

# 采用闭式液压系统的工程车辆传动系试验台

同济大学 机械工程学院 吴仁智 刘凯杰 耿令新 刘 钊 朱玉田

**摘要:**电液比例控制的变量液压泵和电控变量液压马达组成闭式液压传动系统,液压传动与机械传动系统(变速器、车桥等)组成工程车辆传动系试验台。试验台主要创新点体现在电液比例控制的液压泵和液压马达系统、复合变速系统、CAN 总线控制与 LCD 显示、液压冷却与转向控制等方面。试验台可进行的研究包括:研究电液比例控制技术、液压传动系统在工程车辆上的性能、特点等;研究液压泵与液压马达、液压泵与动力系统之间的功率匹配问题;研究复合变速系统的运动学、动力学特性,特别是在各种工况条件下的复合变速系统的换挡特性;研究开发满足工程车辆性能需要的控制软件,进行控制策略的研究;研究新型车辆传动系的传动特点、传动效率和动力匹配等。试验台的研制与应用为研发新型工程车辆传动系统提供了平台。

**关键词:**闭式液压系统 传动系 试验台 控制 工程车辆

在车辆百余年的发展历程中,工程车辆传动系大多采用传统而成熟的机械传动方式以及在此基础上发展起来的液力—机械传动方式。20 世纪 80 年代后,液压传动或液压—机械传动的工程车辆传动方式得到了较快的发展。REXROTH、SAUER-DANFOSS 公司的行驶车辆液压传动装置(闭式静液压传动系统)在工程车辆上得到广泛应用主要是因为这种传动方式发挥了液压传动系统和机械传动系统的特点及其相对的低成本优势,实现了工程车辆的分段无级变速控制和传动系统的高效率(相对液力—机械传动系统),在一定程度上有效地提高了工程车辆的行驶性能,操作简单舒适。静液压闭式传动系统成为现代工程车辆传动系的重要形式。

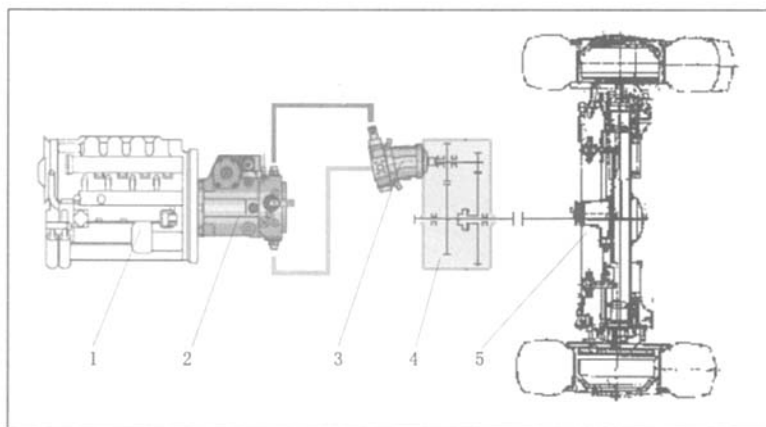
工程车辆传动系试验台的研发思路源于液压传动系统和机械传动系统的发展趋势和各自的技术优势。在液压传动与控制技术方面,构成液压传动的液压泵和液压马达已经可以满足高压、大流量的使用要求,构成传动系统的液压控制元件在液压泵和液压马达上进行了高度的集成,大大简化了结构,降低了成本;在开环传动为主要特征的液压传动技术和以闭环控制为特征的电液伺服控制技术以及现代微电子技术和计算机技术的发展与普及基础上,发展了电液比例控制技术,成为实现微电子产品和大功率工程控制设备之间的桥梁;液压元件自身的发展和微电子控制技术相结合,使现代液压传动应用于工程车辆传动系时可以实现精确控制、自动控制。在

机械传动特别是机械变速器方面,液压控制技术的应用使传统的变速器换挡操作由手动换挡向动力换挡转变;液压系统电子控制的发展,使变速器动力换挡进一步向电控换挡、电子控制的自动换挡方面发展。采用电液比例控制技术的液压系统和采用电子控制换挡技术的变速器的结合,无疑将构成工程车辆新型的传动系,成为工程车辆传动系最重要的发展方向,成为工程车辆向机器人化发展的重要基础。

基于闭式液压系统的工程车辆传动系试验台正是在研究这一发展趋势和技术路线的基础上提出并研制成功的室内试验台架。同济大学机械工程学院 211 工程建设项目为该试验台的研制提供了支持。

## 1 传动系试验台组成

图 1 为工程车辆传动系试验台结构原理图,图 2 为现场安装完成后的试验台构成图。如图 1 所示,传动系主要由动力系统、变量液压泵、变量液压马达、变速器和驱动桥及其轮胎组成,代表了典型的轮式工程车辆传动系方案。当试验台系统需要加载时,可在变速器后连接测功机进行加载,或者在驱动桥两侧进行加载,试验台变速器与转向驱动桥之间为法兰连接,测功机可以在变速器与转向驱动桥之间连接,但这时驱动桥不起作用;转向驱动桥的底架是固定不动的,也就相当于桥壳是固定的,驱动桥两侧加载需要通过轮毂进行加载,文中的试验台架不包含该部分内容。



1.动力系统 2.变量液压泵 3.变量马达 4.变速器 5.驱动桥及其轮胎

图1 工程车辆传动系试验台结构原理图

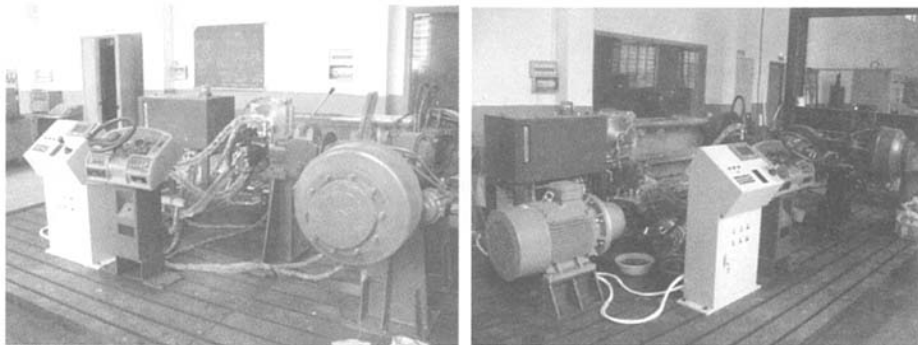


图2 试验台现场安装图

(1) 动力系统。工程车辆的动力系统通常为柴油机或汽油机等,室内试验台通常用电动机作为动力。电动机的启动采用星三角形式,也可以采用变频装置,实现电动机的转速和转矩控制。电动机通过联轴器和分动箱与液压泵连接或者直接与液压泵连接,给液压泵提供动力。

(2) 液压泵和液压马达。工程车辆传动系试验台采用的液压泵为电液比例控制的直轴型斜盘变量柱塞液压泵,液压马达为弯轴式电控变量液压马达或者是电液比例控制液压马达。液压泵和液压马达构成工程车辆典型的闭式液压系统。变量柱塞泵的斜盘角度可由控制器输出的控制信号通过斜盘角度调节杆进行无级调节,从而改变液压泵的排量和方向。液压马达的排量由控制器输出开关信号进行大、小两挡调节。液压泵和液压马达的变量控制使得液

压马达的输出性能(速度和转矩)得到极大的提高,可以在更大范围内使工程车辆的实际工作性能满足或接近理想的目标性能。

(3) 变速器和驱动桥。变速器采用了手动换挡的3挡变速器,也可换用电液控制的动力换挡变速器。变速器的输入端与液压马达连接,输出端通过万向节与驱动桥的中央传动连接,通过差速器、半轴与驱动轮胎连接。驱动桥的形式采用了结构复杂的转向驱动桥,为研究工程车辆的转向系统性能提供条件。

(4) 其他系统。试验台系统还设计有液压转向系统、液压冷却系统、液压油箱、电子控制系统和系统参数显示系统等。

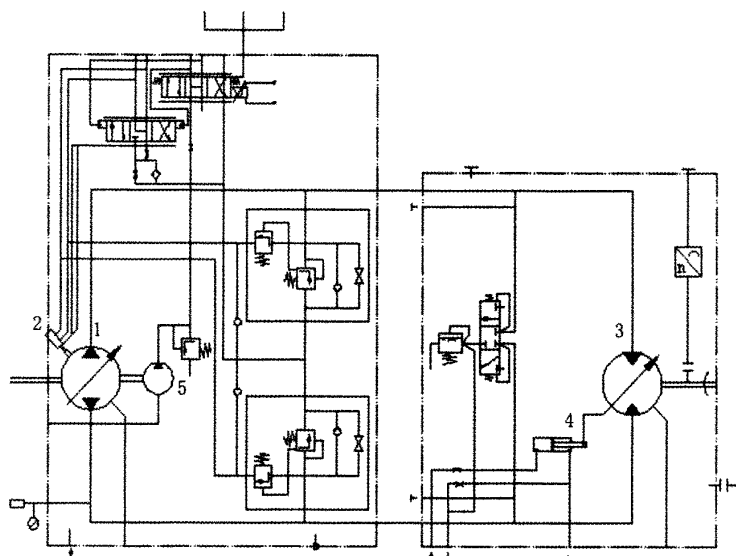
## 2 试验台主要创新点

基于闭式液压系统的工程车辆传动系室内试验台研制的主要目的是紧跟国内外最新的液压传动和控制技术在工程车辆(工程机械)传动系的应用和发展趋势,通过室内的模拟试验和理论分析相结合,掌握新一代工程车辆传动系的性能,研究和解决其关键技术,形成相应的自主知识产权。工程车辆传动系室内试验台的研制过程中有多项技术创新。

### 2.1 电液比例控制的液压泵和液压马达系统

如图3所示,电液比例控制的直轴型斜盘变量柱塞泵与弯轴式电控(或者电液比例控制)变量液压马达组成了闭式液压系统。这一方案与传统的手动变量泵+定量马达的形式相比较,有两个方面

的突出变化:一是引入了电液比例阀控制液压泵和液压马达的排量,代替了手动操作控制;其意义并不仅仅是减轻劳动强度等一般意义下的变化,引入电液比例控制可以实现开环条件下的自动控制、智能化控制,更可以实现闭环的精确控制,是机械传动向着自动化、节能、高效和环保方向发展的必要条件。二是引入比例控制或电控的变量马达,实现了大功率下的二次调节控制,至少相当于增加了1台两挡以上的电控变速器,使得液压系统不仅实现传统意义下的机械能—液压能—机械能的转变,而且进一步优化了液压系统与动力系统、机械传动之间的性能匹配。



1.变量柱塞泵 2.斜盘角度调节杆 3.变量马达 4.马达排量调节缸 5.补油泵

图3 变量泵—变量马达(闭式)液压系统原理图

### 2.2 复合变速系统

基于闭式液压系统的工程车辆传动系试验台采用了变量马达和变速器构成的复合变速系统来实现车辆传动系的变速(变速增(减)转矩)驱动,如图4所示。变量马达+变速器的复合变速系统至少相当于2台变速器进行串联连接。当马达排量为高低挡形式,串接变速器为简单的2挡或者3挡变速器时,复合变速系统就成为 $2 \times 2 = 4$ 或者 $2 \times 3 = 6$ 的4挡或6挡变速器。当马达改为比例控制,实现高中低3种排量切换形式时,复合变速系统就相应成为 $3 \times 2 = 6$ 或 $3 \times 3 = 9$ 挡变速器。由此可见,复合变速系统可以极大地扩展变速的挡位数,而与之串接的变

速器是简单的2挡或者3挡变速器。

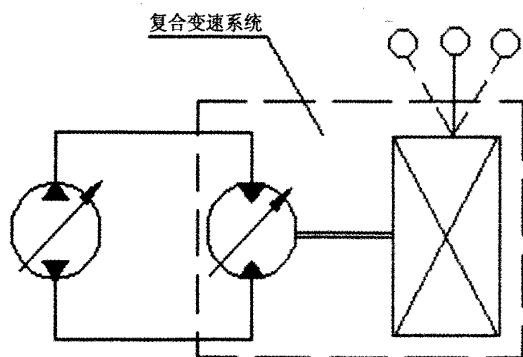


图4 变量马达和变速器构成复合变速系统原理图

变速器可以为手动机械换挡或电液控制动力换挡形式。当变速器采用手动机械换挡方式时,需在液压马达停止(相当于机械停车工况)的工况下对机械变速器进行换挡,但是可以在选定的同一机械挡位下进行液压马达的高低排量切换。采用电液控制动力换挡方式,可以在机器行进间进行挡位转换,加上液压马达的高低排量切换,变量马达和变速器构成的复合变速系统构成了速度和转矩变化范围宽广的变速系统。现代计算机控制技术和汽车工业的发展历程表明,变量马达和变速器的复合变速系统将成为工程车辆一种新型的具有特殊形式和性能的(自动)变速器,成为工程车辆传动系的重要发展模式之一。

### 2.3 CAN 总线控制与 LCD 显示

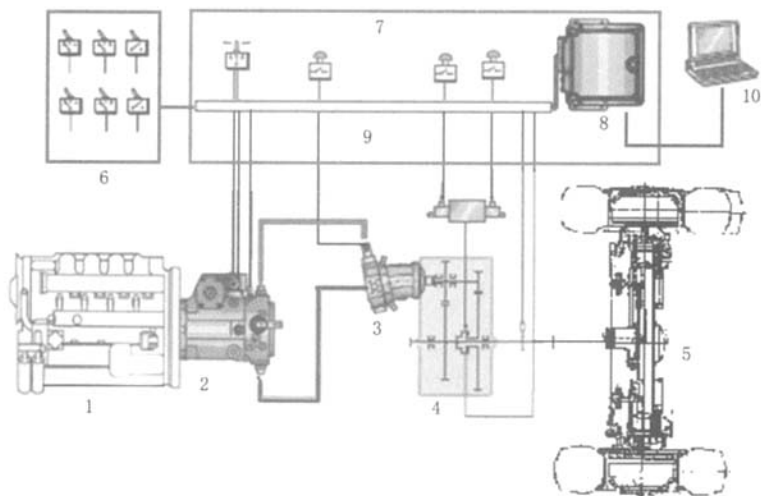
电液比例变量柱塞液压泵、电控(比例控制)液压马达排量控制和变速器的电液换挡控制等均有连续的电流(电压)或开关量的控制问题。液压系统及传动系统中的压力、流量、温度、转速、转矩、位移和控制电流等参数需要实时显示与记录。因此,构建满足工程车辆使用的工程用控制器及其控制系统是室内试验台模拟试验研究的核心内容之一。

采用 SAUER-DANFOSS 公司生产的 MC050 型控制器,该控制器以 DSP 技术为核心,具有强大的计算能力和丰富的 I/O 资源,可以满足复杂的控制要求并做出快速的动态响应,IP67 防护等级保证其适应恶劣的工作环境。电控操作手柄和开关按钮等将

系统需要产生的输入信号输入到控制器,经控制器处理后再输出控制信号到各控制对象(泵、马达和变速器的比例电磁阀或开关电磁阀)。系统中的压力、流量、温度、转速、转矩和位移等性能参数可以通过控制器的接口再输入到 DP600 型高清晰彩色 LCD 显示器实时地显示数值参数,也可以进行图形化的编程,实现动态的虚拟仪表显示。同时,这些性能参数也可以作为系统的反馈信号通过各种控制算法的编程,实现系统的闭环控制,实现机器的速度、温度和位移等作业性能的精确控制。控制器的控制算法的编程和显示器的图形显示均基于其功能强大的 PLUS+1 专用图形编程软件。由于 PLUS+1 采用模块化图形编程方法,使得程序编写可以方便地进行,高效且便于快速修改。在计算机上编译好的程序经 CAN 总线可方便地写入到控制器中。试验台 CAN 总线控制与 LCD 显示如图 5 所示。

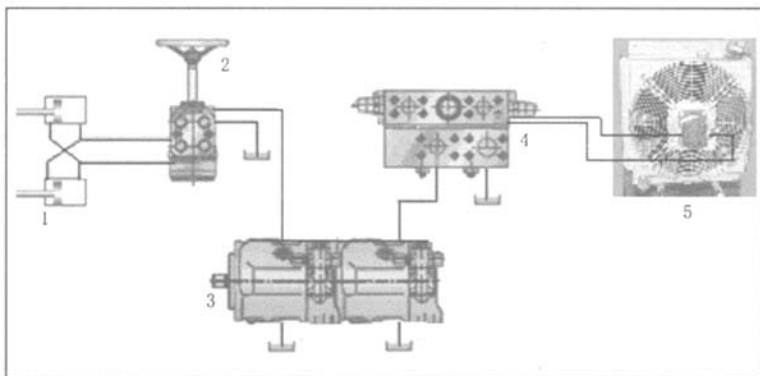
### 2.4 液压冷却与转向控制

液压冷却与转向控制结构原理图如图 6 所示。冷却系统由独立的齿轮泵经过电磁控制阀到齿轮马达,齿轮马达带动冷却风扇,对散热器的液压油进行风冷。冷却系统设计为独立系统,使冷却机构可以方便地安装在机器合适的空间位置上。冷却系统中设置电磁控制阀,与在油箱上设置的温度传感器经控制器编程控制,可实现根据油箱内油温变化自动选



1.发动机 2.变量液压泵 3.变量马达 4.变速器 5.驱动桥及其轮胎 6.LCD 显示器 7.信号输入装置  
8.控制器 9.输出与信号反馈 10.计算机

图 5 试验台 CAN 总线控制与 LCD 显示



1. 转向液压缸 2. 液压转向器总成 3. 双联液压泵 4. 电磁控制阀 5. 液压马达及冷却器总成

图6 液压冷却与转向控制结构原理图

择是否需要开启或关闭冷却风扇的功能,达到把油温自动控制在一定范围内的目的。

转向系统主要由齿轮泵、液压转向器总成和双转向液压缸组成。为了更加接近实际情况,转向系统采用了液压随动控制,操作者可以根据载荷得到真实的手感反馈并实现灵活的随动调节。

### 3 试验台研究内容

(1) 基于闭式液压系统的工程车辆传动系试验台有助于加深理解电液比例控制技术、闭式液压系统和车辆传动系的主要组成与结构等,为进一步研究开发新型车辆传动系提供了试验研究平台。

(2) 研究电液比例控制技术、液压传动系统在工程车辆上的性能、特点等;研究液压泵与液压马达、液压泵与动力系统之间的功率匹配问题。

(3) 研究复合变速系统的运动学、动力学特性,特别是在各种工况条件下复合变速系统的换挡特性。

(4) 研究开发满足工程车辆性能需要的控制软件,进行控制策略的研究。如研发车辆的恒速控制,恒功率控制等控制软件;研究控制器在工程车辆领域的进一步开发,扩大其应用范围等。

(5) 进行闭式系统的温度控制研究;液压转向方面的结构和控制技术的研究等。

(6) 研究新型车辆传动系的传动特点、传动效率和动力匹配等。

### 4 结束语

基于闭式液压系统的工程车辆传动系试验台为现代工程车辆提供了一个先进的试验研究平台。

试验台研制的本身融合了多项现代先进的科学技术,显示了多方面的技术创新。电液比例控制技术、闭式液压传动系统、复合变速系统和最新的控制器件及相应的控制软件等在试验台上的应用,为试验台的进一步研究、开发、试验等奠定了基础。本课题的研究对工程车辆的动力匹配、闭式液压传动系统性能、复合变速系统特性以及计算机控制技术在工程车辆传动系中的应用等技术难题的解决具有一定推动作用。

#### 参考文献

- [1] 吴根茂,邱敏秀,王庆丰,等.新编实用电液比例技术[M].杭州:浙江大学出版社,2006.
- [2] 姚怀新.行走机械液压传动与控制[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [3] 刘修骥.车辆传动系统分析[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [4] 曾谊晖,刘爱荣.PQ190型全液压平地机液压控制系统的设计[J].机床与液压,2003(3):83-85.
- [5] 邓星钟.机电传动控制[M].武汉:华中理工大学出版社,1998.
- [6] 温虎,向中凡.一种新型多功能机械传动试验台的设计[J].机械传动,2004(4):58-60.

通信地址:上海四平路1239号(200092)

(收稿日期:2007-05-28)