

# 极片涂布面密度控制系统设计

王志凡\*, 任正云#

东华大学信息与智能科学学院, 上海

收稿日期: 2026年1月22日; 录用日期: 2026年2月14日; 发布日期: 2026年2月27日

## 摘要

极片涂布是锂电池生产的核心工序, 涂层均匀性直接决定锂电池的产品质量与使用安全。本研究基于上位机工控平台, 开发一套极片涂布面密度控制系统, 核心工作包含上位机软件研发与控制策略设计两大模块。其中, 控制策略是系统的技术核心, 涵盖被控对象模型辨识、控制器设计及控制方案开发等关键环节。实际应用结果表明: 该控制系统可有效提升涂布工序的过程能力, 显著降低锂电池生产成本。

## 关键词

锂电涂布, 上位机, 组合积分系统, 干湿膜双闭环控制

# Design of Areal Density Control System for Electrode Coating

Zhifan Wang\*, Zhengyun Ren#

School of Information and Intelligent Science, Donghua University, Shanghai

Received: January 22, 2026; accepted: February 14, 2026; published: February 27, 2026

## Abstract

Electrode coating is a core process in lithium-ion battery production, and the uniformity of the coating directly determines the product quality and operational safety of lithium-ion batteries. Based on the upper computer industrial control platform, this study developed an areal density control system for electrode coating, with the core work including upper computer software development and control strategy design. Among them, the control strategy is the technical core of the system, covering key links such as controlled object model identification, controller design and control scheme optimization. Practical application results show that the control system can effectively improve the process capability of the coating process and significantly reduce the production cost of

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王志凡, 任正云. 极片涂布面密度控制系统设计[J]. 软件工程与应用, 2026, 15(1): 116-126.

DOI: 10.12677/sea.2026.151012

lithium-ion batteries.

## Keywords

Li-Ion Electrode Coating, Upper Computer, Combined Integrating System, Dual Closed-Loop Control for Wet and Dry Films

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 新能源汽车与储能行业实现跨越式发展。锂电池凭借绿色环保、能量密度高、循环寿命长等优势, 已成为新能源汽车动力源与储能领域的首选方案[1]。据文献[2]统计, 2025年1~11月, 我国动力电池累计产量达1468.8吉瓦时, 同比增长51.1%; 累计销量达1044.3吉瓦时, 同比增长50.3%, 行业发展态势迅猛。

锂电池生产涵盖制浆、涂布、烘干、辊压、分切等多个复杂工序。其中, 涂布工序是决定电池性能的关键环节: 涂层过薄会导致电池容量不足, 涂层过厚则易引发脱嵌析锂现象, 直接影响电池的安全性与使用寿命[3]。当前行业内提升涂布均匀性的手段多聚焦于硬件优化, 例如改进涂布模头腔体结构、优化进料口尺寸、调整垫片厚度与倒角参数等[4][5]。然而, 涂布质量的提升是一项系统工程, 需兼顾硬件设备升级与软件过程调控, 单一环节的短板均会制约最终效果。

目前, 先进闭环控制技术在涂布工序中的应用尚未得到充分重视, 相关研究文献较为匮乏。尽管部分文献[6][7]探讨了涂布面密度闭环控制系统的设计, 但核心控制算法仍基于传统PID控制器, 且缺乏针对性的控制方案设计。鉴于此, 本研究基于某锂电池生产线硬件配置与控制需求, 设计一套基于上位机的涂布面密度控制系统。该系统通过分析被控对象特性完成控制器设计, 经仿真验证其相较于传统PID控制器的优越性; 同时针对现场干膜、湿膜检测设备的配置情况, 分别设计干膜单闭环与干湿膜双闭环控制方案, 实现控制策略的灵活适配。该系统已在锂电池生产线稳定运行, 有效提升了涂布过程能力, 降低了生产成本。

## 2. 极片涂布原理

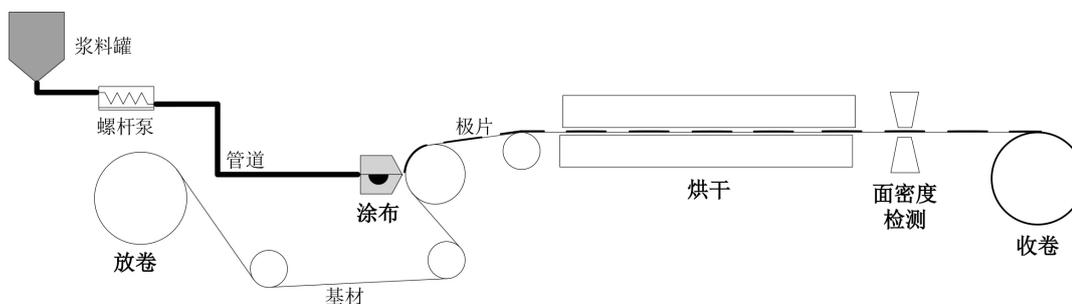


Figure 1. Schematic diagram of the electrode coating process

图1. 极片涂布段工艺流程示意图

锂电池极片涂布的本质, 是将由活性物质、导电剂、粘结剂及溶剂按特定比例混合制成的电极浆料,

通过涂布设备均匀、定量地涂覆在金属集流体表面。正极集流体通常采用铝箔，负极则采用铜箔。涂覆后的极片经干燥、辊压等后续工序，形成具有指定面密度与厚度的电极涂层，为电池充放电过程中锂离子的脱嵌与传输提供物理基础。涂布段工艺流程主要分为涂布、烘干、面密度在线检测三个环节，如图 1 所示。

### 2.1. 涂布

涂布工序是决定极片质量的核心环节。当前动力电池行业主流的闭环涂布控制系统，普遍采用狭缝式挤压涂布工艺，该工艺的稳定运行依赖浆料罐、螺杆泵、涂布头三大关键部件的协同配合：浆料罐内置搅拌装置，通过持续搅拌，确保浆料中活性物质、导电剂、粘结剂及溶剂的混合均匀性；螺杆泵作为定量输送核心，通过伺服电机调节转速实现浆料输送量的精准控制，保障涂层面密度的纵向分布一致性；狭缝式涂布头接收螺杆泵输送的浆料，在模腔内构建稳定流场，使浆料经狭缝以均匀薄膜状挤出并贴合集流体表面。模唇狭缝出口处配置分区 T 型调节块，每个 T 块独立连接伺服驱动单元，可根据面密度检测反馈信号实时微调对应区域的模唇狭缝间隙(调节精度可达 $\pm 1 \mu\text{m}$ )，控制对应分区的浆料流量实现对各分区面密度的控制，保障涂层面密度的横向分布一致性。因此在设计闭环控制策略时，通过分别控制螺杆泵转速和 T 块位移来保证面密度在纵向和横向两个方向上的一致性。涂布机头的实物图和极片面密度分区示意图如图 2 所示。

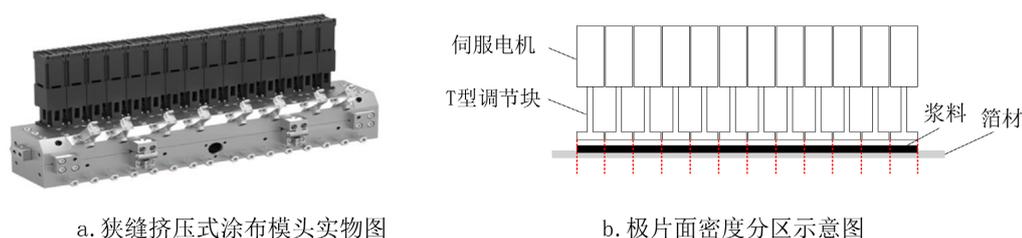


Figure 2. Physical map of slot-die coating head and zoning schematic diagram of electrode areal density  
图 2. 狭缝挤压式涂布模头实物图与极片面密度分区示意图

### 2.2. 烘干

涂布工序完成后，极片进入烘干环节。该环节通常在热风循环烘箱中进行，核心作用是精准去除涂布湿膜中的溶剂，使活性材料、导电剂、粘结剂等组分牢固附着在集流体表面，形成具备指定物理与电化学性能的干极片。烘干烘箱由多节单节烘箱串联组成，极片从进入烘箱到完成干燥通常需要数分钟时间。这一特性导致干膜面密度检测存在较大的纯滞后，为控制算法的设计带来挑战。

### 2.3. 面密度检测

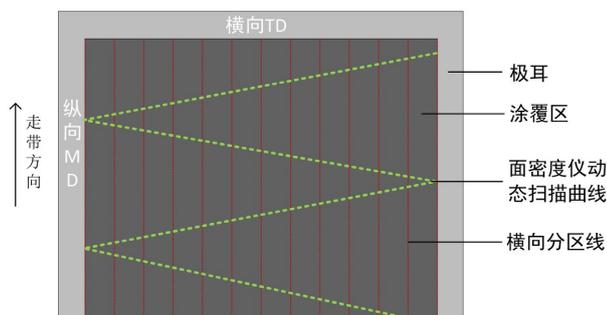


Figure 3. Schematic diagram of areal density detection scanning curve  
图 3. 面密度检测扫描曲线示意图

烘干完成后, 极片进入面密度检测环节。该环节普遍采用射线衰减法, 其原理为: 当射线穿透极片时, 射线强度会因极片的吸收作用而减弱, 且衰减程度与极片面密度呈正相关[8]。在锂电行业中,  $\beta$  射线法是应用最成熟、检测精度最高的在线检测技术。该技术配置的  $\beta$  线源检测仪架沿极片宽度方向往复移动, 同时极片沿传输方向持续行进, 因此面密度仪的检测轨迹呈“Z”字形, 如图 3 所示。

### 3. 极片涂布控制系统结构

#### 3.1. 控制系统介绍

结合现场工况、工艺标准及控制需求, 本研究开发基于上位机控制平台的极片涂布面密度控制系统。如图 4 所示, 系统硬件架构由三部分组成: 核心控制单元为工业 PC 机, 执行设备包括螺杆泵与 T 块伺服电机, 检测设备为面密度仪。上位机作为系统核心枢纽, 部署基于 C# 语言开发的专用控制软件, 功能模块涵盖操作显示界面开发、控制算法开发与数据通讯开发三大核心部分, 实现涂布面密度调控的可视化操作、智能控制与高效数据交互。系统具体工作流程如下:

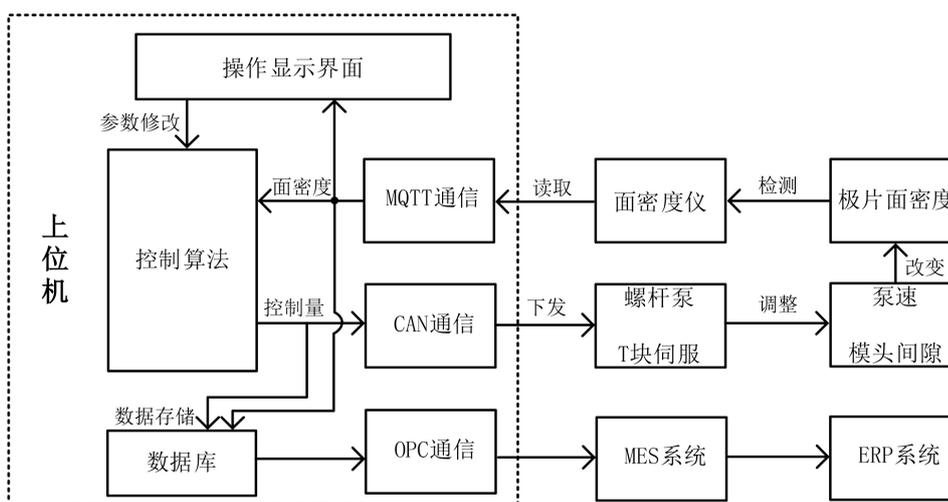


Figure 4. Block diagram of areal density control system for electrode coating

图 4. 极片涂布控制系统结构框图

#### 1、数据采集与监测

面密度仪实时检测极片面密度, 上位机通过 MQTT 协议读取面密度仪检测的面密度数据, 供控制算法模块使用, 同时上传至数据库。

#### 2、闭环控制与调节

控制算法根据设定值与实际面密度的差异, 结合相关控制参数, 计算出控制量, 并通过 CAN 通信下发指令至执行机构(螺杆泵、T 块伺服), 调整生产工艺参数, 实现面密度的闭环控制。

#### 3、人机交互与参数管理

操作人员可通过“操作显示界面”实时监控面密度数据和系统状态, 还可以修改控制参数、设定或修改目标值等。

#### 4、数据存储与通信

系统具备数据存储功能, 支持历史数据查询与分析。同时通过 OPC 协议与上层管理系统通信, 实现生产过程全流程监控与数据追溯。

### 3.2. 较其他控制系统的优势

基于上位机开发的极片涂布闭环控制系统，是集成数据采集、智能控制、人机交互与通信功能的工业自动化系统。相较于基于 PLC 或单片机的控制系统，本系统具有以下显著优势：

(1) 数据处理与分析能力更强

相较于 PLC 或单片机，基于 PC 端软件的上位机系统具备更强大的算力，可实现复杂算法的运行，同时能批量存储、分析面密度数据(如历史趋势、波动溯源)。

(2) 功能拓展更灵活

上位机可便捷集成 MQTT 通信、数据库对接、可视化报表等功能，并且可对接 MES、ERP 等生产管理系统，实现面密度数据与全产线的协同，部署成本更低。

(3) 人机交互体验更友好

上位机支持可视化界面(如实时曲线、数据看板)，操作与参数修改更直观；PLC 或单片机的人机交互多依赖简易触摸屏，界面信息有限、操作复杂度高。

## 4. 控制策略开发

### 4.1. 面密度数学模型

在设计控制策略前，需先建立面密度的数学模型。根据涂布原理，面密度闭环控制分为泵速控制与 T 块位移控制，分别对应纵向与横向面密度调控。因此需分别构建“泵速 - 均值面密度”与“T 块位移 - 分区面密度”的过程数学模型。本研究采用实验阶跃测试法辨识干膜面密度对象的数学模型，测试工况参数如下：

浆料类型：磷酸铁锂；

浆料粘度：6000 mPa·s；

浆料固含量：53%；

走带速度：60 m/min；

采样周期：5 s。

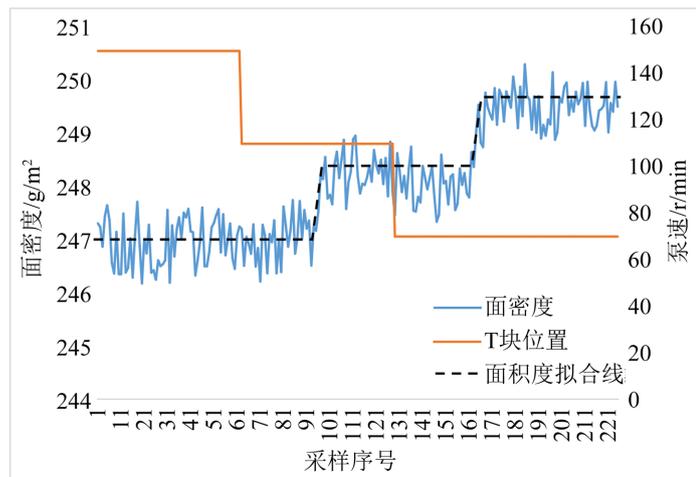
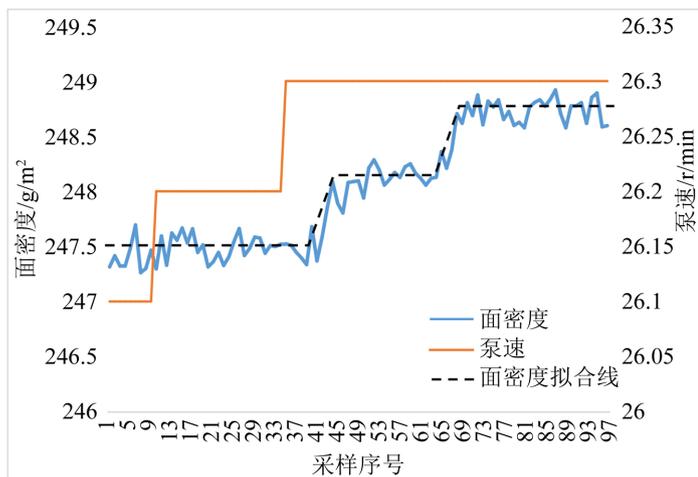


Figure 5. Step test response curve of t-block-zoned areal density

图 5. T 块 - 分区面密度阶跃测试响应曲线

图 5、图 6 分别为 T 块 - 分区面密度、泵速 - 均值面密度的阶跃测试响应曲线。

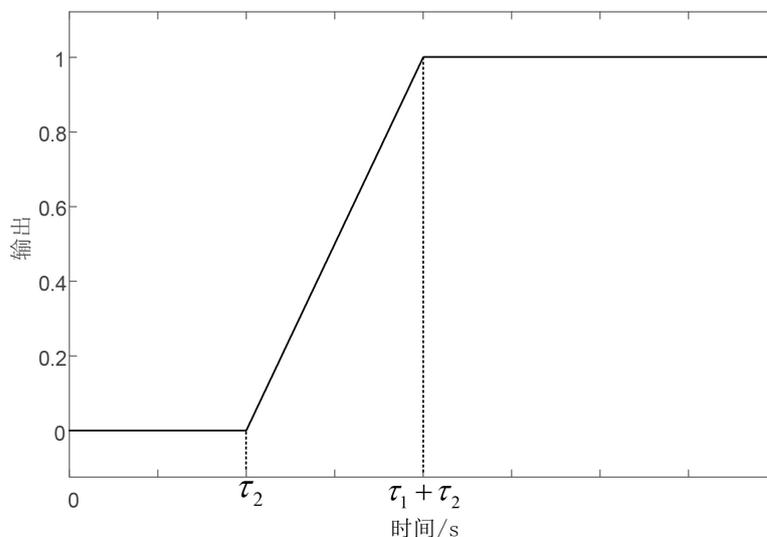


**Figure 6.** Step test response curve of pump speed-average areal density  
**图 6.** 泵速 - 均值面密度阶跃测试响应曲线

分析实验数据可知, 区别于 FOPDT 系统, 上述两个过程的输入输出特性符合组合积分系统[9]。组合积分系统传递函数表达式如(1)式:

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau_1 s} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} \quad (1)$$

其中  $k$  为比例系数,  $\tau_1$  为组合积分系统在阶跃信号作用下达到稳定状态的上升时间,  $\tau_2$  为纯滞后时间。组合积分系统的开环阶跃响应曲线如图 7: 系统输出经过纯滞后时间  $\tau_2$  后线性上升, 再经过  $\tau_1$  时间系统达到稳定状态。



**Figure 7.** Open-loop step response of the combined integrating process  
**图 7.** 组合积分过程的开环阶跃响应

根据图 5、图 6 的实验数据, 可以分别写出 T 块位移 - 分区面密度数学模型:

$$G_{D1}(s) = \frac{-0.031}{35s} (1 - e^{-35s}) e^{-150s} \quad (2)$$

泵速 - 均值面密度数学模型:

$$G_{D0}(s) = \frac{6}{42s} (1 - e^{-42s}) e^{-150s} \quad (3)$$

### 4.2. 控制器设计

由(2)式、(3)式可知, 面密度对象即具有组合积分特性还具有较大的纯滞后特性, 对此, 传统的PID控制算法无论如何整定控制器参数都难以取得令人满意的控制效果[10], 因此有必要对控制器进行重新设计。分析面密度过程对象的数学模型, 基于内模控制器的设计原理, 设计新型面密度控制器, 设计过程如下。

已知面密度过程的传递函数具有(1)式的形式, 选择所期望的闭环传递函数具有以下结构形式:

$$G_0(s) = \frac{1}{\lambda \tau_1 s} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} \quad (4)$$

可以推导出控制器的传递函数:

$$G_c(s) = \frac{G_0}{G_p(1-G_0)} = \frac{\tau_1 s (1 - e^{-\lambda \tau_1 s}) e^{-\tau_2 s}}{k(1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} [\lambda \tau_1 s - (1 - e^{-\lambda \tau_1 s}) e^{-\tau_2 s}]} \quad (5)$$

由(4)式可见, 期望的闭环传递函数与原组合积分系统类似, 其多出的参数  $\lambda$  用来调整系统的上升时间: 当  $\lambda < 1$  时, 闭环过程的响应速度快于开环过程的响应速度; 当  $\lambda = 1$  时, 闭环过程的响应速度等于开环过程的响应速度; 当  $\lambda > 1$  时, 闭环过程的响应速度慢于开环过程的响应速度。 $\lambda$  越小, 闭环过程的响应速度越快, 但系统的鲁棒稳定性变差; 反之  $\lambda$  越大, 闭环过程的响应速度越慢, 但系统的鲁棒稳定性增强。

控制器(5)在时间域的输入、输出关系为:

$$u(s) = \frac{(1 - e^{-\lambda \tau_1 s})}{\lambda k (1 - e^{-\lambda \tau_1 s})} e(s) + \frac{1}{\lambda \tau_1 s} (1 - e^{-\lambda \tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} u(s) \quad (6)$$

其中,  $u(s)$  为控制器的输出,  $e(s)$  为系统误差。当  $\lambda \neq n, n = 1, 2, 3, \dots$ , 右边部分的第一项为重复控制器[11], 而第二项是一个组合积分环节, 可以解释为控制器在  $t$  时刻的输出是由控制器在过去时间  $[t - (\tau_1 + \tau_2), t - \tau_2]$  的输出预测得到的。在实际工程应用时, 为避免控制器输出重复性周期震荡信号, 通常选取  $\lambda = n, n = 1, 2, 3, \dots$ 。

图 8 为组合积分控制系统示意图。

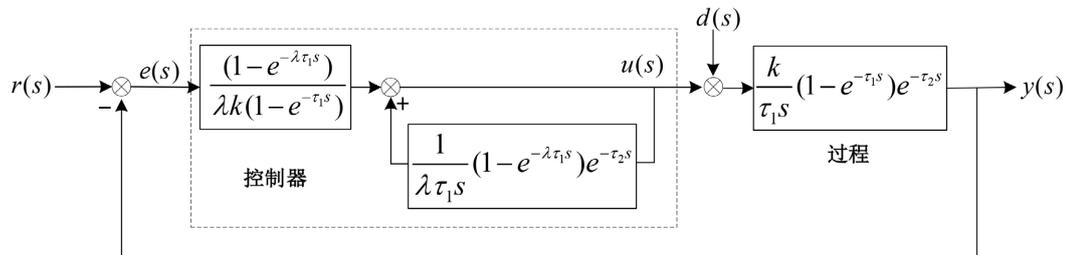


Figure 8. Block diagram of combined integrating control system

图 8. 组合积分控制系统结构图

以(3)式的面密度过程模型作为被控对象, 对新型控制器的控制效果和 Smith 预估 + PI 控制器、ZN 法 PID 控制器的控制效果进行仿真分析, 并加入干扰。考虑到(3)式模型的大纯滞后特性, 取新型控制器

的参数  $\lambda = 2$ , 仿真结果如图 9 所示。从仿真结果上看, 对于组合积分对象, 新型控制器的控制效果优于其他两种控制器。

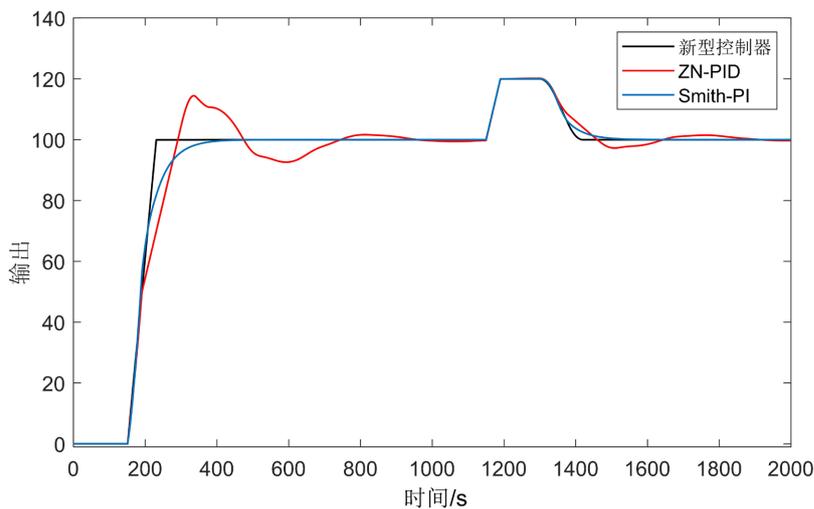


Figure 9. Simulation comparison of controller control effects  
图 9. 控制器控制效果仿真对比

### 4.3. 干膜面密度闭环控制方案设计

当产线仅配备干膜面密度检测仪时, 本研究设计干膜闭环控制方案, 结构如图 10 所示。该控制方案包含横向控制回路和纵向控制回路两部分, 共有  $N + 1$  条控制回路, 包括  $N$  条横向控制回路和 1 条纵向控制回路。

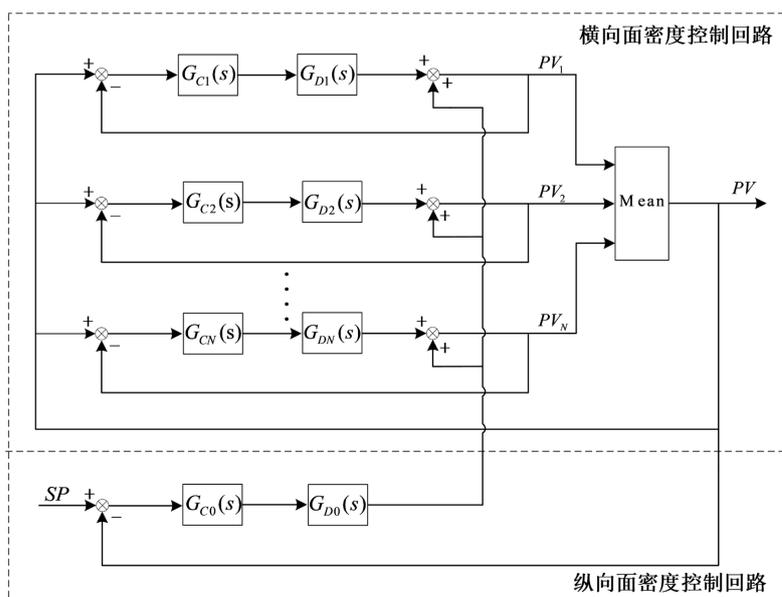
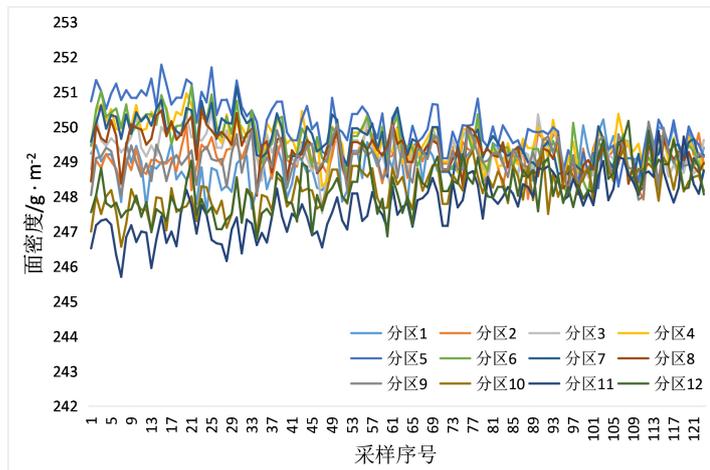


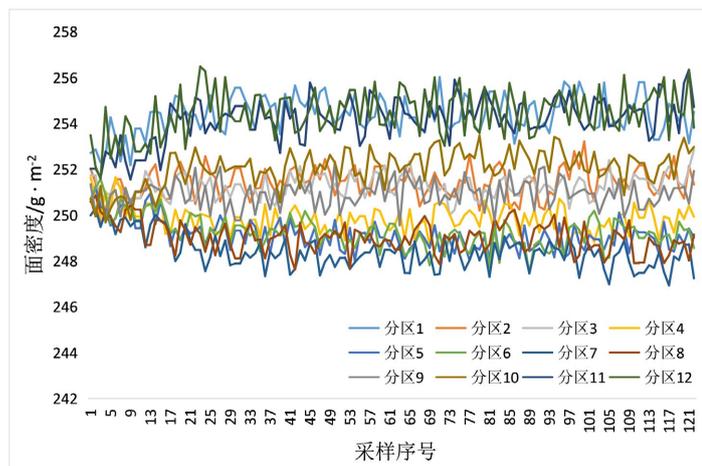
Figure 10. Block diagram of dry film closed-loop control scheme  
图 10. 干膜闭环控制方案结构框图

图中,  $G_{C1}(s)$ ,  $G_{C2}(s)$ ,  $\dots$ ,  $G_{CN}(s)$  为各 T 块控制器, 对应  $G_{D1}(s)$ ,  $G_{D2}(s)$ ,  $\dots$ ,  $G_{DN}(s)$  为横

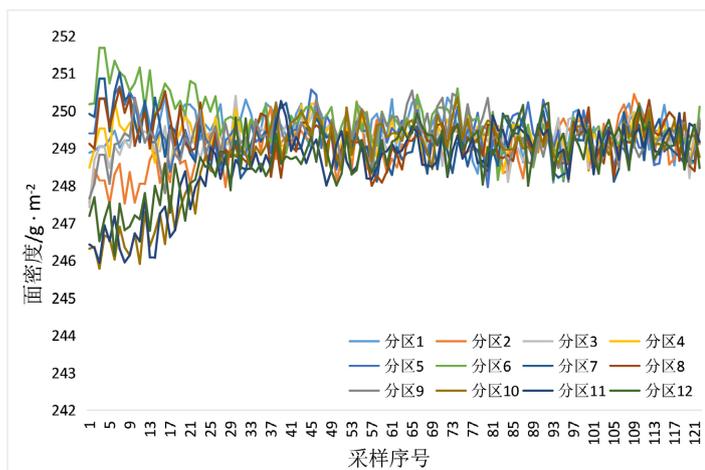




**Figure 12.** Dry film areal density data under single closed-loop control  
**图 12.** 干膜单闭环干膜面密度数据



**Figure 13.** Wet film areal density data under wet-dry film dual closed-loop control  
**图 13.** 干湿膜双闭环湿膜面密度数据



**Figure 14.** Dry film areal density data under wet-dry film dual closed-loop control  
**图 14.** 干湿膜双闭环干膜面密度数据

图 12 为干膜单闭环控制下的分区面密度数据, 图 13、图 14 分别为干湿膜双闭环控制下的湿膜与干膜分区面密度数据。实验结果表明, 两种方案均能使面密度向设定值收敛, 但干湿膜双闭环方案的收敛速度显著更快: 双闭环方案下, 各分区干膜面密度收敛时间仅需 60~80 s; 而单闭环方案的收敛时间需要 250~300 s。

## 6. 结束语

针对锂电池极片涂布过程中的面密度控制难题, 本研究基于上位机工控平台, 设计一套极片涂布面密度控制系统。通过分析涂布工艺特性, 建立面密度的组合积分对象模型, 并针对性设计专用控制器, 有效解决传统 PID 控制器对组合积分对象控制效果差的问题。同时, 结合产线设备配置情况, 分别提出干膜单闭环与干湿膜双闭环控制方案, 实现控制策略的灵活适配。实际应用结果表明, 该控制系统可显著提升涂布面密度的一致性, 干湿膜双闭环方案较单闭环方案将收敛时间缩短约 70%, 大幅提高生产效率与物料利用率, 降低生产成本, 具有较高的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 郁济敏. 2023 年锂电池行业发展形势与未来展望[J]. 电源技术, 2024, 48(4): 550-553.
- [2] 姚美娇. 动力电池产业量质齐升[N]. 中国能源报, 2026-01-12(011).
- [3] 宋岚. 电极材料均匀性和梯度孔隙分布对锂离子电池性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [4] 郎满权. 锂离子电池涂布模头结构设计及涂布过程漏料预测研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥大学, 2025.
- [5] 杨家沐, 陈育新, 练成, 等. 电极浆料涂布模头流场分析与结构优化[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(4): 1109-1117.
- [6] 薛美盛, 张焕星, 何欣汝, 等. 锂电池极片涂布过程厚度控制系统的设计与实现[J]. 化工自动化及仪表, 2025, 52(4): 497-503.
- [7] 杨静. 锂电池极片涂布设备控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [8] 王云辉, 孙青山, 李松鞠.  $\beta$  射线在锂离子电池生产中的应用[J]. 电池, 2018, 48(5): 347-349.
- [9] 任正云, 郑达. 流程工业的组合积分系统及其先进控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(9): 1009-1013.
- [10] 任正云, 郑达, 罗平. 组合积分系统在烟草工艺过程中的应用[J]. 烟草科技, 2008(11): 23-26+35.
- [11] 郑达. 组合积分系统的控制理论与应用研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 东华大学, 2009.