

文章编号:1000-582X(2009)11-1241-05

回流式无级变速传动系统起步控制特性分析

孙冬野, 庄建兵

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要:在充分阐述回流式无级自动变速传动系统起步工作机理和各关键部件工作特性的基础上,建立了该传动系统的动力学仿真模型,制定出离合器自动接合的恒转速起步控制策略,并通过系统仿真分析对所制定的控制策略加以检验。结果表明:起步离合器从动盘存在转速快速提升的特性,在同等起步时间条件下,离合器起步滑摩功低于 3 kJ,仅相当于传统车辆起步时产生的滑摩功的 1/3。

关键词:汽车;无级变速传动;离合器;控制策略

中图分类号: TH132

文献标志码: A

Analysis on starting characteristic of continuously variable transmission system with reflux power

SUN Dong-ye, ZHUANG Jian-bing

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Considering on the characteristics of the transmission system and some key units of continuously variable transmission system with reflux power, a dynamic simulation model and a control strategy are established. The design method of the new continuously variable transmission system is verified by simulation. The simulation result on this continuously variable transmission system shows that the rotating speed of the driven plate can rise up rapidly during starting clutch engagement, and the sliding friction power is lower than 3 kJ which is nearly equal to one-third of the friction power of the traditional vehicle.

Key words: vehicle; continuously variable transmission; clutch; control strategy

回流式无级变速系统是一种具有大速比变化范围的新型车辆动力传动系统,可广泛应用于普通轿车和混合动力轿车。Gomez 等^[1-2]分析表明:与目前车辆普遍采用的、以液力变矩器为起步装置的金属带无级变速系统相比,回流式无级变速系统具有传动效率高、速比变化范围宽及燃油经济性好等特点。与传统车辆的起步离合器布置不同,主离合器并非位于发动机与变速器输入轴之间,而是介于金属带主动带轮与定速比齿轮之间,其主动盘转速虽然与

发动机转速相同,但传递的功率不仅包括发动机输出功率,还包括因行星排功率分流,经太阳轮和金属带传递的回流调速功率。不仅如此,由于行星排、单向离合器本身工作特性,以及整个系统具有金属带无级调速装置和定速比齿轮 2 个动力传动途径的特点^[3],在车辆克服滚动阻力起动前,起步离合器从动盘的转速并不为零。为此,回流式无级变速系统起步控制策略的确定将与传统车辆起步出现明显的不同。

收稿日期:2009-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475066);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2007BB0112)

作者简介:孙冬野(1966-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事车辆动力传动与控制研究,(Tel)023-65103566;
(E-mail)dysun@cqu.edu.cn。

1 起步工作机理

回流式无级自动变速传动系统主要是由金属带调速装置、定速比齿轮(2对)、行星排、制动器 B 以及 3 个双向离合器(L₁、L₂、L₃)、1 个单向离合器 L₄ 组成,其结构如图 1 所示。

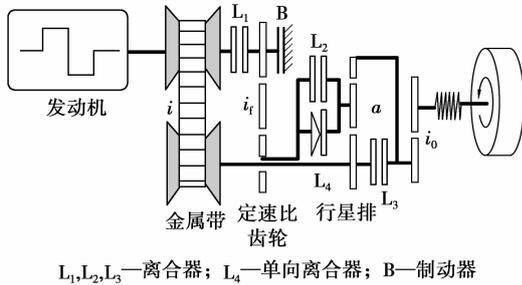


图 1 回流式无级变速汽车传动系统结构简图

车辆起步开始前,发动机处于怠速工况,离合器 L₁、L₂ 和 L₃ 均处于分离状态。离合器 L₁ 作为起步离合器,其主动盘经金属带主动带轮与发动机输出轴固联,主动盘转速与发动机转速 n_e 相等;因汽车处于静止状态,行星排齿圈的转速 n_q 为零;经金属带和行星排传递,单向离合器 L₄ 从动盘转速,即行星架转速 $n_j = n_e / (i \cdot (1+a))$ 。其中, i 为金属带速比; a 为行星排结构参数。因离合器 L₂ 处于分离状态,以及单向离合器单向传递动力的工作特点,离合器 L₁ 从动盘转速 n_c 为零。

起步开始后,起步离合器 L₁ 在消除空行程后开始传递扭矩。因单向离合器 L₄ 不能反向传递扭矩,在单向离合器 L₄ 主动盘转速超过从动盘转速之前,车辆的滚动阻力矩将不会反作用于离合器 L₁ 的从动盘,离合器 L₁ 从动盘的转速将快速增长。此期间,行星排齿圈处的驱动力矩为零。

当单向离合器 L₄ 主动盘转速超过从动盘转速后,发动机驱动力矩将经过单向离合器 L₄ 施加于行星排齿圈,并随起步离合器 L₁ 接合量的增加而增大,直到超过半接合点^[4-5],车辆开始运动。

此时,发动机的动力将经金属带主动带轮、离合器 L₁ 主动盘、L₁ 从动盘、定速比齿轮副、单向离合器 L₄、行星架、行星轮、齿圈,并经主减速器传至差速器输出至车轮,以驱动汽车行驶。同时,部分发动机功率(为发动机功率的 $1/(1+a)$)因行星排功率分流,经行星轮、太阳轮、金属带从动轮、金属带,传递回金属带主动轮,形成回流功率。

虽然整个传动系统存在回流功率,但因发动机功率主要是通过高效率的齿轮传递,仅有小部分用于调

速的回流功率经过相对较低效率的金属带传递回输入轴,因此,回流式无级自动变速传动系统的传动效率比普通金属带无级变速器的传动效率还要高^[6-7]。

为保证车辆在下坡行驶时能满足所要求的发动机反拖制动功能,当离合器 L₁ 完全结合后,再结合离合器 L₂,以保证传动系统功率的正、反双向传递。

正是由于离合器 L₁ 从动盘的转速快速上升过程的出现,致使回流式无级自动变速传动系统起步优势特性的形成。它使主离合器 L₁ 在起步过程中,主、从动盘转速差小于传统的主离合器传动装置,从而使装备回流式无级自动变速传动系统的车辆在起步时,起步时间更短、滑摩功更低。

2 数学模型的建立

当离合器 L₁ 消除空行程开始传递扭矩,单向离合器 L₄ 主动盘转速还未超过从动盘转速时,离合器结合过程的状态方程

$$I_1 \frac{2\pi \cdot \dot{n}_c}{60} = M_e - M_c, \quad (1)$$

$$I_2 \frac{2\pi \cdot \dot{n}_c}{60} = M_c, \quad (2)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为变速器输入端和离合器 L₁ 从动盘的等效转动惯量; M_e 、 M_c 分别为发动机输出转矩和离合器 L₁ 结合控制转矩, $M_c = k_c x r_c$, k_c 、 x 、 r_c 分别为离合器 L₁ 弹簧刚度、接合位移和摩擦盘有效工作半径。

当单向离合器 L₄ 主动盘转速超过从动盘转速,起步离合器 L₁ 所传递的扭矩超过半接合点后,变速系统将处于回流传动工况,传动系统功率的传递主要是通过定速比齿轮和行星排的齿圈,并由金属带无级变速装置的功率循环实现无级调速。离合器结合过程的状态方程

$$I_1 \frac{2\pi \cdot \dot{n}_c}{60} = (M_e + M_h) - M_c, \quad (3)$$

$$I_v \frac{2\pi \cdot \dot{n}_v}{60} = \frac{M_q}{i_o} - \sum M_f, \quad (4)$$

其中: $M_h = M_i i \eta$; $M_c = k_c x r_c = M_j i_f$;

$$M_q = \frac{a}{(1+a)} M_j; M_j = (1+a) M_i n_j = i_f n_c;$$

$$n_i = i n_e; n_q = \frac{(1+a) n_c i_f - n_e i}{a} = \frac{n_v}{i_o}。$$

式中: I_v 为车辆的等效转动惯量; n_j 、 n_i 、 n_q 分别为行星排行星架、太阳轮和齿圈的转速; n_v 为输出轴转速; i_o 、 i_f 分别为主减速比和定速比齿轮速比; M_i 、 M_j 、 M_q 分别为行星排太阳轮、行星架和齿圈的转

矩; M_h 、 M_f 分别为金属带回流调速转矩和车辆外界综合阻力矩; η 为金属带传动效率。

将公式(3)、(4)合并得

$$\left. \begin{aligned} \dot{n}_e &= \frac{60}{2\pi \cdot I_1} \left[M_e - k_c x r_c \left(1 - \frac{i\eta}{(1+a) \cdot i_f} \right) \right], \\ \dot{n}_v &= \frac{60}{2\pi \cdot I_v} \left[\frac{a k_c x r_c}{i_f i_o (1+a)} - \sum M_f \right], \\ n_c &= \frac{a n_v + \dot{i}_o n_e}{i_f i_o (1+a)}. \end{aligned} \right\} (5)$$

分析计算过程需要注意的是公式(5)中传动效率 η 是金属带速比和金属带所分传递的扭矩 M_h 的函数,而不能直接用整个变速传动系统的输入扭矩和速比进行求取。由于分传递的扭矩 M_h 与金属带传动效率 η 之间存在耦合关系,需要通过迭代才能求取整个传动系统效率 η [6]。

3 控制策略的制定

离合器自动结合将遵循发动机恒转速控制原则 [8-9]; 对采用电子节气门控制发动机的车辆,为充分反映驾驶员操纵意图,以油门踏板开度为控制依据,对某一油门踏板开度下,发动机输出扭矩最大时的发动机转速为控制目标,保证在整个起步过程中,车辆的发动机尽可能在该油门踏板开度条件下,输出扭矩最大时的转速下恒定运行。

回流式无级自动变速系统离合器起步的工作模式和普通离合器有较大的不同,总体可划分为 5 个阶段 [10]:

1) 快速充油阶段。即克服离合器空行程,这一阶段应快速充油,以缩短起步时间。单向离合器 L_4 的从动盘开始转动。

2) 从动盘转速提升阶段。即将单向离合器 L_4 主动盘转速提升至行星架转速。单向离合器 L_4 开始向车轮输出驱动力矩,当摩擦力矩还未超过阻力矩,此时车辆仍处于静止状态。所以这一阶段油压变化率仍处于较大水平上。

3) 车辆起步阶段。即离合器结合达到半接合点,车辆开始起动。这一阶段对车辆的起步性能有重要影响,应精确控制离合器的油压变化率,确保车体冲击度和起步时间的要求。根据油门开度和节气门变化率来确定其油压变化率。

4) 发动机恒转速控制阶段。维持发动机恒转速工作。这一阶段主要根据发动机转速变化进行油压控制,若发动机转速降低,则暂停离合器油压增长,控制油门变化维持转速恒定;若发动机转速升高,则继续增加油压,通过增大发动机阻力矩来保持发动机转速恒定。

5) 加速接合阶段。离合器同步后,应尽快提升油压,以实现离合器完全结合。

与传统电控机械自动变速系统离合器起步结合控制相比,其差距主要在于第 2 阶段。由于金属带与发动机固连,单向离合器 L_4 的从动盘将会因发动机 → 金属带主动轮 → 金属带从动轮 → 太阳轮 → 行星架这一传递路径而在结合控制开始前具有某一初始速度,从而导致在离合器 L_4 消除空行程后会出现车辆不动,而从动盘转速快速增长的特殊现象出现。

4 控制结果分析

在保证相同动力性能的前提下,以羚羊轿车 SC7101 为原型车,开展回流式无级自动变速车辆的设计。其采用的发动机为 JL472Q1。发动机试验特性曲线如图 2 所示。

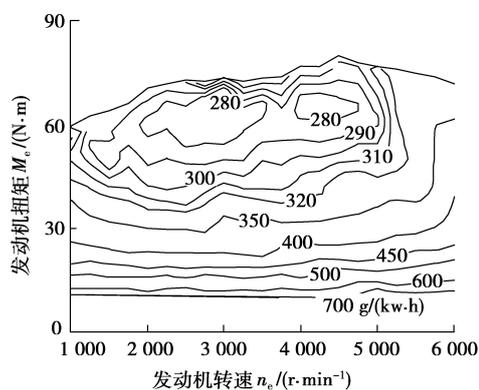


图 2 发动机万有特性图

发动机在起动过程中所受到的阻力主要包括:气缸压缩阻力、活塞环的摩擦阻力、活塞裙部的摩擦阻力、气门机构摩擦阻力、活塞组往复运动惯性力以及附属部件的运行阻力 [11]。发动机起动阻力特性如图 3 所示。

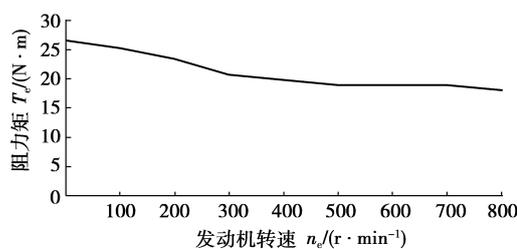


图 3 发动机起动阻力特性

所设计的回流式无级自动变速器结构参数:行星排结构参数 $a=2.517$; 定速比齿轮传动速比 $i_f=2.470$; 变速器最大传动比 $i_{\max}=3.560$; 变速器最小传动比 $i_{\min}=0.498$; 主减速器速比 $i_0=4.990$ 。

不同节气门开度(分别为 10%、20%、40%)回

流式无级变速系统起步仿真结果如图 4-6 所示。

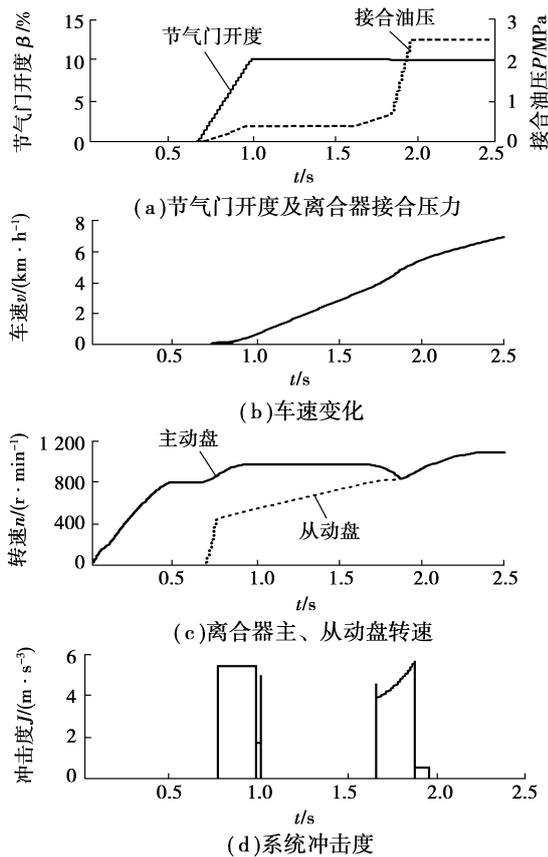


图 4 节气门开度为 10% 的起步控制仿真结果

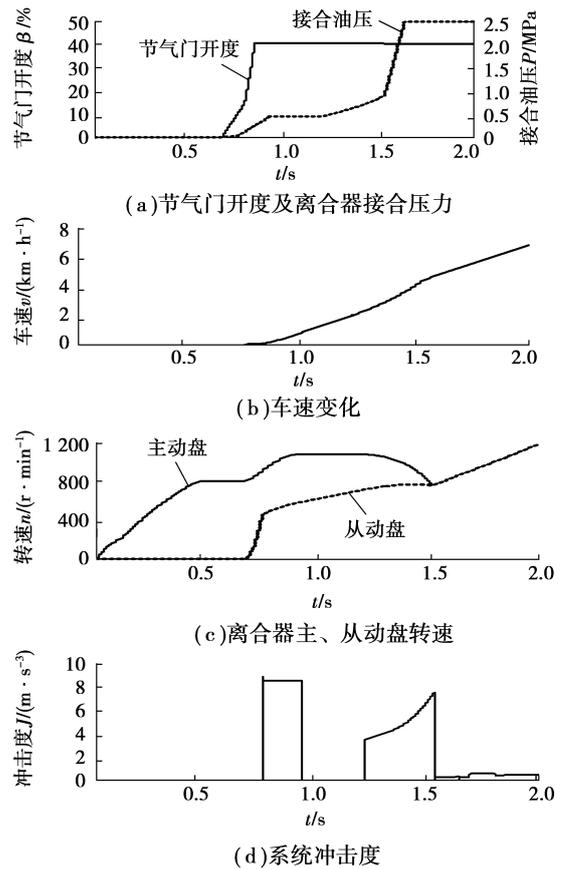


图 6 节气门开度为 40% 的起步控制仿真结果

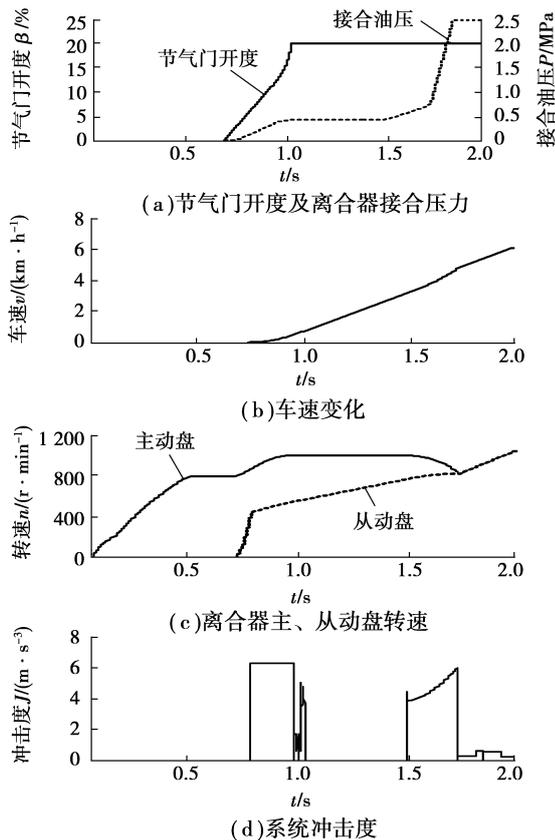


图 5 节气门开度为 20% 的起步控制仿真结果

由仿真结果可以看出,回流式无级变速系统起步过程的最大特点在于:从动盘转速会在离合器 L_1 消除空行程后至半接合点之间存在一个急速上升的过程。这是由回流式无级变速系统本身的结构特点所决定的:由于输入轴、金属带、太阳轮及行星架之间是固定连接的,在离合器 L_1 消除空行程过程中,单向离合器 L_1 从动盘会有一个与输入轴成一定比例的转速;同时,又因单向离合器单向传递的特殊性,此时离合器 L_1 从动盘的转速为零。由于行星排排齿圈处转矩为零,小于车辆的附着力矩,所以在此过程中,车辆保持静止状态。因此,当离合器 L_1 主/从动盘接触后,离合器 L_1 从动盘就会出现一个急速增长的现象。

这个特殊现象的出现,给回流式无级变速系统的起步带来直接好处:在起步过程中,起步离合器 L_1 主、从动盘转速差小,与传统的电控机械自动变速器相比,滑摩功大幅度降低,从而减少了离合器的磨损,提高了离合器的使用寿命^[12];同时,在保证相同最大结合冲击度的前提下,离合器从半结合点到主/从动盘同步的滑摩时间也较电控机械自动变速器减少。仿真数据结果如表 2 所示。

表 2 回流式无级自动变速器起步控制仿真结果

节气门开度 /%	滑摩时间 /s	最大冲击度 /($m \cdot s^{-3}$)	滑摩功 /kJ
10	1.21	5.68	2.783
20	1.07	6.33	2.865
40	0.86	8.90	2.902

5 结 论

1)作为一种新型车辆变速传动系统,回流式无级自动变速器具有起步离合器从动盘急速增长的特性。与传统的电控机械自动变速器相比,新系统起步时间更短、滑摩功更小,具有更好的起步控制品质。

2)所制定的控制策略可以使起步控制结果符合驾驶员的起步意图。滑摩时间随节气门开度的增大而递减,冲击度则随节气门开度的增大而递增,但都处于设计标准所允许的范围内(小于 $10 m/s^3$)。

3)回流式无级自动变速器在各油门开度下的起步滑摩功均低于 3 kJ,小于普通离合器起步时产生的滑摩功(10 kJ 以上)。

参考文献:

- [1] GOMEZ M M, MUCINO V H, CLARK N N, et al. A configuration for a continuously variable power-split transmission in hybrid-electric vehicle application [C/OL]//2004 SAE World Congress, Detroit, USA, March, 2004 [2009-03-12]. <http://www.sae.org/technical/papers/2004-01-0571>.
- [2] PATEL D, ELY J, OVERSON M. CVT drive research study[C]//2005 SAE World Congress, April 11-14, Detroit, MI, USA. [S. l.]: Society of Automotive Engineering Inc, 2005: 131-138.
- [3] HOHN B R, PFLAUM H, TOMIC D. Fuel consumption and energy balance of optimized CVT-hybrid-driveline[C/OL]//Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, Canada, Toronto, October 16, 2006 [2009-05-20]. <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-3259>.
- [4] CARL B, IVANTYSNOYA M, WILLAMS K. Comparison of operational characteristics in power split continuously variable transmissions [C/OL] // Commercial Engineering Congress and Exhibition, Chicago, USA, November 5-10, 2006 [2009-04-18]. http://d.wanfangdata.com.cn/NSTLHY_NSTL_HY16124250.aspx.
- [5] ZHAO Y S, CHEN L P, ZHANG Y Q. Enhanced fuzzy sliding mode controller for automated clutch of AMT vehicle [C/OL] // 2006 SAE World Congress, Detroit, USA. April 3-6, 2006 [2009-04-06]. <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-1488>.
- [6] 孙冬野,秦大同,廖建. 金属带-行星齿轮无级变速传动效率特性分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 12-15. SUN DONG-YE, QIN DA-TONG, LIAO JIAN. Analysis on efficiency characteristics of a metal pushing belt-planetary gear continuously variable transmission system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 12-15.
- [7] GOMEZ M, LEVESLEY M C, CROLLA D A. Integrated powertrain control of gearshifts on twin clutch transmissions [C/OL] // 2004 SAE World Congress, Detroit, USA, March 8-11, 2004 [2009-03-10]. <http://www.sae.org/technical/papers/2004-01-0571>.
- [8] 雷雨龙. 提高电控机械式自动变速器性能的研究[D]. 长春: 吉林工业大学, 1998.
- [9] NESBITT R, MUEHLFELD C, PANDIT S. Powersplit hybrid electric vehicle control with electronic throttle control (ETC) [C/OL] // 2003 SAE World Congress, Detroit USA, March 3-6, 2003 [2009-05-11]. <http://www.sae.org/technical/papers/2003-01-3280>.
- [10] 孙冬野,秦大同,汪新国. 无级变速传动系统速比变化率的设计方法[J]. 汽车工程, 2006, 28(10): 910-913. SUN DONG-YE, QIN DA-TONG, WANG XIN-GUO. Design method of ratio changing rate of continuously variable transmission system [J]. Automotive Engineering, 2006, 28(10): 910-913.
- [11] 李红朋,秦大同,杨阳,等. 汽车发动机起动过程的动力学仿真[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2005, 28(6): 4-8. LI HONG-PENG, QIN DA-TONG, YANG YANG, et al. Dynamics simulation of ISG-HEV engine during starting [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(6): 4-8.
- [12] TSENG C H, HSIEH M F. Analysis and optimization of clutch actuator on automated manual transmission system [C/OL] // 2005 SAE World Congress, Detroit, USA, April 11-14, 2005 [2009-04-16]. <http://www.sae.org/technical/papers/2005-01-1782>.

(编辑 张 芊)