

多传感器融合的自动驾驶汽车制动主动控制

李明杰^{1,2}, 刘小飞^{1,2}, 张跃进³

(1. 三亚学院信息与智能工程学院, 海南 三亚 572000; 2. 陈国良院士工作站, 海南 三亚 572000;
3. 华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对目前方法进行汽车制动主动控制时, 存在控制时间长、丢包率高以及控制的误差大的问题, 提出多传感器融合的自动驾驶汽车制动主动控制。该方法首先建立了数据的支撑裕矩阵, 通过多传感器融合算法对汽车的传感器监测信息进行融合处理。依据融合后的信息设计控制器, 使用自适应遗传算法优化控制器参数。最后将监测信息输入优化的控制器中实现汽车制动主动控制。仿真测试结果表明, 运用该方法主动控制自动驾驶汽车进行制动的时间较短且丢包率较低。

关键词:多传感器; 融合算法; 自动驾驶汽车; 制动主动控制

中图分类号: TH16; U463 文献标识码: A 文章编号: 1001-3997(2023)05-0170-04

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.20230106.021

Active Braking Control of Autonomous Vehicles Based on Multi-Sensor Fusion

LI Ming-jie^{1,2}, LIU Xiao-fei^{1,2}, ZHANG Yue-jin³

(1. School of Information & Intelligence Engineering, Sanya University, Hainan Sanya 572000, China;

2. Academician Workstation of Guoliang Chen, Hainan Sanya 572000, China;

3. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Jiangxi Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at the problems of long control time, high packet loss rate and large control error when the current methods are used for active vehicle braking control, a multi-sensor fusion active braking control for autonomous vehicles is proposed. This method first establishes a data support margin matrix, and uses a multi-sensor fusion algorithm to fuse the car's sensor monitoring information. The controller is designed according to the fused information, and the controller parameters are optimized using adaptive genetic algorithm. Finally, the monitoring information is input into the optimized controller to realize the active control of automobile braking. Simulation test results show that the braking time of autonomous method is short and the packet loss rate is low.

Key Words: Multi-Sensor; Fusion Algorithm; Self-Driving Car; Active Braking Control

1 引言

自动驾驶汽车作为智能交通中重要的一部分, 不仅能够最大限度地避免交通事故的发生, 还可以提高道路的安全通行能力^[1]。自动驾驶汽车中装载的紧急制动系统^[2]作为汽车的核心技术, 成为相关学者研究的重点。而自动驾驶汽车在行驶过程中的制动主动控制更是近年来自动汽车研究领域亟待解决的问题。

文献^[3]提出传感器感知盲区条件下智能汽车主动制动系统控制研究。该方法首先建立汽车的感知盲区数据库, 通过神经网络对数据进行识别; 依据数据的运动特性对数据进行分类处理, 建立感知安全模型; 最后通过模型完成汽车的控制。该方法由于未能使用多传感器融合算法融合自动驾驶汽车传感器的监测信息, 导致该控制方法的控制时间长。文献^[4]提出轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动控制。该方法首先对汽车的电机充电结构进行分析, 获取电机的制动控制原理; 通过该原理建立理论模型, 提取汽车的制动控制规律; 最后通过最小二乘法对模型进行求解, 实现汽车的制动控制。该方法提取制动控制规律时存在问题, 所以该方法控制时的丢包率高。文献^[5]提出电动汽车主动制动能量回收控制策略研究。该方法首先对汽车的加速位移变化率进行获取, 并设定车头时距为汽车的输入向量; 设计汽车的控制器。建立汽车的制动安全性目标函数, 并通过粒子群算法对目标函数进行优化寻找最小函数值; 通过计算获取汽车的制动策略, 从而实现汽车的制动控制。该方法由于在建立目标函数时

来稿日期: 2022-03-20

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目—复杂场景下基于自适应权重网络的智能驾驶多传感器融合感知研究(621RC1077);
海南省自然科学基金资助项目—基于无人机倾斜摄像测量与高性能并行计算的实景三维高效建模研究(2019RC257)

作者简介: 李明杰,(1984-),男,吉林松原人,硕士研究生,副教授,主要研究方向:模式识别与人工智能;
刘小飞,(1984-),女,吉林敦化人,硕士研究生,副教授,主要研究方向:智能规划与规划识别

存在误差,所以该方法的控制误差大。为解决上述自动驾驶汽车制动主动控制过程中存在的问题,提出多传感器融合的自动驾驶汽车制动主动控制。

2 传感器信息融合

自动驾驶汽车在行驶过程中,内部的动力系统会通过汽车自身携带的多个传感器对行驶过程进行监测。因此在对自动驾驶汽车进行制动主动控制前,需要使用传感器融合算法^[6]对自动驾驶汽车内部多个传感器的监测信息进行融合。

2.1 建立支撑裕矩阵

传感器信息在融合过程中,若传感器监测的数据信息较为接近,说明两个传感器之间存在互相支撑的关系,若两个传感器信息完成不同,说明二者之间的支撑程度小。两个传感器信息数据支撑程度就是传感器的支撑裕。基于上述分析,建立传感器数据信息之间的关系函数,过程如下式所示:

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & |x_i - x_j| \leq M \\ 0, & |x_i - x_j| > M \end{cases} \quad (1)$$

其中,建立的关系函数标记 z_{ij} ,第*i*个传感器监测的数据信息为 x_i ,第*j*个传感器监测的数据信息为 x_j ,传感器阈值为 M 。

由于数据的差距不同,传感器之间的支撑裕也不相同,为了规避计算结果的绝对化,使用指数形式建立传感器监测数据的支撑裕函数,过程如下式所示:

$$z_{ij} = A^{|x_i - x_j|} \quad (2)$$

其中,建立的支撑裕函数为 z_{ij} ,常数标记为 A 形式。通过对函数的计算可知,当*i*传感器的监测信息 x_i 与*j*传感器的监测信息 x_j 差距不明显时,支撑裕数值接近为1,而二者相差较大时,支撑裕数值为0。由此可知,当 x_i 与 x_j 之间的差距逐渐增大,支撑裕数值逐渐缩小。

设定固定的阈值 M ,计算支撑裕函数,获取数据的高维矩阵,过程如下式所示:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,数据的数量为*n*,维度为*D*。将矩阵中*i*行*j*列的数据放入支撑裕函数中,通过计算获取支撑裕矩阵,结果如下式所示:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,获取的支撑裕矩阵为 Z ,数据总量标记为*n*。依据 $z_{ii} = A^{|x_i - x_i|} = 1$, $d_{ii} = |x_i - x_i| = 0$ 可知,支撑裕矩阵中,矩阵对角线上的支撑裕数值皆为1。两个传感器监测信息之间的支撑裕为 z_{ij} ,体现的是传感器^[7]之间两个数据的关系。

在支撑裕矩阵中,数据信息在矩阵的每一行中都与其自身进行了比较,所以该信息为冗余信息,所以在进行权重分配时,将其作为支撑裕的一部分,提高传感器信息的融合精度。多传感器在进行数据融合时,使用传感器的冗余互补信息通过数据之间的协调互补,规避数据融合时的局限性,提高传感器的效能。

设定传感器测量方程为 $B = X + V$,式中测量值为 X ,噪声为 V 。当约束条件为 $E[V] = 0$ 且 $D[V] = \sigma^2$ 时,传感器监测精度较高,赋予的权重较大。

基于扩展支撑裕的概念,将传感器检测精度引入支撑裕矩阵中代替 z_{ii} 数值,标记为 z_{σ_i} 。当 $z_{\sigma_i} = A^{-\sigma_i}$,说明传感器的监测精度高。

通过上述分析结果,对支撑裕矩阵进行更新处理,结果如下式所示:

$$Z' = \begin{bmatrix} z_{\sigma_1} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{\sigma_n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,更新后的支撑裕矩阵为 Z' ,两个传感器数据间的支撑裕数值为 z_{σ_n} 。

2.2 算法流程

自动驾驶汽车内多传感器监测数据融合^[8]过程如下:

(1)采集自动汽车多传感器监测信息,并将其作为原始数据,通过支撑裕函数计算数据得到支撑裕值。

(2)通过对多传感器的数据信息的计算,建立数据的支撑裕矩阵。

(3)计算传感器的对应支撑裕系数 σ_i 。首先设定传感器在固定周期 T 内监测的数据有*m*个,表述成 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 形式,通过计算获取传感器监测数据的均值及误差,过程如下式所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \\ \Delta x_i = |x_i - \bar{x}| \\ \Delta \bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta x_i \\ \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^2} \end{array} \right. \quad (6)$$

其中,数据的平均值为 \bar{x} ,误差标记为 Δx_i ,误差均值为 $\Delta \bar{x}$,标准差为 σ_i 。将计算出的数据标准差放入 $z_{\sigma_i} = A^{-\sigma_i}$ 中,计算出各个传感器相对应的 z_{σ_i} 值,通过计算更像支撑裕矩阵。

(4)设定传感器的综合因素为 h_i ,且 $H = ZK$ 。其中综合因素集为*H*,非零向量为*K*,支撑裕矩阵为*Z*。将 h_i 固定为 $h_i = k_1 z_{i1} + k_2 z_{i2} + \dots + k_n z_{in}$ 形式。

(5)通过计算,获取矩阵的最大特征值 λ 。

(6)给计算结果赋予权重,并对其进行归一化处理,结果如下式所示:

$$a_i = \frac{k_i}{k_1 + k_2 + \dots + k_n} \quad (7)$$

其中,归一化结果为 a_i ,数据向量为 k_i 。通过上述计算流程,完成自动驾驶汽车内多传感器数据信息的融合。

3 制动主动控制

基于融合后的传感器监测数据,获取汽车的制动主动控制策略完成控制器的设计,使用遗传算法对控制器进行优化,实现自动驾驶汽车的制动主动控制。

3.1 控制策略

将 t 时刻两车的距离标记 x_s ,设定 t 两车的行驶速度分别为 v_i 和 v_j ,汽车 j 在 s 时刻地进行减速度制动,当前时刻 t 两车的距离如下式所示:

$$\begin{cases} D = \left((v_j - a_j d_r) - v_i \right) d_s \\ a_j = \frac{F_{xft} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr}}{m} \\ I_u \dot{\omega}_u = F_{xi} R_i - T_{bi} \end{cases} \quad (8)$$

式中: D —两车之间的距离; t —当前时刻; d_r —两车距离;汽车 j 的减速度为 a_j , t 两车在 s 时刻的距离标记 d_s ,汽车 j 的相对速度标记 v_j , I_u —车轮的转动惯性; $\dot{\omega}_u$ —转速;车轮半径标记 R ,制动力矩标记 T_{bi} 形式,汽车 j 的制动速度为 F , $F_{xft}, F_{xfr}, F_{xrl}, F_{xrr}$ 都是汽车的制动参数,获取的汽车制动主动策略为 $I_u \dot{\omega}_u$ 。

3.2 设计控制器

自动驾驶汽车在进行制动主动控制时,需要综合考量汽车的性能,保证汽车的垂向、侧倾以及俯仰加速度时,汽车能够达到,良好的车身姿态。选取二次调节器作为自动汽车自动主动控制器^[9],通过调节控制器中的各项性能指标权重,实现汽车制动主动控制。

在进行汽车制动主动控制前,需要选取控制器的系统性能指标,过程如下式所示:

$$J = (YAY + UTU)dt \quad (9)$$

式中: A —控制器的输入权重矩阵; Γ —输出权重矩阵标记;迭代次数标记 T , Y —输出系数;系统的控制力标记 U , dt —控制器的响应时间。

3.3 目标优化控制

使用遗传算法对控制器中选取的各项参数进行优化,通过参数优化后的控制器实现自动驾驶汽车的制动主动控制^[10]。在控制器中,控制指标的权重系数能够决定控制器的控制效果,所以汽车在行驶过程中,行驶路程的工况若发生变化,控制器需要通过改变指标权重实时地对启动驾驶汽车进行制动主动控制。控制时,依据汽车的碰撞风险程度,将工况划分为3种;不同的工况需要建立不同的目标函数优化控制器。

(1)第一种工况:由于该种工况路面较为平顺,控制器只需要通过建立的适应度函数优化汽车的侧倾角、横摆角速度等参数即可。

(2)第二种工况:该工况汽车行驶时会出现“点头现象”,需要通过建立的适应度函数优化汽车的汽车俯仰角以及汽车的加速度极值。

(3)第三种工况:该工况下,汽车的轮胎荷载量过大,汽车在驾驶时安全威胁较大,所以建立的自适应函数主要保证汽车操控性能,控制器中的制动力需要进行优化处理。

设定优化变量为控制器的输入、输出权重,出于对自动驾驶汽车对称性的考量,控制器中设定多个悬架动挠度要与轮胎的荷载权重一致,标记成 $(\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_8)$ 。

控制器的参数优化问题实质上是一个非线性的协同优化问题,在控制器的迭代寻优过程中,为避免优化变量求导出现偏差,在适应度函数中引入惩罚因子 ψ ,建立控制器的自适应优化函数,过程如下式所示:

$$\begin{cases} F_{fu}(x)_1 = \gamma_h \cdot \psi \sum_{i=1}^4 \eta_i \\ F_{fu}(x)_2 = \psi \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \theta_i / \kappa \\ F_{fu}(x)_3 = \psi \cdot \sum_{i=1}^8 \lambda_i \end{cases} \quad (10)$$

式中: $F_{fu}(x)_1, F_{fu}(x)_2$ 以及 $F_{fu}(x)_3$ —不同工况的适应度函数; η —车身侧倾角平均值; γ_h —横摆角速度峰值; θ —汽车俯仰角平均值; κ —汽车加速度极值; λ —轮胎荷载权重。最后通过建立的自适应函数完成控制器的优化,实现自动控制汽车的制动主动控制。

4 仿真测试

4.1 仿真测试环境

此次测试环境为半实物仿真,在Matlab平台上构建汽车运动学模型,由PreScan平台提供模拟地图及GPS、摄像头、激光雷达等传感器模型。具体测试环境,如图1所示。

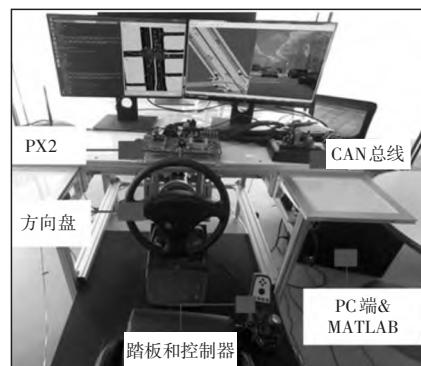


图1 仿真测试环境
Fig.1 Simulation Test Environment

4.2 仿真测试结果及分析

分别采用多传感器融合的自动驾驶汽车制动主动控制(方法1)、轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动控制(方法2)、电动汽车主动制动能量回收控制策略研究(方法3)进行测试;

4.2.1 控制时间测试

在对自动驾驶汽车进行制动主动控制时,控制器控制时间的长短,会影响整个控制方法的控制性能。设定高温、低温两个实验环境,采用方法1、方法2以及方法3对自动驾驶汽车进行控制时,对三种控制方法的控制时间进行测试,测试结果,如图2所示。检测次数的增加,会使自动驾驶汽车的控制时间增加。分析图2可知,高温环境下检测出的控制时间要远低于低温环境下检测出的控制时间。这里所提方法在进行自动驾驶汽车控制前,使用了多传感器融合算法将自动驾驶汽车传感器的监测信息进行了融合,所以这里所提方法的自动驾驶汽车控制时间较短。因此这里所提方法在进行汽车控制时间检测时,检测出的控制时间要低于方法2以及方法3,方法2略高于这里所提方法,方法3的控制时间检测结果最差。

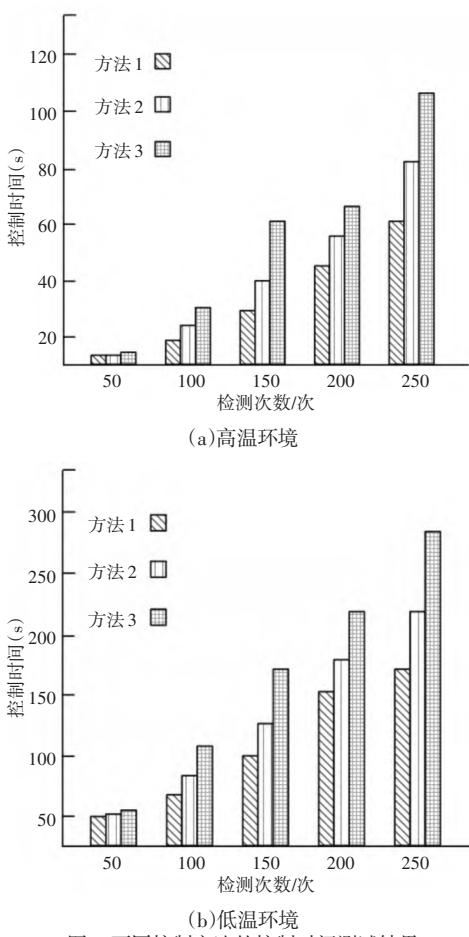


Fig.2 Control Time Test Results of Different Control Methods

4.2.2 丢包率检测

在进行汽车控制时,丢包率的高低同样会影响汽车的控制性能。采用方法1、方法2以及方法3进行汽车制动控制时,对三种控制方法的丢包率进行测试,测试结果,如图3所示。

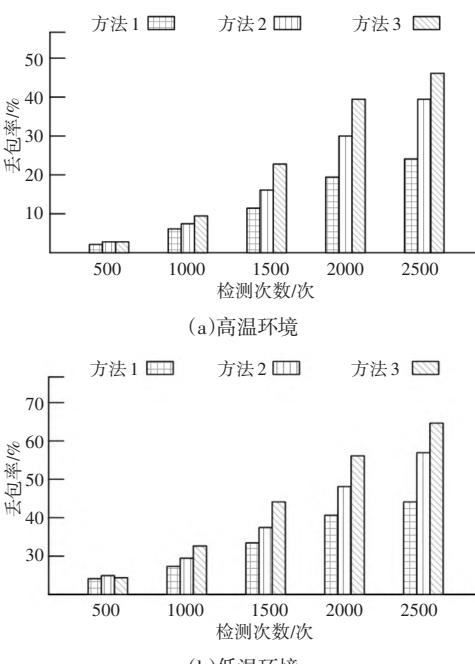


Fig.3 Packet Loss Rate Test Results of Different Control Methods

分析图3可知,检测次数的增加,汽车在控制时的丢包率也随之增加。在图3(a)中,当检测次数为500时,这里所提方法检测出的丢包率低于其他两种方法,而方法2与方法3检测出的丢包率相同。随着检测次数的上升,三种方法检测出的丢包率逐渐拉开差距,方法2的丢包率也远低于方法3。而在图3(b)中,三种方法检测出的丢包率都高于高温环境的丢包率检测结果。基于上述结果发现,三种方法在高温环境和低温环境中都会受到控制器的影响,但经对比发现,这里所提方法在这两种环境下受到的影响最低,说明这里所提方法的控制性能好。

5 结束语

随着科学技术的不断提升,智能汽车设计领域发展迅速。智能汽车制动主动控制作为智能汽车的核心技术,成为人们的重点关注话题。针对自动驾驶汽车制动主动控制方法中存在的问题,提出多传感器融合的自动驾驶汽车制动主动控制方法。该方法首先利用融合算法融合汽车数据信息,通过融合信息完成控制器设计,最后通过设计的控制器,实现了自动驾驶汽车制动主动控制。由于该方法设计控制器还存在一定缺陷,今后会针对该项问题继续对该汽车控制方法进行优化。

参考文献

- [1] 李伟,华梦莲.论自动驾驶汽车伦理难题与道德原则自我选择[J].科学学研究,2020,38(4):588-594+637.
(Li Wei, Hua Meng-lian. The ethical dilemma of autonomous vehicles and moral principle self-selection [J]. Studies in Science of Science, 2020,38(4):588-594+637.)
- [2] 宋志强,曹立波,吴俊,等.自动紧急制动系统测试设备开发和应用研究[J].机械设计,2020,37(2):32-38.
(Song Zhi-qiang, Cao Li-bo, Wu Jun, et al. Development and application of test equipment for the automatic emergency braking system [J]. Journal of Machine Design, 2020,37(2): 32-38.)
- [3] 袁朝春,王桐,何友国,等.传感器感知盲区条件下智能汽车主动制动系统控制研究[J].农业机械学报,2020,51(2):363-373.
(Yuan Chao-chun, Wang Tong, He You-guo, et al. Intelligent vehicle active braking system control under sensor occluded scenes [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2) : 363-373.)
- [4] 王骏骋,何仁.轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动控制[J].机械工程学报,2020,56(10):181-190.
(Wang Jun-cheng, He Ren. Voltage variable charging regenerative braking control strategy for in-wheel motors driven vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,56(10):181-190.)
- [5] 李争争,周志刚,杨文豪,等.电动汽车主动制动能量回收控制策略研究[J].中国科技论文,2020,15(8):935-941.
(Li Zheng-zheng, Zhou Zhi-gang, Yang Wen-hao, et al. Research on energy recovery control strategy for active braking of electric vehicle [J]. China Sciencepaper, 2020,15(8):935-941.)
- [6] 张平川,白林峰,张洒,等.温室物联网多传感器数据融合算法设计与应用[J].江苏农业科学,2019,47(3):174-176+188.
(Zhang Ping-chuan, Bai Lin-feng, Zhang Sa, et al. Design and application of multi-sensor data fusion algorithm for greenhouse Internet of Things [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019,47(3):174-176+188.)

(下转第177页)

力,因而传感器输出将由正转负。然而,由于钢质外壳及永磁铁都固定不变,因此它们间的磁力是恒定,因而这个磁力并不会对滚刀的磨损量检测产生影响。同时,检测数据误差较小,如图8所示,说明磨损不均匀性对检测准确性的影响比较小,有力保证了检测方法的精确性。

在实际工程应用时,基于图4中的数据变化规律,可根据传感器输出利用插值方法反向推算磨损量,向操作人员提供是否更换滚刀的依据。

5 结论

针对TBM的滚刀磨损量检测问题,提出的磨损量检测方法依据磁力随磨损量增大而减小的物理规律,通过高精度压力传感器检测磁力进而实现磨损量检测。检测装置的实验测试结果表明,当磨损量从0增加到25mm的极限磨损量时,剩余磁化强度等于250kA/m的永磁铁与滚刀之间的磁力将显著减小4.54N,同时由于压力传感器的精度高达5m·N,因此滚刀磨损量检测方法具有较高的精确性。同时,由于非磁性金属及合金对静磁场没有屏蔽性,因此基于磁力的磨损量检测方法极大放宽了检测装置的防护壳材料限制。

如何减小磨损量与压力传感器输出之间的非线性是未来需要重点研究的工作之一。

参考文献

- [1] Lin L, Xia Y, Mao Q. Experimental study on wear behaviors of tbm disc cutter ring in hard rock conditions [J]. Tribology Transactions, 2018, 61(5):920–929.
- [2] 李宏波,孙振川,周建军.一种新型TBM刀具磨损检测技术[J].振动与冲击,2017,36(24):7-12。
(Li Hong-bo, Sun Zhen-chuan, Zhou Jian-jun. A new wear detection technique for TBM cutters [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36 (24):7-12.)
- [3] Sahinoglu U K, Ozer U. The prediction of cutter wear from temperature measurements on TBM discs and cutting face [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020(13):1-11.
- [4] Huang X, Liu Q S, Chen L. Cutting force measurement and analyses of shell cutters on a mixshield tunnelling machine [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018(82):325–345.
- [5] 甘章泽,谢敬华,夏毅敏.改进分水岭算法在TBM岩碴片识别与测量中的应用[J].传感器与微系统,2020,39(11):155–157.
(Gan Zhang-ze, Xie Jing-hua, Xia Yi-min. Application of improved watershed algorithm in TBM rock identification and measurement [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(11):155–157.)
- [6] Macias F J, Dahl F, Bruland A. New rock abrasivity test method for tool life assessments on hard rock tunnel boring: the rolling indentation abrasion test (RIAT) [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49 (5):1679–1693.
- [7] Ji Z Y, Xia Y M, Lan H. Cutterhead mud-caking detection method and application based on cutter wear and temperature measurement [J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2019, 13(4):1-13.
- [8] 张明富,袁大军,黄清飞.砂卵石地层盾构刀具动态磨损分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(2):397–402.
(Zhang Min-fu, Yuan Da-jun, Huang Qing-fei. Analysis of dynamic abrasion of shield cutters in sandy cobble stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2):397–402.)
- [9] 张晓波,刘泉声,张建明.TBM掘进刀具磨损实时监测技术及刀盘振动监测分析[J].隧道建设,2017,37(3):380–385.
(Zhang Xiao-bo, Liu Quan-sheng, Zhang Jian-ming. Real-time monitoring technology for wear of cutters and monitoring and analysis of cutterhead vibration of TBM [J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (3) : 380–385.)
- [10] Lan H, Xia Y, Ji Z. Online monitoring device of disc cutter wear –Design and field test [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019(89):284–294.
- [11] 郑伟,赵海鸣,兰浩.TBM滚刀刀圈磨损量在线监测系统[J].仪表技术与传感器,2015(2):46–50.
(Zheng Wei, Zhao Hai-ming, Lan Hao. Design of on-line monitoring system for tunnel boring machine's disc cutter wear [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(2):46–50.)
- [12] 栗良玉.基于子模型法对TBM刀盘的结构强度分析[J].机械设计与制造,2019(1):190–193.
(Li Liang-yu. Structural strength analysis of TBM cutter head based on submodel method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(1) : 190–193.)

(上接第173页)

- [7] 刘迪,唐子龙,张中太.基于SnO₂中空纳米球的低温氢气传感器的研究[J].稀有金属材料与工程,2020,49(2):723–727.
(Liu Di, Tang Zi-long, Zhang Zhong-tai. Low operating temperature hydrogen sensor based on SnO₂ hollow nanospheres [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(2):723–727.)
- [8] 时亚军,顾洁,李楠,等.基于多源数据融合的恶劣气象下10kV配变实时状态评估[J].高电压技术,2020,46(2):448–460.
(Shi Ya-jun, Gu Jie, Li Nan, et al. Real-time state assessment of 10kV distribution transformer under severe weather based on multi-source data fusion [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2):448–460.)
- [9] 李俊玲,赵海波.多目标捕获算法的红外感应型汽车自动制动系统[J].机械设计与制造,2020(12):248–251.
(Li Jun-ling, Zhao Hai-bo. Infrared induction auto brake system based on multi-target acquisition algorithm [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(12):248–251.)
- [10] 罗锦才,刘暾东.基于增强学习的车辆转弯制动横向轨迹控制[J].计算机仿真,2021,38(7):107–110.
(Luo Jin-cai, Liu Tun-dong. Lateral trajectory control of vehicle turning and braking based on reinforcement learning [J]. Computer Simulation, 2021, 38(7):107–110.)