

四轮轮毂电动汽车横摆角速度自抗扰控制

陈锐, 宋新飞, 孙鹤, 张强, 李晨

(中国人民解放军第一航空学院 航空电子工程系, 河南 信阳 464000)

摘要: 汽车的横摆角速度对汽车稳定性和安全性有较大影响, 针对汽车行驶控制时的抗干扰能力, 目前还没有特别有效的汽车横摆角速度控制策略; 创新性设计了基于自抗扰控制理论的用于四轮轮毂电动汽车横摆角速度的高性能控制策略; 首先分析了汽车横摆角速度控制的动态模型, 并通过数学变换, 将其转换为二阶自抗扰控制器被控对象的标准形式; 再设计双层控制结构, 包括直接横摆力矩制定层和转矩分配层; 在直接横摆力矩制定层, 利用二阶自抗扰控制器计算出控制汽车横摆角速度所需的附加横摆力矩; 在转矩分配层, 设计了转矩分配算法, 利用附加横摆力矩得到4个车轮的指令转矩, 进而控制电动汽车横摆角速度; 最后, 通过 Matlab/Simulink 和汽车动力学仿真软件 CarSim 联合仿真验证了所设计控制策略的有效性。

关键词: 四轮轮毂电动汽车; 横摆角速度; 自抗扰控制技术; 直接横摆力矩控制

Active Disturbance Rejection Control for Yaw Rate of Four in-wheel Driven Electric Vehicle

Chen Rui, Song Xinfei, Sun He, Zhang Qiang, Li Chen

(First Aeronautical College of Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: The yaw rate of vehicle has a great influence on stability and safety. There is no effective control strategy used to restraining the disturbance. This paper focuses on the yaw rate control for four in-wheel independent drive (4WID) electric vehicles. A two layer control model (direct yaw-moment control layer and torque distribution layer) is presented to achieve the high performance control. In the upper layer, A direct yaw-moment controller based on Active Disturbance Rejection Control (ADRC) is built through carefully analyzing the control system. Then the deviation torque is calculated for the purpose of control. In the lower layer, an algorithm is designed to distribute torque to the motor drive systems. In the end, the effectiveness of the controller is examined using a driving simulator system.

Keywords: four in-wheel independent drive electric vehicles; yaw rate; active disturbance rejection control; direct yaw-moment control

0 引言

汽车行驶过程中的航向角由质心侧偏角和横摆角之和确定。横摆角速度对时间积分可得横摆角, 对汽车转向特性研究可得, 当质心侧偏角很小时, 横摆角速度影响汽车车身稳定, 所以, 为保证汽车车身稳定性和安全性, 汽车横摆角速度要被控制在一定范围, 对汽车横摆角速度进行合理高效的控制已经引起越来越多的关注^[1-3]。

本文所研究的对象是四轮轮毂电动汽车, 与传统内燃机汽车相比, 四轮轮毂电动汽车具有更多的可控自由度, 成为研究新一代车辆控制技术的重要研究方向以及探索车辆最优动力学性能的理想载体。相比一般电动汽车单电机驱动方式, 四轮轮毂电动汽车4个驱动轮可以单独控制, 所以可以通过直接横摆力矩控制来控制汽车的侧向动态性能^[4-7]。对于直接横摆力矩控制, 现有的控制算法有PID控制、模糊控制^[8]、自适应控制^[9]等。PID控制算法简单、参数少、可靠性高, 但是PID控制对负载变化的自适应能力弱, 对系统内外干扰的抑制能力差; 而像模糊控制和自适应控制这样的高级控制算法, 也有实时性较弱和结构复杂、控制结果不理想等缺点。基于以上控制算法的不足, 本文的四轮轮毂电动汽车横摆角速度控制策略基

于自抗扰控制算法(ADRC)提出, 自抗扰控制算法是一种不依赖被控对象精确模型的控制方法, 具有算法简单、响应速度快、系统超调低、抗干扰能力强、适用范围广等优点。当被控对象参数发生变化或系统存在不确定性扰动时, 该控制器具有很好的自适应性和鲁棒性。

本文针对四轮轮毂电动汽车可通过直接横摆力矩控制的特点, 设计了一种双层控制结构, 即基于自抗扰控制算法的直接横摆力矩制定层和转矩分配层。通过该双层控制结构实现了对四轮轮毂电动汽车的横摆角速度控制。最后, 基于 Matlab/Simulink 和汽车动力学仿真软件 CarSim 的联合仿真也证明了本文设计控制算法的有效性。

1 模型分析与数学变换

本文以整车非线性八自由度动力学模型作为仿真时的实车模型, 这八个自由度包括纵向速度、侧向速度、横摆角速度和侧倾角组成的4个自由度以及4个轮速自由度。八自由度车辆模型用于验证论文设计的控制算法的可行性和有效性。

而控制算法的设计, 即对汽车横摆角速度进行控制分析, 实质上是研究车辆的侧向运动和横摆运动, 因此, 采用只具有侧向和横摆两个运动自由度的操纵模型——线性二自由度汽车操纵模型进行算法分析。

该模型方程如下^[10]:

$$m(\dot{u}\bar{\beta} + u\omega_r) = (C_{af} + C_{ar})\beta + \frac{1}{u}(aC_{af} - bC_{ar})\omega_r - C_{af}\delta$$

收稿日期:2016-02-24; 修回日期:2016-04-18。

作者简介:陈锐(1989-),男,陕西咸阳市人,硕士研究生,主要从事控制理论在工业领域和军事中的应用方向的研究。

$$I_z \ddot{\omega}_r = (aC_{af} - bC_{ar})\beta + \frac{1}{u} (a^2 C_{af} + b^2 C_{ar})\omega_r - aC_{af}\delta + \Delta M \quad (1)$$

式中： m 表示车辆质量， u 为车辆纵向车速； β 为质心侧偏角； ω_r 是横摆角速度； δ 为前轮旋转角度； C_{af} 、 C_{ar} 分别为前轮侧偏刚度和后轮侧偏刚度； a 、 b 分别为前后车轮的轴距； I_z 为车辆围绕 Z 轴的转动惯量； ΔM 为附加横摆力矩值。

将描述汽车线性二自由度操纵模型的式 (1) 改写成状态方程的形式：

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X} + B\Delta M + H\delta \quad (2)$$

其中：

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \begin{bmatrix} \bar{\beta} \\ \bar{\omega}_r \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} \beta \\ \omega_r \end{bmatrix}, \\ A &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{12} \\ b_{22} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix}, \\ a_{11} &= \frac{(C_{af} + C_{ar})}{mu}, a_{12} = \frac{-1 + (aC_{af} - bC_{ar})^2}{mu} \\ a_{21} &= \frac{(aC_{af} - bC_{ar})}{I_z}, a_{22} = \frac{(a^2 C_{af} + b^2 C_{ar})}{I_z u} \\ b_{11} &= \frac{-C_{af}}{mu}, b_{12} = 0, b_{21} = -\frac{aC_{af}}{I_z}, b_{22} = \frac{1}{I_z} \end{aligned}$$

$$\text{令 } W = [\omega_1 \quad \omega_2]^T = H\delta$$

则汽车二自由度操纵模型的状态方程可改写为：

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X} + B\Delta M + W \quad (3)$$

将 (1) 式带入 (3) 式且进行拉氏变换并消去质心侧偏角 β ，可得到：

$$\begin{aligned} \omega_r s^2 - (a_{11} + a_{22})\omega_r s + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})\omega_r = \\ b_{22}\Delta Ms + a_{21}\omega_1 - a_{11}\omega_2 + \omega_2 s + (a_{21}b_{12} - a_{11}b_{22})\Delta M \end{aligned} \quad (4)$$

将式 (4) 反拉氏变换就可以得到：

$$\ddot{\omega}_r = a\ddot{\omega}_r - b\omega_r + \omega_e - b_0\Delta M \quad (5)$$

其中：

$$\begin{aligned} a &= (a_{11} + a_{22}), b = (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}), b_0 = -(a_{21}b_{12} - a_{11}b_{22}) \\ \omega_e &= b_{22}\Delta M + a_{21}\omega_1 - a_{11}\omega_2 + \omega_2 \end{aligned}$$

令 $f = a\ddot{\omega}_r - b\omega_r + \omega_e$ ，是作用于系统的各种扰动（包括建模、未建模动态和外扰）的“总和扰动”。则整个系统可以转换为如下的二阶系统：

$$\begin{cases} \dot{\bar{X}}_1 = X_2 \\ \dot{\bar{X}}_2 = f + b_0\Delta M \\ \omega_r = X_1 \end{cases} \quad (6)$$

2 控制器设计

本文设计的汽车横摆角速度控制策略采用双层控制结构，其上层为基于自抗扰控制算法的直接横摆力矩制定层，通过自抗扰控制理论，设计了质心侧偏角自抗扰控制器，得到附加横摆力矩 ΔM 。下层为转矩分配层，通过附加横摆力矩值 ΔM 对各个车轮转矩进行分配，给汽车 4 个电机输入分配的指令转矩，从而控制电动汽车的横摆角速度。所设计控制算法的结构框图如图 1 所示。

2.1 直接横摆力矩制定层

在直接横摆力矩制定层，本文设计了一个自抗扰控制器，如图 2 所示，它由跟踪微分器、扩张状态观测器、误差非线性组合、扰动补偿等环节组成。对于式 (6) 的二阶系统，是二

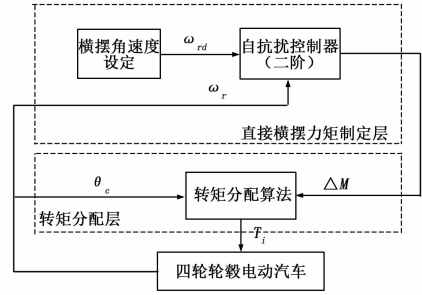


图 1 双层控制结构框图

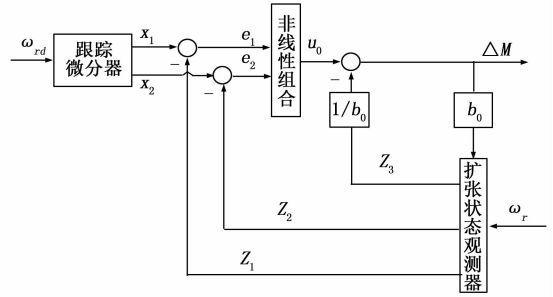


图 2 双层控制结构框图

阶自抗扰控制器被控对象的标准形式，可使用二阶自抗扰控制器进行控制，相应数学模型如下：

1) 跟踪微分器：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ x_2 = fhan(x_1 - \omega_{rd}, x_2, r_0, h_1) \end{cases} \quad (7)$$

2) 扩张状态观测器：

$$\begin{cases} E = Z_1 - \omega_r \\ \dot{Z}_1 = Z_2 - \beta_{01}E \\ \dot{Z}_2 = Z_3 - \beta_{02}fal(E, \frac{1}{2}, h) + b_0\Delta M \\ \dot{Z}_3 = -\beta_{03}fal(E, \frac{1}{4}, h) \end{cases} \quad (8)$$

3) 非线性组合：

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - Z_1 \\ e_2 = x_2 - Z_2 \\ u_0 = -fhan(e_1, ce_2, r, h_0) \end{cases} \quad (9)$$

4) 扰动补偿形成控制量：

$$\Delta M = u_0 - \frac{Z_3}{b_0} \quad (10)$$

其中： x_1 是对期望质心侧偏角 ω_{rd} 的跟踪， x_2 为 x_1 的微分， $fhan()$ 是最速控制综合函数^[11]，包含 r_0 和 h_1 两个参数，该函数主要用于让 x_1 在加速度 r_0 的限制下，“最快地”且无颤振地跟踪设定信号 ω_{rd} 。 Z_1 、 Z_2 是对该二阶系统状态变量 X_1 、 X_2 的估计值， Z_3 是对该二阶系统中不确定扰动 f 的估计值。 e_1 为控制系统的误差信号， e_2 为误差微分信号； u_0 为误差反馈控制量，用估计值 Z_3 对误差反馈控制量 u_0 进行补偿，得到绕汽车 Z 轴所需的附加横摆力矩 ΔM 。

$$fal(\epsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |x|^{\alpha} \text{sgn}(x), & |x| > \delta \\ \frac{x}{\delta^{1-\alpha}}, & |x| \leq \delta \end{cases}, \delta > 0. \quad (11)$$

2.2 转矩分配层

在转矩分配层, 实现转矩分配, 转矩分配实质上就是有约束的最优化分配问题^[12], 为了简化控制算法, 本文转矩分配层的转矩分配算法采用一侧驱动轮增加附加横摆力矩的同时, 另一侧驱动轮相应减少的分配方法, 算法如下:

$$\begin{cases} T'_{fl} = T' + \Delta M \\ T'_{fr} = T' - \Delta M \\ T'_{rl} = T' + \Delta M \\ T'_{rr} = T' - \Delta M \end{cases} \quad (12)$$

其中, $T' = K\theta_c$, 是每个驱动轮的期望驱动转矩, θ_c 是加速踏板深度, K 是反映加速踏板和期望驱动转矩之间对应关系的常数。 T'_{fl} 、 T'_{fr} 、 T'_{rl} 和 T'_{rr} 分别表示给 4 个电驱动系统的转矩设定值。

3 仿真与实验结果

3.1 仿真模型搭建

本文采用 CarSim-Matlab/Simulink 联合仿真平台对设计的汽车横摆角速度控制策略进行仿真验证分析。CarSim 是一款专门用来分析汽车动力学的仿真软件。

如图 3 所示, CarSim 与 Matlab/Simulink 的数据通信是通过 CarSim S-Function 模块实现的, Matlab/Simulink 模块通过计算得到 4 个电驱动系统的转矩设定值 Torque (T'_{fl} 、 T'_{fr} 、 T'_{rl} 和 T'_{rr}), 通过 S-Function 模块施加到 CarSim 车辆模型中, 使 CarSim 车辆模型所建车辆系统按照相应值行驶, 再通过 S-Function 模块采集车辆数据, 这可通过在 CarSim 软件中设立输入输出接口实现。

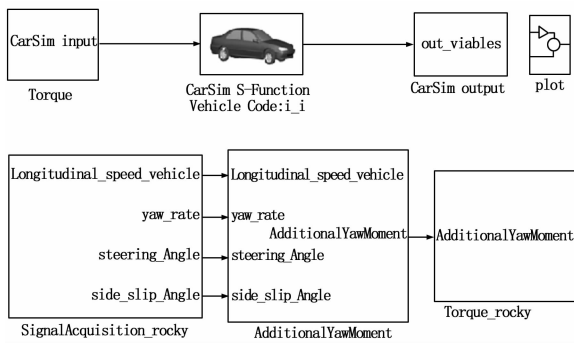


图 3 CarSim-Matlab/Simulink 联合仿真

搭建仿真平台时, 因为自抗扰控制器采用了很多特殊的非线性函数和动态结构, 直接搭建较为困难, 所以本文利用基于 S-函数的自定义模块搭建了自抗扰控制器。

以跟踪微分器为例, 由式 (7) 可以得到该算法涉及的参数和代数关系较多, 用 Simulink 模块搭建比较困难, 因此采用 S-函数创建跟踪微分器自定义模块。最后, 对自定义的各模块进行封装组合, 得到自抗扰控制器仿真模型, 如图 4 所示。

3.2 实验验证与分析

利用搭建的 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真平台对本文设计汽车横摆角速度控制策略的跟踪性能和抗扰性能进行验证分析。仿真车辆的各参数取值如表 1 所示。

3.2.1 控制策略跟踪能力验证

控制策略跟踪能力测试时, 汽车行驶工况设定为: 初始车速设为 80 km/h, 仿真时间 10 s, 电动汽车方向盘转角设置如

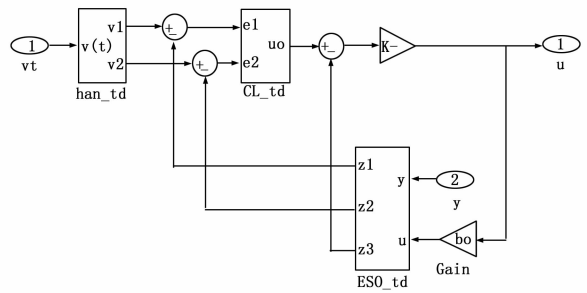


图 4 自抗扰控制器各子模型封装结果

表 1 车辆参数表

参数	符号	单位	数值
车辆重量	m	kg	1830
绕 Z 轴转动惯量	I_z	kgm^2	3819
前轴距	a	m	1.4
后轴距	b	m	1.65
前轮距	T_f	m	1.6
后轮距	T_r	m	1.6
车辆质心高度	h_{cg}	m	0.45
车轮有效半径	R_{eff}	m	0.326

图 5 所示。该设置曲线类似三角波或正弦波, 表示对任意方向盘转角设置, 本文所设计控制系统都可以跟踪。

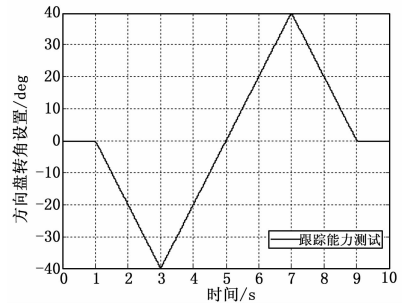


图 5 电动汽车方向盘转角设置图

实验目标是使电动汽车横摆角速度去跟踪设定曲线, 也就是期望值, 运用本文设计的控制策略去跟踪期望值曲线, 期望值曲线与最终控制结果如图 6 所示。

图 6 中, 实线是需要跟踪的期望值曲线, 短虚线是未加入控制的横摆角速度曲线, 长虚线是加入控制后的跟踪结果曲线, 可以看出, 没加控制的横摆角速度曲线跟期望值差距很大, 但是, 计入控制后, 横摆角速度曲线跟期望值几乎重合, 差距很小, 说明采用本文设计的汽车横摆角速度控制算法, 可以使汽车横摆角速度实现对设定的期望值快速、准确的跟踪。

3.2.2 控制策略抗扰能力验证

前文已经分析了作用于系统的扰动公式, 不难分析出一种建模扰动: 方向盘转角扰动, 接下来分析本文设计的横摆角速度控制算法对这种扰动的抗扰能力。

分析对方向盘转角扰动的抗扰能力时, 汽车行驶工况设定为: 直行工况, 车速设为 80 km/h, 仿真时间 10 s。如图 7 所示, 车方向盘转角设置图。该设置曲线为: 方向盘转角初始值设为 0 deg, 在 2 s 时加入幅度为 30 deg 的阶跃信号, 以此阶跃信号为干扰信号, 测试本发明设计控制系统的抗扰能力。

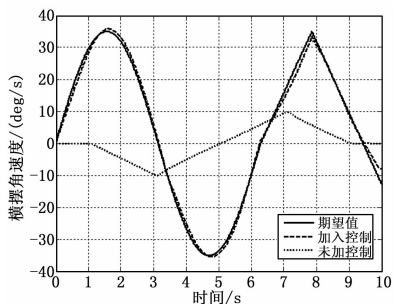


图 6 控制系统跟踪能力测试曲线图

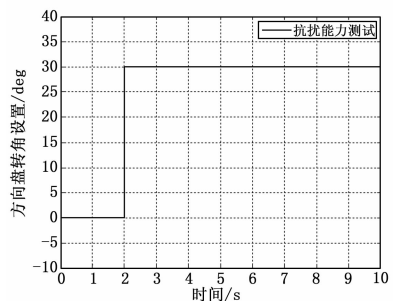


图 7 方向盘转角设置图

横摆角速度期望设定值为固定值 20，汽车受到图 7 所示的方向盘转角扰动，控制系统加入干扰与未加干扰的仿真曲线如图 8 所示。

图 8 中，横摆角速度期望设定值为固定值 20，从仿真曲线可以看出，本发明设计的控制系统可以使初值为 0 的横摆角速度快速跟踪到期望值 20，无超调且在 1.5 s 左右控制系统进入稳态，在 2 s 时控制系统受到外来扰动（加入干扰信号），此时，控制系统能自动对扰动进行动态补偿，具有波动小和恢复时间短的优点，表明本文设计控制系统具有较强抗干扰能力。

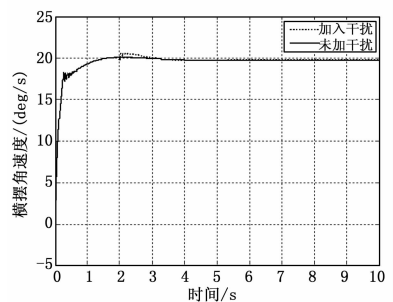


图 8 控制系统抗扰能力测试曲线图

4 结论

本文对四轮轮毂电动汽车的横摆角速度控制问题进行了深入的研究，设计了一种基于自抗扰控制理论的控制策略。最后

(上接第 94 页)

[6] 薛震寰. 三模冗余计算机技术研究 [J]. 中国科技纵横, 2012 (5): 22 - 23.

[7] 戴新发, 袁由光, 杨升春. 容错计算机及其同步机制研究 [A]. 第十届全国容错计算学术会议论文集 [C]. 2003, 15: 20.

[8] 柳振华. 三模冗余容错计算机的设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

通过 CarSim 和 Matlab/Simulink 联合仿真平台对控制算法的跟踪性能和抗扰性能进行了验证。仿真结果表明：本文所设计的四轮轮毂电动汽车横摆角速度控制算法能够使四轮轮毂电动汽车横摆角速度很好地跟踪设定值，且能够抑制系统中干扰的影响，具有响应速度快、控制精度高、适应能力强等优点。

参考文献:

[1] Boada B L, Boada M J L, Diaz V. Vehicle sideslip angle measurement based on sensor data fusion using an integrated ANFIS and an Unscented Kalman Filter algorithm [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72: 832 - 845.

[2] Feng X. Evaluation of A Novel Nonlinear Observer to Estimate Sideslip Angle and Tire Forces for Distributed Electric Vehicle. No. 2016 - 28 - 0189 [R]. SAE Technical Paper, 2016.

[3] Nam Kanghyun, et al. Estimation of sideslip and roll angles of electric vehicles using lateral tire force sensors through RLS and Kalman filter approaches [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on 60. 3 (2013): 988 - 1000.

[4] Demirci M, Gokasan M. Adaptive optimal control allocation using Lagrangian neural networks for stability control of a 4WS - 4WD electric vehicle [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2013, 35 (8): 1139 - 1151.

[5] Ivanov Valentin, et al. All-wheel-drive electric vehicle with on-board motors: Experimental validation of the motion control systems [A]. Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE [C]. IEEE, 2015.

[6] Ivanov V, Savitski D, Augsburg K, et al. Wheel Slip Control for All-Wheel Drive Electric Vehicle [A]. Proc. The 18th International Conference of the ISTVS 2014 [C]. 2014.

[7] Chen Y, Hedrick J K, Guo K. A novel direct yaw moment controller for in-wheel motor electric vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51 (6): 925 - 942.

[8] Shen Qikun, Bin Jiang, Vincent Cocquempot. Fuzzy logic system-based adaptive fault-tolerant control for near-space vehicle attitude dynamics with actuator faults [J]. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on 21. 2 (2013): 289 - 300.

[9] Soltanpour M R, Shafiei S E. Robust adaptive control of manipulators in the task space by dynamical partitioning approach [J]. Elektronika ir Elektrotechnika 101. 5 (2015): 73 - 78.

[10] Fu Chunyun, Hu Minghui. Adaptive sliding mode-based direct yaw moment control for electric vehicles [A]. Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), 2015 International Conference on [C]. IEEE, 2015.

[11] 韩京清. 自抗扰控制技术 [J]. 前沿科学, 2007, 1 (1): 24 - 31.

[12] Fredriksson J, Andreasson J, Laine L. Wheel Force Distribution for Improved Handling in a Hybrid Electric Vehicle using Nonlinear Control [A]. The 43th IEEE Conference on Decision and Control, Portugal [C]. 2004: 4081 - 4086.

[9] Ishaque K, Abdullah S S, Ayob S M, et al. A simplified approach to design fuzzy logic controller for an underwater vehicle [J]. Ocean Engineering, 2011, 38 (1): 271 - 284.

[10] Antonelli G, Chiaverini S. A fuzzy approach to redundancy resolution for underwater vehicle - manipulator systems [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11 (4): 445 - 452.