt \\ I = iS \\ \vartheta_1 = \frac{C_{M^{2+},1}^0 - C_{M^{2+},1}}{C_{M^{2+},1}^0} \\ \vartheta_2 = \frac{C_{M^{2+},2}^0 - C_{M^{2+},2}}{C_{M^{2+},2}^0} \\ \vartheta_1 + \vartheta_2 = 1 \\ C_{M^{2+},2}^0 = C_{M^{2+},1} \\ C_{M^{2+},2} \leq C_{M^{2+},2}^r \end{cases} \end{aligned}$$

式中， J_1 、 J_2 分别表示目标函数值分别表示目标函数， E 是电耗； n 是电解槽个数， t 是电解时间， I 是槽电流， ϑ_1 、 ϑ_2 分别为中和沉淀过程、电化学过程的重金属去除效率， $C_{M^{2+},2}^r$ 为可排放重金属离子浓度上限。

进一步优选，步骤 S5 中实时输入条件下与操作模式知识库中一类输入条件的最优操作模式的相似度计算公式如下：

$$\delta(\psi, \psi_t) = \exp\left(\frac{1}{3} \cdot \sum_{j=1}^3 \alpha_j (\omega_j - \omega_{t,j})^2\right), \quad \sum_{j=1}^3 \alpha_j = 1$$

式中， $\delta(\psi, \psi_t)$ 表示实时输入条件下与操作模式知识库中一类输入条件的最优操作模式的相似度， ω_j 和 $\omega_{t,j}$ 分别表示操作模式知识库中一类输入条件中、实时输入条件中的中和沉淀过程废水流量或沉淀反应池入口重金属离子浓度或电解槽运行时间。

$j=1, 2, 3$ ，其分别对应输入条件中中和沉淀过程废水流量、沉淀反应池入口重金属离子浓度、电解槽运行时间。

进一步优选，步骤 S5 中根据实时输入条件判断是否需要进行操作匹配的标准如下：

若实时输入条件内中和沉淀过程废水流量大于步骤 S1 关系模型参数辨识时历史数据内

中和沉淀过程废水流量的上限或小于下限,且相对误差大于预设阈值,则进行操作模式匹配;

或者,若实时输入条件内沉淀反应池入口重金属离子浓度大于步骤 S1 关系模型参数辨识时历史数据内沉淀反应池入口重金属离子浓度的上限或小于下限,且相对误差大于预设阈值,则进行操作模式匹配;

或者,若实时输入条件内电解槽运行时间大于预设时长,则进行操作模式匹配;

若均不满足,则不需要进行操作模式匹配。

是否需要进行操作匹配的判断基于当前实时工况与步骤 S1 中关系模型参数辨识时历史数据的工况相比较,当前实时工况相较于关系模型构建的工况变动大,则需要进行操作模式匹配。此外,解槽运行时间对应的预设时长是根据极板大小和材料确定的,其为经验值。

进一步优选,所述相对误差对应的预设阈值为 5%。

依据获取的操作参数调节实时输入条件下加药量、槽电压的优化值得到加药量、槽电压的控制值规律为:

加药量的控制值等于操作参数中加药量协调值与加药量优化值之和;

槽电压的控制值等于操作参数中槽电压协调值与槽电压优化值之和。

本发明优选若进行了操作模式匹配,控制值等于协调值与优化值之和。

进一步优选,加药量和槽电压的优化值的获取方式为:采用状态转移算法求解所述多目标协调优化模型。

有益效果

本发明提供了一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法,该方法以构建的中和沉淀过程与电化学过程的机理模型为基础,定量的考虑了出口重金属离子浓度与加药量和电压之间的对应关系而构建出关系模型;再基于加药量和电耗最小为优化目标构建出多目标协调优化模型,因此,本发明基于现场数据和状态转移算法求解多目标协调优化模型计算出加药量与槽电压的优化值,解决了因人工经验操作造成药耗和电耗浪费的问题。进一步又基于历史数据和优化值构建了操作模式知识库,提出了操作模式动态匹配的方法,得到了实时现场数据下加药量和槽电压协调值,再基于协调值来调整优化值得到与实时工况更加吻合的控制值,解决了因入口工况波动造成的出口重金属离子波动较大,出口废水品质不稳定等问题。

利用本发明所述方法,在同等工况条件下,相对于人工添加方法,可以使出口重金属离子浓度波动减小,节约了平均加药量和电耗,达到了稳定出口废水质量,降低药耗和电耗的目标。

本发明深入分析吸附反应和电化学反应原理，结合现场数据，协调两种工序去除废水中的重金属离子，适宜于重金属废水深度净化过程的加药量与电压的控制，对废水处理过程稳定出口重金属离子浓度，提高可排废水质量，降低成本具有重要意义。

附图说明

图1 是本发明提供的一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法的流程图；
图2 是本发明提供的人工操作下以及采用本发明所述方法下出口处铅离子浓度变化对比图。

具体实施方式

下面将结合实施例对本发明做进一步的说明。

如图1所示，本发明提供的一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法，包括如下步骤：

S1：分别构建中和沉淀过程中重金属离子浓度与加药量、电化学过程中重金属离子浓度与槽电压的关系模型，并基于现场历史数据进行关系模型的参数辨识。

重金属离子浓度与加药量的关系模型是根据中和沉淀过程吸附动力学原理与物料平衡原理构建，如下：

$$V_1 \dot{C}_{M^{2+},1} = Q_1 (C_{M^{2+},1}^0 - C_{M^{2+},1}) - k_1 (C_{M^{2+},1})^p G \quad (1)$$

式中， V_1 为沉淀反应池体积， $\dot{C}_{M^{2+},1}$ 为沉淀反应池中重金属离子浓度的变化率， $C_{M^{2+},1}^0$ 为沉淀反应池入口重金属离子 M 浓度； $C_{M^{2+},1}$ 为沉淀反应池出口重金属离子 M 浓度； Q_1 为中和沉淀过程废水流量； G 为加药量； k_1 和 p 为中和沉淀过程的辨识参数。

重金属离子浓度与槽电压的关系模型是根据法拉第定律与物料平衡原理构建，如下：

$$\begin{cases} V_2 \dot{C}_{M^{2+},2} = Q_2 (C_{M^{2+},2}^0 - C_{M^{2+},2}) - k_2 q_{max} \frac{K_L C_{M^{2+},2}}{1 + K_L C_{M^{2+},2}} \frac{iS}{zF} \\ U = k_3 + \frac{d}{\sigma} i + k_4 \ln i \end{cases} \quad (2)$$

式中， V_2 为电解槽体积， $\dot{C}_{M^{2+},2}$ 为电解槽中重金属离子浓度的变化率， $C_{M^{2+},2}^0$ 为电解槽入口重金属离子 M 浓度， $C_{M^{2+},2}$ 为电解槽出口重金属离子 M 浓度， Q_2 为电化学过程废水流量， i 为槽电流密度， q_{max} 为1摩尔氢氧化铁的吸附能力， K_L 为朗缪尔常数， S 为电极板面积， z 为电荷转移数， F 为法拉第常数， U 是槽电压， d 是极板间距， σ 是电导率， k_2 ， k_3 ， k_4 均为

电化学过程的辨识参数。

需要说明的是，上述公式中重金属离子 M 并非特指某一类重金属离子，而仅仅是用于表示废水中的重金属离子，可以用于表示任意一类重金属离子。

还需要说明的是，沉淀反应池中重金属离子浓度的变化率 $\dot{C}_{M^{2+},1}$ 和电解槽中重金属离子浓度的变化率 $\dot{C}_{M^{2+},2}$ 均是表示离子浓度随时间的变化，其分别与电解槽出口重金属离子浓度 $C_{M^{2+},2}$ 、沉淀反应池出口重金属离子浓度 $C_{M^{2+},1}$ 相关。

本实施例中， k_1 和 p 、 k_2 、 k_3 、 k_4 均是利用现场采集的历史数据采用最小二乘法进行参数辨识，得到相关参数值后代入公式 1 和公式 2 得到唯一确定的关系模型。需要说明的是，参数辨识时，是利用现场采集的诸多组历史数据进行分析得到，因此譬如沉淀反应池入口重金属离子浓度、中和沉淀过程废水流量等均是存在多类取值的，但是均会存在一个上限和下限值。下文将利用上限、下限值来鉴别实时工况与关系模型参数辨识时的工况是否相近。

S2: 将加药量和电耗最小以及出口重金属离子浓度达标设定为优化目标并构建多目标协调优化模型。其多目标协调优化模型如下所示：

$$\begin{aligned} \min J_1 &= \min G \\ \min J_2 &= \min E \\ \text{s. t. } &\begin{cases} E = nUIt \\ I = iS \\ \vartheta_1 = \frac{C_{M^{2+},1}^0 - C_{M^{2+},1}}{C_{M^{2+},1}^0} \\ \vartheta_2 = \frac{C_{M^{2+},2}^0 - C_{M^{2+},2}}{C_{M^{2+},2}^0} \\ \vartheta_1 + \vartheta_2 = 1 \\ C_{M^{2+},2}^0 = C_{M^{2+},1} \\ C_{M^{2+},2} \leq C_{M^{2+},2}^r \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， J_1 、 J_2 分别表示目标函数值， E 是电耗； n 是电解槽个数， t 是电解时间， I 是槽电流， ϑ_1 、 ϑ_2 分别为中和沉淀过程、电化学过程的重金属去除效率， $C_{M^{2+},2}^r$ 为可排放重金属离子浓度上限。

本发明优选采用状态转移算法来求解多目标协调优化模型得到加药量、槽电压的优化值。本实施例中优化迭代过程简述如下：

随机生成加药量 G 与槽电压 U 的初始值 $G0$ ， $U0$ ，将 $G0$ ， $U0$ 作为输入值进行状态转移算法中算子的迭代运算得到新的 $G1$ ， $U1$ ，比较 $G0$ 与 $G1$ （即目标函数 $J1$ 的比较）， $E0$ 与 $E1$ 的大小（即目标函数 $J2$ 的比较），较小的 G 和较小的 E 对应的 U 保留作为当前解 Gx ， Ux ，

如果还没有达到迭代终止条件,则以 Gx , Ux , 作为输入值进行操作算子的运算得到新的 $G2$, $U2$, 然后比较 $G2$ 与 Gx , $E2$ 与 Ex , 保留较小的 G 和较小的 E 对应的 U 保留作为当前解 Gx , Ux , 以此类推直到达到迭代终止条件。本实施例中迭代终止条件为预先设置的迭代次数; 其他可行的实施例中, 迭代终止条件还可以是判断当前解 Gx , Ux 是否会继续下降, 若不下降了或者下降差值小于设定值 (下降不明显), 则视为达到了迭代终止条件。

S3: 构建操作模式知识库; 具体过程如下:

S3.1: 将中和沉淀过程废水流量 Q_1 , 沉淀反应池入口重金属离子浓度 C^0 以及电解槽运行时间 T 定义为输入条件 ω , 即存在 $\omega=[Q_1, C^0, T]$;

S3.2: 利用现场采集的历史数据计算各类输入条件下多目标协调优化模型的加药量、槽电压的优化值, 再计算各类输入条件下的操作参数, 操作参数包括加药量协调值和槽电压协调值;

其中, 加药量协调值=同一输入条件下加药量实际操作值-加药量优化值;

槽电压协调值=同一输入条件下槽电压实际操作值-槽电压优化值。

本实施例中加药量、槽电压的优化值均采用上述状态转移算法进行迭代计算得到。

S3.3: 定义一个输入条件及其操作参数构成一个操作模式;

S3.4: 将相同输入条件下所对应的不同操作参数进行综合评价, 将加药量协调值和槽电压协调值均最小的操作模式作为该输入条件下的最优操作模式, 并将各类输入条件下的最优操作模式集合构建操作模式知识库。

从上述可知, 本发明的构建的操作模式知识库是基于运行过程采集的数据以及根据构建的多目标协调优化模型构建的。

S4: 获取现场实时输入条件, 并将实时输入条件代入步骤 S2 中所述多目标协调优化模型得到实时输入条件下加药量、槽电压的优化值。

同理, 本实施例中采用状态转移算法计算出当前实时输入条件下加药量、槽电压的优化值。

S5: 根据实时输入条件判断是否需要进行操作匹配; 本实施例中, 具体判断标准如下:

若实时输入条件内中和沉淀过程废水流量大于步骤 S1 关系模型参数辨识时历史数据内中和沉淀过程废水流量的上限或小于下限, 且相对误差大于预设阈值, 则进行操作模式匹配;

或者, 若实时输入条件内沉淀反应池入口重金属离子浓度大于步骤 S1 关系模型参数辨识时历史数据内沉淀反应池入口重金属离子浓度的上限或小于下限, 且相对误差大于预设阈值, 则进行操作模式匹配;

或者, 若实时输入条件内电解槽运行时间大于预设时长, 则进行操作模式匹配;

若均不满足上述条件，则不需要进行操作模式匹配。

其中，若需要进行操作匹配，则根据实时输入条件匹配操作模式知识库中的操作模式获取实时输入条件匹配的操作参数，再依据获取的操作参数调节实时输入条件下加药量、槽电压的优化值得到加药量、槽电压的控制值并进行控制调节。

其中，按照如下公式依次计算实时输入条件下与操作模式知识库中各类输入条件的最优操作模式的相似度，并选取相似度最小的最优操作模式的操作参数作为实时输入条件匹配的操作参数，即得到加药量协调值和槽电压协调值。

实时输入条件下与操作模式知识库中一类输入条件的最优操作模式的相似度计算公式如下：

$$\delta(\psi, \psi_t) = \exp\left(\frac{1}{3} \cdot \sum_{j=1}^3 \alpha_j (\omega_j - \omega_{t,j})^2\right), \sum_{j=1}^3 \alpha_j = 1 \quad (4)$$

式中， $\delta(\psi, \psi_t)$ 表示实时输入条件下与操作模式知识库中一类输入条件的最优操作模式的相似度， ω_j 和 $\omega_{t,j}$ 分别表示操作模式知识库中一类输入条件中、实时输入条件中的中和沉淀过程废水流量或沉淀反应池入口重金属离子浓度或电解槽运行时间。

本实施例中，优选得到加药量协调值和槽电压协调值后，将加药量协调值与加药量优化值求和作为加药量的控制值，将槽电压协调值与槽电压优化值求和作为槽电压的控制值。然后再根据加药量和槽电压的控制值进行实时控制调节。

若不需要进行操作匹配，择将实时输入条件下的加药量、槽电压的优化值作为加药量、槽电压的控制值并进行实时控制调节。

基于上述方案，本发明提供如下实例来验证本发明所述方法的有效性。

某废水处理厂中和沉淀-电化学过程去除重金属铅为例说明本发明的优越性。第一步，建立中和沉淀过程、电化学过程铅离子浓度与加药量和电流密度的关系模型，并利用现场采集的数据对所建模型进行参数辨识；第二步，构建面向加药量和电耗最小的废水处理过程多目标协调优化模型。第三步，构成的重金属废水处理过程操作模式，采集现场数据，构建操作模式知识库。采集现场一个月实际过程人工添加药剂量和电耗，并采用状态转移算法快速求解优化模型获取到对应优化值；第四步，采集一个月的运行数据进行实验，期间采用状态转移算法快速求解优化模型实时获取实时工况条件下最优的加药量优化值 $\tilde{G}$ 与电压优化值 $\tilde{U}$ ；而当现场工况变化剧烈时，即废水流量和入口重金属离子浓度有一种数据相对误差大于5%或电解槽运行时间大于7天，进行操作模式匹配，工况波动下人工经验操作和多目标协调操作模式匹配的对比结果如表1和图2所示。

其结果表明，本发明所提出的方法充分考虑了重金属废水处理过程加药量与电压值的优

化对工况波动下出口重金属离子稳定达标的重要性，为进一步的控制精度的提高有着重要意义。

表 1

	人工调节	多目标协调优化	多目标协调操作模式匹配
加药量 (FeSO ₄) (kg/月)	12240	11580	11190
电耗 (kW·h/月)	25488	22875	22194

需要强调的是，本发明所述的实例是说明性的，而不是限定性的，因此本发明不限于具体实施方式中所述的实例，凡是由本领域技术人员根据本发明的技术方案得出的其他实施方式，不脱离本发明宗旨和范围的，不论是修改还是替换，同样属于本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1.一种基于操作模式动态匹配的重金属废水净化控制方法，其特征在于：包括如下步骤：

S1：分别构建中和沉淀过程中重金属离子浓度与加药量、电化学过程中重金属离子浓度与槽电压的关系模型，并基于历史数据进行关系模型的参数辨识；

所述重金属离子浓度与加药量的关系模型用于表示沉淀反应池中沉淀反应池出口重金属离子浓度与加药量的关系；所述重金属离子浓度与槽电压关系模型用于表示电解槽中电解槽出口重金属离子浓度与槽电压的关系；

S2：将加药量和电耗最小以及出口重金属离子浓度达标设定为优化目标并构建多目标协调优化模型；

其中，重金属废水净化过程为先进行沉淀反应后进行电化学反应，所述出口重金属离子浓度达标表示电解槽出口重金属离子浓度小于或等于预设的可排放重金属离子浓度上限值；所述电耗表示在电解槽内电化学反应消耗的电能，所述电耗与槽电压相关；

S3：定义输入条件和操作参数并基于历史数据中各个输入条件对应的操作参数构建操作模式知识库；

其中，输入条件包括中和沉淀过程废水流量，沉淀反应池入口重金属离子浓度以及电解槽运行时间；所述操作参数包括加药量协调值和槽电压协调值，所述加药量协调值、槽电压协调值分别为：同一输入条件下历史数据中加药量、槽电压的实际操作值与利用所述多目标协调优化模型得到的对应加药量、槽电压的优化值之差；

一个输入条件及其操作参数构成一个操作模式，所述操作模式知识库包括各类输入条件下的最优操作模式，所述最优操作模式为同一输入条件下加药量协调值和槽电压协调值最小的操作模式；

S4：获取现场实时输入条件，并将实时输入条件代入步骤 S2 中所述多目标协调优化模型得到实时输入条件下加药量、槽电压的优化值；

S5：根据实时输入条件判断是否需要进行操作匹配；

若需要，则根据实时输入条件匹配操作模式知识库中的操作模式获取实时输入条件匹配的操作参数，再依据获取的操作参数调节实时输入条件下加药量、槽电压的优化值得到加药量、槽电压的控制值并进行控制调节；

其中，依次计算实时输入条件下与操作模式知识库中各类输入条件的最优操作模式的相似度，并选取相似度最小的最优操作模式的操作参数作为实时输入条件匹配的操作参数；

若不需要，将实时输入条件下的加药量、槽电压的优化值作为加药量、槽电压的控制值并进行控制调节。

2.根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：步骤 S1 中所述重金属离子浓度与加药量的

关系模型是根据中和沉淀过程吸附动力学原理与物料平衡原理构建，如下：

$$V_1 \dot{C}_{M^{2+},1} = Q_1 (C_{M^{2+},1}^0 - C_{M^{2+},1}) - k_1 (C_{M^{2+},1})^p G$$

式中， V_1 为沉淀反应池体积， $\dot{C}_{M^{2+},1}$ 为沉淀反应池中重金属离子浓度的变化， $C_{M^{2+},1}^0$ 为沉淀反应池入口重金属离子 M 浓度； $C_{M^{2+},1}$ 为沉淀反应池出口重金属离子 M 浓度； Q_1 为中和沉淀过程废水流量； G 为加药量； k_1 和 p 为中和沉淀过程的辨识参数。

3. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：所述重金属离子浓度与槽电压的关系模型是根据法拉第定律与物料平衡原理构建，如下：

$$\begin{cases} V_2 \dot{C}_{M^{2+},2} = Q_2 (C_{M^{2+},2}^0 - C_{M^{2+},2}) - k_2 q_{max} \frac{K_L C_{M^{2+},2}}{1 + K_L C_{M^{2+},2}} \frac{iS}{zF} \\ U = k_3 + \frac{d}{\sigma} i + k_4 \ln i \end{cases}$$

式中， V_2 为电解槽体积， $\dot{C}_{M^{2+},2}$ 为电解槽中重金属离子浓度的变化， $C_{M^{2+},2}^0$ 为电解槽入口重金属离子 M 浓度， $C_{M^{2+},2}$ 为电解槽出口重金属离子 M 浓度， Q_2 为电化学过程废水流量， i 为槽电流密度， q_{max} 为 1 摩尔氢氧化铁的吸附能力， K_L 为朗缪尔常数， S 为电极板面积， z 为电荷转移数， F 为法拉第常数， U 是槽电压， d 是极板间距， σ 是电导率， k_2 ， k_3 ， k_4 均为电化学反应的辨识参数。

4. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：所述多目标协调优化模型如下所示：

$$\begin{aligned} \min J_1 &= \min G \\ \min J_2 &= \min E \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} E = nUIt \\ I = iS \\ \vartheta_1 = \frac{C_{M^{2+},1}^0 - C_{M^{2+},1}}{C_{M^{2+},1}^0} \\ \vartheta_2 = \frac{C_{M^{2+},2}^0 - C_{M^{2+},2}}{C_{M^{2+},2}^0} \\ \vartheta_1 + \vartheta_2 = 1 \\ C_{M^{2+},2}^0 = C_{M^{2+},1} \\ C_{M^{2+},2} \leq C_{M^{2+},2}^r \end{cases} \end{aligned}$$

式中， J_1 、 J_2 分别表示目标函数值， E 是电耗； n 是电解槽个数， t 是电解时间， I 是槽电流， ϑ_1 、 ϑ_2 分别为中和沉淀过程、电化学过程的重金属去除效率， $C_{M^{2+},2}^r$ 为可排放重金属离子浓度上限。

5. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：步骤 S5 中实时输入条件下与操作模式知识库中一类输入条件的最优操作模式的相似度计算公式如下：

$$\delta(\psi, \psi_t) = \exp\left(\frac{1}{3} \cdot \sum_{j=1}^3 \alpha_j (\omega_j - \omega_{t,j})^2\right), \sum_{j=1}^3 \alpha_j = 1$$

式中, $\delta(\psi, \psi_t)$ 表示实时输入条件下与操作模式知识库中一类输入条件的最优操作模式的相似度, ω_j 和 $\omega_{t,j}$ 分别表示操作模式知识库中一类输入条件中、实时输入条件中的中和沉淀过程废水流量或沉淀反应池入口重金属离子浓度或电解槽运行时间。

6. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于: 步骤 S5 中根据实时输入条件判断是否需要进行操作匹配的标准如下:

若实时输入条件内中和沉淀过程废水流量大于步骤 S1 关系模型参数辨识时历史数据内中和沉淀过程废水流量的上限或小于下限, 且相对误差大于预设阈值, 则进行操作模式匹配;

或者, 若实时输入条件内沉淀反应池入口重金属离子浓度大于步骤 S1 关系模型参数辨识时历史数据内沉淀反应池入口重金属离子浓度的上限或小于下限, 且相对误差大于预设阈值, 则进行操作模式匹配;

或者, 若实时输入条件内电解槽运行时间大于预设时长, 则进行操作模式匹配;

若均不满足, 则不需要进行操作模式匹配。

7. 根据权利要求 6 所述的方法, 其特征在于: 所述相对误差对应的预设阈值为 5%。

8. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于: 依据获取的操作参数调节实时输入条件下加药量、槽电压的优化值得到加药量、槽电压的控制值规律为:

加药量的控制值等于操作参数中加药量协调值与加药量优化值之和;

槽电压的控制值等于操作参数中槽电压协调值与槽电压优化值之和。

9. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于: 加药量和槽电压的优化值的获取方式为: 采用状态转移算法求解所述多目标协调优化模型。

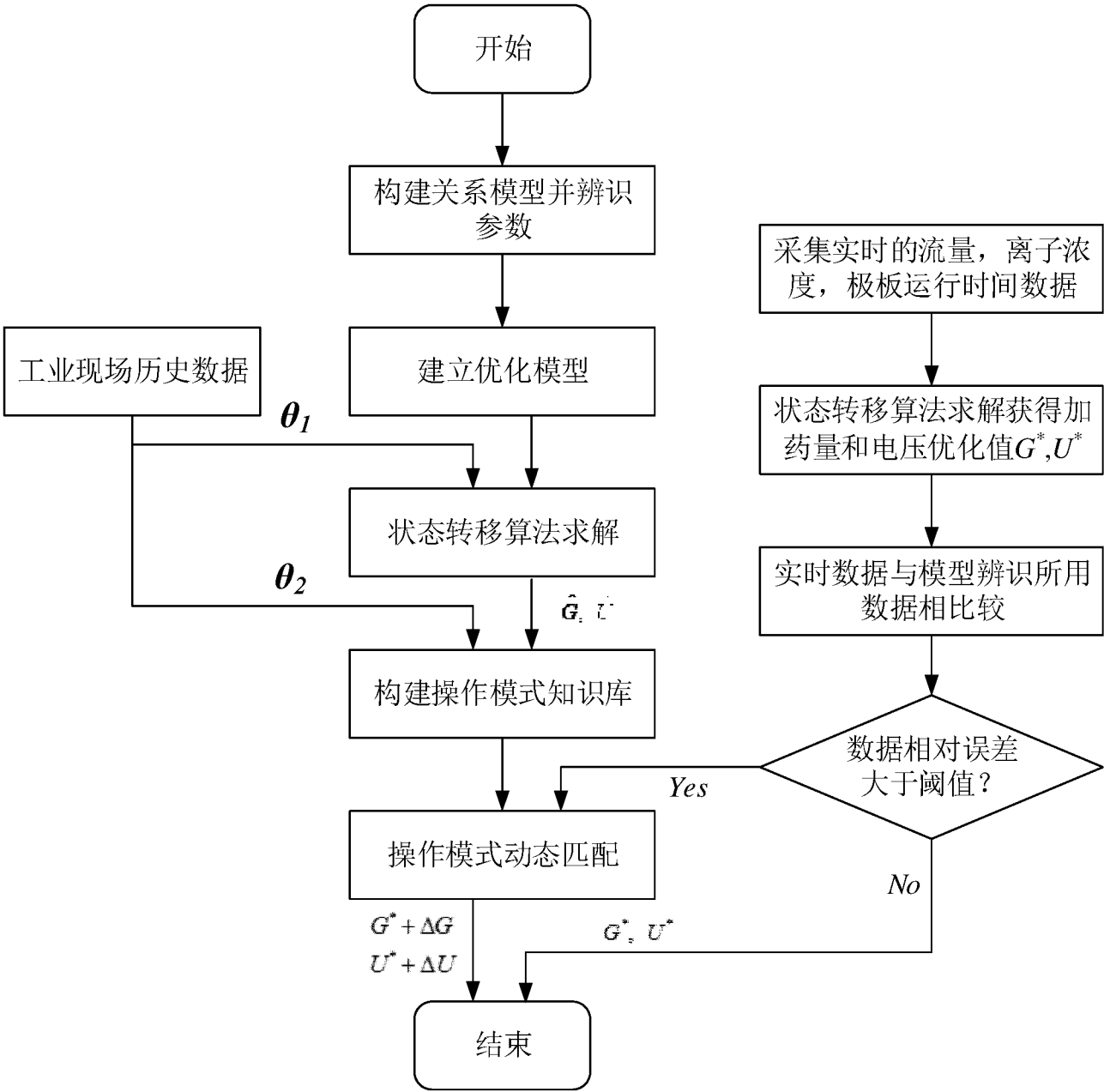


图 1

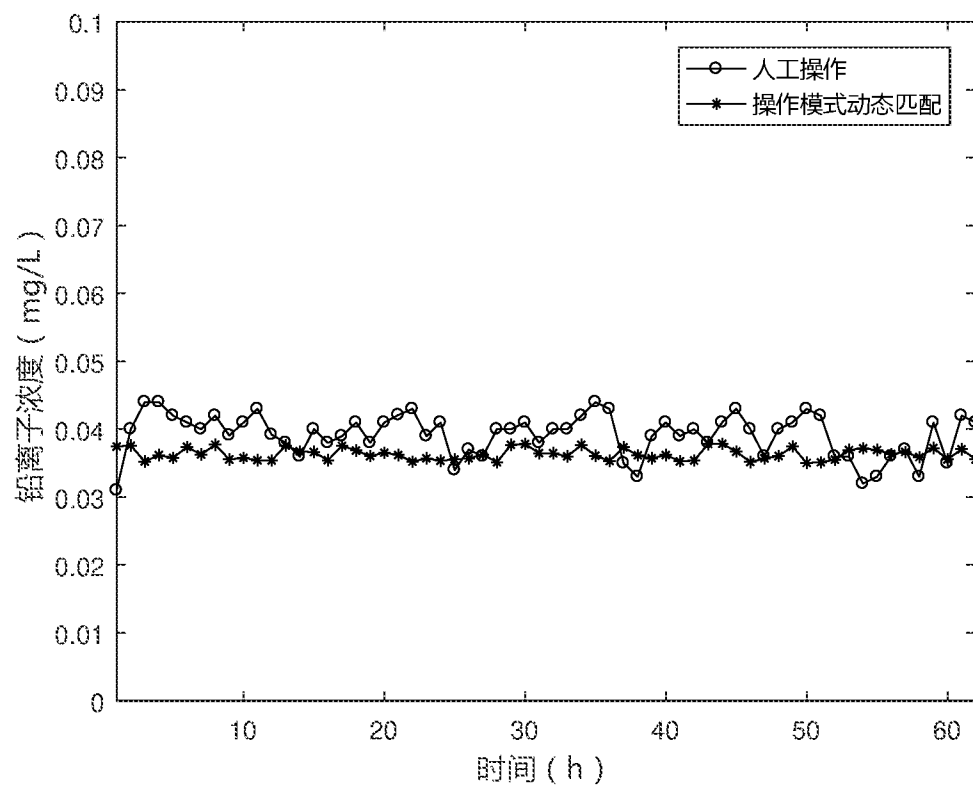


图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/072269

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C02F 9/06(2006.01)i; G06F 17/50(2006.01)i; C02F 101/20(2006.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C02F; G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNTXT, SIPOABS, DWPI, CNKI, ISI Web of knowledge: 中南大学, 重金属, 浓度, 沉淀 or 加药 or 絮凝 or 混凝, 电化学 or 电解 or 电流密度 or 槽电压 or 耗电量 or 电耗 or 电能, heavy metal, waste water, sewage, control, monitor, regulate, model, optimize, formula, equation, calculate, estimate, predict, simulate, electrochemical, electrolysis, deposit, precipitate, flocculate, concentration

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 107500388 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 22 December 2017 (2017-12-22) claims 1-6	1-9
A	CN 105955327 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 21 September 2016 (2016-09-21) claims 1-5	1-9
A	CN 107055732 A (BEIJING EWATERSYS TECHNOLOGY CO., LTD.) 18 August 2017 (2017-08-18) claims 1-7	1-9
A	CN 107729711 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 23 February 2018 (2018-02-23) claims 1-9	1-9
A	CN 106600506 A (RESEARCH CENTER FOR ECO-ENVIRONMENTAL SCIENCES, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 26 April 2017 (2017-04-26) claims 1-12	1-9
A	US 2006113242 A1 (ISHIKAWA, T. et al.) 01 June 2006 (2006-06-01) entire document	1-9



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

05 September 2019

Date of mailing of the international search report

16 September 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Authorized officer

Facsimile No. (86-10)62019451

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/072269

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2018274334 A1 (GENSCAPE INTANGIBLE HOLDING, INC.) 27 September 2018 (2018-09-27) entire document	1-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/072269

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	107500388	A	22 December 2017	None			
CN	105955327	A	21 September 2016	None			
CN	107055732	A	18 August 2017	None			
CN	107729711	A	23 February 2018	None			
CN	106600506	A	26 April 2017	None			
US	2006113242	A1	01 June 2006	EP	1343063	A2	10 September 2003
				US	7014777	B2	21 March 2006
				US	2004011736	A1	22 January 2004
				US	2006108292	A1	25 May 2006
				JP	2004033806	A	05 February 2004
				JP	2003251395	A	09 September 2003
US	2018274334	A1	27 September 2018	WO	2018183054	A1	04 October 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/072269

A. 主题的分类

C02F 9/06(2006.01)i; G06F 17/50(2006.01)i; C02F 101/20(2006.01)n

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

C02F; G06F

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS, CNTXT, SIPOABS, DWPI, CNKI, ISI Web of knowledge: 中南大学, 重金属, 浓度, 沉淀 or 加药 or 絮凝 or 混凝, 电化学 or 电解 or 电流密度 or 槽电压 or 耗电量 or 电耗 or 电能, heavy metal, waste water, sewage, control, monitor, regulate, model, optimize, formula, equation, calculate, estimate, predict, simulate, electrochemical, electrolysis, deposit, precipitate, flocculate, concentration

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 107500388 A (中南大学) 2017年 12月 22日 (2017 - 12 - 22) 权利要求1-6	1-9
A	CN 105955327 A (中南大学) 2016年 9月 21日 (2016 - 09 - 21) 权利要求1-5	1-9
A	CN 107055732 A (北京易沃特科技有限公司) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 权利要求1-7	1-9
A	CN 107729711 A (中南大学) 2018年 2月 23日 (2018 - 02 - 23) 权利要求1-9	1-9
A	CN 106600506 A (中国科学院生态环境研究中心) 2017年 4月 26日 (2017 - 04 - 26) 权利要求1-12	1-9
A	US 2006113242 A1 (ISHIKAWA TAKATOSHI ET AL.) 2006年 6月 1日 (2006 - 06 - 01) 全文	1-9
A	US 2018274334 A1 (GENSCAPE INTANGIBLE HOLDING INC.) 2018年 9月 27日 (2018 - 09 - 27) 全文	1-9

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 9月 5日

国际检索报告邮寄日期

2019年 9月 16日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

周荣振

电话号码 (86-10)53962748

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/072269

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	107500388	A	2017年 12月 22日	无			
CN	105955327	A	2016年 9月 21日	无			
CN	107055732	A	2017年 8月 18日	无			
CN	107729711	A	2018年 2月 23日	无			
CN	106600506	A	2017年 4月 26日	无			
US	2006113242	A1	2006年 6月 1日	EP	1343063	A2	2003年 9月 10日
				US	7014777	B2	2006年 3月 21日
				US	2004011736	A1	2004年 1月 22日
				US	2006108292	A1	2006年 5月 25日
				JP	2004033806	A	2004年 2月 5日
				JP	2003251395	A	2003年 9月 9日
US	2018274334	A1	2018年 9月 27日	WO	2018183054	A1	2018年 10月 4日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)