DOI: 10.3901/JME.2015.02.090

无级变速器金属带滑移特性试验研究*

张飞铁 周云山 薛殿伦 蔡源春 张 军

(湖南大学机械与运载工程学院 长沙 410082)

摘要: 为提高金属带摩擦传动的效率,改善搭载无级变速器的车辆的燃油经济性,研究金属带的滑移特性。搭建金属带滑移特性试验台架,通过台架试验,研究不同速比、不同夹紧力与不同主动轮转速三种工况下滑移率与摩擦因数关系的滑移特性,试验结果表明在滑移率的前段区间,摩擦因数随滑移率增加而快速增加,在滑移率的后段区间,摩擦因数保持稳定并有减小的趋势;速比对滑移特性影响明显,同一滑移率,速比越小,摩擦因数越大;夹紧力与主动轮转速对滑移特性的影响可以忽略。根据滑移特性的试验结果,提出目标滑移区域的定义——滑移效率限制区域(Slip efficiency limit region, SELR)与滑移磨损限制区域(Slip abrasion limit region, SALR)。为高效率的夹紧力控制算法的开发提供依据,为提高金属带的传动效率找到了一种新方法。

关键词: 金属带; 滑移率; 摩擦因数; 滑移特性

中图分类号: U463

Experiment Research on Slip Characters of Metal V-belt of Continuous Variable Transmission

ZHANG Feitie ZHOU Yunshan XUE Dianlun CAI Yuanchun ZHANG Jun

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract: In order to increase metal belt transmission efficiency and improve fuel economy of vehicles with continuous variable transmissions, slip characters are researched. A test bench for metal belt slip characters is created and through test bench experiment, the relationship between slip rate and friction coefficient under conditions of different ratio, different clamp force, and different primary speed is researched. The results are as follows. In the forehead part of slip rate region, friction coefficient increases sharply with increase of slip rate. In the back part of slip rate region, friction coefficient changes little and has decreasing trends; Ratio impacts the slip characters significantly, when ratio is smaller, friction coefficient becomes larger; Impacts from clamp force and primary speed can be ignored. Based on experimental results of slip characters, the definition of object slip region is presented as slip efficiency limit region and slip abrasion limit region. The basis for developing high efficient clamp force control algorithm is provided and a new way to improve transmission efficient of metal V-belt is found out.

Key words: metal V-belt; slip rate; friction coefficient; slip characters

0 前言

在当今对车辆燃油经济性和排放要求越来越高的国际形势下,世界各国汽车零配件供应商和整机生产厂家一直在不断寻求汽车自动变速器的最优设计方案与控制方法,无级变速器(Continuous variable transmission, CVT)也不断通过先进技术,提高传动效率,使 CVT 车型的燃油经济性与手动档车

型相当甚至优于手动档车型。为进一步提高 CVT 的传动效率,一般有以下方法:增加速比范围,减小油泵损失,减小夹紧力。就夹紧力而言,夹紧力过小会导致金属带打滑,如果此刻金属带正在传递大转矩,金属片与带轮接触面会严重磨损。为保证金属带的安全,目前夹紧力的控制一般采用过量安全系数的方法。

如何优化夹紧力提高金属带的传动效率,各个研究机构对其进行了研究。SRIVASTAVA 等^[1]在润滑与非润滑的条件下建立了金属带摩擦特性的模型,用简单的几何公式说明了速比与滑移特性。KIM^[2]从速比与转矩的角度分析了滑移特性,发现

* 国家自然科学基金(51475151)、国家高技术研究发展计划(863 计划, 2012AA111710)和力帆汽车博士后资助项目。20140321 收到初稿, 20140821 收到修改稿

大滑移由从动轮端的转矩决定, 并通过试验研究了摩擦因数。VAN 等^[3]认为减小夹紧力能够使燃油经济性下降 5%。DROGEN 等^[4]的研究表明压力钢带能够在一个较长时间范围内承受较大的滑移量, 并且没有较为明显的磨损, 通过减小夹紧力与控制金属带磨损程度来提高传动效率。ASAYAMA 等^[5]建立金属带的模型, 从理论上分析了夹紧力与滑移的关系。KOBAYASHI 等^[6]对金属带的转矩容量从理论的角度进行了分析, 并建立了金属带运动模型。BONSEN 等^[7]研究了滑移率的特性, 认为滑移率控制在合适范围内, 会提高金属带的传动效率, 但只是从工程角度进行了研究。KLAAMSEN 等^[8]提出了降低夹紧力的控制方法。SHIMOKAWA^[9]提出了提高 CVT 效率的方法之一是降低主动缸与从动缸的压力, SAITO 等^[10]使用模拟的带轮转速与实测的转速差预测金属带的传动效率, MEULEN 等^[11]为了提高传动效率, 采用了跟踪极限速比方法, 这三者都是滑移特性的应用, 但都没有深究滑移理论。

近几年, 自动变速器在国内迅速发展, 无级变速器也是研究热点之一。为了提高自主开发的无级变速器的性能, 本文在目前的研究基础上, 建立滑移试验台架, 研究不同夹紧力、主动带轮转速与速比工况下滑移率与摩擦因数之间的关系, 提出滑移控制目标区域, 为后续提出降低夹紧力的控制方法提供依据。

1 滑移原理

CVT 金属带传递转矩, 是在一定的夹紧力作用下, 通过带轮与金属片之间的摩擦来实现的。对于金属带式无级变速器, 如果夹紧力偏大, 则会降低传动效率, 如果夹紧力过小, 金属带会产生打滑, 导致金属带与带轮的磨损。在目前的方法里, 为了保证发动机转矩的可靠传递与金属带不磨损, 夹紧力通常留有一定的安全余量, 但其缺点是变速器传动效率偏低。目前使用的夹紧力计算方法如下, 受力分析如图 1 所示。

图 1 金属片受力示意图

$$F_t = \frac{T_p}{2R_p} \quad (1)$$

$$F_n = \frac{F_t}{\mu} \quad (2)$$

由式(1)、(2)可得

$$F_n = \frac{T_p}{2R_p\mu} \quad (3)$$

$$F_s = F_n \cos \lambda \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得

$$F_s = \frac{S_f T_p \cos \lambda}{2R_p\mu} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{S_f T_p \cos \lambda}{2F_s R_p} \quad (6)$$

式中 μ ——金属带与主动带轮之间的摩擦因数;

λ ——锥盘母线工作点处的切线与带轮轴线垂面的夹角;

R_p ——主动轮工作半径;

S_f ——夹紧力的安全系数;

T_p ——主动带轮输入转矩;

F_s ——从动轮夹紧力;

F_t ——金属带与主动带轮之间的摩擦力;

F_n ——主动带轮端面的垂直夹紧力。

式(5)中安全系数 S_f , 通常取 1.3, 金属带在工作过程中, 工况复杂, 例如不同的速比与不同的主动轮转速等工况下, 夹紧力是变化的。同时, 车辆在实际的行驶工况中, 会有来自路面与发动机的瞬态转矩冲击, 因此, 为了确保金属带不被磨损, 常引入安全系数。无级变速器最大的优点, 是通过匹配能够使发动机工作在高效率区域, 但也有缺陷, 平均传动效率只有 70%左右(根据负载变化), 与传统的手动档车型相比, CVT 车型燃油经济性并没有提高。但是, 根据 ASAYAMA 等^[5]的研究表明, 金属带的磨损有一个过程, 一定程度的滑移不会损坏钢带, 并且能够提高摩擦因数, 从而能够降低夹紧力。根据 DROGEN 等^[4]的研究, 把滑移分为两个区域, 分别是大滑移区与微滑移区, 如图 2 所示, 在一定的夹紧力作用下, 随着输入转矩的增加, 金属带的滑移率缓慢增大, 当金属带传递转矩所需的夹紧力超过施加的夹紧力, 即传输的转矩达到最大值 $T_{p,max}$, 此后不能再增大转矩, 否则会导致金属片和带轮的打滑, 即滑移率的急剧增加。滑移率小于 $T_{p,max}$ 所在位置的滑移率称为微滑移, 滑移率大于 $T_{p,max}$ 所在位置的滑移率称为大滑移, 就是通常所说的金属带打滑。

图 2 滑移区域示意图

微滑移形成的原因,是由于金属带的松边与紧边的金属片间隙的不同,金属带没有传递转矩时,金属片的间隙是均匀分布的,当传递转矩后,推挤侧的间隙会变小,拖动侧的间隙会变大,当金属片由拖动侧转动至推挤侧时,金属片就产生了微滑移。大滑移区产生的原因是金属带传递的转矩大于某一夹紧力的所能承受转矩的极限值。从上述的描述可知,微滑移与大滑移是由某一夹紧力下传递的转矩大小决定的。由于微滑移与大滑移的本质区别是某一夹紧力下传递转矩的大小不一样,由式(6)可知,其反映的是摩擦因数 μ 的大小。同时,微滑移与大滑移也可通过滑移率大小来区分,也就是说,滑移率与摩擦因数 μ 有其内在联系。摩擦因数决定了系统在某一压力所能传递的最大转矩,由于摩擦因数与滑移率、传递转矩及夹紧力有关,故传输入转矩 T_p 与滑移率、夹紧力、及速比存在一定关系,当夹紧力与速比恒定时,传递的转矩与滑移率的关系将通过试验获得。

为了准确描述金属带滑移率的定义,根据不同需要分两种情况,一种是从金属带线速度的角度,另一种从速比的角度。金属带不打滑时,金属带推挤侧在主动轮上的线速度与从动轮上的线速度是相等的,打滑时,主动轮上的线速度会大于从动轮上的线速度。滑移量定义为

$$v = \omega_p r_p - \omega_s r_s \quad (7)$$

式中 ω_p, ω_s ——主、从动轮角速度;

r_p, r_s ——主、从动轮工作半径。

金属带滑移率 S_v 定义为

$$S_v = \frac{v}{\omega_s r_s} \times 100\% = \left(\frac{\omega_p r_p}{\omega_s r_s} - 1 \right) \times 100\% \quad (8)$$

从速比角度,金属带的滑移率定义如下,设定无输入转矩时传动速比为 i_0 ,某一输入转矩下速比

为 i_s ,金属带不打滑时, i_s 与 i_0 是相等的;当金属带打滑时, i_s 的值大于 i_0 的值。

金属带滑移率 S_i 定义为

$$S_i = \frac{i_s - i_0}{i_0} \times 100\% \quad (9)$$

式中 i_0 ——零输入转矩下的速比;

i_s ——有转矩时的速比。

2 台架试验

2.1 试验系统与方法

为了精确测量金属带与带轮之间摩擦力的关系,本文选用某公司自主开发的变速器,但研究对象不是整台变速器,而是只有金属带与带轮组成的变速机构,因此去掉了变速器的油泵、液力变矩器、离合器总成、主减速齿轮以及自身的液压系统等,带轮的驱动油压与润滑由外置的液压系统供给,变速机构相关参数如表 1 所示。试验台示意如图 3 所示,驱动部分由一台 75 kW 的交流变频电动机,负载电动机与驱动电动机相同,2 个控制电动机的变频器,2 台转速转矩传感器,本系统采用独立的液压系统,液压系统由电动机驱动油泵,比例溢流阀控制系统的压力,一个比例减压阀控制从动缸的压力,另一个比例减压阀控制主动缸的压力,实现速比的控制。

表 1 变速机构相关参数

项目	参数
变速器型号	RD150
低档速比(LOW)	2.43
中间速比(MID)	1.00
高档速比(TOP)	0.62
超速档速比(OD)	0.44
带轮中心距/mm	146
金属带型号	24/9/1.50/196.8
金属带片数	408
金属带长度/mm	612
液压油型号	RDF01

2.2 试验方案

速比工况下的滑移特性试验,设置驱动电动机与负载电动机工作在转矩模式,控制主动轮转速稳定在 1 800 r/min,单独调节主动轮与从动轮夹紧力,夹紧力保持在 8 230 N。试验过程中,油液温度保持在 95 ℃±5 ℃范围内。试验分四种工况进行,分别在 LOW、MID、TOP、OD 四个速比下进行测试。

图 3 试验系统示意图

试验时，输入转矩从 0 开始，逐步增加，直至滑移率增加时，转矩不再增加并且有减小的趋势。试验各参数的值如表 2 所示。

表 2 速比工况参数值

参数	LOW	MID	TOP	OD
速比	2.43	1.0	0.62	0.44
主动轮半径/m	0.028 5	0.050 7	0.062 0	0.068 0
从动轮半径/m	0.011 7	0.050 7	0.099 0	0.154 0
油温/℃	95±5	95±5	95±5	95±5
夹紧力/N	8 230	8 230	8 230	8 230
主动轮转速/(r/min)	1 800	1 800	1 800	1 800

夹紧力工况的滑移特性试验，测试三个不同的夹紧力条件下的滑移特性，三个夹紧力分别是 5 742 N·m、8 203 N·m、11 480 N·m，其他参数见表 3，方案与速比工况试验类似。

表 3 夹紧力工况参数值

速比	油温/℃	主动轮转速/(r/min)	主动轮半径/m	从动轮半径/m
0.62	95±5	1 800	0.062 0	0.099 0

主动轮转速工况的滑移特性试验，测试三个不同的主动轮转速条件下的滑移特性，三个主动轮转速分别是 1 200 r/min、1 800 r/min、2 800 r/min。其他参数见表 4，方案与速比工况试验类似。

表 4 主动轮转工况参数值

速比	油温/℃	夹紧力/(r/min)	主动轮半径/m	从动轮半径/m
0.62	95±5	8 230	0.062 0	0.099 0

2.3 试验结果与分析

不同速比下的滑移特性如图 4~7 所示。图 4 所示的是 LOW 模式试验数据，滑移率从 0%变化至

3.9%这一范围，随着滑移率的增加，摩擦因数单调递增，从 0.005 2 增加到 0.088 0，滑移率大于 3.9%的后一段，摩擦因数略微减小，从 0.088 0 减少到 0.086 0，整个过程转矩最高值达到 42 N·m。图 5 所示的是 MID 模式的试验数据，滑移率从 0%变化至 1.2%这一区间，摩擦因数快速增加，从 0.005 3 增加至 0.073，滑移率从 1.2%变化至 3.6%的这一区间，摩擦因数缓慢升高，从 0.073 0 变化至 0.092 0，滑移率超过 3.6%之后，就呈下降趋势，一直下降到 0.091 0，此模型中转矩最高值达到 78 N·m。图 6 所示的是 TOP 模式的试验数据，滑移率从 0%变化至 0.9%这一区间，摩擦因数从 0.006 0 快速上升至 0.090 0，之后摩擦因数趋于平缓，TOP 模式下最高转矩达到 102 N·m。图 7 所示的是 OD 模型的试验数据，其变化规律与 TOP 模式类似，但其最高转矩达到 122 N·m。

图 4 LOW 模式的滑移特性

图 5 MID 模式的滑移特性

图 6 TOP 模式的滑移特性

图 7 OD 模式的滑移特性

根据上述分析,不同速比的工况下,摩擦因数与滑移率的关系特性差别较大,LOW 模式下摩擦因数随滑移率变化平缓,MID、TOP 与 OD 模式下,在 0~1.2% 这一前段区间,摩擦因数的变化较大,后段区间变化平缓。四个模式中,LOW 模式的摩擦因数最大值是 0.107 8,OD 模式的摩擦因数最大值是 0.088 0,因此,同一滑移率工况下,速比越小,摩擦因数就越大。

不同夹紧力工况下的滑移特性如图 8 所示,夹紧力对滑移特性几乎没有影响。不同主动轮转速工况下的滑移特性如图 9 所示,主动轮转速对滑移特性影响较小,主动轮转速高时,摩擦因数相对较大,但值变化不大,不超过 5%。

图 8 各夹紧力工况下的滑移特性

图 9 各主动轮转速工况下的滑移特性

根据上述的分析可知,滑移率受速比的影响较大,而夹紧力与主动轮转速对滑移率的影响可以忽略。

略,因此,可以根据各速比工况下的滑移特性来定义目标滑移率。为了准确区别目标滑移区域,根据区域特征类型,把目标滑移区域分成两个区域:滑移效率限制区域(Slip efficiency limit region, SELR)与滑移磨损限制区域(Slip abrasion limit region, SALR)。如图 10 所示,BE 线段是各个速比下最大摩擦因数的连线,由于实际控制中,难以保持滑移率工作在线工况上,因此需要定义面工况,定义面工况的原则是尽可能地与摩擦因数最大的线工况靠近,并且不能因为滑移而磨损金属带。本文以 BE 线工况摩擦因数的 90% 作为下限,如 CF 线段所示,BCFE 围成了一个目标区域,由于该区域受效率的限制,把 BCFE 围成的区域叫做 SELR。图 10 中 AD 连线是金属带不磨损条件下允许的最大滑移率,ABED 围成了一个目标区域,由于该区域受金属带磨损的限制,把 ABED 围成的区域叫做 SALR。滑移控制的目标,就是控制滑移率工作在 SELR 与 SALR 区域。

图 10 目标滑移区域定义

3 结论

(1) 速比对摩擦因数与滑移率的关系特性影响较大,同一滑移率,速比越小,摩擦因数越大;LOW 模式下摩擦因数随滑移率变化平缓,MID、TOP 与 OD 模式下,摩擦因数在前段区间(0~1.2%)变化大,在后段区间变化平缓。

(2) 夹紧力与主动轮转速对滑移特性的影响可以忽略。

(3) 为了准确区别目标滑移区域,根据区域特征类型,提出了目标滑移区域的定义 SELR 与 SALR。

参考文献

- [1] 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.
- [2] KIM H. Analysis of belt behavior and slip characteristics for a metal V-belt CVT[J]. Mechanism and Machine Theory, 1994, 29(6): 865-876.
- [3] VAN S G, VEENHUIZEN B. An upshift in CVT efficiency[C]//VDI Society for Automotive and Traffic Engineering. Proceeding of Gear In Vehicles'98, June, 1998, VDI Berichte 1393: Friedrichshafen. VDI knowledge IWB GmbH, 1998: 659-671.
- [4] DROGEN M V, LANN M V D. Determination of variator robustness under macro slip conditions for a push belt CVT[C]//Society of Automotive Engineers. SAE World Congress, March 8-11, 2004, Detroit: SAE, 2004: 2004-01-0480.
- [5] ASAYAMA H, KAWAI J, TONOHATA A, et al. Mechanism of metal pushing belt[J]. JSAE Review, 1995, 16(2): 137-143.
- [6] KOBAYASHI D, MABUCHI Y, KATOH Y. A study on the torque capacity of a metal pushing v-belt for CVT's[C]//Society of Automotive Engineers. Transmission and Driveline Systems Symposium, February 23-26, 1998, Detroit: SAE, 1998: 980822.
- [7] BONSEN B, KLAAMSEN T, MEERAKKER K, et al. Analysis of slip in a continuously variable transmission[C]//American Society of Mechanical Engineers. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Dynamic Systems and Control, November 15-21, 2003, Washington DC, USA: ASME, 2003: 995-1000.
- [8] KLAAMSEN T, BONSEN B, MEERAKKER K, et al. Nonlinear stabilization of slip in a continuously variable transmission[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers, International Conference on Control Applications, September 2-4, 2004, Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2004: 338-343.
- [9] SHIMOKAWA Y. Technology development to improve Jatco CVT8 efficiency[C]//Society of Automotive Engineers. SAE World Congress, April 16-18, 2013, Detroit: SAE, 2013: 2013-01-0346.
- [10] SAITO T, MIYAMOTO K. Prediction of CVT transmission efficiency by metal V-belt and pulley behavior with feedback control[C]//Society of Automotive Engineers. SAE World Congress, April 12-15, 2010, Detroit: SAE, 2010: 2010-01-0855.
- [11] MEULEN S V D, JAGER B D, VELDPAUS F, et al. Combining extremum seeking control and tracking control for high-performance CVT operation[J]. Control Engineering Practice, 2014, 29: 86-102.
-
- 作者简介: 张飞铁, 男, 1978 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为汽车动力总成控制。
- E-mail: flyiron@126.com
- 周云山(通信作者), 男, 1957 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为自动变速器、汽车电子。
- E-mail: zys8888@sina.com