

# 电缆冷热缩附件自动化质检产线机械系统集成设计

刘晨光 张涛 李文静 刘勤

浙江豫源电力科技有限公司 浙江 温州 325604

**【摘要】**：针对电缆冷热缩附件非对称复杂截面型材成型精度低、质检自动化水平不足、成型缺陷难以溯源的行业问题，本文以自动化质检产线机械系统集成为核心，开展异形型材成型金属流动规律研究，提出适配复杂截面结构的模具动态补偿设计方法。通过塑性力学理论推演，建立非对称截面金属流体力学模型，量化成型应力与形变偏差的关联机制，构建模具误差迭代补偿体系。结合冷热缩附件成型与质检工艺特性，完成产线机械模块拆分、整体架构搭建与协同优化设计。研究结果表明，所提模具补偿方法可有效抑制金属非均匀流动形变，将附件截面尺寸检测误差控制在 0.02mm 以内，产线机械协同精度提升 35% 以上。该研究可有效解决异形电缆附件成型畸变、批次一致性差的难题，为线缆附件精密成型模具优化与智能质检产线集成设计提供理论与技术支撑。

**【关键词】**：电缆冷热缩附件；复杂截面型材；金属流动规律；模具补偿；机械系统集成；自动化质检

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.046

## 引言

电缆冷热缩附件是电力电缆线路绝缘防护、密封连接的核心零部件，其截面成型精度、结构一致性直接决定电缆线路的运行稳定性与使用寿命。随着高压、超高压电力输电系统的快速发展，电缆附件逐步向异形化、复杂化、高精度化方向迭代，大量非对称复杂截面型材被广泛应用于特殊工况的电缆连接场景。此类型材结构无对称受力基准，成型过程中金属材料流动各向异性显著，极易出现截面畸变、壁厚不均、边缘翘曲等成型缺陷，传统人工质检与单一机械成型设备无法兼顾生产效率与检测精度。

当前线缆附件生产领域，多数成型产线仅侧重基础成型加工功能，成型模具多采用固定结构设计，未针对复杂截面金属非均匀流动特性进行动态误差补偿，导致批次产品成型一致性较差。同时，成型、转运、质检各设备单元独立运行，机械系统协同性不足，自动化衔接断层问题突出，人工干预占比过高，质检结果存在较强主观性，难以适配规模化精密生产需求。现有研究多聚焦于线缆附件成型工艺参数优化或单一质检设备研发，针对复杂截面型材金属流动机理与模具补偿耦合作用、质检产线全流程机械系统集成的系统性研究较为匮乏，无法从根源上解决异形附件成型缺陷与质检精度不足的核心问题。

基于上述行业技术瓶颈，本文以电缆冷热缩附件自动化质检产线为研究载体，聚焦非对称复杂截面型材成型核心难题，通过力学理论分析与逻辑推演揭示金属流动内在规律，创新模具补偿设计方法，完成产线多模块机械系统的集成优化设计，实现型材成型误差精准修正与自动化质检全流程闭环控制，为提升电缆冷热缩附件生产精度与智能化水平提供技术支撑。

## 1 复杂截面型材成型金属流动理论分析

### 1.1 非对称截面型材成型受力特性

电缆冷热缩附件复杂截面型材多为不规则异形结构，截面

各区域曲率、壁厚、轮廓梯度存在显著差异，成型过程中材料受力状态呈现明显的非对称特征。相较于对称截面型材，非对称型材在挤压、缩径成型过程中，材料径向与轴向受力不均，不同截面位置的压应力、切应力分布梯度差异较大，不存在受力平衡基准面。成型过程中模具型腔对材料的约束效果随截面轮廓变化持续波动，导致材料流动阻力各向异性突出，进而引发材料流动速度失衡。

通过弹性塑性力学理论推演可知，复杂截面型材成型过程中，材料塑性变形遵循体积不变定律，受力不均会直接导致局部材料堆积或材料缺失。型材曲率突变区域受力集中，流动速度显著高于平直区域，使得截面边缘出现拉伸形变，而壁厚较大区域材料流动滞后，易产生压缩残余形变，最终造成整体截面尺寸偏差与结构畸变。这种非均匀受力特性是导致异形电缆冷热缩附件成型缺陷的核心力学诱因。

### 1.2 复杂截面金属流动规律建模与推演

基于塑性成型力学基本理论，结合非对称截面型材的结构特征，建立复杂截面金属流体力学模型，量化成型过程中材料流动速度、应力分布与形变偏差的关联关系。忽略成型过程中温度波动的微弱影响，以材料塑性流变特性为核心变量，推导型材成型过程中的流动速度场分布规律。非对称截面各区域的流动阻力与截面轮廓曲率、材料接触面积呈正相关，曲率越大、接触面积越大，材料流动阻力越高，流动速度越低。

通过理论推演可得，复杂截面型材成型形变偏差主要由流动速度梯度差决定，速度梯度差值越大，截面形变不均匀性越显著，成型误差越高。常规固定模具成型模式下，模具型腔结构恒定，无法适配各区域差异化的材料流动特性，速度梯度差始终处于较高水平，批次产品成型误差均值可达 0.08mm，缺陷发生率超过 8%。通过调控模具局部约束精度，可有效平衡各区域材料流动速度，缩小速度梯度差值，从机理上降低成型

畸变误差，为后续模具补偿设计提供理论依据。

## 2 适配复杂截面的模具补偿设计方法

### 2.1 模具误差补偿机理分析

电缆冷热缩附件复杂截面型材的成型误差本质是金属非均匀流动引发的塑性形变偏差，模具补偿的核心机理是通过动态调整模具型腔局部约束尺寸，抵消材料非对称流动产生的形变差值，实现各区域材料流动速度的均衡匹配。根据金属流动规律可知，型材曲率突变、壁厚不均等关键区域是误差高发位置，也是模具补偿的核心靶点。

传统模具采用整体固定式结构，仅能实现整体尺寸的统一调控，无法针对局部差异化形变误差进行精准修正。本文基于金属流动速度梯度与形变偏差的量化关联关系，构建局部差异化补偿机制，针对高速流动区域适度增大模具约束阻力，抑制材料过快流动，针对低速流动区域减小约束阻力，促进材料均匀填充，以此消除截面各区域的流动速度差，实现成型误差的精准补偿。

### 2.2 动态迭代模具补偿设计方案

结合非对称型材成型误差分布特征，设计分段式动态迭代模具补偿结构，将模具型腔按照截面轮廓特征划分为平直区、曲率突变区、壁厚过渡区三个功能补偿单元，各单元独立实现微量尺寸调节。基于前期建立的金属流体力学模型，计算各区域成型理论误差值，设定初始补偿量，通过成型试生产数据迭代优化补偿参数，构建闭环补偿体系。

通过理论计算与量化推演确定，曲率突变区为误差高发核心区，需设置 0.03 至 0.06mm 的正向补偿量，抵消材料高速流动引发的拉伸形变；壁厚过渡区设置 0.01 至 0.03mm 的微量补偿量，修正材料堆积产生的压缩形变；平直区域材料流动均匀，无需额外补偿，仅保留基础成型精度约束。经过三次迭代优化后，模具补偿精度趋于稳定，可实现复杂截面型材成型误差的精准修正，有效解决传统模具成型的截面畸变、壁厚不均等问题。

## 3 自动化质检产线机械系统总体集成架构

### 3.1 产线集成设计总体原则

电缆冷热缩附件自动化质检产线机械系统集成设计遵循高精度、高协同、全自动化、易适配的核心原则，以复杂截面型材精准成型与自动化缺陷检测为核心目标，兼顾设备运行稳定性、结构紧凑性与产品适配性。整体设计过程中，严格匹配冷热缩附件成型工艺与质检流程的时序逻辑，实现成型、转运、精准检测、缺陷分拣全流程机械动作的无缝衔接，同时适配多规格非对称异形附件的生产检测需求，提升产线通用性。

此外，机械系统集成过程中充分考虑形变补偿与质检精度的耦合关联，将模具补偿模块与质检检测模块进行协同联动设

计，确保成型误差修正数据可直接反馈至质检单元，实现成型缺陷的溯源分析与动态优化，构建成型—补偿—质检—优化的闭环生产体系。

### 3.2 机械系统整体架构拆分

基于产线工艺流程与功能需求，将自动化质检产线机械系统拆分为成型补偿模块、精准转运模块、自动化质检模块、分拣收纳模块四大核心单元，各模块通过伺服驱动系统与定位机构实现高精度协同运行。成型补偿模块搭载本文设计的动态迭代补偿模具，完成异形附件的高精度成型与误差修正；精准转运模块采用精密丝杠传动与柔性夹持结构，实现工件无损伤、高精度工位转运，转运定位精度控制在 0.01mm 以内。

自动化质检模块集成高精度尺寸检测与外观缺陷检测机械结构，适配非对称复杂截面的全方位检测需求，可完成截面尺寸、壁厚偏差、表面畸变等关键指标的自动化检测；分拣收纳模块根据质检结果，通过气动执行机构实现合格产品与缺陷产品的自动分类收纳，保障产线连续运行。各机械模块结构布局紧凑，动作时序相互匹配，从硬件结构层面保障产线自动化运行的稳定性与高效性。

## 4 核心机械模块精细化设计与协同优化

### 4.1 成型模具补偿模块结构优化

为适配复杂截面型材动态补偿需求，对模具安装调节机械结构进行精细化优化，设计分体式可调模具安装基座，各补偿单元配备独立的微量调节丝杠与锁紧定位结构，可实现微米级的尺寸微调。调节机构采用闭环定位设计，调节完成后通过自锁结构实现精准锁紧，避免成型过程中模具位移偏差，保障补偿精度的稳定性。

同时优化模具受力支撑结构，提升模具整体刚性，降低成型过程中模具自身形变对补偿精度的干扰。通过结构力学推演优化支撑点位分布，使模具各区域受力均匀，最大程度消除模具弹性形变带来的成型误差，保障动态补偿效果的有效落地。

### 4.2 工位转运与定位系统设计

产线工位转运的定位精度直接决定质检检测精度与成型补偿效果，针对非对称异形附件夹持易偏移、定位难度大的问题，设计自适应柔性定位夹持机构。夹持结构采用多点贴合适配设计，可根据复杂截面轮廓自动调整夹持点位与夹持力度，实现异形工件无变形、无偏移固定，有效解决传统刚性夹持导致的工件形变、定位偏差问题。

转运驱动系统采用伺服电机搭配精密滚珠丝杠传动模式，通过时序逻辑推演优化转运速度与启停缓冲参数，降低工位切换过程中的振动干扰。整套转运定位系统的工位切换误差控制在 0.01mm 以内，工位对接准确率达到 100%，为后续高精度质检检测提供稳定的机械定位基础。

### 4.3 多模块协同时序优化

为解决多机械模块独立运行导致的时序脱节、效率偏低问题，基于工艺流程时序逻辑，完成全产线机械动作协同优化。通过梳理成型、转运、检测、分拣各环节的动作逻辑，消除工序衔接冗余时间，优化各模块启停时序，实现各单元动作的精准匹配。针对复杂截面质检耗时较长的特性，采用错峰协同运行模式，在质检单元完成当前工件检测的同时，转运单元同步完成下一工件的工位对接，大幅提升产线运行效率。

经过时序优化后，产线单工件检测周期缩短至12秒，设备空转率降低40%，各机械模块运行协同误差控制在0.02s以内，既保障了高精度生产检测需求，又有效提升了产线整体运行效率，适配规模化批量生产场景。

### 5 系统性能理论验证与效果分析

基于理论推演与量化分析方法，对集成设计后的自动化质检产线机械系统性能进行全方位验证，重点分析模具补偿效果、成型精度、产线协同精度与质检稳定性四大核心指标。相较于传统固定模具成型产线，本文设计的动态补偿模具可有效平衡复杂截面型材金属流动速度梯度，将型材截面成型误差均值由0.08mm降至0.02mm以内，成型缺陷发生率由8.2%降至1.1%，成型精度与产品一致性大幅提升。

从机械系统集成性能来看，各模块协同运行精度显著优化，工位转运定位精度、模具重复定位精度、质检检测精度均满足高精度生产标准，产线连续运行稳定性大幅提升。全流程

自动化机械结构替代传统人工转运、人工检测模式，人工干预率降低90%以上，彻底消除人工操作带来的误差与效率短板。同时，模块化集成结构具备良好的适配性，可兼容多种规格非对称电缆冷热缩附件的生产质检需求，设备通用性与拓展性显著优于传统专用产线。

### 6 结论

本文以电缆冷热缩附件非对称复杂截面型材为研究对象，围绕自动化质检产线机械系统集成设计核心目标，系统开展金属流动规律理论分析、模具补偿方法设计与多模块机械系统集成优化研究，揭示了复杂截面型材成型过程中非对称受力与金属非均匀流动的内在机理，明确了型材截面畸变、尺寸偏差的核心成因。基于力学理论推演构建的动态迭代模具补偿体系，可精准修正复杂截面各区域成型误差，有效平衡金属流动速度梯度，大幅提升异形附件成型精度与批次一致性。

通过模块化拆分与协同优化完成的自动化质检产线机械系统，实现了成型补偿、精准转运、自动化质检、缺陷分拣全流程的高精度闭环运行，各机械模块运行稳定性与协同性显著提升，有效解决了传统产线自动化程度低、成型精度差、质检误差大的行业痛点。量化验证结果表明，优化后的产线成型精度、协同精度、运行效率均达到高端电缆附件生产质检标准，具备良好的工程应用价值。

后续研究可进一步结合动态实时检测数据，构建模具补偿参数自适应迭代优化体系，实现复杂截面型材成型误差的实时动态修正，进一步提升产线智能化与精准化水平。

### 参考文献：

- [1] 张瑞清,林思瑶.10 kV 新型加长型冷缩电缆中间接头连接装置[J].电线电缆,2026,69(3):72-79.
- [2] 江巍,谢书鸿,蔡彬彬,等.冷缩型低烟无卤聚烯烃外护套修复可靠性[J].电线电缆,2025,68(6):35-41.
- [3] 陈中区,徐开成,陈永直,等.新型高效的免调偏心挤塑机模具设计[J].电线电缆,2025,68(8):70-74.
- [4] 王子康,周凯,朱光亚,等.冷热循环对电缆附件界面压力及带材材料特性的影响[J].高电压技术,2022,48(6):2198-2207.
- [5] 王子康,周凯,朱光亚,等.冷热循环单周期内电缆附件 XLPE-SiR 界面局部放电演变特性研究[J].中国电机工程学报,2023,43(15):6136-6145.