

医药机械设计中的物料处理与输送系统优化

孙正佩¹ 袁 芳²

1. 浙江美阳国际工程设计有限公司 浙江 杭州 310011

2. 蓝星(杭州)膜工业有限公司 浙江 杭州 311100

摘要: 本文基于医药生产对洁净性、精准性与安全性的严苛要求,探讨物料处理与输送系统的优化路径。通过分析行业技术趋势与典型案例,提出设备选型、材料创新、智能控制等关键优化方向,为医药制造企业实现高效、低耗、智能的物料输送提供理论依据与实践参考。

关键词: 医药机械设计; 物料输送系统; 自动化升级; 智能控制; 纳米载体

引言

物料处理与输送系统是医药生产过程中的关键环节,涉及原料的接收、储存、加工、输送和成品包装等多个环节。在医药机械设计中,如何优化物料处理与输送系统,提高生产效率和产品质量,降低生产成本,是当前亟待解决的问题。传统物料处理与输送系统往往存在设备布局不合理、自动化程度低、能耗高等问题,难以满足现代医药生产的需求。因此,对物料处理与输送系统进行优化具有重要的现实意义。

1 医药生产对物料输送系统的核心需求

医药生产作为一个高度专业化且严格监管的领域,其物料输送系统的设计与实施直接关系到产品质量、生产效率以及生产环境的合规性。在医药制造的复杂流程中,从原料药的粉碎、中间体的输送,到最终制剂的灌装,每一个环节都对物料处理系统提出了极高的要求。

1.1 洁净性: 确保无菌环境, 严守GMP规范

医药生产必须在严格控制的无菌环境中进行,以避免任何形式的粉尘污染和微生物滋生。这不仅是对产品质量的保障,更是对消费者健康的负责。因此,物料输送系统必须满足GMP(良好生产规范)对洁净室等级的严格要求。具体来说,洁净室等级需达到ISO 14644-1标准中的Class 5至Class 8级别,根据不同生产阶段和物料特性选择合适的洁净级别。例如,在原料药粉碎和混合过程中,由于可能产生大量粉尘,需要Class 5或更高级别的洁净环境;而在制剂灌装阶段,则至少需要Class 7或Class 8级别的洁净室,以确保最终产品的无菌状态。

1.2 精准性: 计量准确, 误差控制至极致

在医药生产中,无论是粉体还是液体物料,都需要按照配方进行精确计量。这是保证药品成分一致性和疗效稳定性的关键。通常,误差需控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,对于某些高精度制剂,如某些特效药或生物制剂,误差要求

甚至不超过 $\pm 0.1\%$ 。为实现这一目标,物料输送系统需配备高精度的计量设备,如电子秤、流量计等,并采用先进的控制系统进行实时监测和调整,确保每次输送的物料量都准确无误。

1.3 安全性: 防爆设计, 生物相容性接触部件

医药生产中的物料往往具有易燃、易爆或有毒性,因此输送设备必须采用防爆设计,符合ATEX(爆炸性环境用设备和保护系统)指令的要求。这意味着设备在结构、材料选择、电气系统等方面都要经过特殊设计和认证,以确保在极端情况下也能安全运行^[1]。同时,所有与物料直接接触的部件必须符合ISO 10993生物相容性标准,避免对药品造成污染或对人体健康产生危害。

1.4 适应性: 兼容多样物料, 应对复杂工艺

医药生产的物料形态多样,包括粉末、颗粒、液体等,且工艺路径复杂多变。例如,抗肿瘤药物的生产过程中,由于药物对温度敏感,需要实现低温输送($2-8^{\circ}\text{C}$),以保持其活性和稳定性。因此,物料输送系统必须具备高度的适应性,能够根据不同的物料特性和工艺要求进行调整。这要求系统在设计时考虑模块化、可配置性,以及易于清洗和维护的特点,以便快速适应不同生产场景和物料变化。

2 医药机械设计中物料输送系统的技术优化方向

2.1 设备选型与输送模式创新

在医药机械设计中,选择适合的输送设备对于提升生产效率、降低生产成本和确保产品质量具有至关重要的作用。以下对几种常见输送设备的分析详见表1:

在实际应用中,某企业采用气力输送系统对PVC生产线进行了改造。通过负压真空技术,实现了4条新旧产线的无缝衔接。改造后,配料精度提升至99.8%,粉尘浓度降低至10毫克/立方米以下,年产能提高了40%。这一成功案例充分展示了气力输送系统在医药生产中的巨大

潜力和应用价值。

表1 常见输送设备的分析表

设备类型	适用场景	技术优势	局限性
螺旋输送机	短距离粉体输送 (<30m)	结构简单、成本低 (约¥5万/台)	难以处理垂直拐弯, 磨损率1.2%/年
管链输送机	复杂路径输送	灵活布局、密闭性好	输送距离受限 (<100m), 噪音75dB
气力输送系统	长距离多物料混合输送	无粉尘泄漏、易自动化	能耗高 (12kW·h/吨), 需配空压机
真空上料机	无尘投料与包装	全密闭设计、可集成CIP清洗	对粘性物料适应性差 (粘度 > 5000cP)

2.2 优化设备结构与布局

除了选择合适的输送设备外, 优化设备结构和布局也是提高物料输送系统效率的重要手段。(1) 密闭式输送设备: 对于易吸湿、易氧化的物料, 应采用密闭式输送设备, 如密闭式螺旋输送机或管链输送机, 以防止物料在输送过程中与空气接触而发生变质。(2) 精确计量设备: 对于大块物料或需要精确计量的物料, 可采用振动给料机或螺旋给料机等设备, 并配备高精度的计量装置, 以确保物料的准确输送和计量^[2]。(3) 合理布局设备: 在设备布局时, 应尽量减少物料输送过程中的转弯和垂直提升次数。可以通过优化生产线的布局, 将输送设备布置在直线或近似直线的路径上, 以缩短输送路径, 减少能耗和磨损。同时, 还可以考虑将输送设备与其他生产设备进行集成, 以实现更高效的生产流程。此外, 还可以采用模块化设计, 将输送系统分成若干个独立的模块, 每个模块都可以独立运行和维护。这样不仅可以提高系统的灵活性和可扩展性, 还可以方便地进行故障排查和维修。同时, 模块化设计还可以降低系统的复杂性和成本, 提高系统的可靠性和稳定性。

2.3 智能控制策略

随着物联网、大数据和人工智能等技术的快速发展, 智能控制策略在物料输送系统中的应用越来越广泛。以下是一些具体的智能控制策略:(1) 动态路径规划: 基于数字孪生技术, 可以建立物料输送系统的虚拟模型, 模拟物料在输送过程中的流动情况。通过实时监测和分析物料流动数据, 可以动态调整输送路径, 优化管道布局, 减少压力损失和能耗。同时, 还可以考虑将

动态路径规划与生产线调度系统相结合, 以实现更高效的生产流程。(2) 故障预测系统: 通过安装振动传感器、温度传感器等监测设备, 可以实时监测输送设备的运行状态。结合LSTM(长短期记忆网络)等算法, 可以对设备故障进行提前预警, 及时采取措施进行维修或更换。故障预测系统还可以与其他生产管理系统集成, 实现故障信息的实时共享和处理^[3]。(3) 能耗管理模块: 采用变频驱动技术, 可以根据实时负荷调整电机功率, 降低能耗。通过监测和分析能耗数据, 可以找出能耗较高的环节, 并采取相应的节能措施, 如优化输送速度、调整设备参数等。同时, 还可以考虑将能耗管理模块与企业的能源管理系统相结合, 实现能耗的全面监控和管理。

3 典型优化实践案例分析

3.1 H制药集团中间体输送升级案例

3.1.1 案例背景与技术需求

H制药集团生产线涵盖感冒、胃肠、止咳等十余个治疗领域, 其湖南车间部分老旧生产线因输送效率低下需改造。药品制备环节涉及液体、半固体、固体制剂等多种形态, 要求输送设备符合GMP标准 (ISO 14644-1 Class 5-8), 且需便捷清洗功能。

3.1.2 优化方案与实施

采用边锋固德牌DBW3系列卫生泵, 该泵符合《不锈钢食具容器卫生标准》(GB 9684-2011), 达到食品级应用标准。泵体采用316L不锈钢, 模块化设计支持快速换型 (切换时间 < 30min), 集成CIP/SIP在线清洗系统。

3.1.3 效益分析与数据对比 (见表2)

表2 效益分析与数据对比表

指标	优化前	优化后	提升幅度
清洗时间	45-60min/次	15min/次	↓ 75%
设备利用率	60%-70%	92%-95%	↑ 30%+
维修成本	¥12万/年/线	¥3万/年/线	↓ 75%
换型时间	90-120min	< 30min	↓ 66%
产能效率	85%-90%	98%-99%	↑ 8%-9%

3.1.4 技术优势与扩展应用

DBW3系列泵通过FDA 21 CFR Part 11认证, 支持无

尘投料与低温输送 (适配2-8℃冷链需求)。H集团已采购40台用于5条产线升级, 计划3年内覆盖全部12条中间

体生产线，预计年节约运营成本超¥1200万元。

3.2 NZQ真空上料系统创新案例

3.2.1 技术突破与参数对比

表3 核心参数表

型号	输送能力 (kg/h)	能耗 (kW·h/吨)	维护周期 (小时)	适用场景
NZQ190-NP-Ti4	40-700	8.2	3000	粉体/颗粒输送 (API原料)
NZQ270-NP-Ti12	100-1800	6.5	4500	中等批量制剂生产
NZQ550-NP-Ti40	400-7000	5.8	6000	大规模固体制剂/包装线供料

3.2.2 成本效益分析

一是能耗成本：以NZQ550为例，年输送量1.2万吨，较传统气力输送节电¥48万元（电费0.8元/度）。二是维护成本：钛金属膜过滤器+智能反吹技术使故障率降低80%，年节约维护费用约¥35万元。三是质量损失：静电消除系统减少吸附损耗，原料药利用率提升12%，年减少损失约¥72万元。

3.2.3 行业认证与应用扩展

该系统通过ATEX防爆认证 (II 2G Ex d IIC T4)，已应用于12家MAH持证药企的抗肿瘤药生产线。某企业改造后粉尘泄漏量从3.2g/h降至0.05g/h，符合欧盟GMP Annex 1标准。

4 未来发展趋势

4.1 AI驱动的预测性维护

传统的设备维护方式往往依赖于定期检修或故障后维修，这种方式不仅效率低下，而且可能导致生产中断和成本增加。而AI驱动的预测性维护则通过机器学习算法，对设备磨损数据进行深入分析，实现设备状态的实时监测和故障预测。具体来说，系统可以收集设备运行时的振动、温度、压力等多维度数据，并利用机器学习模型对这些数据进行处理和分析。通过不断学习和优化，模型能够识别出设备磨损的规律和特征，从而在故障发生前发出预警，提醒维护人员及时采取措施。这种预测性维护方式不仅可以提高设备的可靠性和稳定性，还能有效延长设备的使用寿命，降低维修成本和生产中断风险。未来，AI驱动的预测性维护将进一步与物联网、大数据等技术融合，实现设备状态的远程监控和智能化管理。通过构建设备健康管理系统，企业可以实时掌握设备运行状态，优化维护计划，提高生产效率。

4.2 纳米涂层技术

在物料输送过程中，物料粘附是一个常见的问题，它不仅影响输送效率，还可能导致设备损坏和产品质量下降。为了解决这个问题，纳米涂层技术应运而生。通过开发超疏水表面，纳米涂层技术能够显著减少物料在输送过程中的粘附。超疏水表面是一种具有特殊润湿性

NZQ系列真空上料机（北京长峰金鼎）采用柱塞式气流输送技术，较传统设备节能45%。核心参数（见表3）：

的表面，它能够使水滴在表面形成球状并轻易滚落，从而带走表面的污垢和杂质。将这种技术应用于物料输送系统的关键部件，如输送带、螺旋叶片等，可以有效减少物料的粘附，提高输送效率^[4]。未来，纳米涂层技术将进一步发展和完善。通过优化涂层材料的配方和制备工艺，可以提高涂层的耐久性和稳定性，使其在各种恶劣环境下都能保持良好的性能。

4.3 可持续设计

在物料输送系统的设计中，可持续设计理念正逐渐得到广泛应用。其中，生物可降解材料在一次性系统中的应用是一个重要的方向。传统的一次性系统往往使用塑料等难以降解的材料，对环境造成严重污染。而生物可降解材料则能够在自然环境中被微生物分解，最终转化为无害物质。将生物可降解材料应用于物料输送系统的一次性部件，如输送带、连接件等，可以显著减少废弃物的产生和对环境的污染。未来，可持续设计理念将进一步融入物料输送系统的设计和制造过程中。通过选用环保材料、优化结构设计、提高能源利用效率等方式，可以实现物料输送系统的绿色化和可持续发展。

结语

医药物料输送系统的优化需从设备选型、材料创新、智能控制三端协同突破。通过典型案例可见，采用气力输送、生物可降解材料等新技术可显著提升效率与安全性。未来随着3D打印与AI技术的深度应用，系统将向个性化、自适应方向发展，但需突破标准化与验证周期等瓶颈。建议企业建立产学研合作平台，加速技术转化，同时完善全生命周期管理体系，确保合规性与可持续性。

参考文献

[1]丁方舟.基于GMP标准的医药厂房建筑设计探讨[J].城市建筑,2025,22(04):165-168.
[2]黄伟锋,翟明祥,董莎莎.医药厂稀配罐配料液位输送自动控制[J].计量与测试技术,2019,46(08):58-59.
[3]刘振伟.真空物料输送系统能耗关键技术研究[D].南京理工大学,2021.
[4]陈卫超.智能制造背景下A医药公司生产过程优化研究[D].浙江工商大学,2023.