一种液力缓速器强制润滑系统设计

费逢宇，权双璐
西安交通大学，陕西 西安 710049
DOI: 10.61369/RTED.2026180021

摘　　要： 针对重型商用车液力缓速器长期空转工况下润滑不良、摩擦副易磨损，以及现有空转润滑方案结构复杂、转速适配性差、系统耦合度高等问题，本文设计一种基于螺纹泵的新型强制润滑系统。通过分析液力缓速器工作原理与空转润滑失效机理，对比两类传统润滑方案的技术缺陷，设计了一种强制润滑系统的整体结构，阐明螺纹泵主动泵油及双单向阀协同调控工作机理。该系统随转子同步运转主动供油，无需改动缓速器制动主体结构，可有效克服管路液阻，实现全转速稳定润滑，同时避免停机油液倒流引发的附加扭矩与油耗增加问题。结果表明，该润滑系统结构简单、可靠性高、工况适应性好，可显著改善空转干磨故障，降低产品故障率，延长缓速器服役寿命，具备良好的工程应用与推广价值。

关 键 词： 液力缓速器；螺纹泵；空转润滑

A Design of Forced Lubrication System for Hydraulic Retarder

Fei Fengyu, Quan Shuanglu
Xi'an Jiaotong University, Xi 'an, Shaanxi 710049

Abstract: Aiming at the problems of insufficient lubrication and easywear friction pairs of hydraulic retarders for heavyduty commercial vehicles under longterm idling conditions, as well as the drawbacks of existing idling lubrication schemes such as complex structure, poor speed adaptability and high system coupling, a novel forced lubrication system based on screw pump is proposed in this paper. The working principle of the hydraulic retarder and the failure mechanism of idling lubrication are analyzed, and the technical deficiencies of two conventional lubrication schemes are compared. The overall structure of the forced lubrication system is designed, and the operating mechanisms of active oil supply by the screw pump and coordinated regulation of dual check valves are illustrated. Driven synchronously by the rotor, the system supplies oil actively without modifying the main braking structure of the retarder. It can overcome pipeline hydraulic resistance effectively and realize stable lubrication in the fullspeed range, and prevent additional torque and increased fuel consumption caused by oil backflow under shutdown condition. The results show that the proposed lubrication system features simple structure, high reliability and favorable condition adaptability. It can remarkably alleviate drywear failures during idling, reduce product failure rate and extend the service life of retarders, which possesses favorable engineering application and promotion value.

Keywords: hydraulic retarder; screw pump; idling lubrication

引言

随着我国道路运输产业规模化、高效化发展，商用车持续向大载重、高时效、长里程运营方向升级，行业对车辆行驶安全性与制动系统稳定性的要求不断提升[1]。为适配高强度运输工况下的安全生产需求，交通运输部持续完善车辆制动安全技术规范，对车辆制动系统的制动力稳定性、高温耐受能力与长期服役耐久性提出更为严苛的标准要求[2]。传统主制动系统依靠摩擦制动实现减速，在山区长下坡、连续缓行等高频持续制动工况下极易产生大量累积热量，易出现热衰退、制动效能下降甚至制动失效等安全隐患，难以满足重型商用车长时连续制动的安全需求[3]。

液力缓速器作为高效稳定的辅助制动装置，凭借制动柔和、无机械磨损、热稳定性好等优势[4]，能够有效分担主制动系统工作负荷，显著延长主制动器使用寿命，规避频繁制动引发的热失效风险，目前已在重型商用车领域得到广泛推广应用[5]。制动力输出性能是衡量液力缓速器工作能力的核心指标[6]，现有研究多聚焦于充液制动状态下的转矩特性、流场优化与控制策略[7]。但在车辆常规行驶过程中，液力缓速器长期处于高转速空转待机状态，此时工作腔油液大量回流，轴承、油封等关键摩擦副润滑条件恶化，易出现润滑不

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

足、异常磨损与早期失效等问题，直接影响整机可靠性与服役寿命，是空转工况下制约产品性能的关键短板[8-9]。

针对现有液力缓速器空转润滑回路结构局限与润滑供给不足的工程问题，本文结合液力缓速器结构特征与实际工况特点，系统剖析现有空转润滑系统的工作原理与现存缺陷，提出一种优化改进的液力缓速器空转润滑系统设计方案，旨在改善高转速空转工况下关键摩擦副的润滑效果，提升液力缓速器整机空载可靠性与长期服役稳定性。

一、液力缓速器原有润滑系统及缺陷分析

（一）液力缓速器工作原理与润滑机理

液力缓速器主要由内置叶片的转子与定子耦合组成，是重型商用车核心辅助制动部件。其制动原理为：通过气压控制系统对储油介质加压，将工作油液压入缓速器工作腔，高速旋转的转子带动油液高速运动并约束流体流向，使高速油液以设定角度冲击定子叶片。依靠油液内部剪切摩擦、油液与叶片的冲击阻尼作用，将车辆行驶动能持续转化为油液热能，进而实现无机械磨损的辅助制动功能。液压回路匹配外置散热器，可及时将制动产生的热量向外散发，保证缓速器具备长时、连续的稳定制动能力，制动转矩大小可通过比例调节阀精准调控，以适配不同行驶工况的制动需求[10]。

常规制动工况下，液力缓速器工作腔完全充油，轴承、油封等摩擦副可得到充分浸润润滑，零部件工作状态稳定。但车辆正常行驶过程中，缓速器多处于高转速空转待机状态，工作腔内油液快速回流至储油池，旋转部件长期处于缺油运转状态。由于商用车仅在下坡工况频繁启用缓速器制动，绝大多数行驶里程均为空转工况，长期缺油干磨易造成摩擦副异常磨损，直接影响缓速器整机可靠性与使用寿命。因此，改善空转工况润滑条件，是解决液力缓速器早期失效的关键。

（二）液现有润滑设计方案对比与缺陷分析

当前液力缓速器空转润滑优化主要包含内置专用润滑油路、比例阀程序控制润滑两类主流方案，两种方案均存在明显技术短板，难以兼顾结构设计、制造成本与运行可靠性。

内置专用空转润滑油路方案通过增设独立油道满足空转润滑需求，但会显著增加缓速器内部结构复杂度，提升加工难度与生产成本。同时，新增油路会占用内部空间、增大整机体积，导致设备车型适配性下降，难以适配紧凑型车辆安装布局，推广应用性受限。

比例阀程序控制润滑方案无需改造机械结构，实施便捷、改造成本低，但存在诸多局限性。该方案对比例阀的灵敏度、稳定性与使用寿命要求极高，依赖大量实车试验数据完成程序标定，参数匹配不当易出现润滑不足或空转损耗过大等问题。此外，电控程序与机械本体耦合度高、系统容错性差，比例阀故障易引发润滑失效，造成缓速器内部零件干磨损坏甚至整机报废，大幅增加售后成本，降低产品市场竞争力。

综合两类方案的优劣，理想的润滑系统应遵循高内聚、低耦合设计原则，在不增大整机体积、不复杂结构的前提下，简化油路设计、降低加工成本，保障全工况稳定润滑。基于该设计目标，本文结合缓速器空转工况特性，提供一种缓速器的强制润滑系统，润滑回路中增加强制润滑油泵，缓速器空转时通过油泵吸入少量油液润滑内部元件。使缓速器在任何条件下均具有良好的润滑条件，保护内部零件。

二、强制润滑系统结构及工作原理

针对现有液力缓速器空转润滑方案存在结构复杂、转速适配性差、润滑稳定性不足等诸多问题，本文设计一款以螺纹泵为核心供油元件的新型主动强制润滑系统。该系统依托螺纹泵同步泵油特性，可实现液力缓速器全转速范围空转主动润滑，有效解决传统负压式被动润滑供油不稳定、低速润滑失效等工程短板，显著提升缓速器空载运行可靠性。

（一）液强制润滑系统整体结构

本文所设计的液力缓速器强制润滑系统整体结构如图1所示，系统核心采用螺纹泵作为主动供油部件，整体由螺纹泵、润滑进油油路、进油单向阀、润滑出油油路、出油单向阀、热交换器及储油池组成，结构布局紧凑、集成度高。该润滑系统独立于缓速器制动主油路，无需改造设备原有机械结构，不会增大整机外形尺寸，可适配多数重型商用车安装工况，克服了传统内置润滑油路加工难度大、车型适配性差的缺陷。

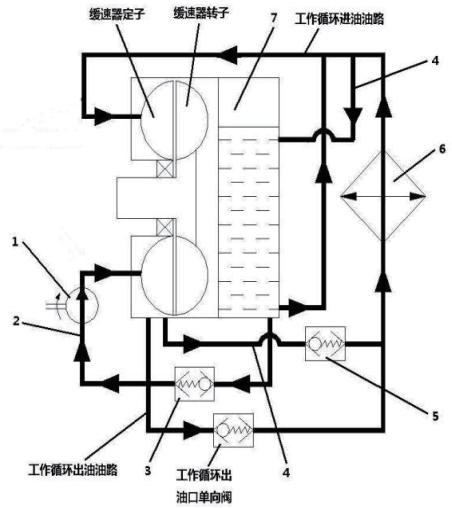

图1 液力缓速器油路示意图

1、螺纹泵 2、润滑循环进油油路 3、润滑循环进油口单向阀 4、润滑循环出油油路 5、润滑循环出油口单向阀 6、热交换器 7、油池

螺纹泵为润滑系统的核心动力元件，其结构如图2所示，主要包含螺纹泵壳体、泵盖、螺纹泵泵体、进油孔与拉紧螺栓等部件。螺纹泵泵体通过拉紧螺栓与缓速器旋转轴刚性固连，可随转子同步高速旋转，无需额外增设驱动装置，结构简单且运行可

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

靠。泵体外圆加工有直角三角形螺旋齿形，可根据转子旋转方向匹配对应的螺纹旋向，能够有效抑制润滑油回流，保障供油连续性与稳定性。该螺纹泵具备出液均匀、供油压力稳定、免维护的优势，可长期适配缓速器高速空转的恶劣工况。

为解决设备停机润滑油倒流、低速空转供油不足等问题，系统在进出油回路分别布置单向阀组件。通过匹配合理的单向阀开启压力，可实现润滑回路稳压、防倒流双重防护，有效规避停机静置油液倒灌工作腔、低速工况供油中断等故障，保障润滑系统全工况稳定运行。

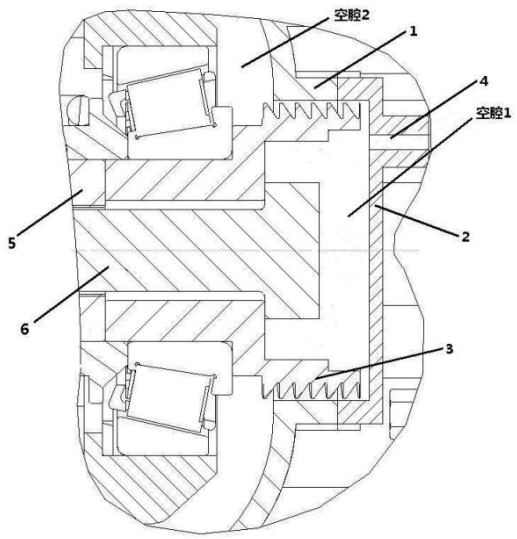

图2 螺纹泵内部结构

1、螺纹泵壳体 2、螺纹泵盖 3、螺纹泵体 4、进油孔 5、旋转轴 6、拉紧螺栓

（二）液工作原理

重型商用车行驶过程中，液力缓速器大部分时间处于非制动空转工况，转子持续高速运转，可带动同轴布置的螺纹泵同步工作，实现主动强制供油润滑，彻底解决传统被动润滑依赖转子负压、受转速制约的技术弊端。系统润滑循环流程为：储油池内的润滑油经进油油路，顶开进油单向阀后进入螺纹泵，在螺旋容腔的轴向推送作用下，润滑油被持续、均匀泵入缓速器内部，对轴承、油封等核心摩擦副进行充分浸润润滑。完成润滑作业的油液经出油油路流出设备，通过出油单向阀进入热交换器进行降温处理，冷却后的润滑油回流至储油池，形成持续润滑循环。

相较于传统空转润滑方案，本文设计的强制润滑系统依靠螺纹泵主动供油压力，可有效克服热交换器管路产生的较大液阻，无需增设辅助润滑支路，大幅简化油路结构，降低设备加工与装配成本。同时，回路内置的热交换器可实时带走摩擦副运转产生的热量，避免润滑油高温老化变质，稳定润滑介质性能。配套的双单向阀结构可实现全工况自适应调控，即在设备停机静置时，单向阀保持闭合，阻断润滑油重力倒流，避免工作腔积油过多产生附加空转扭矩、增加整车行驶油耗；低速空转工况下，单向阀可维持回路内部油压，保证润滑油量充足，有效解决传统方案低速润滑失效的痛点，显著提升液力缓速器全转速区间的运行稳定性与服役寿命。

三、结论

针对传统液力缓速器空转润滑方案结构复杂、加工成本高、转速适配性差、运行可靠性不足，易造成轴承、油封等关键摩擦副润滑不良、早期磨损的工程问题，本文设计了一种基于螺纹泵的主动强制润滑系统，通过结构优化与工作原理改进，有效解决了液力缓速器长期空转工况下的润滑短板。该润滑系统布局紧凑、集成度高，无需改动缓速器原有制动油路及机械主体结构，不增加整机安装尺寸，规避了传统内置润滑油路加工难度大、车型适配性差的缺陷。系统采用与转子同轴联动的螺纹泵作为核心供油部件，摆脱了传统被动润滑依赖旋流负压、受转速制约的弊端，可在转子全运转工况下持续稳定供油，有效克服热交换器管路液阻影响，保障空转状态下摩擦副的良好润滑，从根源改善干磨磨损问题。同时，系统搭配双单向阀协同控制结构，通过匹配合理开启压力，实现停机防油液倒流、低速保压稳润滑的双重效果，既避免停机积油引发的附加扭矩与油耗升高问题，又解决了低速工况供油不足的缺陷，实现全转速区间稳定润滑。该新型润滑系统工况适应性强、运行可靠，有效提升了液力缓速器工作稳定性与服役寿命，可为液力缓速器润滑系统的优化设计与工程应用提供有效参考。

参考文献

[1] 魏巍，贾磊磊，柯志芳，等 . 液力缓速器压力油箱动态充液过程制动转矩特性 [J]. 兵工学报 ,2025,46(9):238-248.

[2] 彭丽英，赵淑华，王晓友，等 .JT/T 1178.1-2018《营运货车安全技术条件第1部分：载货汽车》标准解读与实施应用 [J]. 中国汽车 ,2020,(2):58-62+52.

[3] 胡昌斌，沈金荣，陈友杰 . 长下坡路段货车鼓式制动器摩擦衬片温升规律 [J]. 交通运输工程学报 ,2009,9(4):49-55.DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2009.04.010.

[4] 袁哲，徐东，刘春宝，等 . 基于热流固耦合过程的液力缓速器叶片强度分析 [J]. 吉林大学学报 (工学版),2016,46(5):1506-1512.DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201605018.

[5] 史培龙，鲁雄文，余强，等 . 重型商用汽车持续制动匹配研究 [J]. 机械科学与技术 ,2015,34(9):1431-1437.DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.2015.0924.

[6] 魏巍，贾磊磊，柯志芳，等 . 液力缓速器压力油箱动态充液过程制动转矩特性 [J]. 兵工学报 ,2025,46(9):238-248.

[7] 孔令兴，魏巍，闫清东，等 . 液力缓速器及其液压控制系统耦合流动特性的联合仿真研究 [J]. 机械工程学报 ,2024,60(12):355-364.

[8] 魏巍，李双双，安媛媛，等 . 液力缓速器低充液率工况扰流柱起效条件判定方法 [J]. 北京理工大学学报 ,2017,37(7):672-676.DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2017.07.003.

[9] 黄俊刚，李长友 . 液力缓速器空转损耗的全流道仿真计算与试验 [J]. 农业工程学报 ,2013,29(24):56-62.

[10 黄勇，于良耀 . 基于储油腔气压波动的液力缓速器工作腔充液率测量方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版),2025,65(5):940-947.DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2024.21.031.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License