

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.047

液压机械无级变速器动力连续换段过程建模与仿真

郭占正 徐立友 孙冬梅 张 帅

(河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003)

摘要: 液压机械无级变速器(HMCVT)通过换段机构的结合与分离时序切换,结合液压传动系统的速度调节,实现段间切换。传统的段间切换方法短间隔或交叉,容易造成动力中断,影响换段品质。基于某重型货车装备的HMCVT,本文采用换段机构短时重叠结合的方法实现了动力连续换段,对动力连续换段过程的动力学特性进行了理论分析,建立了HMCVT动力连续换段过程的数学模型和仿真模型,对HMCVT动力连续换段过程进行了仿真与分析,并在试验台上对理论研究和仿真结果进行了验证。研究表明,在适当排量比调节范围内,换段机构段间重叠结合可实现动力连续换段;将动力连续换段过程阶段划分为同步调速、重叠结合、动力切换和快速分离等4个阶段,在动力切换阶段,HMCVT的传动比为常值,由分汇流机构参数和机械变速机构参数决定,与液压调速系统参数及负载无关;在理论换段点动力连续换段时,系统输出转速基本没有波动;在理论换段点前后进行动力连续换段时,系统输出转速波动较大,产生较大换段冲击,偏离理论换段点越多,波动幅度和换段冲击越大;均实现了动力传递连续无中断。

关键词: 液压机械无级传动; 动力连续换段; 建模; 仿真

中图分类号: TP271.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)08-0435-08

OSID:



Modeling and Simulation of Continuous Power Shift Process of Hydro-mechanical Continuously Variable Transmission

GUO Zhanzheng XU Liyou SUN Dongmei ZHANG Shuai

(School of Vehicle and Transportation Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Through the state switch of shifting mechanism and combined with speed regulation of hydraulic transmission system, the shift of hydro-mechanical transmission continuously variable transmission (HMCVT) was realized. The traditional method of shift was short intervals or cross, which would easily lead to power interruption and affected the quality. Based on the HMCVT of a heavy truck, the method of short overlap combination between segments was used to achieve continuous power shift. The dynamic analysis of the process of continuous power shift was studied in theory. The mathematical and simulation models of the process of continuous power shift were built. The process of continuous power shift were analyzed by simulation. The result of theoretical research and simulation were verified on the test bench. The research results showed that within the appropriate range of displacement ratio, the short overlap combination between the segments of the shifting mechanism can realize the continuous shifting of power. The power continuous switching process was divided into four stages: synchronous speed regulation, overlapping combination, power switching and rapid separation; in the power switching stage, the transmission ratio of the HMCVT was constant, which was determined by the parameters of the sub-convergence mechanism and the mechanical transmission mechanism, and it had nothing to do with the parameters of the hydraulic transmission system and the load; at the theoretical shift displacement ratio, the output speed of the HMCVT basically did not fluctuate; before or after the theoretical shift

收稿日期: 2022-02-10 修回日期: 2022-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375145)、河南省高等学校重点科研项目(16A460016)和拖拉机动力系统国家重点实验室开放项目(SKT2016014、SKT202100X)

作者简介: 郭占正(1974—),男,讲师,博士,主要从事车辆传动理论与智能控制技术研究,E-mail: guozhanzheng@126.com

通信作者: 徐立友(1974—),男,教授,博士,主要从事车辆传动理论与智能控制技术研究,E-mail: xlyou@haust.edu.cn

displacement ratio, the output speed of the HMCVT fluctuated greatly, resulting in a large shifting impact, the more the deviation from the theoretical switching point was, the greater the fluctuation range and switching impact were; in all three cases, the system power was continuously transmitted without interruption.

Key words: hydro-mechanical continuously variable transmission; continuous power shift; modeling; simulation

0 引言

液压机械无级变速器(HMCVT)由液压调速机构和机械变速机构及分、汇流机构组成,液压调速机构和机械变速机构并联传动,分汇流机构调节机械路和液压路的功率分配,通过液压传动与机械传动相结合实现无级变速,综合了液压传动和机械传动的优良特性,实现了高效率传动,已成为大功率无级传动的主要发展方向之一。由于HMCVT的优良性能,液压机械无级传动系统在大功率车辆上的应用前景广阔^[1]。德国RENK公司研制的四段式HMCVT已应用于Audi100汽车,使用效果良好^[1]。美国M2和M3战车、日本10式主战坦克等装备了HMCVT^[2-3]。德国ZF与Fendt公司各自生产的HMCVT,已装备于Deuta-Fahr、JCB和Steyr等公司的拖拉机上^[4-5]。美国Caterpillar、日本Komatsu等也在其产品中应用了HMCVT^[6-8]。

美国威廉康星大学和普渡大学在HMCVT的建模、仿真和特性分析等方面进行了深入研究^[9-11]。文献[12-14]对HMCVT在大功率拖拉机上的应用进行了大量研究。文献[1,15-16]针对军车用HMCVT提出了相对完整的设计方法。文献[17-22]针对东方红1302R型拖拉机设计了HMCVT,并进行了特性分析和换段规律研究。文献[23-24]进行了拖拉机HMCVT特性分析和速比跟踪控制等研究。唐新星等^[25]也提出了适用于工程机械的HMCVT传动方案,丰富了HMCVT的方案构型。

受结构和传动效率限制,HMCVT单一工作段的调速范围有限,难以满足车辆使用要求。通过换段机构的结合与分离时序切换,结合液压调速机构的速度调节,使相邻工作段之间相互衔接,将调速范围扩大,构成多段连续的无级传动。国内学者在HMCVT的设计匹配、特性分析、段内速比跟踪控制等方面取得了诸多研究成果。但HMCVT的动态换段性能不佳和成本高昂限制了HMCVT在国内的工程应用。胡纪滨等^[26]研究了HMCVT的换段机构结合重叠的可行性,为提高换段品质开拓了新思路,但换段时仍存在动力不连续和换段品质不高的问题。魏超等^[27-28]分析了HMCVT换段品质的影响

因素,提出了段内速比跟踪控制方法能使发动机工作在期望区域。苑士华等^[29-30]指出HMCVT换段时存在转速波动、压力冲击、动力中断等问题。杨树军等^[31]提出了改良换段品质的方法,换段品质有所改善,但依然存在压力冲击等问题。

本文以两段式HMCVT为研究对象,采用段间切换短时重叠结合换段机构的方法实现动力连续换段,通过对HMCVT动力连续换段过程理论推导与建模仿真分析相结合对动力连续换段的工作机理进行研究,并在试验台上对理论研究和仿真结果进行验证。

1 HMCVT结构组成和换段原理

图1为某型两段式HMCVT的传动原理简图,液压调速机构为变排量液压元件和定排量液压元件组成的液压传动系统,分汇流机构分别为定轴齿轮传动和行星排k2,机械路传动部分由普通行星排k3和传动环节 i_1 组成。

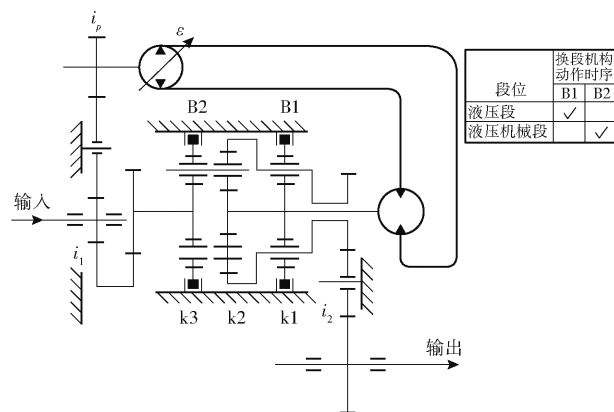


图1 HMCVT传动简图

Fig.1 Schematic of HMCVT

HMCVT的换段主要通过调节液压调速机构的传动比和换段机构的结合与分离切换来实现。为达到良好的换段品质,需选择合适的换段点,并对换段机构的切换时序进行适当控制。在图1所示的HMCVT中,换段机构为制动器B1和B2,两者的切换时序如图1右上角表格所示。B1结合和B2分离为第1段,仅液压路工作,为液压段;B2结合和B1分离为第2段,液压路和机械路均工作,为液压机械段。液压段和液压机械段的换段过程分析(分析时

以行星排 k_1 的行星架作为输出端,不考虑传动环节 i_2) 如下:

液压段时,系统输出速度为

$$n_{b1} = n_{pc1} = \frac{n_{s1}}{1+k_1} = \frac{n_e \varepsilon \eta_V}{(1+k_1)i_p} \quad (1)$$

其中

$$\varepsilon = V_p/V_M = eV_{pmax}/V_M$$

式中 ε ——液压传动系统排量比,为变排量液压元件与定排量液压元件的排量之比

V_{pmax} ——变排量液压元件最大排量, cm^3/r

V_M ——定排量液压元件排量, cm^3/r

e ——变排量液压元件排量变化率,取 $-1 \sim 1$

η_V ——液压传动系统容积效率

n ——转速, r/min

V_p ——变排量液压元件排量, cm^3/r

下标 pc 表示行星架, s 表示太阳轮, r 表示齿圈, k_i 表示下标数字 i 对应的行星排, b 表示输出, e 表示发动机, M 表示定排量液压元件, p 表示变排量液压元件; i_i 为传动环节 i 的传动比,见图 1,下同。

液压机机械段时,系统输出速度为

$$n_{b2} = \frac{n_e}{k_2} \left[\frac{1+k_2}{(1+k_3)i_1} - \frac{\varepsilon \eta_V}{i_p} \right] \quad (2)$$

根据换段时速度衔接条件,令式(1)、(2)相等,可解得液压段向液压机机械段换段时的理论换段点对应的液压传动系统排量比为

$$\varepsilon_{h \rightarrow hm} = \frac{i_p(1+k_2)(1+k_1)}{(1+k_3)(1+k_1+k_2)i_1 \eta_V} \quad (3)$$

代入 HMCVT 参数,取液压传动系统容积效率为 0.9,可得理论换段点处液压传动系统排量比为 0.896 8。

2 HMCVT 动力连续换段工作机理

2.1 动力切换过程

车辆实际运行工况复杂多变,控制系统很难使换段机构分离与结合的切换完全同步完成。当段间切换有短间隔时,将造成动力中断,换段前后系统输出速度不连续,产生换段冲击,影响换段品质^[15-31]。因此可考虑采取段间切换时有短时间重叠,在理论换段点附近时,使待分离制动器保持结合的同时使待结合制动器也结合上,重叠结合一段时间后再使待分离制动器迅速分离,这样换段时动力连续,但系统构件间的运动学干涉会影响换段性能,严重时会造成系统构件损坏。

对于前述 HMCVT,当液压传动系统排量比在理论换段点附近时使两个制动器都结合上,根据系统传动关系可以得到系统的速度特性。

在不考虑换段方向时,令理论换段点的排量比

为 ε^* 。在理论换段点附近重叠结合换段前后,实际换段点的排量比为 ε ,则 $\varepsilon \neq \varepsilon^*$,行星排行星架 k_2 和 k_3 的状态发生变化,则有

$$n_{pc1} = \frac{n_{s1}}{1+k_1} = \frac{n_e \varepsilon \eta_V}{(1+k_1)i_p} \neq \frac{n_e \varepsilon^* \eta_V}{(1+k_1)i_p} = n_{pc1}^* \quad (4)$$

$$n_{r2} = \frac{n_e}{k_2} \left[\frac{1+k_2}{(1+k_3)i_1} - \frac{\varepsilon \eta_V}{i_p} \right] \neq$$

$$\frac{n_e}{k_2} \left[\frac{1+k_2}{(1+k_3)i_1} - \frac{\varepsilon^* \eta_V}{i_p} \right] = n_{r2}^* \quad (5)$$

在理论换段点换段时, $n_{pc1}^* = n_{r2}^*$,由式(4)、(5)可得 $n_{pc1} \neq n_{r2}$,而结构要求两构件转速必须相同,如果排量比保持不变,则只有容积效率变化使两者相等,令 $n_{pc1} = n_{r2}$,可得

$$\eta_V = \frac{i_p(1+k_2)(1+k_1)}{(1+k_3)(1+k_1+k_2)i_1 \varepsilon} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)和式(5)可得

$$n_b = n_{pc1} = n_{r2} = \frac{(1+k_2)}{(1+k_3)(1+k_1+k_2)i_1} n_e \quad (7)$$

$$i = \frac{(1+k_3)(1+k_1+k_2)i_1}{1+k_2} \quad (8)$$

由式(3)、(7)、(8)可知,当排量比保持一定值时,在保持待分离制动器结合制动的同时,结合待结合制动器,液压路和机械路经过短时转矩重新分配和转速震荡后,系统输出转速稳定在式(7)所示的转速;系统输出转速与排量比无关,仅与系统结构参数有关;HMCVT 在重叠结合过程的传动比为一定值,由系统结构参数决定,即分汇流机构与机械路机构参数决定系统的输出速度(传动比)、液压路传动比及定排量液压元件输出速度。因此,HMCVT 可以动力连续换段的根本原因在于液压元件的泄漏和液压管路中油液的可压缩性可以消除重叠结合时的运动学干涉,综合表现为液压路容积效率的变化以适应前述的速度相等,但会造成系统构件间转矩重新分配。

2.2 换段过程阶段划分

根据 HMCVT 换段过程和动力切换过程,可以把动力连续换段过程分为:同步调速阶段、重叠结合阶段、动力切换阶段、分离阶段等 4 个阶段,排量调节和制动器操纵时序如图 2 所示。通常情况下,HMCVT 在换段时需要通过调节排量比使待结合换段机构的速差基本为零时结合,此时排量比基本为理论换段排量比,该值随系统负载及液压调速系统工作状态等多项因素的变化而变化,然而在系统设计时,按常用工况设计理论换段排量比。因此,多数情况下换段时需要通过检测液压调速系统的输出转速计算需要的换段点,而动力连续换段时则不需待

结合换段机构完全同步即可以结合,即在一定速差范围时即可结合,该速差范围应根据换段机构类型和换段品质要求来确定。

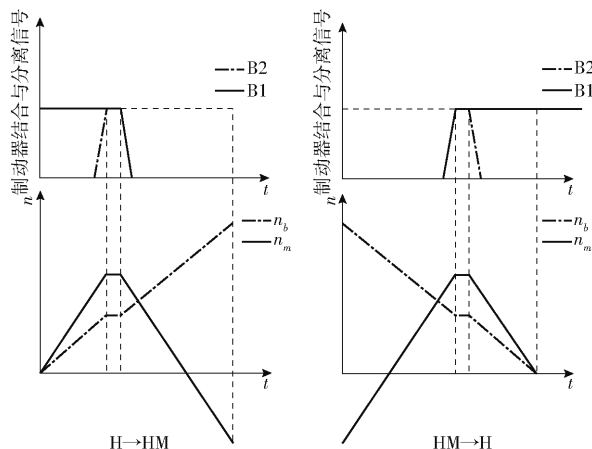


图2 液压机械无级变速器动力连续换段过程示意图

Fig.2 Schematic of power continuous shift-shift process of HMCVT

3 HMCVT 动力连续换段过程模型

3.1 液压调速系统数学模型与仿真模型

建模时,假设液压元件内泄漏为层流,忽略高低压油路压力损失,不考虑流量脉动对系统动态特性的影响,补油没有滞后,工作过程中补油压力为常数,溢流阀没有溢流,对变排量液压元件、定排量液压元件构成的液压传动系统建立高压油路流量方程和力平衡方程^[15-16,18,24,26-31]为

$$eV_{pmax}\omega_p = V_M\omega_M + \frac{C_s(V_{pmax} + V_M)}{u}\Delta p + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{d\Delta p}{dt} \quad (9)$$

$$\Delta p V_M = I_M \frac{d\omega_M}{dt} + f_M \omega_M + T_M + C_f \Delta p V_M \quad (10)$$

式中 V ——液压元件的排量, m^3/rad

ω ——角速度, rad/s

V_0 ——油液工作容积, m^3

β_e ——油液弹性模量, Pa

I_M ——定排量液压元件负载转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

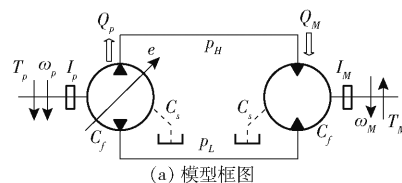
f_M ——定排量液压元件粘性阻尼系数, $\text{N}\cdot\text{s/m}$

C_f ——定排量液压元件的机械摩擦损失系数

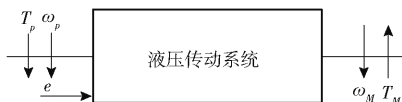
液压传动系统模型框图和仿真模块如图3所示。

3.2 机械路和分汇流机构数学模型

为研究简便,建模时,仅考虑机械路及分汇流传动环节构件和负载的转动惯量,忽略其弹性和阻尼的影响,建立各构件的动力学模型并消去行星排内力及构件间相互作用力,并整理得到各种工况下分汇流机构及机械路的动力学微分方程通式^[32-40]为



(a) 模型框图



(b) 仿真模块

图3 液压传动系统模型

Fig.3 Models of hydraulic transmission system

$$\frac{d\omega_L}{dt} = -\frac{2k_2}{I_{r2}^*(1+k_2)} \left[I_{s3}^* \frac{d\omega_{s3}}{dt} + I_{r3}^* \frac{d\omega_{r3}}{dt} - \frac{1+k_3}{2} T_{s3} - \frac{1+k_3}{2} \frac{T_{B2}}{k_3} + \frac{1+k_2}{2} T_M - I_m^* \frac{d\omega_M}{dt} + I_{r1}^* \frac{d\omega_{r1}}{dt} - \frac{(1+k_1+k_2)(1+k_2)}{2k_1k_2} T_{B1} + \frac{1+k_2}{2} \frac{T_L}{k_2} \right] \quad (11)$$

其中

$$I_{s3}^* = \frac{I_{pc3}^*}{1+k_3} + \frac{1+k_3}{2} I_{s3} - \frac{I_{r2}^*(1+k_2)}{(1+k_3)k_2^2}$$

$$I_{r3}^* = \frac{k_3 I_{pc3}^*}{1+k_3} + \frac{1+k_3}{2} \frac{I_{r3}}{k_3} - \frac{I_{r2}^* k_3 (1+k_2)}{(1+k_3)k_2^2}$$

$$I_m^* = \frac{1+k_2}{2} \left[I_{s1,2} + \frac{4(1+k_2)n_{p1}I_{p1}}{(k_1-1)^2k_2} - \frac{I_{r2}^*}{k_2^2} \right]$$

$$I_{r1}^* = \frac{1+k_2}{2} \left[\frac{4(1+k_2)k_1n_{p1}I_{p1}}{(k_1-1)^2k_2} - \frac{I_{r1}(1+k_1+k_2)}{k_1k_2} \right]$$

$$I_{pc3}^* = n_{p2}m_{p2}R_{pc2}^2 + I_{pc2} + n_{p3}m_{p3}R_{pc3}^2 + I_{pc3}$$

$$I_{r2}^* = I_{r2} + I_{pc1} + n_{p1}m_{p1}R_{pc1}^2 + I_L$$

式中 I ——转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

n_{pi} ——行星轮个数

m ——质量, kg R ——半径, m

下标 L 表示负载。

根据不同工况下的约束条件,可以分别建立相应的动力学微分方程,把各种工况的动力学微分方程组合即可建立换段过程的数学模型。

4 液压机械无级变速器动力连续换段过程仿真与台架试验

4.1 换段过程仿真

以装备该型液压机械无级变速器的重型货车设计满载质量 20 000 kg 为例进行仿真。换段时对应的车速较低,相应的空气阻力相对地面阻力很小,仿真时忽略不计。换段前后的短时间内车速变化较小,车辆负载转矩和转动惯量近似为定值。为简便计,仿真时以行星排 k_1 行星架为输出端,把负载转矩和车体转动惯量简化为当量负载转矩和当量负载转动惯量进行仿真,当量负载转矩为 1 016 N·m,当

量负载转动惯量为 $212.83 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。变速器输入转速设为 $1500 \text{ r}/\text{min}$ 。限于篇幅, 仅对 HMCVT 动力连续换段过程进行仿真, 以验证理论分析。仿真时, 为清晰显示上述 4 个阶段的区分, 将动力切换阶段时间加长, 实际时间远小于此阶段的仿真时间。限于篇幅, 本文不考虑换段机构分离与结合过程的影响, 简化为线性过程, 根据前面建立的液压传动系统模型和 HMCVT 换段过程模型, 在 Matlab/Simulink 下建立仿真模型, 分阶段进行仿真。分别在理论换段点及其前后仿真, 结果如图 4 所示。

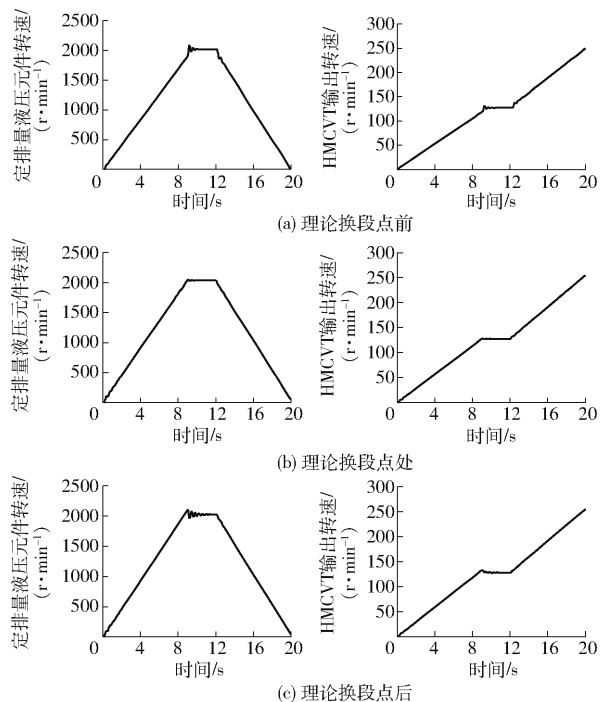


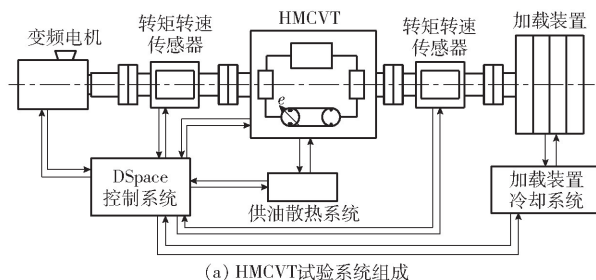
图 4 动力连续换段过程仿真

Fig. 4 Simulation of power continuous shift-shift process

由图 4 可知, 在 HMCVT 动力连续换段过程中, 在理论换段点处动力连续换段时, 系统输出转速和定排量液压元件转速基本没有波动, 系统动力传递连续无中断; 在理论换段点之前动力连续换段时, 为安全计, 换段排量比提前理论换点较少, 换段排量比为 0.886; 系统输出转速和定排量液压元件转速在同步结合阶段相对于动力切换阶段稳定转速突然升高约 5%, 产生一定的换段冲击, 随着换段排量比提前理论换点越多, 该升高幅度和换段冲击会快速增加; 在理论换段点之后动力连续换段时, 换段排量比为 0.95, 系统输出转速和定排量液压元件转速在同步结合阶段相对于动力切换阶段稳定转速突然降低约 9%, 带来一定的换段冲击, 随着换段排量比滞后理论换点越多, 该降低幅度和换段冲击会快速增加; 在动力切换阶段, 3 种情况的系统输出转速和定排量液压元件转速均相同。在整个换段过程中, 3 种情况均实现了动力连续。

4.2 台架试验

为验证 HMCVT 动力连续换段过程的理论研究和仿真模型的正确性, 进行了动力连续换段过程台架试验, 试验系统如图 5 所示, 采用变频电机模拟发动机输入转速和转矩, 车辆负载采用电涡流测功机和惯量加载装置。在理论换段点及其前后分别进行了动力连续换段过程试验。为安全性计, 试验减小了预模拟发动机的最高转速和系统负载, 即将变频电机输出转速设为 $500 \text{ r}/\text{min}$, 将惯量加载系统的转动惯量设为 $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 负载转矩为 $500 \text{ N}\cdot\text{m}$, 仿真时系统输出转速测量位置在行星排 k1 行星架输出端, 因此试验时的输出转速与仿真结果具有可比性。由于 HMCVT 输入转速和负载转动惯量与负载转矩相对于仿真数据较小, 试验效果可能不明显, 所以试验时将非理论换段排量比相对于仿真增加了偏离量, 理论点前换段排量比为 0.8, 理论点后换段排量比为 1。试验结果如图 6 所示。



(a) HMCVT 试验系统组成



(b) HMCVT 试验台架

图 5 HMCVT 试验系统

Fig. 5 Test system for HMCVT

1. 变频电机 2. 转速传感器 3. 液压机机械无级变速器 4. 测功机 5. 惯量加载系统

由图 6 可知, 在理论换段点时, 变速器各转速基本保持不变, 稳定在理论换段点处, 换段过程基本没有冲击, 动力传递连续; 在非理论换段点时, 重叠结合阶段, 系统输出转速快速变化到动力切换时的系统输出转速, 动力传递连续, 但是转速变化波动较大, 产生较大的换段冲击。在理论换段点前动力连续换时, 系统输出转速和定排量液压元件转速在同步结合阶段相对于动力切换阶段稳定转速突然升高约 22%。在理论换段点后动力连续换时, 系统输出转速和定排量液压元件转速在同步结合阶段相对于动力切换阶段稳定转速突然降低约 15%。

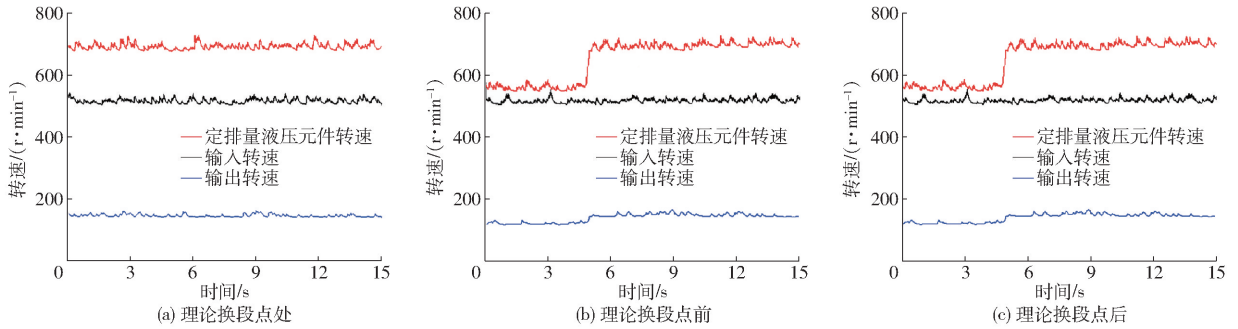


图6 动力连续换挡过程试验转速变化曲线

Fig. 6 Test of power continuous shift-shift process

虽然仿真与试验时输入转速和负载转矩不同,但是3种情况的试验结果与仿真结果的变化趋势和规律一致,说明对动力连续换挡过程的理论分析及其仿真模型正确。

5 结论

(1)通过理论分析和建模仿真,对HMCVT动力连续换挡过程进行了研究,结果表明,所提出的HMCVT动力连续换挡方法可行。在适当排量比调节范围内,在待分离和待结合换挡机构重叠结合的同时,调节排量比实现了动力切换和动力连续换挡。

(2)将动力连续换挡过程阶段划分为:同步调速、重叠结合、动力切换和快速分离等4个阶段。在动力切换阶段,HMCVT的传动比为常值,由分汇流

机构参数和机械传动部分结构参数决定,与液压传动系统参数及负载无关。动力连续换挡时,待结合换挡机构可以在一定速差范围时结合,该速差范围应根据换挡机构类型和换挡品质要求来确定。

(3)对HMCVT进行了定输入和定负载工况动力连续换挡过程仿真与台架试验,虽然仿真与试验工况具体参数设置有差别,但结果的规律一致,均表明:在理论换挡点动力连续换挡时,系统输出转速和定排量液压元件转速基本没有波动和换挡冲击;理论换挡点前后分别进行动力连续换挡时,系统输出转速和定排量液压元件转速波动较大,产生较大的换挡冲击,偏离理论换挡点越多,幅度越大;均实现了系统动力传递连续无中断;液压机械无级变速器动力连续换挡过程分析和建模及仿真正确。

参 考 文 献

- [1] 刘修曦. 车辆传动系统分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
- [2] 刘立明. 日本10式主战坦克[J]. 国外坦克, 2013(2): 21-32.
- [3] 夏海南, 葛建人, 陈明宏. 液压机械传动在工程机械上的应用[J]. 工程机械, 2000, 31(3): 17-19.
XIA Hainan, GE Jianren, CHEN Minghong. Application of hydraulic drive on construction machinery[J]. Construction Machinery and Equipment, 2000, 31(3): 17-19. (in Chinese)
- [4] XU Liyou, ZHOU Zhili, NIU Yi. Development of a new type hydro-mechanical continuously variable transmission for tractor[C]//The Sixteenth China Mechanism and Machine Science Conference, 2008: 40-43.
- [5] HIROYUKI M, KEIJI O, TSUTOMU I, et al. Development of hydro-mechanical transmission for bulldozers[C]. SAE Paper, 941772: 159-168.
- [6] МАСТРОБОЙ В М. 三挡液压减速器的工作特性与应用前景[J]. 国外工程机械, 1988(2): 40-43.
- [7] OLIVER M. Deutz-Fahr unveils new 287hp 8280 TTV[J]. Farmers Weekly, 2020, 174(1): 78-70.
- [8] 吴清芬. Fendt公司800 Vario系列无级变速新拖拉机[J]. 拖拉机与农用运输车, 2016, 43(1): 6-11.
WU Qingfen. 800 Vario series continuously variable new tractors from Fendt company[J]. Tractor & Farm Transporter, 2016, 43(1): 6-11. (in Chinese)
- [9] MARK E. The evaluation and analysis of a power split hydraulic hybrid drivetrain[D]. Madison: University of Missouri-Columbia, 2003.
- [10] WANG Wenbo. Dynamic powertrain system modeling and simulation with applications for diagnostics design and control[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2000.
- [11] KUMAR R. A power management strategy for hybrid output coupled power-split transmission to minimize fuel consumption[D]. West Lafayette: Purdue University, 2010.
- [12] ALARICO M, ANTONIO R. Optimization of hydromechanical power split transmissions[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(12): 1901-1919.
- [13] ANTONIO R, LARICO M. Multi-objective optimization of hydro-mechanical power split transmissions[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 62(12): 112-128.

- [14] ALARICO M, ANTONIO R. Fuel consumption reduction in urban buses by using power split transmissions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013(71): 159 – 171.
- [15] 杨树军. 液压机械无级传动系统硬件在环仿真研究[D]. 北京:北京理工大学, 2005.
YANG Shujun. The study of hardware in the loop simulation of the hydrostatic mechanical variable transmission on vehicle[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005. (in Chinese)
- [16] 魏超. 液压机械无级变速器速比跟踪系统研究[D]. 北京:北京理工大学, 2007.
WEI Chao. A study on the speed ratio roll-up system of hydro-mechanical transmission [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] 张明柱, 王全胜, 白东洋, 等. 基于拖拉机整机效率最大化的液压机械无级变速规律[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 74 – 78.
ZHANG Mingzhu, WANG Quansheng, BAI Dongyang, et al. Speed changing law of hydro-mechanical CVT based on maximum efficiency of tractors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(21): 74 – 78. (in Chinese)
- [18] 张迎军. 拖拉机液压机械无级变速传动系统控制策略研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
ZHANG Yingjun. Study on the control strategy of hydro-mechanical continuously variable transmission of tractor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [19] ZHANG Mingzhu, ZHOU Zhili. Speed change and range shift control schedule of the multi-range hydro-mechanical CVT for farm tractors[C]//*Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2006: 1970 – 1974.
- [20] 徐立友, 刘海亮, 周志立, 等. 拖拉机双离合自动变速器换挡品质评价指标[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 48 – 53.
XU Liyou, LIU Hailiang, ZHOU Zhili, et al. Evaluation indexes of shift quality for dual clutch transmission for tractor[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(8): 48 – 53. (in Chinese)
- [21] 张明柱, 周志立, 徐立友, 等. 农业拖拉机用多段液压机械无级变速器设计[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 118 – 121.
ZHANG Mingzhu, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Design of a multi-range hydrostatic mechanical transmission for farm tractors [J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(6): 118 – 121. (in Chinese)
- [22] 徐立友. 拖拉机液压机械无级变速器特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
XU Liyou. Study on characteristics of hydro-mechanical continuously variable transmission of tractor [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [23] 倪向东. 拖拉机液压机械多区段双排汇流无级变速箱传动特性研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013.
NI Xiangdong. Study on features of multisession and double row confluence hydro-mechanical continuously variable transmission of tractor [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [24] 倪向东, 朱思洪, 张海军, 等. 液压机械无级变速器换挡品质影响因素试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(6): 29 – 34.
NI Xiangdong, ZHU Sihong, ZHANG Haijun, et al. Experimental factors affecting the quality of hydraulic mechanical continuously variable transmission [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(6): 29 – 34. (in Chinese)
- [25] 唐新星, 赵丁选, 黄海东, 等. 工程车辆等比三段式液压机械的复合传动[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2006, 9(增刊2): 56 – 61.
TANG Xinxing, ZHAO Dingxuan, HUANG Haidong, et al. Three-stage with geometric ratios hydrostatic-mechanical compound transmission for construction vehicle [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2006, 9(Supp. 2): 56 – 61. (in Chinese)
- [26] 胡纪滨, 魏超, 杜玖玉, 等. 液压机械无级变速器速比跟踪控制系统研究[J]. *北京理工大学学报*, 2008, 28(6): 481 – 485.
HU Jibin, WEI Chao, DU Jiuyu, et al. A study on the speed ratio follow-up control system of hydro-mechanical transmission [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(6): 481 – 485. (in Chinese)
- [27] 魏超, 苑士华, 胡纪滨, 等. 等差式液压机械无级变速器的速比控制理论与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(16): 101 – 105.
WEI Chao, YUAN Shihua, HU Jibin, et al. Theoretical and experimental investigation of speed ratio follow-up control system on geometric type hydro-mechanical transmission [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(16): 101 – 105. (in Chinese)
- [28] 魏超, 马志远, 尹旭峰, 等. 液压机械无级变速器换挡冲击影响因素研究[J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(11): 1122 – 1127.
WEI Chao, MA Zhiyuan, YIN Xufeng, et al. Research on the influencing factors of the range-shifting impact on HMT [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(11): 1122 – 1127. (in Chinese)
- [29] 苑士华, 魏超, 张银彩. 液压机械无级变速器动态特性的影响因素研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 33 – 38.
YUAN Shihua, WEI Chao, ZHANG Yincai. Influencing factors for dynamic characteristics of hydro-mechanical continuously variable transmission [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(2): 33 – 38. (in Chinese)
- [30] 苑士华, 魏超, 胡纪滨. 排量伺服系统对液压机械无级变速器动态特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(7): 27 – 31.
YUAN Shihua, WEI Chao, HU Jibin. Influence of displacement servo system on dynamic behavior of hydro-mechanical transmission [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(7): 27 – 31. (in Chinese)
- [31] 杨树军, 鲍永, 范程远. 液压机械全功率换挡方法及功率过渡特性[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 63 – 66.
YANG Shujun, BAO Yong, FAN Chengyuan. Full power shift method of hydro-mechanical transmission and power transition

- characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5):63–66. (in Chinese)
- [32] WANG Guangming, ZHANG Xiaohui, ZHU Sihong, et al. Dynamic simulation on shift process of tractor hydraulic power split continuously variable transmission during acceleration[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9):30–39.
- [33] ZHAO Zhiguo, CHEN Haijun, ZHENG Zhengxing, et al. Optimal torque coordinating control of the launching with twin clutches simultaneously involved for dry dual-clutch transmission[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(6):776–801.
- [34] PATEL S K, MANI I, SRIVASTAVA A P. The effect of tractor load and trafficking on wheat crop yield[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2014, 45(2):70–73.
- [35] IQBAL S, AI-BENDER F, OMPUSUNGGU A P, et al. Modeling and analysis of wet friction clutch engagement dynamics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 60:420–436.
- [36] HWANG H S, YANG D H, CHOI H K, et al. Torque control of engine clutch to improve the driving quality of hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(5):763–768.
- [37] 高翔, 朱镇, 朱彧. 液压机械无级变速器传动特性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(4):712–716.
GAO Xiang, ZHU Zhen, ZHU Yu. Analysis of transmission characteristics of HMCVT[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2013, 32(4):712–716. (in Chinese)
- [39] 罗俊林, 吴维, 苑士华, 等. 液压机械无级变速器速比自抗扰控制研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(3):374–380, 404.
LUO Junlin, WU Wei, YUAN Shihua, et al. Study on active disturbance rejection control for speed ratio of hydro-mechanical continuously variable transmission[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(3):374–380, 404. (in Chinese)
- [40] 张广庆, 汪开鑫, 肖茂华, 等. 基于液压机械传动扭矩比的 HMCVT 稳态传动效率研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊):533–541.
ZHANG Guangqing, WANG Kaixin, XIAO Maohua, et al. HMCVT steady state transmission efficiency based on HST-EGT torque ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.):533–541. (in Chinese)

(上接第 319 页)

- [14] FERNANDES M, SCALDAFERRI A, FIAMENI G, et al. Grapevine winter pruning automation: on potential pruning points detection through 2d plant modeling using grapevine segmentation[C]//IEEE 11th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE, 2021:13–18.
- [15] KARKEE M, ADHIKARI B. A method for three-dimensional reconstruction of apple trees for automated pruning[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(3):565–574.
- [16] BOTTERILL T, PAULIN S, GREEN R, et al. A robot system for pruning grape vines[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6):1100–1122.
- [17] 马保建, 鄢金山, 王乐, 等. 基于骨架点的矮化密植枣树三维点云自动化配准[J]. 农业机械学报, 2020, 52(9):24–32.
MA Baojian, YAN Jinshan, WANG Le, et al. Three-dimensional point cloud automatic registration for dwarf and dense planting jujube tree based on skeleton points[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 52(9):24–32. (in Chinese)
- [18] RUSSELL B C, TORRALBA A, MURPHY K P, et al. LabelMe: a database and web-based tool for image annotation[J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 77(1–3):157–173.
- [19] CHEN Z, TING D, NEWBURY R, et al. Semantic segmentation for partially occluded apple trees based on deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181:105952.
- [20] CHEN L C, ZHU Y, PAPANDREOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018:801–818.
- [21] CHEN L C, PAPANDREOU G, SCHROFF F, et al. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation[J]. arXiv preprint arXiv:1706.05587, 2017.
- [22] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. Mobilenetv2: inverted residuals and linear bottlenecks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018:4510–4520.
- [23] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:770–778.
- [24] ZHANG T Y, SUEN C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Communications of the ACM, 1984, 27(3):236–239.
- [25] 何东健, 宋子琪. 基于热红外成像与骨架树模型的奶牛眼温自动检测[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3):243–250.
HE Dongjian, SONG Ziqi. Automatic detection of dairy cow's eye temperature based on thermal infrared imaging technology and skeleton tree model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3):243–250. (in Chinese)
- [26] ZHAO H, SHI J, QI X, et al. Pyramid scene parsing network[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017:2881–2890.