

文章编号:1671-1637(2015)01-0082-10

矿用汽车动力源功率匹配控制策略

郑舒阳,金 纯,罗维东

(北京科技大学 机械工程学院,北京 100083)

摘 要:针对矿用汽车发动机工作点分布于燃油低效区的问题,提出了基于功率匹配的交流传动控制策略,使得传动系统能够根据车辆工况的变化相应改变发动机输出功率。确定了电传动系统功率区,引入了车辆负荷度评价车辆所处工况的负荷程度,设计了3层结构的控制策略,上层算法中使用滑动平均滤波算法对轮边电机转速进行预处理,计算车辆负荷度;中层算法利用三维模糊控制器,根据车辆负荷度及发动机转速计算了参考功率;下层算法中驱动系统追踪给定的参考功率,实现了矿用汽车的功率匹配。为验证功率匹配控制策略的控制效果,搭建了电传动试验平台进行验证。验证结果表明:控制策略能够快速识别矿用汽车启动、爬坡、突遇负载、下坡等常用工况的负载变化,并计算适合当前负载的驱动功率,保障了矿用汽车在恶劣工况下的动力性;稳态试验考察了控制策略下矿用汽车的节油效果,发动机工作点分布在最佳燃油经济性曲线附近,负载为40 kW时,功率匹配控制策略的燃油消耗量比满足最大功率需要策略减少10.8%,负载为80 kW时,功率匹配控制策略的燃油消耗量比满足最大功率需要策略减少4.8%,验证了功率匹配策略的有效性与可行性。

关键词:矿用汽车;动力源优化;功率匹配;交流传动;分层控制;车辆负荷度;燃油经济性

中图分类号:U463.212

文献标志码:A

Power matching control strategy of power source for mine truck

ZHENG Shu-yang, JIN Chun, LUO Wei-dong

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering that the working points of mine truck engine were distributed in low efficiency area, the AC(alternating current) drive control strategy based on power matching was designed, and the output power was adjusted by transmission system according to different driving cycles. The power region of electric drive system was determined. Vehicle load degree was introduced to evaluate load degrees of different driving cycles. A three-layer hierarchical control strategy was proposed. The rotational speeds of in-wheel motor were pretreated by using moving average filter algorithm, and vehicle load degrees were calculated in the upper algorithm. In the middle algorithm, the reference power was calculated with vehicle load degree and engine speed, and a three-dimensional fuzzy controller was used in the middle algorithm. In the lower algorithm, the reference power was tracked by driving system to realize power matching of mine truck. The electric drive test bench was built, and the effect of power matching control strategy was verified. Verification result indicates that by using power matching control strategy, the change of load degrees can be quickly identified for common driving cycles of starting, climbing,

收稿日期:2014-08-23

基金项目:国家863计划项目(2011AA060404)

作者简介:郑舒阳(1986-),男,黑龙江大庆人,北京科技大学工学博士研究生,从事矿用汽车电传动系统研究。

导师简介:金 纯(1975-),男,河南信阳人,北京科技大学副教授,工学博士。

sudden loading and downhill. The driving power of current load is calculated, which can guarantee the dynamic performance of mine truck in complicated working conditions. The oil saving effect of control strategy for mine truck is examined by steady test, and the working points of engine locate nearby the optimum fuel economy curve. Compared with the maximum power satisfied strategy, the fuel consumption of power matching control strategy reduces by 10.8% for load of 40 kW, and 4.8% for load of 80 kW, so the effectiveness and feasibility of control strategy are validated. 1 tab, 14 figs, 25 refs.

Key words: mine truck; power source optimization; power matching; AC drive; hierarchical control; vehicle loading; fuel economy

Author resumes: ZHENG Shu-yang(1986-), male, doctoral student, +86-10-62332467, 59708858@qq.com; JIN Chun(1975-), male, associate professor, PhD, +86-10-82375949, jinjinbit@163.com.

0 引言

燃油成本在矿山运输成本中占有较大比重,优化传动系统动力源工作点是提高燃油经济性的有效方法。目前,百吨级以上矿用汽车普遍采用柴油发动机为单一动力源的串联式交流电传动驱动方式。传动系统中柴油发动机与发电机组成的动力系统与异步电机驱动系统没有机械连接是通过功率耦合的,柴油发动机转速与车速之间没有直接关系,动力系统与驱动系统的功率匹配是系统控制中的核心问题。

在公路车辆领域的早期研究中,优化多能源控制策略是改善混合动力汽车燃油经济性的重要途径^[1-5],如串联式混合动力汽车的恒温器控制策略、功率跟踪式控制策略;并联式混合动力汽车的以车速或功率为主要参数的控制策略、模糊逻辑控制策略;混联式混合动力汽车的发动机恒定工作点策略、发动机最优工作曲线策略、瞬时优化策略等。随着计算机技术的发展,智能算法逐渐应用到电传动汽车的研究中:Murphey等应用双神经网络对驾驶人意图和当前行驶路况进行识别,对得到的驾驶人意图与路况类型应用动态规划算法(Dynamic Programming, DP)计算发动机与电池间的最优功率分配,并进行了仿真验证^[6-7];Johannesson等计算了一段时间内的平均车速、平均加速度等信息,对当前行驶路况进行识别^[8];林巨广等应用模糊识别算法对驾驶人意图与行驶路况进行识别,对车辆转矩输出与能量分配进行了优化^[9-11];邹渊等在统计已有路测数据的基础上,应用随机动态规划(Stochastic Dynamic Programming, SDP)算法建立了驾驶人需求功率的马尔科夫算法,对未来一段时间的驾驶人

需求功率进行预测,进而改善了发动机与电池之间的功率分配规则^[12-14]。由以上研究可以看出,智能算法的引入使得电传动汽车在控制中兼顾了驾驶人意图与路况的信息,能够提高车辆行驶性能与燃油经济性。智能算法的缺点包括以下几点:算法复杂、计算量大且需要计算速度更快的硬件支持;神经网络与随机动态规划等算法需要大量的实测数据进行训练,数据量与数据准确度影响控制策略的效果;行驶路况的识别依赖于建立一套成熟的路况类型标准。基于以上原因,智能算法在实车上的应用较少,研究大多仅停留在软件仿真层面。

车辆负荷度是一个能够表示车辆载质量、路面阻力、空气阻力和坡度的综合变量。在车辆负荷度相关研究中,刘洪波等探讨了各种阻力对车辆负载识别的影响,利用变速箱输出的转矩计算了车辆负载程度,并分析了一台机械式自动变速器(Automated Mechanical Transmission, AMT)汽车的路测数据,验证了负载识别算法的可行性^[15];张泰等首次提出用加速度计算车辆负荷度^[16-17];金辉等提出了使用纵向加速度滤波算法来识别坡度的方法^[18];雷雨龙等基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)提出了车辆质量与道路坡度估计算法,仿真结果表明算法能够有效估计车辆运行中的坡度与车辆质量^[19];王玉海等利用SAE J1939协议获取发动机输出转矩信号,计算了道路坡度^[20];金辉等提出了一种车辆纵向动力学模型识别道路坡度,根据试验数据确定了自动变速器控制逻辑表,提高了自动变速器在坡道行驶的性能^[21]。与公路汽车相比,矿用汽车行驶路面不平整,坡度欠平缓,并且矿用汽车交流传动系统没有电池与超级电容等储能元件。在机械传动的液压挖掘机节能优化研究中,

可以根据泵输出压力识别挖掘机工况,进而优化发动机工作点^[22-25]。

上述电传动车辆控制策略在系统结构、工作环境中不同于矿用汽车电传动系统。本文针对柴油发动机为单一动力源的功率耦合式交流电传动系统,从柴油发动机、发电机、轮边电机整个系统的角度出发,提出了基于功率匹配的交流传动控制策略,以解决传动系统只能按照固定的油门开度-输出功率曲线运行以及动力源处于低效区的问题,使得系统功率能够兼顾燃油经济性与动力性。为验证控制策略的可行性,进行了仿真与台架试验,为进一步应用在实车上提供参考。

1 串联式交流传动系统

柴油发动机(下文所有发动机均指柴油发动机)与同步发电机构成动力系统,发动机拖动发电机发出的三相交流电经过整流后供给电机驱动系统,轮边电机驱动车轮。图1为一典型的串联式两轮驱动交流传动系统。

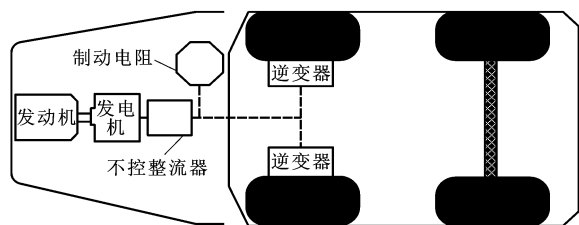


图1 交流传动系统结构

Fig. 1 Structure of AC drive system

交流传动系统中动力系统与驱动系统具有能量非直接耦合的特点,不同于直传动系统中控制直流发电机的励磁即可以控制直流电动机的输出特性。交流传动要兼顾动力系统与驱动系统的控制,因此,要求交流传动系统具有以下功能:在不同的工况下,动力系统能够与驱动系统的功率相匹配;发动机在大部分时间中工作在燃油高效区;启动与遇到负载时能够提供足够的功率以克服阻力。

2 动力系统与驱动系统分析

2.1 动力系统

全程调速发动机的调速特点是每个油门开度均对应一个固定的转速区间,随着负载的变化发动机能够自动调节喷油量,因此,不同转速下有不同的输出功率。图2为发动机工作点分布,其中曲线1为同步发电机外特性曲线,曲线2为发动机燃油经济性曲线, A_1A_2 段位于等油耗曲线的中心,表示最佳燃油经

济性曲线。同步发电机与发动机直连负责将机械能转换为电能,曲线1能够包围发动机功率区。柴油机与同步发电机共同组成了交流传动中的动力系统。

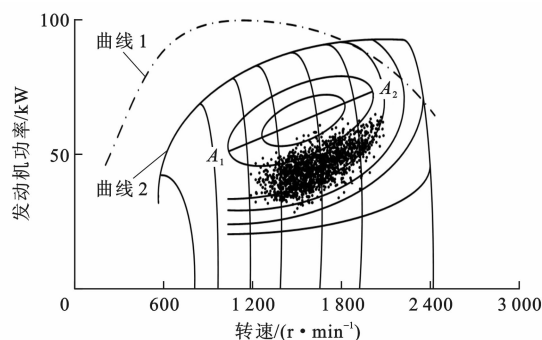


图2 工作点分布

Fig. 2 Distribution of working points

一般基于满足最大功率需求的交流传动控制策略是根据车辆运行中的最大负荷核算出动力系统的工作功率曲线,使其包围在电机驱动系统功率的范围之上,并且核算出发动机转速与发电机电压的对应关系曲线,根据曲线设计发电机励磁控制器。电机驱动系统从动力系统吸收能量,这样的控制策略可以满足驱动系统最大功率的需求,而在车辆运行周期中,部分工况会处于空载或轻载行驶状态,而控制策略是基于满足最大功率需求设计的,因此,发动机工作点会偏离发动机燃油经济区。图2中阴影区为发动机实际工作点分布,可以看出实际工作区较最佳燃油经济性曲线下移,发动机处于高转速低功率状态,燃油效率低。

2.2 驱动系统

驱动系统由逆变器、交流牵引电机组成,采用基于转子磁链定向的空间矢量控制算法(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)进行控制,系统结构见图3。图3中: m 为给定的电机转速; T 为直流电机模型下的等效转矩; L_1 为定转子互感; L_2 为转子自感; ψ 为转子磁链; i_d 、 i_q 为 d - q 轴坐标系下的电流分量; v_α 、 v_β 为 α - β 轴坐标系下的电压分量; i_1 、 i_2 为电机输入两相的电流;带星号的变量为计算后给出的控制量,不带星号的变量为传感器采集得到的测量值;ASR(Automatic Speed Regulator)为自动速度调节器;ATR(Automatic Torque Regulator)为自动转矩调节器;AFR(Automatic Flux Regulator)为自动磁链调节器;RSS(Rotational Speed Sensor)为转速传感器。速度传感器采集电机的输出转速,电流传感器采集定子电流送入磁链观测器,得到实时转子磁链并反馈至转速闭环与磁链闭环进行运算,实现定子电流的励磁分量与转矩分量的动态解耦,

得到类似于直流电机的转矩模型为

$$T = mL_2 \psi i_q / L_1 \quad (1)$$

空间矢量控制算法中的自动速度调节器通过比

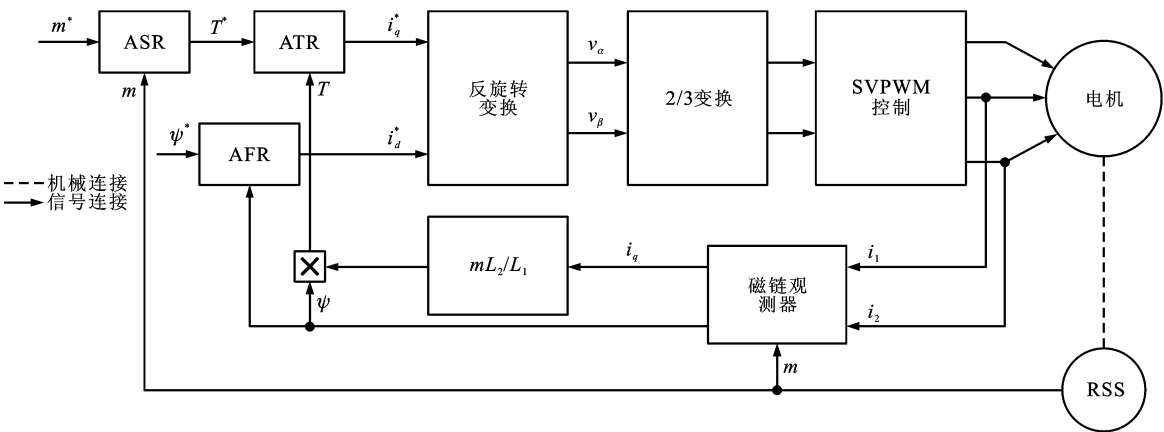


图 3 系统结构

Fig. 3 System structure

3 控制策略设计

针对传动系统特点,设计了分层控制策略,见图 4。控制策略分为 3 层:上层为车辆负荷度计算层,引入了车辆负荷度并给出了计算方法;中层为功率匹配协调控制层,提出了三维模糊控制算法的功率匹配控制策略,动态协调动力系统与驱动系统的功率给定;下层为功率跟踪层,运用功率闭环比例-积分-微分控制器(Proportion-Integration-Differentiation, PID)算法使驱动系统跟踪给定功率。本文着重于上层与中层的车辆负荷度计算与功率匹配控制策略的研究。

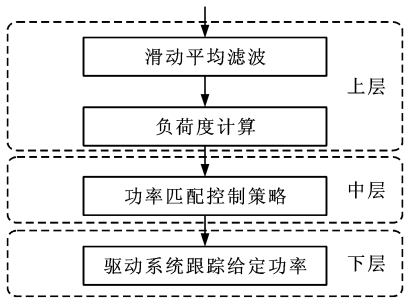


图 4 控制策略

Fig. 4 Control strategy

3.1 车辆负荷度计算

3.1.1 车辆负荷度

引入了车辆负荷度 $\Delta a^{[16-17]}$,用以描述车辆行驶中的路况与负载状况, Δa 为

$$\Delta a = a' - a \quad (2)$$

式中: a 为车辆实际加速度; a' 为空载车辆在平坦且路况良好的路面上直线行驶的基准加速度。

较速度差,计算 i_q 以调节转矩输出,使得电机外特性变硬,转矩迅速提升,因此,能够使矿用汽车克服频繁的路面扰动,并在启动过程中快速输出最大转矩。

以标准路面负荷度为基准工况,此时负荷度为 0;当车辆遇到上坡、路面颠簸等情况时,负荷度为正;当车辆遇到下坡、车辆打滑等情况时,负荷度为负。引入车辆负荷度的目的是对大负荷、启动工况进行识别,不考虑负荷度为负的情况。

在计算负荷度时,要对车辆加速度进行测量标定,方法是测量轮边电机轴端的转速输出,推算出车辆加速度。在试验台架上进行对传动系统中的交流牵引电机试验,测量不同油门开度下的电机输出轴端加速度,结果见表 1。以基准工况车辆加速度为依据,计算车辆实际负荷度。电机处于低速时,由于测功机原因导致无法加载大转矩,因此,一些工况无法测得数据。

表 1 不同油门开度下的加速度

Tab. 1 Accelerations under different throttle openings $m \cdot s^{-2}$

油门开度/%	负载功率/kW					
	0	20	40	60	80	100
10	5.5	5.4	5.1	—	—	—
20	6.1	5.8	5.7	5.3	4.9	—
30	7.1	6.7	6.6	6.3	5.8	5.3
40	7.7	7.5	6.9	6.5	6.1	5.8
50	8.1	7.8	7.3	6.9	6.5	6.3
60	8.7	8.5	7.9	7.4	7.0	6.8
70	9.9	9.5	9.1	8.6	8.1	7.8
80	10.9	10.8	10.4	10.1	9.6	9.3
90	11.7	11.5	11.2	10.9	10.5	10.1

3.1.2 车辆加速度计算

车辆的加速度是由轮边电机转速计算得来的,

轮边电机转速信号易受到随机的脉冲干扰及高频干扰,因此,提出了滑动平均滤波算法对转速信号进行滤波。滑动平均滤波算法能够抑制频繁起伏的随机误差,对数据起到平滑作用。滑动平均滤波算法适用于数据更新量大的系统且易于在数字信号处理(Digital Signal Process, DSP)等硬件中实现。滑动平均滤波算法的数学模型表示为

$$Y_n = \frac{1}{l} \sum_{k=0}^{l-1} y_{n-k} \quad (3)$$

式中: Y_n 为第 n 次采样经滤波后的输出值; y_{n-k} 为未经滤波的第 $n-k$ 次采样值; l 为滑动窗口的宽度,根据系统中主要干扰为高频随机误差的特点,滑动窗口的宽度设定为 8。

3.2 功率匹配控制策略

3.2.1 功率匹配控制策略

将负荷度 Δa 、负荷度变化率 $d\Delta a/dt$ (t 为时间)与发动机转速输入至三维模糊控制器,根据功率匹配控制策略给出参考功率 P ,控制策略描述如下。

(1) 车辆匀速运行中车辆驱动力与路面负载相平衡,即加速度为 0,负荷度等于基准加速度 a' 。根据驾驶人给定油门开度所确定的发动机转速,控制策略按照发动机最佳燃油经济性曲线给出传动系统的参考功率,电机驱动系统通过功率闭环算法追踪该参考功率,最终动力系统与电机驱动系统功率相平衡。

(2) 行驶中负载变化量较小时,即路面负载未引起电机转速大幅度降低,负荷度 Δa 较小,此时不提高参考功率给定,会导致车速降低。如欲提高车速,驾驶人需要加大油门开度,系统功率点会滑移至燃油经济曲线的更高点并达到平衡。这样的控制策略可以使车辆自适应小幅度的负载扰动,车辆速度小幅度降低不会提高功率给定,以防止系统对负载的扰动响应过于敏感而出现频繁窜车的问题。

(3) 车辆启动或突遇大负载情况时,负荷度 Δa 、负荷度变化率 $d\Delta a/dt$ 较大,控制策略提高动力系统的输出功率参考值,经过功率追踪不断增加电机驱动输入给定,使得电机驱动系统输出功率增加。待克服负载后,发动机工作点回到最佳燃油经济性曲线附近。

根据以上的功率匹配控制策略对车辆行驶中最常见的遇到阻力负载情况进行分析。当车辆遇到的负载超过该油门开度的最大功率时,车辆负荷度会增大,系统会在规划的功率区间内上调发动机参考

功率。如果在此功率下车辆动力仍克服不了该负载,随着负载转矩增大,转子转速减小,导致转差率增大,电机输出转矩在一定范围内增加,车辆的反应是车速下降,输出转矩增加。如果增大的转矩能够克服负载,并且电机散热良好,则车辆会以低速继续行驶;如果此过程中电机温度超过限值,则会采取自动保护措施;最极端的情况为短时间内电机转差率超过最大转矩时的转差率,则电机输出转矩会快速跌落,电机也会进入保护状态。

综上所述,功率匹配控制策略在遇到负载时只在当前油门开度下的最大功率内调节,不会提高发动机输出转速与功率,这样的控制特性不会使车辆在当前能力不足时克服负载,是符合传动系统能量守恒定律的,并且与传统的控制策略效果相同,即不增加油门开度的情况下遇到大负载车辆会减速直至停车。

基于百千瓦级电传动试验台架,根据功率匹配控制策略确定了动力系统功率区,见图 5 中阴影区域 $B_1 B_2 B_3 B_4 B_5$ 。功率区域设计规则为: $B_1 B_5$ 段与最佳燃油经济性曲线重合, $B_1 B_2 B_6$ 段为发动机功率上限, $B_2 B_3$ 为设计功率上限,构成了整个 $B_1 B_2 B_3 B_4 B_5$ 功率面。

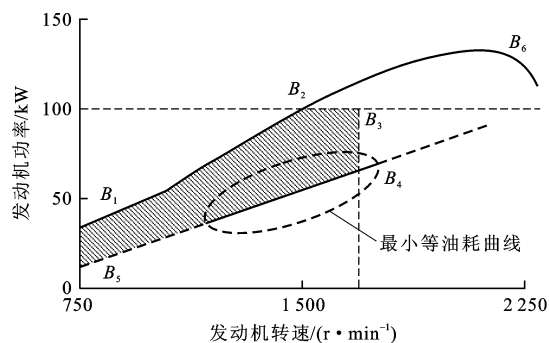


图 5 传动系统功率区

Fig. 5 Power region of drive system

3.2.2 三维模糊控制器

中层功率匹配控制器的作用是采集车辆负荷度与油门开度,并根据已有经验准则确定输出功率。由于控制系统模型不确定,并且具有根据已有经验对系统输出进行决策的特性,模糊算法是适合本系统的。模糊算法能够较好地识别车速下降不大、车速下降严重、车辆处于启动等大负载工况等模糊概念,根据识别的工况,依据上文确定的功率匹配控制策略对输出功率进行模糊判决。与二维模糊控制相比,三维模糊控制能够从被控对象获取更多信息,可以做到更好的控制决策。三维模糊控制器结构见

图 6,以发动机转速、车辆负荷度与负荷度变化率为模糊控制器的输入变量, P 为传动系统给定的输出功率。

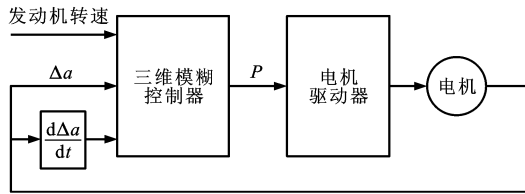
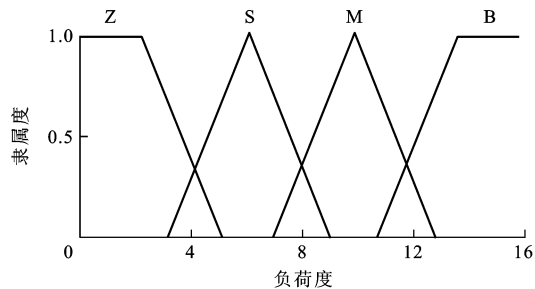


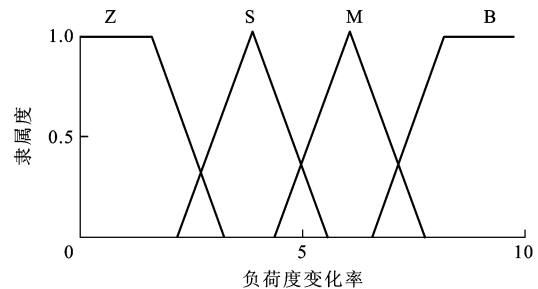
图 6 三维模糊控制器结构

Fig. 6 Structure of three-dimensional fuzzy controller

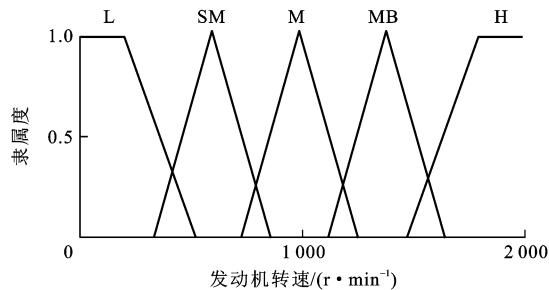
根据建立的功率匹配模糊控制规则确定的隶属度函数见图 7,其中负荷度 Δa 与其变化率 $d\Delta a/dt$ 的模糊子集为 $\{Z, S, M, B\}$,发动机转速与输出功率的模糊子集为 $\{L, SM, M, MB, H\}$,其中 Z、S、M、B、



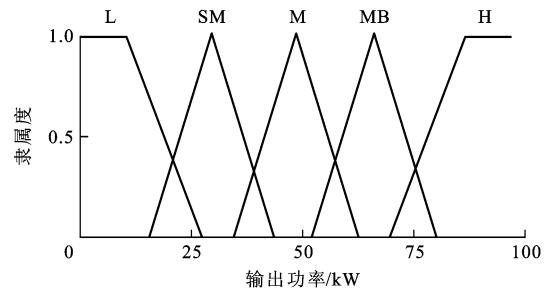
(a) 负荷度对应的隶属度函数



(b) 负荷度变化率对应的隶属度函数



(c) 发动机转速对应的隶属度函数



(d) 输出功率对应的隶属度函数

图 7 隶属度函数

Fig. 7 Membership functions

图 8 为功率匹配控制策略仿真结果,可以看出:4~7 s 控制器识别了 60、90 kW 的负载变化,并增

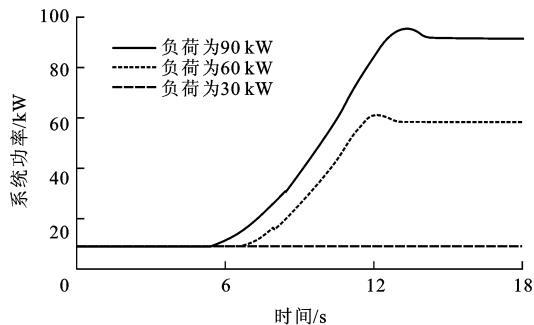


图 8 仿真结果

Fig. 8 Simulation result

L、H、SM、MB 分别代表零、小、中、大、低、高、中小、中大,表示负荷度、负荷度变化率、发动机转速与输出功率所达到的模糊程度。

4 仿真结果分析

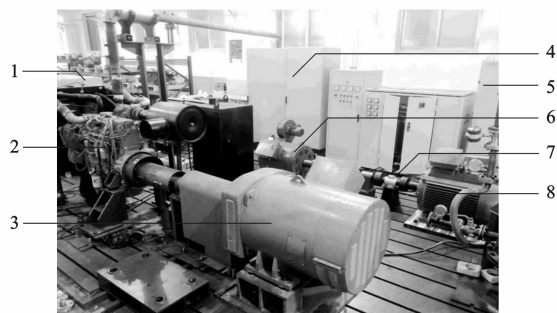
为了验证三维模糊控制器与功率匹配控制策略的合理性,采用 MATLAB/Simulink 仿真方法,搭建了包括发动机模型、发电机模型、异步电机及逆变器模型、控制系统的试验平台。仿真工况设定为:前 10 s 传动系统稳定工作在空载状态,发动机转速为 $1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,电机输出功率为 10.5 kW;10~14 s 对电机分别施以 30、60、90 kW 的斜坡型负载。仿真期间发动机油门开度不变,观察控制策略对负载的识别与响应。

加了功率给定,系统功率增加平稳,静态误差小;相比 60 kW 的负载,系统对 90 kW 负载响应更迅速,原因为 90 kW 负载负荷度变化率更大;30 kW 负载属于对车速影响不大的范畴,并未改变功率给定。三维模糊控制能够准确识别不同的负载变化,并作出响应,显示出模糊控制鲁棒性强与实时性好的优点。

5 试验结果分析

5.1 试验方案

为进一步确定功率匹配控制策略的有效性,利用百千瓦级电传动试验台进行试验,试验台布置见图 9。



1—传动系统控制柜;2—柴油发动机;3—同步发电机;4—牵引电机驱动器;5—整流柜;6—交流牵引电机;7—转速转矩传感器;8—测功机

图 9 试验台架

Fig. 9 Test bench

发动机功率为 220 kW,最高转速为 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$;发电机额定电压为 660 V;异步电机的额定功率为 110 kW,额定电压为 660 V,额定转速为 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,极对数为 3。

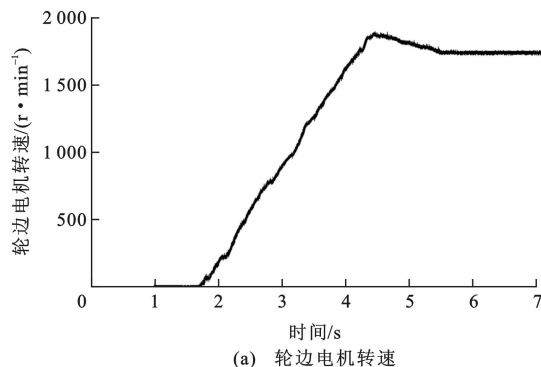
由转速传感器测得电机转速,由发动机 CAN 总线读取发动机的转速、功率、燃油消耗量,按照 SAE J1939 数据协议进行计算,其中发动机转速、功率、燃油消耗的采样周期分别为 10、10、100 ms。

5.2 试验结果分析

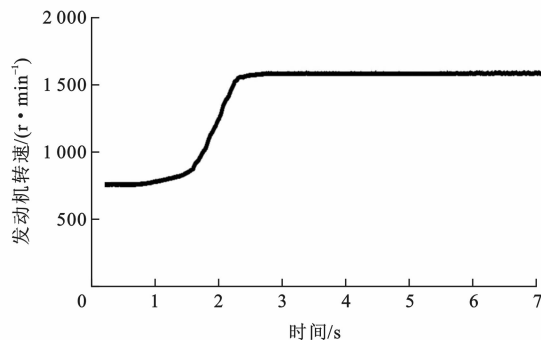
5.2.1 动态特性试验

试验中设计了带载启动、突遇负载、稳定行驶等工况。图 10 为带载启动过程的试验结果。试验仿照实际启动过程将油门开度直接提高至 80%,发动机转速上升并稳定为 $1\,610\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。启动中电机加速度小于空载启动加速度,负荷度较大。控制策略根据发动机转速、车辆负荷度及其变化率判断传动系统需要提高驱动功率给定。4.9 s 时发动机输出功率达到 42 kW,轮边电机转速增加平稳,未出现抖动现象。启动完成后,发动机工作点在最佳燃油经济性曲线上(电机转速为 $1\,692\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,系统功率为 42 kW)。

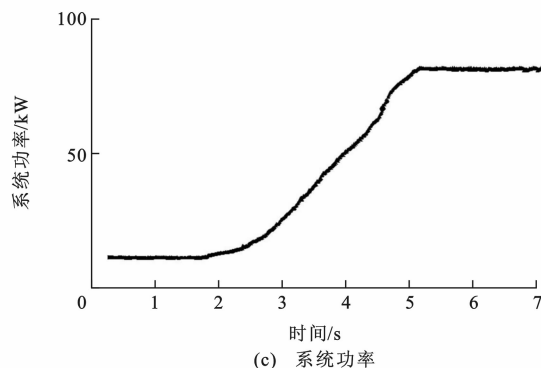
图 11 为突遇负载时的试验结果,初始状态轮边电机运行在 $1\,991\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,测功机给定负载功率为 38.6 kW,发动机转速稳定在 $1\,409\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。3.1 s 时增加测功机负载功率以模拟行驶中突遇大负载,电机转速逐渐降低,加速度为负,转速下降为 $1\,806\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,说明控制策略判定此过程对车速影响不大。随着电机转速持续下降,车辆负荷度 Δa 增加,控制策略判定负载对车速产生较大影响,增加了功率给定,牵引电机转速逐渐升高为 $1\,935\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,系统达到新的平衡状态(电机转速为 $1\,935\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,系统功率为 76.3 kW)。测功机系统在 7.2 s 后撤出负载,系统逐渐恢复到初始运行状态。



(a) 轮边电机转速



(b) 发动机转速



(c) 系统功率

图 10 启动过程试验结果

Fig. 10 Test results of starting process

动态特性试验表明利用车辆负荷度能够实现对大负载、启动工况的识别。电机驱动系统能够跟踪并响应驱动系统的功率需求,负载变化引起的轮速波动也平稳。

5.2.2 动态油门开度下的系统响应

为了观察动态油门开度下控制策略的响应,设计了能够模拟矿用汽车实际行驶工况的试验。试验过程包括启动、平稳运行、缓坡爬坡、急坡爬坡、下坡几个过程,基本覆盖车辆行驶中的主要工况,试验结果见图 12。

在平稳运行过程中(6~97 s、353~412 s)添加了不同强度的负载扰动,电机转速变化平稳且未出现明显跌落。在急、缓 2 种坡度(183~261 s、473~494 s)的爬坡过程中,电机转速曲线对系统功率曲线的反应迅速,显示控制策略能够满足矿用汽车的

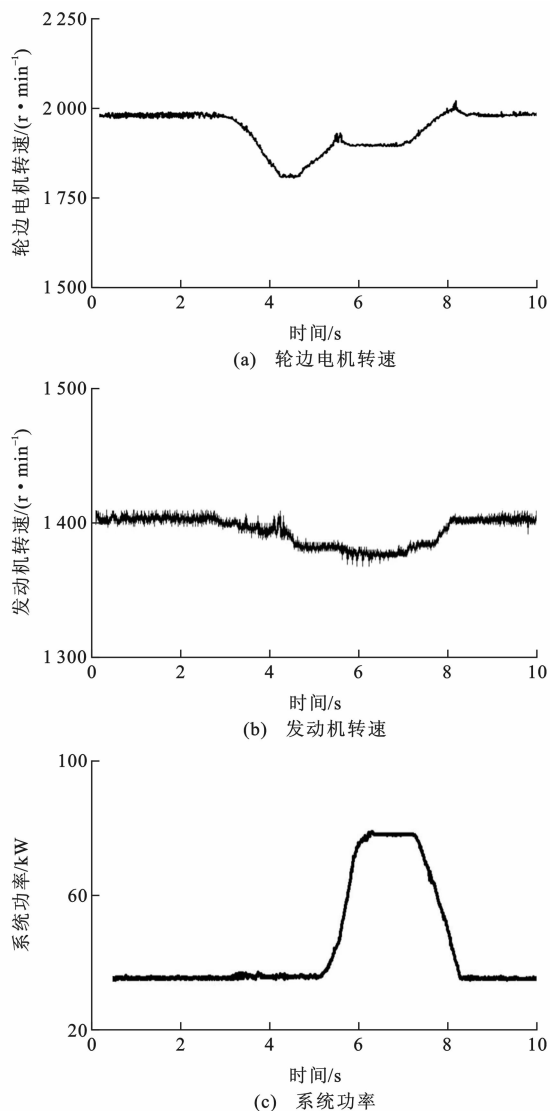


图 11 突加负载试验结果

Fig. 11 Test results of sudden loading

动力性。从发动机转速曲线变化可以看出驾驶人操作次数较少,因为控制策略克服了一些小扰动而并不需要驾驶人进行干预,同时并未出现由于动力与负载不匹配的窜车、急减速等情况。

在台架试验中利用测功机反拖轮边电机来模拟下坡制动过程(273~326 s),发动机与发电机停止向直流母线输送功率。系统功率的监测点设置在发动机输出端,因此,在下坡过程中系统功率较小但不为 0。

5.2.3 发动机工作点与燃油消耗量对比试验

对功率匹配策略与满足最大功率需求策略的传动系统进行多次对比试验。试验中测功系统给定的负载功率分别为 10、20、…、80 kW,发动机油门开度由 0 升至 80%,每次试验保持稳定运行 15 min,测量发动机工作点与燃油消耗量,结果分别见图 13、

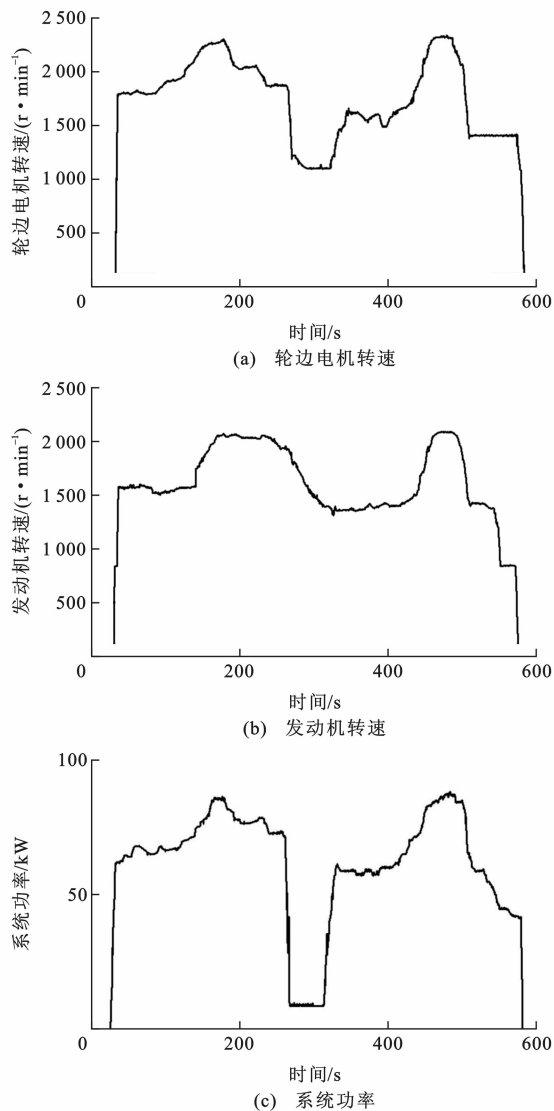


图 12 实际行驶工况的试验结果

Fig. 12 Test results of real driving cycles

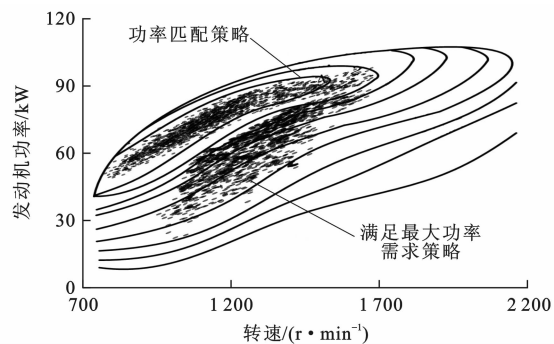


图 13 稳态运行发动机工作点

Fig. 13 Working points of engine for stable running

14。基于功率匹配策略的发动机工作点更靠近最佳燃油经济性曲线,并且转速在 $700 \sim 1\,200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围的工作点改善更为明显。从燃油消耗量曲线可以看出负载功率越大节省的燃油量越多,最大值为 70 kW 负载下节约燃油 306.0 g,最小值为 10 kW

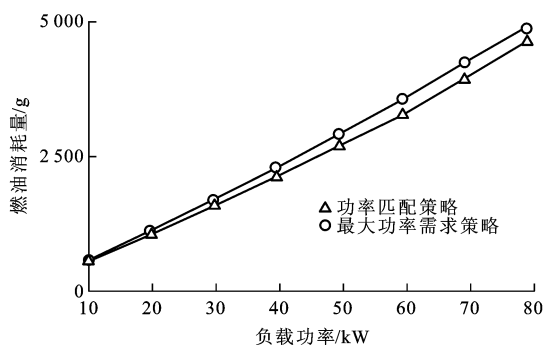


图 14 燃油消耗量对比

Fig. 14 Comparison of fuel consumptions

负载下节约 60.6 g。从油耗降低比例分析,负载为 40 kW 时油耗降低最大(10.8%),负载为 80 kW 时油耗降低最小(4.8%)。这说明车辆在满负载工作时要保证车辆的动力性,两种策略下发动机工作点均位于功率外特性区;在小负载工况下能够使发动机处于更经济的工作点,验证了功率匹配策略的效果。

6 结 语

在分析了矿用汽车交流传动系统功率耦合特点的基础上,提出了基于功率匹配的分层控制策略。利用模糊算法实现了功率匹配策略。台架试验表明,车辆负荷度能够准确地识别车辆的负荷程度。控制策略可以满足启动及突遇大负载工况下驱动系统的能量需求。动态油门开度下的系统响应显示出该控制策略的动力性与可行性。在稳定行驶工况中发动机工作点落在最佳燃油经济区附近,燃油经济性改善明显。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 李晓英,于秀敏,李 君,等.串联混合动力汽车控制策略[J]. 吉林大学学报:工学版,2005,35(2):122-126.
LI Xiao-ying, YU Xiu-min, LI Jun, et al. Control strategy for series hybrid-power vehicle[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(2): 122-126. (in Chinese)
- [2] 彭 武,张俊智,卢青春.混合动力电动公共汽车控制策略的仿真[J].公路交通科技,2003,20(1):148-150,154.
PENG Wu, ZHANG Jun-zhi, LU Qing-chun. Simulation on the control strategy of hybrid electric bus[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 148-150, 154. (in Chinese)
- [3] CHAN C C. An overview of electric vehicle technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(9): 1202-1213.
- [4] CHAN C C. The state of the art of electric and hybrid

vehicles[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(2): 247-275.

- [5] 王 磊,张 勇,舒 杰,等.基于模糊自适应滑模方法的混联式混合动力客车模式切换协调控制[J].机械工程学报,2012,48(14):119-127.
WANG Lei, ZHANG Yong, SHU Jie, et al. Mode transition control for series-parallel hybrid electric bus using fuzzy adaptive sliding mode approach[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 119-127. (in Chinese)
- [6] MURPHEY Y L, PARK J, CHEN Z, et al. Intelligent hybrid vehicle power control—Part I: machine learning of optimal vehicle power[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(8): 3519-3530.
- [7] MURPHEY Y L, PARK J, KILIARIS L, et al. Intelligent hybrid vehicle power control—Part II: online intelligent energy management[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 69-79.
- [8] JOHANNESSON L, PETTERSSON S, EGARDT B, et al. Predictive energy management of a 4QT series-parallel hybrid electric bus[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(7): 1440-1453.
- [9] 林巨广,顾 杰,朱茂飞.基于驾驶意图模糊识别的 PHEV 输出转矩控制的研究[J].汽车工程,2012,34(11):984-989.
LIN Ju-guang, GU Jie, ZHU Mao-fei. A study on PHEV output torque control based on fuzzy recognition of driver's intention[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(11): 984-989. (in Chinese)
- [10] 孙以泽,王其明.车辆 AMT 中道路条件及驾驶意图的模糊识别[J].汽车工程,2001,23(6):419-422.
SUN Yi-ze, WANG Qi-ming. Fuzzy discernment of the driving environment and the driving intention in AMT[J]. Automotive Engineering, 2001, 23(6): 419-422. (in Chinese)
- [11] 邱 铁,徐子川,江 贺.基于模糊控制的智能车路况识别[J].计算机工程与应用,2009,45(14):213-216.
QIU Tie, XU Zi-chuan, JIANG He. Smartcar road status recognition based on fuzzy control[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(14): 213-216. (in Chinese)
- [12] 邹 渊,陈 锐,侯仕杰,等.基于随机动态规划的混合动力履带车辆能量管理策略[J].机械工程学报,2012,48(14):91-96.
ZOU Yuan, CHEN Rui, HOU Shi-jie, et al. Energy management strategy for hybrid electric tracked vehicle based on stochastic dynamic programming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 91-96. (in Chinese)
- [13] 林歆悠,孙东野,尹燕莉,等.基于随机动态规划的混联式混合动力客车能量管理策略[J].汽车工程,2012,34(9):830-836, 858.
LIN Xin-you, SUN Dong-ye, YIN Yan-li, et al. The energy management strategy for a series-parallel hybrid electric bus based on stochastic dynamic programming[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(9): 830-836, 858. (in Chinese)
- [14] TATE E D, GRIZZLE J W, PENG H. Shortest path stochastic control for hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2008, 14(18):

- 1409-1429.
- [15] 刘洪波,雷雨龙,傅尧,等.基于转矩的车辆负载识别方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2012,42(5):1107-1112.
- LIU Hong-bo, LEI Yu-long, FU Yao, et al. Torque-based vehicle load recognition method[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(5): 1107-1112. (in Chinese)
- [16] 张泰,葛安林,唐春学,等.越野汽车机械自动变速器换挡规律的自适应控制[J].农业机械学报,2006,37(4):5-8.
- ZHANG Tai, GE An-lin, TANG Chun-xue, et al. Shift schedule self-adaptive control of off-road vehicle automated mechanical transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 5-8. (in Chinese)
- [17] 张泰,葛安林,郭立书,等.基于车辆负荷度的换挡规律研究[J].农业机械学报,2004,35(3):9-12.
- ZHANG Tai, GE An-lin, GUO Li-shu, et al. Shift schedule based on vehicle loading[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3): 9-12. (in Chinese)
- [18] 金辉,李磊,李斌虎,等.基于加速度区间判断的坡道识别方法[J].中国公路学报,2010,23(1):122-126.
- JIN Hui, LI Lei, LI Bin-hu, et al. Slope recognition method based on acceleration interval judgment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 122-126. (in Chinese)
- [19] 雷雨龙,付尧,刘科,等.基于扩展卡尔曼滤波的车辆质量与道路坡度估计[J].农业机械学报,2014,45(11):9-13,8.
- LEI Yu-long, FU Yao, LIU Ke, et al. Vehicle mass and road grade estimation based on extended Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 9-13, 8. (in Chinese)
- [20] 王玉海,董瑞先,王松,等.基于SAE J1939协议的重型车辆坡道识别实时算法[J].汽车工程,2010,32(7):640-642,647.
- WANG Yu-hai, DONG Rui-xian, WANG Song, et al. Real-time road slope recognition algorithm for heavy truck based SAE J1939 protocol[J]. Automotive Engineering, 2010, 32(7): 640-642, 647. (in Chinese)
- [21] 金辉,葛安林,秦贵和,等.基于纵向动力学的坡道识别方法研究[J].机械工程学报,2002,38(1):79-86.
- JIN Hui, GE An-lin, QIN Gui-he, et al. Study on slope recognition method based on vehicle's longitudinal dynamics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(1): 79-86. (in Chinese)
- [22] 尚涛,赵丁选,肖英奎,等.液压挖掘机功率匹配节能控制系统[J].吉林大学学报:工学版,2004,34(4):592-596.
- SHANG Tao, ZHAO Ding-xuan, XIAO Ying-kui, et al. Power matching for energy-saving control system of hydraulic excavators[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2004, 34(4): 592-596. (in Chinese)
- [23] 王东云,管成,潘双夏,等.液压挖掘机功率匹配与动力源优化综合控制策略[J].农业机械学报,2009,40(4):91-95.
- WANG Dong-yun, GUAN Cheng, PAN Shuang-xia, et al. Control strategy of power matching and power sources optimization for hydraulic excavators[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 91-95. (in Chinese)
- [24] PARK J, CHEN Zhi-hang, KILIARIS L, et al. Intelligent vehicle power control based on machine learning of optimal control parameters and prediction of road type and traffic congestion[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 4741-4756.
- [25] YUAN Xi-bo, WANG Jia-bin. Torque distribution strategy for a front-and rear-wheel-driven electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(8): 3365-3374.

《交通运输工程学报》2015年征订通知

《交通运输工程学报》是由国家教育部主管、长安大学主办、国务院学位委员会交通运输工程学科评议组、东南大学与西南交通大学共同协办的交通运输领域的学术理论刊物,两院院士沈志云教授任名誉主任委员;主要刊载道路与铁道工程、载运工具运用工程、交通运输规划与管理、交通信息工程与控制等领域高水平的学术论文和重大工程实践项目产生的论文;主要读者对象为国内外交通运输领域的科研人员、工程技术人员及大专院校相关专业的师生。

《交通运输工程学报》为双月刊,大16开本,128个页码,每期定价30.00元,全年共180.00元。可到当地邮局订阅,邮发代号为52-195,也可直接汇款至《交通运输工程学报》编辑部订阅。

开户银行:中国银行西安翠华路支行

账号:102407337258

账户:长安大学杂志社

邮政编码:710064

联系人:胡广平

电话:029-82334382

地址:陕西省西安市南二环路中段长安大学杂志社

E-mail:jygc@chd.edu.cn