

电控限滑差速器对汽车动力性的影响

王云成,王建华,谢 飞,张宝生

(吉林大学 汽车工程学院,长春 130022)

摘要:设计开发了一种电机式电控限滑差速器,探讨了其结构组成与工作过程,同时基于整车四轮力学模型,仿真分析了电控限滑差速器对后驱动车辆动力性的影响。结果表明,装有电控限滑差速器的后驱动车辆,在对分路面上的原地起步加速时间和直接档加速时间显著缩短,在对分坡道路面上的最大爬坡度显著提高,其动力性有明显改善。

关键词:车辆工程;电控限滑差速器;动力性;对分路面;仿真分析

中图分类号:U491 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)Sup.-0018-05

Influence of electronically controlled limited-slip differential on vehicle dynamic performance

Wang Yun-cheng, Wang Jian-hua, Xie Fei, Zhang Bao-sheng

(College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: An electromotor-type electronically limited-slip differential (ELSD) was developed and its structural composition and working principle were presented. The influence of the ELSD on the dynamic performance of a rear-wheel drive vehicle on the split- μ road was simulated by a four-wheel vehicle dynamic model. The simulated results show that the ELSD decreases the accelerating time from the start and the accelerating time on the direct gear on the split- μ road and increases the maximal gradeability on the split- μ sloping road.

Key words: vehicle engineering; electronically controlled limited-slip differential (ELSD); dynamic performance; split- μ road; simulating analysis

主动式限滑差速器是指在被动式限滑差速器中加设的控制系统。该系统运用现代控制技术,可根据车辆的运行工况和路面状态动态调整限滑性能,从而使车辆获得最佳的驱动附着效果,可提高整车的通过性、行驶安全性等。目前对其研究已越来越受到研究人员和生产厂家的重视^[1]。吉林大学汽车工程学院 LSD 课题组结合吉林省科技厅科技发展计划项目,研究和开发了一种新型的主动式限滑差速器——电机式电控限滑差速

器。本文在对其结构和工作原理进行探讨的基础上,主要对装有该限滑差速器的汽车的动力性进行了相关分析。

1 电控限滑差速器

电控限滑差速器(Electronically controlled limited-slip differential, ELSD)是一种采用电子控制方式来实现限滑功能自动调整与控制的主动式限滑差速装置。它可根据车辆的运行工况和路

收稿日期:2006-11-25.

基金项目:吉林省科技厅科技发展计划项目(20010332).

作者简介:王云成(1966-),男,博士研究生. 研究方向:汽车动力学. E-mail: lsd@jtu.edu.cn

面状态,运用现代控制技术对差速器实施限滑控制,从而控制驱动车轮的过度滑转,在各驱动车轮间重新分配驱动转矩,以充分利用驱动车轮与路面间的附着条件,使车辆获得较大的纵向力,提高车辆的动力性、通过性及行驶安全性等性能^[2]。目前电控限滑差速器主要有电液式、电磁式和电机式等典型结构形式。

1.1 电液式限滑差速器

Haldex 电液式限滑差速器^[3](如图 1 所示)是一种用作中央差速器的主动控制式限滑差速器,它利用前后轴转速传感器采集转速信号,传递给电控单元;电控单元根据转速的输入信号和内置的控制程序,控制节流阀 5,调整控制油压,促动油泵 4 和活塞 2 运动;由于后驱动轴 1 的端部采用楔形结构,当油泵 4 和活塞 2 使离合器组件压紧时,就会使后驱动轴 1 和前驱动轴联成一体,实现驱动转矩在前、后驱动轴上的动态分配。

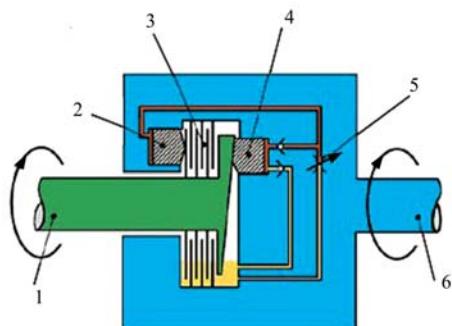


图 1 Haldex 电液式限滑差速器
Fig. 1 Haldex ELSD

1.2 电磁式限滑差速器

EATON 电磁式限滑差速器^[4]由差速器壳体、半轴齿轮、行星齿轮、行星齿轮轴、摩擦元件、电磁阀、促动机构及电控单元等组成。其工作原理如图 2 所示。

在电磁式限滑差速器中,首先由电控单元 7 对传感器采集的车辆行驶状态信号进行分析、判断及相应的处理,产生控制信号;然后控制信号促使电磁阀 8 动作,并通过促动机构 6 对摩擦元件 5 形成轴向压紧力。由于摩擦元件 5 的主动件与差速器壳 1 相配合,从动件与半轴齿轮 4 轴颈相配合,因此轴向压紧力将使摩擦元件 5 中主、从动件产生内摩擦力矩,从而实现驱动转矩在左右半轴之间的重新分配,实现限滑功能。

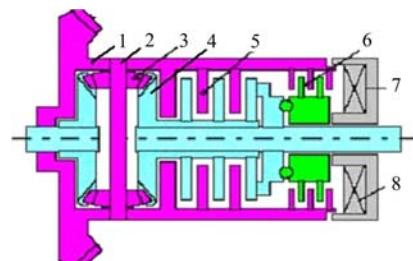


图 2 电磁式限滑差速器
Fig. 2 Electromagnetic ELSD

1.3 电机式限滑差速器

GKN 公司于 2003 年开发了基于电机驱动的主动控制式限滑差速器,它是一种轮间或轴间的电控限滑差速器,由导球式机构、摩擦元件和电机等组成,通过电控单元驱动电机,来实现限滑功能的动态控制与调整。

吉林大学汽车工程学院 LSD 课题组在 JA1020LSD 机械摩擦片式限滑差速器的前期研究基础上,开发出电机式主动控制限滑差速器,其结构如图 3 所示。

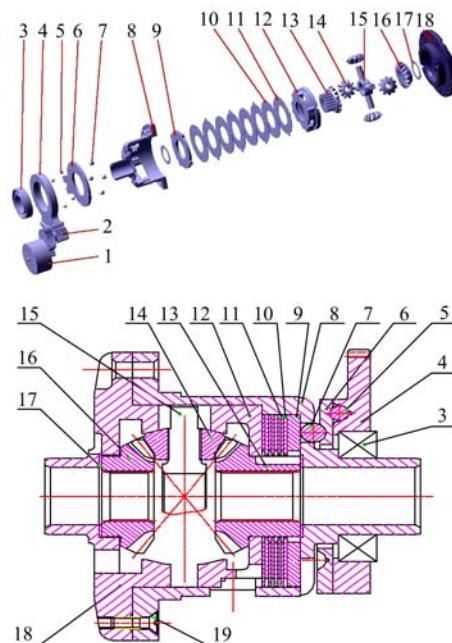


图 3 电机式电控限滑差速器
Fig. 3 Motor-type ELSD

根据各组成零件的功能,将电控限滑差速器的结构分为控制系统和执行系统。控制系统主要实现对执行系统的自动控制,执行系统则完成差速和限滑两大功能。

1.3.1 控制系统

电控限滑差速器控制系统的主要功能是根据车辆行驶状态自动控制执行系统的动作,其组成如图4所示。

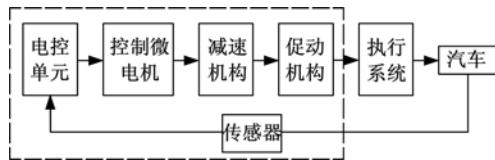


图4 电控限滑差速器的控制系统

Fig. 4 Control system of ELSD

控制系统的工作过程是:这些电控单元对传感器采集的各种汽车行驶状态信号进行分析、判断、计算和处理,产生控制信号,通过减速机构和促动机构实现对电控限滑差速器执行系统的控制。

1.3.2 执行系统

电控限滑差速器的执行系统主要有限滑和差速两大功能,相应结构分别如图5、图6所示。

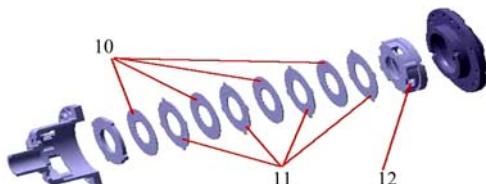


图5 限滑机构

Fig. 5 Limited-slip mechanism

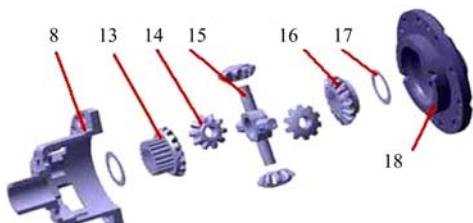


图6 差速机构

Fig. 6 Differential mechanism

2 动力学模型

2.1 发动机模型

根据发动机万有特性曲线或使用外特性,采用三次多项式来拟合发动机转矩与转速的特性曲线,有

$$T_e = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^3 \quad (1)$$

式中: T_e 为发动机转矩; n 为发动机转速; a_i ($i=0, 1, 2, 3$)为拟合系数。

某一时刻发动机实际输出转矩 $T_{et}(t)$ 为

$$T_{et}(t) = (0.01\mu_e - 0.2\dot{\mu}_e) T_e - I_e \dot{\omega}_e(t) \quad (2)$$

式中: μ_e 为节气门开度影响系数; I_e 为发动机飞轮的转动惯量; ω_e 为回转角速度。

2.2 变速器和主减速器模型

忽略离合器的接合过程,只考虑变速器速比、主减速器速比和传动系效率的影响,发动机经过变速器和主减速器传递到差速器壳的输出转矩 T_d 为

$$T_d = T_{et} i_g i_0 \eta - (I_g i_0^2 + I_0) \dot{\omega}_d \quad (3)$$

式中: I_g 为变速器和主减速器转动惯量之和; I_0 为差速器转动惯量; i_g 和 i_0 分别为变速器和驱动桥主减速器的传动比; η 为传动效率; ω_d 为差速器壳的回转角速度。

根据差速器的运动学关系有

$$\omega_d = (\omega_{lr} + \omega_{rr}) i_g i_0 / 2 \quad (4)$$

式中: ω_{lr} 、 ω_{rr} 分别代表后左、后右驱动车轮的角速度。

2.3 电控限滑差速器模型

差速器的作用是实现左右驱动轮间转速和转矩的分配,即差速器将发动机经传动系传递来的驱动转矩,根据下列关系分配给左右半轴

$$\begin{cases} T_{lr} = (T_d \pm M_r)/2 \\ T_{rr} = (T_d \mp M_r)/2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{lr} 、 T_{rr} 分别代表后左、后右驱动车轮的驱动转矩; M_r 为差速器的内摩擦转矩(式中慢转侧转矩取加号,快转侧转矩取减号)

$$M_r = M_r + M_f \quad (6)$$

式中: M_r 为电控限滑差速器所产生的限滑转矩; M_f 为差速器中齿轮传动等产生的摩擦转矩,由于 M_f 一般很小,在研究中予以忽略。

通过对电控限滑差速器结构的研究,可以得到 M_r 的计算公式

$$M_r = \eta_M k_{elsd} T_M \quad (7)$$

式中: η_M 为电控限滑差速器的传动效率; T_M 为电机的输出转矩; k_{elsd} 为电控限滑差速器的当量传动比,该值与传动比、限滑机构的结构尺寸等有关。

由电机学知识可知电机输出转矩 T_M 为

$$T_M = k_t I_M \quad (8)$$

式中: k_t 为控制微电机的转矩灵敏度。

2.4 驱动车轮模型

驱动过程中左、右驱动车轮的受力分别如图 7 所示。

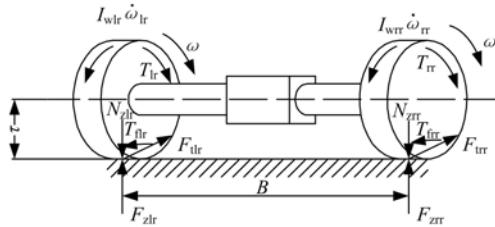


图 7 驱动车轮受力图

Fig. 7 Forces acting on the driving tyre

图中: T_{flr} 、 T_{frr} 分别为后左、后右驱动轮滚动阻力偶矩; I_w 为车轮转动惯量; $\dot{\omega}_{lr}$ 、 $\dot{\omega}_{rr}$ 分别为后左、后右驱动轮角加速度; r 为车轮滚动半径; ω 表示驱动轮旋转方向。

由图 7 对左、右驱动车轮列出动力学方程

$$I_{wlr} \dot{\omega}_{lr} = T_{lr} - T_{flr} - F_{dlr} r \quad (9)$$

$$I_{wrr} \dot{\omega}_{rr} = T_{rr} - T_{frr} - F_{drr} r \quad (10)$$

式中: T_{lr} 、 T_{rr} 为半轴作用在两后驱动轮上的转矩。

由此可得到驱动车轮的运动方程

$$\begin{cases} I_w \dot{\omega}_{lr} = T_{lr} - F_{dlr} r - T_{flr} \\ I_w \dot{\omega}_{rr} = T_{rr} - F_{drr} r - T_{frr} \end{cases} \quad (11)$$

类似可得到前动车轮的运动方程

$$I_w \dot{\omega}_{lf} = T_{fl} - F_{dlf} r - T_{lf} \quad (12)$$

式中: $\dot{\omega}_{lf}$ 、 $\dot{\omega}_{rf}$ 分别为前左、前右车轮的角加速度; T_{lf} 、 T_{rf} 分别为前左、前右车轮上的滚动阻力偶矩。

2.5 整车模型

为简化数学模型, 同时又能反映出车辆系统的动态特性, 根据研究的实际需要, 作以下假设: 忽略路面不平度对整车性能的影响; 忽略悬架作用, 即认为车辆没有垂直方向的运动; 不考虑行驶过程中车辆俯仰运动; 各轮胎的机械特性相同; 忽略转向系统影响, 直接以前车轮平均转向角作为输入, 并认为其与方向盘转角成线性关系; 固结于车辆上的动坐标原点与车辆质心重合。

经过假设和简化后的后驱动车辆模型成为一个四轮力学模型, 以整车为研究对象, 其动力学图如图 8 所示。图中: m 为整车质量; h_g 为质心高度; L 为轮距; a 、 b 分别为质心位置至前、后轴线距离; u 为车辆切向速度; 下角标 x 、 y 、 z 分别代表地面切向、侧向、法向; F_w 为空气阻力; α 为坡道角; δ 为前轮转角。

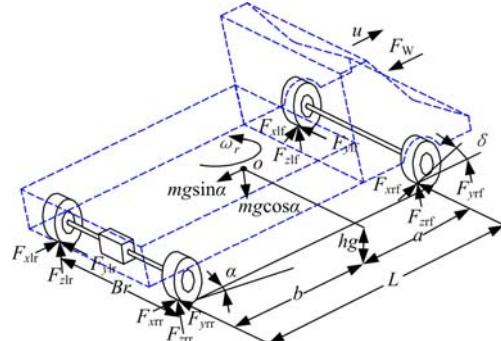


图 8 整车动力学图

Fig. 8 Forces acting on the vehicle

利用固结于车辆的坐标系来分析车辆运动, 可以得到车辆纵向运动的微分方程

$$m(\dot{u} - v\omega_r) = (F_{xlf} + F_{xrf})\cos\delta - (F_{zlf} +$$

$$F_{zrf})\sin\delta + (F_{xlf} + F_{xrf}) - F_f - F_w \quad (13)$$

式中: v 为侧向速度; F_f 为滚动阻力。

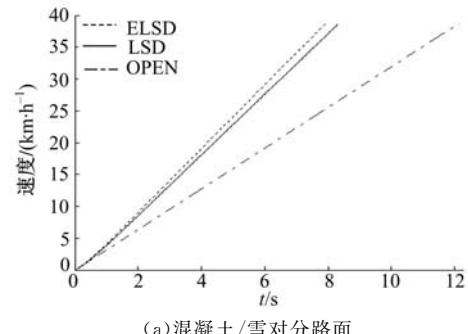
3 仿真分析

仿真参数为 $L=2.35$ m, $a=1.56$ m, $b=0.79$ m, $m=1170$ kg, $i=5.125$, $r=0.27$ m, $I_w=1.7$ kg·m²

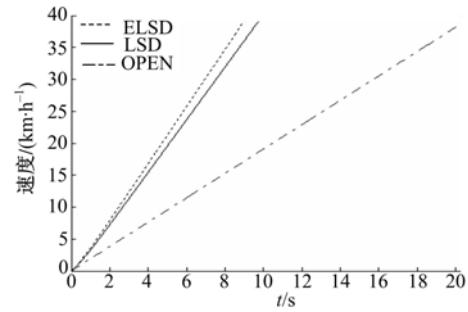
对混凝土/冰和混凝土/雪两种典型对分路面进行三种行驶工况的动力性仿真研究。

3.1 原地起步加速行驶工况(工况 1)

仿真结果见图 9。仿真条件: 初始车速为零,



(a) 混凝土/雪对分路面



(b) 混凝土/冰对分路面

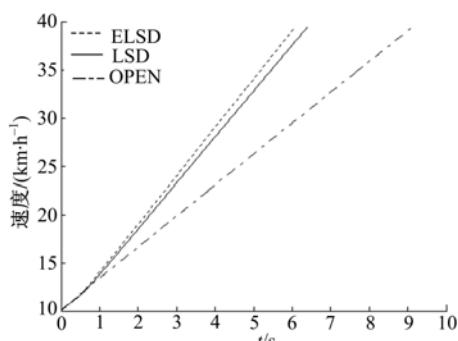
图 9 工况 1 的仿真结果

Fig. 9 Result of simulation of State 1

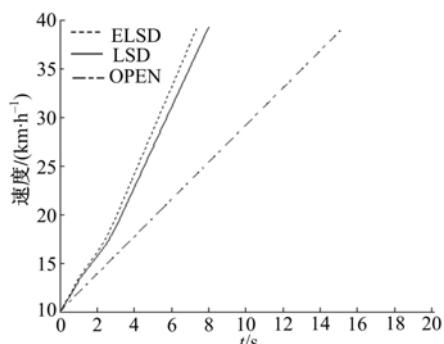
油门开度从0加到100%，变速器初始1挡，连续换挡至直接挡，加速到40 km/h；左侧为混凝土路面，右侧为雪或冰路面。图中：OPEN指普通差速器，LSD指JA1020LSD机械摩擦片式限滑差速器，ELSD指装有电控限滑差速器。

3.2 直接挡加速行驶工况(工况2)

仿真条件：初始车速为15 km/h；变速器置直接挡，左侧为混凝土路面，右侧为雪或冰路面，加速到40 km/h。仿真结果见图10。



(a) 混凝土/雪对分路面



(b) 混凝土/冰对分路面

图10 工况2的仿真结果

Fig. 10 Result of simulation of State 2

3.3 爬坡行驶工况(工况3)

研究在混凝土/雪和混凝土/冰对分坡道路面上的爬坡能力，仿真结果见表1。

表1 最大爬坡度

Table 1 Maximum grade(State 3)

工况	最大爬坡度(%)		
	OPEN	LSD	ELSD
混凝土/雪对分坡道	12.19	21.46	26.29
混凝土/冰对分坡道	5.46	9.93	15.62

仿真结果表明：

(1)当汽车分别在混凝土/雪和混凝土/冰对分路面上原地起步加速行驶时，装有ELSD的加速时间比装有OPEN的分别缩短34.51%和56.12%，比装有LSD的分别缩短4.86%和7.53%；当汽车在混凝土/雪和混凝土/冰对分路面上直接挡加速行驶时，装有ELSD的加速时间比装有OPEN的分别缩短30.58%和49.04%，比装有LSD的分别缩短3.81%和6.33%。

(2)当汽车在混凝土/雪和混凝土/冰对分坡道路上爬坡时，装有ELSD的车辆比装有OPEN的最大爬坡度分别提高115.67%和182.08%，比装有LSD的分别提高22.51%和57.30%。

(3)当汽车在混凝土/雪对分路面上加速行驶时，ELSD上产生的锁紧系数为0.4~0.5，转矩比为2.5~3；当汽车在混凝土/冰对分路面上加速行驶时，ELSD产生的锁紧系数为0.5~0.6，转矩比为3.5~4。

4 结论

(1)装有电控限滑差速器的汽车动力性有显著改善。

(2)装有电控限滑差速器的汽车在混凝土/冰对分路面上行驶时的限滑性能比在混凝土/雪对分路面上行驶时的限滑性能更明显。

参考文献：

- [1] Gassmann Theodor, Bariage John A. Electronic torque manager:an adaptive driveline torque management system[C]//SAE Paper 2004-01-0866.
- [2] 王建华. 车辆电控限滑差速器结构及控制技术研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2006.
- [3] Maki R, Ganemi B. Limited slip wet clutch transmission fluid for AWD differentials, part1: system requirements and evaluation methods[C]// SAE Paper 2003-01-1980.
- [4] Liu Cha-Shang, Monkaba Vincent. Driveline torque-bias-management modeling for vehicle stability control[C]// SAE Paper 2002-01-1584.