

电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器” 在环的双侧驱动控制实时仿真*

邹 渊 孙逢春 张承宁

(北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

摘要: 为了在系统设计阶段及早验证控制方案可行性,把“驾驶员—综合控制器”纳入电传动履带车辆双侧驱动控制仿真闭环,建立双侧驱动电传动履带车辆及驱动系统模型。采用真实的驾驶员操纵设备和产品型综合控制器,不同控制策略使用不同 CAN 通讯协议匹配,被控对象及其外界环境通过数学模型在 dSPACE 中实时运算来模拟实现,构建包括 CAN 通讯在内的电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环双侧驱动控制实时仿真平台。基于该平台展开以驾驶员操作为输入的硬件在环仿真。仿真结果表明:该平台能进一步验证产品型综合控制器动力学控制算法代码,分析评估不同控制策略下车辆的机动性能。

关键词: 电传动 履带车辆 驱动控制 实时仿真

中图分类号: TJ8

0 前言

电传动履带车辆的动力性能除了与动力传动系统及路面情况相关外,还与驾驶员的操控密切相关。鲁连军等^[1]对速度控制下的车辆转向性能进行离线仿真分析。汤久望等^[2]建立了零差速电传动履带车辆动力学模型并仿真加速工况性能。上述研究未充分考虑驾驶员对整车的影响。有必要把驾驶员操纵纳入仿真环节中,形成“驾驶员—综合控制器—驱动系—车辆—地面”的闭环系统^[3]。综合控制器负责接收驾驶员操纵命令并根据双侧驱动控制策略对两侧电动机进行控制。当综合控制器硬件设计完成、控制策略转化为算法代码写入综合控制器后,需要进一步对综合控制器硬件及动力学控制算法代码进行测试,也必须把驾驶员—综合控制器纳入到仿真闭环。建立双侧驱动电传动履带车辆驱动系统动态模型,基于 dSPACE 系统构建电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环的实时仿真平台,基于该平台展开了“驾驶员—综合控制器—驱动系—车辆—地面”整车动力性实时仿真,既对产品型综合控制器软硬件系统展开了测试,也对不同的控制策略下的车辆动力性能和机动性能展开进一步评价和比较。

1 双侧驱动电传动履带车辆及驱动系统建模

忽略履带车辆的侧倾运动和俯仰运动,则履带车辆的运动可看作在具有集中质量的刚体平面运

动。以车辆几何中心 C 为原点,分别以车辆纵向和横向对称中心线为横坐标和纵坐标,建立固结于车辆几何中心的随动坐标系 Oxy ,同时以大地坐标系 $O'x'y'$ 为绝对参考系,并设初始时刻两坐标系重合,如图 1 所示。图 1 中两侧履带接地中心线间距离为 B ,任意时刻瞬时转向中心为 O ,角速度为 ω ,质心线速度为 v ,分别沿纵向和横向分解为 v_x 、 v_y , α 为履带车辆侧偏角, v_2 、 v_1 分别为内、外侧履带接地速度, F_{r1} 、 F_{r2} 为两侧履带受到滚动阻力, F_1 、 F_2 为由主动轮发出的牵引力, M_h 表示地面给履带车辆的转向阻力矩, F_h 为地面对履带车辆的横向作用力。图 1 也囊括了直驶时履带车辆受力,只要令 M_h 、 F_h 取零即可,此时 λ 、 α 、 ω 和 v_x 均为零。

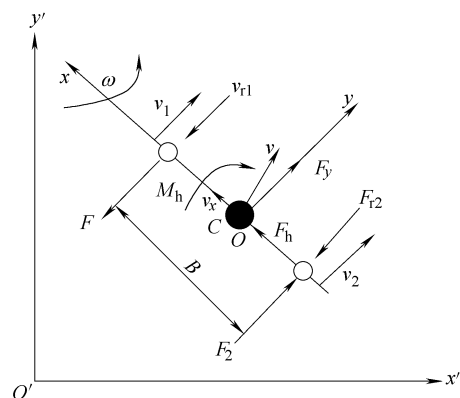


图 1 履带车辆的平面运动坐标图

根据刚体动力学定律,任意时刻 t 在坐标系 $O'x'y'$ 中,有

$$\begin{cases} -F_1 + F_2 - F_{r1} - F_{r2} = ma_y \\ F_h = ma_x \\ F_1 \frac{B}{2} + F_2 \frac{B}{2} + F_{r1} \frac{B}{2} - F_{r2} \frac{B}{2} - M_h = I_z \dot{\omega} \end{cases} \quad (1)$$

* 国防“十五”预研资助项目。20060227 收到初稿,20061215 收到修改稿

式中 a_x, a_y ——车辆质心 C 纵向和横向绝对加速度分量

任意时刻 t 有

$$a_x = \dot{v}_x - v_y \omega \tag{2}$$

$$a_y = \dot{v}_y + v_x \omega \tag{3}$$

$$v_{2,i} = v_y \pm \omega B/2 \tag{4}$$

这里着重考虑履带纵向运动, 忽略履带横向运动, 认为 $v_x = 0$, 并根据履带车辆动力学相关结论^[4-6] 得出微分方程组

$$\begin{cases} m\dot{v}_y = F_1 + F_2 - F_{r1} - F_{r2} \\ I_z \dot{\omega} = -F_1 \frac{B}{2} + F_2 \frac{B}{2} + F_{r1} \frac{B}{2} - F_{r2} \frac{B}{2} - M_h \\ M_h = \begin{cases} 0 & \omega = 0 \\ \frac{\mu m g l}{4} \left[1 - \left(\frac{2\lambda}{l} \right)^2 \right] & \omega \neq 0 \end{cases} \\ \lambda = \frac{v_y \omega l}{2\mu g} \\ \mu = \frac{\mu_{\max}}{0.925 + 0.15R/B} \\ R = \frac{v_y}{\omega} \end{cases} \tag{5}$$

式中 λ ——离心力引起两侧履带接地段瞬心纵向向前偏移距离
 R ——转向半径
 l ——整车长度
 m ——整车质量
 g ——重力加速度
 I_z ——整车转动惯量
 μ ——转向阻力系数

μ_{\max} ——原地转向情况下的转向阻力系数值

式(5)包含未知变量 $v_y, \omega, M_h, \lambda, \mu$ 和 R 共 6 个, 方程组包含 6 个方程, 可以通过数值计算方法求解。

在电传动履带车辆中, 牵引力 F_1, F_2 依据综合控制器指令通过控制两侧电动机拖动主动轮发出,

最大牵引力受到地面附着情况的影响。一般情况下, 两侧履带发出的牵引力可以表示为

$$F_{1,2} = \begin{cases} 0.5\phi G & \frac{T_{1,2} i_0 \eta}{r} > 0.5\phi G \\ \frac{T_{1,2} i_0 \eta}{r} & \frac{T_{1,2} i_0 \eta}{r} \leq 0.5\phi G \end{cases} \tag{6}$$

式中 ϕ ——地面附着系数

$T_{1,2}$ ——两侧电动机的驱动力矩

i_0 ——电动机输出轴到主动轮的传动比

η ——电动机转子输出轴到履带的效率

该履带车辆从电动机转子输出轴到主动轮采用了圆柱齿轮和行星齿轮两级传动, 同时考虑主动轮到履带的机械效率, 则从两侧电动机转子输出轴分别到履带的机械效率取为

$$\eta_{1,2} = 0.941(0.97 - 0.003v_{1,2}) \tag{7}$$

两侧电动机及其控制器可看作响应综合控制器命令而输出力矩的执行机构, 考虑到电动机力矩响应的动态特点, 出力环节简化为线性一阶系统

$$T(s) = \frac{1}{\tau s + 1} T^*(s) \tag{8}$$

式中 τ ——电动机力矩响应时间常数, 由台架试验确定

$T^*(s)$ ——电动机控制器根据综合控制器指令确定的目标输出转矩

$T(s)$ ——电动机实际输出转矩

2 电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环的双侧驱动控制实时仿真平台

2.1 仿真平台的总体结构

图 2 为电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环的双侧驱动控制实时仿真平台总体结构示意图。驾驶员操作台把驾驶员操作转换为模拟电信号输入综合控制器。综合控制器通过 A/D 转换读入驾驶员信号, 通过 CAN 总线接收两侧电动机的反馈

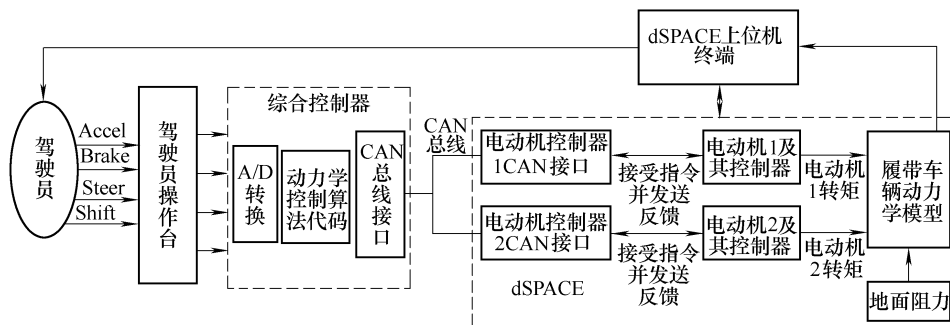


图 2 “驾驶员—综合控制器”在环的双侧驱动控制实时仿真平台的总体结构

信号，在每个控制周期运行动力学控制算法代码求得两侧电动机的转速或转矩指令，并通过 CAN 总线发送给两侧电动机。dSPACE 中运行电传动履带车辆驱动系统以及地面阻力的数学模型，并通过 CAN 接口卡 DS4302 实现两侧电动机控制器接收指令与反馈。dSPACE 上位机终端实时显示履带车辆的运动状态以反馈给驾驶员。dSPACE 中各模型的相关参数可以通过上位机终端进行在线、实时的修改。图 3 为电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环的动力学控制实时仿真平台的实物图。



图 3 “驾驶员—综合控制器”在环的动力学控制实时仿真平台的实物图

2.2 不同控制策略的 CAN 总线通讯及电传动履带车辆驱动系统模型

电传动履带车辆动力学控制硬件在环仿真的首要任务是把电传动履带车辆驱动系统数学模型转化为 dSPACE 中的实时代码，并利用 dSPACE 的 CAN 总线接口卡 DS4302 接受来自综合控制器的转速指令，同时把 dSPACE 中模型实时计算的两侧电动机的转速反馈给综合控制器。由于存在两个电动机控制器，因此采用 DS4302 中 2 个 CAN 控制器分别进行每侧电动机指令与反馈的发送与接收。在 Matlab/Simulink 中可以分别设置两个 CAN 控制器的接收器和发送器模块实现两侧电动机对 CAN 总线信号的发送与接收。由于调节转速与调节转矩的电传动整车动力驱动系统中电动机控制的方式不同，因此不同的动力学控制算法代码对应不同的整车动力驱动系统模型。图 4 为进行调节转速的动力学控制硬件在环仿真时电传动履带车辆驱动系统模型。在模型中，采用 dSPACE 中两个 CAN 控制器分别接受综合控制器的转速指令，并通过 CAN 总线向综合控制器发送两侧电动机的实际转速。图 5 为进行调节转矩的动力学控制硬件在环仿真时电传动履带车辆的驱动系统模型。该模型中，两个 CAN

控制器分别接收综合控制器的转矩指令，同时把实时运算的两侧电动机转速发送给综合控制器。

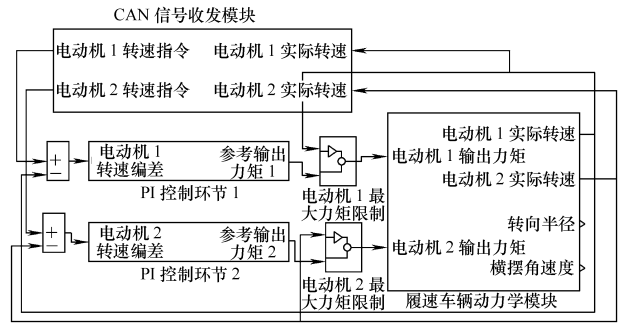


图 4 调节转速的动力学控制硬件在环仿真时电传动履带车辆驱动系统模型

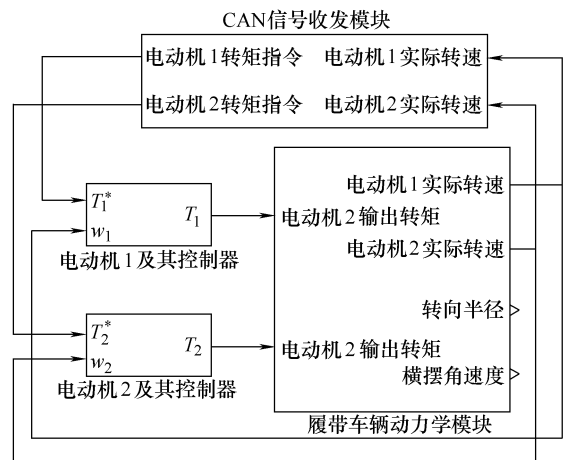


图 5 调节转矩的动力学控制硬件在环仿真时电传动履带车辆驱动系统模型

综合控制器和 dSPACE 运算模型存在 CAN 总线通讯，为保证运算的同步性，必须综合考虑控制算法代码执行周期以及运算的实时性来决定电传动履带车辆驱动系统模型的运算步长^[7-8]。由于综合控制器控制算法执行周期为 50 ms，电传动履带车辆驱动系统模型运算量小，具有较好的实时性，因此模型的运算步长取小于 50 ms 即可，仿真时取 1 ms。

2.3 路面参数实时修改及电传动履带车辆动力学状态的图形化显示

在电传动履带车辆的实际行驶中，履带接地路面性质随时发生变化，也即滚动阻力系数 f 和转向阻力系数 μ 随时发生改变，因此地面对履带车辆的阻力也是实时变化的。在电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环的动力学控制实时仿真中，可以通过 dSPACE 上位机终端对滚动阻力系数 f 和转向阻力系数 μ 进行实时修改，以测试不同路面下动力学控制算法代码的效果与整车的性能。其次，考虑到路面阻力的随机因素，可以通过对 dSPACE 上位机终端的操作造成两侧履带直驶时两侧阻力不

完全一致的情况，测试控制算法能否有效地保持车辆直线行驶。另外，在动力学控制仿真中，还可以通过对 dSPACE 上位机终端的操作造成单侧履带受到较大阻力的工况，测试该工况下的车辆直驶稳定性。

在电传动履带车辆硬件在环的动力学控制实时仿真中，可以把整车的动力学状态、阻力情况以及两侧电动机的情况实时、动态地显示在 dSPACE 上位机中，形成面向驾驶员的整车运动情况的反馈。图 6 为电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环的动力学控制实时仿真界面，除了实时显示履带车辆运动学参数、两侧主动轮输出转矩和功率等变量外，还可以在线仿真过程中设定两侧履带的不同的地面阻力特性。

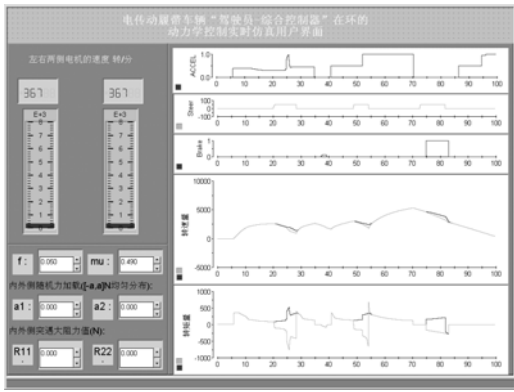


图 6 电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环的动力学控制实时仿真界面

3 电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环的动力学控制实时仿真

基于电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环的动力学控制实时仿真平台可以对不同动力学控制算法代码进行测试与验证，同时进行考虑驾驶员输入在内的电传动履带车辆动力学控制仿真，评价不同控制策略下的整车性能。下面选定典型路面和工况，分别进行速度调节和转矩调节的控制算法代码的动力学硬件在环仿真。

仿真工况 1 中综合控制器采用调节转速的动力学控制算法代码，在不同路道路条件下对加速踏板、制动踏板与转向盘配合实现的直驶与转向过程展开模拟。图 7 为加速踏板、转向盘与制动踏板行程百分比，共进行 7 次转向，第 2 次和第 7 次为转向盘与制动踏板配合制动中转向，其余转向通过加速踏板与转向盘配合完成，其中第 1 次在加速中同时实现转向。图 8 为连续转向过程中两侧电动机转速指令和实际速度、输出力矩、两侧电动机以及总机械

输出功率和转向阻力矩变化情况。在制动转向中，外侧电动机仍输出驱动力矩，该力矩比等效到电动机输出轴的阻力矩要小一些，内侧电动机仍输出制动力矩，该力矩比等效到电动机输出轴的驱动力矩要大一些，因此两侧电动机同时降速，并形成了速度差。加速转向中与制动转向恰恰相反。

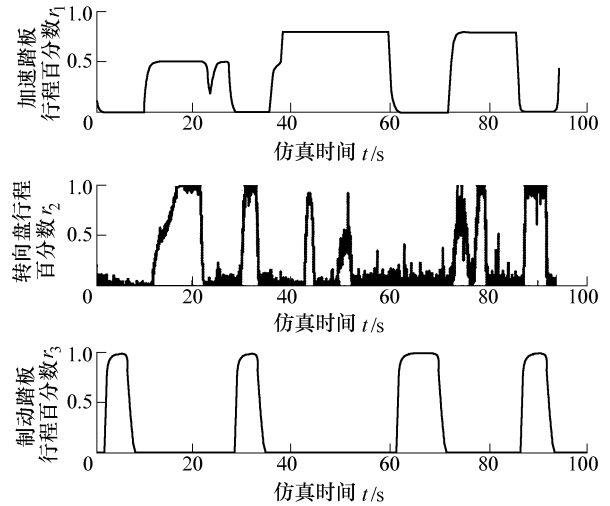


图 7 加速踏板、转向盘与制动踏板行程百分数

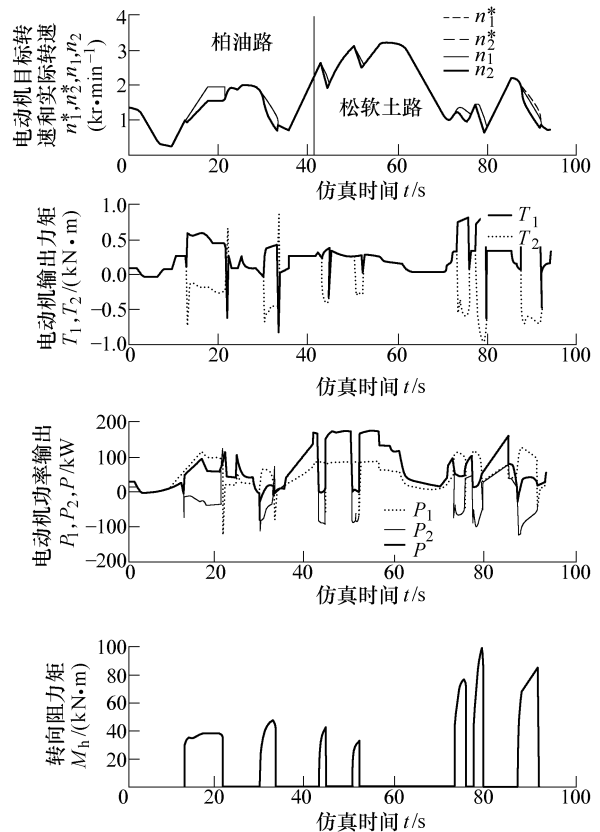


图 8 转向过程中各参数变化曲线

仿真工况 2 中综合控制器采用调节转矩的动力学控制代码，对不同路面下通过加速踏板和转向盘配合实现转向过程，制动踏板信号为零。图 9 显示了加速踏板与转向盘行程自分数，驾驶员共进行了

6次转向。图10为转向过程中各参数的变化曲线。第3次转向为修正转向,该转向过程中驾驶员转向盘量程较小,两侧电动机同时输出驱动力矩,但外侧电动机的驱动力矩要大于内侧电动机。其他转向为再生性转向,转向中驾驶员转向盘量程较大,外侧电动机驱动,内侧电动机制动。后3次转向位于松软土路,转向阻力矩较大,因此形成的转速差要小一些,同时整车平均车速降低了。从机械输出总功率来看,加速过程一般大于转向过程,同时修正性转向要大于再生性转向,主要原因是直驶加速功率的影响。该仿真工况也说明调节转矩的动力学控制策略对驾驶员操作要求较高,操作负荷加大,要求驾驶员具有较高的驾驶技能。

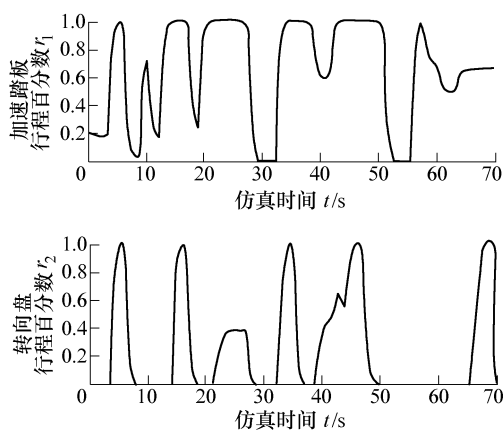


图9 加速踏板与转向盘行程百分数

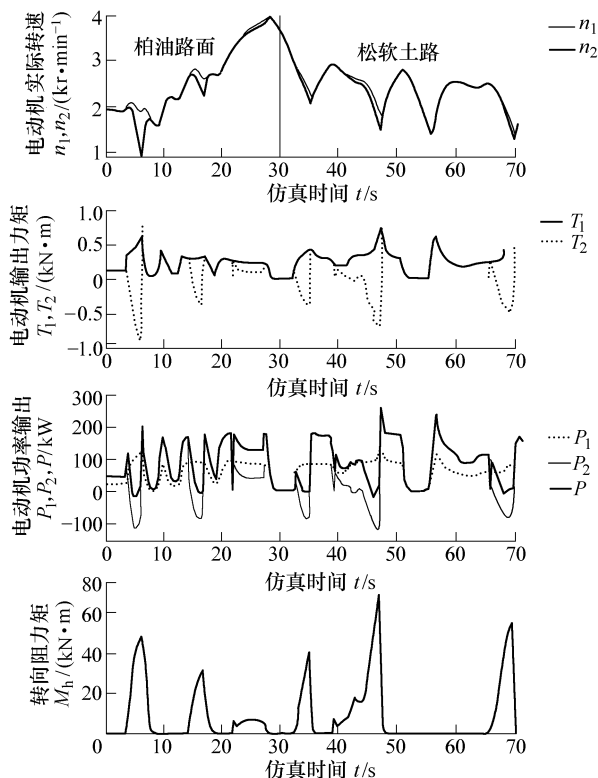


图10 转向过程中各参数的变化曲线

4 结论

(1) 采用真实的驾驶员操纵设备和产品型综合控制器,被控对象及其外界环境通过数学模型在dSPACE中实时运算来模拟实现,构建了包括CAN总线通讯在内的电传动履带车辆“驾驶员—综合控制器”在环双侧驱动控制实时闭环仿真系统。

(2) 基于该系统展开以驾驶员操作为输入的硬件在环仿真,进一步验证产品型综合控制器动力学控制算法代码,分析评估不同控制策略下车辆的机动性能。

(3) 应用实践表明该系统能快速、有效验证控制策略及算法,缩短控制策略及算法代码调试周期。

参 考 文 献

- [1] 鲁连军,孙逢春,翟丽.基于MATLAB SIMULINK电传动履带车辆转向性能仿真[J].兵工学报,2006,27(1):69-74.
- [2] 汤久望,刘维平,刘德刚,等.电传动履带车辆系统建模及加速工况性能仿真[J].系统仿真学报,2006,18(5):1350-1352.
- [3] 雷雨成.汽车系统动力学与仿真[M].北京:国防工业出版社,1997.
- [4] 汪明德,赵毓芹,祝嘉光.坦克行驶原理[M].北京:国防工业出版社,1983.
- [5] MERHOF W[德].履带行驶力学(中译本)[M].北京:国防工业出版社,1989.
- [6] 邹渊.电传动履带车辆双侧驱动控制策略研究[D].北京:北京理工大学,2004.
- [7] 廖瑛,梁加红,姚新宇.实时仿真理论与支撑技术[M].湖南:国防科技大学出版社,2002.
- [8] 杨涤,李立涛,杨旭.系统实时仿真开发环境与应用[M].北京:清华大学出版社,2003.

ELECTRIC TRACKED VEHICLE REAL-TIME SIMULATION OF DUAL-MOTOR DRIVING CONTROL WITH DRIVER-GLOBAL CONTROLLER IN-LOOP

ZOU Yuan SUN Fengchun ZHANG Chengning
(School of Mechanical and Vehicular Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: To validate the feasibility of control scheme in the initial process of system design, driver and global controller is

combined into simulation loop of electric tracked vehicle's dual-motor driving control. Dual-motor driving electric tracked vehicle and its drive system is modeled. Real driver's input devices and global controller are applied. Different CAN protocols are matched with different control strategies. Controlled object and its plant are simulated based on its mathematic model by real-time computation in dSPACE. The real-time simulation platform of electric tracked vehicle's dual-motor driving control with driver, global controller and CAN in-loop is built up. Real-time simulation with the input of driver's operates is performed based on the platform. Simulation results show the real global controller's algorithm and software code are verified and the maneuverability with different control strat-

egy is analyzed and evaluated rapidly based on the simulation platform.

Key words: Electric drive Tracked vehicle Drive control
Real-time simulation

作者简介: 邹渊, 男, 1976 年出生, 讲师。主要研究方向为车辆电传动。

E-mail: zouyuan@china.com.cn

孙逢春, 男, 1958 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动汽车、车辆电传动。

E-mail: sunfch@bit.edu.cn

张承宁, 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动汽车、车辆电传动。

E-mail: zhangchn@vip.sina.com



(上接第 192 页)

- [9] 李志纯, 黄海军. 随机交通分配中有效路径的确定方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2003, 3(1): 28-32.

MODELING OF PRODUCT FAMILY STRUCTURE AND MODULE ANALYSIS METHOD BASED ON COMPLEX NETWORK

FAN Beibei QI Guoning
(*Institute of Contemporary Manufacturing
Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou 310027*)

Abstract: Applying complex network to product family structure modeling, network model of parts relationship for product family is presented. Parts and components are the nodes of the network and subjection relations of parts and components are

the edges. Network model of module relationship is evolved. Parameters of the networks such as betweenness, usage times and product numbers of each node are calculated via simple path searching algorithm. Through analyzing and comparing these parameters, a method of distinguishes various modules based on network model is presented. As an example, a product family of the industry steam turbine is researched with this algorithm and some useful results of analyzing module characters are obtained. Distinguishing basic modules, must-selected modules and may-selected modules is an important work. The idea can be applied in looking for key modules and analyzing conversion of module types, which is the base and key for researching evolvement of product family.

Key words: Product family Complex network Module

作者简介: 樊蓓蓓, 女, 1980 年出生, 博士研究生。主要研究方向为大批量定制, 复杂网络理论及其应用, 产品模块化设计等。

E-mail: sally_fanbeibei@yahoo.com.cn