

基于直接驱动和自增力技术的 AMT 换挡系统*

葛文庆¹ 李 波¹ 赵彦峻² 刘泽砚¹

(1. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 淄博 255049; 2. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049)

摘要: 为进一步提高电控机械式自动变速器(AMT)的换挡品质和系统鲁棒性,提出一种应用直驱自增力换挡系统的 AMT 方案。设计了直接驱动装置的结构并对其性能进行测试,针对直接驱动技术存在的问题,研究一种具有自增力和提高换挡系统鲁棒性功能增力式同步器,参考实车的相关参数,研制了直驱自增力换挡系统的原理性样机,完成了技术方案可行性与功能性的试验研究。结果表明,追求的换挡品质相同时,直驱自增力换挡系统同步阶段需要驱动装置提供的最大瞬时驱动力较小,降低了换挡过程中的能量损耗;当增力斜面角 $\theta = 116^\circ$ 时,增力式同步器的力放大系数 n_F 约为 1.54,实现了换挡系统放大驱动装置输出力和提高换挡系统鲁棒性的功能,为缩小驱动装置体积和降低换挡控制系统设计难度奠定了良好的技术基础。

关键词: 电控机械式自动变速器 直接驱动技术 增力式同步器 换挡能耗

中图分类号: U463.212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0001-07

引言

电控机械式自动变速器(AMT)由传统手动变速器和电控自动变速系统组成,具有操作简单、传动效率高、成本低和易于制造等优点,但也存在动力中断时间较长和换挡冲击较大等问题^[1-2]。文献[3]设计了一种液压装置直接驱动的液动式 AMT,通过对液动换挡系统的精确控制,实现无选挡过程的进退挡操作往复运动,与传统液压式自动变速器相比,缩短了汽车运行过程中的动力中断时间。

近年来,一类基于直驱技术的动态响应速度快、换挡能耗低的电控机械式自动变速器(直驱 AMT)引起了越来越多学者的关注^[4-6]。文献[7]介绍了一种动磁式二自由度执行器直接驱动的全电式 AMT,集直动和转动功能于一体的驱动装置直接驱动换挡轴,完成选换挡操作,与传统全电式 AMT 相比,提高了换挡系统的传动效率和可控性。直接驱动技术取消了动力传动的中间环节,简化了系统结构,使换挡系统具有高传动效率、高响应速度、低能量损耗和低运行噪声等优点^[8],但对驱动装置最大瞬时驱动力的要求较高^[9-10],且由于扰动的直接介入和无缓冲运行等问题的存在,加大了换挡控制系统的设计难度。

为进一步提高 AMT 的换挡品质,减小换挡过程中的能量损耗和换挡控制系统的设计难度,降低直

接驱动技术对驱动装置最大瞬时驱动力的要求,提出一种基于直接驱动和自增力技术的 AMT 方案,设计直接驱动装置的结构并测试其工作特性,针对直接驱动技术带来的问题设计一种新型增力式同步器结构,在自主研制的系统样机上,配以合适的换挡控制策略,完成直驱自增力换挡系统可行性与功能性的试验研究。

1 基于直接驱动和自增力技术的 AMT

1.1 方案设计

考虑变速器布置空间和换挡品质的要求,提出的 AMT 总体结构方案如图 1 所示,包括发动机、离合器、变速器总成、车辆负载和换挡系统,其结构简单,生产与改装成本低,且易于实现。换挡系统的性能是 AMT 性能的决定因素之一,其结构主要包括直接驱动装置、换挡拨块、拨叉轴、拨叉和增力式同步器等。驱动装置具备直动与转动的双重功能,直接驱动换挡拨块完成选换挡操作,图中 a、b、c 为直接驱动装置和换挡拨块相连的 3 个不同位置,对应控制不同的挡位;增力式同步器具有自增力和提高换挡系统鲁棒性的功能。

目前,关于直驱 AMT 换挡驱动装置的研究主要以动磁式结构的电磁直线执行器为主,此类换挡驱动装置存在动子质量大、推力波动严重及难于控制等问题^[11],研究一种低动子质量、高功率密度及易

收稿日期: 2014-04-11 修回日期: 2014-05-05

* 国家自然科学基金资助项目(51306090)

作者简介: 葛文庆,副教授,博士,主要从事发动机喷射装置理论及控制技术、车辆变速器理论及控制技术研究, E-mail: gwq@sdut.edu.cn

于控制的直接驱动装置对直驱 AMT 的技术进步具有重要意义。

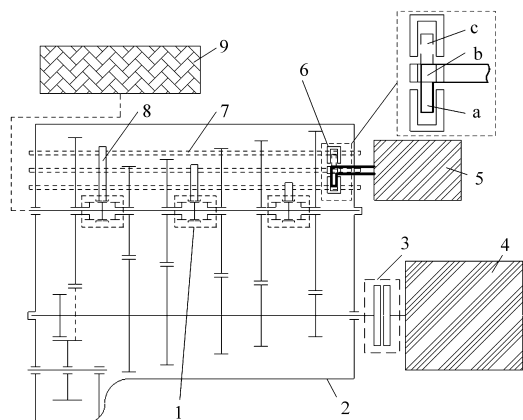


图1 AMT 总体结构示意图

Fig.1 Diagram of AMT overall structure

1. 增力式同步器 2. 变速器总成 3. 离合器 4. 发动机 5. 直接驱动装置 6. 换挡拨块 7. 拨叉轴 8. 拨叉 9. 车辆负载

1.2 换挡系统的设计目标

换挡系统设计包括驱动装置设计和换挡控制系统设计。驱动装置在满足驱动位移 s 和驱动力 F 要求的同时,需具有较小的体积和较高的传动效率,采用直接驱动技术可以更好地满足此项要求;换挡控制系统设计时需要满足换挡品质和同步器使用寿命的要求,换挡时间 t 和换挡过程冲击度 j 是评价换挡品质的重要指标,而换挡同步阶段单位面积滑磨功 W_A 是评价同步器使用寿命的关键参数。各参数均需满足相关设计要求^[12]。

2 直接驱动装置设计与性能研究

考虑 AMT 换挡系统驱动特性的要求,并能充分发挥直接驱动技术的优势,直接驱动装置设计时应用“电—磁—力”转换特性,直接将电能转换为直线运动与旋转运动所需的机械能,直动与转动驱动同一根执行器轴,且运动时互不干涉,具有结构简单、体积小、运动部件惯性小、可控性强、传动效率高等优点。直动部分采用动圈式结构,总质量实测为 0.671 kg,较常规全电式 AMT 驱动装置(约 1 kg)减小 30% 以上;旋转部分采用动铁式结构,总转动惯量为 $7.04 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,较常规全电式 AMT 驱动装置(约 $3 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)减小 80% 以上。较小的直动质量和转动惯量可使直接驱动装置获得较高的响应速度,其整体结构模型如图 2 所示。

直动部分永磁体采用 Halbach 阵列排列方式^[13],可以增强气隙内的磁通密度,提高驱动装置功率密度的同时,减小驱动装置位移变化引起的推力变化量,从而降低了直接驱动装置端部效应对换挡系统鲁棒性的影响。

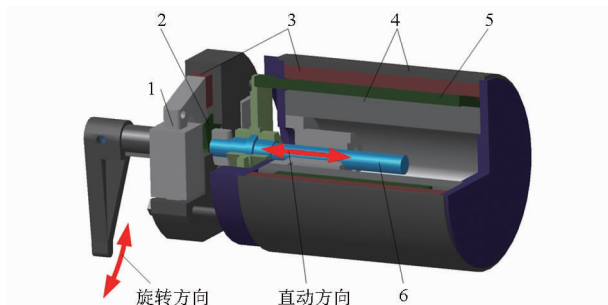


图2 直接驱动装置整体结构模型

Fig.2 Overall structure model of direct-drive device

1. 旋转磁轭及线圈组件 2. 旋转衔铁 3. 永磁体
4. 内外磁轭 5. 直动组件 6. 执行器轴

设计相应的性能测试台架,研究驱动装置的静态特性和动态特性。结果表明,驱动装置的直动组件 8 ms 内可使执行器轴的直线位移达到 10 mm,最大驱动力超过 1 200 N,且最大驱动位移达到 25 mm;旋转衔铁在 14 ms 内可使执行器轴转过 22° ,最大驱动力超过 $2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。由此可知,研究的直接驱动装置拥有较强的驱动性能和较好的动态特性,满足 AMT 换挡系统的驱动要求;可在较短的时间内达到较大的瞬时驱动力,充分发挥了直接驱动技术的优势。

3 增力式同步器设计

直接驱动技术存在扰动直接介入和无缓冲运行等问题,主要体现在换挡时负载扰动、电源波动和驱动装置的端部效应等对换挡系统鲁棒性的影响。车辆实际行驶过程中可能出现运行工况突变、自身震动和变速箱内润滑油阻力变化等现象,使被同步部分负载发生扰动,此时要求驱动装置及时调整输出的驱动力,进而加大了换挡控制系统的设计难度。

以解决直接驱动技术带来的问题和降低换挡能耗为目标,设计一种具有自增力功能和提高换挡系统鲁棒性的增力式同步器,利用同步阶段同步环受到的切向力差值,放大驱动装置输出的驱动力。理论研究表明^[14],换挡同步阶段需要的峰值驱动力为其它阶段的 2~4 倍,减小同步阶段需要驱动装置输出的最大瞬时驱动力,在有效抑制直接驱动技术引起的电源波动,降低换挡能耗的同时,提高换挡系统的鲁棒性,进而降低换挡控制系统的设计难度。

传统同步器包括接合套、花键毂、定位滑块、同步环和目标挡齿轮齿圈等,同步阶段同步环的受力情况如图 3 所示。

图中 n_H ——输出轴上花键毂的转速

n_C ——与输入轴相连的目标挡齿轮转速,换挡过程中 $n_C > n_H$

F_{ss} ——同步阶段驱动装置输出的驱动力

$$\begin{cases} F_s = n_F F_{ss} \\ n_F = 1 + \tan \frac{\theta}{2} \left(\frac{\mu R_s}{R_{sp} \sin \alpha} - \frac{1}{\tan \frac{\beta}{2}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中 μ ——同步环与目标挡齿轮工作锥面间的摩擦因数

R_s ——同步环摩擦锥面的有效工作半径

α ——同步环摩擦锥面角的一半

β ——同步器的锁止角

从中可以看出,设计的增力式同步器力放大系数 n_F 的大小由其本身的设计参数决定。

4 系统样机

在前述设计和理论分析的基础上,研制了具有直接驱动特性和自增力功能的 AMT 换挡系统样机,如图 7 所示。增力斜面角 $\theta = 116^\circ$,将改装前传统同步器的相关参数代入公式(3)可得力放大系数 n_F 的理论值为 1.537。

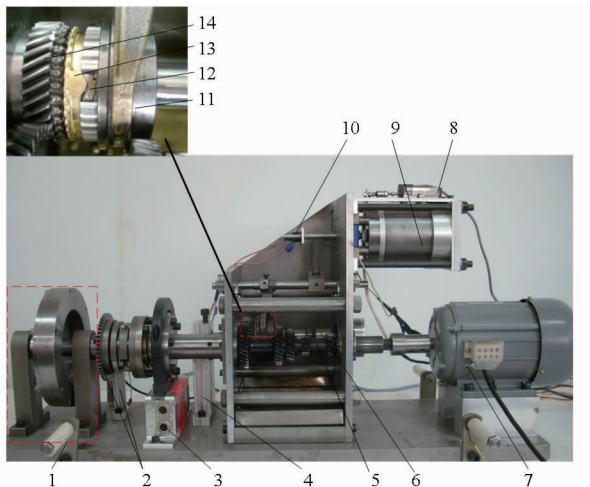


图 7 直驱自增力换挡系统测试台架

Fig. 7 Test bench of direct-drive and self-energizing shift system

1. 惯量模拟装置 2. 转速传感器 3. 转矩传感器 4. 锁死装置
5. 输入轴 6. 输出轴 7. 变频电动机 8. 位移传感器 9. 直接驱动装置
10. 角位移传感器 11. 接合套 12. 增力环 13. 同步环 14. 目标挡齿轮

样机主要由直接驱动装置、模拟输入轴转速的变频电动机、输入端当量转动惯量模拟装置、输入轴及其相连齿轮、增力式同步器、输出轴及其相连齿轮、输出轴锁死装置和信号测试装置,以及控制器、上位机等部分组成。

控制器选用具有丰富接口的 ARM 微控制器,位移传感器选用具有抗干扰强、成本低等特点的导电塑料位移传感器,扭矩传感器选用德国 HBM 公司 T40 扭矩传感器,其测试精度满足直驱自增力换

挡系统的试验要求。惯量模拟装置设计可模拟 $0.01 \sim 0.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 范围内的被同步部分转动惯量,变频电动机选型最大驱动转速可达 1440 r/min ,使系统样机可模拟直驱自增力换挡系统应用在不同车型上的换挡过程,适用性强,其工作原理如图 8 所示。

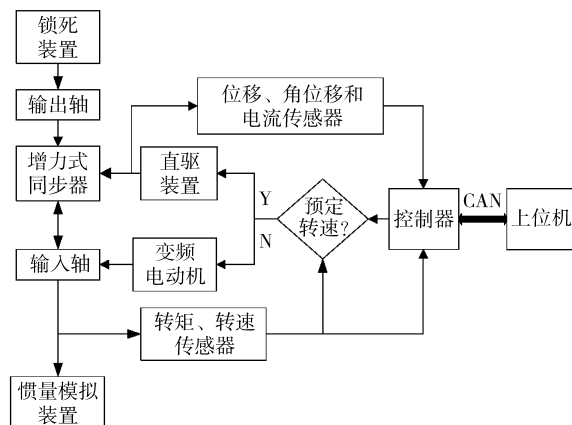


图 8 系统样机工作原理图

Fig. 8 Working principle diagram of system prototype

试验前设定所需模拟的惯量值和同步前输入输出轴的转速差,通过控制器开启变频电动机驱动输入轴转动,当转速传感器的反馈信号达到预定值时,关闭变频电动机并同时开启直接驱动装置,控制器接收各传感器的反馈信号,实现换挡过程的实时控制。

应用直接驱动和自增力技术的换挡系统样机是在应用直接驱动技术的换挡系统样机基础上改装的,目的是通过两种换挡系统的性能对比,验证直驱自增力换挡系统的优越性。

5 试验

通常情况下,AMT 换挡过程中的换挡时间、换挡冲击和同步器使用寿命之间是相互矛盾的,试验时需通过精心设计的换挡控制策略加以协调。对换挡过程的分段研究结果表明,各个阶段受到的阻力及影响因素是不同的,根据各个换挡阶段控制目标的不同,可将其分为两种类型的换挡阶段,即存在轴向位移的非同步阶段和不存在轴向位移的同步阶段,为充分挖掘提高换挡同步阶段换挡品质的潜力,对换挡过程采用分阶段控制策略。

非同步阶段的位移量可在静态条件下进行标定,控制系统的控制目标应是尽量缩短非同步阶段的运动时间,并且使各个非同步阶段临近结束时的运动速度较低,避免运动速度过快造成较大冲击,此时应用位移传感器实时测量换挡机构的位移,采用换挡系统首先以直接驱动装置最大加速性能加速,到达最大速度后再减速缓冲的 PD 闭环控制策略,既能快速消除间隙,又能有效控制运动速度,在试验

过程中取得了较好的控制效果;同步阶段的控制策略主要是控制同步过程的冲击度 j 和单位面积滑磨功 W_A 不超过最大许用值,冲击度 j 与同步转矩的变化率有关^[15],单位面积滑磨功 W_A 主要由同步转矩、同步时间和输入输出轴转速差决定^[16]。同步阶段的驱动力采用双输入单输出的模糊控制,输入量是转速差和输出轴转速变化规律的二次微分,输出量是调节直接驱动装置两端电压的占空比大小,实现驱动力大小的实时调整,通过模糊控制方法获得某次换挡时驱动力大小后,对直接驱动装置采用电流闭环控制,使驱动力尽量保持稳定,避免较大波动产生冲击。

5.1 自增力功能

当输入输出轴转速差 $\Delta n = 500 \text{ r/min}$,被同步部分转动惯量 $J_s = 0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 时,以获得相同的换挡品质为目标,分别对装有增力式同步器和传统同步器的两种 AMT 换挡系统进行试验研究,得到的试验结果如图 9 所示。

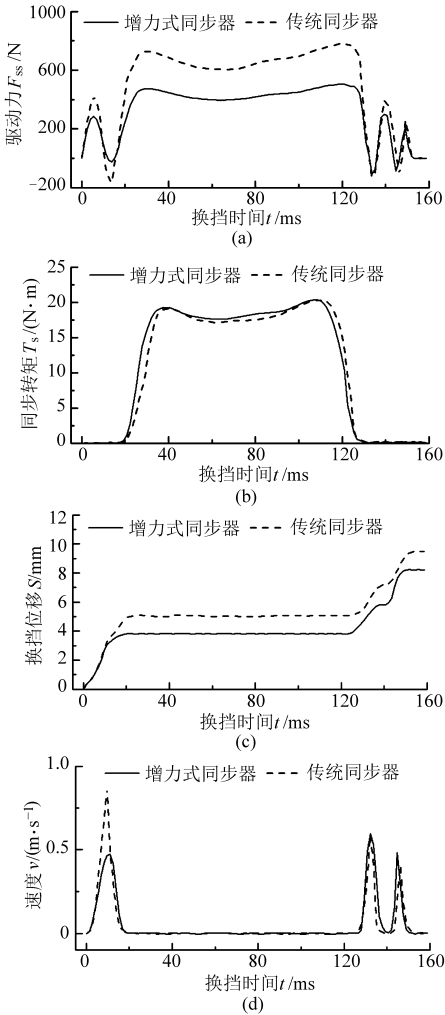


图 9 自增力功能试验结果

Fig. 9 Test results of the function of amplifying force

(a) 加载的驱动力规律 (b) 同步转矩试验结果
(c) 换挡位移试验结果 (d) 运动速度试验结果

图 9a、9b 分别为两种 AMT 换挡系统驱动力与同步转矩的换挡过程试验结果,应用增力式同步器的 AMT 换挡系统放大了同步阶段驱动装置输出的驱动力,力放大系数 n_F 的试验结果约为 1.542,与理论计算值相差不多,验证了增力式同步器的自增力功能。

从图 9a 和图 9c 中可以看出,当应用增力式同步器的 AMT 换挡系统同步阶段最大瞬时驱动力达到 500 N 时,同步时间约为 105 ms,总进挡时间控制在 150 ms 左右,而获得相同换挡品质时,应用传统同步器的 AMT 换挡系统需要驱动装置提供的最大瞬时驱动力超过 770 N;图 9c 中两种换挡系统的换挡位移存在差异,其主要原因在于,传统同步器内部布置空间有限,改装为增力式同步器时,主动缩短了同步阶段开始前同步环的位移。

图 9d 为非同步阶段驱动装置运动速度 v 的试验结果,各阶段临近结束时,将驱动装置的运动速度控制在较小的范围内,且变化较平缓,所用控制策略有效减小了换挡冲击并降低了打齿现象发生的概率。增力式同步器缩短了同步阶段开始前换挡机构的运动位移,当加载如图 9a 中所示驱动力规律时,获得的运动速度变化更为平缓,进一步提高了 AMT 的换挡品质。

上述试验结果表明,获得相同换挡品质时,应用传统同步器的换挡系统与应用增力式同步器的换挡系统需要驱动装置提供的最大瞬时驱动力分别为 771 N 和 500 N,此时换挡驱动装置的能耗分别为 47.7 J 和 18.2 J。应用增力式同步器的 AMT 换挡系统需要驱动装置提供的最大瞬时驱动力较小,且降低了换挡过程中的能量损耗。

5.2 提高换挡系统鲁棒性功能

直接驱动技术使外部因素的扰动直接介入 AMT 换挡系统,加大了换挡控制系统的设计难度。为保证车辆实际运行中同一挡位多次换挡的换挡品质一致,每次换挡需要同步阶段换挡驱动装置提供的同步转矩存在一定差异。

将图 10a 的驱动力调整信号分别叠加到图 9a 中两种 AMT 换挡系统的驱动力信号上,试验得到调整后的同步转矩变化规律如图 10b 所示,从中可以看出,AMT 换挡系统应用增力式同步器时,同步转矩的调整幅度较大,抵御外部扰动的能力较强,提高了换挡系统的鲁棒性,进而降低了换挡控制系统的设计难度;定义 n_R 为换挡系统鲁棒系数,则

$$n_R = \frac{A_{\max-Se}}{A_{\max-Tr}} \tag{4}$$

式中 $A_{\max-Se}$ ——应用增力式同步器时同步转矩的最大调整幅值

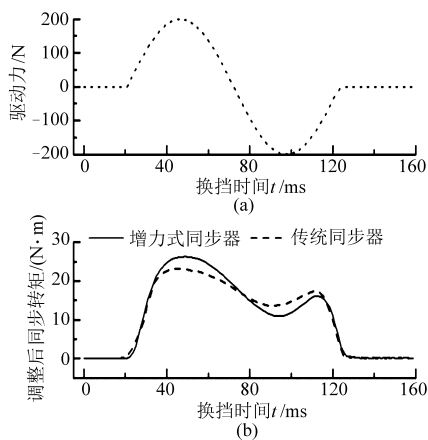


图10 提高换挡系统鲁棒性功能试验结果

Fig. 10 Test results of the function of improving the shift system robustness

$A_{\max-Tr}$ ——应用传统同步器时同步转矩的最大调整幅值

由增力式同步器的工作原理可知,换挡系统鲁棒系数 n_R 和力放大系数 n_F 相同,均由增力式同步器的设计参数决定,且换挡系统鲁棒系数越大,换挡系统的鲁棒性越好。

6 结论

(1) 针对 AMT 和直接驱动技术的研究现状,提出了一种应用直驱自增力换挡系统的 AMT 总体结构方案,在换挡系统设计时引入直接驱动技术,减小了驱动装置动子的直动质量和转动惯量,进一步提高了换挡系统的响应速度、运动精度和传动效率。

(2) 在分析直接驱动技术工作特点的基础上,自主设计了一种具有自增力和提高换挡系统鲁棒性功能的增力式同步器,增力斜面角 $\theta = 116^\circ$ 时,力放大系数 n_F 约为 1.54,降低了直驱换挡系统对驱动装置最大瞬时驱动力的要求,且仍有进一步提高的潜力。

(3) 研制了应用直接驱动技术和增力式同步器的 AMT 换挡系统样机,在满足换挡品质设计要求的换挡控制策略控制下,完成了直驱自增力换挡系统的可行性与功能性试验。研究表明,追求的换挡品质相同时,直驱自增力换挡系统需要驱动装置提供的驱动力较小,在降低换挡能耗的同时,提高了换挡系统的鲁棒性,为进一步缩小驱动装置体积和降低换挡控制系统设计难度奠定了良好的技术基础。

参考文献

- 何忠波,白鸿柏. AMT 技术的发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2007,38(5):181-186.
He Zhongbo, Bai Hongbai. Automatic mechanical transmission technique development actuality and expectation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(5): 181-186. (in Chinese)
- 叶明,秦大同,刘振军. 轻度混合动力 AMT 系统换挡品质控制[J]. 机械工程学报,2009,45(5):108-114.
Ye Ming, Qin Datong, Liu Zhenjun. Shift performance control for mild hybrid electric vehicle equipped with automatic manual transmission[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 108-114. (in Chinese)
- 刘振军,秦大同,胡建军. 重型车辆电控机械式自动变速系统设计与应用[J]. 农业机械学报,2011,42(8):7-14.
Liu Zhenjun, Qin Datong, Hu Jianjun. Design and application of heavy truck AMT system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(8): 7-14. (in Chinese)
- 贺红林,占晓煌,刘文光,等. 直接驱动机器人自适应-PD 复合运动控制研究[J]. 农业机械学报,2014,45(5):271-277.
He Honglin, Zhan Xiaohuang, Liu Wenguang, et al. Robot control using a hybrid controller composed of an adaptive controller and a PD controller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 271-277. (in Chinese)
- 李波,常思勤,林树森. 电磁执行器直接驱动的 AMT 换挡机构[J]. 农业机械学报,2013,44(10):29-35.
Li Bo, Chang Siqin, Lin Shusen. Research of shifting mechanism for AMT direct driven by electromagnetic linear actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 29-35. (in Chinese)
- 席军强,丁华荣,陈慧岩. ASCS 与 AMT 的历史、现状及其在中国的发展趋势[J]. 汽车工程,2002,24(2):89-93.
Xi Junqiang, Ding Huarong, Chen Huiyan. The history and present status of ASCS and AMT and their development trend in China [J]. Automotive Engineering, 2002, 24(2): 89-93. (in Chinese)
- Turner A, Ramsay K, Clark R, et al. Direct-drive rotary-linear electromechanical actuation system for control of gearshifts in automated transmissions[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2007, 2007:267-272.
- 魏华. 直驱伺服关键技术和应用[D]. 北京:北京交通大学,2007.
Wei Hua. The key technology and application of direct-drive servo[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- Tessarolo A, Bruzzese C, Mazzuca T, et al. A novel fault-tolerant high-thrust inverter-controlled permanent magnet linear actuator as a direct-drive for shipboard loads[C]//2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2013:459-463.
- 叶云岳. 高效节能的直驱技术及其应用[C]//中国电工技术学会学术年会,2011:650-652.
Ye Yunyue. Technology and application of direct-drive high energy efficient [C]// China Electrotechnical Society Annual Conference, 2011: 650-652. (in Chinese)
- Jin P, Fang S, Lin H, et al. A novel linear and rotary Halbach permanent magnet actuator with two degrees-of-freedom[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(7): 07E725.

12 Naunheimer H, Bertsche B, Ryborz J, et al. Automotive transmissions second edition[M]. Heidelberg: Springer Verlag, 2010.

13 Liu Liang, Chang Siqin. Improvement of valve seating performance of engine's electromagnetic valvetrain[J]. Mechatronics, 2011,21(7):1234 – 1238.

14 Li Bo, Chang Siqin, Lin Shusen. Analysis and simulation of gear shift for an AMT based on 2-DOF EMA[C] //2011 International Conference on Electrical and Control Engineering(ICECE), 2011:1994 – 1997.

15 孙贤安,吴光强. 双离合器式自动变速器车辆换挡品质评价系统[J]. 机械工程学报,2011,47(8):146 – 151.
Sun Xianan, Wu Guangqiang. Shifting quality evaluation system for dual clutch transmission vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8):146 – 151. (in Chinese)

16 刘有德. 汽车同步器粉末冶金同步环用湿式铜基摩擦材料[D]. 杭州:浙江大学,2005.
Liu Youde. Powder metallurgy synchronization ring with the wet friction material of synchronizer [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2005. (in Chinese)

AMT Shift System Based on Direct-drive and Self-energizing Technology

Ge Wenqing¹ Li Bo¹ Zhao Yanjun² Liu Zeyan¹

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China
2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to further improve shifting quality and system robustness of automated manual transmission (AMT), an AMT system program based on direct-drive and self-energizing shifting system is given. These technical measures can improve the compactness of the system and the shift quality of AMT, at the same time, the shifting energy loss happening in the process of gear switching is reduced greatly. The key technologies of shift system based on direct-drive technology are researched by theoretical analysis, simulation and experiment in this thesis. The structure of direct-drive device is designed, and then, the performance tests have been completed. To solve the inherent problems of direct-drive technology, a servo synchronizer with the function of self-energizing and improving the shifting system robustness is studied. The principle prototype of self-energizing shifting system is developed reference to real vehicle parameters. The universal test bench for AMT shift system based on 2-DOF EMA has been constructed. The feasibility, functionality and versatility of AMT shift system based on direct-drive technology are verified in the last. The results show that the maximum instantaneous force provided by self-energizing shifting system is smaller than traditional shifting system in the same shifting quality, and the shifting energy loss can be reduced greatly. The force amplification coefficient n_F is nearly 1.54 when the energizing bevel angle θ is equal to 116° . For the direct-drive automated mechanical transmission, the upshift time is controlled in nearly 150 ms and the synchronization time is controlled at 105 ms when the rotary speed difference is 500 r/min, the moment of inertia is $0.04\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ and the maximum instantaneous force reaches 770N. At this moment, the maximum instantaneous force provided by shift driving device of direct-drive and self-energizing shift system is 500 N, it has been reduced nearly 35%. Thus, the functions of amplifying force output by driving device and improving the shifting system robustness are implemented. It has laid a good technical foundation for decreasing the volume of driving device and reducing the difficulty of shifting control system design.

Key words: Automated manual transmission Direct-drive technology Servo synchronizer Shift energy loss