

文章编号:1671-1637(2016)03-0084-07

高加速寿命试验下的干式离合器半联动热稳定性

王阳阳^{1,2}, 陈广达², 李 南³, 袁一卿^{1,2}

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

摘要:针对干式离合器在半联动操作中的热失效问题,研究了半联动过程中离合器的热稳定性。基于离合器半联动操作过程中的滑摩功,得到了影响热稳定性的关键变量,包括摩擦片轴向压力、相对滑磨转速和滑磨持续时间。结合干式离合器热模型和高加速寿命试验,设计了强化加载剖面,验证了摩擦片热模型的循环强化加载试验效果。为了分析高加速寿命试验下不同变量对热稳定性的影响程度,通过正交试验和极差分析法,研究了关键变量对摩擦片最高热点温度的影响。研究结果表明:按影响程度由大到小排序,3个关键变量依次为相对滑磨转速、滑磨持续时间和摩擦片轴向压力;当发动机转速较低,约为 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,热点温度始终保持在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的安全温度,当发动机转速超过 $1\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,轴向压力超过 2.0 kN ,滑磨持续时间超过 8 s 后,热点温度将超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的安全温度;采取合适的半联动操作组合,例如控制发动机的转速与频繁半联动操作的累计时间,可以有效防止摩擦片热失效的发生。

关键词:车辆工程;干式离合器;半联动;高加速寿命试验;强化加载剖面;摩擦片;热稳定性

中图分类号:U463.51

文献标志码:A

Semi-linkage thermal stability of dry clutch under highly accelerated life test

WANG Yang-yang^{1,2}, CHEN Guang-da², LI Nan³, YUAN Yi-qing^{1,2}

(1. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. School of Automotive, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Institute of Mechanical Engineering, University of Michigan-Ann Arbor, Ann Arbor 48109, Michigan, America)

Abstract: Aiming at the problem of thermal failure of dry clutch during semi-linkage operation, the thermal stability of clutch in semi-linkage process was studied. Based on the sliding friction power of clutch during semi-linkage operation, the key variables effecting the thermal stability were acquired, including the axial pressure of friction plate, relative sliding speed and sliding friction duration time. With the combination of dry clutch thermal model and highly accelerated life test (HALT) method, the enhancement loading profile was designed, and the effect of cyclic enhancement loading test of friction plate thermal model was verified. In order to reflect the influence degrees of different variables on the thermal stability in highly accelerated life test, the effect of sensitive variables on the highest hot spot temperature of friction plate was studied by using orthogonal test and range analysis method. Analysis result indicates that according to the influence degrees from the great to the little, the order of key variables are relative sliding speed,

收稿日期:2015-12-27

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

作者简介:王阳阳(1980-),女,安徽肥东人,同济大学副教授,工学博士,从事汽车系统动力学与控制研究。

sliding friction duration time and the axial pressure of friction plate respectively. When the engine is running at a lower speed of $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, the hot spot temperature is always under the safe temperature of $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. When the engine speed exceeds $1\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, the axial pressure of friction plate is more than 2.0 kN , and the sliding friction duration time is more than 8 s , the hot spot temperature will exceed the safe temperature of $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. With the right semi-linkage operation, such as controlling both the engine speed and the accumulation time of frequent semi-linkage operation, the thermal failure of friction plate can be effectively prevented. 5 tabs, 11 figs, 23 refs.

Key words: vehicle engineering; dry clutch; semi-linkage; highly accelerated life test; enhancement loading profile; friction plate; thermal stability

Author resume: WANG Yang-yang (1980-), female, associate professor, PhD, +86-21-69588660, wyangyang@tongji.edu.cn.

0 引言

离合器半联动是城市汽车常用的操纵,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,使得摩擦片的摩擦因数急剧下降,引起摩擦片热失效。

对于离合器热失效影响因素的研究如下:Ivanović等对主动限滑变速器的碳纤维基体摩擦片的试验研究表明,当温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,摩擦因数线性下降,并得出热传导系数与滑移速度、施加压力的关系^[1];Karamavruc等通过对液力变矩器离合器在不同工况下内表面温度的测量数据与CFD仿真结果的对比,证明了经验热传导系数在CFD仿真试验中的可行性^[2];Przybilla等对离合器压盘内外表面的温度场进行了仿真分析^[3];Davis等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^[4];Marklund等建立一个与温度相关的边界摩擦模型^[5];Jang等研究了摩擦材料槽面参数对湿式离合器热接合特性的影响^[6];张金乐等研究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^[7-8];邓涛等应用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,分析了对偶钢盘上热点分布形式,比较了不同厚度与不同环境宽度下,对偶钢盘表面的温度分布情况^[9];刘传波等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^[10];柴盛典等进行了拖拉机离合器接合理论的试验与研究,指出摩擦片表面瞬时高温烧损是引起离合器失效的主要原因^[11];王阳阳等研究了离

器瞬时接合和频繁接合下的摩擦片温度分布^[12]。

研究离合器热失效采用的方法如下:Ingram等使用红外相机测量在湿式离合器形成的接触单元中的闪光温度,研究结果表明该温度对不断滑动的湿式离合器摩擦/滑动速度特性没有起到决定性的影响作用^[13];Liu等建立了离合器摩擦片的温度采集系统^[14];Fairbank等研究了湿式离合器在重载情况下的热点和热塑变形的情况,结论为除了摩擦材料,润滑条件也对热点的发生存在重要影响^[15];He等研究了离合器压盘的热变形,以热电偶作为测温装置,测量压盘不同半径位置的温度变化和压盘表面在工作过程中的接触压力分布,以及两者之间的影响和关系^[16];Hirano等以湿式离合器系统作为研究对象,研究了离合器摩擦面发生热点现象的机理,认为热点发生的机理对干式离合器也是适用的^[17];Velardocchia等提出了一种在滑磨过程中的离合器线性热模型^[18];Albert等阐述了较完整的干式离合器热动力学研究方法^[19];Han等研究了离合器盘工作表面的温度分布,通过在离合器盘上打扇形孔使红外线可以直接打到摩擦盘的工作表面,以直接测量摩擦面的温度^[20];Sun等分析了干式离合器在频繁起步工况下的热载荷,给出了在连续起步情况下离合器摩擦面的温度发展情况^[21];邢预恩等利用ANSYS软件对离合器的摩擦片进行了温升分析,推导了温度场的边界条件并建立了摩擦片的传热方程,在ANSYS中利用有限元法解出了任一时刻点的温度^[22]。

综上,国内外研究主要集中在温度的几个关键影响因素,对于干式离合器的热稳定性综合影响因素研究不多,尤其是没有针对离合器半联动问题的研究。本文首先得到了影响干式离合器半

联动传动热稳定性的关键变量,通过高加速寿命试验对干式离合器摩擦片在半联动操作下的热稳定性进行了研究,并提出了基于热稳定性的半联动操纵组合。

1 离合器热稳定性关键影响因素

1.1 半联动传动热稳定性概述

半联动操作中发动机的转矩只能部分传递到离合器的输出轴上,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,成为一些离合器热失效事故的主要起因,因此,需要对半联动情况下离合器摩擦片传动的热稳定性做进一步的研究,以找到离合器操纵过程中不同因素对摩擦片温升产生的影响,并以此作为离合器控制方法开发的理论依据。

1.2 摩擦片热稳定性关键影响因素

驾驶人在进行单次的半联动操作时,有 4 个可以控制的因素:(1)离合器踏板位置,通过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;(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相对滑磨转速;(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,因为离合器的滑磨功是热产生的主要因素,通过离合器接合过程的摩擦传递转矩 M 、等效主动盘转速 ω_1 与等效从动盘转速 ω_2 ,可以得到离合器的滑磨功 P 为

$$P = \int_0^{t'} M(\omega_1 - \omega_2) dt \quad (1)$$

式中: t' 为接合结束时间; t 为接合时间。

对照离合器半联动操作的可控变量和滑磨功计算公式,可得到可控的热稳定性关键影响因素,包括离合器压盘施加在摩擦片上的轴向压力 F 、离合器主动盘与从动盘的相对滑磨转速 $\Delta\omega$ 、摩擦片滑磨持续时间 t' 。

2 离合器半联动热稳定性研究方法

2.1 干式离合器热模型

为了分析干式离合器在半联工况下的热稳定性,建立了干式离合器热模型。干式离合器的摩擦副是由石棉基材料构成的摩擦片和铸铁构成的压盘组成。因为摩擦片是主要的摩擦受损和受热变形件,所以干式离合器的热模型主要针对摩擦片分析。进行有限元计算时,在保证摩擦副的力学特性和计算精度的情况下,需要对实际结构进行必要的简化,

摩擦片三维模型和有限元简化模型分别见图 1、2。

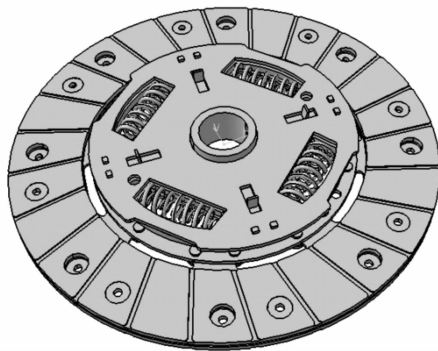


图 1 离合器摩擦片三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of clutch friction plate

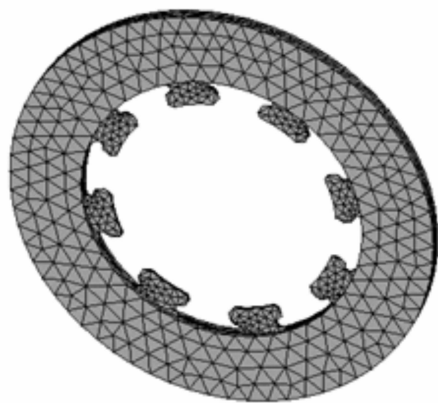


图 2 离合器摩擦片有限元简化模型

Fig. 2 Simplified finite element model of clutch friction plate

为获得摩擦副的热负荷,首先需要获得摩擦面的热负荷。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 3 个边界:从周围环境吸收的热量;摩擦面滑磨产生的热;非摩擦面与周围空气的对流散热。边界条件 1 为初始环境温度的影响。边界条件 2 为滑磨功产生的热,在半径为 r 处的热流密度 q 为

$$q = \frac{3rP(t)}{2\pi(r_2^3 - r_1^3)} \quad (2)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻的滑磨功率; r 为接触半径; r_1 、 r_2 分别为摩擦片的内径与外径。

假定所有的摩擦热都被 2 个摩擦面吸收,则热流分配因素 $K^{[23]}$ 为

$$K = \frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{\lambda_2 c_2 \rho_2}{\lambda_1 c_1 \rho_1} \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中: q_1 、 q_2 分别为 2 个摩擦面的热流密度; λ_1 、 λ_2 分别为 2 个摩擦面的导热系数; c_1 、 c_2 分别为 2 个摩擦面的比热; ρ_1 、 ρ_2 分别为 2 个摩擦面的材料密度。

边界条件 3 以随温度和速度变化的对流换热系数 h 为表征,通常使用经验公式进行计算

$$h = 0.70(f/D)(Re)^{0.55} \quad (4)$$

式中: f 为空气导热系数; D 为流体特性尺寸; Re 为与流体速度、流体密度、流体黏度和特征长度相关的雷诺数。

2.2 高加速寿命试验

对摩擦片有限元模型施加表 1 的单次半联动加载方案后,摩擦片的温度场见图 3。由图 3 可以看到:摩擦片上温度基本按照半径呈正梯度的分布,在图中出现了多个热点,并普遍分布在摩擦片环的平均摩擦半径附近;正常的单次半联动操作并不会使摩擦片温度剧烈上升,即当驾驶人进行一次半联动操作时,并不会对摩擦片产生过大的热冲击造成其工作表面摩擦性能的明显热衰退。可见,通过单次热加载的方法来研究干式离合器摩擦片在半联动操作中的热失效现象是不合理的。

表 1 单次加载方案

Tab. 1 Single loading scheme

压盘压力/kN	主从动盘滑磨转速/($r \cdot \min^{-1}$)	滑磨持续时间/s
1.5	1 500	6

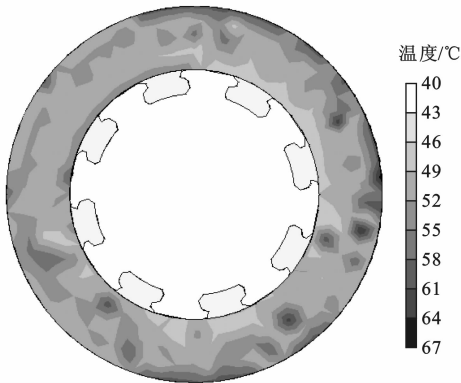


图 3 单次加载后的摩擦片温度场

Fig. 3 Temperature field of friction plate after single loading

将表 1 的载荷卸去 20 s 后摩擦片工作表面温度场见图 4,可以看出:卸载 20 s 后虽然仍存在多个热点,但是最高温度已经下降了约 10 °C。可见,为了研究摩擦片热失效的热载荷累计效应需要通过循环加载试验进行验证。基于单次加载方案,设定每次半联动操作间隔为 10 s,摩擦片温度发展趋势见图 5。在每次加载过程刚刚完成、散热过程还未开始时观察最高热点温度的极值包络线,可以看到温度趋于一个上限值,并且低于 100 °C。这是由于摩擦片表面的温度越高,在散热阶段的散热降温速度越快,这个温度对于研究摩擦片的热衰退是不够的,由此提出了高加速寿命试验。

2.3 高加速寿命试验剖面设计

高加速寿命试验 (Highly Accelerated Life

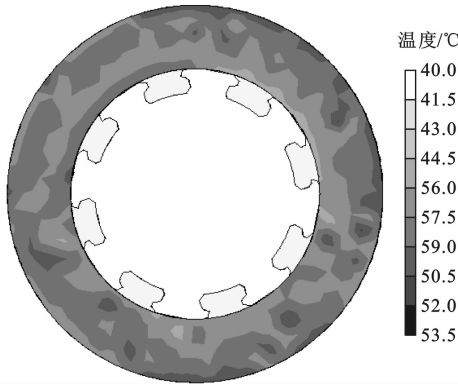


图 4 卸载后的摩擦片温度场

Fig. 4 Temperature field of friction plate after unloading

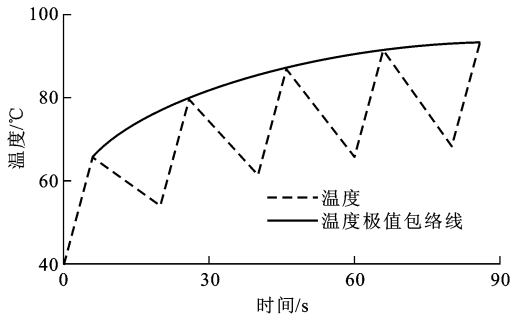


图 5 基于单次加载的摩擦片温度发展趋势

Fig. 5 Development trend of temperature of friction plate based on single loading

Test, HALT)是将离合器摩擦片放置在周期性变化的强化半联动工作环境中,离合器频繁地经过接合-半联动-分离-接合-半联动-分离的状态,最终导致其表面最易发生过热的位置失效。循环加载剖面是整个试验的核心。根据高加速寿命试验的经验规律,周期性强化载荷的施加次数以 3~5 次为宜。若超过 5 次仍未发生明显的失效,则应提高载荷的强度重新进行试验,以保证试验的高效率。高加速寿命试验剖面设计见图 6。试验中对离合器摩擦片施加 5 个周期的强化载荷。

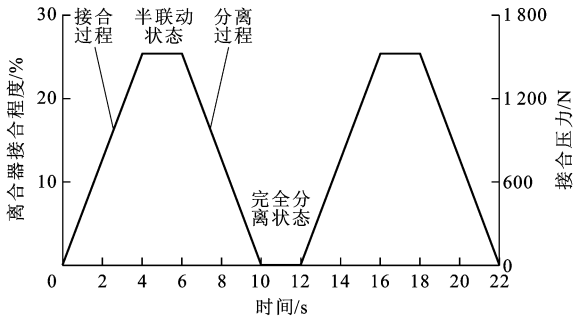


图 6 高加速寿命试验剖面

Fig. 6 Profile of highly accelerated life test

真实工况下的加载情况见图 7(以表 1 的载荷方案为例),根据真实的驾驶人操作习惯,定义接合

和分离过程的时间均为 4 s。考虑到在 2 次半联动加载之间短暂的完全分离状态对离合器摩擦片工作表面温度的降低是有限的(例如在拥堵的坡道工况下,驾驶人在进行高频率的半联动操作时,2 次半联动操作之间通常间隔很短),将试验剖面中完全分离状态的时间设为 0。图 7 可以等效为图 8 周期性方波的形式。每次加载产生的滑磨功和周期长度相等,转化为方波加载可以极大地简化仿真的过程,其与真实情况的等效程度是可以接受的。

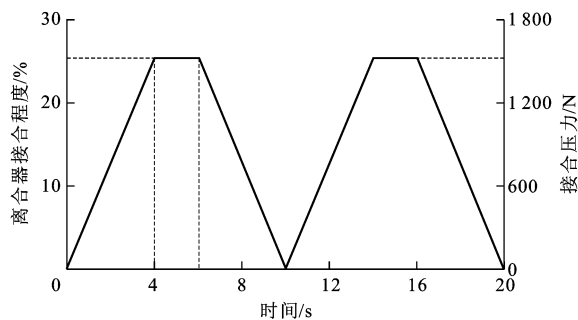


图 7 真实工况下的高加速寿命试验剖面

Fig. 7 Profile of highly accelerated life test in real case

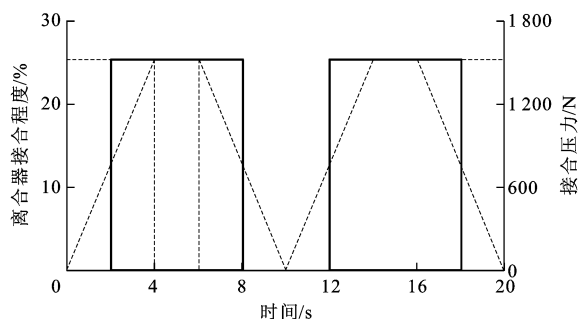


图 8 简化的高加速寿命试验剖面

Fig. 8 Simplified profile of highly accelerated life test

2.4 高加速寿命试验效果

按照表 1 中加载方案的参数值进行周期性循环加载,5 个周期之后摩擦片的温度场见图 9。图 9 的热点现象更加明显,在 5 次加载之后,最高温热点的温度达到了 132.97 °C,再次证明热点是造成摩擦片热失效的主因。摩擦片工作表面最高温热点温度的发展趋势见图 10,没有出现明显的在一般强度循环加载中出现的最高温度,如图 5 趋于一个上限值的趋势。可见,通过高加速寿命试验对于干式离合器摩擦片在半联动操作下的热场和热失效现象进行研究是合理并可行的。

3 高加速寿命试验下半联动操作关键变量热稳定性影响

3.1 半联动关键变量的热稳定性影响程度

为了研究在高加速寿命试验下的半联动敏感变

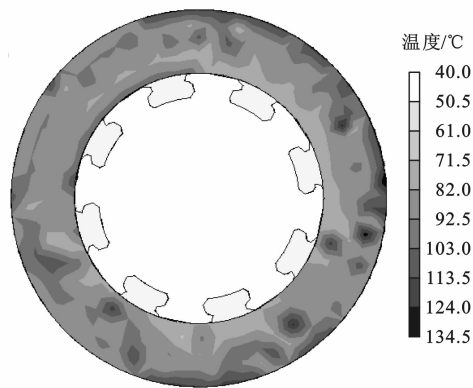


图 9 循环加载后的摩擦片温度场

Fig. 9 Temperature field of friction plate after cyclic loading

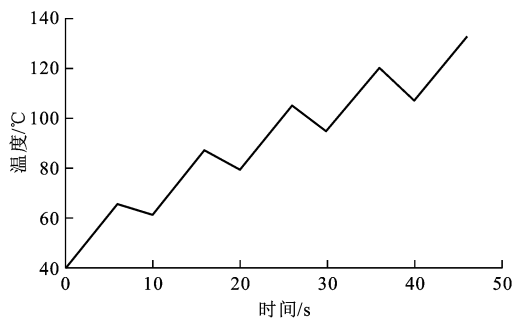


图 10 基于高加速寿命试验的摩擦片温度发展趋势

Fig. 10 Development trend of temperature of friction plate based on highly accelerated life test

量对离合器热稳定性的影响,利用正交试验和极差分析法进行分析,研究各因素水平变动时最高温热点温度的变动幅值。发动机转速为 1 000、1 500、2 000 $r \cdot \min^{-1}$ 时的正交试验结果分别见表 2~4。

表 2 发动机转速为 1 000 $r \cdot \min^{-1}$ 的正交试验结果

Tab. 2 Result of orthogonal test with engine speed of 1 000 $r \cdot \min^{-1}$

滑磨持续时间/s	不同轴向压力(kN)下的最高温热点温度/°C		
	1.5	2.0	2.5
5	83.0	97.4	111.7
6	102.0	122.6	143.2
8	122.6	150.1	177.6

表 3 发动机转速为 1 500 $r \cdot \min^{-1}$ 的正交试验结果

Tab. 3 Result of orthogonal test with engine speed of 1 500 $r \cdot \min^{-1}$

滑磨持续时间/s	不同轴向压力(kN)下的最高温热点温度/°C		
	1.5	2.0	2.5
5	104.6	126.0	147.5
6	133.0	163.8	194.8
8	164.0	205.1	246.4

从表 2~4 中可以看到:随着摩擦片轴向压力增大(半联动程度加大),滑磨持续时间增加,发动机转

表 4 发动机转速为 2 000 r·min⁻¹ 的正交试验结果

Tab. 4 Result of orthogonal test with engine speed of 2 000 r·min⁻¹

滑磨持续时间/s	不同轴向压力(kN)下的最高热点温度/℃		
	1.5	2.0	2.5
5	126.1	154.7	183.4
6	163.9	205.2	246.5
8	205.2	260.3	315.3

速(与主从动盘相对滑磨转速 $\Delta\omega$ 近似相等)提高,摩擦片最高热点的温度上升明显;当发动机转速较低为 1 000 r·min⁻¹时,热点温度始终保持在 200 ℃ 以下的安全温度;当发动机转速达到 1 500 r·min⁻¹,摩擦片轴向压力超过 2.0 kN,滑磨持续时间超过 8 s 后,热点温度将超过 200 ℃ 的安全温度。

因素主次关系见表 5。极差大说明因素对指标的影响大,因此,根据极差的大小可排出各因素的相对主次关系。敏感变量对热稳定性的影响由大到小依次为 $\Delta\omega$ 、 t' 和 F 。考虑到 5 次连续的长时间半联动操作已经属于比较恶劣的工况,当发动机转速较低,约为 1 000 r·min⁻¹时,摩擦片的温度将始终保持在 200 ℃ 以下的安全温度(根据摩擦片材料的不同,摩擦因数开始急剧下降的温度从 200 ℃ 到 300 ℃ 不等)。当发动机转速较高时,则应谨慎采取半联动操作。根据以上结果提出对干式离合器半联动操作的一组安全操作组合。

表 5 因素主次关系

Tab. 5 Primary-secondary relationship of factors

因素	$\Delta\omega$	t'	F
极差	41.69	39.57	31.22

3.2 半联动安全操作组合

在实际驾驶中,半联动程度是一个不易准确控制的变量。驾驶人通常不可能通过离合器踏板,对膜片弹簧小端施加精确控制的力(尤其是在有真空、液压或者电机助力的情况下)。当离合器摩擦片有了一定程度的磨损,离合器踏板行程对应分离轴承处的压紧力也有明显的变化,使得对半联动程度的控制更加困难。在通过半联动操作控制汽车超低速行驶时,驾驶人往往不断地踩下和抬起离合器踏板,使离合器的接合程度动态变化,因此,通过驾驶人控制半联动程度来抑制摩擦片工作表面的温升是不够现实的。为了保证离合器摩擦片不发生热失效,驾驶人应主要通过降低发动机转速和尽量不要进行长时间的半联动操作来进行。

考虑到在连续高频率的半联动操作中,散热较差,可以取上文中的 5 次滑磨加载的时间总长作为一

个标定量,以短时间内多次半联动操作的累计时间作为判断是否安全的标准,见图 11。可以看出:设定 200 ℃ 为摩擦片安全温度的上限,以累计滑磨时间为 40 s,发动机转速为 2 000 r·min⁻¹ 画对角线,对角线所在平面以下的部分均为安全的操作组合,处在平面以上的部分则属于具有安全隐患的操作方式。

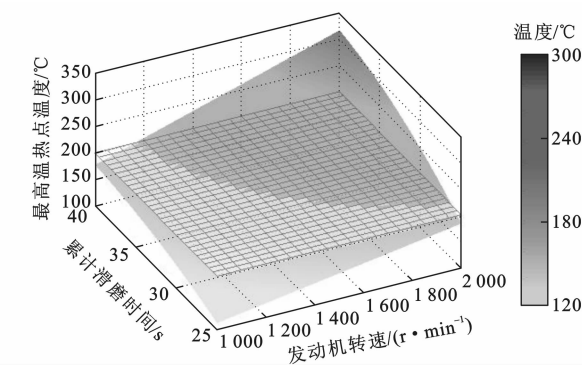


图 11 累计多次半联动的安全操作

Fig. 11 Safety operation of cumulative multiple semi-linkage

4 结 语

(1)基于影响干式离合器半联动传动热稳定性的关键变量,提出摩擦片轴向压力、主从动盘相对滑磨转速和滑磨持续时间为可控的关键影响变量。通过高加速寿命试验研究了干式离合器摩擦片在半联动操作下的热场和热失效现象,设计了高加速寿命试验的加载剖面。

(2)基于正交试验和极差分析法,得到当发动机转速较低为 1 000 r·min⁻¹时,热点温度始终保持在 200 ℃ 以下的安全温度。当发动机转速超过 1 500 r·min⁻¹,摩擦片轴向压力超过 2.0 kN,滑磨持续时间超过 8 s 后,热点温度将超过 200 ℃ 的安全温度。设定 200 ℃ 为摩擦片安全温度的上限,以累计滑磨时间为 40 s 和发动机转速为 2 000 r·min⁻¹ 画对角线,对角线所在平面以下的部分均为安全的操作组合,以上的部分则属于具有安全隐患的操作方式。关键敏感变量影响热稳定性程度依次为离合器主从动盘相对滑磨转速、滑磨持续时间、摩擦片轴向压力。

(3)根据本文提出的加载剖面通过正交试验进行验证,并进一步研究合理的离合器控制策略,以确保干式离合器传动的相对热稳定性是下一步的研究方向。

参 考 文 献 :

References :

[1] IVANOVIĆ V, HEROLD Z, DEUR J, et al. Experimental characterization of wet clutch friction behaviors including

- thermal dynamics[J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 2(1): 1211-1220.
- [2] KARMAVRUC A, SHI Z, GUNTHER D. Determination of empirical heat transfer coefficients via CFD to predict the interface temperature of continuously slipping clutches[C]//SAE. SAE 2011 World Congress and Exhibition. New York: SAE, 2011: 1-11.
- [3] PRZYBILLA M, KUNZE C, CELIK S, et al. Combined simulation approach for dry clutch systems[C]//SAE. SAE 2011 World Congress and Exhibition. New York: SAE, 2011: 12-19.
- [4] DAVIS C L, SADEGHI F, KROUSGRILL C M. A simplified approach to modeling thermal effects in wet clutch engagement: analytical and experimental comparison[J]. Journal of Tribology, 2000, 122(1): 110-118.
- [5] MARKLUND P, MÄKI R, LARSSON R, et al. Thermal influence on torque transfer of wet clutches in limited slip differential applications[J]. Tribology International, 2007, 40(5): 876-884.
- [6] JANG J Y, KHONSARI M M, MAKI R. Three-dimensional thermohydrodynamic analysis of a wet clutch with consideration of grooved friction surfaces[J]. Journal of Tribology, 2011, 133(1): 186-192.
- [7] 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): 660-664.
ZHANG Jin-le, MA Biao, ZHANG Ying-feng, 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): 660-664. (in Chinese)
- [8] 张金乐, 马彪, 张英锋, 等. 湿式换挡离合器热特性仿真[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(2): 321-326.
ZHANG Jin-le, MA Biao, ZHANG Ying-feng, et al. Simulation of thermal characteristic of wet shift clutch[J]. Journal of Jinlin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(2): 321-326. (in Chinese)
- [9] 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): 918-922.
DENG Tao, HU Feng-bin, SUN Dong-ye. An analysis on the thermoelastic instability of wet multi-disc clutch[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(10): 918-922. (in Chinese)
- [10] 刘传波, 李明, 莫易敏, 等. 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): 11-13.
LIU Chuan-bo, LI Ming, MO Yi-min. Clutch pressure plate started working conditions thermodynamic analysis based on ANSYS[J]. Machinery, 2009, 47(9): 11-13. (in Chinese)
- [11] 柴盛典, 陈德元, 张为春, 等. 拖拉机离合器接合理论的试验与研究[J]. 农业机械学报, 1995, 26(2): 1-5.
CHAI Sheng-dian, CHEN De-yuan, ZHANG Wei-chun, et al. Experiment and study on the tractor clutch-engaging theory[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(2): 1-5. (in Chinese)
- [12] 王阳阳, 刘茜. 干式离合器摩擦面片温度分布研究[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(4): 86-92.
WANG Yang-yang, LIU Xi. Temperature distribution of friction plate for dry clutch[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(4): 86-92. (in Chinese)
- [13] INGRAM M, REDDYHOFF T, SPIKES H A. Thermal behaviour of a slipping wet clutch contact[J]. Tribology Letters, 2011, 41(1): 23-32.
- [14] LIU Xing-long, XI Jun-qiang, LUO Li-peng, et al. Design of the clutch friction plate temperature acquisition system based on zigbee[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 155-156(2): 1102-1106.
- [15] FAIRBANK D, MARUO K, DU S, et al. ATF additive effects on hot spot formation in wet clutches[C]//SAE. 2001 International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition. New York: SAE, 2001: 1-9.
- [16] HE H, OKUBO K, FUJII T, et al. Thermal deformation of pressure plates for manual clutches[J]. Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, 2006, 37(2): 113-118.
- [17] HIRANO T, MARUO K, GU X, et al. Development of friction material and quantitative analysis for hot spot phenomenon in wet clutch system[C]//SAE. SAE 2007 World Congress. New York: SAE, 2007: 1-9.
- [18] VELARDOCCIA M, AMISANO F, FLORA R, et al. A linear thermal model for an automotive clutch[C]//SAE. SAE 2000 World Congress. New York: SAE, 2000: 1-9.
- [19] ALBERT A, OTT S, MERKEL P. Methods for clutch dimensioning[C]//SAE, FISITA. Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Berlin: Springer, 2013: 39-48.
- [20] HAN Zhi-peng, SONG Wen-yue, DAI Bing-ru. Measuring surface temperature distributions on clutch discs[C]//SAE. 1992 Worldwide Passenger Car Conference and Exposition. New York: SAE, 1992: 1-7.
- [21] SUN Shao-hua, LEI Yu-long, FU Yao, et al. Analysis of thermal load for dry clutch under the frequent launching condition[C]//SAE. SAE 2013 World Congress and Exhibition. New York: SAE, 2013: 1-9.
- [22] 邢预恩, 高耀东, 张根保, 等. 换挡离合器摩擦片温升分析[J]. 现代制造技术与装备, 2007(5): 17-19.
XING Yu-en, GAO Yao-dong, ZHANG Gen-bao, et al. Temperature rise analysis of the friction disk in shift clutch[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2007(5): 17-19. (in Chinese)
- [23] WANG Yang-yang, LI Yang, LI Nan, et al. Time-varying friction thermal characteristics research on a dry clutch[J]. Journal of Automobile Engineering, 2014, 228(5): 510-517.