

文章编号:1000-582X(2002)05-0005-05

液力变矩器在机械无级变速传动系统中的应用

曹建国¹, 秦大同¹, 胡建军¹, 龚为伦², 李培军²

(1.重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044; 2.重庆青山工业有限责任公司,重庆 402761)

摘要:无级自动变速传动作为理想的传动方式,能有效地提高车辆的动力性和燃油经济性,减少排放污染,用液力变矩器作为无级自动变速传动系统的起步装置具有良好的起步性能,且控制简单。在液力变矩器性能试验及锁止离合器闭锁动态过程仿真的基础上,根据发动机与液力变矩器的共同工作特性进行了发动机与液力变矩器的匹配评价,提出了液力变矩器闭锁控制规律以及用液力变矩器作起步装置的机械无级变速传动系统的起步控制策略。经汽车起步、加速过程的仿真结果表明,与装备五档手动变速器的汽车相比,装备机械无级变速器的汽车具有良好的起步和加速性能。

关键词:液力变矩器;无级变速;控制策略

中图分类号:TH132.32

文献标识码:A

无级自动变速传动(简称 CVT)作为理想的传动方式一直是人们追求的目标,利用无级自动变速传动的速比连续变化的特性,结合电子控制技术,可以控制发动机在最佳燃油经济线或最佳动力线上运行,从而有效地提高车辆的动力性和燃油经济性,减少排放污染^[1]。起步控制是 CVT 控制系统的三大关键技术之一,目前用作 CVT 起步装置的主要有液力变矩器、湿式离合器和电磁离合器。液力变矩器具有自动适应性、自动增矩变速、减振隔振、无机械磨损等优点,同时由于锁止离合器的采用,使得液力变矩器的传动效率得到提高,减少了散热功耗,因此液力变矩器被公认为是汽车最佳的起步装置。用液力变矩器作起步装置,可明显改善 CVT 车辆的起步性能、低速爬行性能和加速性能,保证在任何道路条件下起步平顺,发动机不熄火,上坡起步不溜坡。带液力变矩器的无级变速器与四档液力机械自动变速器(AT)相比,由于液力变矩器锁止离合器闭锁范围得到扩大以及采用全电子控制速比变化和管路压力,可使汽车燃油经济性提高大约 20%^[2]。

1 发动机与液力变矩器的匹配

液力变矩器是液力传动车辆的一个重要部件,它的性能将直接影响车辆的性能。特别是车辆的牵引性

能和燃油经济性,在很大程度上取决于发动机与液力变矩器的共同工作性能的好坏。在研究发动机和液力变矩器的共同工作特性时,首先必须知道二者各自的特性,然后再对发动机与液力变矩器共同工作特性进行评价,以求获得最佳共同工作性能的发动机与液力变矩器的匹配。

1.1 发动机

利用发动机台架试验数据,采用样条插值的方法拟合出发动机稳态输出转矩与油门开度和发动机转速关系的数值模型以及发动机燃油消耗率与发动机转速和转矩关系的数值模型。根据上述模型,给定发动机节气门开度和转速,可以确定在稳态工况下发动机的输出转矩;给定发动机转速和转矩,可以确定在稳态工况下的发动机燃油消耗率。

1.2 液力变矩器

为了研究装备机械无级自动变速器的汽车的起步控制,利用液力变矩器试验台对无级自动变速器的液力变矩器进行了性能测试。该液力变矩器为三元件带锁止离合器的向心涡轮式液力变矩器,试验得到的原始特性曲线如图 1 所示。

液力变矩器由于其内部流场十分复杂,难以用精确的数学模型来描述,一般采用一维束流理论简化模型,该模型可以表示为:

· 收稿日期:2002-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59835160)

作者简介:曹建国(1972-),男,重庆忠县人,重庆大学硕士研究生,主要从事车辆传动理论及应用领域的研究。

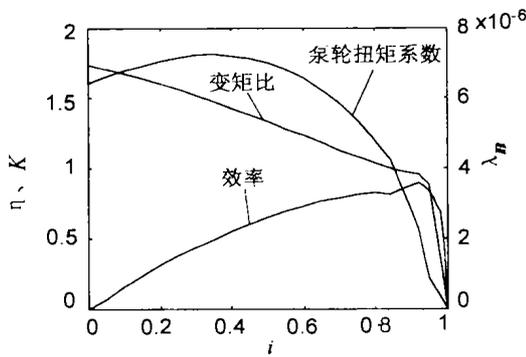


图1 液力变矩器原始特性曲线

$$n_T = in_B$$

$$M_B = \lambda_B \rho g n_B^2 D^5$$

$$M_T = KM_B$$

式中: n_B 、 n_T ——分别为泵轮转速和涡轮转速;

M_B 、 M_T ——分别泵轮转矩涡轮转矩;

D ——液力变矩器有效直径;

ρ ——工作液体的密度;

g ——重力加速度;

i ——液力变矩器的速比;

λ_B ——泵轮扭矩系数;

K ——液力变矩器变矩比。

λ_B 、 K 的值是由液力变矩器原始特性曲线得到的,二者均是变矩器速比的函数。

1.3 发动机与液力变矩器共同工作的评价

与该液力变矩器匹配的可选发动机有 1.0 升的 J1472 发动机和 1.3 升 J1474 发动机,因此有必要对该液力变矩器与这两种发动机的共同工作进行评价,以得到发动机与液力变矩器的最优匹配,使车辆具有良好的动力性和燃油经济性。

有了发动机模型和液力变矩器原始特性曲线,就可以得到发动机和液力变矩器共同工作的输入特性曲线和输出特性曲线(如图 2、图 3 所示)。

发动机与液力变矩器共同工作的输入、输出特性是评价发动机与液力变矩器匹配的重要特性,是车辆牵引计算的基础,应对其作量化的评价^[3]:

常用的评价参数有:

1) 功率输出系数 φ_v : 它表示在一定工作范围内涡轮轴平均输出功率对发动机额定功率的比值,也表示发动机功率的平均利用程度。功率输出系数 φ_v 越大,车辆的动力性能好。

2) 单位消耗量系数 φ_{ge} : 它表示在一定涡轮工作范围内,平均单位燃油消耗量 g_{ep} 与额定工况下单位

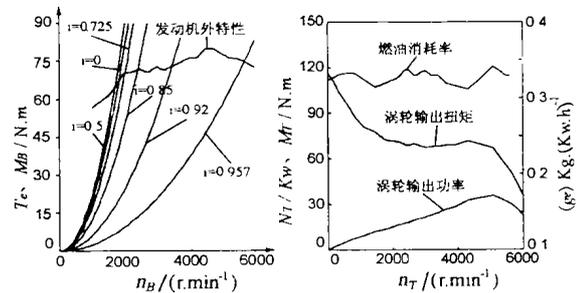


图2 J1472 发动机与液力变矩器的共同输入、输出特性

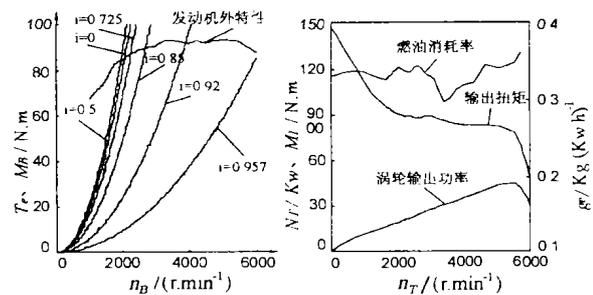


图3 J1474 发动机与液力变矩器的共同输入、输出特性

消耗量 g_v 的比值。单位消耗量系数越小,车辆的经济性越好。

3) 液力变矩器高效工作范围($\eta \geq 0.8$)内涡轮转速工作范围 d_n : d_n 值大,可以使变速箱的排档数目减少。

4) 液力变矩器高效工作范围内涡轮扭矩变化范围 d_M : d_M 值越大,车辆的适应性越好。

5) 起动扭矩 M_{T0} : 它表示车辆起动、加速和克服重负荷的能力。

发动机与液力变矩器匹配的每个指标都反映了发动机与液力变矩器共同工作性能的不同侧面,这些指标往往相互矛盾。选择最佳匹配一般采用综合指标法,即用表示车辆动力性、经济性的综合指标 $\varphi = \varphi_v / \varphi_{ge}$ 来选择最佳匹配, φ 值最大即为最佳。

从 J1472 发动机和 J1474 发动机与液力变矩器共同工作的输入和输出特性曲线来看, J1474 发动机的最大扭矩点和最大功率点都在液力变矩器高效区范围($0.725 \leq i \leq 0.957$)内,低油耗区也在高效区范围内。从量化评价参数(见表 1)也可以明显看出, J1474 发动机与液力变矩器共同工作的性能优于 J1472 发动机与液力变矩器共同工作的性能,因此应选用 J1474 发动机作为该液力变矩器的动力源。

表 1 量化评价参数

评价参数	JL472 发动机	JL474 发动机
φ_{λ}	0.504 7	0.588 7
φ_{μ}	0.991 3	0.914 2
d_n	3.664 2	3.526 6
d_v	1.370	1.479
M_{T0}	116.44 N·m	148.53 N·m
φ	0.5091	0.644 0

2 无级变速传动系统的起步控制策略

用带锁止离合器的液力变矩器作为无级变速传动系统的起步装置的优点是起步快速、平稳,而且控制简单。起步控制实际上就是液力变矩器锁止离合器最佳闭锁点的选择以及闭锁控制规律的确定。

2.1 液力变矩器锁止离合器最佳闭锁点的选择

从理论上讲,闭锁点应设在偶合点 i_{CV} 附近,以保证充分利用液力变矩器自动适应性的长处,又可以减少因闭锁而造成转矩与转速的突变。但闭锁点的选择还应视车辆用途、变矩器结构型式、与发动机的匹配等因素综合确定。对所测试的液力变矩器而言,其最高效率 η 高,相应的转速比 i' 也高,而且 i_{CV} 与 i' 相差不大,故宜取 i_{CV} 点闭锁,以缩小闭锁时的转速差,提高闭锁时车辆的乘坐舒适性。

2.2 液力变矩器的闭锁控制

液力变矩器的闭锁是靠无级变速传动系统的液压系统来完成的。无级变速传动装置的液压系统通常采用电子控制,当汽车达到一定的车速,通过车速传感器将车速转换为电信号输入到 ECU,经过 ECU 计算处理适时输出信号给脉宽调制电磁阀,利用电磁阀来控制油压,使锁止离合器结合。输入到脉宽调制电磁阀的电信号占空比越大,作用在锁止离合器的压力也就越大,锁止离合器结合也越快,反之亦然。液力变矩器闭锁离合器的控制实际上是主从动盘之间的正压力控制,只要合理控制主从动盘之间的正压力,就可以减少闭锁时的转矩扰动,保证良好的闭锁和解锁品质^[4]。

2.3 液力变矩器的闭锁控制规律

液力变矩器锁止离合器的闭锁控制实质上属于换档控制,只不过是液力传动工况和机械传动工况之间的换档问题^[5]。因此,也可以应用自动换档规律来确定液力变矩器的闭锁控制规律。

变矩器的闭锁控制应当满足以下要求:

1) 应使车辆具有良好的闭锁与解锁品质,以使换档平稳,保证车辆具有良好的乘坐舒适性。

2) 尽量减少锁止离合器的闭锁或解锁次数,以延长锁止离合器的寿命。

3) 闭锁和解锁之间应有一定的延迟,以防止或减少换档循环的产生。

由于 CVT 的速比控制采用了模糊控制策略,具有类似于 AT 干预换档的功能,即当油门突然变大(小)时,CVT 自动向低档(高档)变化,因而无级变速传动系统能够很好地反映驾驶员的意图;同时,CVT 具有速比连续变化的特性,在汽车未达到闭锁车速之前,不断改变 CVT 的速比,使液力变矩器的速比保持在最佳闭锁点附近,这样就可减少闭锁时的冲击,确保良好的闭锁品质。因此,液力变矩器的闭锁控制可以选择结构最简单的单参数车速控制,以减少闭锁或解锁次数,有利于提高车辆的乘坐舒适性,延长锁止离合器的寿命。

从车辆的经济性角度来看,由于液力变矩器的效率始终小于 1,因此车辆的闭锁车速越低,整个传动系统的效率越高,经济性越好;从闭锁品质上讲,车速越低,相应的发动机转速也较低,闭锁时的冲击、振动也较低,而且滑磨功也相对较低,有利于延长离合器的寿命。但是,必须保证在闭锁时发动机具有足够大的扭矩来克服阻力,以防止熄火,因此发动机转速不能过低。同时,液力变矩器的速比从 0 变化到最佳闭锁点有一段时间,汽车达到闭锁车速的时间应在液力变矩器达到最佳闭锁点的时间之后,以确保液力变矩器能在最佳闭锁点闭锁,因此闭锁车速也不能太低。

根据以上原则可得变矩器闭锁控制规律:闭锁车速为 20 km/h,解锁车速为 15 km/h(见图 4)。

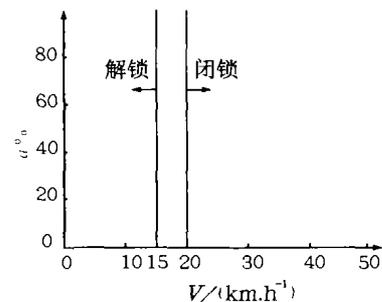


图 4 液力变矩器闭锁控制规律

3 汽车起步仿真和性能比较

以装备了机械无级自动变速传动系统的汽车为研究对象,按照集中质量法将沿直线行驶的汽车起步时液力变矩器锁止离合器结合过程的模型简化为四阶弹簧质量模型^[6](图 5)。

该模型作了以下假设:

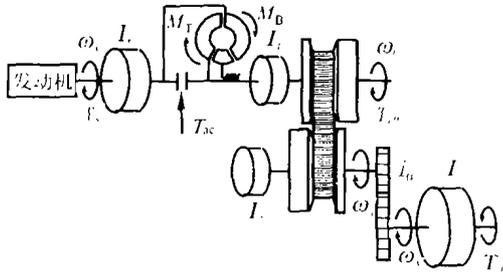


图 5 变矩器锁止离合器结合过程简化模型示意图

1) 不考虑油门瞬态变化时发动机输出转矩的动态响应过程;

2) 不考虑汽车及传动系统的扭转刚度和粘性阻尼;

3) 不考虑无级自动变速系统液压执行机构的动力学特性影响, CVT 速比和速比变化率之间只用一个简单的积分关系来描述; 忽略了锁止离合器的充放油特性对闭锁和解锁过程的影响。

描述锁止离合器闭锁动态过程的方程如下:

$$I_e \dot{\omega}_e = T_e - M_B - T_m \quad (1)$$

$$I_t \dot{\omega}_t + C_t \omega_t = T_m + M_T - T_m \quad (2)$$

$$I_s \dot{\omega}_s = T_m i_{cvt} \eta - T_0 / i_0 \quad (3)$$

$$I_v \dot{\omega}_v = T_0 - b_v \omega_v^2 - T_d \quad (4)$$

$$i_{cvt} = \omega_t / \omega_s \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_t = \dot{\omega}_s i_{cvt} + \omega_s di/dt \quad (6)$$

$$\omega_s = i_0 \omega_v \quad (7)$$

式中: T_e ——发动机输出转矩;

ω_e ——发动机角速度;

I_e ——发动机飞轮和变矩器泵轮的惯量;

ω_t ——涡轮角速度;

I_t ——变矩器涡轮和 CVT 主动带轮的惯量;

C_t ——锁止离合器的结构阻尼系数;

T_m ——锁止离合器传递的转矩;

T_m ——主动带轮输入转矩;

ω_s ——从动带轮角速度;

I_s ——CVT 从动带轮和主减速器的惯量;

i_{cvt} ——CVT 传动比;

i_0 ——主减速器的速比;

ω_v ——车轮的角速度;

I_v ——车体和轮胎的等效惯量;

b_v ——汽车等效风阻系数;

di/dt ——CVT 速比变化率;

η ——CVT 传动效率;

T_0 ——汽车驱动轴上的输出转矩;

T_d ——汽车阻力, 包括滚动阻力、坡度阻力整个动态系统用状态方程的形式描述为:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X, U) \\ Y = g(X, U) \end{cases} \quad (8)$$

式中系统的输入变量、状态变量、输出变量分别为:

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T = [T_e \quad T_m \quad di/dt]^T \quad (9)$$

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [\omega_e \quad i_{cvt} \quad \omega_t \quad \omega_v]^T \quad (10)$$

$$Y = [y_1 \quad y_2]^T = [\omega_e \quad \omega_v]^T = [x_1 \quad x_4]^T \quad (11)$$

系统的状态方程为:

$$\dot{x}_1 = (u_1 - u_2 - cx_1^2)/I_e$$

$$\dot{x}_2 = di/dt = u_3$$

$$\dot{x}_3 = \frac{i_0(I_v + i_0^2 I_s)x_4 u_3 - i_0 x_2 (b_v x_4^2 + T_d)}{I_v + i_0^2 I_s + i_0^2 \eta I_t x_2^2} +$$

$$\frac{(u_2 + Kcx_1^2 - C_t x_3)x_2^2 i_0^2 \eta}{I_v + i_0^2 I_s + i_0^2 \eta I_t x_2^2}$$

$$\dot{x}_4 = \frac{(u_2 + Kcx_1^2 - C_t x_3 - I_t i_0 x_4 u_3) i_0 \eta x_2 - b_v x_4^2 - T_d}{I_v + i_0^2 I_s + i_0^2 \eta I_t x_2^2}$$

其中: $c = \pi^2 \lambda_B \rho g D^5 / 900$

由状态方程可以看到, 系统是具有 3 个输入和 2 个输出的非线性的耦合系统。

机械无级自动变速器的速比变化范围为 0.442 ~ 2.432, 其主减速器的传动比为 5.246 6; 五档手动变速器(简称 MT) 的主要参数见表 2, 其主减速器的传动比为 4.38。

表 2 五档手动变速器(MT) 的主要参数

档位	1 档	2 档	3 档	4 档	5 档
MT	3.416	1.894	1.28	0.914	0.757

装备 CVT 的汽车和装备 MT 的汽车均采用 JL474 发动机作为动力源, 二者以 100% 的油门起步, 通过计算机仿真, 汽车的加速性能如图 6 所示, 汽车原地起步加速至 100 km/h, 装备 CVT 的汽车用了 19.73 s, 而装备 MT 的汽车用了 23.27 s, 前者的加速性能明显好于后者。从图 6 可以看出, 装备 MT 的汽车在换档过程中由于变速器输出扭矩和转速的突变导致加速度的突变而产生冲击, 影响了车辆的舒适性, 同时也影响了车辆的动力性, 而装备 CVT 的汽车在加速过程中速比连续变化, 加速平稳, 无换档冲击。

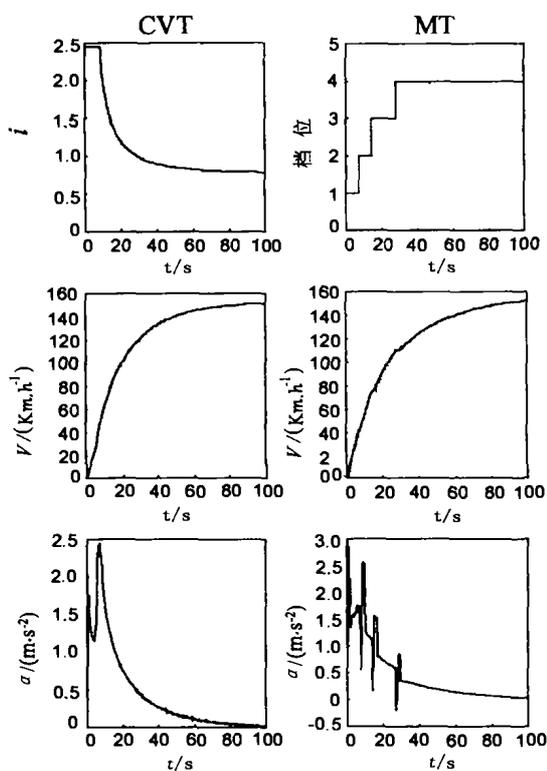


图 6 100% 油门起步加速过程的对比

4 结 论

1) 装备机械无级自动变速器的汽车, 由于速比连续变化及变矩器闭锁范围的扩大, 其动力性和燃油经

济性均好于装备液力机械自动变速器的汽车。用液力变矩器作为无级自动变速传动系统的起步装置具有良好的起步性能, 且控制简单。

2) 装备了带有液力变矩器的机械无级自动变速器的汽车起步控制实际上就是液力变矩器锁止离合器的最佳闭锁点的选择以及闭锁控制规律的确定。锁止离合器的最佳闭锁点选取在偶合点, 以提高闭锁时的乘坐舒适性。液力变矩器闭锁控制规律采用单参数控制规律闭锁车速为 20 km/h, 闭锁车速为 15 km/h。

3) 建立了锁止离合器闭锁、解锁动态过程的动力学模型, 该系统是具有非线性特性的耦合系统。从计算机仿真结果可知, 无级变速汽车的加速性能明显好于装备 MT 的汽车, 而且加速平稳, 无换挡冲击。

参考文献:

- [1] 王红岩, 秦大同, 周云山, 等. 汽车无级变速传动综合控制的研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(2): 38 - 41.
- [2] KEIJU A. Development of a Metal Belt - Drive CVT Incorporating a Torque Converter for Use with 2 - Liter Class Engines[J]. SAE Paper, 1998, (8): 1 241 - 1 248.
- [3] 朱经昌. 液力变矩器的设计与计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [4] 潘旭峰. 现代汽车电子技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [5] 葛安林. 车辆自动变速理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [6] 王红岩, 秦大同, 周云山, 等. 无级变速汽车速度巡航模糊控制器的研究[J]. 汽车工程, 2000, 22(4): 230 - 235.

Application of Hydraulic Torque Converter Incorporated in Mechanical Continuously Variable Transmission

CAO Jian - guo¹, QIN Da - tong¹, HU Jian - jun¹, GONG wei - lun², LI pei - jun²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University,

Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Qingshan Industry Co., Ltd, Chongqing 402761, China)

Abstract: Continuously Variable Transmission which is the ideal transmission for automobile can improve dynamical and economical performance and reduce pollution emission effectively. Vehicle equipped with CVT where hydraulic torque converter is acted as start clutch have better acceleration performance and its starting control is very simple. Based on performance test of hydraulic torque converter and simulation on lock - up dynamic process of torque converter clutch, matching characteristic between engine and torque converter is evaluated, and the lock - up control rule of torque converter clutch and the control strategy of standing start of vehicle equipped with Continuously Variable Transmission with torque converter is proposed. By computer simulation on start process, vehicle equipped with CVT have better acceleration performance than equipped with five - speed MT.

Key words: hydraulic torque converter ; continuously variable transmission; control strategy

(责任编辑 成孝义)