

# 线拉双活塞油压碟刹系统的动态响应特性与制动平顺性控制策略

徐子健

杭州诺维奇机械科技有限公司 浙江 杭州 311100

**【摘要】**：线拉双活塞油压碟刹系统是自行车制动领域的重要创新，融合了机械线拉的操作便利性与液压制动的性能优势。本文系统分析了该系统的结构组成与工作原理，重点探讨了其动态响应特性，包括响应延迟、制动力建立及双活塞协同机制。在此基础上，针对制动平顺性这一核心指标，提出了基于力分配优化、迟滞补偿和热衰减抑制的综合控制策略。研究表明，系统的动态响应受线缆弹性、液压传递及活塞运动特性的耦合影响，通过优化双活塞时序配合和压力分配，可有效改善制动过程的线性度和可控性。

**【关键词】**：线拉油压碟刹；双活塞；动态响应；制动平顺性；控制策略

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.114

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

自行车制动系统是保障骑行安全的关键。随着骑行场景多元化，市场对制动系统提出了更高要求：不仅需要强劲的制动力，更要求制动过程平顺可控。传统机械碟刹结构简单但线性度差、手感沉重；纯液压碟刹性能优越但成本高、维护复杂。线拉油压碟刹系统作为折中方案，通过线缆触发液压机构，兼具安装便捷性与制动平顺性。特别是双活塞结构的引入，进一步提升了制动效能与稳定性。然而，该系统动态响应涉及机械、液压、摩擦三域耦合，其响应特性与平顺性控制机理尚缺乏系统性理论分析。

### 1.2 国内外研究现状

当前，自行车制动研究多聚焦于热衰减、材料及液压优化。针对线拉油压系统，现有成果多为专利技术，如双油缸腔体设计，为双活塞系统提供了结构基础。制动平顺性方面，汽车领域的研究具有一定借鉴意义，但因结构、成本及使用场景差异，难以直接应用。因此，开展针对线拉双活塞油压碟刹系统的专门研究，具有重要的理论价值与工程意义。

### 1.3 研究内容与方法

本文围绕线拉双活塞油压碟刹系统，首先阐述其结构组成与工作原理；其次，分析动态响应特性，揭示响应延迟、制动力建立及双活塞协同规律；再次，提出针对性的制动平顺性控制策略；最后，通过对比分析验证策略有效性并给出结论。

## 2 系统结构与工作原理

### 2.1 系统总体构成

线拉双活塞油压碟刹系统主要由线拉操控机构、液压转换机构和双活塞制动卡钳三部分构成。

线拉操控机构：包括刹车把手、钢缆和线管。骑行者捏动把手，钢缆被牵引，将力传递至液压机构。该设计适配标准刹车把手，降低了改装难度。

液压转换机构（线拉油压上泵）：是系统核心。钢缆牵引驱动件，压缩油缸内制动液，将机械力转化为液压力。部分设计采用双油缸腔体，可分别输出油液至卡钳的不同活塞，实现双路独立控制。

双活塞制动卡钳：内部设有两个活塞，分别对应来令片的两个受力点。高压制动液进入卡钳油腔，推动活塞伸出，将来令片压向刹车盘片，通过摩擦产生制动力。

### 2.2 双活塞结构设计特点

相较于单活塞卡钳（需依靠浮动结构实现夹紧），双活塞卡钳能从来令片两侧同时施加压力，使接触更均匀，提高制动力利用效率，并减少因受力不均引起的制动抖动和噪声。采用独立油腔供油的双活塞系统，能实现更灵活的制动力分配，为平顺性控制提供了硬件基础。

### 2.3 线拉与液压的转换机制

转换过程通过上泵内的驱动件完成。钢缆的拉力与油液阻力在此平衡。转换特性受多重因素影响：一是钢缆自身弹性伸长，导致操作行程与活塞位移非线性；二是驱动件与油缸壁的摩擦，影响响应灵敏度；三是制动液的可压缩性及油路中空气含量，空气会显著降低液压刚性，造成响应迟滞。在双油缸设计中，两个驱动件由同一钢缆联动，但可通过油路互通实现协调控制。

## 3 动态响应特性分析

### 3.1 响应延迟的来源与特征

线拉双活塞油压碟刹系统的响应延迟，指从骑行者捏动刹车把手到制动力实际作用于盘片的时间间隔，主要由线缆空行程、液压建立时间和活塞接触行程串联构成。

线缆空行程源于钢缆与线管间隙、接头装配间隙及线缆弹性伸长。制动初期需先消除这些间隙与变形，才能将有效力传递至液压机构。其大小与线缆预紧程度、走线布局和线管压缩性密切相关。

液压建立时间是从驱动件压缩制动液到油路压力足以推动活塞移动所需的时间。虽然理想状态下制动液不可压缩、液压传递瞬时，但实际油路中微量空气的可压缩性会显著延长该时间，导致制动滞后。此阶段受制动液黏度、油路截面积及空气含量影响。

活塞接触行程指活塞从初始位置移动到来令片与盘片接触的行程，取决于活塞回位机构设置及来令片与盘片的初始间隙。间隙过大时，活塞需移动更长距离才能建立接触，增加响应延迟。

### 3.2 制动力建立的阶段性特征

制动力建立过程分为三个阶段：空行程阶段、制动力上升阶段和制动力稳定阶段。

空行程阶段从制动开始到来令片与盘片首次接触。此时骑行者感受的阻力主要来自线缆摩擦和复位弹簧弹力，制动力尚未产生，手感轻软。适当的空行程有利于精细控制，过大则导致响应迟钝。

制动力上升阶段是制动效能的关键。来令片与盘片接触后，随操作力增加，液压力上升，正压力增大，制动力快速建立。其上升速率决定响应灵敏度：过快易造成制动冲击，过慢则延长制动距离，影响安全。

制动力稳定阶段指制动力达到目标值后，在操作力不变时保持相对稳定。实际制动中，因摩擦系数和系统热状态变化，制动力可能出现波动或衰减。

双活塞系统在独立油腔供油设计中，可通过油路结构和活塞直径差异化调节两活塞的启动时序，实现“分级介入”——优先启动一活塞保证轻制动平稳响应，增大制动力时第二活塞介入，提升制动平顺性。

### 3.3 双活塞协同动态特性

双活塞的协同状态决定制动平顺性与稳定性。理想状态为两活塞同步伸出，均匀压迫来令片，使其与盘片平行接触。但制造公差、油路阻力差异及活塞摩擦差异等因素，可能导致活塞不同步。

不同步主要表现为两种：一是一个活塞先伸出，来令片倾斜接触盘片，引起制动抖动与噪声；二是两活塞伸出速度不一，造成制动力分布不均及来令片偏磨，影响使用寿命。

协同特性还受液压回路结构影响。并联油路中两活塞压力相等，伸出速度取决于各自摩擦阻力与回位弹簧力；独立油路则可独立控制压力，协同调节能力更优，但系统复杂度更高。

### 3.4 影响动态响应的关键参数

影响系统动态响应的关键参数可归纳如下：

机械传动参数包括钢缆弹性模量、线缆长度、线管压缩系数、线缆预紧力及连接间隙，主要影响响应延迟与初始手感。

液压系统参数包括制动液黏度、油路直径与长度、油路内空气含量、活塞与油缸配合间隙及密封件摩擦特性，影响液压建立时间和压力传递效率。

活塞与来令片参数包括活塞直径与行程、回位弹簧刚度、来令片与盘片初始间隙、来令片摩擦特性及热传导性能，影响制动力上升速率与稳定性。

操作输入参数包括操作力大小与速度及其持续特性，不同的操作方式会激发系统不同的响应特征。

## 4 制动平顺性控制策略

### 4.1 制动力分配优化策略

制动力分配是改善制动平顺性的核心。对于线拉双活塞系统，优化分为两个层面：双活塞力分配与前后轮制动力分配。

在双活塞力分配层面，可采用“主从活塞”设计。两个活塞设定为不同响应特性：主活塞启动压力小、响应快，负责轻制动工况；从活塞需更高压力启动，在重制动时介入辅助。该设计提升了小制动力输入时的线性度，避免因活塞启动阈值过高导致的制动力跳跃。

在前后轮制动力分配层面，根据骑行工况动态调整前后刹车比例。前刹车在减速中承担更大制动力，但过大易致前轮抱死或翻车。通过线拉油压系统的压力调节功能，可实现前轮制动渐进介入，使制动更平稳可控。

### 4.2 迟滞与非线性补偿

线拉双活塞系统存在迟滞与非线性的固有特性。迟滞主要源于机械传动的摩擦与间隙，表现为制动力与操作力间的回环差；非线性则来自线缆弹性变形及液压系统压力—流量特性。

迟滞补偿重在从设计阶段减少间隙与摩擦。具体措施包括：采用低摩擦线缆与线管内衬；优化走线以减小弯折角度；装配时适当预紧线缆消除间隙；选用低摩擦活塞密封件，降低液压环节摩擦损失。

对无法消除的迟滞与非线性，可通过手感调校补偿。如在刹车把手上设置变化杠杆比曲线，使操作力与制动力形成更线性关系。部分高端把手还配置免工具行程调节旋钮，便于骑行者按需调整空行程与触感。

### 4.3 热衰减抑制方法

制动时摩擦生热会导致制动效能下降，即热衰减。线拉双活塞油压碟刹的热衰减主要表现为：来令片与盘片摩擦系数的温度依赖性，以及制动液高温气化造成的液压传递失效。

加强散热是抑制热衰减的首要措施。主流做法包括：采用带散热鳍片的来令片背板以增加散热面积；使用大直径刹车盘片分散热量；在卡钳与车架间设置隔热垫片，减少热量向液压系统传导。

从控制策略上,可通过制动力分配减轻热衰减影响。长下坡等连续制动工况下,建议采用间歇制动以保障冷却时间。对前后独立控制系统,可适当增加后刹车使用比例,使前刹车获得冷却机会。

此外,选用高沸点制动液是防止气塞的有效手段。DOT 4 或 DOT 5.1 等级制动液具备较高的干沸点与湿沸点,可满足高强度制动工况的高温要求。

#### 4.4 自适应控制机制

自适应控制使系统能根据工况变化自动调整制动特性。在线拉双活塞油压碟刹系统中,主要通过以下方式实现:

**基于制动频率的自适应:**通过监测制动频率与持续时间,判断城市通勤或山地越野等工况,相应调整制动响应——高频制动时提升灵敏度,长时间连续制动时适当降低响应速度以延缓热积累。

**基于温度的自适应:**在卡钳或液压管路中设置温度传感器,当系统温度超过阈值时,自动调整制动力分配或触发降温策略。该功能已在高端电助力自行车上应用。

**基于骑行模式的自适应:**配合整车骑行模式切换,制动系统提供对应特性曲线。经济模式下优先能量回收,运动模式下强调响应速度,舒适模式下注重平顺性。

### 5 系统性能对比分析

#### 5.1 不同配置下的响应特性对比

为了更直观地理解线拉双活塞油压碟刹系统的性能特点,本文对三种典型配置的制动系统进行了对比分析。对比维度包括响应速度、制动力线性度、手感一致性、热衰减耐受性和维护便利性。如下表所示:

性能指标	传统机械碟刹	纯液压碟刹	线拉双活塞油压碟刹
响应速度	较慢,受线缆弹性影响	快,液压传递近乎瞬时	中等,受线缆—液压双重影响
制动力线性度	较差,存在明显非线性	优秀,手感线性细腻	良好,双活塞分级介入改善线性度
手感一致性	较差,易受线缆状态影响	优秀,密封系统保持稳定	良好,液压环节提升一致性
热衰减耐受性	一般,线缆不受热影响但来令片衰减	较好,需优质制动液配合	良好,液压环节与来令片需整体考量
维护便利性	优秀,工具简单	较复杂,需要注油排气	良好,保留线缆结构便于维护

#### 参考文献:

- [1] 丁亚兰.基于 CFRP 的竞技自行车制动组件摩擦层热性能研究[J].塑料工业,2019,47(11):120-122.
- [2] 罗来军,陈博.基于 Bicycle Model 和 3 DOF Model 的车辆行驶平顺性和操纵稳定性分析[J].传动技术,2020,34(2):17-23.
- [3] 李臣,晋杰,杨良坤.盘式和鼓式制动器热衰退性能对比试验研究[J].汽车工程,2017,39(12):1397-1401,1430.
- [4] 王正国,付磊.制动片表面沟槽结构对盘式制动器热耦合特性的影响[J].现代制造工程,2023(10):72-78.

对比表明,线拉双活塞系统在各项性能间取得了较好平衡,在保留机械碟刹维护便利性的基础上,显著提升了线性度与手感一致性。

#### 5.2 平顺性控制策略的效果评估

针对本文提出的平顺性控制策略,从理论层面评估其预期效果:

**制动力分配优化:**通过双活塞分级介入,有效改善了轻制动工况下的平顺性,减少了制动冲击感。

**迟滞补偿:**通过消除线缆间隙和优化走线,减少了空行程,使操作力与制动力的对应关系更直接,有利于精细控制。

**热衰减抑制:**综合应用散热鳍片和高沸点制动液,可有效延缓制动效能下降,保障严苛工况下的性能稳定性。

### 6 结论

本文对线拉双活塞油压碟刹系统的动态响应特性与制动平顺性控制策略进行了系统研究,主要结论如下:

第一,线拉双活塞油压碟刹系统是机械与液压传动的复合系统,其动态响应受线缆弹性、液压传递刚性和双活塞协同状态的多重影响。响应延迟由线缆空行程、液压建立时间和活塞接触行程构成,制动力建立过程呈现空行程、上升和稳定三个阶段。

第二,双活塞协同动态特性是影响制动平顺性的关键。活塞不同步会导致制动力分布不均,引发抖动和噪音。通过独立油腔供油或主从活塞结构,可有效改善协同性能。

第三,提升制动平顺性的控制策略主要包括:制动力分配优化(双活塞分级介入、前后轮分配)、迟滞与非线性补偿(消除间隙、优化走线)、热衰减抑制(加强散热、选用高沸点制动液)以及自适应控制机制。

第四,性能对比分析表明,线拉双活塞油压碟刹系统在响应速度、线性度、手感一致性和维护便利性之间取得了较好平衡,是一种兼具性能优势和成本效益的技术方案。

未来研究可聚焦于:开展台架与实车试验验证理论分析;探索电子控制技术在制动力分配中的应用;以及研究来令片材料与液压系统的匹配优化,进一步提升系统综合性能。