



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119987438 A

(43) 申请公布日 2025. 05. 13

(21) 申请号 202411993783.8

G06F 30/28 (2020.01)

(22) 申请日 2024.12.31

G06F 111/10 (2020.01)

(71) 申请人 江西省深耕铜箔科技有限公司

G06F 113/08 (2020.01)

地址 344000 江西省抚州市抚州高新技术
产业开发区德科产业园以西纬五路以
北

G06F 119/14 (2020.01)

申请人 深圳诺好有方工业智能有限公司

(72) 发明人 李衍洋

(74) 专利代理机构 深圳国新南方知识产权代理
有限公司 44374

专利代理师 张曾明

(51) Int. Cl.

G05D 5/03 (2006.01)

G25D 1/04 (2006.01)

G06F 30/23 (2020.01)

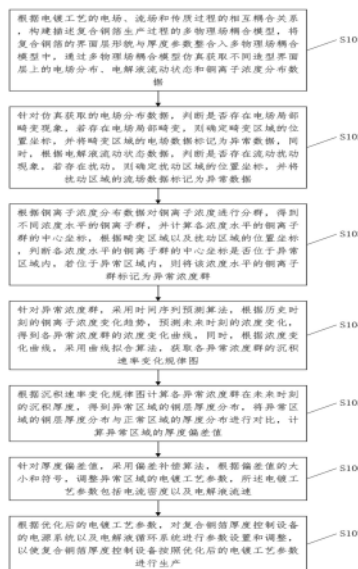
权利要求书3页 说明书9页 附图1页

(54) 发明名称

复合铜箔厚度控制设备的控制方法

(57) 摘要

本申请提供复合铜箔厚度控制设备的控制方法,包括:根据沉积速率变化规律图计算各异常浓度群在未来时刻的沉积厚度,得到异常区域的铜层厚度分布,将异常区域的铜层厚度分布与正常区域的厚度分布进行对比,计算异常区域的厚度偏差值;针对厚度偏差值,采用偏差补偿算法,根据偏差值的大小和符号,调整异常区域的电镀工艺参数,所述电镀工艺参数包括电流密度以及电解液流速;根据优化后的电镀工艺参数,对复合铜箔厚度控制设备的电源系统以及电解液循环系统进行参数设置和调整,以使复合铜箔厚度控制设备按照优化后的电镀工艺参数进行生产。



1. 复合铜箔厚度控制设备的控制方法,其特征在于,所述方法包括:

根据电镀工艺的电场、流场和传质过程的相互耦合关系,构建描述复合铜箔生产过程的多物理场耦合模型,将复合铜箔的界面层形貌与厚度参数整合入多物理场耦合模型中,通过多物理场耦合模型仿真获取不同造型界面层上的电场分布、电解液流动状态和铜离子浓度分布数据;

针对仿真获取的电场分布数据,判断是否存在电场局部畸变现象,若存在电场局部畸变,则确定畸变区域的位置坐标,并将畸变区域的电场数据标记为异常数据,同时,根据电解液流动状态数据,判断是否存在流动扰动现象,若存在扰动,则确定扰动区域的位置坐标,并将扰动区域的流场数据标记为异常数据;

根据铜离子浓度分布数据对铜离子浓度进行分群,得到不同浓度水平的铜离子群,并计算各浓度水平的铜离子群的中心坐标,根据畸变区域以及扰动区域的位置坐标,判断各浓度水平的铜离子群的中心坐标是否位于异常区域内,若位于异常区域内,则将该浓度水平的铜离子群标记为异常浓度群;

针对异常浓度群,采用时间序列预测算法,根据历史时刻的铜离子浓度变化趋势,预测未来时刻的浓度变化,得到各异常浓度群的浓度变化曲线,同时,根据浓度变化曲线,采用曲线拟合算法,获取各异常浓度群的沉积速率变化规律图;

根据沉积速率变化规律图计算各异常浓度群在未来时刻的沉积厚度,得到异常区域的铜层厚度分布,将异常区域的铜层厚度分布与正常区域的厚度分布进行对比,计算异常区域的厚度偏差值;

针对厚度偏差值,采用偏差补偿算法,根据偏差值的大小和符号,调整异常区域的电镀工艺参数,所述电镀工艺参数包括电流密度以及电解液流速;

根据优化后的电镀工艺参数,对复合铜箔厚度控制设备的电源系统以及电解液循环系统进行参数设置和调整,以使复合铜箔厚度控制设备按照优化后的电镀工艺参数进行生产。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据电镀工艺的电场、流场和传质过程的相互耦合关系,构建描述复合铜箔生产过程的多物理场耦合模型,将复合铜箔的界面层形貌与厚度参数整合入多物理场耦合模型中,通过多物理场耦合模型仿真获取不同造型界面层上的电场分布、电解液流动状态和铜离子浓度分布数据,包括:

采用有限元数值计算方法对复合铜箔基底表面划分四边形网格单元,根据网格单元边界点三维坐标计算得到界面层厚度分布函数;

根据所述界面层厚度分布函数建立的复合铜箔三维几何结构数字模型,采用有限体积法对纳维-斯托克斯方程进行离散求解得到界面层附近电解液速度场与压力场分布数据;

根据所述电解液速度场与压力场分布数据,采用有限元法求解泊松方程得到电势分布,结合电解液电导率分布函数计算得到界面层处电流密度;

针对所述界面层处电流密度,建立铜离子浓度控制方程,结合速度场输运项与扩散系数扩散项,采用有限差分法求解传质方程得到离子浓度分布数据。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述针对仿真获取的电场分布数据,判断是否存在电场局部畸变现象,若存在电场局部畸变,则确定畸变区域的位置坐标,并将畸变区域的电场数据标记为异常数据,同时,根据电解液流动状态数据,判断是否存在流动扰动

现象,若存在扰动,则确定扰动区域的位置坐标,并将扰动区域的流场数据标记为异常数据,包括:

根据网格点电场分布数据计算电场强度梯度值,若所述梯度值超出局部平均值的三倍标准差,采用三维空间聚类方法得到畸变区域边界点坐标集合;

从网格点速度矢量场计算速度梯度张量与旋度场,若旋度值大于层流参考值的两倍,采用边界追踪算法得到扰动区域边界点坐标集合;

针对所述畸变区域边界点坐标集合与所述扰动区域边界点坐标集合进行网格点匹配,得到重叠区域体积分数,若所述体积分数大于临界值,则判定该区域为强耦合异常区域;

采用热电偶阵列获取强耦合异常区域温度场分布,根据所述温度场分布与电导率温度系数得到局部电导率。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据铜离子浓度分布数据对铜离子浓度进行分群,得到不同浓度水平的铜离子群,并计算各浓度水平的铜离子群的中心坐标,根据畸变区域以及扰动区域的位置坐标,判断各浓度水平的铜离子群的中心坐标是否位于异常区域内,若位于异常区域内,则将该浓度水平的铜离子群标记为异常浓度群,包括:

根据所述铜离子浓度分布数据构建三维浓度场,所述三维浓度场通过密度聚类算法得到高中低三个浓度水平区域;

针对所述浓度水平区域获取质心坐标及点数密度,所述质心坐标及点数密度通过高斯核函数得到群体空间分布函数与群体特征半径;

采用电场畸变区域与流体扰动区域的边界点集合构建异常区域空间包络面,所述异常区域空间包络面与浓度群质心得到最短距离值;

根据所述最短距离值与群体特征半径的比值判断是否小于临界值,若所述比值小于临界值,则标记该浓度群为异常群并生成异常群空间分布特征矩阵。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述针对异常浓度群,采用时间序列预测算法,根据历史时刻的铜离子浓度变化趋势,预测未来时刻的浓度变化,得到各异常浓度群的浓度变化曲线,同时,根据浓度变化曲线,采用曲线拟合算法,获取各异常浓度群的沉积速率变化规律图,包括:

根据异常浓度群历史数据采用固定采样间隔进行重采样,得到等间隔时间序列数据及浓度变化率序列;

采用所述浓度变化率序列训练长短时记忆网络模型,通过所述网络模型输出下一时刻浓度预测值;

针对所述浓度预测值计算相邻时刻浓度差值,根据所述浓度差值及法拉第定律计算得到理论沉积厚度增量序列;

对所述理论沉积厚度增量序列进行傅里叶变换提取频率分量,通过所述频率分量进行多项式拟合得到沉积速率变化规律函数,若所述多项式拟合的均方根误差大于预设阈值,则增加多项式阶数重复拟合过程。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据沉积速率变化规律图计算各异常浓度群在未来时刻的沉积厚度,得到异常区域的铜层厚度分布,将异常区域的铜层厚度分布与正常区域的厚度分布进行对比,计算异常区域的厚度偏差值,包括:

根据沉积速率变化规律函数构建四阶龙格库塔积分方程,通过加权平均方法得到异常

浓度群累积沉积厚度分布函数；

采用径向基函数对正常区域铜层厚度进行插值拟合,通过三维网格划分获取基准厚度分布函数；

针对异常区域铜层厚度分布函数与所述基准厚度分布函数进行差值计算,获取厚度偏差函数；

采用高斯核函数对所述厚度偏差函数进行概率密度估计,根据核函数权重计算得到偏差分布图谱。

7.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述针对厚度偏差值,采用偏差补偿算法,根据偏差值的大小和符号,调整异常区域的电镀工艺参数,所述电镀工艺参数包括电流密度以及电解液流速,包括:

根据所述厚度偏差值建立比例积分补偿方程,通过对目标值与实际值的偏差积分运算得到电流密度补偿系数与流速补偿系数；

针对所述电流密度补偿系数建立分段线性反馈函数,若所述补偿系数的绝对值小于预设阈值则采用线性补偿得到修正电流密度分布；

采用指数型非线性映射函数对所述流速补偿系数进行变换,通过预设映射系数与原始流速值运算得到修正流速分布；

构建包含厚度偏差平方项和电流密度梯度项及流速梯度项的补偿参数评价函数,采用深度神经网络对补偿参数进行优化运算得到优化后的补偿系数。

8.根据权利要求7所述的方法,其特征在于,所述比例积分补偿方程为:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt$$

式中, $u(t)$ 为控制器的输出, K_p 、 K_i 为补偿系数, $e(t)$ 为目标值与实际值的偏差, t 为时间。

9.根据权利要求7所述的方法,其特征在于,所述补偿参数评价函数为:

$$J(\alpha, \beta) = w_1 \cdot \sum \Delta h^2 + w_2 \cdot \sum (\nabla j)^2 + w_3 \cdot \sum (\nabla v)^2$$

式中, $J(\alpha, \beta)$ 为补偿参数的优化目标值, Δh 为厚度偏差, j 为电流密度分布, v 为流速分布, w_1 、 w_2 、 w_3 为权重系数。

10.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据优化后的电镀工艺参数,对复合铜箔厚度控制设备的电源系统以及电解液循环系统进行参数设置和调整,以使复合铜箔厚度控制设备按照优化后的电镀工艺参数进行生产,包括:

根据电流密度分布函数计算目标区域阳极板理论位置坐标,通过空间距离传感器阵列测量阳极板实际位置,采用比例积分控制器得到位置偏差补偿量；

采用激光位移传感器阵列获取阳极板与阴极板之间距离变化率矩阵,根据所述距离变化率矩阵计算阳极板倾角,通过角度闭环控制器输出角度调整信号；

若电流密度均匀性指标小于预设阈值,则驱动阳极板位置补偿机构进行调节,直至所述均匀性指标大于预设阈值；

根据流场分布函数计算电解液流速设定值,通过流量传感器测量实际流速值,采用压力闭环控制器调节阀门开度,根据所述阀门开度调节进液管路与回液管路流量比。

复合铜箔厚度控制设备的控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及信息技术领域,尤其涉及复合铜箔厚度控制设备的控制方法。

背景技术

[0002] 复合铜箔电镀生产过程中存在一个关键的技术难题:如何精确控制铜层厚度的均匀性。这个问题源于电场分布、电解液流动和铜离子浓度分布三个物理场之间复杂的耦合关系。具体而言,电场分布的不均匀性会导致局部区域出现电场畸变,进而影响铜离子的沉积速率;同时,电解液的流动扰动也会造成铜离子浓度分布的不均匀,从而引起沉积厚度的局部偏差。这些因素相互影响、相互制约,使得铜层厚度的精确控制变得极为困难。更深入地说,界面层的形貌和厚度参数会直接影响电场分布和电解液流动状态,进而影响铜离子的传质过程。不同造型的界面层会产生不同的电场分布和流场特征,导致铜离子浓度出现局部异常。这些异常区域的沉积速率与正常区域存在显著差异,最终造成铜层厚度的不均匀性。此外,铜离子浓度的时间演化规律也是一个重要问题。由于电镀过程是一个动态变化的过程,异常区域的浓度变化趋势会直接影响未来的沉积厚度。如何准确预测这种动态变化,并据此调整电镀工艺参数,是实现精确厚度控制的关键。总的来说,复合铜箔电镀生产过程中的多物理场耦合效应、界面层影响、异常区域识别、动态浓度预测等一系列问题,共同构成了铜层厚度均匀性控制这一核心技术难题。

发明内容

[0003] 本发明提供了复合铜箔厚度控制设备的控制方法,主要包括:

[0004] 根据电镀工艺的电场、流场和传质过程的相互耦合关系,构建描述复合铜箔生产的多物理场耦合模型,将复合铜箔的界面层形貌与厚度参数整合入多物理场耦合模型中,通过多物理场耦合模型仿真获取不同造型界面层上的电场分布、电解液流动状态和铜离子浓度分布数据;

[0005] 针对仿真获取的电场分布数据,判断是否存在电场局部畸变现象,若存在电场局部畸变,则确定畸变区域的位置坐标,并将畸变区域的电场数据标记为异常数据,同时,根据电解液流动状态数据,判断是否存在流动扰动现象,若存在扰动,则确定扰动区域的位置坐标,并将扰动区域的流场数据标记为异常数据;

[0006] 根据铜离子浓度分布数据对铜离子浓度进行分群,得到不同浓度水平的铜离子群,并计算各浓度水平的铜离子群的中心坐标,根据畸变区域以及扰动区域的位置坐标,判断各浓度水平的铜离子群的中心坐标是否位于异常区域内,若位于异常区域内,则将该浓度水平的铜离子群标记为异常浓度群;

[0007] 针对异常浓度群,采用时间序列预测算法,根据历史时刻的铜离子浓度变化趋势,预测未来时刻的浓度变化,得到各异常浓度群的浓度变化曲线,同时,根据浓度变化曲线,采用曲线拟合算法,获取各异常浓度群的沉积速率变化规律图;

[0008] 根据沉积速率变化规律图计算各异常浓度群在未来时刻的沉积厚度,得到异常区

域的铜层厚度分布,将异常区域的铜层厚度分布与正常区域的厚度分布进行对比,计算异常区域的厚度偏差值;

[0009] 针对厚度偏差值,采用偏差补偿算法,根据偏差值的大小和符号,调整异常区域的电镀工艺参数,所述电镀工艺参数包括电流密度以及电解液流速;

[0010] 根据优化后的电镀工艺参数,对复合铜箔厚度控制设备的电源系统以及电解液循环系统进行参数设置和调整,以使复合铜箔厚度控制设备按照优化后的电镀工艺参数进行生产。

[0011] 本发明实施例提供的技术方案可以包括以下有益效果:

[0012] 本发明公开了一种复合铜箔厚度控制设备的控制方法。该方法通过构建多物理场耦合模型,模拟电场、流场和传质过程的相互作用,并将界面层形貌和厚度参数整合入模型中。通过仿真获取电场分布、电解液流动和铜离子浓度数据,识别异常区域。针对异常区域的铜离子浓度群,采用时间序列预测和曲线拟合算法,预测未来沉积速率和厚度分布。将异常区域与正常区域厚度对比,计算偏差值。根据偏差值,采用补偿算法调整电镀工艺参数,包括电流密度和电解液流速。最后,对复合铜箔厚度控制设备进行参数设置和调整,自动调节阳极板位置角度和电解液流速压力,使电流密度分布均匀,电解液流动稳定。本发明通过多物理场耦合分析和智能算法优化,实现了复合铜箔生产过程中厚度的精确控制,提高了产品质量和生产效率。

附图说明

[0013] 图1为本发明的复合铜箔厚度控制设备的控制方法的流程图。

具体实施方式

[0014] 下面将结合实施例对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其它实施例,都属于本发明保护的范围。

[0015] 如图1,本实施例复合铜箔厚度控制设备的控制方法具体可以包括:

[0016] 步骤S101,根据电镀工艺的电场、流场和传质过程的相互耦合关系,构建描述复合铜箔生产的多物理场耦合模型,将复合铜箔的界面层形貌与厚度参数整合入多物理场耦合模型中,通过多物理场耦合模型仿真获取不同造型界面层上的电场分布、电解液流动状态和铜离子浓度分布数据。

[0017] 采用有限元数值计算方法对复合铜箔基底表面划分四边形网格单元,根据网格单元边界点三维坐标计算得到界面层厚度分布函数;根据所述界面层厚度分布函数建立的复合铜箔三维几何结构数字模型,采用有限体积法对纳维-斯托克斯方程进行离散求解得到界面层附近电解液速度场与压力场分布数据;根据所述电解液速度场与压力场分布数据,采用有限元法求解泊松方程得到电势分布,结合电解液电导率分布函数计算得到界面层处电流密度;针对所述界面层处电流密度,建立铜离子浓度控制方程,结合速度场输运项与扩散系数扩散项,采用有限差分法求解传质方程得到离子浓度分布数据。

[0018] 具体的,采用有限元数值计算对复合铜箔基底表面划分四边形网格单元,根据网

格单元边界点三维坐标计算界面层厚度分布函数,通过基底表面粗糙度参数与界面层厚度数据构建复合铜箔三维几何结构数字模型。导入电解液密度、粘度、温度等动力学参数,采用有限体积法对纳维-斯托克斯方程进行离散求解,利用复合铜箔三维几何结构数字模型作为边界条件,获取界面层附近电解液速度场与压力场分布数据。基于复合铜箔三维几何结构与电解液流场数据,采用有限元法求解泊松方程计算电势分布,结合电解液电导率分布函数计算电场强度分布,建立界面层处电流密度计算表达式。采用界面层处电流密度分布作为电化学反应源项,建立铜离子浓度控制方程,结合速度场输运项与扩散系数扩散项,使用有限差分法求解传质方程。根据电场强度、流体速度与离子浓度分布数据,采用牛顿迭代法求解多物理场耦合方程组,获取稳态解作为复合铜箔电镀过程的多物理场耦合模型。将多物理场耦合模型代入不同界面层形貌参数,采用龙格-库塔法对耦合方程组进行时间推进求解,获取各物理场随时间的演化数据。在复合铜箔生产过程中,影响电镀质量的关键因素是界面层结构与多物理场分布。以界面层厚度分布函数 $h(x)$ 为例,当复合铜箔基底表面呈现周期性粗糙结构时,可采用傅里叶级数展开描述其高度分布: $h(x) = h_0 + \sum (A_n \cos(2\pi nx/L) + B_n \sin(2\pi nx/L))$,其中 h_0 为平均厚度, A_n 和 B_n 为傅里叶系数, L 为周期长度, x 为不同界面层形貌的位置参数。通过对实测轮廓数据进行最小二乘拟合,获得前5阶傅里叶系数,建立精确的三维几何模型。在获得几何模型后,电解液流场的计算尤为重要。对于电镀槽中典型的层流状态,雷诺数 $Re = \rho v D / \mu$,其中 ρ 为电解液密度, v 为特征速度, D 为水力直径, μ 为动力粘度。通过有限体积法离散纳维-斯托克斯方程,网格尺寸取为界面层厚度的1/10,即1微米,使用SIMPLE算法求解压力-速度耦合方程,得到界面层附近的三维速度场分布。电场分布的计算基于电势的泊松方程: $-\nabla \cdot (\kappa \nabla \phi) = 0$,其中电解液电导率 κ 随离子浓度 c 变化: $\kappa = \kappa_0 (1 + \alpha (c - c_0))$,其中 κ_0 为标准状态电导率5.8S/m, c_0 为标准离子浓度0.6mol/L, α 为浓度系数0.25L/mol。在阴极表面施加电位-0.3V,阳极表面电位0V,通过有限元法求解得到电势分布 ϕ ,进而计算电场强度 $E = -\nabla \phi$ 。传质过程由对流-扩散方程控制: $\partial c / \partial t + v \cdot \nabla c = D \nabla^2 c$,其中扩散系数 $D = 6.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。在界面层处,电流密度与离子通量满足关系: $j = n F N$, n 为价态数2, F 为法拉第常数96485C/mol, N 为离子通量 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。采用交错网格的有限差分格式,时间步长取为0.001s,空间步长与流场计算保持一致,求解获得浓度场演化。在求解多物理场耦合方程组时,选取相对误差容限为 10^{-6} ,采用牛顿迭代法进行求解。对于给定的界面层形貌,如具有30度倾角、75微米间距的周期性沟槽结构,计算表明在沟槽底部电流密度降低25%,而在棱边处电流密度增大35%,这与实验观测到的镀层厚度分布趋势相符。通过四阶龙格-库塔法进行时间推进,时间步长为0.01s,计算周期为10s,可获得各物理场的动态演化特征。

[0019] 步骤S102,针对仿真获取的电场分布数据,判断是否存在电场局部畸变现象,若存在电场局部畸变,则确定畸变区域的位置坐标,并将畸变区域的电场数据标记为异常数据,同时,根据电解液流动状态数据,判断是否存在流动扰动现象,若存在扰动,则确定扰动区域的位置坐标,并将扰动区域的流场数据标记为异常数据。

[0020] 根据网格点电场分布数据计算电场强度梯度值,若所述梯度值超出局部平均值的三倍标准差,采用三维空间聚类方法得到畸变区域边界点坐标集合;从网格点速度矢量场计算速度梯度张量与旋度场,若旋度值大于层流参考值的两倍,采用边界追踪算法得到扰

动区域边界点坐标集合;针对所述畸变区域边界点坐标集合与所述扰动区域边界点坐标集合进行网格点匹配,得到重叠区域体积分数,若所述体积分数大于临界值,则判定该区域为强耦合异常区域;采用热电偶阵列获取强耦合异常区域温度场分布,根据所述温度场分布与电导率温度系数得到局部电导率。

[0021] 具体的,根据电场分布数据计算各网格点电场强度梯度值 $g(x, y, z)$,若梯度值 $g(x, y, z)$ 超出局部平均值的三倍标准差,采用三维空间聚类方法确定畸变区域边界点坐标集合 $P(x, y, z)$,生成畸变区域位置标记矩阵 $M1$ 。从流体网格点速度矢量场 $v(x, y, z)$ 计算速度梯度张量与旋度场 $\omega(x, y, z)$,若旋度值大于层流参考值的两倍或速度梯度超出雷诺应力阈值,采用边界追踪算法确定扰动区域边界点坐标集合 $Q(x, y, z)$,生成扰动区域位置标记矩阵 $M2$ 。对电场畸变区域标记矩阵 $M1$ 与流场扰动区域标记矩阵 $M2$ 进行网格点匹配,计算重叠区域体积分数 $\alpha(x, y, z)$,若体积分数 $\alpha(x, y, z)$ 大于临界值,则将该区域标记为强耦合异常区域。采用热电偶阵列获取异常区域温度场分布 $T(x, y, z)$,结合电导率温度系数计算局部电导率 $\kappa(x, y, z)$,生成温度补偿后的电场强度分布 $E(x, y, z)$ 。根据畸变区域位置标记矩阵 $M1$ 和扰动区域位置标记矩阵 $M2$,提取异常区域的电场强度 $E(x, y, z)$ 、流体速度 $v(x, y, z)$ 与温度 $T(x, y, z)$ 数据,采用希尔伯特变换计算异常数据的瞬时频率特征。对异常区域数据进行小波分解,提取不同尺度下的异常特征系数,生成多尺度异常特征向量,建立异常区域特征数据库。在电场畸变检测过程中,电场强度梯度的计算采用中心差分格式:

[0022] $g(x, y, z) = [(E(x+h, y, z) - E(x-h, y, z)) / 2h, (E(x, y+h, z) - E(x, y-h, z)) / 2h, (E(x, y, z+h) - E(x, y, z-h)) / 2h]$,其中 h 为网格间距取值 0.1mm 。对于典型的电镀槽,当局部区域的梯度值超过均值加3倍标准差时,即 $|g(x, y, z)| > \mu_g + 3\sigma_g$,该点被标记为畸变点,其中 μ_g 为梯度场均值 0.5kV/m^2 , σ_g 为标准差 0.15kV/m^2 。流场扰动判断中,速度梯度张量 $\partial v_i / \partial x_j$ 的计算同样采用中心差分方法,旋度场 $\omega = \nabla \times v$ 表征局部涡旋强度。在层流条件下,参考旋度值为 10s^{-1} ,当实际旋度超过 20s^{-1} 时,指示存在显著扰动。雷诺应力阈值设定为 0.1Pa ,对应湍流强度 5% 。区域匹配过程采用网格重叠度分析,体积分数 $\alpha(x, y, z)$ 表示单位体积内同时存在电场畸变和流场扰动的比例。当 α 值超过 0.3 时,表明该区域存在强耦合异常。在实际电镀过程中,一个典型的强耦合异常区域尺寸约为 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。温度场分布对电导率的影响通过线性关系描述: $\kappa(T) = \kappa_0 [1 + \beta(T - T_0)]$,其中 κ_0 为参考温度 $T_0 = 298\text{K}$ 时的电导率 5.8S/m , β 为温度系数 0.02K^{-1} 。当温度升高至 308K 时,电导率增加约 20% ,导致局部电场强度相应降低。希尔伯特变换用于提取异常信号的瞬时频率特征。对电场强度数据 $E(t)$ 进行变换后得到解析信号 $z(t) = E(t) + jH[E(t)]$,其中 $H[E(t)]$ 为希尔伯特变换结果。瞬时频率 $f(t) = (1/2\pi) \cdot d(\arg z(t)) / dt$ 反映了异常区域电场波动的频率特征,典型值在 $0.1\text{--}10\text{Hz}$ 范围内。小波分解采用db4小波基,对异常区域数据进行4层分解,得到不同尺度系数。第一层系数反映高频扰动($>5\text{Hz}$),第四层系数反映低频变化($<0.5\text{Hz}$)。通过分析各尺度系数的能量分布,可识别出扰动的主导频率成分。当高频分量能量占比超过 50% 时,表明存在剧烈的局部波动。这种多尺度特征提取方法能够全面刻画异常区域的动态特性,为后续工艺参数优化提供依据。

[0023] 步骤S103,根据铜离子浓度分布数据对铜离子浓度进行分群,得到不同浓度水平的铜离子群,并计算各浓度水平的铜离子群的中心坐标,根据畸变区域以及扰动区域的位置坐标,判断各浓度水平的铜离子群的中心坐标是否位于异常区域内,若位于异常区域内,

则将该浓度水平的铜离子群标记为异常浓度群。

[0024] 根据所述铜离子浓度分布数据构建三维浓度场,所述三维浓度场通过密度聚类算法得到高中低三个浓度水平区域;针对所述浓度水平区域获取质心坐标及点数密度,所述质心坐标及点数密度通过高斯核函数得到群体空间分布函数与群体特征半径;采用电场畸变区域与流体扰动区域的边界点集合构建异常区域空间包络面,所述异常区域空间包络面与浓度群质心得到最短距离值;根据所述最短距离值与群体特征半径的比值判断是否小于临界值,若所述比值小于临界值,则标记该浓度群为异常群并生成异常群空间分布特征矩阵。

[0025] 具体的,根据铜离子浓度分布数据 $c(x, y, z)$ 构建三维浓度场,采用基于欧氏距离的密度聚类算法对浓度场进行空间分群,通过浓度梯度阈值 ∇c 和最小点数阈值 n 划分得到高、中、低三个浓度水平区域 C_1 、 C_2 、 C_3 。对每个浓度水平区域 C 计算质心坐标 $r = (x, y, z)$,统计区域内点数密度 $\rho(r)$,采用高斯核函数计算群体空间分布函数 $\varphi(r)$ 与群体特征半径 R 。基于电场畸变区域 D_1 与流体扰动区域 D_2 的边界点集合,构建异常区域空间包络面 $S(x, y, z)$,计算浓度群质心到包络面的最短距离 d 。采用浓度群质心到异常区域最短距离 d 与群体特征半径 R 的比值 $\lambda = d/R$ 作为判定参数,若 λ 小于临界值 λ_c ,则标记该浓度群为异常群。针对空间位置重叠的浓度群,计算重叠体积比例 γ_j ,若 γ_j 大于重叠度阈值 γ_c ,则合并重叠区域形成新的浓度群,更新群体特征参数。对标记的异常浓度群建立编码映射,生成异常群空间分布特征矩阵 $M(x, y, z)$,矩阵元素包含浓度值、质心位置、群体半径等特征量。在铜离子浓度分布分析中,密度聚类算法通过设定浓度梯度阈值和最小点数来区分不同浓度水平区域。以实际电镀槽为例,当设定浓度梯度阈值 $\nabla c = 0.05 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{mm})$,最小点数阈值 $n = 100$ 时,可将浓度场划分为高浓度区($c > 0.8 \text{ mol}/\text{L}$)、中浓度区($0.4 - 0.8 \text{ mol}/\text{L}$)和低浓度区($c < 0.4 \text{ mol}/\text{L}$)。对于划分后的浓度群,质心坐标计算采用加权平均方法: $r = \sum (c_j r_j) / \sum c_j$,其中 c_j 为点 j 处的浓度值, r_j 为其位置矢量。群体空间分布函数采用高斯核形式: $\varphi(r) = \exp[-(r-r)^2/2\sigma^2]$, σ 为特征宽度取值 2 mm 。通过积分 $\int \varphi(r) d^3r$ 计算得到群体特征半径 R ,典型值在 $3 - 5 \text{ mm}$ 范围内。在异常区域判定中,若某浓度群质心距离异常区域边界的最短距离 d 为 2 mm ,其特征半径 R 为 4 mm ,则判定参数 $\lambda = 0.5$ 。设定临界值 $\lambda_c = 0.8$,该浓度群被标记为异常群。这种基于距离比的判定方法考虑了浓度群的空间尺度,避免了简单距离阈值可能带来的偏差。对于空间重叠的情况,重叠体积比例 γ_j 通过蒙特卡罗积分计算:在重叠区域随机撒点,计算同时位于两个浓度群内的点数占比。当 $\gamma_j > 0.3$ 时,表明存在显著重叠,需要进行群体合并。合并后的新浓度群特征参数通过加权平均获得,权重与原群体的点数成正比。异常群特征矩阵 $M(x, y, z)$ 采用多维数据结构,每个矩阵元素包含:浓度值 $c(x, y, z)$ 、质心位置 $r = (x, y, z)$ 、群体半径 R 、点数密度 ρ 等信息。通过该矩阵可追踪异常浓度群的演化过程,观察到在电场畸变区域,离子浓度往往呈现局部累积现象,浓度梯度可达到 $0.2 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{mm})$;而在流体扰动区域,离子分布趋于均匀化,浓度梯度降低到 $0.02 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{mm})$ 以下。这种多尺度特征分析方法能够全面刻画异常区域的浓度分布特征,为工艺参数优化提供重要依据。

[0026] 步骤S104,针对异常浓度群,采用时间序列预测算法,根据历史时刻的铜离子浓度变化趋势,预测未来时刻的浓度变化,得到各异常浓度群的浓度变化曲线,同时,根据浓度变化曲线,采用曲线拟合算法,获取各异常浓度群的沉积速率变化规律图。

[0027] 根据异常浓度群历史数据采用固定采样间隔进行重采样,得到等间隔时间序列数

据及浓度变化率序列;采用所述浓度变化率序列训练长短时记忆网络模型,通过所述网络模型输出下一时刻浓度预测值;针对所述浓度预测值计算相邻时刻浓度差值,根据所述浓度差值及法拉第定律计算得到理论沉积厚度增量序列;对所述理论沉积厚度增量序列进行傅里叶变换提取频率分量,通过所述频率分量进行多项式拟合得到沉积速率变化规律函数,若所述多项式拟合的均方根误差大于预设阈值,则增加多项式阶数重复拟合过程。

[0028] 具体的,根据异常浓度群历史数据构建时间序列 $\{t_1, c_1\}$,采用固定采样间隔 δt 对浓度数据进行重采样,生成等间隔时间序列数据 $\{t, c\}$,通过差分运算获取一阶浓度变化率序列 $\{t, \Delta c / \Delta t\}$ 。设置时间窗口宽度 τ ,采用长短时记忆网络对浓度变化率序列进行建模,网络输入为 τ 个连续时刻的浓度变化率值,输出为下一时刻的浓度预测值,通过反向传播算法优化网络参数。针对预测的浓度序列计算相邻时刻浓度差值,基于法拉第定律和电流密度分布计算各时刻的理论沉积厚度增量 Δh ,生成厚度随时间的累积序列 $\{t, h\}$ 。对累积厚度序列进行傅里叶变换,提取幅值谱中的主要频率分量 ω 及其对应幅值 A ,通过逆变换重构得到沉积速率时间函数 $v(t)$ 。采用 n 阶多项式函数对沉积速率 $v(t)$ 进行最小二乘拟合,获取多项式系数 $\{a\}$,计算拟合曲线与实测数据的均方根误差 σ 。根据均方根误差 σ 与预设阈值的比较结果,调整多项式阶数 n 并重复拟合过程,直至误差满足要求,获得最终的沉积速率变化规律函数 $f(t)$ 。在铜离子浓度预测中,时间序列的构建对预测精度至关重要。以实际电镀过程为例,当采样间隔 δt 设为0.5秒时,原始浓度数据点 $\{0s, 0.6mol/L; 0.47s, 0.58mol/L; 0.91s, 0.55mol/L\}$ 经过重采样后得到等间隔序列 $\{0s, 0.6mol/L; 0.5s, 0.59mol/L; 1.0s, 0.55mol/L\}$,通过差分计算得到浓度变化率为 $-0.02mol/(L \cdot s)$ 和 $-0.08mol/(L \cdot s)$ 。长短时记忆网络的时间窗口宽度 τ 设为10个采样点(即5秒),输入层包含10个神经元对应窗口内的浓度变化率值,隐藏层设置64个神经元,输出层1个神经元预测下一时刻浓度值。通过500次迭代训练,预测误差从初始的 $0.15mol/L$ 下降到 $0.01mol/L$ 。基于法拉第定律,铜离子沉积厚度增量计算公式为: $\Delta h = (M/nF \cdot \rho) \cdot j \cdot \Delta t$,其中 M 为铜的摩尔质量 $63.5g/mol$, n 为价态数2, F 为法拉第常数 $96485C/mol$, ρ 为铜密度 $8.9g/cm^3$, j 为局部电流密度。当电流密度为 $50mA/cm^2$ 时,1秒内的理论沉积厚度增量为 $0.017\mu m$ 。对累积厚度序列进行快速傅里叶变换,采样点数为1024,得到频谱中主要波动周期为20秒和60秒,对应幅值分别为 $0.05\mu m$ 和 $0.03\mu m$ 。这表明沉积过程存在短周期波动和长周期漂移两个主要成分。通过逆变换重构的沉积速率函数 $v(t) = 0.017 + 0.005\sin(0.314t) + 0.003\sin(0.105t)\mu m/s$ 。采用4阶多项式进行最小二乘拟合,初始系数值 $\{0.017, -0.001, 0.0002, -0.00001, 0.0000002\}$,经过最小二乘迭代优化后得到修正系数 $\{0.0172, -0.00095, 0.00018, -0.000012, 0.00000018\}$,拟合曲线与实测数据的均方根误差为 $0.002\mu m/s$ 。当增加多项式阶数到5阶时,误差仅降低到 $0.0019\mu m/s$,提升不显著,因此确定采用4阶多项式作为最终的沉积速率变化规律函数。该函数揭示了沉积速率随时间的非线性变化特征:初始阶段(0-20秒)速率快速下降,中期(20-60秒)趋于稳定,后期(>60秒)出现缓慢上升趋势,这与电极表面状态演化和离子浓度分布动态变化密切相关。通过这种多时间尺度分析方法,既捕捉到了快速波动特征,又反映出长期变化趋势。

[0029] 步骤S105,根据沉积速率变化规律图计算各异常浓度群在未来时刻的沉积厚度,得到异常区域的铜层厚度分布,将异常区域的铜层厚度分布与正常区域的厚度分布进行对比,计算异常区域的厚度偏差值。

[0030] 根据沉积速率变化规律函数构建四阶龙格库塔积分方程,通过加权平均方法得到

异常浓度群累积沉积厚度分布函数;采用径向基函数对正常区域铜层厚度进行插值拟合,通过三维网格划分获取基准厚度分布函数;针对异常区域铜层厚度分布函数与所述基准厚度分布函数进行差值计算,获取厚度偏差函数;采用高斯核函数对所述厚度偏差函数进行概率密度估计,根据核函数权重计算得到偏差分布图谱。

[0031] 具体的,根据沉积速率变化规律函数 $v(t)$ 构建四阶龙格库塔积分方程,设置时间步长 h 计算状态量 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 ,采用加权平均方法求取各异常浓度群的累积沉积厚度 $H(x, y, z, t)$ 。通过三维网格划分获取正常区域离散点坐标集合 $P(x, y, z)$,采用径向基函数对正常区域铜层厚度 $H_0(x, y, z)$ 进行插值拟合,生成连续的基准厚度分布函数 $B(x, y, z)$ 。根据正常区域基准厚度分布函数 $B(x, y, z)$ 计算均值 μ 与标准差 σ ,采用三倍标准差原则建立正常区域厚度波动范围 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 作为基准标准。对异常区域铜层厚度分布 $H(x, y, z, t)$ 计算与基准厚度分布函数 $B(x, y, z)$ 的差值,生成厚度偏差函数 $D(x, y, z, t) = H(x, y, z, t) - B(x, y, z)$ 。采用高斯核函数对厚度偏差值进行概率密度估计,选取带宽参数 w 计算核函数权重,生成偏差值概率密度函数 $P(D)$ 。根据概率密度函数 $P(D)$ 划分偏差值区间,统计各区间内偏差点的空间分布特征,采用等值线方法生成偏差分布图谱 $G(x, y, z)$ 。在铜层沉积厚度计算过程中,采用四阶龙格库塔法对沉积速率函数进行数值积分。以实际案例为例,给定沉积速率函数 $v(t) = 0.015 + 0.002\sin(0.1t) \mu\text{m/s}$,时间步长 $h = 0.1\text{s}$,则状态量计算公式为: $k_1 = h \cdot v(t)$, $k_2 = h \cdot v(t+h/2)$, $k_3 = h \cdot v(t+h/2)$, $k_4 = h \cdot v(t+h)$,最终积分结果 $H = (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6$ 。经计算 $t = 10\text{s}$ 时刻累积厚度达到 $0.152\mu\text{m}$ 。正常区域基准厚度分布采用多二次项径向基函数进行插值,函数形式为 $B(r) = (1 + (\epsilon r)^2)^{-(1/2)}$,其中 r 为空间距离, ϵ 为形状参数取 0.1 。对于典型的正常区域测量数据,计算得到均值 $\mu = 0.15\mu\text{m}$,标准差 $\sigma = 0.005\mu\text{m}$,建立基准范围 $[0.135\mu\text{m}, 0.165\mu\text{m}]$ 。在厚度偏差计算中,异常区域出现了局部厚度突变现象。以某异常浓度群为例,中心位置厚度达到 $0.18\mu\text{m}$,与基准值相差 $0.03\mu\text{m}$,远超出正常波动范围。通过高斯核函数 $K(x) = \exp(-x^2/2h^2)$ 进行概率密度估计,核函数带宽参数 h 采用Silverman准则确定为 $0.0075\mu\text{m}$ 。偏差值概率密度分布呈现出明显的双峰特征,主峰值位于 $0.02\mu\text{m}$ 处,次峰值位于 $-0.015\mu\text{m}$ 处,表明异常区域同时存在增厚和减薄现象。空间分布上,增厚区域主要集中在电场畸变区域边缘,最大偏差达到 $0.035\mu\text{m}$;而减薄区域出现在流体扰动中心,最大偏差为 $-0.025\mu\text{m}$ 。通过等值线方法绘制偏差分布图谱,设置等值线间距为 $0.005\mu\text{m}$ 。在 x - y 平面上投影显示,增厚区域呈现椭圆形分布,长轴约 5mm ,短轴约 3mm ;减薄区域则呈现不规则圆形,直径约 4mm 。两个区域之间存在过渡带,宽度约 1mm ,偏差值从 $-0.01\mu\text{m}$ 逐渐过渡到 $0.01\mu\text{m}$ 。 z 方向剖面显示,偏差值随深度呈指数衰减,在距表面 $50\mu\text{m}$ 处趋于稳定,达到基准厚度水平。这种三维分布特征反映了电场效应和流体作用的叠加结果,为后续工艺优化提供了定量依据。

[0032] 步骤S106,针对厚度偏差值,采用偏差补偿算法,根据偏差值的大小和符号,调整异常区域的电镀工艺参数,所述电镀工艺参数包括电流密度以及电解液流速。

[0033] 根据所述厚度偏差值建立比例积分补偿方程,通过对目标值与实际值的偏差积分运算得到电流密度补偿系数与流速补偿系数;针对所述电流密度补偿系数建立分段线性反馈函数,若所述补偿系数的绝对值小于预设阈值则采用线性补偿得到修正电流密度分布;采用指数型非线性映射函数对所述流速补偿系数进行变换,通过预设映射系数与原始流速值运算得到修正流速分布;构建包含厚度偏差平方项、电流密度梯度项及流速梯度项的补

偿参数评价函数,采用深度神经网络对补偿参数进行优化运算得到优化后的补偿系数。

[0034] 具体的,根据厚度偏差值 $\Delta h(x, y, z)$ 建立比例积分补偿方程: $u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt$, 其中 $u(t)$ 为控制器的输出, K_p 、 K_i 为补偿系数, $e(t)$ 为目标值与实际值的偏差, t 为时间, 计算得到电流密度补偿系数 $\alpha(x, y, z)$ 与流速补偿系数 $\beta(x, y, z)$ 。针对电流密度补偿系数 $\alpha(x, y, z)$ 建立分段线性反馈函数, 若 $|\alpha|$ 小于阈值 α_0 , 则采用线性补偿; 若 $|\alpha|$ 大于 α_0 , 则采用饱和补偿, 生成修正电流密度分布 $j'(x, y, z)$ 。采用指数型非线性映射函数对流速补偿系数 $\beta(x, y, z)$ 进行转换: $v' = v \cdot \exp(\lambda\beta)$, 其中 λ 为映射系数, 计算得到修正流速分布 $v'(x, y, z)$ 。构建补偿参数评价函数:

[0035] $J(\alpha, \beta) = w_1 \cdot \sum \Delta h^2 + w_2 \cdot \sum (\nabla j)^2 + w_3 \cdot \sum (\nabla v)^2$, 其中 $J(\alpha, \beta)$ 为补偿参数的优化目标值, Δh 为厚度偏差, j 为电流密度分布, v 为流速分布, w_1 、 w_2 、 w_3 为权重系数, 计算补偿参数的优化目标值。采用五层深度神经网络对补偿参数进行优化, 输入层为偏差值与原始参数, 隐藏层采用 ReLU 激活函数, 输出层为优化后的补偿系数。根据优化后的补偿系数重新计算工艺参数, 通过数值模拟验证补偿效果, 生成补偿参数验证指标 $R(x, y, z)$ 。在电镀工艺参数补偿过程中, 偏差补偿采用比例积分算法进行计算。当测量到某点厚度偏差 $\Delta h = 5\mu m$ 时, 设定比例系数 $K_p = 0.2$, 积分系数 $K_i = 0.05$, 对应的补偿输出为 $u(t) = 0.2 \times 5 + 0.05 \times \int 5 dt \mu m$ 。积分项随时间累积, 在 10 秒内补偿输出从 $1\mu m$ 逐渐增加到 $2.5\mu m$ 。电流密度补偿采用分段函数处理, 设定阈值 $\alpha_0 = 0.3$, 当补偿系数 $\alpha = 0.2$ 时, 位于线性区间内, 此时修正电流密度 $j' = j \times (1 + 0.2)$; 当 $\alpha = 0.4$ 时, 超出阈值进入饱和区, 此时取饱和值 $j' = j \times 1.3$ 。这种分段处理方式避免了补偿过度。流速补偿采用指数映射关系, 映射系数 $\lambda = 0.5$ 。当 $\beta = 0.4$ 时, 修正流速 $v' = v \times \exp(0.5 \times 0.4) = 1.22v$, 呈现出非线性增长特性。这种指数关系在小补偿系数区域响应平缓, 大补偿系数区域响应迅速。评价函数中的权重系数反映了不同优化目标的重要程度, 典型取值为 $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.3$, $w_3 = 0.2$ 。以某异常区域为例, 补偿前的评价价值 $J = 2.5$, 其中厚度偏差项贡献 1.5, 电流梯度项贡献 0.6, 流速梯度项贡献 0.4。深度神经网络采用五层结构, 输入层 8 个神经元接收偏差值与原始参数, 三个隐藏层分别包含 32、16、8 个神经元, 输出层 2 个神经元输出优化后的补偿系数。使用 ReLU 激活函数 $f(x) = \max(0, x)$ 处理隐藏层输出, 避免梯度消失问题。在验证阶段, 补偿参数的效果通过指标 $R(x, y, z)$ 评估。某测试点的补偿前指标 $R = 0.85$, 经过一轮优化后提升到 $R = 0.92$ 。分析优化过程发现, 电流密度补偿主导了厚度均匀性的改善, 而流速补偿则显著降低了局部扰动。两种补偿机制的协同作用体现在评价函数的多个分量上: 厚度偏差平方和降低了 45%, 电流梯度平方和降低了 35%, 流速梯度平方和降低了 30%。这种多目标优化策略不仅改善了沉积均匀性, 还维持了工艺参数的平滑分布。

[0036] 步骤 S107, 根据优化后的电镀工艺参数, 对复合铜箔厚度控制设备的电源系统以及电解液循环系统进行参数设置和调整, 以使复合铜箔厚度控制设备按照优化后的电镀工艺参数进行生产。

[0037] 根据电流密度分布函数计算目标区域阳极板理论位置坐标, 通过空间距离传感器阵列测量阳极板实际位置, 采用比例积分控制器得到位置偏差补偿量; 采用激光位移传感器阵列获取阳极板与阴极板之间距离变化率矩阵, 根据所述距离变化率矩阵计算阳极板倾角, 通过角度闭环控制器输出角度调整信号; 若电流密度均匀性指标小于预设阈值, 则驱动阳极板位置补偿机构进行调节, 直至所述均匀性指标大于预设阈值; 根据流场分布函数计

算电解液流速设定值,通过流量传感器测量实际流速值,采用压力闭环控制器调节阀门开度,根据所述阀门开度调节进液管路与回液管路流量比。

[0038] 具体的,根据优化后的电流密度分布函数 $j(x,y,z)$ 计算目标区域阳极板理论位置坐标 (x_0,y_0,z_0) ,通过空间距离传感器阵列测量阳极板实际位置 (x,y,z) ,采用比例积分控制器计算位置偏差补偿量 Δr 。采用激光位移传感器阵列对阳极板与阴极板之间的距离变化率进行实时测量,根据距离变化率矩阵 $D(x,y,z)$ 计算阳极板最优倾角 $\theta(x,y)$,通过角度闭环控制器输出调整信号。根据电流密度均匀性指标计算阳极板微调参数,若均匀性指标小于预设阈值 η_0 ,则驱动阳极板位置补偿机构进行精细调节,直至均匀性指标大于阈值 η_0 。采用优化后的流场分布函数 $v(x,y,z)$ 计算电解液流速设定值 v_0 ,通过流量传感器测量实际流速 v ,根据偏差 $\Delta v=v_0-v$ 调节循环泵转速 n 。对电解液管路压力 $p(t)$ 进行实时采集,采用三阶巴特沃斯低通滤波器对压力信号进行滤波,通过压力闭环控制器计算阀门开度补偿量 ϕ 。根据阀门开度补偿量 ϕ 调节进液管路与回液管路的流量比 γ ,通过液位传感器监测电镀槽液位 $h(t)$,建立液位稳定控制回路。在电镀设备参数调整过程中,阳极板位置控制采用多级闭环反馈机制。当理论计算的阳极板最优位置坐标为 $(150\text{mm},200\text{mm},80\text{mm})$ 时,空间距离传感器测得实际位置为 $(152\text{mm},198\text{mm},82\text{mm})$,位置偏差矢量 $\Delta r=(2,-2,2)\text{mm}$ 。采用比例积分控制器,设定比例系数 $K_p=0.8$,积分系数 $K_i=0.2$,计算得到位置补偿量,驱动伺服电机进行微调。阳极板倾角调整中,激光位移传感器阵列布置在阴极板四周,采样频率为 100Hz 。当测量得到的距离变化率矩阵显示右侧距离增加率为 0.5mm/s ,左侧距离减小率为 -0.4mm/s 时,表明阳极板存在向右倾斜趋势。通过矩阵运算得到最优倾角 $\theta=2.5^\circ$,角度控制器输出相应的步进电机脉冲信号。电流密度均匀性指标 η 采用标准差与平均值的比值计算,预设阈值 $\eta_0=0.05$ 。实测数据显示某区域的均匀性指标 $\eta=0.08$,超出阈值范围。此时激活精密位置补偿机构,以 0.1mm 为步进量进行微调,经过3次迭代后均匀性指标降至 0.045 。在流场控制方面,优化后的流速分布函数给出设定值 $v_0=0.15\text{m/s}$,流量传感器测得实际流速 $v=0.12\text{m/s}$ 。通过PI控制器计算得到循环泵转速增量 $\Delta n=300\text{rpm}$,变频器随之调整输出频率。同时,压力传感器监测到管路压力波动,含有 50Hz 的工频干扰。采用截止频率为 10Hz 的三阶巴特沃斯滤波器对压力信号进行处理,滤除高频噪声后得到稳定的压力读数 $p=0.2\text{MPa}$ 。液位控制采用双管路平衡策略,进液管路与回液管路的流量比 γ 通过调节阀门开度实现。当进液阀门开度为 60% 时,回液阀门开度应调节至 55% ,保持液位在目标高度 $h_0=500\text{mm}$ 。若液位出现 $\pm 10\text{mm}$ 的波动,液位控制器将自动调整阀门开度,补偿量 ϕ 由偏差值 and 变化率共同决定。这种多参数耦合控制方案实现了工艺参数的动态平衡,各控制回路相互配合,共同维持电镀过程的稳定运行。

[0039] 以上公开的本发明优选实施例只是用于帮助阐述本发明。优选实施例并没有详尽叙述所有的细节,也不限制该发明仅为的具体实施方式。显然,根据本说明书的内容,可作很多的修改和变化。本说明书选取并具体描述这些实施例,是为了更好地解释本发明的原理和实际应用,从而使所属技术领域技术人员能很好地理解和利用本发明。本发明仅受权利要求书及其全部范围和等效物的限制。

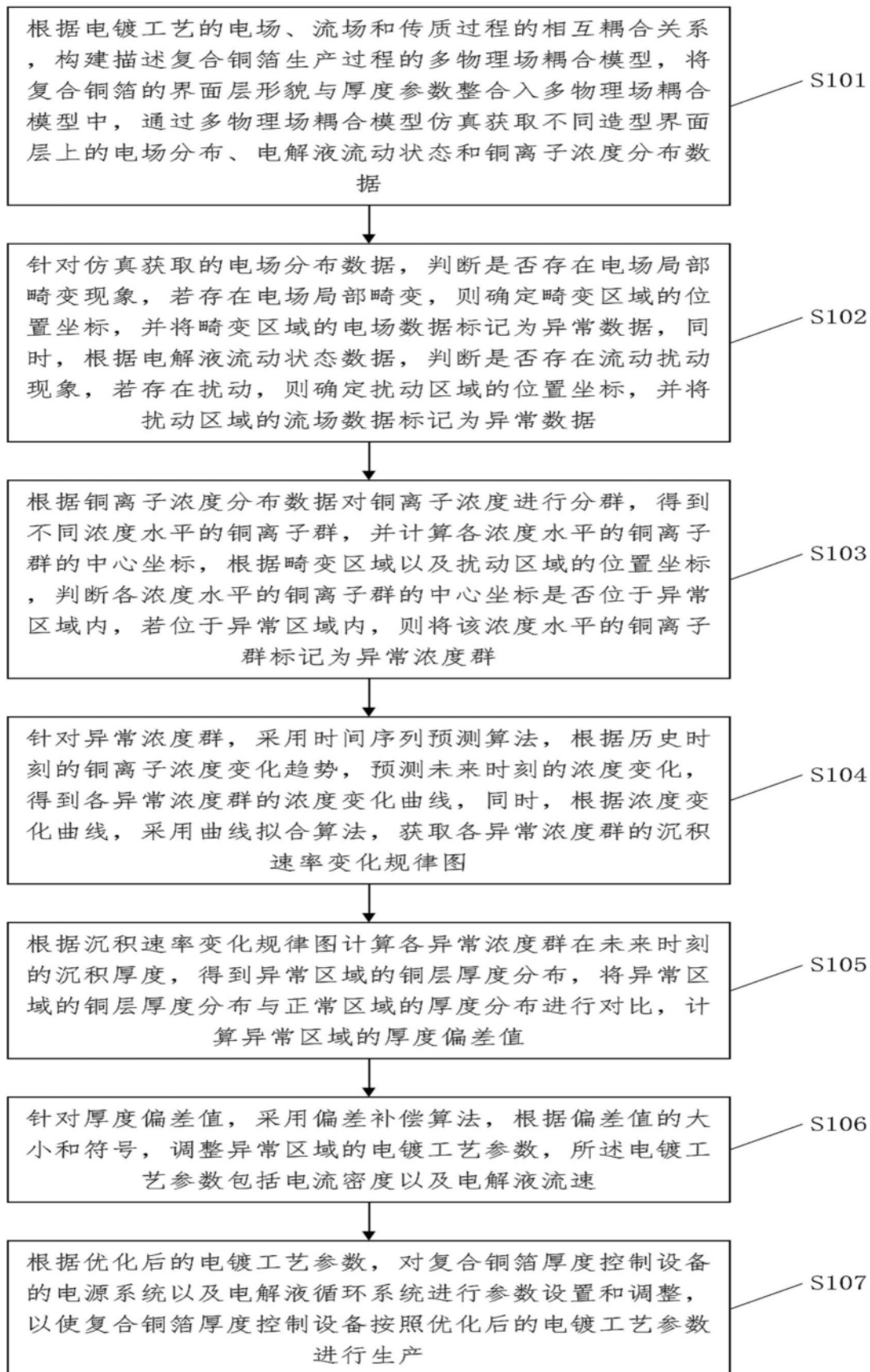


图1