

基于磨损失效原理的无级变速器可靠性试验研究^①

安 颖^{②*} 韩 玲^{③**} 刘鸿祥^{**}

(* 湖南科技大学机电工程学院 湘潭 411100)

(** 长春工业大学机电工程学院 长春 130012)

摘 要 根据带式无级变速器(CVT)夹紧力控制策略对 CVT 可靠性的要求,设计了 CVT 耐久性测试试验台。结合滑摩传动时变速机构失效及传统夹紧力控制特点,利用机械限位固定速比的方式开发了夹紧力试验台。根据金属带滑移的工作原理及摩擦系数测试结果,借助 Matlab 绘制了变速机构失效图,并给出了变速器润滑油的选取标准。最后,进行 3×10^4 km 道路实车试验,对比试验前后润滑油内金属元素含量;使用铁谱分析方法预测变速器内零部件早衰,误差仅为 1.02%。结果表明:采用耐久测试试验台对变速器可靠性的评价具有一定试验支持,具有较好的鲁棒性和稳定能力。

关键词 无级变速器(CVT),磨损失效,相对滑移,试验

0 引 言

无级变速器与有级变速器的区别是速比可连续变化值,因而英文名为 continuously variable transmission,简称 CVT。CVT 具有更好的驾驶平顺性和经济性。近年来我国自主研发的金属带式 CVT 性能独特,获得了大量汽车消费者的青睐。尽管 CVT 在我国实现了批量生产,但在可靠性方面缺乏全球竞争力。因此,开展可靠性研究具有实际意义^[1,4]。

目前,为提高 CVT 的可靠性能,金属带 CVT 滑移状态下的摩擦特性研究受到广泛关注。Laan 等研究了通过减小夹紧力的适用条件和传动失效形式,证明了有效传动所允许的最大滑移率,建立了夹紧力控制策略^[5]。Bonsen 等人的进一步研究给出了滑移率与传动效率的关系曲线,研究结果表明滑移率在 0.5% ~ 3% 之间,CVT 可保持较好的可靠性水平^[6]。Srivastava 等^[7,8],Youn 等^[9]在考虑滑移率

对传动性能影响的情况下,对 CVT 系统中各种瞬态力相互作用进行了描述,研究了金属带与带轮在摩擦和润滑条件下的特性。Wang^[10]等研究了渗碳钢的滑动摩擦动态可靠性特性,提出了基于滑动摩擦布尔分布的两种动态可靠性模型。Danelle 等和 Guerin 等针对微机电系统(MEMS)采用统计和测试的方法分析了主要的故障模式,基于摩擦失效机理建立了故障预测模型,并将它应用于不同的涂层表面^[11,12]。谢里阳^[13]通过剖析失效率曲线成因,解释了系统和零部件之间可靠度的关系。张云凤^[14]从磨损的随机特性出发,建立了磨损可靠性预测模型用于计算、预测机械设备的磨损可靠性,提高了机械设备磨损可靠性预测的科学性与准确性。

综上所述,国内外学者在 CVT 可靠性分析上已取得一定成果。本文针对某自主品牌 CVT 液压控制系统耐久性失效问题,从 CVT 金属带滑摩传动基本原理出发,在分析磨损失效关键因素的基础上,通过台架试验对比变速器测试前后金属带与带轮的磨

① 湖南省重点研发计划(2016GK2006),吉林省优秀青年人才基金(20180520070JH),吉林省教育厅“十三五”科学技术(JJKH20181011KJ)和教育部“春晖计划”科研(Z2016023)资助项目。

② 女,1980 年生,博士;研究方向:汽车自动变速理论、电液控制系统开发;E-mail: 64259725@qq.com

③ 通信作者,E-mail: hanling@ccut.edu.cn

(收稿日期:2017-08-29)

损变化情况。同时,在试验台上进行摩擦特性试验。最后,对配有该 CVT 的车型进行了整车道路耐久试验,拆箱检验了 CVT 润滑油(CVT fluid, CVTF)品质,证明了磨损指标在合理范围内可反映出该品牌 CVT 的可靠性。

1 变速机构磨损失效分析

金属带与带轮、金属片与带轮、金属片与金属环、金属环与金属环之间各接触面的磨损方式一般可分为四种,分别是金属间的化学磨损、疲劳磨损、研磨磨损以及粘着磨损。前三种磨损方式伴随带式摩擦传动一直存在,是金属带式摩擦传动的固有特性,同时决定了 CVT 的传动效率和使用寿命,第四种磨损定义为严重磨损不允许存在,该磨损是由于金属带与锥轮锥面之间由微观滑移转为相对宏观滑动所造成。

1.1 金属带夹紧力试验台搭建

为研究轴向夹紧力不变情况下的变速器可靠性,开发耐久测试系统。速比采用机械限位方式固定。试验台主要部分组成如图 1 所示。

为精确测试不同速比下的滑移率,在变速器内部采用机械结构将可动带轮固定在需要的速比位置。并采用激光位移传感器监测可动带轮的位置。同时主、从动轴分别采用转速传感器测速。由此,则可以得到两个速比,即转速比值得到的真实速比 i ,和带轮位置得到的理论几何速比 i_0 ,两者之间的差值则是由传动过程中的金属带滑移所导致的。

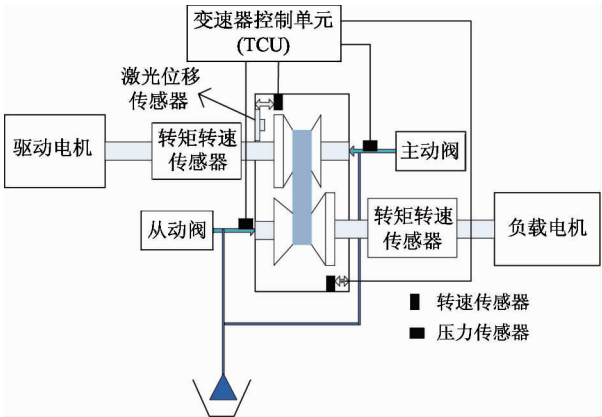


图 1 夹紧力试验台结构简图

试验过程中主、从动轮压力均采用 20ms 任务周期的闭环控制,同时驱动电机、负载电机也采用闭环控制。驱动电机目标转速 1500r/min。通过机械法限定带轮轴向位移以达到限定速比的目的,保持从动带轮和主动带轮夹紧力不变,缓慢增加负载扭矩,并记录实际速比 i (输入转速与输出转速比)以及几何速比 i_0 。

1.2 金属带滑移失效分析

定义相对滑移速度 v_{abs} :

$$v_{abs} = w_p R_p - w_s R_s \tag{1}$$

式中:

w_p 和 w_s 分别表示 CVT 主/从动轮转速, R_p 和 R_s 分别表示 CVT 主/从动锥轮工作半径。

试验过程中如图 2 和图 3 所示。滑移测试中内几何速比 i_0 在 5s ~ 10s 之内一直维持在 OD 速比(即超速(overdrive)速比,是 CVT 的最小速比)位置,驱

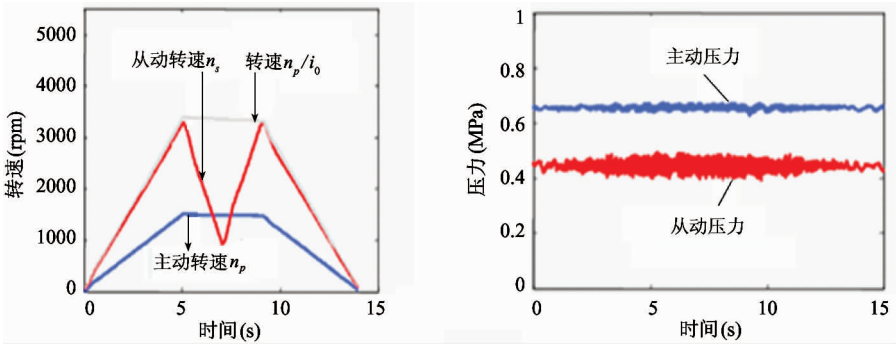


图 2 测试中转速和压力的变化情况

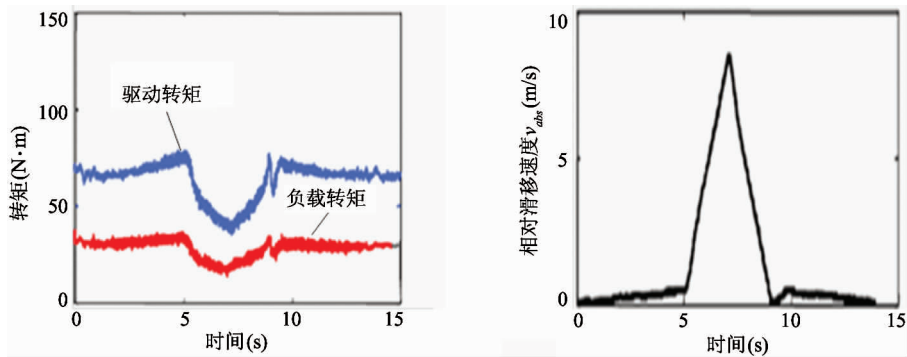


图3 测试中转矩和相对滑移速度的变化情况

动电机目标转速 1500r/min, 负载电机转速从 3200r/min 逐渐下降至 800r/min, 随即逐渐上升, 在此变化过程中, 滑移测试速度产生变化, v_{abs} 从 0.5m/s 上升到 8.5m/s, 随后速度下降至原来位置, 该现象说明滑移测试在 5s ~ 10s 区间金属带与带轮之间发生相对宏观滑动, 变速器存在粘着磨损。

因此, 当金属带受力方向相同时, 通过上述试验可测得粘着磨损发生的条件与滑移速度的大小相关, 当滑移速度增大时金属带与带轮间产生粘着磨损。利用滑移测试试验绘制法向力与滑移速度 v_{abs} 的变速机构失效图, 即 $F-v_{abs}$ 如图 4 所示。

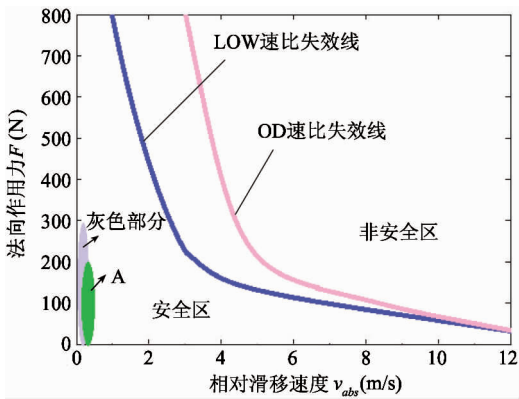


图4 变速机构失效图

从图 4 中可以看出, 驱动电机转速恒定时 LOW 速比 (CVT 最低档速比, 本文研究对象最低速比为 2.422) 左侧为安全区域, 右侧则是金属片失效, 容易产生粘着磨损的非安全区域。因此, 通过该失效图可预测夹紧力与金属带之间的失效趋势, 同时, 从图中可以看出, 夹紧力控制要满足滑移速度在安全

区域内不可以穿越失效线, 否则带轮发生打滑, 变速机构失效。另外, 在 OD 速比工作状态下, 夹紧力的工作区域为图中灰色部分, 从图中可知该部分相对滑移速度较小, 处于传统合理控制范围内, 图中区域 A 为该自主变速器夹紧力优化后, 在保证安全区域的情况下, 降低夹紧力提高效率。

2 台架耐久可靠性及摩擦特性测试

装配有 CVT 的车辆需满足各种路况条件下的行驶要求, 本文为了减少道路试验的测试周期长、强度大和动力不合理匹配等缺陷问题, 开发了耐久可靠性测试试验台, 测试内容包括变速器主、从动缸压力、润滑油油温、速比、电机转矩、转速等。该试验台也同样适用变速机构摩擦特性的研究。

2.1 固定速比耐久性测试

如表 1 中参数设定所示, 假设带轮表面摩擦系数为 0.08, 安全系数为 1.3, 试验测试步骤如下:

- (1) 全负载测试条件下, 以 0.650 的速比进行 60h 测试;
- (2) 全负载测试条件下, 以 0.486 的速比进行 60h 测试;
- (3) 半负载测试条件下, 以 2.588 的速比进行 35h 测试;
- (4) 全负载测试条件下, 以 2.422 的速比进行 40h 测试;
- (5) 测试结束, 检测金属带轮磨损情况及 CVTF 油品杂质。

表 1 固定速比耐久性测试参数设定表

	TOP	OD	LOW	LOW
测试时间(h)	60	60	35	40
速比	0.650	0.486	2.588	2.422
转矩(N·m)	150	120	80	150
主动轮转速(r/min)	6500	4500	4500	4500
从动缸压力(MPa)	1.92	1.40	2.08	4.16
润滑油温度	85℃±5	85℃±5	85℃±5	85℃±5

上述试验中,磨损发生在所有的接触面上,直接影响变速器耐久性。接触面积的增大不但会影响组织油膜的正常形成,使得接触面间的自由度、粗糙度变大,极易产生疲劳磨损,应力过大失效更会导致 CVT 传递能力降低。因此,只有确保各零部件磨损程度在评价指标内^[15],才能达到变速机构耐久测试的要求。

一般情况下按照磨损程度由轻到重分为 6 个等级,处于两种等级之间的可按照数字进行量化评级分析:0—无磨损;1—轻微磨损;2—较轻磨损;3—轻度磨损;4—中度磨损;5—较重磨损;6—粘着磨损。其中,判断带轮的磨损标准如下:

- (1) 金属带内由于钢片之间,钢片与钢环之间拉伸导致的总间隙应满足 $\Delta L \leq 0.8\text{mm}$;
- (2) 金属带钢片齿形面高度平均值需满足 $\Delta H \leq 11\mu\text{m}$;
- (3) 磨损程度等级 $m \leq 3$;
- (4) 主动轮与从动轮速比范围在 0.443 ~ 2.422。

图 5、图 6 分别为金属带钢片拆装后左右两侧的真实磨损情况;图 7、图 8 分别为金属带最里层与最外层钢环磨损情况。

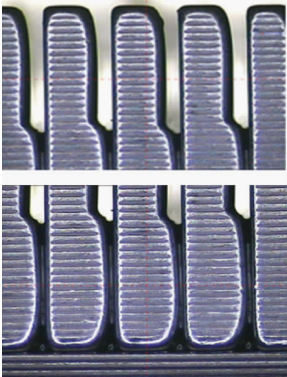


图 5 钢片左侧磨损

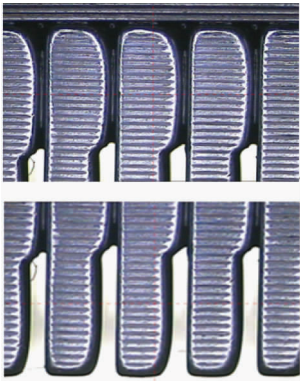


图 6 钢片右侧磨损



图 7 金属带最里层钢环



图 8 金属带最外层钢环

耐久性试验测试结果表明:金属带轮的磨损等级满足指标要求,钢片齿形面测试前后磨损高度之差为 $\Delta H = 6\mu\text{m}$,满足 $\Delta H \leq 11\mu\text{m}$ 。

2.2 CVTF 摩擦系数 μ

金属带锥轮间的摩擦系数 μ ^[16] 通常取决于 CVTF 油品品质,较低摩擦系数的润滑油将导致金属带转矩的容纳能力变小(如表 2 所示,转矩参数设定表),为平衡转矩的传递安全性势必要增大夹紧力,使带轮受力增加,整体变速机构损耗加大,整车传动效率降低,严重影响耐久性测试。因此,在降低夹紧力的前提下,适当提高摩擦系数,为 CVTF 油品的选择提供一定标准。根据夹紧力传递公式可推出摩擦系数 μ :

$$F_t = \frac{T_{p,max} \cdot S_f}{2R_p} \tag{2}$$

$$F_n = \frac{F_t}{\mu} \tag{3}$$

由式(2)和(3)可得:

$$F_n = \frac{T_{p,max} \cdot S_f}{2R_p\mu} \tag{4}$$

$$F_{ax} = F_n \cos\lambda \cdot S_f \tag{5}$$

由式(4)和(5)可得:

$$T_{p,max} = \frac{2F_{ax}R_p\mu}{\cos\lambda \cdot S_f} \tag{6}$$

$$\mu = \frac{|T_{p,max}| \cos\lambda}{2R_p F_{ax}} \times S_f \tag{7}$$

式中: μ —金属带轮间摩擦因数;
 λ —金属带轮轴线与锥盘垂直夹角;
 F_n —主动带轮端面垂直夹紧力;
 F_t —金属带与主动带轮之间摩擦力;
 F_{ax} —从动带轮的轴向推力;
 R_p —主动轮工作半径;
 $T_{p,max}$ —某一夹紧力下传递最大输入转矩;
 S_f —安全系数转矩最大值时取 $S_f = 1.0$ 。

表 2 转矩容量参数设定表

	TOP	OD1	OD2	MID	LOW
速比	0.650	0.486	0.486	1	2.422
主动轮转速 (r/min)	6500	4500	4500	4500	4500
从动缸压力 (MPa)	1.08	0.89	0.89	1.35	3.8
油温	85℃ ± 5	85℃ ± 5	85℃ ± 5	85℃ ± 5	85℃ ± 5

CVTF 油品摩擦系数在不同速比下需满足条件:

- (1)TOP 速比,平均摩擦系数范围: $\mu \geq 0.09$;
- (2)OD 速比,平均摩擦系数范围: $\mu \geq 0.092$;
- (3)LOW 速比,平均摩擦系数满足: $\mu \geq 0.082$ 。

通过转矩参数的设置,对 LOW 速比下的转矩进行测量(测量结果如图 9 所示),图中横纵坐标分别代表驱动电机转矩与滑移率,图中临界转矩 50N·m 的突变是由于金属带传动机理导致的(以金属带拉应力为主的传递方式转变为以金属片压应力

为主的扭矩传递方式)。当扭矩达到 180N·m 时,滑移率陡增进入宏观打滑可能导致严重的粘着磨损。根据最大扭矩测试结果,可根据摩擦系数公式计算 CVTF 油可靠性(如表 3 所示,摩擦系数测量结果),该方法同样适用于 OD 速比及 TOP 速比范围。

表 3 测试中的摩擦系数

测试数据		结果
LOW 速比	第一次 $\mu_{low,1} = 0.093$	$\mu_{low,avg} > 0.09$
	第二次 $\mu_{low,2} = 0.095$	
	平均值 $\mu_{low,avg} = 0.094$	
OD 速比	第一次 $\mu_{od,1} = 0.099$	$\mu_{od,avg} = 0.0995$ > 0.092
	第二次 $\mu_{od,2} = 0.010$	
	平均值 $\mu_{od,avg} = 0.0995$	
TOP 速比	第一次 $\mu_{top,1} = 0.090$	$\mu_{top,avg} > 0.082$
	第二次 $\mu_{top,2} = 0.092$	
	平均值 $\mu_{top,avg} = 0.091$	

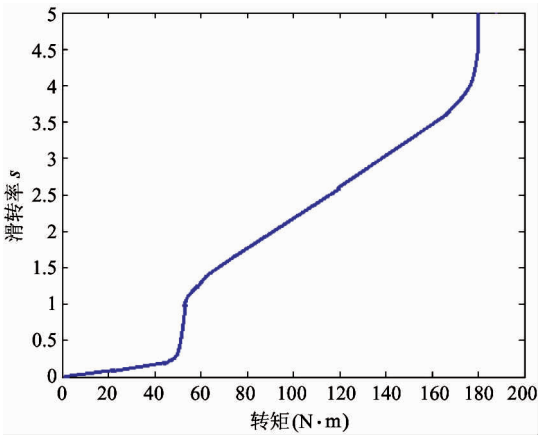


图 9 转矩容量测试结果

3 道路耐久性试验

为更好地模拟各种道路工况,使配有 CVT 的某车型在中国第一汽车集团公司农安汽车试验场进行试验,该试验场占地面积 $95.72 \times 10^4 \text{m}^2$,现拥有高速环形跑道、耐久性试验路、综合性能试验路、ABS 试验路、圆形广场、标准坡道、灰尘洞、涉水池、淋雨室等专项试验设施。其中,耐久性试验路由强化试验路面、水泥混凝土路面及沥青混凝土连接路面组成。可靠性路试类型主要包括高速环形跑道、耐久性道路、山区公路、综合性能公路、标准车道和圆形广场等共计 $3 \times 10^4 \text{km}$ (如图 10 所示,路测试验现场),该条件测试下的试验结果对汽车可靠性评价具有较高价值。



图 10 耐久性道路测试

通过 $3 \times 10^4 \text{km}$ 道路测试试验后,利用铁谱定性分析法对 CVTF 油品内部金属元素浓度含量和颗粒物成份进行分析,进一步掌握变速机构内磨损情况,如表 4 所示试验前后润滑油液中金属含量对比。通过铁谱显微镜观测变速器磨损金属颗粒和污染油

表 4 试验前后润滑油中金属含量

金属元素	单位 (mg/kg)		金属元素	单位 (mg/kg)	
	CVTF	$3 \times 10^4 \text{km}$		CVTF	$3 \times 10^4 \text{km}$
Fe	0	16	Na	0	10
Cu	0	4	Mn	0	2
Pb	0	2	Ag	0	3
Cr	0	0	V	0	0
Sn	0	0	Ti	0	0
Si	0	0	B	38	34
Mo	0	0	Ba	0	3
Al	0	14	Ca	69	79
Mg	0	4	Zn	1	10
Ni	0	2	P	297	279

液颗粒(如图 11 所示):润滑油液中含有少量正常磨损颗粒、有色金属颗粒和外界污染颗粒,其余污染物颗粒都是个别现象(如表 5 所示),指标范围符合耐久性试验国家标准。其次,对比新 CVTF 油与 $3 \times 10^4 \text{km}$ 后油液金属含量,针对不同零部件所含金属成份和试验后 CVTF 油中成份含量对比,早期预测变速机构内磨损部位失效零部件,该方法精度较高,在存在测量误差的情况下仅为 1.02%。

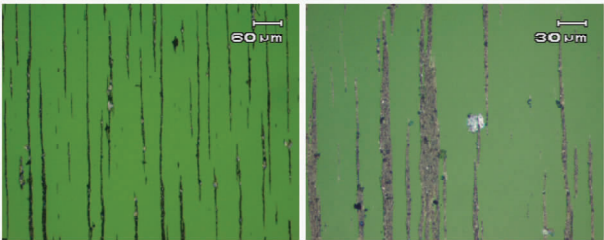


图 11 铁谱显微镜颗粒检测

表 5 磨损颗粒和污染杂质特征

磨损金属颗粒 剂污染颗粒	主要成分	尺寸范围 (μm)	颗粒浓度相对数量等级				
			无	个别	少量	较多	大量
正常磨损颗粒	钢	<10			▲		
粘着磨损颗粒	钢	10~40		▲			
疲劳剥落颗粒	钢	10~30		▲			
切削磨损颗粒	钢	10~30		▲			
腐蚀磨损颗粒			▲				
高温氧化颗粒	钢	10~45					
有色金属颗粒	铝合金	10~25			▲		
外界污染颗粒	粉尘	5~15		▲	▲		
油品变质颗粒	油泥	5~25		▲			

配有 CVT 的车辆进行 3×10^4 km 道路耐久性试验,测试结果直接反馈给终端消费者,该结果不仅验证变速机构磨损在有效范围内的合理性,也对现有自主研发变速器的液压控制系统可靠性提供一定支持。

4 结 论

本文以金属带滑摩传动磨损原理为基础,将磨损分类为化学磨损、研磨磨损、疲劳磨损以及粘着磨损 4 种,证明粘着磨损是由于金属带轮之间发生滑移时所产生,易使变速机构失效。建立夹紧力试验台,对滑移失效进行分析,绘制失效图。通过对失效图中非安全区部分分析,避免金属带打滑提供参考依据;同时,开发变速器耐久性试验台,完成 3×10^4 km 装配 CVT 的车辆耐久性实车试验,试验完毕后采用铁谱分析方法拆箱检验 CVTF 油液内金属元素含量,标定变速机构磨损情况预测各零部件早衰。结果表明测试通过,为该变速器可靠性提供支持。

参考文献

- [1] 张义民. 机械动态与渐变可靠性理论与技术评述[J]. 机械工程学报,2013,49(20):101-114
- [2] 于繁华,刘仁云,张义民,等. 机械结构动态可靠性设计的智能计算方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2016,46(4):1269-1275
- [3] 孟广伟,冯昕宇,周立明,等. 基于降维算法的结构可靠性分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2017,47(1):174-179
- [4] 刘玉梅,赵聪聪,熊明烨,等. 基于物元模型的高速轨道车辆传动系可靠性评价[J]. 吉林大学学报(工学版),2015,45(4):1063-1068
- [5] Laan M V D, Drogen M V, Brandsma A. Improving push belt CVT efficiency by control strategies based on new variator wear insight[R]. SAE Technical Papers, 2004. doi: <http://papers.sae.org/2004-40-0039>
- [6] Bonsen B, Klaassen T W G L, van de Meerakker K G O, et al. Analysis of slip in a continuously variable transmission[C]. In: Proceedings of the ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Washington, USA, 2003. 15-21
- [7] Srivastava N. Modeling & Simulation of Friction-limited Continuously Variable Transmission [D]. Clemson: Clemson University, 2006
- [8] Srivastava N, Haque I. Transient dynamics of metal V-belt CVT: effects of band pack slip and friction characteristic[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(4): 459-479
- [9] Youn B D, Choi K K, Yang R J, et al. Reliability-based design optimization for crashworthiness of vehicle side impact[J]. *Industrial Applications and Design Case Study*, 2004, (26): 272-283
- [10] Wang K S, Chen C S, Huang J J. Dynamic reliability behavior for sliding wear of carburized steel[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1997, 58(1): 31-41
- [11] Danelle M T, Michael T D. Wear mechanisms in a reliability methodology[J]. *Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS II*, 2003(4980): 22-40
- [12] Guerin F, Todoskoff A, Barreau M, et al. Reliability analysis for complex industrial real-time systems: application on an antilock brake system[C]. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Yasmine Hammamet, Tunisia, 2002, (7): 657-686
- [13] 谢里阳. 机械可靠性理论、方法及模型中若干问题评述[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7):27-35
- [14] 张云凤. 基于随机过程的磨损可靠性预测及若干问题研究:[博士学位论文][D]. 沈阳:东北大学机械能与自动化学院, 2010
- [15] Bert P, Mark P, Arjen B, et al. Van doorne CVT fluid test: a test method on belt-pulley level to select fluids for push belt CVT applications[R]. SAE Technical Papers, 2003. doi:10.3200/2003-01-3253
- [16] Thomas J, Constans B, Gresser E, et al. Testing the torque capacity of CVT fluids[R]. SAE Technical Papers, 2004. doi:10.4271/2004-01-2007

Test research on continuously variable transmissions' reliability based on principle of wear failure

An Ying^{*}, Han Ling^{**}, Liu Hongxiang^{**}

(^{*} College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University
of Science and Technology, Xiangtan 411100)

(^{**} College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012)

Abstract

According to the demands of continuously variable transmission (CVT)'s clamping force control strategy for CVT's reliability, a durability test bench is designed. In consideration of the characteristics of the speed shifting mechanism and traditional clamping force control during sliding transmission, a clamping force test bench is developed based on the method of using mechanical limit to fix the speed ratio. Based on the principle of metal strip slip and the results of friction coefficient test, the failure chart of the transmission mechanism is plotted with the help of Matlab, and the lubricating oil selection standard for CVT is given. A real vehicle with CVT is tested on the road of 30000km to compare the metal ion contents in lubricating oil before and after the road test, and the inside component aging is predicted by using the iron spectrum method, resulting in the predicting error rate of only 1.02%. The simulation verified the effectiveness of the test bench. It has the better stability and robustness when testing CVT's reliability.

Key words: continuously variable transmission (CVT), wear failure, relative slip, test