智能制造背景下锂电设备机械设计研究

陈铁城
纳科诺尔智能装备（深圳）有限公司，广东 深圳 518100

[摘要]新能源电池产业朝着多规格、定制化方向快速推进，锂电设备出现高速高精度、多品种混线生产的新需求，传统的刚性专用设备机械设计模式已经不能满足。文章整理了锂电设备机械设计技术现状和趋势，从服役工况和制造模式两个方面分析了智能制造对机械结构刚性、稳定性、柔性可重构性的要求，提出了结构优化与轻量化、高速往复传动系统设计、热特性分析与补偿、模块化与可装配性四个关键技术方向，还探讨了数字孪生驱动迭代、机械参数与控制协同、并行设计、可靠性评估等设计方法。

[关键词]锂电设备；智能制造；机械设计；结构优化；模块化设计
DOI：10.33142/sca.v9i10.20620　　中图分类号：TH16　　文献标识码：A

Research on Mechanical Design of Lithium Battery Equipment under the Background of Intelligent Manufacturing

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

Abstract: The new energy battery industry is rapidly advancing towards multi specification and customization, and there is a new demand for high-speed, high-precision, and multi variety mixed line production of lithium battery equipment. The traditional rigid specialized equipment mechanical design mode can no longer meet this demand. The article summarizes the current status and trends of mechanical design technology for lithium battery equipment, analyzes the requirements of intelligent manufacturing for mechanical structure rigidity, stability, flexibility, and reconfigurability from two aspects: service conditions and manufacturing modes. It proposes four key technical directions: structural optimization and lightweighting, high-speed reciprocating transmission system design, thermal characteristic analysis and compensation, modularity and assemblability, which also explores design methods such as digital twin drive iteration, mechanical parameter and control coordination, parallel design, and reliability evaluation.

Keywords: lithium battery equipment; intelligent manufacturing; mechanical design; structural optimization; modular design

引言

锂电设备机械设计属于新能源装备制造的关键部分，它的好坏会直接影响到电池的质量和成本。设备包括极片制备、电芯组装、化成分容等全部制程，各个工序对于机械结构的动静态特性、热稳定性、耐久性都有严格的要求。目前新能源电池产业正处在技术迭代加快、产品规格多样化的新阶段。2025 年上半年中国锂电池出货量 776GWh，同比增 68%，其中动力 477GWh、储能 265GWh；全球锂电智能装备市场规模从 2021 年 350 亿元增至 2025 年 583 亿元。混合固液电池量产、全固态中试验证提速、钠离子产业化加速，产业链升级由电芯材料端向制造设备全面传导。下游需求为多品种、小批量、快切换，传统刚性专用产线不匹配，换型成本高。设备要实现全生命周期的性能稳定，对机械设计有更高的要求。传统的机械设计依靠经验试验，周期长、成本高，急需革新。

1 技术现状与发展趋势

锂电设备包含涂布、辊压、模切、卷绕、叠片、入壳、注液、化成等主要设备，各个工序有不同的设计难题。涂布过程中狭缝式宽幅模头内部流道要保证浆料均匀，防止沉降。先进涂布机需 1600mm 宽幅、100m/min 速度下，面密度 COV≤±0.25%，模头重复定位精度 1μm。模切环节传统的伺服电机、减速机或者丝杠传动在高速间歇送料时会产生背隙和磨损，高端设计使用直驱技术实现零背隙。卷绕环节主要是研究高速高精度的卷绕机构以及张力控制，华冠科技方形卷绕机总线速度超过 3365mm/s，效率大于 7PPM，裁切精度为±0.05mm，毛刺小于 10μm。入

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

壳阶段需要在 1～2g 的加速度下完成微米级的重复定位，传动系统刚性、热稳定性能要求高。

发展趋势设备升级由原来的单机参数比拼变成整线工艺匹配能力的较量。2025 年全球锂电设备规模约 497 亿元，2026 年有望达 810 亿元[1]。第一，下一代电池驱动设备全面升级，国内固态电池已经形成超过 75GWh 的产能规划，前段新增干法混料和纤维化电极设备，中段叠片逐渐取代卷绕，后段升级高压化成分容。第二，设备精密化、绿色化、柔性化、固态专用化这四个趋势，使机械设计不能仅仅满足目前的工艺，还要能适应工艺路线的变化。

2 需求分析

2.1 高速高精度下的刚性与稳定性需求

机械结构刚性会直接影响到加工精度以及一致性。入壳设备同轴对位误差≤±0.1mm，卷绕主从轴同步精度≤±0.05mm，在高速运动过程中要保持。先导智能 Z 字切叠一体机单工位叠片速度达到 0.075 秒/片，对齐度误差±0.1mm；海目星三工位裁断叠片机采用直线电机和大理石基座，重复定位精度为 0.001mm 级，辊压精度最大为±0.8μm，稳定生产±2μm 以内。

高速振动属于刚性设计的主要难题。环形缓存线弧形导轨用 V 型滚轮和 V 型导轨面线接触配合双导轨来提高弯道的抗侧翻能力。模切设备要设置机械限位和压紧机构来防止极片抖动。刚性不是孤立的指标，它和运动学、动态响应是耦合的系统问题。长期交变载荷会造成累积变形或者疲劳，设计阶段应该用有限元分析做静力学、模态和随机振动评价。

2.2 多品种混线对柔性与可重构性需求

由于电池产品型号更新速度加快、订单批量变小，传统的“一条产线只生产一个爆款型号”的刚性制造模式已经不能满足要求了。储能 PACK 装配遇到电芯形态不同、模组结构复杂等问题，2026 年储能电芯正式进入 500Ah 以上时代，314Ah 和 587Ah 甚至更大的电芯同时生产成了行业常态，CCS 产线经常要进行规格的频繁转换。

柔性制造对机械设计有两方面的要求。第一，设备要有快速换型的能力。磁悬浮多动子输送系统让换型只需要软件调用配方，不需要更换机械模具，换型时间可以缩短到 15min 以内，按照年换型 50 次计算，单条产线每年直接节省的模具和调试成本超过 80 万元。第二，设备要有可重构的能力。模块化机械架构是实现可重构的基础，把大型产线拆分成标准化的模块单元，不同的模块可以按照需要组合起来使用来满足不同的工艺路线。日本日立制作所、理光等 9 家企业已经联合推出积木式电池工厂模式，把设备分成标准化模块出货，成本最高可以降低 70%左右。固态电池生产时，先从模块化设计入手，在保证严格气氛控制和压力的情况下可以灵活地增加产能。柔性与刚性存在着固有的矛盾，柔性要求结构可调，刚性要求结构稳定。化解这种矛盾必须要从设计源头入手统筹考虑，采用可调刚度结构、快换接口标准化、接口精度控制等手段来实现刚性与灵活性之间的平衡。

3 锂电设备机械设计关键技术方向

3.1 基于服役工况的机械结构优化与轻量化设计

结构优化、轻量化是提高锂电设备动态性能的一种有效方法。拓扑优化依靠材料重新分布和空间构型来达成创新设计，在关键承载结构里可以在保持刚度的情况下明显削减运动部件的质量，减小惯性力，加快响应速度。和明机械用航空铝材和碳纤维复合结构来减小卷绕机自重 20%，减小振动幅度 40%。

轻量化设计要以服役工况分析为依据。不同的工序设备载荷特性不一样，涂布模头承受浆料流动压力和热载荷，模切机刀架承受周期性冲击载荷，入壳机直线电机模组承受高加速往复载荷。设计阶段要根据实际工况做多工况静力学、模态分析，找出结构的薄弱、冗余部位，以结构轻量化为原则做拓扑优化、形貌优化，重构后用仿真验证力学性能。轻量化不能以牺牲结构刚性为代价，两者要共同被考虑。

3.2 面向高速往复运动特性的传动系统与执行部件设计

锂电设备中很多地方都有高速往复运动，例如模切间歇式送料、叠片往复取放片、入壳快速移载等。传动系统设计的好坏直接影响到运动的精度以及动态响应。

直驱技术是解决高速往复传动难题的途径。DD 马达去掉所有的中间传动部件，实现动力 1∶1 无损耗传递，绝对精度可以达到±10 角秒，重复定位精度可以达到 0.5 角秒。模切机中，模块化直驱旋转马达代替伺服电机和减速机直接驱动切刀或者送料辊，达到零背隙、免维护的效果；直驱直线电机取代丝杠滑轮机构来控制张力，反应迅速，可以使设备速度由原来的每分钟 20m 提高到 45m 以上。入壳设备中直线电机模组在 1～2g 加速度下做微米级重复定位，配合高刚性基座来抑制振动。执行部件也非常重要，凸轮机构依靠自锁性以及往复运动来达到高速搬运和高重复定位精度的目的。采用电子凸轮并行控制方式，把机械传动误差由原来的 50μm 减小到 8μm。传动和执行部件的设计要兼顾惯量、刚度、阻尼的匹配，保证系统在宽速度范围内有稳定的动态性能。

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

3.3 设备热特性分析与热变形补偿结构设计

锂电设备连续工作时会产生较大的温升，热变形属于影响长期精度稳定性的因素。热源主要是电机和传动系统机械发热、工艺过程热作用以及环境温度变化。高速运转时，直线电机模组的线圈温度要依靠内置的温度传感器和热管理系统来实时监测。

热变形有累积性、时变性，传统的静态误差补偿方法不能起作用。从结构设计上可以采用对称结构来减小热变形不均匀性，选择低热膨胀系数材料制造关键精度部件，设计热补偿结构吸收热应力差异[2]。从系统上要建立热特性模型，对主要部件在不同的工况下温度场和热变形进行分析，从而预留补偿余量或者设计出主动温控结构。对涂布模头等温度敏感的部件进行热流耦合仿真，优化其热结构设计，保证工作时温度场均匀。对激光焊接设备要考虑焊接热影响对夹具、定位机构的传导效应，设计隔热和散热结构。

3.4 面向全生命周期维护的模块化与可装配性设计

锂电设备的使用寿命一般为 5～8 年，需要经过多次的维护、更换和升级。模块化设计把设备分解成功能独立、接口一致的模块单元，能明显削减维护繁杂程度和升级本钱。

模块化设计的本质就是接口标准化、功能解耦。机械接口的精度和重复定位性决定模块更换之后能否快速恢复精度。模块划分要遵照高内聚低耦合准则，把频繁维修的部件当作独立可替换模块，把易损件同基体结构接口设计成快速拆卸的标准接口。可装配性设计要求结构设计时考虑装配顺序、空间和工具的可达性，不能出现为了装一个螺丝而拆掉半个设备的情况。面向全生命周期还要考虑可升级性，在机械设计时留有扩展接口和安装空间，使设备在较长时间内保持技术先进性。

4 设计方法与技术路径

4.1 数字孪生驱动的机械设计迭代与验证

数字孪生技术为锂电设备的机械设计带来新的迭代验证方式。利用多物理场仿真平台同 CAD、CAM、CAE 以及工业物联网的数据进行整合之后，就可以构建起设备的数字孪生模型，在虚拟环境中对它的实际工况性能加以模拟。

机械设计阶段数字孪生的价值表现在三个方面。第一，设计方案虚拟验证，在物理样机制造之前用多学科耦合仿真提前发现缺陷[3]。第二，根据仿真结果及时调整结构参数并加以评价。第三，服役性能预测评价，把实际运行数据反馈到孪生模型中，评价长期性能退化趋势，给预防性维护提供依据。

图 1 为数字孪生驱动的设计流程，是物理设备、虚拟模型、数据分析、设计优化的闭环。设计阶段创建初始孪生模型并开展虚拟检验，制造环节把实测数据同模型同步，运行阶段依靠数据分析找出偏差并回馈到设计改良当中。该流程把机械设计由串行的“设计-制造-测试-修改”变为并行的“设计-仿真-优化-验证”。

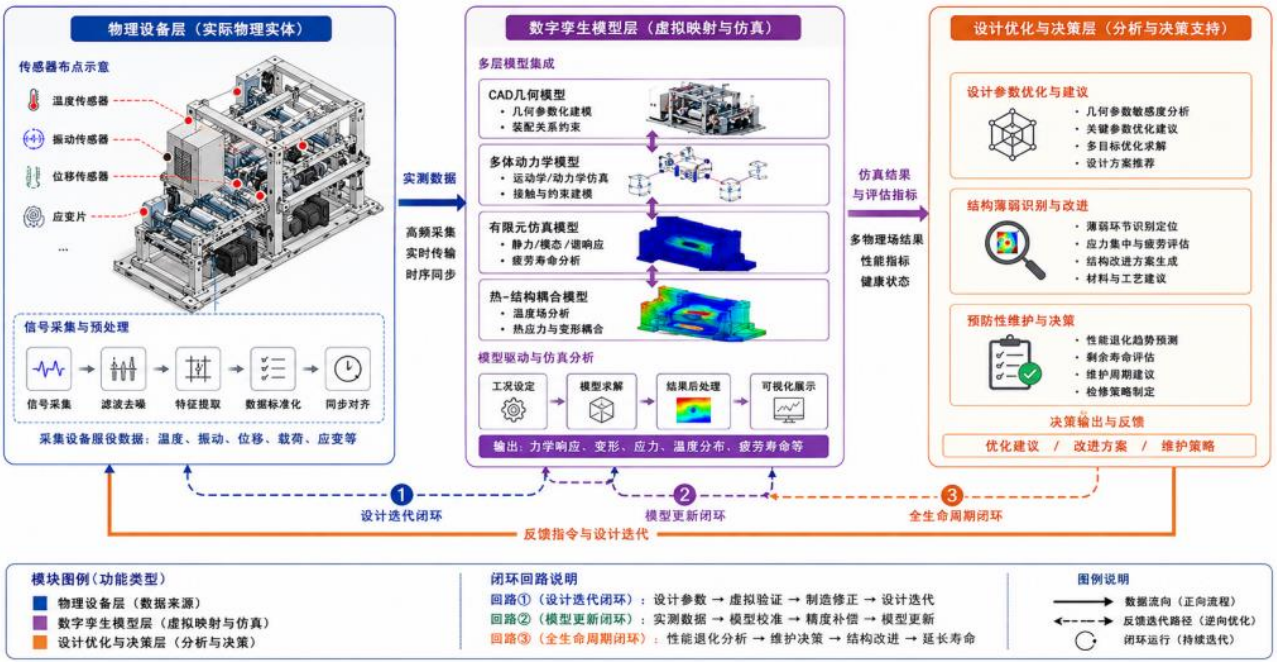


图 1　数字孪生驱动的锂电设备机械设计闭环流程

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

4.2 基于工艺数据的机械参数与控制策略协同设计

传统设计中，机械结构设计和控制策略设计是两个不同的团队、不同的阶段，容易造成参数不匹配。面向智能制造的协同设计要求在机械设计阶段就考虑控制策略的需求，进行联合优化。

协同设计的关键就是创建机械系统动力学模型和控制模型之间的耦合联系。机械质量、刚度、阻尼会影响控制系统的响应及精度，控制带宽、增益受机械固有频率以及执行器能力所限。卷绕设备中张力控制精度不单依靠控制算法，还要看张力摆臂惯量匹配和缓存辊响应速度，入壳设备中直线电机控制性能和基座刚性、导轨摩擦特性有关。实施路径为建立机械和控制联合仿真模型，评价不同的机械方案下控制是否可行；将工艺速度、加速度、力曲线作为输入参数来优化机械动态特性，样机调试阶段根据实测数据修正联合模型，达到迭代匹配的目的。

4.3 面向制造与装配的并行设计流程

并行设计要求在机械设计过程中同时考虑制造工艺可行性和装配工艺的方便性，防止设计方案在制造或者装配过程中出现不可行的问题。

从制造可行性角度出发，设计时要考虑到加工设备的精度水平和工艺限制，对高精度的关键部件给出具体的精度要求以及检测办法，对大型的焊接结构件设计退火、时效处理方案。装配可行性上用装配过程仿真提前发现干涉、操作空间不够的问题，改善装配顺序和布局。表 1 给出了传统串行设计和并行设计在开发各个阶段的不同。并行设计把制造和装配约束提前到设计阶段，可以大大减少设计变更和开发周期。

表 1　传统串行设计与并行设计的流程对比

对比维度	传统串行设计	并行设计
设计阶段	机械设计完成后移交制造	制造可行性同步评估
装配验证	样机装配阶段发现问题	装配仿真提前验证
设计变更	后期变更成本高、周期长	早期发现问题、快速修正
开发周期	设计-制造-装配-调试串行	多环节并行推进

4.4 设计阶段可靠性评估与失效模式预防

可靠性应该从设计源头开始抓起，而不能等到设备投入使用之后才被动地应对。设计阶段做失效模式和影响分析（FMEA），找出可能的失效模式，分析原因和影响，提出预防措施，是提高可靠性的有效方法[4]。

锂电设备常用的机械失效模式有高速运动部件的磨损与疲劳失效，传动系统的精度降低，结构件的变形与开裂，密封件的泄漏等。设计阶段根据可靠性问题采取有目的性的措施，对于磨损问题采用耐磨材料、设计可更换磨损件、改进润滑方式，疲劳问题用应力分析找到高应力部位、改善结构细节、确定合理的检修周期。可靠性量化评价也十分重要，可以利用加速寿命试验、退化轨迹分析等方式来评判关键部件在预期服役条件下的可靠度及寿命，把可靠性指标加入到设计评审当中去，保证设计方案既有好的性能又具备良好的可靠性和可维护性。

5 结束语

智能制造背景之下，锂电设备的机械设计由原来的静态设计转向了全生命周期的设计，由以前的经验驱动转变为现在的数据驱动。文章从需求、关键技术方向和设计方法三个方面对面向智能制造的锂电设备机械设计研究框架进行梳理。研究结果表明，高速高精度下刚性与稳定性、多品种混线下柔性与可重构性为基本要求；结构优化与轻量化、高速往复传动系统设计、热特性分析与变形补偿、模块化与可装配性为支撑关键技术；数字孪生驱动迭代、机械与控制协同、并行设计、可靠性评估为高质量设计的途径。随着固态电池等新一代电池的产业化进程，锂电设备也会出现新的工艺要求和机械设计问题。机械设计要更紧密地嵌入到电池工艺研发和智能制造系统创建当中，在设计理念、方法以及工具方面不断革新，从而给电池产业的高质量发展赋予强有力的装备技术支撑。

[参考文献]

[1]范伟军,刘强,李奇奇,等.锂电池液冷扁管复合结构设计与多目标优化[J].机械设计与研究,2025,41(4):43-50.

[2]张洪生,向旭.基于 EDEM 的废旧锂电池破碎机的参数优化设计[J].机械设计与制造工程,2025,54(5):11-15.

[3]邹胜,江正贤,刘文可,等.锂电池涂布机主辊磨削静力仿真[J].机械研究与应用,2024,37(6):31-34.

[4]李建华,祖家乐.移动机器人在锂电池生产工艺中的应用研究[J].机器人技术与应用,2026(1):50-53.

作者简介：陈铁城（1987—），男，汉族，广东河源市紫金县人，2011.07 年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.