

干式离合器半联动滑磨热载荷控制

王阳阳^{1,2}, 李 南²

(1. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804; 2. 密歇根大学 机械工程学院, 密歇根 48109)

摘要: 离合器半联动是汽车在拥堵路况下的常用操纵方式, 频繁的半联动产生大量热易使干式离合器失效. 首先分析了离合器半联动过程中的热载荷, 建立了干式离合器接合模型、发动机模型和滑磨阻力模型. 提出了通过使离合器的接合程度在单次跟进的过程中保持不变并刚好可以克服行驶阻力的控制策略, 以降低频繁的半联动操作次数. 分别在水平良好和 2% 以及 5% 坡度路面上, 对控制前后的离合器滑磨功进行了比较, 结果显示采用该控制策略将半联动跟进 10m 产生的滑磨功分别降低了 3.72 %, 36.00% 和 71.35%.

关键词: 干式离合器; 半联动; 滑磨热载荷控制

中图分类号: U46

文献标志码: A

Slipping Friction Load Control of Dry Clutch on Semi-linkage Manipulation

WANG Yangyang^{1,2}, LI Nan²

(1. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor 48109, USA)

Abstract: Dry clutch semi-linkage manipulation is often resorted to on congested roads, but frequent semi-linkage may generate a lot of heat and cause the clutch failure. An analysis was made of the heat load of the clutch during semi-linkage process. A dry clutch engagement model, an engine model and a resistance model were established respectively. A control strategy was proposed, which overcame the running resistance by controlling the degree of engagement of the clutch with a single semi-linkage manipulation so as to avoid the frequent semi-linkage operations. A comparative study was made of the slipping friction power before and after semi-linkage control on the pavement of 2% and 5% slope as well as the pavement in good condition. Results show that the slipping friction power was reduced by 3.72 %, 36.00% and 71.35% respectively.

Key words: dry clutch; semi-linkage; slipping friction heat

load control

离合器半联动是城市汽车常用的操纵方式, 在拥堵路况和短距离跟进时可以通过主、从动盘的滑磨实现可控的动力输出. 但是频繁的半联动滑磨, 尤其是对干式离合器而言, 会产生大量的热, 使得摩擦片的摩擦系数急剧下降, 引起摩擦片热失效.

离合器的热场成为近年来的研究热点. Vladimir Ivanovi 通过对主动限滑差速器的碳纤维基体摩擦片的实验表明, 摩擦系数在 40~140℃ 间线性下降, 并得出热传导系数与滑移速度、所施加压力的关系^[1]. Przybilla 提供了应用计算仿真软件 LMS AMESim, Matlab/Simulink 等对干式离合器模拟实验和设计的流程, 对离合器压盘内外表面的温度场进行了仿真分析^[2]. Davis 通过修改后的雷诺热扩散方程研究了湿式离合器在接合过程中润滑油的温度和负载变化对转矩的影响^[3]. 张金乐、马彪运用有限元软件 ABAQUS 建立了湿式换挡离合器摩擦副三维有限元模型, 考虑了摩擦副之间的摩擦接触、相对旋转运动和热机耦合等因素, 并分析了摩擦副相对转速差、对偶钢片厚度和工作油压对于对偶钢片温度场和应力场分布的影响^[4]. 邓涛应用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行离合器摩擦副滑动摩擦阶段的瞬态-结构耦合仿真, 分析对偶钢盘上热点分布形式, 比较不同厚度不同环境宽度下, 对偶钢盘表面的温度分布情况^[5]. 刘传波分析了起步工况下压盘温度场分布和温度的变化以及压盘产生的热形变^[6]. 离合器半联动是产生热的主要原因之一, 发生在接合过程. 对离合器的接合过程控制也是近年来的研究热点. 2001 年意大利 Garofalo 针对干式离合器建立了以曲轴转速和从动盘速度作为控制变量以避免发动机熄火, 减少了传动系统接合后的抖动, 指

收稿日期: 2014-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51305302); 中央高校基本科研业务费专项资金(20140440); 汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金(20121104)

第一作者: 王阳阳(1980—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向: 汽车系统动力学与控制. E-mail: wyangyang@tongji.edu.cn

出抖动取决于接合结束时的滑动加速度^[7]. 2007年荷兰的 Heijden 提出了驾驶舒适性保持、快速接合和小摩擦损失的干式离合器的接合控制目标^[8]. 2011年秦大同教授等建立自动变速器 AMT 和双离合 DCT 的离合器起步统一动力学模型,以滑磨功最小为目标,采用线性二次型最优控制方法,将冲击度转换为最优控制的约束条件之一^[9].

国内外研究主要集中在离合器热场本身和以平稳等目标的离合器接合控制方面,针对干式离合器滑磨热载荷控制的研究不多. 本文首先对干式离合器半联动传动热载荷进行分析,建立了离合器接合模型、发动机模型和滑磨阻力模型. 通过对离合器接合程度进行控制以降低频繁的半联动操作次数. 分别在水平良好和 2% 以及 5% 坡度路面上,对采取控制策略前后的离合器滑磨功进行了比较.

1 干式离合器半联动传动热载荷分析

“半联动”是驾驶员在起步和换挡时通常会采取的一种操作方式,即离合器的状态处在完全分离和完全接合之间. 此时发动机的转矩只能部分地传递到离合器的从动部分,其余的转矩将导致摩擦片的滑磨,并生成大量的摩擦热,使摩擦片温度升高. 为了获得摩擦副的热负荷,首先假设周围环境温度变化较小,整个离合器工作过程中的热负荷包括:从周围环境吸收的热量、摩擦副滑磨产生的热和非摩擦副与周围空气的对流散热. 其中离合器的滑磨是热产生的主要因素,用滑磨功表示为

$$W = \int_0^t T_c(\omega_e - \omega_c) dt = \int_0^t fFZR_c(\omega_e - \omega_c) dt \quad (1)$$

式中: T_c 为离合器接合过程的摩擦传递转矩; ω_e 为主动盘的转速; ω_c 为从动盘转速; f 为摩擦副间的摩擦系数; Z 为摩擦片数; F 是摩擦副的压力; R_c 为摩擦片的平均摩擦半径; t 为滑磨持续时间.

驾驶员在进行单次的“半联动”操作时,有 4 个可以控制的变量:① 离合器踏板位置. 通过其控制离合器的接合程度,从而控制发动机传递到传动系的转矩大小. ② 发动机转速. 在起步和超低速行驶的情况下,发动机转速基本上决定了离合器主从动盘的滑磨转速. ③ 半联动状态的保持时间. 即摩擦片滑磨的持续时间. ④ 离合器接合和分离的速度.

对照离合器半联动操作的可控变量和滑磨功计

算公式,可控的热稳定性敏感影响变量是:

- (1) 离合器压盘施加在摩擦片上的轴向压力 F .
- (2) 离合器主动盘与从动盘的滑磨转速差 $\Delta\omega$.
- (3) 摩擦片滑磨的持续时间 t .

为了获得离合器半联动过程产生的滑磨功,需要建立干式离合器滑磨模型.

2 干式离合器滑磨模型^[10]

2.1 离合器接合模型

与发动机输出轴连接的离合器主动盘通过摩擦作用使得与变速器连接的从动盘转动. 离合器接合过程的力学模型如下:

$$J_e \dot{\omega}_e = T_e - T_c, J_c \dot{\omega}_c = T_c - T_r \quad (2)$$

式中: T_e 为发动机等效输入转矩; T_r 为等效到从动盘上的阻力矩; J_e 为所有主动旋转部件等效到主动盘的转动惯量; J_c 为所有旋转部件等效到从动盘的转动惯量. 离合器接合过程如图 1 所示.

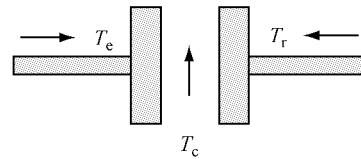


图1 离合器接合过程

Fig.1 Clutch engagement process

2.2 发动机模型

发动机通过节气门开度和转速来决定输出扭矩的大小.

$$T_e = f(a, n_e) \quad (3)$$

式中: T_e 为发动机转矩, $N \cdot m$; a 为节气门开度; n_e 为发动机转速, rpm. 发动机模型如图 2 所示.

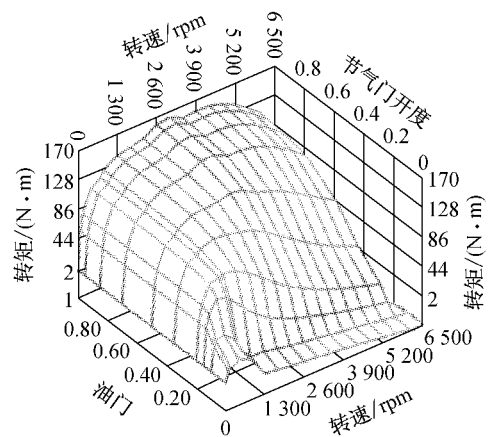


图2 发动机模型

Fig.2 Engine model

2.3 滑摩阻力模型

为了获得离合器半联动传动时整车等效到从动盘上的阻力矩 T_r , 利用表 1 的参数, 以起步为例, 空气阻力的影响忽略不计, 离合器从动部分的阻力主要由道路阻力 T_r 组成. 建立的滑摩阻力模型如下:

$$T_r = mgr(f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) / (i_g \cdot i_0 \cdot \eta) \quad (4)$$

式中: f 为滚动阻力系数; α 为道路坡度角; m 为汽车质量; r 为滚动半径; i_0 , i_g 为主减速器和变速箱的传动比乘积; η 表示传动系的机械效率.

表 1 车辆参数

Tab.1 Vehicle parameters

整车质量 m/kg	762
车轮滚动半径 r/m	0.292
滚动阻力系数 f	0.015
路面坡度 $\alpha/^\circ$	10
变速器速比 i_g	3.78
主减速比 i_0	4.1
传动系机械效率 η	0.9

3 半联动传动滑摩热控制

3.1 控制策略

图 3 是离合器完整的起步接合过程(假设整个过程的发动机输出转速恒定)的转矩传递率与接合程度的定性变化趋势. 接合程度表示压盘接合行程占总行程的百分比, 传递率表示离合器传递的转矩占最大传递力矩的百分比. 第 1 为消除空行程阶段, 压盘与从动盘未发生接触, 不传递转矩, 内部温度几乎不发生变化, 主从动部分转速差不变. 第 2 为起步滑摩阶段, 压盘与从动盘摩擦面开始接触, 摩擦力矩逐渐增大到最大阻力矩. 这时虽然从动盘依然保持

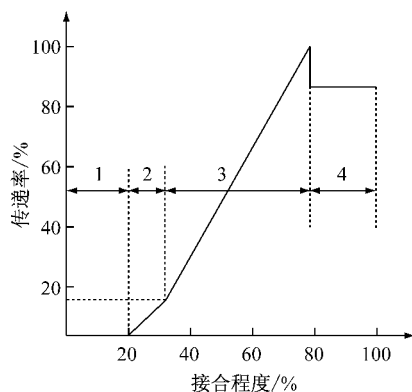


图 3 离合器接合过程扭矩传递率

Fig.3 Torque transmission of clutch during the engagement process

静止, 但由于主动盘转速降低, 所以转速差稍有降低, 温度上升. 第 3 为同步滑摩阶段, 从动盘与主动盘产生相对滑动位移, 此阶段为动态摩擦过程. 考虑到接合的平顺性和舒适性要求, 此阶段过快的接合会产生巨大的冲击, 使车身耸动甚至熄火. 另外, 考虑到从动盘的寿命, 接合也不宜过慢, 否则滑摩时间越长, 产生的滑摩功越大, 产生的热量越多, 摩擦片会有过热甚至烧片的危险. 离合器半联动就发生在这一阶段. 第 4 为同步结束阶段, 从动盘与飞轮同步后, 接合行程继续变大, 直到从动盘波形片的轴向压缩量达到最大值. 膜片弹簧对压盘的作用力增至最大, 即压紧力达到最大值.

在频率较高的半联动操作下, 离合器摩擦片的工作表面始终处于较差的散热条件. 根据对离合器半联动热负荷的分析可知, 控制离合器摩擦片的温度场, 在根本上应该控制主、从动盘滑摩过程中生成的滑摩功. 其中最易发生离合器摩擦片过热的是超低速行驶的工况(例如双离合热失效事故主要发生在拥堵路段的驾驶). 此时驾驶员主要通过半联动操作维持汽车以极低的速度进行短距离跟进. 在实际的短距离跟进驾驶中, 驾驶员并不是控制离合器在一个稳定的接合状态, 而是通过不断调整离合器踏板的位置, 控制汽车起步、加速, 当速度过高时, 踩下踏板深一点, 并配合制动进行减速. 在整个过程中离合器接合的情况如图 4 所示.

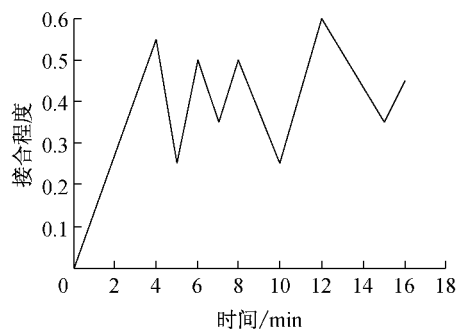


图 4 无控制策略的离合器接合情况

Fig.4 Clutch engagement without control

频繁半联动操作是干式离合器产生热不稳定的主要原因之一. 可以通过对离合器接合程度进行控制, 使离合器的接合程度在单次跟进的过程中保持不变, 并刚好使汽车保持匀低速行驶. 根据图 3, 控制离合器接合程度可以获得需求的传递转矩. 达到驾驶员预期的车速之后, 接合程度稍有下降, 并维持该接合程度直到汽车完成此次短距离跟进, 如图 5 所示.

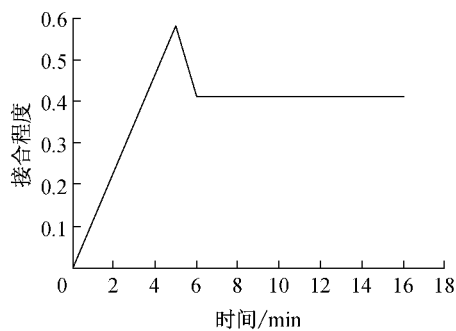


图 5 超低速短距离跟进有控制的离合器接合情况

Fig.5 Clutch engagement with control

3.2 水平良好路面

在水平良好路面,对比了实施控制策略前后汽车超低速跟进 10 m 离合器生成滑摩功的情况,如图 6 所示.可以看到,实施控制策略之后,离合器生成的滑摩功比控制之前稍有下降.这样就有利于降低摩擦片工作表面温度的上升速度.在水平良好路面情况下,采用该控制策略将半联动跟进 10 m 产生的滑摩功平均降低了 3.72 %.

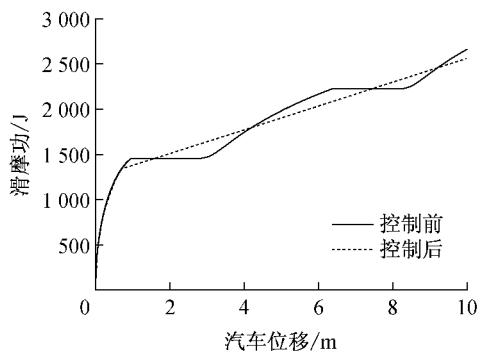


图 6 水平路面半联动离合器生成滑摩功的对比

Fig.6 Slipping friction power comparison of clutch semi-linkage on smooth road

3.3 坡道路面

图 7 对比了采用控制策略前后超低速跟进 10 m 离合器生成的滑摩功情况.在具有 2% 坡度的路面上,采用控制策略后,离合器生成的总滑摩功比采用控制策略之前下降明显.采用该控制策略将半联动跟进 10 m 产生的滑摩功平均降低了 36.00%.

图 8 对比了采用控制策略前后超低速跟进 10 m 离合器生成的滑摩功的情况.在具有 5% 坡度的路面情况下,采用控制策略稳定离合器的接合程度之后,超低速行驶跟进 10 m 离合器生成的总滑摩功相比于采用控制策略之前的下降更多,优化效果更显著.采用该控制策略将半联动跟进 10 m 产生的滑摩功

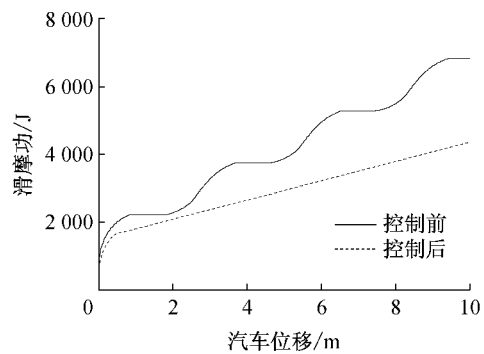


图 7 2%坡度路面半联动跟进 10 m 离合器生成滑摩功的对比

Fig.7 Slipping friction power comparison of clutch semi-linkage on 2% slope road

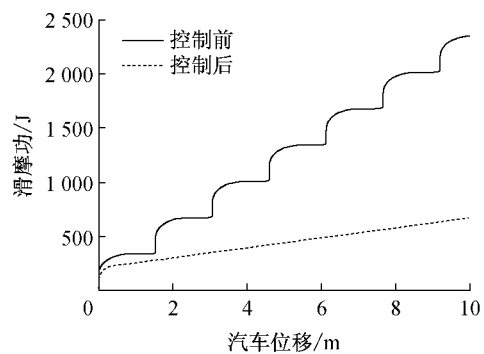


图 8 5%坡度路面半联动跟进 10 m 离合器生成滑摩功的对比

Fig.8 Slipping friction power comparison of clutch semi-linkage on 5% slope road

平均降低了 71.35%.

4 结论

本文对干式离合器半联动滑磨热控制进行了研究,得到如下成果和结论:

(1) 分析了离合器半联动过程中的热负荷,其中离合器的滑磨是热产生的主要因素.建立了离合器模型、发动机和滑磨阻力模型.

(2) 基于完整离合器接合过程分析,提出了通过使离合器的接合程度在单次跟进的过程中保持不变,并刚好使汽车可以克服行驶阻力从而保持匀低速行驶的控制策略,以降低频繁的半联动操作次数.

(3) 分别在水平良好和 2% 及 5% 坡度路面上,对采取控制策略前后的离合器滑摩功进行了比较,得到控制后将半联动跟进 10 m 产生的滑摩功分别降低了 3.72 %,36.00% 和 71.35%.

参考文献:

- [1] Vladimir Ivanovi, Zvonko Herold, Josko Deur, *et al.* Experimental characterization of wet clutch friction behaviors including thermal dynamics [J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 2(1): 1211.
- [2] Przybilla M, Kunze C, Celik S, *et al.* Combined simulation approach for dry clutch systems [C]//SAE. Detroit: SAE International, 2011: 2011-01-1232.
- [3] Davis L C, Sadeghi F, Krousgrill M C. A simplified approach to modeling thermal effects in wet clutch engagement: analytical and experimental comparison [J]. Transactions of the ASME, 2000, 122(111): 110.
- [4] 张金乐, 马彪, 张英锋, 等. 湿式换挡离合器温度场和应力场影响因素分析[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 660.
ZHANG Jinle, MA Biao, ZHANG Yingfeng, *et al.* Study on the factors affecting temperature field and stress field of the wet shift clutch [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(6): 660.
- [5] 邓涛, 胡丰宾, 孙冬野. 湿式多片离合器的热弹性失稳分析[J]. 汽车工程, 2012, 34(10): 918.
DENG Tao, HU Fengbin, SUN Dongye. An analysis on the thermoelastic instability of wet multi-disc clutch [J]. Automotive Engineering, 2012; 34(10): 918.
- [6] 刘传波, 李明, 莫易敏, 吕成俊. 基于 ANSYS 的汽车起步工况离合器压盘热力学分析[J]. 机械制造, 2009, 47(9): 11.
LIU Chuanbo, LI Ming, MO Yimin, *et al.* Clutch pressure plate started working conditions thermodynamic analysis based on ANSYS [J]. Machine Manufacture, 2009, 47(9): 11.
- [7] Garofalo F, Glielmo L, Iannelli L, *et al.* Smooth engagement for automotive dry clutch [C]//Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando: IEEE, 2001: 529-534.
- [8] van Der Heijden A C, Serrarens A F A, Camlibel M K, *et al.* Hybrid optimal control of dry clutch engagement [J], International Journal of Control, 2007, 80(11): 1717.
- [9] 秦大同, 陈清洪. 基于最优控制的 AMT/DCT 离合器通用起步控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 85.
QIN Datong, CHEN Qinghong. Universal clutch starting control of AMT/DCT automatic transmission based on optimal control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 85.
- [10] 米奇克. 汽车动力学[M]. 第 4 版. 陈荫三译. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Mitschke. Vehicle dynamics [M]. 4th ed. Translate by CHEN Yinsan. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

• 下期文章摘要预报 •

再生混凝土早期抗开裂性能试验研究

肖建庄, 胡 博, 丁 陶

采用刀口约束法试验, 研究了再生粗骨料取代率及粉煤灰、矿粉的掺量对再生混凝土早期抗开裂性能的影响. 以单位面积平板上的总开裂面积为主要指标评价了试件的抗开裂性能. 研究表明, 随着再生粗骨料取代率的增加, 试件总开裂面积逐渐增大; 取代率为 100% 的再生混凝土试件的总开裂面积是普通混凝土试件的 1.5 倍左右. 掺入粉煤灰可以有效改善再生混凝土的抗开裂性能, 当粉煤灰掺量达到 30% 时, 试件的总开裂面积相比不掺矿物外加剂的对照组下降了 72.1%. 矿粉对于再生混凝土开裂面积的抑制作用不及粉煤灰有效, 但其有助于减小裂缝分布的离散性.