

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.01.010

车用 IVT 设计与仿真研究

王 振^{1,2}, 崔亚辉¹, 刘 凯¹, 徐 琳¹

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 榆林学院 能源工程学院, 陕西 榆林 719000)

摘要: 提出 IVT 的一种设计方案, 确保传动效率大于 40% 和调速范围大于 6。给出单环路系统过零调速条件、IVT 的功率流和效率特性, 通过 IVT 效率特性图确定设计方案。根据 IVT 功率流类型, 建立装备 IVT 的整车键合图模型, 并推导出该系统的状态方程。以 MATLAB/Simulink 为平台, 建立整车仿真模型。仿真结果表明: 在 UDDS 循环工况下, 发动机始终工作于最优经济性转速; IVT 顺时针环流效率小于逆时针环流效率; IVT 顺时针环流循环功率大于逆时针环流循环功率。

关键词: IVT; 传动效率; 调速范围; 循环功率

中图分类号: TH132

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2017)01-0053-07

IVT design and simulation research on automotive applications

WANG Zhen^{1,2}, CUI Yahui¹, LIU Kai¹, XU Lin¹

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Energy Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China)

Abstract: A design scheme of IVT is proposed to ensure that the transmission efficiency is greater than 40% and that the speed range is greater than 6. The condition of zero-crossing speed regulation of the single-loop system is given. with the power flow and efficiency characteristics of the IVT given. The design scheme is determined by the IVT efficiency map. According to the IVT power flow model, the bond graph model of the vehicle equipped with IVT is established and the state equation of the system is deduced. Taking MATLAB/Simulink as a platform to establish the simulation model of the vehicle. The simulation results show that throughout the UDDS driving cycle, the engine always works at the optimum economy speed, the efficiency of the IVT with clockwise power circulation is less than that of anticlockwise power circulation, the circulation power of the IVT with clockwise power circulation is greater than that of anticlockwise power circulation.

Key words: IVT; transmission efficiency; speed range; power circulation

无限级无级变速器 (Infinitely Variable Transmission, IVT), 可实现无限速比范围甚至提供零速比, 即“过零调速”和运动倒转^[1]。装备有 IVT 的中型车在市区行驶, 具有低能耗, 高驾驶舒适性的特点^[2]。Mantriota G 等对不同功能方案的 IVT 性能进行了分析和试验^[3-7]。Volpe S S 对 IC(input couple) 和 OC(output couple) IVT 进行了优化设计^[8]。郗向儒等对封闭差动无级变速传动的过零调速特性进行了研究^[9]。

本文给出单环路系统的过零调速条件, 对 IVT

的功率流和效率特性进行研究, 设计一种 IVT, 能够保证传动效率大于 40% 和调速范围大于 6。研究装备 IVT 的整车在城市循环工况 (Urban Dynamometer Driving Schedule, UDDS) 下的行驶动力学特性。

1 过零调速的稳态特性

1.1 单环路系统

单环路系统由差动轮系 X 和单自由度的封闭机构 P 组成。其组合方式如图 1 所示, 分别为 XP

收稿日期: 2016-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175419); 陕西省教育厅专项科研项目 (16JK1898); 榆林学院高层次人才科研启动基金项目 (11GK48)

作者简介: 王振, 男, 博士生, 研究方向为行星齿轮传动功率分汇流。E-mail: wangzhen_PP@163.com

通讯作者: 崔亚辉, 男, 教授, 博导, 研究方向为新型机械传动装置及理论、新型车辆传动技术。E-mail: cyhxut@163.com

型和PX型。其中,P为齿轮传动或无级变速器^[10]。

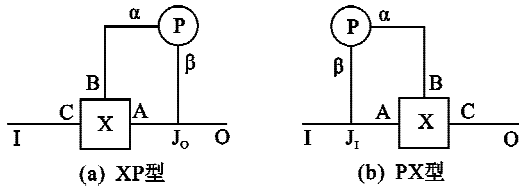


图1 单环路系统

Fig.1 Single-loop system

令 $K = i_{AB}^C = (\omega_A - \omega_C) / (\omega_B - \omega_C)$, $i_p = \omega_\alpha / \omega_\beta$, 其中, ω_j 表示 j 轴的转速 ($j = \alpha, \beta, A, B, C, I, O$)。因此,XP 系统传动比: $i_{XP} = \omega_I / \omega_O = (1 - Ki_p) / (1 - K)$;PX 系统传动比: $i_{PX} = \omega_I / \omega_O = (1 - K) / (1 - Ki_p)$ 。当 $Ki_p = 1$ 时, $i_{PX} = \infty$,PX 型单环路系统可实现过零调速。

1.2 IVT 功率流

根据传动比分析可知,IVT 为 PX 型单环路系统,其功率流分为功率分汇流型、逆时针环流型和顺时针环流型,如图 2 所示。

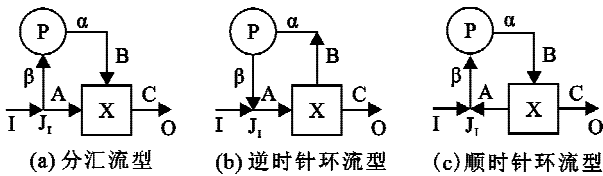


图2 PX 型单环路系统功率流图

Fig.2 Power flow diagram of the PX type single-loop system

令 $q = Ki_p$,取 $0 < K < 1$, $i_p > 0$,根据 PX 型单环路系统功率流判定准则^[11],当 $0 < q < 1$ 时,IVT 功率流为逆时针环流; $q = 1$ 时,IVT 实现过零调速。当 $1 < q$ 时,IVT 功率流为顺时针环流。

1.3 IVT 效率特性

效率是无级变速器研究的优先考虑因素。Singh 和 Nair 通过插值实验数据,推导了一系列关系式,根据输入转矩 T_{CVT} 、主动滑轮角速度 ω_{CVT} 和金属带传动比 i_{CVT} ,计算带式 CVT 系统的效率^[12],即:

$$\eta_p = \eta - 0.04\nu_{CVT} \frac{0.067 + 0.46t_{CVT} + 0.47t_{CVT}^2}{i_{CVT}^2} \quad (1)$$

$$\eta = \eta' + (\eta' - \eta'') \frac{\left[\lg\left(\frac{1}{i_{CVT}}\right) - 0.9163 \right]}{1.8326} \quad (2)$$

$$\eta' = 0.616 + 3.84t_{CVT} - 16.4t_{CVT}^2 + 24t_{CVT}^3 \quad (t_{CVT} \leq 0.3)$$

$$\eta' = 0.95 \quad (t_{CVT} > 0.3)$$

$$\eta'' = -0.2145 + 13.87t_{CVT} - 76.01t_{CVT}^2 + 218.4t_{CVT}^3 - 318.4t_{CVT}^4 +$$

$$185.4t_{CVT}^5 \quad (t_{CVT} \leq 0.5)$$

$$\eta'' = 0.92 \quad (t_{CVT} > 0.5)$$

其中,无量纲转矩 $t_{CVT} = T_{CVT} / T_{CVTmax}$,无量纲转速 $\nu_{CVT} = \omega_{CVT} / \omega_{CVTmax}$, T_{CVTmax} 为金属带主动滑轮最大输入转矩, ω_{CVTmax} 为金属带主动滑轮最大输入转速。

金属带效率 η_p 受无量纲转速 ν_{CVT} 的影响较小^[7],假定 $\nu_{CVT} = 0.5$,研究无量纲转矩 t_{CVT} 、金属带传动比 i_{CVT} 与金属带效率 η_p 之间的关系。由方程 (1) 可获得金属带效率特性图,如图 3 所示。

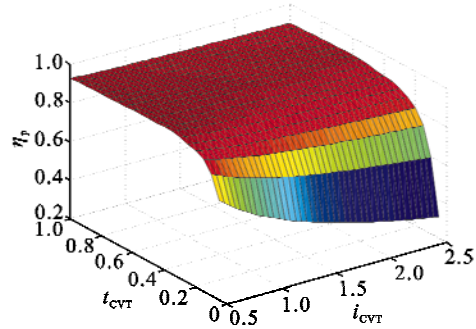


图3 金属带效率特性图

Fig.3 Metal pushing belt efficiency characteristic diagram

取 PX 型单环路系统各基本构件以及整个系统为研究对象,建立逆时针环流型 IVT 的能量方程:

$$\begin{cases} P_I - P_\beta - P_A = 0 \\ \eta_p P_c + P_\beta = 0 \\ P_B + P_a = 0 \\ q \cdot P_A \cdot \eta_{AB}^C + P_B = 0 \\ (1 - q) \cdot P_A \cdot \eta_{AC}^R + P_C = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知:

$$\eta_{PX} \Big|_{0 < q < 1} = \frac{-P_C}{P_I} = \frac{\eta_{AC}^R (1 - q)}{1 - q \eta_p \eta_{AB}^C} \quad (4)$$

建立顺时针环流型 IVT 的能量方程:

$$\begin{cases} P_I - P_\beta - P_A = 0 \\ \eta_p P_\beta + P_c = 0 \\ P_a + P_B = 0 \\ \frac{1}{q} \cdot P_B \cdot \eta_{BA}^C + P_A = 0 \\ \frac{(q - 1)}{q} \cdot P_B \cdot \eta_{BC}^A + P_C = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知:

$$\eta_{PX} \Big|_{q > 1} = \frac{-P_C}{P_I} = \frac{(1 - q) \eta_{BC}^A}{\eta_{BA}^C - q / \eta_p} \quad (6)$$

式中, η_{mn}^l 为行星齿轮的效率,其中 m, n 和 l 分别表示驱动、从动和固定构件, ($m, n, l = A, B, C$)。 P_j 表示功率。

取 $\eta_{AC}^B = \eta_{AB}^C = \eta_{BC}^A = \eta_{BA}^C = 0.98$, $i_p = i_{CVT}$,由方程(1)、(4)、(6)可获得 IVT 效率特性图(见图 4)。

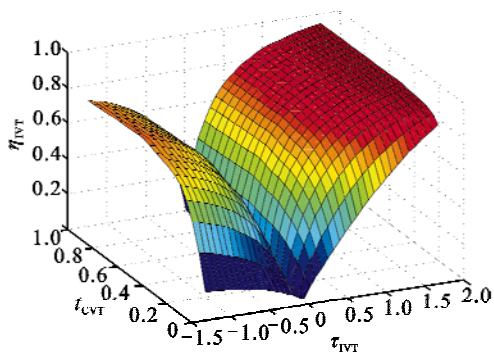


图 4 IVT 效率特性图

Fig. 4 IVT efficiency characteristic diagram

为了避免 IVT 传动比 $i_{IVT} = \infty$, 定义 IVT 的速比为 $\tau_{IVT} = \omega_O / \omega_I$ 。由图 4 可知, 当速比 $\tau_{IVT} > 0$ 时, IVT 效率随着速比 τ_{IVT} 的增加而增加, 当 $0.2 < \tau_{IVT} < 1.75$ 时, IVT 效率大于 40%; 当速比 $\tau_{IVT} < 0$ 时, IVT 效率随着速比 τ_{IVT} 的减小而增加, 当 $-1.25 < \tau_{IVT} < -0.2$ 时, IVT 效率大于 40%; 速比 τ_{IVT} 绝对

值相同时, IVT 逆时针环流时 ($\tau_{IVT} > 0$) 效率大于顺时针环流时效率 ($\tau_{IVT} < 0$); 当速比 $\tau_{IVT} < 0$ 时, 效率最大值不超过 70%, 所以, IVT 不适合反向动力传动。

2 过零调速的键合图模型

图 5 为装备 IVT 系统的整车原理图, 由于 IVT 调速范围大, 可以实现过零调速及运动倒转, 所以该传动系统无离合器及一级齿轮减速器, 使得传动系统结构紧凑。

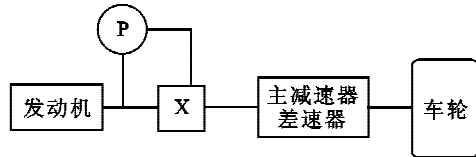


图 5 装备 IVT 系统的整车原理图

Fig. 5 Principle diagram of the vehicle equipped with the IVT

根据传动系统组成和 IVT 功率流, 建立装备 IVT 的整车键合图模型, 如图 6 所示。

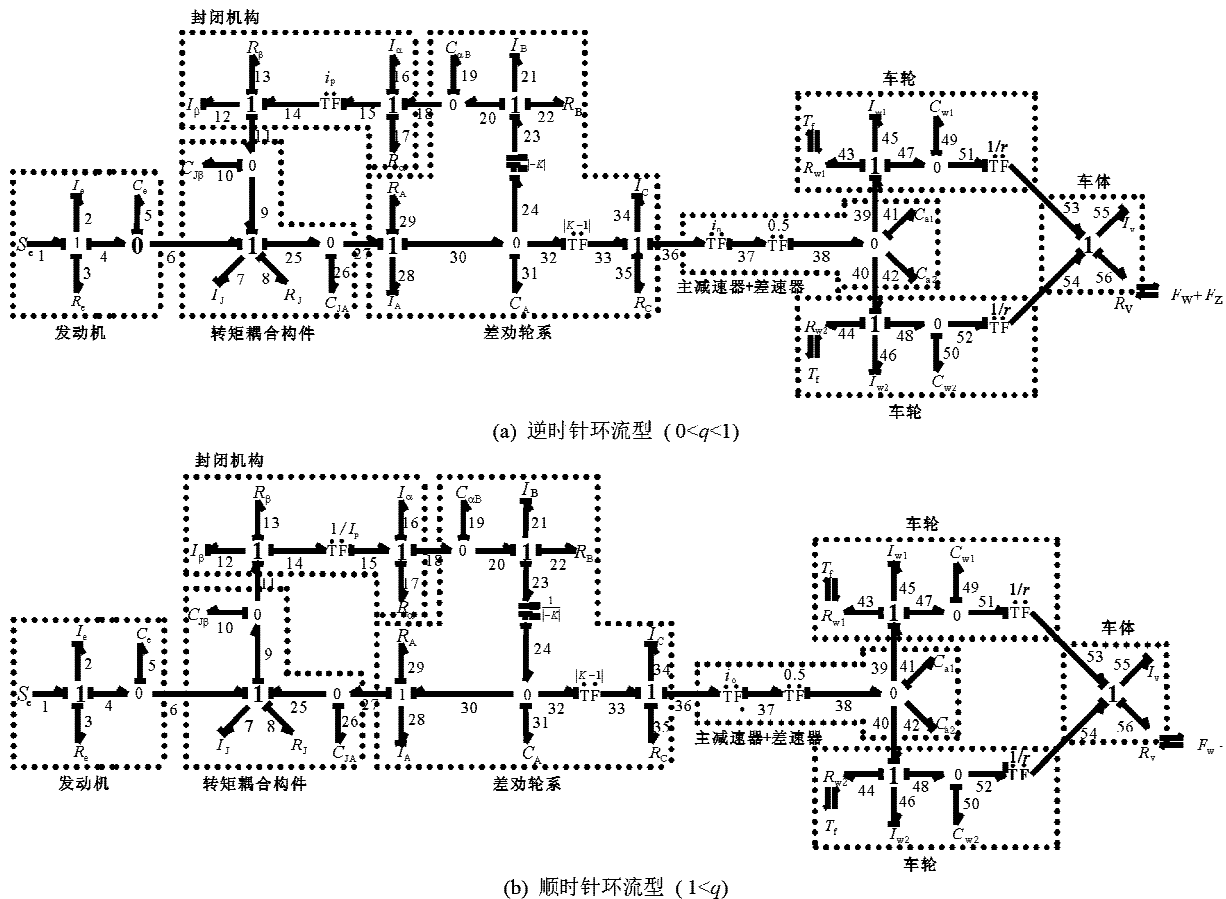


图 6 装备 IVT 系统的整车键合图模型

Fig. 6 Bond graph model of the vehicle equipped with the IVT system

图 6 中, I 为惯性元; C 为容性元; R 为阻性元; 1 结为共流结; 0 结为共势结; TF 为变换器; i_p 为封闭机构传动比; i_o 为主减速器传动比, $i_1 = i_o/2$; $|1/(-K)|$ 、 $|-K|$ 、 $|K-1|$ 分别为差动轮系

支路传动比; r 为车轮半径; S_e 为发动机转矩; T_f 为单侧车轮滚动阻力矩; F_w 为空气阻力; F_z 为制动力; 下角标 e 表示发动机, A、B、C 分别为差动轮系 A 端、B 端、C 端; α 、 β 分别为封闭机构 α 、 β 端; J 为转矩耦

合点; W_1 、 W_2 分别为左右轮胎; V 为车体。

3 状态方程

根据图 6 所示装备 IVT 的整车键合图模型,以惯性元的广义动量 p 和容性元的广义位移 q 为状态变量^[13-14],可知整车的状态变量为:

$$\mathbf{X}_{IVT} = (p_2, p_7, p_{12}, p_{21}, p_{28}, p_{34}, p_{45}, p_{46}, p_{55}, q_5, q_{10}, q_{19}, q_{26}, q_{31}, q_{41}, q_{49}, q_{50})$$

根据因果关系和功率流向,可知逆时针环流时,整车状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{p}_2 = S_e - \frac{1}{C_e} q_5 - \frac{R_e}{I_e} p_2 \\ \dot{p}_7 = \frac{1}{C_e} q_5 + \frac{1}{C_{JA}} q_{10} - \frac{1}{C_{JA}} q_{26} - \frac{R_J}{I_J} p_7 \\ \dot{p}_{12} = \frac{I_\beta}{I_\beta + I_a i_p^2} \left(\frac{i_p}{C_{aB}} q_{19} - \frac{1}{C_{J\beta}} q_{10} - \frac{R_a i_p^2 + R_\beta}{I_\beta} p_{12} \right) \\ \dot{p}_{21} = |-K| \frac{1}{C_A} q_{31} - \frac{1}{C_{aB}} q_{19} - \frac{R_B}{I_B} p_{21} \\ \dot{p}_{28} = \frac{1}{C_{JA}} q_{26} - \frac{1}{C_A} q_{31} - \frac{R_A}{I_A} p_{28} \\ \dot{p}_{34} = |K-1| \frac{1}{C_A} q_{31} - \frac{1}{C_{a1} i_1} q_{41} - \frac{R_C}{I_C} p_{34} \\ \dot{p}_{45} = \frac{1}{C_{a1}} q_{41} - \frac{1}{C_{w1}} q_{49} - T_f \\ \dot{p}_{46} = \frac{1}{C_{a1}} q_{41} - \frac{1}{C_{w2}} q_{50} - T_f \\ \dot{p}_{55} = \frac{1}{C_{w1} r} q_{49} + \frac{1}{C_{w2} r} q_{50} - F_w - F_z \\ \dot{q}_5 = \frac{1}{I_e} p_2 - \frac{1}{I_J} p_7 \\ \dot{q}_{10} = \frac{1}{I_\beta} p_{12} - \frac{1}{I_J} p_7 \\ \dot{q}_{19} = \frac{1}{I_B} p_{21} - \frac{i_p}{I_\beta} p_{12} \\ \dot{q}_{26} = \frac{1}{I_J} p_7 - \frac{1}{I_A} p_{28} \\ \dot{q}_{31} = \frac{1}{I_A} p_{28} - |-K| \frac{1}{I_B} p_{21} - |K-1| \frac{1}{I_C} p_{34} \\ \dot{q}_{41} = \frac{C_{a1}}{C_{a1} + C_{a2}} \left[\frac{p_{34}}{I_J i_1} - \frac{p_{45}}{I_{w1}} - \frac{p_{46}}{I_{w2}} \right] \\ \dot{q}_{49} = \frac{p_{45}}{I_{w1}} - \frac{p_{55}}{I_v r} \\ \dot{q}_{50} = \frac{p_{46}}{I_{w2}} - \frac{p_{55}}{I_v r} \end{cases} \quad (7)$$

顺时针环流时整车的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{p}_2 = S_e - \frac{1}{C_e} q_5 - \frac{R_e}{I_e} p_2 \\ \dot{p}_7 = \frac{1}{C_e} q_5 + \frac{1}{C_{JA}} q_{26} - \frac{1}{C_{J\beta}} q_{10} - \frac{R_J}{I_J} p_7 \\ \dot{p}_{12} = \frac{I_\beta}{I_\beta + I_a i_p^2} \left(\frac{1}{C_{J\beta}} q_{10} - \frac{i_p}{C_{aB}} q_{19} - \frac{R_a i_p^2 + R_\beta}{I_\beta} p_{12} \right) \\ \dot{p}_{21} = \frac{1}{C_{aB}} q_{19} - |-K| \frac{1}{C_A} q_{31} - \frac{R_B}{I_B} p_{21} \\ \dot{p}_{28} = \frac{1}{C_A} q_{31} - \frac{1}{C_{JA}} q_{26} - \frac{R_A}{I_A} p_{28} \\ \dot{p}_{34} = |K-1| \frac{1}{C_A} q_{31} - \frac{1}{C_{a1} i_1} q_{41} - \frac{R_C}{I_C} p_{34} \\ \dot{p}_{45} = \frac{1}{C_{a1}} q_{41} - \frac{1}{C_{w1}} q_{49} - T_f \\ \dot{p}_{46} = \frac{1}{C_{a1}} q_{41} - \frac{1}{C_{w2}} q_{50} - T_f \\ \dot{p}_{55} = \frac{1}{C_{w1} r} q_{49} + \frac{1}{C_{w2} r} q_{50} - F_w - F_z \\ \dot{q}_5 = \frac{1}{I_e} p_2 - \frac{1}{I_J} p_7 \\ \dot{q}_{10} = \frac{1}{I_J} p_7 - \frac{1}{I_\beta} p_{12} \\ \dot{q}_{19} = \frac{i_p}{I_\beta} p_{12} - \frac{1}{I_B} p_{21} \\ \dot{q}_{26} = \frac{1}{I_A} p_{28} - \frac{1}{I_J} p_7 \\ \dot{q}_{31} = |-K| \frac{1}{I_B} p_{21} - \frac{1}{I_A} p_{28} - |K-1| \frac{1}{I_C} p_{34} \\ \dot{q}_{41} = \frac{C_{a1}}{C_{a1} + C_{a2}} \left[\frac{p_{34}}{I_J i_1} - \frac{p_{45}}{I_{w1}} - \frac{p_{46}}{I_{w2}} \right] \\ \dot{q}_{49} = \frac{p_{45}}{I_{w1}} - \frac{p_{55}}{I_v r} \\ \dot{q}_{50} = \frac{p_{46}}{I_{w2}} - \frac{p_{55}}{I_v r} \end{cases} \quad (8)$$

差动轮系 A、B、C 端的转速分别为:

$$\begin{cases} \omega_A = p_{28}/I_A \text{ (rad/s)} \\ \omega_B = p_{21}/I_B \text{ (rad/s)} \\ \omega_C = p_{34}/I_C \text{ (rad/s)} \end{cases} \quad (9)$$

差动轮系 A、B、C 端的转矩分别为:

$$\begin{cases} T_A = q_{31}/C_A \text{ (Nm)} \\ T_B = q_{19}/C_{aB} \text{ (Nm)} \\ T_C = q_{41}/(C_{a1} i_1) \text{ (Nm)} \end{cases} \quad (10)$$

车辆速度为:

$$v_s = p_{55}/I_v \text{ (m/s)} \quad (11)$$

4 IVT 整车动态特性仿真

4.1 仿真参数

动力传动系统参数如表 1 所示。

表 1 动力传动系统参数
Tab.1 Powertrain parameters

惯量参数: $I_e = 0.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_A = 0.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$ $I_B = 0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_C = 0.006 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$ $I_a = 0.006 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_b = 0.002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$ $I_J = 0.012 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_{w1} = I_{w2} = 3.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$ $I_v = 1\ 000 \text{ kg}$
柔度参数: $C_e = C_{JA} = C_{JB} = C_{Bc} = C_x = 0.001 \text{ rad}/(\text{Nm}),$ $C_{a1} = C_{a2} = 0.000\ 5 \text{ rad}/(\text{Nm}), C_{w1} = C_{w2} =$ $0.000\ 1 \text{ rad}/(\text{Nm})$
阻性参数: $R_e = R_A = R_B = R_C = R_a = R_b = R_J =$ $0.005 \text{ (Nm)}/(\text{rad} \cdot \text{s})$
变换器模数: $i_o = 4$
整车参数: 汽车质量 $m = 1\ 000 \text{ kg},$ 车轮半径 $r =$ $0.282 \text{ m},$ 滚动阻力系数 $f = 0.015,$ 风阻系 数 $C_D = 0.335,$ 迎风面积 $A = 2 \text{ m}^2,$ 坡度 角度 $\theta = 0,$ 重力加速度 $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2,$ 空 气密度 $\rho = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$
发动机参数: 最大功率 $41 \text{ kW}(5\ 700 \text{ r}/\text{min}),$ 最大扭 矩 $81 \text{ N} \cdot \text{m}(3\ 477 \text{ r}/\text{min})$

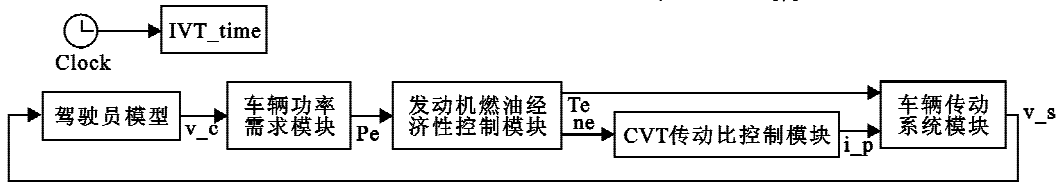


图 7 装备 IVT 的整车顶层 Simulink 模型
Fig. 7 Top-level Simulink model of the vehicle equipped with the IVT

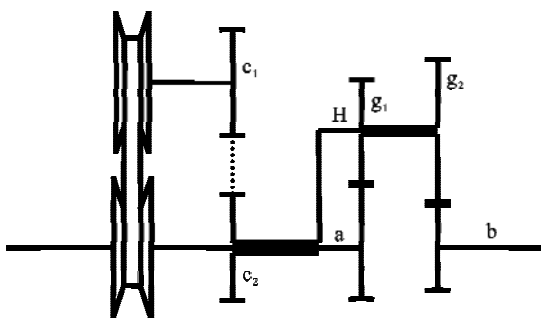


图 8 IVT 结构方案
Fig. 8 IVT structure scheme

4.2 仿真结果与分析

选取 UDDS 循环工况,对装备 IVT 的整车进行仿真。图 9 所示为逆时针环流型 IVT 整车行驶动力学特性。图 10 所示为顺时针环流型 IVT 整车行驶动力学特性。由图 9、图 10 可知以下几点。

1) 基本构件转速特性对比。由图 11 可知,逆时针环流型 IVT 与顺时针环流型 IVT 的 C 端速度绝对值相等,说明仿真结果正确。顺时针环流与逆时针环

图 7 显示了装备 IVT 的整车顶层 Simulink 模型。驾驶员模型从 UDDS 循环工况文件获得目标速度 v_m ,与车辆的模拟实际速度 v_s 相比较,给出驾驶命令 v_c 。车辆功率需求模块根据驾驶员命令 v_c ,计算需求功率 P_e 。发动机燃油经济性控制模块根据需求功率 P_e ,查表发动机最优经济性曲线,获得发动机最优转速 n_{e_opt} 和发动机输出转矩 T_e 。CVT 传动比控制模块根据发动机最优转速 n_{e_opt} 计算目标传动比,与车辆实际传动比比较,输出封闭机构传动比 i_p ,车辆传动系统模块根据发动机转矩 T_e 和封闭机构传动比 i_p ,计算车辆实际速度 v_s ,反馈给驾驶员模块。

图 8 给出 IVT 的结构方案,该 IVT 由 2K-H (WW)型差动轮系、定轴齿轮 C_1 及 C_2 、金属带无级变速器组成。该结构方案中, $K = i_{AB}^C = i_{aH}^b = 0.6,$ $0.5 < i_p < 2.5,$ 其中, $Z_a = 30, Z_{g1} = 24, Z_{g2} = 36,$ $Z_b = 18, Z_{c1} = 20, Z_{c2} = 20。$

结合 IVT 效率图 4 的讨论结果,选择 IVT 同向传动速比范围 $0.2 < \tau_{IVT} < 1.75$ (即 $0.6 < i_{IVT} < 5$); IVT 反向传动速比范围 $-1.25 < \tau_{IVT} < -0.2$ (即 $-5 < i_{IVT} < -0.8$)。

流 A 端速度基本相同,为发动机最优经济性转速。

2) 金属带特性对比。由图 12 可知,在整个循环工况过程中,顺时针环流型 B 端速度比逆时针环流型 B 端速度大;顺时针环流型 B 端力矩与逆时针环流型 B 端力矩基本相同;顺时针环流型 B 端功率比逆时针环流型 B 端功率大。考虑到 IVT 系统中,金属带无级变速器支路的效率最低,减小该支路功率,可以提高系统效率。所以 IVT 顺时针环流效率小于逆时针环流效率,与理论结果一致。

3) 循环功率特性对比。由图 13 可知,IVT 顺时针环流循环功率 P_A 大于逆时针环流循环功率 $P_B。$

因为 $\omega_B = (1/K)\omega_A + (1-1/K)\omega_C,$ 当 $K = 0.6$ 时, $\omega_B = 1.66\omega_A - 0.66\omega_C。$

在 UDDS 循环工况下,IVT 逆时针环流时, $\omega_C > 0,$ 顺时针环流时, $\omega_C < 0;$ 逆时针环流与顺时针环流时,发动机始终工作于最优转速, ω_A 相同;所以,顺时针环流 ω_B 大于逆时针环流 $\omega_B。$ IVT 逆时针环流与顺时针环流时, C 端转矩 T_C 相同, A 端转矩,

即发动机转矩 T_A 基本相同,由图 12 可知,B 端转矩 T_B 基本相同。因此,顺时针环流 ω_B 大于逆时针环流 ω_B 导致 $P_A > P_B$ 。

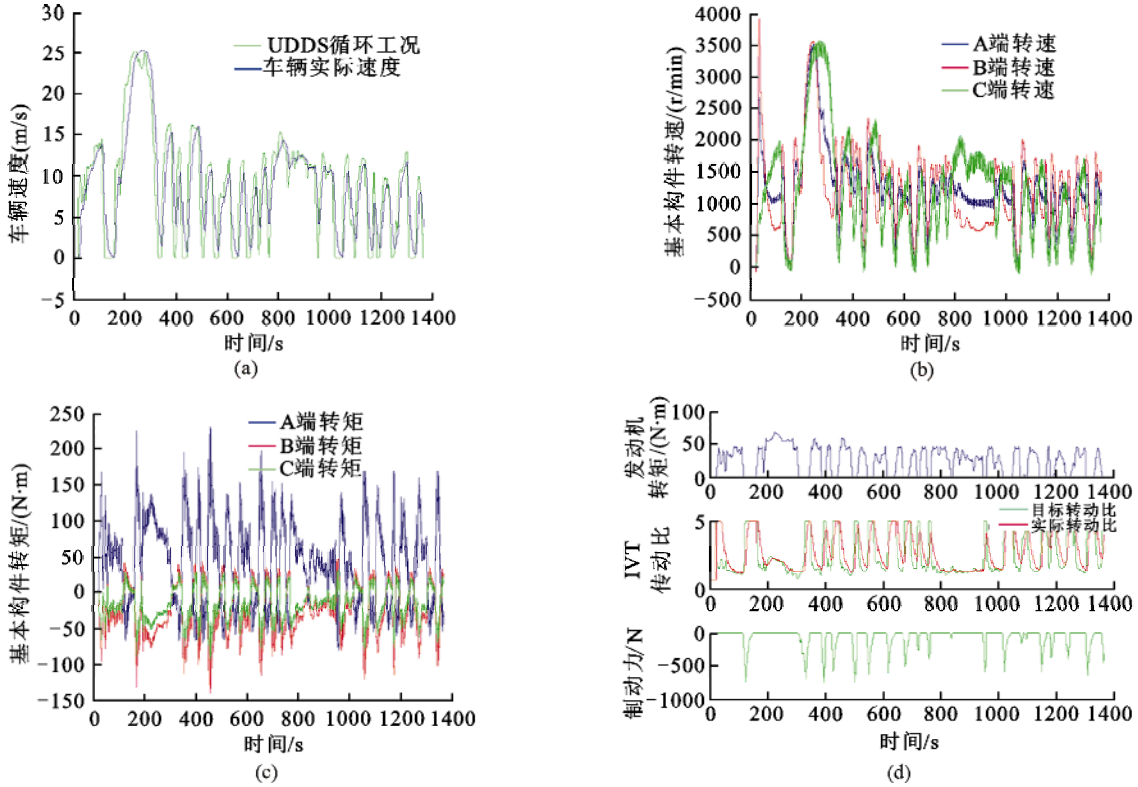


图 9 逆时针环流型 IVT 特性

Fig. 9 Anticlockwise circulation type IVT characteristics

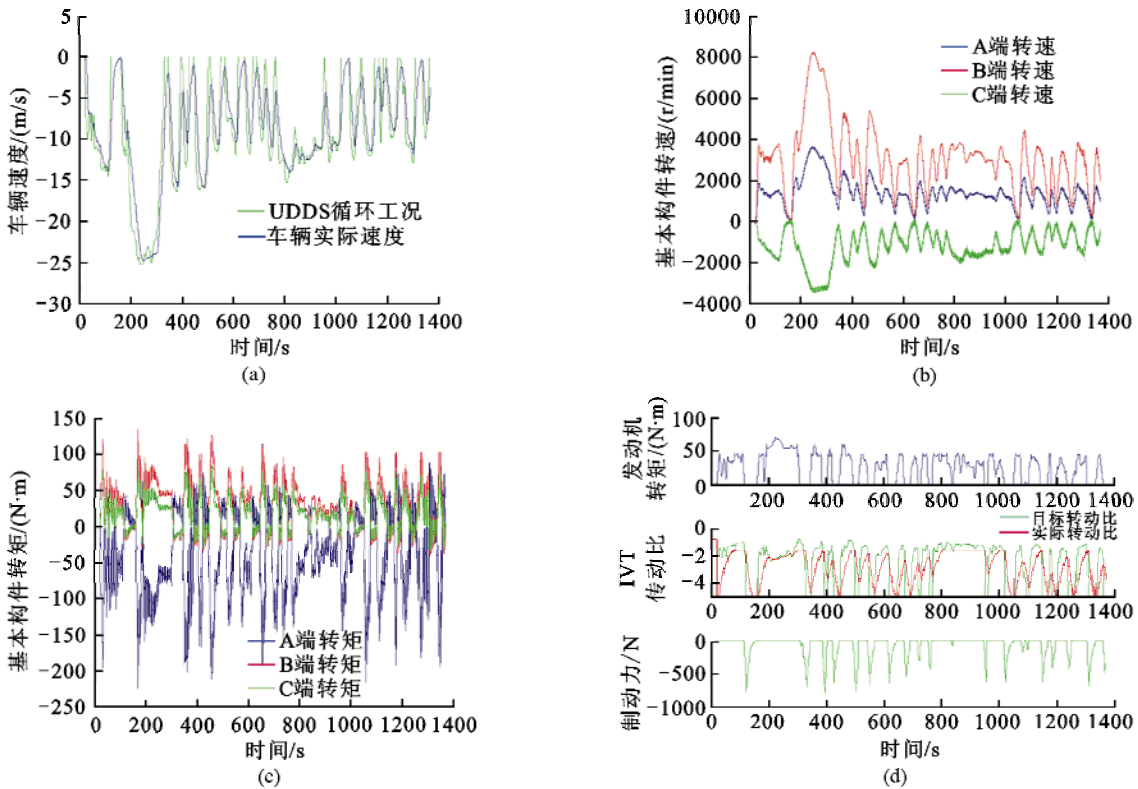


图 10 顺时针环流型 IVT 特性

Fig. 10 Clockwise circulation type IVT characteristics

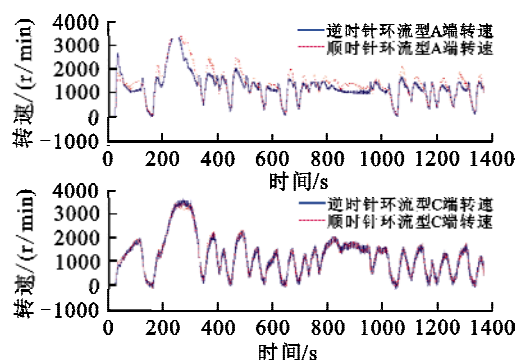


图 11 逆时针与顺时针环流型 IVT 转速对比

Fig. 11 Speed contrast of the IVT with anticlockwise and clockwise power circulation

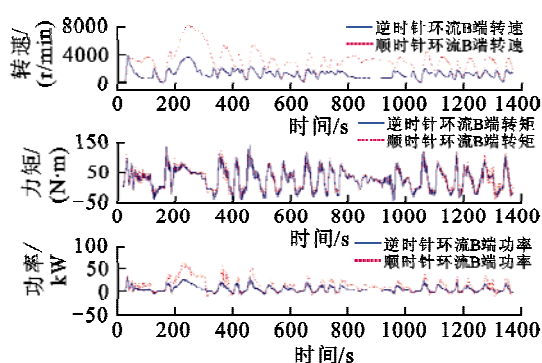


图 12 逆时针环与顺时针环流型金属带特性对比

Fig. 12 Metal belt characteristics contrast of the IVT with anticlockwise and clockwise power circulation

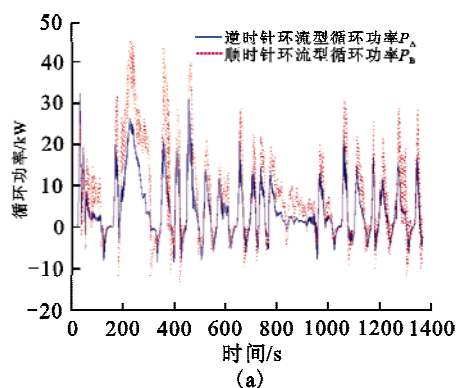


图 13 逆时针与顺时针环流型 IVT 循环功率对比

Fig. 13 Circulation power contrast of the IVT with anticlockwise and clockwise power circulation

4 结 论

1) 设计的 IVT, 功率流逆时针环流时, 调速范围为 0.6~5, 顺时针环流时, 调速范围为 -5~-0.8, 能够保证传动效率大于 40% 和调速范围大于 6。

2) 对装备 IVT 的整车行驶动力学进行研究, 在 UDSS 循环工况下, 发动机始终工作于最优经济性转速。IVT 顺时针环流效率小于逆时针环流效

率, 与理论结果一致; IVT 顺时针环流循环功率大于逆时针环流循环功率。

参考文献:

- [1] MANGIALARDI L, MANTRIOTA G. Power flows and efficiency in infinitely variable transmissions[J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(7): 973-994.
- [2] CARBONE G, MANGIALARDI L, MANTRIOTA G. Fuel consumption of a mid class vehicle with infinitely variable transmission [C]. SAE Paper, 2001-01-3692, 2001.
- [3] MANTRIOTA G. Performances of a series infinitely variable transmission with type I power flow[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(6): 579-597.
- [4] MANTRIOTA G. Performances of a parallel infinitely variable transmission with type II power flow[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(6): 555-578.
- [5] BOTTIGLIONE F, MANTRIOTA G. MG-IVT: an infinitely variable transmission with optimal power flows [J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(11): 112603-112612.
- [6] BOTTIGLIONE F, MANTRIOTA G. Reversibility of power-split transmissions[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(8): 084503-084507.
- [7] BOTTIGLIONE F, PINTO S D, MANTRIOTA G. Infinitely variable transmissions in neutral gear: torque ratio and power re-circulation [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 74(1): 285-298.
- [8] VOLPE S S, CARBONE G, NAPOLITANO M, et al. Design optimization of input and output coupled power split infinitely variable transmissions[J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(11): 111002-111012.
- [9] 郗向儒, 薛隆泉, 崔亚辉. 封闭差动无级变速传动的研究 [J]. 机械, 1997, 24(1): 2-6.
XI Xiangru, XUE Longquan, CUI Yahui. Research on closed differential variable speed transmission [J]. Mechanical, 1997, 24(1): 2-6.
- [10] 崔亚辉, 阮忠唐, 曹惟庆. 封闭差动行星传动研究 [J]. 机械科学与技术, 1998, 17(1): 73-75.
CUI Yahui, RUAN Zhongtang, CAO Weiqing. Research on closed differential gear train [J]. Mechanical Science and Technology, 1998, 17(1): 73-75.
- [11] 薛隆泉, 郗向儒, 崔亚辉, 等. 行星式无级变速传动 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [12] SINGH T, NAIR S S. A mathematical review and comparison of continuously variable transmissions [C]. SAE Paper 922107, 1992.

(下转第 73 页)

2) \Rightarrow 3),因为 $t(x)^- = t(x^-) \leq x^-$,由引理1的2)有 $x \leq t(x)$,然而由(vt2)知 $x \geq t(x)$,所以 $t(x) = x$.

3) \Rightarrow 1)显然。

推论1 设 $(E; +, 0, 1)$ 是一个伪效应代数,如果态射 $t: E \rightarrow E$ 是极真算子,则 t 为忠实的。

参考文献:

- [1] BIRKHOOF G, VON NEUMANN J. The logic of quantum mechanics[J]. Annals of Mathematics. 1936, 37(4): 823-843.
- [2] PULMANNOVA S. Quantum logics and Hilbert space [J]. Foundations of Physics. 1994, 24 (10): 1403-1414.
- [3] GIUNTINI R, GREULING H. Towards a formal language for unsharp properties[J]. Foundations of Physics. 1989, 19(7): 931-945.
- [4] KOPKA F. D-Posets[J]. Mathematica Slovaca. 1994, 44: 21-34.
- [5] FOULIS D J, BENNETT M K. Effect algebras and unsharp quantum logics[J]. Foundations of Physics. 1994, 24(10): 1331-1352.
- [6] DVURECENSKIJ A, VETTERLEIN T. Pseudoeffect algebras. I. Basic properties[J]. International Journal of Theoretical Physics. 2001, 40(3): 685-701.
- [7] GUDDER S. Total extensions of effect algebras[J]. Foundations of Physics Letters. 1995, 8(3): 243-252.
- [8] GIUNTINI R. Quantum MV-algebras[J]. Studia Logica. 1996, 56(3): 393-417.
- [9] GIUNTINI R, PULMANNOVA S. Ideals and congruences in effect algebras and QMV-algebras[J]. Communications in Algebra. 2000, 28(3): 1567-1592.
- [10] CHAJDA I, KUHR J. Pseudo-effect algebras as total algebras[J]. International Journal of Theoretical Physics. 2010, 49(12): 3039-3049.
- [11] HAJEK P. On very true[J]. Fuzzy Sets and System. 2001, 124(3): 329-333.
- [12] GUO Jiansheng, LI Yongming, XIE Yongjian. Pseudo weak effect algebras and pseudo weak D-posets[J]. International Journal of Theoretical Physics, 2011, 50 (4): 1175-1185.

(责任编辑 王绪迪,王卫勋)

(上接第59页)

- [13] 胡建军,秦大同,孙冬野,等. 金属带式无级变速传动键合图建模及仿真[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000,23(2):1-5.
HU Jianjun, QIN Datong, SUN Dongye, et al. Modeling by bond graph and simulation for a metal pushing belt continuously variable transmission system [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2000,23(2):1-5.
- [14] 胡建军,秦大同,孙冬野,等. 金属带式无级变速传动系统仿真与控制研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(1): 27-30.
HU Jianjun, QIN Datong, SUN Dongye, et al. Modeling and control of a continuously variable transmission system with metal pushing belt [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32 (1): 27-30.
- [15] 王振,崔亚辉,刘凯,等. 装备单环路系统的整车行驶动力学研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(8): 1123-1129.
WANG Zhen, CUI Yahui, LIU Kai, et al. Research on driving dynamics for vehicles equipped with a single loop systems [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(8): 1123-1129.

(责任编辑 王卫勋)