

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.02.002

基于在线参数辨识的电动助力转向补偿控制

刘涛¹, 严周栋¹, 杨娜¹, 郭桐²

(1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 山东威海 264209; 2. 北京中卓时代消防装备科技有限公司, 北京 101300)

摘要: 电动助力转向(electric power steering, EPS)系统具有非线性和时变性, 采用常系数补偿无法实现对转矩的准确跟踪, 影响驾驶员手感。文章采用滑模控制器准确跟踪电流, 并设计补偿算法, 利用带遗忘因子的递推最小二乘(recursive least squares, RLS)算法对助力装置进行在线参数辨识, 并将辨识得到的结果进行补偿控制, 在参数缓慢变化的条件下实现EPS对转矩的准确跟踪。

关键词: 电动助力转向(EPS); 补偿控制; 递推最小二乘(RLS)参数辨识; 滑模控制器; 遗忘因子

中图分类号: U463.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)02-0152-06

Compensation control of electric power steering based on online parameter identification

LIU Tao¹, YAN Zhoudong¹, YANG Na¹, GUO Tong²

(1. School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology(Weihai), Weihai 264209, China; 2. Beijing Zhongzhuzuo Fire Fighting Equipment Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: Electric power steering (EPS) system is nonlinear and time-varying. Constant coefficient compensation cannot track the torque accurately, which affects the driver's hand feeling. In this paper, the sliding mode controller is used to track the current accurately, and the compensation algorithm is designed. The recursive least squares (RLS) algorithm with forgetting factor is used to identify the parameters of the power assist device online, and the identified results are compensated. The EPS can accurately track the torque when the parameters change slowly.

Key words: electric power steering (EPS); compensation control; recursive least squares (RLS) parameter identification; sliding mode controller; forgetting factor

电动助力转向(electric power steering, EPS)系统利用电动机作为动力源, 助力装置执行决策算法计算得到助力力矩, 保证转向的轻便性和路感。EPS系统对电流进行闭环跟踪的方法较常见, 在设计助力特性曲线时一般利用转矩系数将目标助力力矩与目标电流对应起来。但实际上由于转向管柱转角的输入及助力装置阻尼、惯性的存在, 这种静态的对应关系并不准确, 无法做到精确的转矩跟踪, 会产生转向顿挫感。

为改善以上问题, 一些方法直接对转矩进行

闭环控制。文献[1]采用改进的自抗干扰控制器对转向盘转矩进行控制, 使转矩更加平顺; 文献[2]设计的自适应滑模控制算法可以快速获得设计路感, 实现方向盘的转矩跟踪。这些算法改造了机械转向系统本身特性, 需要对路感进行精心设计, 因此更适合线控转向。而对于助力力矩, 直接反馈控制比较困难。文献[3]的转矩跟踪算法选择电机角度作为参考信号, 把负载转矩干扰控制在回路内, 增强了系统的鲁棒性, 但转向阻力矩的获取难度较大。

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-07-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51905121)

作者简介: 刘涛(1966—), 男, 山东威海人, 博士, 哈尔滨工业大学(威海)教授, 硕士生导师;

杨娜(1982—), 女, 山东淄博人, 博士, 哈尔滨工业大学(威海)副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: ynhelen@163.com.

对于电流闭环的控制系统,由于未将机械转向系包括在控制回路内,对其系统特性产生的影响较小,容易获得路感,实用性较强。而对于电流闭环转矩跟踪不准确的问题,可以通过补偿控制进行改善。文献[4]采用转矩传感器通过相位超前补偿、转矩微分补偿、摩擦补偿、惯性及阻尼补偿等使EPS动态响应特性和转向轻便性得到了改善;文献[5]提出了电机动、静摩擦共同补偿控制的方法改善转向的准确性。

然而,车辆在使用过程中器件磨损老化以及环境变化都会对系统参数产生影响,文献[6-7]介绍了通过试验获得补偿系数的方法,但常值的补偿无法一直保持最佳性能。因此,本文提出对助力装置进行在线参数辨识,并由此进行补偿,以实现EPS保持最佳性能。

1 数学模型

转向盘-转向器模型为:

$$T_d + T_{as} - T_r/i_\omega = J_x \ddot{\theta}_p + B_x \dot{\theta}_p \quad (1)$$

其中: T_d 为转向盘输入转矩; θ_p 为转向管柱转角; T_{as} 为助力电机减速后的输出助力力矩; T_r 为转向阻力矩; i_ω 为转向器角传动比; J_x 、 B_x 为转向盘和转向器等效转动惯量和阻尼系数。

助力电机及减速器模型为:

$$L_a \dot{I}_a + R_a I_a + K_e \dot{\theta}_a = U_a \quad (2)$$

$$K_t I_a = J_a \ddot{\theta}_a + B_a \dot{\theta}_a + T_{as}/i_j \quad (3)$$

$$T_{as} = K_m (\theta_a/i_j - \theta_p) \quad (4)$$

其中: L_a 为电机电感; I_a 为电机电枢电流; U_a 为电机控制电压; θ_a 为电机转角; K_e 为电机反电动势系数; K_t 为电机转矩系数; i_j 为减速器减速比; K_m 为减速器等效扭转刚度; J_a 、 B_a 为电机和减速器等效转动惯量和阻尼系数。

转向阻力矩模型为:

$$T_{z1} = k_1 \left(\beta + a \frac{\omega_r}{u} - \delta \right) R \sin \gamma \cos \delta \quad (5)$$

$$T_{z2} = 0.5 G_1 a_x \sin(2\theta_{kp}) \sin \delta \quad (6)$$

$$T_f = \begin{cases} T_{cf}(\dot{\delta}), & \dot{\delta} \neq 0; \\ T_q, & \dot{\delta} = 0 \text{ 且 } |T_q| < T_{fk}; \\ T_{fk} \operatorname{sgn}(T_q), & \dot{\delta} = 0 \text{ 且 } |T_q| \geq T_{fk} \end{cases} \quad (7)$$

$$T_{cf}(\dot{\delta}) = (T_{fk} + k_n |\dot{\delta}|) \operatorname{sgn}(\dot{\delta}) \quad (8)$$

$$T_{fk}(u) = \frac{6.615u + 10.48}{u^3 - 1.048u^2 + 24.58u + 10.48} \times \frac{f}{3} \sqrt{\frac{G_1}{p}} \quad (9)$$

$$T_r = T_{z1} + T_{z2} + T_f \quad (10)$$

其中: T_{z1} 、 T_{z2} 、 T_f 分别为侧向力、垂向力引起的回正力矩以及摩擦阻力矩; R 为车轮半径; γ 为主销后倾角; δ 为前轮转角; k_1 为前轮侧偏刚度; a 为质心到前轴的距离; β 为质心侧偏角; ω_r 为车辆横摆角速度; u 为车速; G_1 为前轴轴荷; a_x 为轮胎中心到主销的水平距离; θ_{kp} 为主销内倾角; T_{cf} 为转向摩擦力矩; T_{fk} 为库伦摩擦力矩,与车速相关,通过拟合等效摩擦系数得到^[8]; k_n 为黏滞摩擦系数; T_q 为驱动力矩, $T_q = T_{as} + T_d$; f 为车轮与路面之间的摩擦系数; p 为轮胎胎压。

线性二自由度模型为:

$$(k_1 + k_2)\beta + \frac{\omega_r}{u}(ak_1 - bk_2) - k_1\delta = m(\dot{v} + u\omega_r) \quad (11)$$

$$(ak_1 - bk_2)\beta + \frac{\omega_r}{u}(a^2k_1 + b^2k_2) - ak_1\delta = I_z \dot{\omega}_r \quad (12)$$

其中: k_2 为后轮侧偏刚度; b 为质心到后轴的距离; m 为整车质量; \dot{v} 为侧向加速度; I_z 为汽车绕 z 轴转动惯量。

2 控制策略

2.1 直线型助力特性曲线设计

助力特性曲线是根据驾驶员作用在转向盘上的手力,并综合考虑车速等因素确定出的助力电流或转矩。助力特性曲线一般分为直线型、折线型和曲线型3种,本文选择形式简单的直线型助力特性曲线。设计步骤^[9]如下:

(1) 开始助力力矩 T_{d0} 。取 $T_{d0} = 2 \text{ N} \cdot \text{m}$,当转向盘手力小于开始助力力矩时,不助力。

(2) 最大转向盘手力 T_{dmax} 。国家标准规定装有EPS系统的车辆,转向盘最大切向力不能大于50 N,本文选用的车型转向盘直径为0.5 m,故取 $T_{dmax} = 12.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

(3) 车速系数 K_v 。根据驾驶员在某些特征车速下的理想手力^[10],并结合车辆不助力时方向盘所需的手力进行设计,对特征车速下的车速系数进行拟合,即

$$I = \begin{cases} 0, & 0 \leq T_d < T_{d0}; \\ K_v(T_d - T_{d0}), & T_{d0} \leq T_d < T_{dmax}; \\ I_{max}, & T_{dmax} \leq T_d \end{cases} \quad (13)$$

$$K_v(u) = -1.728 \times 10^{-5} u^3 + 2.158 \times 10^{-3} u^2 - 9.154 \times 10^{-2} u + 1.557 \quad (14)$$

2.2 滑模控制器设计

下层的电流跟踪算法中最常见的PID算法

简单可靠,但是参数固定,跟踪效果较差。滑模控制(sliding mode control, SMC)器是一种非线性鲁棒控制器,可以设计指数趋近规律,跟踪效果好,可以有效抵抗外界干扰和系统参数摄动。

对于受到扰动的电机系统有:

$$\dot{I}_a = \frac{1}{L_a}(U_a - R_a I_a - K_e \dot{\theta}_a) + q(t) \quad (15)$$

其中, $q(t)$ 为有界干扰, $|q(t)| \leq q_{\max}$ 。

设计滑模面函数如下:

$$s = e = I_m - I_a \quad (16)$$

其中: I_m 为目标电流; e 为偏差; s 为滑模面函数。

选择指数趋近率为:

$$\dot{s} = -ks - \epsilon \text{sgn}(s) - q(t) \quad (17)$$

对(16)式求导,代入(15)式可得偏差变化率的规律为:

$$\dot{s} = \dot{I}_m - \frac{1}{L_a}(U_a - R_a I_a - K_e \dot{\theta}_a) - q(t) \quad (18)$$

联立(17)、(18)式可得电压反馈输入为:

$$U_a = L_a[\dot{I}_m + k(I_m - I_a) + \epsilon \text{sgn}(I_m - I_a)] + R_a I_a + K_e \dot{\theta}_a \quad (19)$$

车速为 10 km/h 条件下,对转向系模型输入正弦手力矩 $T_d = 6\sin(0.1t)$ N·m,由助力特性曲线可以得到理想助力力矩。为方便比较,使转向管柱转角变化一致,转向模型中均输入理想助力力矩。仿真参数取值见表 1 所列。

表 1 仿真参数取值

参数	数值	参数	数值
$J_x / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.21	i_j	25
$B_x / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	10	i_ω	29
$J_a / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.000 6	L_a / H	0.002 7
$B_a / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	0.05	R_a / Ω	0.5
$K_m / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	300	m / kg	21 700
$k_1 / (\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-80 000	a / m	4.811
$k_2 / (\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-175 000	b / m	2.389
$k_n / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	10	R / m	0.521
$K_e / (\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	0.525	a_x / m	0.08
$K_t / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.79	$\gamma / (^\circ)$	1.5
$I_z / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	60 000	$\theta_{kp} / (^\circ)$	10
f	0.7	p / MPa	0.83

转向管柱转角的变化对于电流闭环控制的 EPS 系统相当于一个干扰。在这个干扰影响下, PID 控制($K_p=50, K_i=20, K_d=0$)跟踪电流的变化存在一定偏差,而滑模控制器跟踪效果较好。PID 与 SMC 控制器对电流的跟踪效果如图 1 所示。

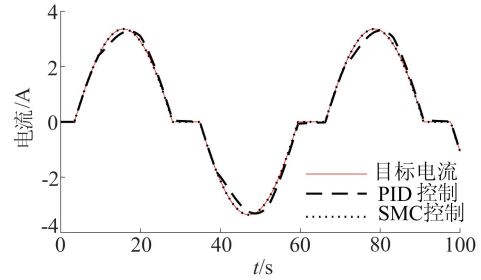


图 1 PID 与 SMC 控制器对电流的跟踪效果

然而,不补偿情况下理想助力力矩与实际助力力矩如图 2 所示。由图 2 可知,即便 SMC 控制器可以很好地跟踪目标电流,由于电机的惯性、阻尼等因素,实际输出的助力力矩与理想助力力矩并不相等,助力装置的存在对机械转向系统特性产生了影响,在实际助力过程中将影响驾驶员手感。

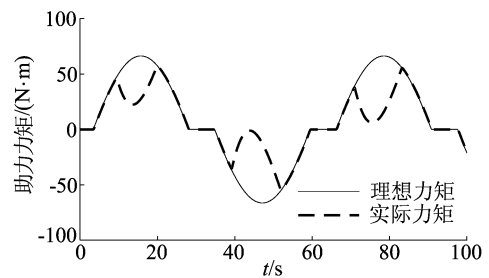


图 2 不补偿情况下理想助力力矩与实际助力力矩

3 补偿策略

3.1 补偿计算分析

本文采用 SMC 控制器,其动态特性好,实际电流可以准确跟踪目标电流,使电机的电动系统部分得到了改造。对于机械系统部分采用开环的前馈控制加入补偿,消除助力装置机械系统影响,同时不会影响转向系统特性。

对(3)式进行拉氏变换,并代入(4)式,消去 θ_a 整理可得:

$$T_{as} = \frac{i_j K_m}{(J_a s^2 + B_a s) i_j^2 + K_m} \times [K_t I_a - i_j (J_a s^2 + B_a s) \theta_p] \quad (20)$$

由此得到系统结构,如图 3 所示。

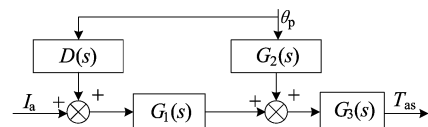


图 3 干扰前馈补偿结构

图 3 中: $D(s)$ 为干扰前馈的传递函数^[11]; $G_1(s) = K_t$; $G_2(s) = -i_j(J_a s^2 + B_a s)$; $G_3(s) = \frac{i_j K_m}{(J_a s^2 + B_a s)i_j^2 + K_m}$,

为消除 θ_p 的影响,加入 $D(s)$ 后,使 θ_p 不影响 T_{as} 输出,即 $T_{as}(s)/\theta_p(s) = 0$,化简整理可得:

$$D(s) = \frac{i_j(J_a s^2 + B_a s)}{K_t} = \frac{i_j J_a}{K_t} s^2 + \frac{i_j B_a}{K_t} s \quad (21)$$

拉氏逆变换后得到的应补偿的电流为:

$$I_{b1} = \frac{i_j J_a}{K_t} \ddot{\theta}_p + \frac{i_j B_a}{K_t} \dot{\theta}_p \quad (22)$$

当 K_t 发生变化时的补偿电流应为:

$$I_{b2} = I_{m0}(K_{t0} - K_t)/K_t \quad (23)$$

其中: K_{t0} 为原转矩系数; I_{m0} 为原目标电流。

补偿后的目标电流应为:

$$I_m = I_{m0} + I_{b1} + I_{b2} \quad (24)$$

由(22)式可知, J_a 、 B_a 、 K_t 、 i_j 对补偿电流的大小有影响。其中:助力电机减速器的减速比 i_j 可以准确获得且不会发生变化;助力装置等效转动惯量 J_a 不会随时间发生变化,可以通过试验或者离线参数辨识得到比较准确的结果;在 EPS 系统使用过程中,由于温度、润滑、磨损等因素影响, B_a 在使用过程中会缓慢发生变化;电机转矩系数 K_t 为电机输出转矩与电流的比值,其变化将直接影响控制目标的准确性,转矩系数 K_t 中包含气隙磁通,温度变化会影响磁导率,因此也具有一定的时变性。

如果能在转向系使用过程中在线辨识出 B_a 、 K_t 并实时修正补偿值,可以有效提高 EPS 的使用性能。

EPS 补偿策略框图如图 4 所示。

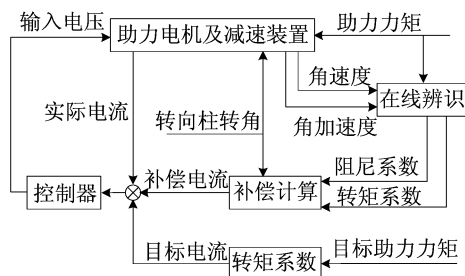


图 4 EPS 补偿策略框图

本文设计的控制器控制住电机的电流,在线辨识算法将助力电机及减速机构的阻尼系数和转矩系数辨识出来,再计算补偿电流,这样助力力矩就可以准确跟踪目标力矩。

3.2 参数辨识

递推最小二乘(recursive least squares, RLS)算法是一种常用的辨识算法,该算法计算量小,收敛速度快。

电机的角速度和角加速度信号均可采集,对于(3)式可以写成:

$$J_a \alpha + \frac{T_{as}}{i_j} = K_t I_a - B_a \omega \quad (25)$$

整理成 k 时刻矩阵形式为:

$$y(k) = \varphi(k)\theta \quad (26)$$

其中: $y(k)$ 为 k 时刻系统输出, $y(k) = T_{as}(k)/i_j + J_a \alpha(k)$; $\varphi(k)$ 为 k 时刻输入输出量的矩阵, $\varphi(k) = [I_a(k) \quad -\omega(k)]$; θ 为待辨识参数矩阵, $\theta = [K_t \quad B_a]^T$; 对于(26)式系统,带遗忘因子的 RLS 算法的递推公式^[12-13]为:

$$K(k) =$$

$$P(k-1)\varphi^T(k)[\lambda + \varphi(k)P(k-1)\varphi^T(k)]^{-1} \quad (27)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} [I - K(k)\varphi(k)]P(k-1) \quad (28)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (29)$$

其中: $K(k)$ 为 k 时刻的增益矩阵; I 为单位矩阵; $\hat{\theta}(k)$ 与 $\hat{\theta}(k-1)$ 分别为 k 时刻与 $k-1$ 时刻辨识得到的参数矩阵; λ 为遗忘因子; $P(k)$ 与 $P(k-1)$ 分别为 k 时刻与 $k-1$ 时刻协方差矩阵,其表达式为:

$$P(k) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \quad (30)$$

其中, Φ 为 k 个时刻的输入输出矩阵,其表达式为:

$$\Phi = [\varphi(k) \quad \lambda^{1/2}\varphi(k-1) \quad \dots \quad \lambda^{(k-1)/2}\varphi(1)] \quad (31)$$

采用 RLS 算法,相较于整批最小二乘算法不进行协方差矩阵 $P(k)$ 中求逆的运算,没有出现高维度的矩阵 Φ ,而是利用上一时刻的协方差矩阵 $P(k-1)$ 和倒数运算即可得到,大大减小了运算量,适合在线计算。对于初值一般取 $P(0) = 10^6 I$, $\hat{\theta}(0) = [0 \quad 0]^T$ 。

遗忘因子 λ 的加入可以使旧数据的影响逐渐消减,防止产生数据饱和现象,并使算法具有跟踪缓慢变化参数的能力。遗忘因子的确定应考虑时变参数的变化速度和采样时间等因素,经过仿真调试本文取 $\lambda = 0.997$ 。

仿真时各参数的采样时间为 0.01 s,仿真结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,助力电机有输入之后,待辨识参数快速收敛到了真实值。

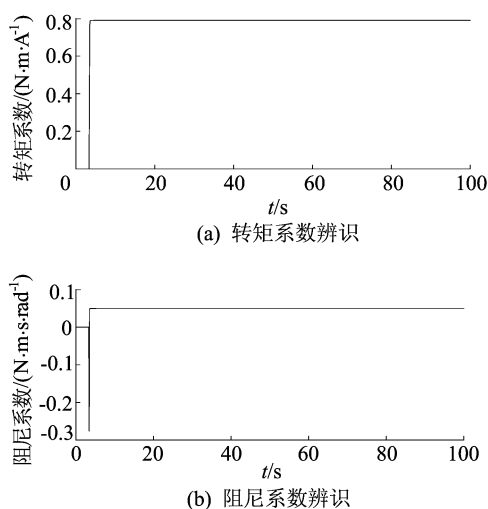


图 5 在线参数辨识结果

3.3 仿真分析

考虑系统参数时变性,假设阻尼系数和电机转矩系数分别以 $B_a = 0.05 + 0.03\sin(0.0005\pi t)$ 与 $K_t = 0.79 - 0.3\sin(0.002\pi t)$ 的规律随时间缓慢变化,给转向盘输入同样的正弦力矩。

辨识得到的参数与实际参数如图 6a 和图 6b 所示,参数时变时的补偿效果对比如图 6c 所示。

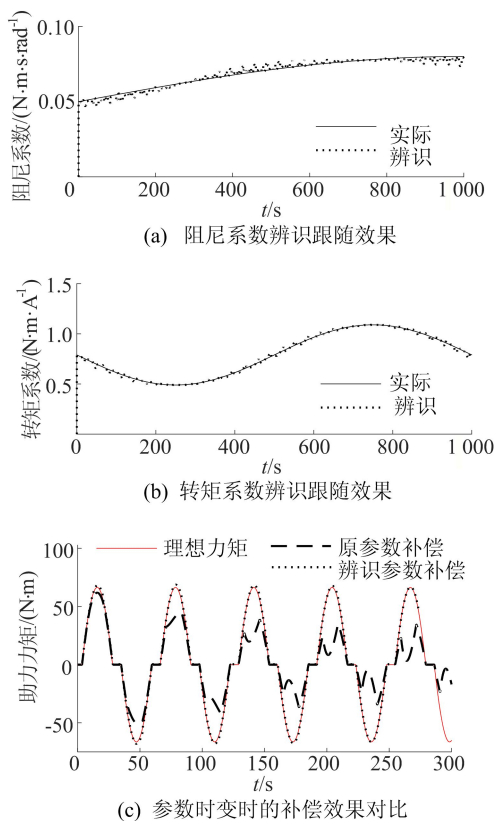


图 6 仿真结果

从图 6a、图 6b 可以看出,对于缓慢变化的时变参数,带遗忘因子的最小二乘算法可以基本做到跟踪,但辨识参数值相对于实际值存在一定的波动。因为输入的是正弦转矩,当 $T_d < T_{d0}$ 时助力电机不提供助力,所以在进行参数辨识时就得不到外界持续的激励,即 $\varphi(k)$ 和 $y(k)$ 为 $\mathbf{0}$ 和 0 ,由递推公式(29)可知 $\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1)$ 使参数得不到更新,此外没有转向柱转角输入时也不能对阻尼系数准确辨识。但事实上这些参数变化缓慢,而辨识算法收敛速度很快,算法只需要在有转角输入的时间段内完成参数辨识,即可对补偿参数做到及时更新。

从图 6c 可以看出,参数变化缓慢时,采用辨识得到的参数进行动态补偿可以实现对理想转矩的跟踪,而采用固定参数的补偿随着参数的变化,转矩跟踪效果越来越差。

4 结 论

(1) 本文设计了 EPS 电流闭环的算法,并分析了其无法准确做到转矩跟踪的原因。

(2) 针对以上问题提出了补偿策略,计算了补偿电流,并考虑到 EPS 系统的时变性,利用带遗忘因子的 RLS 算法在线辨识参数来进行补偿。

(3) 仿真结果表明,本文算法可以在参数缓慢变化的条件下做到对转矩的准确跟踪,在转向系数变化的情况下能消除助力装置对转向系的影响。

[参 考 文 献]

- [1] NA S, LI Z, QIU F, et al. Torque control of electric power steering systems based on improved active disturbance rejection control[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1-13.
- [2] LEE D, JANG B, HAN M, et al. A new controller design method for an electric power steering system based on a target steering torque feedback controller[J]. Control Engineering Practice, 2021, 106: 104658.
- [3] 武国飞,李媛媛,吴立群,等.一种新型电动助力转向系统助力转矩跟踪的控制策略[J].西安工业大学学报,2020,40(2):168-175.
- [4] 姜平,祖春胜,赵林峰. EPS 助力补偿控制策略的研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(1):12-17.
- [5] LI S, NIU J, CUI G, et al. Research on friction compensation control for electric power steering system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 1-5.
- [6] 朱联邦,邵文彬,蒋照华,等.电动助力转向系统补偿控制研究[J].农业装备与车辆工程,2016,54(9):39-42.

17~20 m,进深继续增加则产生组合型制。

(2) 徽州传统民居主要模块有堂屋、卧室、天井、走道、楼梯间等,堂屋的面宽和进深主要集中在 4.0~5.0 m 和 3.0~5.5 m 之间;卧室的面宽主要集中在 2.0~3.5 m 之间,进深随堂屋变化;天井的面宽视民居整体面宽而定,进深多不超过 4 m;楼梯间的宽度多集中在 1 m 左右;走道的宽度一般在 0.7~1.5 m 之间。

(3) 徽州传统民居正房屋顶坡度多在 0.4~0.6 之间,而走道屋顶坡度多在 0.3~0.5 之间。

(4) 徽州传统民居建筑屋顶正脊与最高阶马头墙之间的高差多在 0.8 m 以内;马头墙最高阶宽度与相邻阶宽度的比值在 3~6 之间,且与最高阶的宽度呈现明显的正相关,其他阶的宽度与天井的进深相关。

(5) 在 Python 中对模块简化处理,用点定位生成模块,根据各功能模块尺寸、数量、位置等条件,进行连接设定。

(6) 结合立面马头墙韵律的数学逻辑,以及与平面的对应关系在 Grasshopper 平台上运用 Python 语言编程生成,随后结合平面对快速生成的民居进行展示。

不同于以往针对徽州村落的计算机生成模式,本文针对单体型制,从功能模块的角度,采用量化解析的方法探究个体的生成规律;有别于传统的 JAVA 语言生成方法,本文采用 GhPython 语言把传统民居与 Grasshopper 平台结合起来,提供了建筑生成的更多可能性。

对于徽州传统民居特征的数字化总结,有利于通过计算机程序进行快速生成,Grasshopper 与 Python 语言的结合更加适用于建筑学,可以提高传统民居的重建、现代民居的新建效率。在此基础上,还可以把程序与不规则的地形条件结合寻找更加广泛的适用领域。

[参 考 文 献]

- [1] 单德启. 安徽民居[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 64-85.
- [2] 张宇航, 李琳, 李尚林, 等. 基于语义的徽州民居快速建模方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(12): 1629-1635, 1658.
- [3] 徐卫国. 数字建筑设计与建造的发展前景[J]. 当代建筑, 2020(2): 20-22.
- [4] 童磊. 村落空间肌理的参数化解析与重构及其规划应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [5] 李飏, 郭梓峰, 季云竹. 生成设计思维模型与实现: 以“赋值际村”为例[J]. 建筑学报, 2015(5): 94-98.
- [6] 杜信池. 一种建筑空间生成机理研究的参数化方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [7] 王凯. 基于 BIM 的大木作模型参数化生成方法与应用探索[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [8] 常磊. 基于 BIM 的大木建筑遗产信息管理平台实现技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [9] 汪强, 李早, 高翔, 等. 地域性民居风貌要素语义体系构筑方法及特征解析: 以徽州地区为例[J]. 装饰, 2019(6): 94-97.

(责任编辑 李 凯)

(上接第 156 页)

- [7] 李绍松, 牛加飞, 于志新, 等. 电动助力转向系统阻尼特性分析及测试方法[J]. 制造业自动化, 2015, 37(9): 99-101.
- [8] 曹冬. 车辆低速转向阻力矩模型与复合电源式 EPS 自抗扰控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [9] 韩炯刚, 申荣卫, 台晓虹, 等. 混合动力客车电动助力转向系统设计及仿真研究[J]. 现代制造工程, 2014(1): 49-53.
- [10] 舒智. 商用车电动助力转向系统研究及仿真分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.

- [11] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 7 版. 北京: 科学出版社, 2019.
- [12] 徐兆丰, 吴志红, 朱元. 三相永磁同步电机的转动惯量和阻尼系数的辨识[J]. 信息通信, 2016(8): 15-17.
- [13] 谢文超, 赵延明, 方紫薇, 等. 带可变遗忘因子递推最小二乘法的超级电容模组等效模型参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 996-1005.

(责任编辑 胡亚敏)