

多段金属带复合无级传动效率特性分析^{*}

杨树军 蔡 兴

【摘要】 建立了等比式多段金属带复合无级传动正反相位工作时的效率模型,通过仿真,得到了系统效率与金属带 CVT 传动比、传递转矩及输入转速的关系曲线。结果表明:等比式多段金属带复合无级传动无论处于正相位还是反相位工况,系统传递的效率随金属带传动比、传递转矩以及输入转速的增加而增加,且都要明显高于金属带 CVT 传动的效率;系统扩大了金属带无级传动的速比范围,提高了传递的功率,因此该传动系统能够应用于大功率车辆传动中。

关键词: 金属带复合无级传动 多段 效率

中图分类号: U463.212 **文献标识码:** A

Analysis on Efficiency Characteristics of Multi-range Composite CVT System

Yang Shujun Cai Xing

(East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract

A efficiency model of the multi-range composite CVT system working on the positive and negative phases was established. The relation curves between overall efficiency of the multi-range composite CVT system and transmission ratio of metal pushing V-belt CVT, transmission torque and input rotate speed, were obtained by simulation. The simulated results indicated that no matter the CVT system works on positive or negative phase, the system efficiency increases with the CVT transmission ratio, torque or input speed increased. The efficiency is higher than that of metal pushing V-belt CVT system obviously. Furthermore, the system can be applied in high-power vehicle transmission, which enlarges the speed ratio range of transmission and increases the overall power.

Key words Composite continuously variable transmission system, Multi-range, Efficiency

引言

无级变速(CVT)是车辆传动的理想形式,它可以根据路面状况和发动机工况使车辆处于最佳行驶状态^[1]。目前使用较为普遍的是金属带式无级变速器,但由于它是基于摩擦传动的,效率、功率及可用的速比范围均偏低,导致 CVT 很难用于大功率的车辆^[2~3]。而多段金属带复合无级传动以金属带为核心,可提高其承载能力,拓宽速比变化范围,

本文研究多段金属带复合无级传动效率的变化规律,为多段金属带复合无级传动的开发提供理论保证。

1 多段金属带复合无级传动的原理

多段金属带复合无级传动由功率分流机构、功率汇流机构以及换段机构 3 部分组成,其中,汇流机构是由一个正向和一个反向汇流行星排共同组成的一个双向汇流行星排组^[3],其传动简图及各参数之间的关系如图 1 所示。

收稿日期:2007-09-24

^{*} 江西省自然科学基金资助项目(项目编号:2007GZC0895)

杨树军 华东交通大学机电工程学院 教授,330013 南昌市

蔡 兴 华东交通大学机电工程学院 硕士生

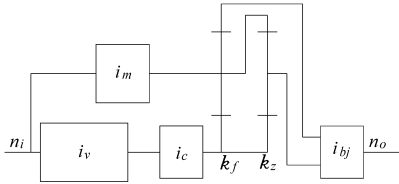


图 1 多段金属带复合无级传动简图

Fig.1 Schematic diagram of multi-range composite CVT system

图 1 中 n_i ——输入转速
 i_m ——齿轮传动机构传动比
 i_v ——金属带传动比, $i_v = r_{DN}/r_{DR}$
 r_{DR}, r_{DN} ——主、从动轮半径, 当从动轮半径最大、主动轮半径最小时, i_v 达到最大值 i_{vmax}
 i_{bj} ——后传动变速比, 下标 j 表示段位序号 ($j = 1, 2, \dots, m$; m 为系统的总段位数)
 i_c ——从 CVT 从动轮到行星排太阳轮的传动比
 k_z ——正向汇流行星排特性参数
 k_f ——反向汇流行星排特性参数
 n_o ——输出转速

图 1 中功率汇流机构由正向汇流行星排和反向汇流行星排组成。由连接关系可知, 对于 i_{bj} 取某一值时, 当正向汇流排工作时, 输出转速 n_o 随 CVT 转速的升高而升高, 称为正相位工况; 当反向汇流排工作时, 输出转速 n_o 随 CVT 转速的降低而升高, 称为反相位工况。无论是正相位工况还是反相位工况, 当 i_{bj} 一定时, n_{oj} 随 CVT 转速是连续变化的, 称为“段”。随着正、反相位汇流排交替工作, 输出转速逐段连续升高。

2 传动效率计算

2.1 传动效率分析模型

多段金属带复合无级传动的效率是由各个元件的效率及每个分支的分流功率比来决定的。结合多段金属带复合无级传动简图, 可建立起正相位工作时系统效率的分析模型(图 2), 从各个分支的功率关系可得

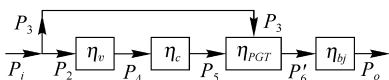


图 2 多段金属带复合无级传动正相位工作时的系统效率分析模型

Fig.2 Efficiency analytical model of multi-range composite CVT system working on the positive phases

$$P_1 - P_2 - P_3 = 0 \quad (1)$$

$$P_3 + P_5 - P_6 = 0 \quad (2)$$

其中 $P_1 = P_i$ $P_6 = P'_6 / \eta_{PGT}$

式中 P_i ——系统输入功率

P_6 ——忽略行星齿轮效率损失的输出功率

P'_6 ——行星齿轮实际输出的功率

η_{PGT} ——行星齿轮效率

对流过金属带 CVT 的功率分支进行分析, 可得

$$P_2 \eta_v \eta_c = P_5 \quad (3)$$

式中 η_v ——金属带 CVT 的效率

η_c ——从 CVT 从动轮到汇流行星排间的齿轮传动效率

由式(1)~(3)可得

$$\frac{P_6}{P_1} = \frac{1}{\frac{P_5}{P_6 \eta_v \eta_c} + 1 - \frac{P_5}{P_6}} \quad (4)$$

又因为 $P_6 \eta_{PGT} \eta_{bj} = P_o$ (5)

式中 P_o ——系统输出功率

所以, 正相位工况系统的总效率为

$$\eta_z = \frac{P_o}{P_i} = \frac{\eta_{PGT} \eta_{bj}}{\frac{P_5}{P_6 \eta_v \eta_c} + 1 - \frac{P_5}{P_6}} \quad (6)$$

2.2 转速计算

多段金属带复合无级传动的输出转速可用正相位工况和反相位工况的输出转速通式来表示, 由行星排转速关系式和连接关系(图 1)可得

$$n_{oj} = \frac{1}{(1 + k_z) i_{bj}} \left(\frac{k_z}{i_m} + \frac{1}{i_v i_c} \right) n_i \quad (7)$$

$$n_{oj+1} = \frac{1}{k_f i_{bj+1}} \left(\frac{1 + k_f}{i_m} - \frac{1}{i_v i_c} \right) n_i \quad (8)$$

第 j 段是正相位工况还是反相位工况, 不影响分析结果, 这里以第 j 段正相位工况为例。

2.3 分流功率比计算

系统由正向汇流排输出功率时, 流过金属带 CVT 的功率为

$$P_2 = 2\pi n_i T_{CVT} \quad (9)$$

式中 T_{CVT} ——输入到金属带 CVT 主动轮的扭矩
 忽略功率损失, 输入到传动系统的功率 P_i 等于输出的功率 P_o , 即 $P_i = P_6 = P_o$, 流过金属带的功率流也保持不变, 即 $P_2 = P_5$, 因此

$$P_{oj} = 2\pi n_{oj} T_{oj} \quad (10)$$

式中 T_{oj} ——第 j 段的输出扭矩

又 $T_{CVT}/T_{oj} = 1 / [i_v i_c (1 + k_z) i_{bj}]$ (11)

由式(7)、(9)、(10)、(11)可得出正相位工况时金属带的承载功率占总功率的比值为

$$\gamma_z = \frac{P_5}{P_6} = \frac{1}{k_z i_v i_c + 1} \quad (12)$$

同理可得反相位工况时金属带的承载功率占总功率的比值为

$$\gamma_f = \frac{P_5}{P_6} = \frac{1}{(1+k_f)i_v i_c - 1} \quad (13)$$

2.4 行星齿轮效率计算

系统所用的单行星排是二自由度机构,属于差动轮系,故计算其效率要考虑到每个分支的功率流。首先将太阳轮固定,齿圈作原动件,行星架作从动件,功率流由齿圈流向行星架,其效率为 η_{ca}^s ,用简便公式^[4-5]表示为

$$\eta_{ca}^s = \frac{\eta^H + k}{1+k} \quad (14)$$

其中

$$\eta^H = \eta_n \eta_w$$

式中 η_n ——内啮合齿轮对效率

η_w ——外啮合齿轮对效率

然后将齿圈固定,太阳轮作原动件,行星架作从动件,功率流由太阳轮流向行星架,其效率为 η_{sa}^c ,用简便公式表示为

$$\eta_{sa}^c = \frac{1+k\eta^H}{1+k} \quad (15)$$

则流过行星齿轮的效率可由图3得

$$P'_3 + P'_5 = P'_6 = P_6 \eta_{PGT} \quad (16)$$

其中

$$P'_3 = P_3 \eta_{ca}^s \quad (17)$$

$$\eta_f = \frac{\left[\frac{(1+k_f)i_v i_c - 1}{(1+k_f)i_v i_c} \frac{(1+k_f)\eta^H}{1+k_f\eta^H} + \frac{1}{(1+k_f)i_v i_c} \frac{(1+k_f)\eta^H}{\eta^H + k_f} \right] \eta_{bj}}{1 + \frac{1}{(1+k_f)i_v i_c - 1} - \frac{1}{(1+k_f)i_v i_c - 1} \eta_w \eta_c \left[\frac{(1+k_f)i_v i_c - 1}{(1+k_f)i_v i_c} \frac{(1+k_f)\eta^H}{1+k_f\eta^H} + \frac{1}{(1+k_f)i_v i_c} \frac{(1+k_f)\eta^H}{\eta^H + k_f} \right]} \quad (22)$$

式中 η_f ——反相位工况系统的总效率

3 设计实例与仿真

3.1 参数选择

设计时取等比式多段金属带复合无级传动的公比 $\phi = 1.6$, $i_c = 1$,为保证输出转速连续,计算得 $k_z = 2.267$, $k_f = 3.667$ 。后传动比参数的确定参照了CAS5-20型五挡手动变速器传动比,主要是为了满足车辆的动力性能要求,故取系统最大传动比为5.568^[6]。可得: $i_{b1} = 4.535$, $i_{b2} = 2.52$, $i_{b3} = 1.772$, $i_{b4} = 0.984$ 。根据以上数据和各关系式求得

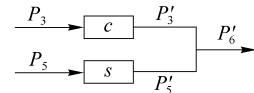


图3 行星齿轮功率流图

Fig.3 Power flows in planetary gear train

$$P'_5 = P_5 \eta_{sa}^c \quad (18)$$

由式(16)~(18)可得

$$\eta_{PGT} = \frac{P_3}{P_6} \eta_{ca}^s + \frac{P_5}{P_6} \eta_{sa}^c \quad (19)$$

又因为 $\frac{P_3}{P_6} = 1 - \frac{P_5}{P_6}$,再结合公式(12)、(14)、(15),可得行星齿轮的效率为

$$\eta_{PGT} = (1 - \gamma_z) \frac{\eta^H + k}{1+k} + \gamma_z \frac{1+k\eta^H}{1+k} \quad (20)$$

所以,由式(6)、(12)、(20)可得正相位工况工作时系统的总效率为

$$\eta_z = \frac{\left(\frac{k_z i_v i_c}{k_z i_v i_c + 1} \frac{\eta^H + k_z}{1+k_z} + \frac{1}{k_z i_v i_c + 1} \frac{1+k_z\eta^H}{1+k_z} \right) \eta_{bj}}{\frac{1}{(1+k_z i_v i_c) \eta_w \eta_c} + 1 - \frac{1}{k_z i_v i_c + 1}} \quad (21)$$

多段金属带复合无级传动反相位工作时会出现循环功率流,但反相位工况工作时的系统总效率的求解依然可以参照正相位工作时的推导模式,可得

各段输出转速和金属带承载功率占总功率的比值情况,计算结果见表1。

根据表1中数据,以操纵行程为横坐标、转速比为纵坐标绘制速比曲线如图4所示;以操纵行程为横坐标、金属带CVT承载功率占总功率的比值为纵坐标绘制功率比曲线如图5所示。

从图4中可知,系统的速比范围为 $R = 1.183/0.18 = 6.570$ 。

该速比范围和5挡变速箱相近,能够满足车辆的速比范围要求,若想继续扩大速比范围,可通过增加段位来实现。从图5中可知,无论是正相位工况

表1 各段输出转速比和金属带的承载功率占总功率的比值

Tab.1 Output speed ratio of each range and the power ratio between CVT and the input power

参数	I段	II段	III段	IV段
输出转速比 n_o/n_i	0.18~0.288	0.289~0.462	0.461~0.737	0.739~1.183
P_{CVT}/P	0.15~0.469	0.094~0.75	0.15~0.469	0.094~0.75

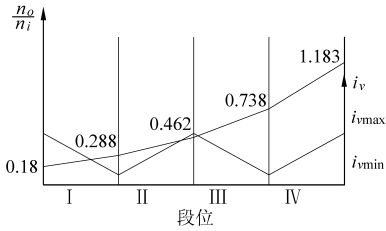


图 4 多段金属带复合无级传动速比曲线

Fig. 4 Speed curves of multi-range composite CVT system

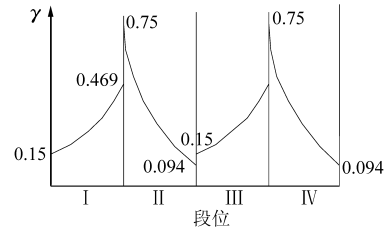


图 5 多段金属带复合无级传动各段分流功率比曲线

Fig. 5 Power ratio curves of the multi-range composite CVT system in each range

还是反相位工况,系统输出功率都大于流过 CVT 的功率,正相位工况时输出功率能达到 CVT 承载功率的 6.67 倍;反相位工况时能达到 CVT 承载功率的 10.6 倍,解决了金属带功率范围窄的缺陷,扩大了系统的功率范围。

3.2 效率仿真

运用 Matlab 仿真软件,建立多段金属带复合无级传动系统效率的仿真框图,其中金属带效率仿真数学模型参照文献[7~13],总效率框图如图 6。

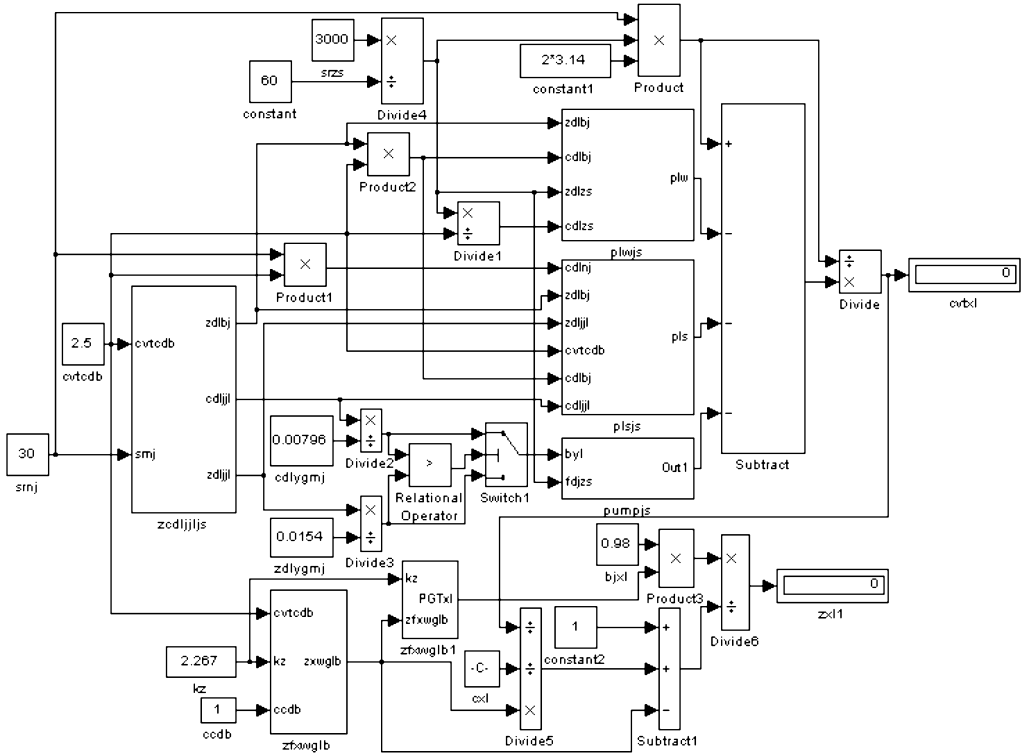


图 6 系统总效率仿真图

Fig. 6 Simulation of overall transmission efficiency

运用 Microsoft Excel 软件,对仿真的数据进行处理,可得到输入转速 $n_i = 3\ 000\ \text{r/min}$,在不同的传递转矩情况下,系统效率随金属带传动比变化的关系曲线(图 7),以及在不同的金属带传动比情况下,系统效率随系统传递扭矩变化的关系曲线(图 8);图 9 则是在金属带传动比 $i_v = 2.0$ 时,在不同的传递转矩情况下,系统效率随输入转速变化的关系曲线。

从图 7 中可以看出,多段金属带复合无级传动无论处于正相位工况还是反相位工况,效率都明显高于金属带 CVT 传动的效率。在金属带传动比 $i_v = 2.5$ 时,系统效率与金属带 CVT 传动的效率差最为明显。在多段金属带复合无级传动各段位的衔

接点处,效率出现不连续现象,在金属带传动比 $i_v = 0.5$ 时,不衔接现象更为明显。这是由正、反相位工况的功率比在衔接点处不连续以及功率流形式不同造成的。

由图 8 知,金属带 CVT 传动的效率随传递扭矩的增加而增加,在传动比 $i_v = 1.0$ 时金属带 CVT 有最大效率值;多段金属带复合无级传动无论处于正相位工况还是反相位工况,系统效率都随传递扭矩的增加而增加;传递扭矩越小,系统与金属带 CVT 传动的效率差越明显;并且随金属带传动比 i_v 的减小,系统与纯金属带 CVT 传动的效率差越小。由图 9 知,多段金属带复合无级传动无论处于正相位工况还是反相位工况,系统效率随输入转速的增加而增加,但是

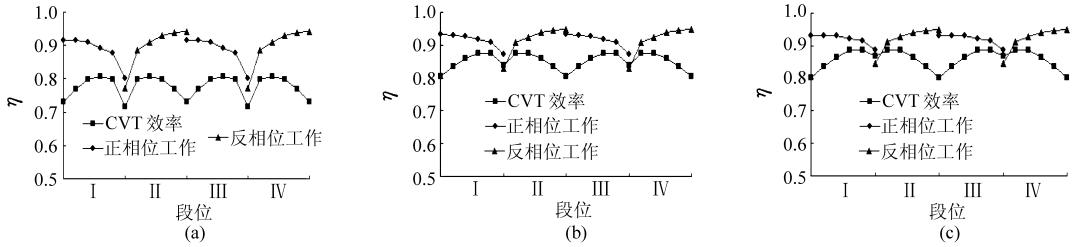


图7 多段金属带复合无级传动系统效率随金属带传动比变化曲线

Fig.7 Overall transmission efficiency curves when the transmission ratio of metal pushing V-belt CVT changes

(a) $T = 30 \text{ N}\cdot\text{m}$ (b) $T = 60 \text{ N}\cdot\text{m}$ (c) $T = 90 \text{ N}\cdot\text{m}$

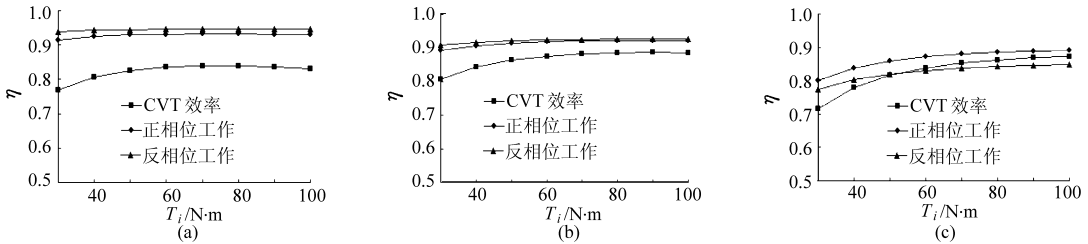


图8 多段金属带复合无级传动系统效率随传递扭矩变化曲线

Fig.8 Overall transmission efficiency curves when the input torque changes

(a) $i = 2.0$ (b) $i = 1.0$ (c) $i = 0.5$

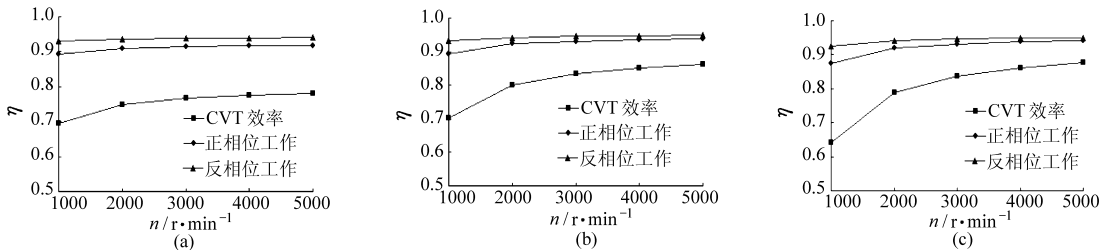


图9 多段金属带复合无级传动系统效率随转速变化曲线

Fig.9 Overall transmission efficiency curves when the input speed changes

(a) $T = 30 \text{ N}\cdot\text{m}$ (b) $T = 60 \text{ N}\cdot\text{m}$ (c) $T = 90 \text{ N}\cdot\text{m}$

效率变化不大,比金属带 CVT 受转速影响小。

4 结束语

通过对多段金属带复合无级传动简图的分析,建立了其正反相位工况系统效率的计算模型。利用

Matlab 仿真软件建立正反相位工况系统效率的仿真框图,得到了系统效率与纯金属带 CVT 传动的效率、金属带传动比、传递转矩以及输入转速的规律曲线。结果表明:多段金属带复合无级传动的效率明显高于纯金属带 CVT 的传动。

参 考 文 献

- 胡建军,秦大同,刘振军.金属带式无级变速传动速比变化特性研究[J].汽车工程,2003,25(1):25~29.
Hu Jianjun, Qin Datong, Liu Zhenjun. A study on the speed ratio changing characteristic of a metal belt continuously variable transmission [J]. Automotive Engineering, 2003, 25(1): 25~29. (in Chinese)
- 李贤彬.汽车无级变速技术的发展现状与展望[J].邢台职业技术学院学报,2005,22(1):24~26.
Li Xianbin. Actuality and development of technologies in automobile continuously variable transmission [J]. Journal of Xingtai Vocational and Technical College, 2005, 22(1): 24~26. (in Chinese)
- 黄向东,张小琴,罗玉涛,等.功率分流双向汇流的新型复合无级变速系统[J].华南理工大学学报:自然科学版,2002,30(11):106~112.
Huang Xiangdong, Zhang Xiaoqin, Luo Yutao, et al. Novel composite CVT system featuring power split and dual-mode confluence [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2002, 30(11): 106~112. (in Chinese)
- 桂乃磐,郭惠昕,罗佑新.2K-H单向封闭差动无级变速器效率计算方法的比较研究[J].机械研究与应用,2002,15(1):25~29.

参 考 文 献

- 1 迪克曼,海因茨. 工业油化学基础-天然油脂技术综论[M]. 北京:中国轻工业出版社,1995:8~100.
- 2 李玉柱,于海业,牛序堂,等. 葵花籽生物柴油超临界甲醇法制备试验与优化[J]. 农业机械学报,2008,39(5):74~76,85.
Li Yuzhu, Yu Haiye, Niu Xutang, et al. Experiment and optimization on preparation of biodiesel from sunflower seed oil by supercritical methanol method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(5):74~76,85. (in Chinese)
- 3 董英,林琳,徐向明. 米糠油生物柴油-水乳化油的稳定性及燃料性能[J]. 农业机械学报,2008,39(3):32~36.
Dong Ying, Lin Lin, Xu Xiangming. Stability and fuel properties of rice bran oil biodiesel-water emulsion fuel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(3):32~36. (in Chinese)
- 4 董英,林琳,徐斌. 柴油-米糠油生物柴油-甲、乙醇混合燃料特性实验[J]. 农业机械学报,2007,38(11):26~30,35.
Dong Ying, Lin Lin, Xu Bin. Experimental study on fuel properties of diesel-rice bran oil biodiesel-ethanol blend [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(11):26~30,35. (in Chinese)
- 5 董英,林琳,徐向明. 米糠油制备生物柴油的工艺优化和燃料特性[J]. 农业机械学报,2007,38(10):80~83,90.
Dong Ying, Lin Lin, Xu Xiangming. Optimum technology preparation of biodiesel from rice bran oil and fuel properties [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(10):80~83,90. (in Chinese)
- 6 Corma A, Fornes V, Matin-Aranda R M, et al. Determination of base properties of hydrotalcites: condensation of benzaldehyde with ethylacetoacetate[J]. Appl. Catal., 1992,134:58~65.
- 7 Jitputti, Kitiyanan, Rangsunvigit. Transesterification of crude palm kernel oil and crude coconut oil by different solid catalysts[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 116(1): 61~66.
- 8 岳 ■,王兴国,金青哲,等. 固体酸性催化剂催化生物柴油合成反应性能的比较[J]. 中国油脂,2006,31(7):63~65.
- 9 GB5530—1998 动植物油脂酸价及酸度测定[S].
- 10 GB/T 386—1991 柴油着火性质测定法(十六烷值)[S].
- 11 GB/T 267—1988 石油产品闪点与燃点测定法(开口杯法)[S].

(上接第 42 页)

- 5 杨延栋. 渐开线齿轮行星传动[M]. 成都:成都科技大学出版社,1986.
- 6 陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- 7 程乃士,刘温. 金属带式无级变速器传动效率的试验研究[J]. 东北大学学报:自然科学版,2000, 21(4):394~396.
Cheng Naishi, Liu Wen. Experimental study of transmission efficiency for metal pushing V-belt type CVT [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2000, 21(4):394~396. (in Chinese)
- 8 孙德志,谭振江. 金属带式无级变速器传动效率的分析[J]. 东北大学学报:自然科学版,2002, 23(1):53~56.
Sun Dezhi, Tan Zhenjiang. Analysis of transmission efficiency for metal pushing V-belt type CVT [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2002, 23(1):53~56. (in Chinese)
- 9 廖建,孙冬野,秦大同. 金属带式无级变速器传动效率的理论分析[J]. 重庆大学学报,2003, 26(3):12~15.
Liao Jian, Sun Dongye, Qin Datong. Efficiency analysis of steel pushing V-belt continuously variable transmission in theory [J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(3):12~15. (in Chinese)
- 10 Fujii T A. Study of a metal pushing V-belt type CVT part 1: relation between transmitted torque and pulley thrust[C]. SAE Paper 930666, 1993.
- 11 Fujii T A. Study of a metal pushing V-belt type CVT part 2: compression force between metal blocks and ring tension[C]. SAE Paper 930667, 1993.
- 12 何晓春,冯樱. 金属带式无级变速传动的动力学计算[J]. 湖北汽车工业学院学报,2000,14(1):14~19.
He Xiaochun, Feng Ying. Dynamic calculation of continuously variable transmission [J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2000, 14(1):14~19. (in Chinese)
- 13 孙冬野,秦大同,廖建. 金属带-行星齿轮无级变速传动特性效率分析[J]. 农业机械学报,2004, 35(5):12~15.
Sun Dongye, Qin Datong, Liao Jian. Analysis of transmission efficiency characteristics of a metal belt and planetary gear continuously variable transmission system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5):12~15. (in Chinese)