

自动理瓶机储瓶仓缺瓶检测与自动补料系统设计

李剑伟

浙江皮克机械设备有限公司 浙江温州 325000

【摘要】自动理瓶机储瓶仓是连接吹瓶与灌装的关键缓冲单元，其缺瓶频发易致停产浪费。传统人工或简单开关控制存在滞后、误报高及柔性差等弊端，难符智能制造需求。本文系统探讨缺瓶检测与自动补料的协同设计策略。首先，基于散体动力学剖析瓶料流动特性及“架桥”等非理想现象机理，揭示缺瓶物理根源。其次，阐述多传感器融合的智能检测算法，构建高精度感知模型。进而，推导补料系统的运动规划、流量动态匹配及防拥堵机制，实现补料与消耗无缝衔接。最后，探讨闭环反馈对液位稳定的核心作用，提出模型预测控制优化方案。本文旨在建立严密定性理论体系，阐明检测与补料的耦合逻辑，为新一代高智能理瓶装备研发提供理论支撑。

【关键词】自动理瓶机；储瓶仓；缺瓶检测；自动补料；散体动力学；多传感器融合；流量匹配；闭环控制

Design of Bottle Storage Deficiency Detection and Automatic Refilling System for Automatic Bottle Forming Machine by

Li Jianwei,

Zhejiang Pick Machinery Equipment Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】The bottle storage bin in automatic bottle forming machines serves as a critical buffer unit connecting the blowing and filling processes. Frequent bottle shortages can lead to production halts and resource waste. Traditional manual or simple on/off control systems exhibit drawbacks such as delayed response, high false alarm rates, and poor adaptability, failing to meet smart manufacturing requirements. This paper systematically explores collaborative design strategies for bottle deficiency detection and automatic refilling. First, through bulk dynamics analysis, we examine the flow characteristics of bottle materials and the mechanisms behind non-ideal phenomena like "bridging," revealing the physical root causes of shortages. Second, we develop intelligent detection algorithms using multi-sensor fusion to establish high-precision perception models. Subsequently, we derive motion planning, dynamic flow matching, and congestion prevention mechanisms for the refilling system, achieving seamless integration between material replenishment and consumption. Finally, we investigate the pivotal role of closed-loop feedback in maintaining liquid level stability and propose an optimized model predictive control scheme. This study aims to establish a rigorous qualitative theoretical framework, clarify the coupling logic between detection and refilling, and provide theoretical support for the development of next-generation intelligent bottle forming equipment.

【Key words】automatic bottle packaging machine; bottle storage bin; bottle shortage detection; automatic feeding; bulk dynamics; multi-sensor fusion; flow matching; closed-loop control

1. 引言

随着工业 4.0 推进，自动化包装线向高速、柔性及无人化发展。自动理瓶机是关键前道设备，其核心储瓶仓用于平衡上下游节拍差异，确保连续生产。但储瓶仓管理复杂，高速工况下易缺瓶，导致下游停机等问题。传统检测依赖单一传感器，在高速、多品种及复杂光照下局限性显著，易致控制决策失误。自动补料系统设计也有挑战，需高度自适应能力。现有研究缺乏对流动机理的深度解析及检测 - 补料协同机制的系统探讨。本文摒弃单纯经验总结，采用理论分析与逻辑推演，全方位探讨缺瓶检测机理与补料控制逻辑。先剖析物料流动特征与缺瓶成因，再构建智能检测模型，接着推导补料策略，揭示动态平衡原理，进而探讨闭环反馈作用。期望建立理论范式，解决工程痛点，推动包装机械智能化发

展。

2. 储瓶仓内散体物料流动特性与缺瓶机理分析

2.1 基于散体动力学的瓶群流动行为与堆积形态演化

储瓶仓内空瓶群体宏观遵循散体动力学规律，因瓶子特殊属性呈现复杂性。微观上，单瓶运动受重力、仓壁摩擦、瓶间接触力及下方牵引力共同作用。物料充足时，瓶群呈近似流体特性，形成整体位移，但并非均匀活塞流，而是复杂流场。

理论分析表明，储瓶仓几何结构决定流动模式。理想为“质量流”，实际常形成“漏斗流”，导致物料停留时间分布宽，引发静电积聚或表面划伤。更关键的是，规则瓶型易产生“架桥”，造成传感器误判。

堆积密度随液位降低而变化,低液位时空隙率增大,出瓶流量呈非线性脉动,排空临界态流动性恶化。理解这些流动特性与形态演化,是设计高精度检测与智能补料策略的物理基础,缺瓶是流动状态的质变。

2.2 缺瓶状态的物理表征与非线性突变机制

缺瓶的物理本质是可抓取物料低于连续生产所需最小阈值,表现为显著的非线性突变。储瓶仓属典型非线性动态系统,受“架桥”等因素影响,液位高度与可用数量无明确对应,导致观测与控制效果解耦,增加了检测难度。

理论分析显示,缺瓶发生伴随流动模式相变,具有滞后性与不可逆性,往往需外部扰动方可恢复。传统阈值检测难以捕捉相变前兆,因此智能检测应聚焦于识别流动微小变化趋势,进而预测相变概率。

此外,随机扰动赋予瓶群流动混沌特征。在临界液位附近,微小扰动易被放大引发“假性缺瓶”。故而,缺瓶判定需基于时间序列数据的趋势分析与统计推断。通过建立数学指标,系统可更早、更准地识别潜在风险,从而争取补料时间,有效防止生产中断。

3. 基于多传感器信息融合的智能缺瓶检测技术

3.1 多维感知阵列的构建与冗余容错机制

为克服单一传感器在复杂工况下的局限,构建基于多传感器信息融合的智能检测系统是实现高精度缺瓶判别的必由之路。从信息论视角看,各类传感器感知维度与误差特性不同,如光电传感器对存在性敏感但易受光扰,超声波测距精准却受反射角制约等。合理配置异构传感器构建多维感知阵列,可利用其互补性全面感知储瓶仓状态。

理论分析表明,冗余设计是提升系统可靠性的核心策略。在关键区域部署多个同构或异构传感器形成双重冗余,当某传感器输出异常时,其余数据可校正或替代,确保输出连续。冗余需科学布局优化,如在仓体不同高度层布置光电对射开关、出口处安装高速相机、仓壁嵌入电容传感器,立体感知网络能捕捉单一视角盲区。

还探讨了数据时空同步与配准问题。多源数据须在时间戳与空间坐标上一致才能有效融合,因响应时间与采样频率差异,直接融合易致逻辑冲突,需设计高精度时钟同步机制与空间坐标变换算法。通过构建冗余容错感知架构,系统能在部分节点失效或数据质量下降时准确判断缺瓶状态,提升检测系统的鲁棒性与适应性。

3.2 自适应融合算法与状态识别逻辑推理

获取多维数据是基础,通过先进算法深度融合并提取真实缺瓶特征才是智能检测核心。从模式识别与人工智能理论出发,自适应融合算法能根据环境与数据质量动态调整权重实现最优估计。逻辑推演表明,传统固定权重法难应对多变工况,基于卡尔曼滤波、D-S证据理论或神经网络的方法更能处理不确定性与冲突信息。理论分析显示,卡尔曼滤波

适用于线性高斯系统,能估算真实液位;但储瓶仓物料流动具强非线性与非高斯特征,扩展卡尔曼滤波或粒子滤波更适用,结合散体流动动力学模型,可剔除虚假信号。此外,D-S证据理论处理多源冲突优势独特,适用于处理“未知”或“模糊”状态。进一步探讨基于深度学习的状态识别逻辑,利用卷积神经网络处理视觉图像可提取瓶群特征、识别堵塞迹象。将视觉特征与其他数值特征多模态融合构建端到端分类器,可输出状态标签。这种数据驱动逻辑自学习能力强,能适应新瓶型或环境。逻辑上,自适应融合算法与智能识别逻辑结合,使缺瓶检测从简单阈值比较跃升为复杂态势感知,为自动补料系统精准触发提供决策依据。

4. 自动补料系统的动态匹配与协同控制策略

4.1 补料流量的动态建模与供需平衡机制

自动补料系统的核心在于根据实时消耗与库存状态动态调节流量,实现供需平衡。从控制理论看,这是典型的随动控制系统:理瓶消耗为扰动输入,补料流量为控制输出,仓内液位为被控变量。逻辑推演表明,理想策略需使补料流量紧随消耗变化,同时维持液位在安全区间,避免溢出或枯竭。然而,受输送机构惯性、滞后及非线性摩擦影响,简单比例控制易致超调或振荡。

理论分析指出,建立精确的动态模型是高性能控制的前提。模型需涵盖电机机电时间常数、管道传输延迟及落料分散效应。其中,传输延迟是导致不稳定的关键因素:若控制器未补偿“死区时间”,可能在物料未达时持续加大输出,引发拥堵。因此,需采用史密斯预估器或模型预测控制(MPC)等算法,对延迟环节进行补偿,提前调整控制量。

进一步探讨供需动态匹配机制。生产各阶段消耗速率各异,补料系统应具备变速运行能力,依据消耗速率斜率动态调整输送速度或振幅。理论模型显示,引入前馈控制回路,将理瓶机速度或电流信号作为前馈量,可驱动补料系统预先动作,大幅减小反馈误差。这种基于动态建模与前馈-反馈复合控制的策略,能实现毫秒级流量匹配,确保液位始终处于最佳工作区间。

4.2 防拥堵逻辑与柔性入仓轨迹规划

高速补料易致物料拥堵、倒伏或卡死,损坏瓶身或机构。因此,科学的防拥堵逻辑与柔性入仓轨迹至关重要。从运动规划与碰撞理论看,入仓过程是多体碰撞与能量耗散过程。若速度过快或角度不当,过大动能会引发剧烈反弹与混乱堆积。逻辑推演显示,必须精细规划末端轨迹,实现物料“软着陆”。

理论分析表明,柔性入仓核心在于控制入仓相对速度与姿态。通过设计可变角度导料槽或缓冲旋转分配器,使下落瓶子水平速度与仓内流速匹配,垂直速度被有效缓冲。逻辑推导指出,利用伺服电机驱动导料机构,可根据实时液位动态调整落料点位置与角度,保持合适落差,避免高空冲击。

此外,采用脉冲式或间歇式给料,有助于打散物料流,降低互锁概率。

进一步探讨基于实时反馈的主动防拥堵逻辑。在入口及仓内关键位部署压力或视觉传感器,监测堆积密度与流动通畅度。理论模型显示,一旦检测到压力异常或流速骤降,系统应立即触发防拥堵协议,如暂停补料、启动振动或反转输送疏解。逻辑上,这种主动防御机制将防拥堵从被动结构设计升维至主动控制行为,能自适应应对突发状况。通过柔性轨迹规划与主动防拥堵逻辑协同,系统能在保证高效率的同时,最大限度减少对瓶群有序性的破坏,确保下游稳定运行。

5. 闭环反馈控制与系统稳定性优化

5.1 液位滞环控制与PID参数自适应整定

为维持储瓶仓液位长期稳定,避免频繁启停导致的机械磨损与电流冲击,引入滞环控制与自适应PID算法至关重要。经典控制理论表明,单阈值控制易致执行机构在阈值附近高频抖动(Chattering)。滞环控制通过设定上下限形成死区,仅当液位超出该范围才触发动作,有效平滑输出。逻辑推演显示,滞环宽度选择需权衡:过宽增大液位波动与缺瓶风险,过窄则丧失抑抖意义。因此,宽度应依据瓶型尺寸、消耗速率波动及系统响应速度动态调整。

对于精细调节,PID控制虽为主流,但面对储瓶仓对象的非线性与时变性,固定参数难以全工况最优。逻辑推导指出,需采用自适应PID算法,依据实时液位误差及其变化率在线调整增益。例如,大误差阶段(严重缺瓶)增大比例增益以提速;小误差阶段(接近目标)减小比例增益并增强微分作用以抑超调。此外,须设计抗积分饱和逻辑,防止执行机构极限运行时积分项过度累积。

进一步探讨多变量耦合下的解耦策略。在多仓并联或串联系统中,各仓液位相互影响构成MIMO系统,独立控制易引发振荡。理论模型显示,需引入前馈或对角矩阵等解耦算法消除干扰。逻辑上,构建“滞环宏观管理+自适应PID微观调节+解耦协同”的层次化闭环体系,可确保液位在动态平衡中保持最优。

5.2 系统能效优化与预测性维护逻辑

除功能稳定外,系统设计需兼顾能效优化与预测性维护,践行绿色制造理念。能量管理分析表明,补料机构是耗

能大户。逻辑推演显示,通过按需启停、变频调速及重力势能回收可显著节能。例如,低消耗时自动降至最低维持转速,既节能又减启动冲击。

理论分析指出,预测性维护基于运行数据深度挖掘。长期监测电机电流波形、振动频谱及响应时间,可建立健康退化模型。逻辑推导表明,当检测到电流异常或延迟增加时,系统可预判链条松动、轴承磨损等潜在故障,提前预警。这种基于状态的维护(CBM)策略避免了定期维护的盲目性与事后维修的被动性。

进一步探讨数字孪生技术的应用前景。构建系统数字孪生体,可在虚拟空间实时映射物理状态并仿真推演。理论模型显示,利用该技术可在不影响生产前提下测试参数组合,寻找能效与稳定性的最佳平衡点。逻辑上,将能效优化与预测性维护纳入闭环体系,使补料系统升级为具备自感知、自优化、自诊断能力的智能实体,极大提升整机智能化水平与经济效益。

6. 结论

本文系统构建了自动理瓶机储瓶仓从散体流动机理、智能感知融合到动态协同控制的完整理论链条。研究证实,突破传统局限需深入解决物料流动非线性、检测信号不确定性及补料动态匹配三大核心难题。

在机理层面,揭示“架桥”与“鼠洞”等散体动力学现象是缺瓶误判与流动中断的物理根源。在检测层面,论证了多传感器冗余容错架构与自适应融合算法的关键作用,实现了从简单阈值判断向复杂态势感知的跨越。在控制层面,提出了基于动态流量匹配与柔性轨迹规划的补料策略,阐明了前馈-反馈复合控制在供需平衡与防拥堵中的核心效能。此外,结合滞环控制、自适应PID及预测性维护的综合方案,为系统长效稳定运行提供了理论保障。

综上所述,该系统集成散体力学、传感技术、自动控制及人工智能,是一项复杂的系统工程。本文构建的理论框架虽未涉及具体量化数据,但其严密的逻辑推演为理解缺瓶检测与补料控制本质提供了清晰视角,奠定了开发高智能、高可靠性装备的理论基础。未来应深化数字孪生、边缘计算及强化学习应用,推动包装机械向更高水平无人化与智能化迈进,助力制造业提质增效。

参考文献

- [1]朱东利. 间歇生产工艺自动化率评估[J]. 石油化工自动化, 2026, 62(1): 27-31, 64.
- [2]杨朋, 缪立新. 自动化存取系统控制优化研究综述[J]. 工业工程, 2011, 14(1): 123-127.
- [3]周宏博. 面向柔性制造的电气自动化控制系统组态设计[J]. 现代制造技术与装备, 2026, 62(1): 182-184.
- [4]初阳. 一种聚氨酯板材连续线自动循环自动补料系统的研制与应用[J]. 装备制造技术, 2015(4): 65-66, 70.