

带式输送机动态分析方法

孙毅群

西安重装蒲白煤矿机械有限公司 陕西 渭南 715517

摘要：带式输送机作为现代工业重要的散装物料连续运输设备，其动态分析方法对于优化设计和确保稳定运行至关重要。动态分析主要包括刚体模型、弹性体模型和粘弹性体模型，其中粘弹性体模型能更真实反映输送带的特性。数值解法如有限元分析法（FEA）和波动分析法是主流方法，可处理复杂工况和动态响应。动态分析软件如MATLAB/Simulink和Belt Ansyslyst的应用，进一步提升了分析的精确度和实用性，为带式输送机的优化设计提供了有力支持。

关键词：带式输送机；动态分析方法；实例

引言：带式输送机作为物料输送系统中的关键设备，在现代工业生产中发挥着不可或缺的作用。其稳定运行和高性能对于保障生产线的连续性和效率至关重要。然而，在实际运行过程中，带式输送机常面临动态载荷变化、输送带振动和张力分布不均等问题。因此，深入研究带式输送机的动态分析方法，对于优化其结构设计、提高运行稳定性和降低能耗具有重要意义。本文将综述现有的动态分析方法，探讨其在带式输送机设计中的应用与挑战。

1 带式输送机的基本原理与结构

1.1 带式输送机的工作原理

带式输送机是一种连续输送物料的机械设备，其核心原理是通过输送带的循环运动实现物料的水平或倾斜传输。

1.1.1 输送带的运动与物料传输

输送带作为承载和牵引构件，在驱动滚筒的带动下形成闭环运动。物料从进料口均匀落在输送带上，随输送带移动至卸料端。输送带的运动速度、宽度和材质直接影响输送效率与适用范围。例如，高摩擦橡胶带适用于倾斜输送，而轻型PVC带常用于食品行业。

1.1.2 驱动装置与张紧装置的作用

（1）驱动装置：通常由电机、减速器和驱动滚筒组成，提供动力使输送带运动。驱动滚筒通过摩擦力将动力传递给输送带，其表面常采用包胶或花纹设计以增大摩擦。

（2）张紧装置：用于维持输送带适当的张力，防止打滑或跑偏。常见形式有螺旋式、重锤式和液压式，其中重锤式能自动调节张力，适用于长距离输送^[1]。

1.2 带式输送机的结构组成

带式输送机由多个关键部件协同工作，确保稳定运行。

1.2.1 主要部件介绍

（1）输送带：多为橡胶或塑料复合材料，需具备耐磨、抗拉和耐腐蚀性。根据用途可分为普通带、耐热带和防静电带等。

（2）滚筒：包括驱动滚筒、改向滚筒和增面滚筒。驱动滚筒传递动力，改向滚筒改变输送带方向，增面滚筒增大包角以提高驱动力。

（3）托辊：支撑输送带和物料，减少运行阻力。分为承载托辊（槽型或平型）和回程托辊（平型），缓冲托辊用于保护输送带免受冲击。

（4）驱动装置：核心动力源，需匹配输送机功率和负载需求。

（5）张紧装置：确保输送带与滚筒间有效接触，避免松弛或过度磨损。

1.2.2 部件的相互作用与整体协调性

各部件需精密配合以实现高效输送。例如：（1）托辊间距过大会导致输送带下垂，增加摩擦；过小则提高成本。（2）驱动滚筒与张紧装置的协同可避免输送带打滑，尤其在重载启动时。（3）改向滚筒的布置需考虑输送带转向半径，防止应力集中。

2 输送带的特性研究

2.1 输送带的材料组成与结构特点

输送带是带式输送机的核心部件，其性能直接影响输送效率、使用寿命和运行稳定性。其材料组成和结构设计需综合考虑强度、耐磨性、抗冲击性及环境适应性等因素。

2.1.1 橡胶与中间骨架材料的组合

输送带通常由覆盖胶、骨架材料和粘合层三部分组成：

（1）覆盖胶：外层橡胶，直接接触物料和环境，需具备耐磨、抗撕裂、耐高温或耐腐蚀等特性。常见橡胶类型包括天然橡胶（NR）、丁苯橡胶（SBR）和氯丁橡胶（CR），特殊工况下可采用硅橡胶或氟橡胶。（2）

骨架材料：承载拉力的核心层，决定输送带的抗拉强度和刚度。传统骨架材料包括棉帆布、尼龙（NN）、聚酯（EP）等织物，而高强度需求场景则使用钢丝绳芯（ST）或芳纶纤维。（3）粘合层：确保橡胶与骨架材料的紧密结合，通常采用间苯二酚-甲醛-胶乳（RFL）浸渍处理，以提高层间粘合强度^[2]。

2.1.2 织物芯与钢丝绳芯输送带的区别

（1）织物芯输送带：以多层织物（如EP或NN）为骨架，通过硫化工艺粘合成整体。优点：柔韧性好，适用于短距离、高频率启停的输送场景；成本较低；缺点：抗拉强度较低（通常 $\leq 2000 \text{ N/mm}$ ），长期使用易发生层间剥离。

（2）钢丝绳芯输送带：以纵向排列的钢丝绳为骨架，外包橡胶覆盖层。优点：抗拉强度极高（可达8000 N/mm以上），适用于长距离、大运量输送（如矿山、港口）；抗冲击性强，寿命长；缺点：横向柔韧性差，需配合大直径滚筒使用；成本较高。

2.2 输送带的粘弹性特性

输送带作为高分子复合材料，表现出显著的粘弹性行为，即兼具弹性固体（储能）和粘性流体（耗能）的特性。这一特性对输送机的动态响应、能耗和稳定性具有深远影响。

2.2.1 粘弹性模型（如Kelvin-Voigt模型）的建立与应用

（1）Kelvin-Voigt模型：由弹簧（弹性模量E）与阻尼器（粘性系数 η ）并联组成，其本构方程为： $\sigma = E\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt}$ 。该模型能描述输送带的蠕变（恒定应力下应变随时间增加）和应力松弛（恒定应变下应力衰减）现象。

（2）广义Maxwell模型：由多个Maxwell单元串联而成，更适用于宽频域下的动态特性分析，可模拟输送带在启动、制动时的瞬态响应。

2.2.2 粘弹性对输送机动态特性的影响分析

（1）启动与制动过程：粘弹性导致输送带在加速或减速时产生滞后效应，可能引发“弹性波”传播，造成局部张力突变（如“浪涌现象”），需通过软启动技术（如变频调速）缓解。

（2）能量损耗：粘性阻尼会转化为热能，使输送带运行阻力增加（约占总功率的10%~20%），尤其在长距离输送中需优化张力配置以降低能耗^[3]。

（3）动态稳定性：粘弹性可能放大输送带的横向振动（如“蛇行”跑偏），需通过改进托辊间距或采用动态张力控制系统抑制。

3 带式输送机动态分析方法

3.1 动态分析方法的分类与特点

3.1.1 刚体模型、弹性体模型、粘弹性体模型的对比分析

（1）刚体模型：特点：假设输送带为不可变形的刚体，仅考虑整体运动，忽略弹性变形；适用场景：短距离、低速输送机的初步设计，计算简单但误差较大；局限性：无法分析振动、冲击等动态效应。

（2）弹性体模型：特点：将输送带视为弹性体，考虑其拉伸、弯曲变形，常用波动方程描述动态行为；适用场景：中长距离输送机，可分析启动/制动时的弹性波传播；局限性：未考虑材料的粘性耗散，对高频振动预测不足^[4]。

（3）粘弹性体模型：特点：结合弹性与粘性（如Kelvin-Voigt模型），更真实反映输送带的蠕变、松弛特性；适用场景：高精度动态分析，尤其是长距离输送机的能耗与稳定性研究；局限性：模型复杂，计算成本高。

3.1.2 数值解法与解析法的优缺点及适用范围

（1）解析法：优点：通过数学方程（如波动方程）直接求解，结果精确且物理意义明确；缺点：仅适用于简单边界条件和线性问题，难以处理复杂工况；应用：输送带纵向振动的波动分析。

（2）数值解法：优点：可处理非线性、多自由度问题（如有限元法、差分法），适用性广；缺点：计算量大，需依赖软件工具；应用：复杂结构输送机的动态响应分析。

3.2 主流动态分析方法详细介绍

3.2.1 有限元分析法（FEA）

（1）离散化模型建立：将输送带离散为多个单元（如梁单元或壳单元），每个单元通过节点连接，赋予材料属性（弹性模量、密度等）。

（2）求解过程：建立动力学方程 $[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}$ ；采用隐式/显式积分法（如Newmark- β 法）求解瞬态响应。

（3）结果分析：可输出应力分布、固有频率、振动模态等，用于优化托辊布置或张力配置。

3.2.2 波动分析法

（1）波动方程的建立与求解：基于一维波动方程 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ 。（c为波速），结合边界条件（驱动端/张紧端）解析求解。

（2）适用条件：适用于分析输送带启动时的弹性波传播、张力突变（浪涌现象）。

（3）局限性：忽略横向振动，难以处理多驱动点或

复杂拓扑结构。

3.3 动态分析软件的应用

3.3.1 常用软件介绍

(1) MATLAB/Simulink: 功能: 通过编程实现模型参数化分析, 适合粘弹性模型的数值求解与控制策略仿真。案例: 某矿山输送机通过Simulink模拟软启动过程, 优化了加速度曲线, 减少张力峰值30%。

(2) Belt Anslst: 功能: 强大的静态设计与分析能力, 可进行张力、功率、载荷的精确计算; 并具有先进的动态分析与仿真功能, 可对启动、制动过程进行模拟, 并分析和预测运行中的弹性振动与动态载荷, 在长距离输送的状况下表现优异。

3.3.2 软件应用趋势

(1) 多软件协同: 如Belt Anslst与MATLAB联合仿真, 兼顾结构细节与控制系统设计。

(2) 数字化孪生: 通过实时数据驱动模型(如西门子NX), 实现故障预测与智能调控。

4 带式输送机动态分析实例

4.1 输送机动态分析模型的建立

4.1.1 动态分析方法选择

某煤矿固定式带式输送机输送距离2000m、带宽1.2m、运量1000t/h、带速3.15m/s, 通过Belt Anslst静态计算, 确定输送带型号为ST/S3150, 带厚23.3mm; 采用有限元-多体动力学耦合方法:

有限元法: 用于模拟输送带的弹性变形(视为黏弹性体, 采用Kelvin-Voigt模型); 多体动力学: 处理驱动滚筒、改向滚筒等刚性部件的运动耦合; 边界条件: 考虑启动/制动时的惯性力、物料分布不均引起的偏载、托辊组阻尼效应。

4.1.2 动力学方程与状态方程

(1) 输送带动力学方程: 基于连续介质理论, 建立轴向振动方程: $\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} + q(x, t)$ 。其中, ρ 为线密度, T 为张力, c 为阻尼系数, $q(x, t)$ 为分布载荷。

(2) 状态方程: 将系统离散化为集中质量-弹簧模型, 状态变量包括位移 x 、速度 v 、张力 T , 形式为: $\dot{X} = AX + Bu$ 。其中 A 为系统矩阵, B 为输入矩阵, u 为驱动力/制动力输入。

4.2 动态仿真与结果分析

4.2.1 仿真模拟工具与参数

使用Belt Anslst与MATLAB联合仿真:

(1) 输入参数: 启动时间30s, 制动时间20s, 带速3.15m/s, 摩擦系数0.35;

(2) 关键假设: 输送带初始张力均匀, 驱动滚筒扭矩线性加载。

4.2.2 仿真结果分析

(1) 动张力分布: 启动阶段头部张力峰值达1.8倍稳态值, 尾部因弹性波传递滞后出现负张力;

(2) 速度波动: 驱动端速度超调量12%, 尾部因弹性振动产生 ± 0.2 m/s波动;

(3) 加速度变化: 最大加速度 0.1m/s^2 出现在启动第8秒, 导致物料滑动风险。

表1 关键动态参数对比

参数	启动阶段	稳态阶段	制动阶段
最大张力(kN)	156	85	120
速度波动(%)	± 15	± 2	± 10

4.3 优化设计建议

4.3.1 优化方案

(1) 张力控制: 采用液压张紧装置+PID闭环控制, 将启动张力波动抑制在 $\pm 10\%$ 以内;

(2) 驱动策略: 改用S曲线加速(分3阶段: 0-10s缓加速, 10-25s恒加速, 25-30s缓加载);

(3) 结构改进: 在距头部500m处增设缓冲托辊组, 降低弹性波反射幅值。

4.3.2 验证结果

优化后仿真显示: (1) 动张力峰值下降32%, 速度超调量减少至5%; (2) 物料滑动风险指数从0.7降至0.2(安全阈值0.3以下)。

结束语

综上所述, 带式输送机的动态分析方法在保障其稳定运行和优化设计方面发挥了关键作用。通过对输送带的粘弹性特性、动态响应以及影响因素的深入分析, 我们能够更准确地理解带式输送机的运行状态和潜在问题。未来, 随着计算技术和仿真软件的不断进步, 动态分析方法将更加精细化和智能化, 为带式输送机的设计和优化提供更多可能性。我们将持续关注这一领域的发展, 致力于推动带式输送机技术的不断创新与升级。

参考文献

[1]施恩广,纪非洲.带式输送机动态优化控制系统的设计分析[J].工程地质学,2022,(12):118-119.
[2]邵永辉.矿用带式输送机电气系统优化设计方案[J].自动化应用,2020,(12):127-128.
[3]李晓东.带式输送机动态分析方法[J].文化科学,2020,(07):72-73.
[4]汉少雄.带式输送机控制系统研究分析[J].工程地质学,2022,(09):95-96.