锂电池辊压分切设备整机设计优化研究

陈铁城
纳科诺尔智能装备（深圳）有限公司，广东 深圳 518100

[摘要]针对锂电池极片辊压分切设备在高车速、宽幅化工况下出现的整机刚度不够和厚度一致性控制困难问题，从整机总体方案设计、关键部件设计、结构优化以及控制系统设计四个方面展开系统研究。提出辊压系统和分切系统一体化布局的整机方案，采用四柱式机架结构满足大辊径、大宽幅的承载要求。利用有限元法对机架做静力学、动力学分析，得到最大应力和低阶固有频率等主要性能参数。通过结构参数灵敏度分析确定机架立柱厚度、上横梁厚度为主要控制参数，用响应面法和多目标遗传算法对机架进行轻量化优化，在保证刚度的基础上减重 8.6%。设计出以 PLC 为基础的分布式控制系统结构，设计了伺服液压辊缝闭环控制策略和基于观测器的张力协调控制策略。整机运行性能测试结果表明，经过优化后的设备极片厚度一致性控制在±2μm 之内，分切毛刺长度小于隔膜厚度的二分之一，符合锂电池极片高品质制造的要求。

[关键词]辊压分切设备；机架优化；有限元分析；多目标优化；张力控制
DOI：10.33142/ect.v4i10.20664　　中图分类号：TG376.2　　文献标识码：A

Research on the Overall Design Optimization of Lithium Battery Roll Cutting Equipment

CHEN Tiecheng
Naknor Smart Equipment (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518100, China

Abstract: In response to the problems of insufficient overall stiffness and difficulty in controlling thickness consistency of lithium battery electrode roll cutting equipment under high vehicle speed and wide width working conditions, a systematic study is conducted from four aspects: overall machine design, key component design, structural optimization, and control system design. Propose an integrated layout of roller pressing system and slitting system, adopting a four column frame structure to meet the load-bearing requirements of large roller diameter and large width. Using finite element method to perform static and dynamic analysis on the frame, obtain the main performance parameters such as maximum stress and low order natural frequency. By analyzing the sensitivity of structural parameters, the thickness of the frame column and upper crossbeam were determined as the main control parameters. The response surface method and multi-objective genetic algorithm were used to optimize the lightweighting of the frame, reducing weight by 8.6% while ensuring stiffness. Designed a distributed control system structure based on PLC, designed servo hydraulic roller gap closed-loop control strategy and observer based tension coordination control strategy. The performance test results of the entire machine show that the optimized equipment's electrode thickness consistency is controlled within ± 2 μ m, and the length of the cutting burr is less than half of the diaphragm thickness, which meets the requirements for high-quality manufacturing of lithium battery electrode pieces.

Keywords: roll cutting equipment; rack optimization; finite element analysis; multi-objective optimization; tension control

引言

辊压和分切是锂电池极片制造流程中的两个重要工序，辊压用轧辊对涂布干燥后的极片施加压力来实现活性物质的压实定型，分切把宽幅的极片分切成符合电芯装配要求的窄幅卷料。目前动力电池向大尺寸、高容量方向快速发展，极片幅宽也从早期的 600mm 级提高到现在的 1500mm 甚至 1800mm，生产速度普遍达到 120m/min。辊压分切一体机设备是将两道工序结合在一起的设备，整机设计水平的好坏精度会直接影响到极片厚度一致性、分切毛刺形态等主要质量指标。

1 整机总体方案设计

辊压分切设备的整机方案设计要兼顾辊压载荷传递

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

途径，分切精度保证和工序间物料衔接速度。按照功能集成和模块化设计思想，确定设备总体为“放卷、辊压主机、分切、收卷”四段式布置。每一段采用分体机架，保证各段机架互不影响，中间用张力隔离辊实现分段张力控制，实现了紧凑一体化结构，又避免了辊压段轧制力波动对分切精度的直接干扰。

整机主要技术参数如下：最大辊压宽度 1500mm，设计机械速度 140m/min，最大轧制力 600t，辊缝调节范围 0.05～2.0mm，分切条数 8～16 条。辊压主机机架为四柱式预应力结构，由上横梁、下横梁、左右牌坊和预应力拉杆组件组成闭合框架，辊压载荷由轴承座传给立柱，再由下横梁传到地基[1]。相比传统的开式机架，四柱式结构在承受偏载的时候抗扭刚度更好，适合宽幅辊压工况。分切系统采用独立刀架和圆盘刀组，刀轴和辊压段轧辊轴线平行度误差不大于 0.02mm/m，保证分切后的极片宽度精度。

2 关键部件设计

2.1 辊压系统设计

辊压系统是由轧辊组件、轴承座、液压压下装置和辊缝调节机构组成。轧辊采用 9Cr3Mo 材质，辊身淬火后表面硬度不小于 HRC68，辊面圆跳动不大于 1.0μm/m。辊径为 1200mm，大辊径方案在同样的轧制力下可以减小辊面接触应力，减少辊系弹性变形对辊缝均匀性的影响。轧辊两端用四列圆柱滚子轴承支承在轴承座里，轴承座与机架立柱之间装有斜楔调整装置，用来补偿轴承游隙和消除辊系轴向窜动。

液压压下装置用伺服阀控制的双缸同步方式，每个液压缸都配有压力传感器和位移传感器，可以实现恒压力和恒辊缝两种控制模式的切换。最大压力是 600t，系统压力 25MPa。辊缝调节依靠液压缸内磁致伸缩位移传感器做闭环反馈，调节分辨率为 1μm。

2.2 分切系统设计

分切系统用上圆盘刀和下圆盘刀对滚剪切工作方式。刀轴为空心结构，减小转动惯量，两端用精密角接触球轴承支撑。圆盘刀的材质是硬质合金涂层钢，刀刃锋利度用在线激光检测系统实时检测。分切段设独立除尘装置，用负压吸附和毛刷清扫相结合的方式清除分切产生的粉尘颗粒，保证极片的洁净度。

分切精度主要是由刀轴刚度、刀片轴向定位精度和极片入刀角度这三个因素决定的。刀轴直线度控制在不大于 1.0μm/m，刀片轴向定位误差不大于±0.005mm。入刀角度用导向辊位置调节实现 0°～5°连续可调，满足不同厚度极片分切的要求。

3 整机结构优化

3.1 机架静力学分析

机架是整机的承载核心，静刚度的好坏直接影响到辊缝在轧制力作用下是否稳定。采用 SolidWorks 建立机架三维实体模型，导入 ANSYS Workbench 进行有限元静力分析。材料为 Q235B 结构钢，弹性模量为 206GPa，泊松比为 0.3。网格以六面体为主划分，单元尺寸为 10mm，主要受力区局部加密至 5mm，共有 28 万个单元。约束条件为下横梁底面全约束，载荷按 600t 轧制力均匀分布在左右立柱内侧轴承座安装面上。

静力分析结果可知，机架最大等效应力为 78.6MPa，立柱、上横梁连接处圆角位置为最大等效应力点，远远小于 Q235B 的屈服强度 235MPa，安全系数为 2.99。最大变形是 0.087mm，出现在上横梁的中部，对应辊缝处的变形为 0.052mm。该变形量在允许范围内，在 120m/min 高速工况下，动态载荷的叠加效应会造成辊缝波动增大，需要做动力学分析。另外根据辊缝变形量反推极片厚度偏差，在 600t 轧制力下，辊缝中心与两端变形差约为 0.018mm，对应极片横向厚度偏差约 ±3.5μm，虽然满足基础要求，但是还有优化空间，为后续结构参数优化提供明确的方向。

3.2 机架动力学分析

模态分析属于动力学分析的基础部分，它能找出机架结构的固有频率和振型，从而给避开设备工作频率范围内共振区提供依据。对机架进行无阻尼自由振动模态分析，得到前六阶固有频率和振型。结果表明，一阶固有频率为 47.3Hz，振型为机架整体左右摆动；二阶固有频率为 62.8Hz，振型为上下横梁同向弯曲；三阶固有频率为 89.5Hz，振型为立柱扭转振动。

设备的工作频率是由轧辊的转速来决定的，10m/min 对应的轧辊转速约为 31.8Hz（辊径为 φ1200mm），其倍频成分（2 倍频 63.6Hz、3 倍频 95.4Hz）和机架二阶、三阶固有频率比较接近，存在共振风险。为了评价共振的影响，做了谐响应分析，在轴承座安装处加上幅值为额定载荷 5%的简谐激励力，频率范围为 20Hz 到 100Hz。计算结果表明，63.6Hz 的激励频率下，辊缝处位移响应幅值比静态变形大 2.8 倍，达到 0.146mm，会大大降低极片厚度一致性[2]。因此，在结构优化时应把提高低阶固有频率，特别是二阶固有频率从 63.6Hz 以上这个目标放在第一位。

3.3 结构参数灵敏度分析

为了找到影响机架刚度和动态特性的主要控制参数，

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

选择上横梁厚度、下横梁厚度、立柱厚度、拉杆直径和筋板厚度这五个结构参数，用机架质量、最大变形和一阶固有频率作为响应指标，用拉丁超立方抽样法得到 50 组样本点做灵敏度分析。采用全局灵敏度法，计算出各个参数对响应指标的偏效应以及交互效应，得到主效应指数。结果表明立柱厚度对一阶固有频率的灵敏度系数最高（0.42），对最大变形的灵敏度系数次之（0.31）；上横梁厚度对最大变形的灵敏度系数最高（0.38），对质量的灵敏度系数为 0.29；拉杆直径和筋板厚度对各个响应指标的灵敏度都小于 0.15，是非主控参数。另外交互效应分析得出立柱厚度和上横梁厚度的耦合效应对最大变形影响指数为 0.12，说明两者联合调整可以产生叠加改善的效果，为之后多变量协同优化提供依据。

根据灵敏度分析结果，把立柱厚度、上横梁厚度作为优化设计变量，其他参数以初始设计值不变的方式固定。设计变量取值范围为立柱厚度 40～70mm、上横梁厚度 50～90mm。

3.4 基于有限元的多目标优化

以机架质量最小化、最大变形最小化和一阶固有频率最大化为目标，用响应面法和多目标遗传算法（MOGA）进行优化求解。首先用中心复合设计产生 13 个试验点，建立各个响应指标的二阶响应面近似模型，经方差分析可知模型决定系数 R^2 均大于 0.95，拟合精度满足要求。然后用响应面模型作为代理模型，用 MOGA 算法进行全局寻优，种群规模 100，进化代数 200。进化到 80 代以后，Pareto 前沿趋于稳定，各个目标之间存在着明显的竞争关系，质量减轻往往会带来变形增大或者频率降低，最后算法在前沿解集中选择出了综合折中解。

得到 Pareto 前沿解集，从中选择综合性能最好的解，即立柱厚度为 58mm、上横梁厚度为 76mm。优化后的机架质量为 14.8t，比原来的方案（16.2t）减轻了 8.6%；最大变形为 0.071mm，比原来的方案降低了 18.4%；一阶固有频率提高到 52.6Hz，成功地避开了 2 倍频工作频率（63.6Hz）的共振区间。优化前后机架性能对比表 1 如下。

表 1 机架结构优化前后性能对比

性能指标	初始方案	优化方案	变化率
机架质量/t	16.2	14.8	-8.6%
最大变形/mm	0.087	0.071	-18.4%
最大等效应力/MPa	78.6	72.3	-8.0%
一阶固有频率/Hz	47.3	52.6	+11.2%

经过优化后的机架应力分布更均匀，最大应力从立柱圆角处转移到下横梁中部，数值减小到 72.3MPa。该优化方案在保证强度和刚度的基础上得到了很好的轻量化效果，并且改善了机架的动态特性。

4 控制系统设计与性能验证

4.1 控制系统总体架构

控制系统以 PLC 为基础的分布式结构，由上位机监控层、PLC 控制层、现场执行层三部分构成。上位机依靠工业以太网同 PLC 展开通信，担当参数设定、状况监测以及数据记载的任务。PLC 控制层使用西门子 S7-1500 系列，高速计数模块和模拟量输入输出模块分别处理编码器反馈、传感器信号和阀控指令。现场执行层有伺服液压阀、变频器、张力传感器和位移传感器等。系统总线使用 Profinet 工业以太网协议，循环周期为 1ms，保证张力、辊缝信号的实时性。关键硬件选型方面，伺服阀采用 MOOG D633 系列，频响 40Hz；张力传感器采用 Burster 8524 型，精度等级 0.1%。

整机控制分为辊压控制和分切控制两个子系统，两者用 PLC 内部共享的数据区来实现状态同步。辊压控制子系统对辊缝进行调节和轧制力的控制，分切控制子系统对分切刀速进行同步以及收卷张力进行控制。

4.2 辊缝闭环控制策略

辊缝控制使用伺服液压阀驱动双缸同步调节的方式。控制策略为三环串级结构，外环为辊缝位置环，用位移传感器反馈来达到目标辊缝的闭环跟踪，中环为压力环，用来限制单侧液压缸的最大输出力防止偏载，内环为阀控电流环，保证伺服阀的快速响应。

辊缝位置环用 PID 控制算法，经过现场整定得到比例系数 Kp=120、积分系数 Ki=0.8、微分系数 Kd=5。为了抑制双缸不同步造成的辊缝倾斜，在位置环输出端加入交叉耦合补偿环节，把两缸位置偏差按比例反馈到各自的控制量中。另外为了应对轧制力突然变化对辊缝造成的扰动，采用轧制力前馈补偿的方法，即根据实时检测到的轧制力变化量，利用辊缝轧制力刚度模型计算出补偿位移量，再加到位置环给定值上，使辊缝在加载波动的时候仍然保持稳定[3]。由阶跃响应试验可知，辊缝调节上升时间小于 120ms，稳态误差不大于 ±1.5μm，可以满足极片厚度控制精度要求。

4.3 张力协调控制策略

辊压段和分切段之间的张力协调，是保证极片平稳运行的重要因素。由于辊压段轧辊是速度模式运行，分切段牵引辊是张力模式运行，两段之间张力通过张力隔离辊的浮动位置间接控制。控制策略是用张力隔离辊实际位置和

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

设定位置之间的偏差作为输入，用 PI 控制器调节分切段牵引辊速度给定值来达到张力动态平衡的目的。为了提高动态响应品质，设计了一个基于状态观测器的张力估计模块，用隔离辊的位置、速度信号实时估计出实际张力值，代替直接的张力测量，来克服张力传感器的滞后效应。观测器采用降维 Luenberger 结构，极点配置在-20rad/s，确保观测误差在 0.1s 内收敛。

为了应对极片在启停、加减速过程中出现的张力突变，在速度环中加入前馈补偿环节，根据辊压段速度变化率提前调节牵引辊速度，减小张力波动幅度。稳定运行时张力波动保持在±2.5%以内，加减速过程中超调量不大于±5%。

4.4 整机运行性能测试

对优化后的辊压分切设备在锂电池极片生产现场进行连续运行测试，极片为 NCM811 三元正极片，涂布面密度为 250g/m²，压实密度为 3.4g/cm³。连续工作 72 小时后取样检测极片厚度和分切毛刺。

厚度检测用在线 β 射线测厚仪，在极片幅宽方向上布置 9 个检测点。测试结果得出极片厚度在±2μm 范围内。分切毛刺用光学显微镜测量，毛刺长度最大值为 8.5μm，小于隔膜厚度（12μm）的一半。设备运行时没有发生极片断带、褶皱等异常情况，张力控制系统的反应也较好。为了检验优化后的结构对于运行稳定性有无提高，将优化前后的设备在相同工况下辊缝波动数据进行对比，优化后辊缝动态偏差标准差由优化前的 3.2μm 降低到 1.8μm，明显提高了极片纵向厚度均匀性。

图 1 中优化后的机架一阶固有频率为 52.6Hz，避开了设备工作频率的 2 倍频成分（63.6Hz），有效地防止了共振的风险，给整个系统的高速平稳运行提供结构保证。

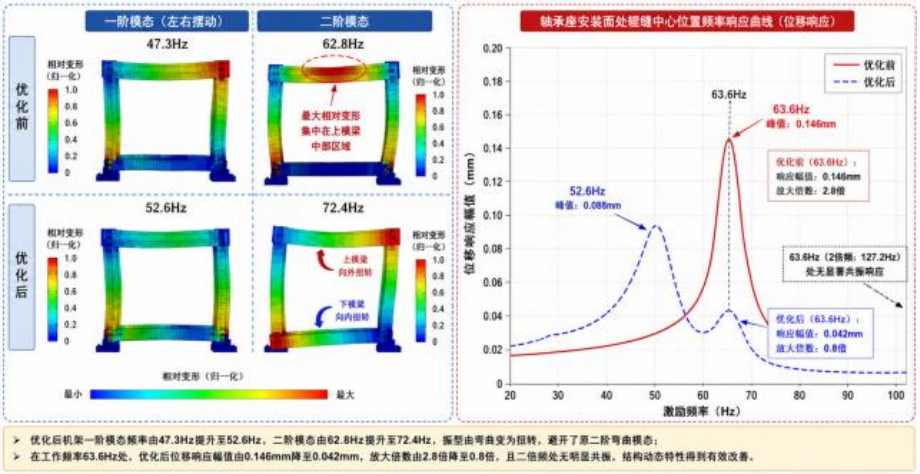


图 1　优化前后机架模态振型对比及频率响应曲线

5 结束语

本文针对锂电池辊压分切设备在高车速、宽幅化工况下的整机设计优化问题，从总体方案设计、关键部件设计、结构优化和控制系统设计四个方面进行了系统的探究。提出了辊压和分切一体化布局的四柱式机架结构，用张力隔离辊来实现工序解耦，既保证了整机紧凑性又保证了控制独立性。利用有限元方法对机架进行静动力学分析，通过灵敏度分析得到立柱和上横梁厚度为主控参数，用响应面法和多目标遗传算法实现轻量化优化，机架减重 8.6%，最大变形减小 18.4%，一阶固有频率提高到 52.6Hz，避开设备工作频率的 2 倍频共振区。设计出以 PLC 为基础的分布式控制系统，提出了辊缝闭环、张力协调控制方案，整机测试结果表明极片厚度一致性控制在±2μm 以内，分切毛刺长度小于隔膜厚度的二分之一。本研究给锂电池辊压分切设备的工程化设计提供可以实施的技术方案和数据支撑，之后会开展设备长期运行可靠性验证以及智能化运维技术研究。

[参考文献]

[1]张长军,马俊,郭山国,等.锂离子电池极片辊压生产线的总体设计与研究[J].机电信息,2025(17):57-59.
[2]汪婷婷,顾佳丽,王远鹏,等.基于 GA-BP 算法的锂电池辊压机设计[J].科技创新与生产力,2025,46(4):102-104.
[3]刘文可,邹胜,李学勇,等.基于 Ansys 的锂电池极片辊压质量改善研究[J].精密成形工程,2023,15(9):198-205.

作者简介：陈铁城（1987—）男，汉族，广东省河源市紫金县人，2011 年 7 月毕业于华南理工大学广州学院，本科，现主要从事锂电设备研发设计方向。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.