

基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统

于文泽¹ 葛嘉卿² 张寅^{2, 3*}

1.唐山曹妃甸煤炭港务有限公司, 河北 唐山 063200

2.燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004

3.燕山大学工程训练中心, 河北 秦皇岛 066004

[摘要]为解决传统皮带张紧系统调节滞后、动态适应性差的问题, 本论文设计了码垛机皮带液压张紧系统, 并提出位置-压力双闭环控制策略。针对传统机械张紧系统人工维护频繁、恒张力张紧系统体积大且难适配动态工况的缺陷, 结合皮带弹性塑性变形、启停冲击及长距离张力不均的工况痛点, 构建了含压力传感器、位移传感器及电比例阀的液压控制结构, 通过位移内环与压力外环实现协同控制。运行数据表明, 该系统启动 10 秒内张紧力即可稳定, 动态工况下张紧力波动范围为 190t-210t, 压力变化幅度 $\leq 10\%$, 满足设计要求, 同时有效提升系统寿命、降低皮带更换频率。

[关键词]皮带机; 液压张紧; 闭环控制

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18000

中图分类号: TD5

文献标识码: A

Belt Hydraulic Tensioning System of Palletizer Based on Position-pressure Dual Closed-loop Control

YU Wenzhe¹, GE Jiaqing², ZHANG Yin^{2, 3*}

1. Tangshan Caofeidian Coal Port Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063200, China

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China

3. Engineering Training Center, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China

Abstract: In order to solve the problems of lagging adjustment and poor dynamic adaptability in traditional belt tensioning systems, this paper designs a hydraulic tensioning system for palletizing machine belts and proposes a position pressure dual closed-loop control strategy. In response to the shortcomings of traditional mechanical tensioning systems, such as frequent manual maintenance, large volume of constant tension tensioning systems, and difficulty in adapting to dynamic working conditions, a hydraulic control structure containing pressure sensors, displacement sensors, and electric proportional valves was constructed by combining the pain points of belt elastic plastic deformation, start stop impact, and long-distance tension unevenness. Collaborative control was achieved through the displacement inner ring and pressure outer ring. The operating data shows that the tension of the system can be stabilized within 10 seconds after startup. The fluctuation range of tension under dynamic conditions is 190t-210t, and the pressure change amplitude is $\leq 10\%$, which meets the design requirements and effectively improves the system life and reduces the frequency of belt replacement.

Keywords: belt conveyor; hydraulic tensioning; closed-loop control

引言

皮带机作为散状物料运输的核心设备, 广泛应用于矿山、港口、电厂、化工等领域。其运行依赖皮带的连续传动, 张紧装置是皮带输送机的重要组成部分, 能够实现输送带的张紧, 保证带式输送机运行的安全与稳定。

传统机械张紧系统, 以螺旋拉紧、固定式电动绞车为代表, 结构简单、成本低廉, 依赖人工定期调节张力, 适用于 50m 以下短距离、低负荷的小型皮带机 (如车间小型物料输送)。但其调节滞后、张力精度低, 每月需多次人工维护, 已难以满足复杂工况需求。恒张力张紧系统, 包括垂直式重锤、塔架式重锤等类型, 通过重力实现恒定张力补偿, 适用于 50m 以上中长距离皮带机, 在矿山、港口等传统领域应用广泛。其优势是张力稳定、可靠性高,

但体积庞大、安装空间要求高, 且无法适应动态工况的张力波动。

因为皮带自身特性, 皮带在载荷作用下会发生弹性伸长和塑性变形, 长期运行后长度会增加, 若不及时补偿, 会导致皮带松弛、打滑。

启动与制动稳定性需求: 皮带机启动时会产生瞬时冲击张力, 制动时会出现张力骤减, 若无张紧系统调节, 易造成皮带跑偏、撕裂甚至设备损坏。在多滚筒、长距离、大倾角的皮带机中, 皮带各段张力分布不均, 需张紧系统平衡张力, 避免局部应力过大。

因此本文提出了基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统。本系统可以根据皮带张紧力和张力实施液压缸位移控制进行实时调整。双闭环张紧系统可消除

传统张紧方式的“打滑、跑偏、张力失控”等问题，确保物料输送与码垛动作精准同步，减少因皮带故障导致的停机，提升生产线整体效率。同时双闭环控制可与码垛机的整体控制系统（如 PLC、工业互联网平台）无缝对接，实现张力参数的远程监控、历史数据分析和智能预警，符合现代制造业“少人化、智能化”的发展趋势。例如，通过采集不同工况下的张力数据，可优化张紧策略，实现基于大数据的预测性维护。该系统的“位置-压力双闭环”控制逻辑，可推广至其他需要精准张力控制的传动场景，具有较强的行业借鉴价值。

1 基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统结构

目前曹妃甸煤炭港务公司二期码头堆垛机上采用的是机械限位固定张紧装置。固定式张紧装置是指张紧滚筒在输送机启动前和停机后可以左右移动改变张紧力，而在运行过程中位置始终不变，张紧力随着张力的变化而变化（不能保持恒定）的张紧装置。但当皮带产生塑性变形后，引起皮带张力变小，悬垂度增大，这时应重新调整张紧位置。这种张紧装置的优点是体积小，拉力大，广泛运用到短距离带式输送机中，但其不能自行张紧。原有系统如图 1 所示。



图 1 现场机械限位装置

这样的结构主要导致三个问题：

（1）水平度与对中性难以保证

机械限位结构的安装和调整依赖人工校准，两侧支撑部位的水平度容易出现偏差。这种偏差会直接导致皮带运行时受力不均，不仅容易引发皮带跑偏、边缘磨损的问题，还会因接触面贴合不紧密产生打滑现象，影响传动效率，严重时还会缩短皮带的使用寿命。二侧水平度不够，容易造成皮带跑片和打滑现象。

（2）张紧力控制缺乏精准性

机械限位通常通过固定的机械结构设定张紧行程，无法实时感知皮带的张力变化。实际运行中，皮带会因温度升高、磨损、材质老化等因素发生弹性形变，而机械限位无法动态调整张紧力，导致张紧力要么过松（增加轴承负

荷和能耗），要么过紧（加剧打滑风险），且无法准确量化张紧力的具体数值，难以达到最优传动效果。皮带张紧度不准，不能准确知道力的变化。

（3）调整操作繁琐且耗时费力

每次需要调整张紧力时，都必须通过人工拆卸、微调机械限位部件来实现。整个过程需要停机操作，不仅中断生产流程，还对操作人员的经验和技能有一定要求，调整效率低下。尤其在批量设备或高频调整场景中，会大幅增加人力成本和生产停机时间，影响整体生产效率。每次调整张紧力都要通过人工方式，费时费力。

因此本文提出通过系统改造，实现基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统系统结构。如图 2 所示。

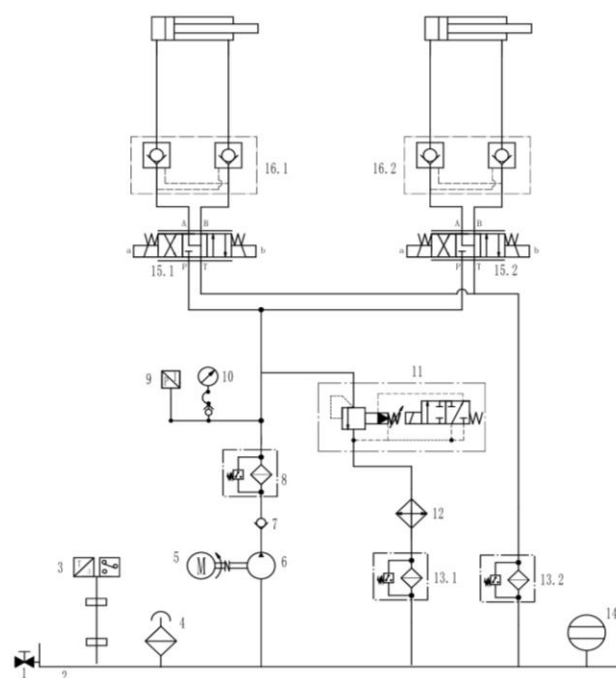


图 2 液压系统原理图

其中 1.截止阀、2.油箱、3.液位传感器、4.过滤器、5.电机、6.液压泵、7.单向阀、8.过滤器、9.压力传感器、10.压力表、11.电磁卸荷阀、12.加热器、13.过滤器、14.液位计、15.电比例阀、16.液压锁。

以上硬件是支撑闭环控制的关键元件，形成了“动力输出-执行动作-信号反馈-控制调节”的完整链路。

液压动力单元：提供系统压力源，包括定量/变量泵（输出液压油）、油箱、溢流阀（设定系统最高压力，保障安全）、过滤器（净化油液）。

执行机构：双作用液压油缸，活塞杆与皮带张紧轮连接，通过油缸伸缩驱动张紧轮位移，进而改变皮带张紧程度。

控制元件：比例压力阀（调节油缸压力，关联张紧力）、比例流量阀/电磁换向阀（控制油缸伸缩速度与方向，关联张紧位置）、PLC 或专用控制器（核心控制单元，处理反馈信号并输出指令）。

反馈元件：压力传感器（安装于油缸无杆腔或张紧力输出端，实时采集皮带张力对应的液压压力信号）、位移传感器（与油缸活塞杆刚性连接，实时采集张紧轮的位置信号）。

负载对象：码垛机皮带及传动系统，包括皮带的弹性特性、运行阻力、动态负载（运输物料过程中的张力冲击）。

以皮带张紧位移控制设定作为系统位移内环，根据运输物料的系统载荷变化不同设定压力范围，实现压力外环的闭环控制，进而实现双闭环控制的皮带张紧系统。

这样系统可以实现：①张紧力控制精度与稳定性双提升。压力闭环可实时监测皮带张力变化（如因负载波动、温度变形、皮带磨损等导致的张力波动），并通过液压系统动态调节压力，确保张力始终稳定在预设最优区间（如避免过紧导致皮带撕裂、轴承过载，或过松引发打滑、传动失效）；同时，位置闭环可精确控制张紧油缸的位移量，避免因机械松动、振动等导致的位置漂移，双重闭环形成“张力-位置”的相互校验与修正，大幅提升控制精度（通常张力控制误差可控制在 $\pm 5\%$ 以内）。②码垛机工作时，皮带需频繁启停、承受动态负载（如抓取重物瞬间的冲击张力），双闭环系统可通过压力传感器快速捕捉张力突变（响应时间毫秒级），结合位置反馈实时调整液压流量与压力，实现“动态缓冲-快速补偿”的自适应控制。例如，当码垛负载突然增大时，系统可瞬间提升张紧力以抵抗皮带松弛，避免打滑；负载减小时则及时回调张力，减少能耗与磨损。③稳定的张力控制可避免皮带因受力不均导致的局部磨损、边缘起毛或断裂，延长皮带更换周期；同时，通过精准控制油缸位置和压力，可减少张紧机构（如轴承、连接件）的附加应力，降低机械部件的疲劳损伤，间接降低设备维护和更换成本。

2 系统仿真

为了验证该自动张紧系统的效果，根据液压原理，在Amesim中搭建仿真模型进行分析。

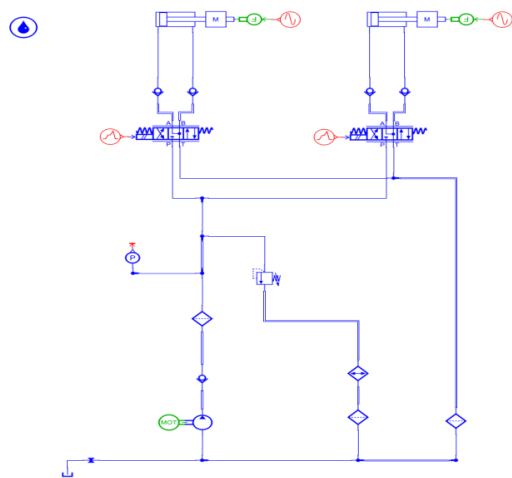


图3 Amesim 仿真模型

基于液压原理图搭建 AMESim 模型的过程，是将原理图中的液压元件、管路连接及控制逻辑转化为 AMESim 软件中对应模块的可视化建模过程，需遵循“元件映射-参数配置-连接验证-控制集成”的步骤。系统 Amesim 模型如图 3 所示。模拟运输煤炭真实工况下的仿真如图 4 所示。

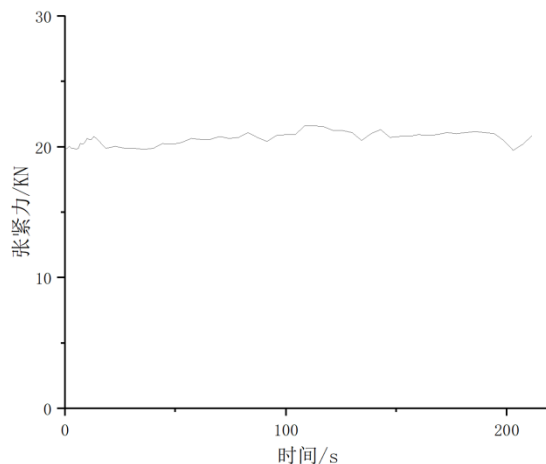


图4 载荷变化条件下的张紧力变化曲线

系统平稳启动后，若因输送物料重量变化导致皮带张紧力出现波动，控制系统将按以下逻辑实施精准调控：当张紧力处于预设值 20kN 的 $\pm 10\%$ 范围内（即 18kN-22kN）时，系统保持张紧机构位移不变，仅通过压力闭环实时调节液压压力，确保张紧力稳定在该区间内；若张紧力波动超出 $\pm 10\%$ 范围（即低于 18kN 或高于 22kN），则触发位移闭环控制，驱动张紧机构调整位置以重新整定张紧力，直至其回归 20kN 的 $\pm 10\%$ 区间。通过上述实时闭环控制逻辑，可始终保证皮带张紧力处于有效控制范围内，满足码垛机稳定运行需求。

3 系统运行效果

根据液压系统原理，实时采集系统运行数据，验证系统运行效果。

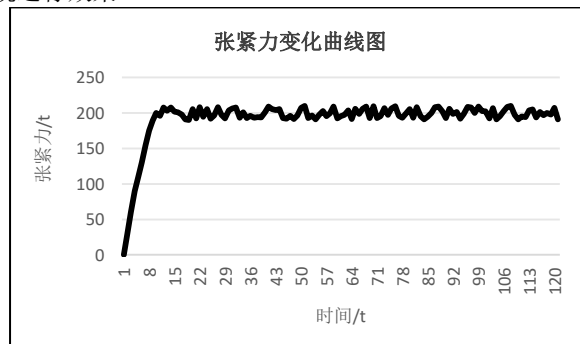


图5 张紧力变化曲线图

从系统中可以看到在系统启动时，系统张紧力开始建立系统压力，大约 10s 中后达到稳定。由于运输的物料重

量变化,导致系统张紧动态变化,在 190t 到 210t 之间变化,系统压力变化在 10%左右,满足系统运行要求。



图 6 现场运行图

如图 6 所示,通过轴承座将液压缸与底座连接。实现液压张力控制。电控系统可以实时显示运行状态,实时显示压力数据和位移数据。当系统出现异常,可以实现报警和故障数据记录。

4 结论

基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统采用了压力和位移双闭环控制结果,能够完成对位移和压力的分别控制,从而确保调节的控制稳定性。皮带机在启动和运行阶段,张紧力波动在 10%的有效范围内,对

于系统稳定工作和皮带的有效寿命提高均达到了良好的效果。

该系统在曹妃甸煤二期已经投入使用,效果良好,具有很好的示范效果和推广应用价值。

【参考文献】

- [1]徐孝,孟巧荣,王定龙.皮带机变频张紧装置调速系统设计[J].煤炭技术,2019,38(10):169-172.
- [2]韩东升,杜永贵,庞宇松,等.基于预见控制的皮带机调速节能方法[J].工矿自动化,2018,44(6):68-72.
- [3]宋瑾瑾.皮带机永磁变频自动张紧装置研究设计[D].青岛:山东科技大学,2018.
- [4]马少云.皮带机保护的安装和应用[J].煤炭工程,2018,50(1):13-115.

作者简介:于文泽(1987.12—),毕业于沈阳工业大学工程学院,机械设计制造及自动化专业,当前就职单位:唐山曹妃甸煤炭港务有限公司,职务:技术员,职称级别:工程师;通讯作者:张寅(1979.9—),毕业于燕山大学,流体传动与控制专业,当前就职单位:燕山大学机械工程学院,工程训练中心,副教授。