DOI: 10.3901/JME.2013.02.116

双圆锥式无级变速器传动性能的试验研究*

李雪原 沈楚敬 苑士华 崔 锦

(北京理工大学车辆传动国家重点实验室 北京 100081)

摘要: 采用试验研究的方法,对双圆锥式无级变速器的传动性能以及影响因素进行研究。设计并制造出双圆锥式无级变速器的试验样机,搭建传动性能测试试验平台,并进行性能试验。试验结果表明,保持传动比、输入转速和液压腔压力不变,系统的传动效率随着输入转矩的增加而增加,最终到达最大值,随后逐渐下降;保持传动比、输入转速和输入转矩不变,系统传动效率随着液压腔压力的降低而增加,但过低的液压腔压力会使系统无法高效传递动力;保持传动比、液压腔压力和输入转矩不变,系统传动效率随着转速的增加而减小;当输入转速、液压腔压力和输入转矩不变,增大系统传动比,将提高系统的传动效率。

关键词: 无级变速器 试验平台 效率 自旋

中图分类号: TH132

Experimental Investigation Into the Performance of Double Conical Continuously Variable Transmission

LI Xueyuan SHEN Chujing YUAN Shihua CUI Jin

(National Key Laboratory of Vehicular Transmission,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: The Performance of double conical continuously variable transmission(CVT) and its effect factors are investigated by experimental method. An experimental device of the CVT is designed and manufactured, a performance test bench of the CVT is established, and the performance experiment of the CVT is carried out. The experiment results show that when the transmission ratio, input speed and the pressure of the hydraulic cavity remain constant, the efficiency of CVT increases with the increasing of the input torque, finally reach the maximum, and decrease later; when the transmission ratio, input torque and the input speed remain constant, the efficiency of CVT increases with the decreasing of the pressure of the hydraulic cavity, but the CVT cannot transmit the power effectively with too low pressure of the hydraulic cavity; When the transmission ratio, input torque and the pressure of the hydraulic cavity remain constant, the efficiency of CVT decreases with the increasing of the input speed; When the input speed, input torque and the pressure of the hydraulic cavity remain constant, the efficiency of CVT increases with the increasing of the transmission ratio.

Key words: Continuously variable transmission Test bench Efficiency Spin

0 前言

目前,无级变速器(Continuously variable transmission, CVT)已经越来越广泛的应用在汽车上^[1-2]。无级变速器作为一种理想的变速器,可根据外部载荷使发动机工作在最佳燃油经济性区域,从而大幅度提高了汽车的燃油经济性,降低了油耗

并减少了排放。因此,无级变速器具有广泛的应用前景^[3-4]。

双圆锥式无级变速器的液压系统可根据需要调节摩擦副间的法向加载力使系统保持在较高的工作效率^[5]。

双圆锥式无级变速器主要核心部件有内圆锥滚轮、外圆锥滚轮、外摩擦轮、内摩擦轮、变速机构和液压机构等。双圆锥式无级变速器主要通过内圆锥滚轮与内摩擦轮、外圆锥滚轮与外摩擦轮之间的牵引油剪切力实现动力传递,这样的功率传递方式,使双圆锥式无级变速器具有特殊的动力传动机

* 国家部委基础科研(A2220060029)和车辆传动国家重点实验室基金(9140C340201113403)资助项目。20120719收到初稿,20121215收到修改稿

理。因此, 本文对双圆锥式无级变速器的传动效率以及不同的输入参数对系统传动效率的影响进行试验研究。

1 CVT 传动原理

双圆锥式无级变速器与目前使用的金属带式无级变速器传动机理不同, 它通过摩擦副中油膜的剪切使牵引油产生牵引力, 从而带动从动件旋转, 进而实现动力传递。如图 1 所示, 内圆锥滚轮与外圆锥滚轮通过动力销进行连接, 外圆锥滚轮套在内圆锥滚轮的中轴上, 内圆锥滚轮与外圆锥滚轮可实现相对的轴线运动, 而且在两者中间设置一个液压腔, 液压系统使液压油通过油道进入液压腔。在液压腔中油压的作用下, 内圆锥滚轮和外圆锥滚轮沿着轴线相对运动, 此时, 内摩擦轮与内圆锥滚轮、外圆锥滚轮与外摩擦轮对其摩擦副上的牵引油进行作用, 从而使牵引油的粘性增大, 牵引系数增加。

图1 双圆锥式无级变速器结构图

动力首先通过内摩擦轮与内圆锥滚轮之间的摩擦副将动力传递到内圆锥滚轮, 其次内圆锥滚轮通过动力销将动力传递到外圆锥滚轮, 动力由外圆锥滚轮与外摩擦轮之间的摩擦副传递给外摩擦轮, 从而实现动力传递。

另外, 变速系统由小支架、内圆锥滚轮、外圆锥滚轮和调速支架组成。变速时, 通过调速支架沿着轴线方向左右移动, 即可改变内圆锥滚轮与内摩擦轮接触的工作半径, 同时, 也改变了外圆锥滚轮与外摩擦轮接触的工作半径, 由于内、外圆锥滚轮的工作半径是连续变化的, 因此, 系统可实现了无级变速。此外, 由于内、外圆锥滚轮的工作半径是

同时变化, 所以系统的结构尺寸将更加紧凑。

在忽略摩擦副打滑情况下, 由图 1 可知双圆锥式无级变速器的传动比为

$$i = \frac{n_{in}}{n_{out}} = \frac{d_2 D_2}{D_1 d_1} \quad (1)$$

式中 n_{in}, n_{out} ——内、外摩擦轮的转速

D_1, D_2 ——内、外摩擦轮的工作直径

d_1, d_2 ——外、内圆锥滚轮的工作直径

在忽略内、外圆锥滚轮的重力的情况下, 受力分析可简化为如图 2 所示, 由于内圆锥轮与中轴的接触为线接触, 而且中轴与内圆锥滚轮都加工的非常光滑, 因此忽略内圆锥滚轮与中轴之间的摩擦。内、外摩擦轮与双圆锥的接触点保持在同一垂直线上以避免内、外法向加载力对中轴产生一力偶。 F_{t1} 为外摩擦轮受到方向垂直于纸面往里的牵引力作用; F_{t2} 为内摩擦轮所受到垂直于纸面往里的牵引力作用。

图2 内、外圆锥滚轮受力分析图

由此可得内、外摩擦副上的牵引力分别为

$$\begin{cases} F_{t2} = F_{\perp} \cdot f_2 \\ F_{t1} = F_{\perp} \cdot f_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, f_1, f_2 分别为外圆锥滚轮与外摩擦轮之间的牵引系数、内圆锥滚轮与内摩擦轮之间的牵引系数; $F_{\perp}$ 为在液压腔压力作用下, 作用在内、外摩擦副上的法向加载力。

所有力对中轴求矩, 可得平衡方程

$$\begin{cases} T_1 = T_2 \\ T_2 = F_{t2} d_2 / 2 \\ T_1 = F_{t1} d_1 / 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, T_2, T_1 分别为内圆锥滚轮和外圆锥滚轮在内、外摩擦力作用下产生的矩。

由此式(2)、(3)可知内、外摩擦副的牵引系数之间关系为

$$f_2 = f_1 d_1 / d_2 \quad (4)$$

结合式(1)可知内、外牵引系数与传动比之间关系为

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{D_2}{iD_1} \quad (5)$$

由系统的结构尺寸可知, $D_1=100\text{ mm}$, $D_2=300\text{ mm}$, 由此可得内、外摩擦副牵引系数与传动比之间关系图3所示。大量的试验和仿真表明, 牵引油的牵引系数存在一极限值^[6-7]。因此, 当法向加载力一定时, 摩擦副产生的牵引力也存在一个极限值, 这也是双圆锥式无级变速器在某一液压腔压力作用下摩擦副所能传递的最大牵引力。

图3 两个摩擦副的比值与传动比的关系

所以, 当 $i < 3$ 时, 即 $f_2 > f_1$, 即系统所能传递的最大转矩由内摩擦副决定, 这意味着随着负载的增加, 内圆锥滚轮与内摩擦轮之间的摩擦副将先于外圆锥滚轮与外摩擦轮之间的摩擦副出现打滑情况; 当 $i > 3$ 时, 即 $f_2 < f_1$, 即系统所能传递的最大转矩由外摩擦副决定, 这意味着外圆锥滚轮与外摩擦轮之间的摩擦副将先于内圆锥滚轮与内摩擦轮之间的摩擦副出现打滑情况。因此, 在试验过程中, 如内、外圆锥出现明显的打滑时, 则表示系统已经达到最大的牵引力, 停止试验。

2 试验结果及分析

双圆锥式无级变速器是一种摩擦传动, 通过控制液压腔中的压力调节摩擦副的法向加载力, 保证系统高效的传递动力。由以上分析可知, 影响无级变速器转矩传递能力的关键因素有传动比、输入转矩、输入转速和液压腔压力等因素。

为了研究传动比、输入转矩、输入转速和液压腔压力对传动效率的影响, 本文以试验作为研究手段, 对双圆锥式无级变速器的上述性能及影响进行了试验研究, 得到的结果为双圆锥式无级变速器在应用和控制方面奠定了基础。

2.1 试验平台组成及试验过程

本文通过自主研发的双圆锥式无级变速器为主要核心部件, 设计了该传动试验装置及液压系统, 该装置及系统与传动试验平台的动力及加载系统一起构建了整个试验测试系统, 如图4所示。

图4 CVT传动试验台布置图

传动试验装置主要由两个变频电动机组成, 两个变频电动机可以实现正、反转, 同时也可作为双圆锥式无级变速器的负载使用。在双圆锥式无级变速器的输入和输出端分别连接一个转速转矩传感器, 可分别采集输入、输出端的转速和转矩。

通过轴向移动调速支架, 在无负载情况下, 调速支架的轴线位移(从左到右)与传动比 i 之间的关系如图5所示, 从图5可以看出, 随着轴线位移的增大, 传动比逐渐减小, 试验值于理论值是由于摩擦副间存在这一定的滑动, 实际输出转速小于理想输出转速, 因此相同的轴向位移下, 实际传动比小于理论传动比。

图5 轴向位移与传动比之间关系

为了对液压腔中的压力进行精确控制, 在液压控制系统中, 采用一个电磁阀对无级变速器液压腔中的液压进行调节。另外, 通过一个比例阀对双圆锥式无级变速器中各个摩擦副进行充分润滑, 使其表面形成全油膜状态, 保证摩擦副产生足够的牵引力。

试验过程中, 以变频电动机2作为输入电动机,

变频电动机 1 作为负载。通过电磁阀控制双圆锥式无级变速器的液压腔压力, 进而控制内、外摩擦副上的法向加载力。保持电动机 2 的输入转速不变, 控制负载电动机 1, 使其保持一定的负载, 记录此时输入端和输出端的转矩、转速和液压腔压力, 每增加一次负载, 记录所有参数, 不断增加负载, 直至输出端的效率出现明显的下降或者内、外圆锥滚子出现较大的滑滚比(高于 3%, 滑滚比是摩擦副表面的滑动速度与卷吸速度之比), 停止加载, 恢复到负载为零状态, 调节液压腔压力, 重新进行试验, 并做记录, 当所有液压腔压力试验结束后, 调节输入转速, 并在输出负载、液压腔压力和传动比不变情况下, 测试输入转速对传动效率的影响。当完成速度测试后, 改变传动比, 并重新按照以上步骤进行试验。

2.2 试验结果分析

如图 6~9 所示, 当液压腔压力、输入转速和传动比不变时, 双圆锥式无级变速器的传动效率随着输入转矩的增加而增加, 但随着输入力矩的增加, 传动效率趋于平缓, 最终达到 85% 左右, 并在一定的输入力矩范围内保持较高的传动效率, 随后, 系统的传动效率快速下降。这是由于摩擦式无级变速器的功率损失主要为滑动功率损失和自旋功率损失, 自旋功率损失与液压腔压力和输入转速关系最为密切, 因此, 当试验中输入转速、传动比和液压腔压力不变情况时, 即自旋功率损失保持不变, 系统的传动效率随着输入转矩的升高而升高。而随着输入转矩的增加, 在同一液压腔压力作用下, 为了产生较大的牵引力, 摩擦副间的滑动率将不断增加, 但牵引系数不可能无限增加, 当牵引系数达到最大值时, 牵引力达到极限最大值, 此后滑滚比的增加将使滑动功率损失快速上升, 系统的传动效率快速下降。

图 6 输入转速为 100 r/min, 传动比为 2.7 时, 传动效率随着输入转矩的变化曲线

图 7 输入转速为 700 r/min, 传动比为 2.7 时, 传动效率随着输入转矩的变化曲线

图 8 输入转速为 100 r/min, 传动比为 3.7, 传动效率随着输入转矩的变化曲线

图 9 输入转速为 700 r/min, 传动比为 3.7, 传动效率随着输入转矩的变化曲线

在相同的输入转速、传动比和输入转矩下, 系统传动效率随着液压腔压力的降低而增加, 这是由于增加液压腔压力将使内、外摩擦副接触区的自旋功率损失增加, 导致系统的功率效率下降。由此可知, 液压腔压力对系统传动效率的影响较大, 液压腔压力过低将使系统无法高效的传递较大的转矩, 而液压腔压力过大, 将因自旋功率损失较大而使系统的传递效率较低, 因此对液压腔压力的合理控制是保证系统高效传递转矩的关键。

3 结 论

(1) 在相同的传动比、输入转速和液压腔压力下, 双圆锥式无级变速器的传动效率随着输入转矩的增加而增加, 最终达到最大传动效率, 继续增大输入转矩将使传动效率快速下降。

(2) 在相同的传动比、输入转速和输入转矩下, 系统传动效率随着液压腔压力的降低而增加, 但过低的液压腔压力也会使系统无法高效传递动力。

(3) 在相同的输入转速、液压腔压力和输入转矩下, 传动比越大, 系统的传动效率越高。

参 考 文 献

- [1] JUNG Y, PARK K F C, PARK Y, et al. Design and analysis of a spherical continuously variable transmission[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2002, 124(3): 21-29.
- [2] ZHEN C H, LIM W S, CHA S W. Performance optimization of CVT for two-wheeled vehicles[J]. *International Journal of Automotive Technology*. 2011, 12(3): 461-468.
- [3] 李华英, 秦大同, ATTIA N A. 牵引式锥盘滚轮 CVT 的研究现状及发展趋势[J]. *重庆大学学报*, 2008, 26(4): 15-19.
- [4] LI Huaying, QIN Datong, ATTIA N A. Current situation and trend of the traction CVT[J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 26(4): 15-19.
- [5] CARTER J, POHL B, RUTTER B, et al. The turbo traction drive CVT[C]// 2004 International Continuously Variable and Hybrid Transmission Congress. San Francisco, 2004: 38-44.
- [6] WEI Chao, SHEN Chujing, YUAN Shihua. Analysis methods of power characteristics for hydraulic pressing of the traction drive device[J]. *Advanced Materials Research*, 2011(301-303): 1458-1463.
- [7] LIM K L. Optimal design of traction drive continuously variable transmission[D]. United States: Oregon State University, 1988.
- [8] LOEWENTHAL S H, Rohn D A. Regression analysis of traction characteristics of two traction fluids[R]. NASA Technical Paper, 1983: 2154.

作者简介: 李雪原, 男, 1976 年出生, 讲师。主要研究方向为车辆传动技术。

E-mail: bitlxy@163.com

沈楚敬(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士研究生。主要研究方向为液压传动技术。

E-mail: shenchujing@126.com