

# 轨道交通车辆空调系统智能控制技术研究

张英姿, 刘峰

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 针对智能轨道交通空调系统智能控制需求, 采用变频空调机组技术, 集制冷、制热、新风、废排、空气净化、除湿、被动式压力控制保护为一体, 设计研发了轨道交通空调系统智能控制技术并应用; 结果表明, 通过调节压缩机运行频率可实现车内温度的精确控制, 使实际温度逐步接近目标温度, 温度波动范围控制在 $\pm 1$  K以内; 变频技术可避免压缩机频繁启停, 降低空调能耗10%以上; 空气净化装置可实现甲醛去除率约为86%; 细菌去除率约为92%; PM2.5过滤效率可由40%提高到70%; 同时智能运维系统对空调系统进行故障诊断和预测, 降低公司的维保人力成本; 该研究可为轨道交通车辆空调系统的智能化研究与应用提供技术参考。

**关键词:** 轨道交通车辆; 智能控制; 空调系统; 故障诊断

## Research on Intelligent Control of Air Conditioning System Technology for Rail Transit Vehicles

ZHANG Yingzi, LIU Feng

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

**Abstract:** In response to the intelligent control requirements of the intelligent rail transit air conditioning system, the inverter of air conditioning unit technology is adopted to integrate the function of refrigeration, heating, fresh air, exhausting, air purification, disinfection and sterilization, dehumidification, and passive pressure control protection to design and develop the rail transit air conditioning system. The results show that the precise control of the temperature in the vehicle is achieved by adjusting the operating frequency of the compressor, so that the actual temperature gradually approaches the target temperature, and the temperature fluctuation range is controlled within  $\pm 1$  K, avoiding frequent start and stop of the compressor, and reducing the energy consumption of the air conditioner by more than 10%; The air purification device can achieve a formaldehyde removal rate of about 86%; a bacteria removal rate of about 92%; PM2.5 filtration efficiency can be increased from 40% to 70%. The intelligent operation and maintenance system diagnoses and predicts the air conditioning system, thereby improving the efficiency of the entire after-sales service team and reducing the company's maintenance labor costs. This research can provide a technical reference for the intelligent research and application of air-conditioning systems for rail transit vehicles.

**Keywords:** rail transit vehicle; intelligent control; air-conditioning system; fault diagnosis

## 0 引言

当今全球前沿科技创新呈现迅猛发展趋势, 以智能化和信息化为核心特征的新一轮科技革命和产业变革孕育兴起, 人工智能、大数据、物联网技术与轨道交通装备不断深度融合<sup>[1]</sup>。作为智能高铁中智能装备的重要组成部分, 智能动车组通过对列车状态、运行环境信息广泛感知、融合处理, 在智能行车、智能控制、智能运维和智能服务等方面提升智能化水平。随着我国轨道交通行业的快速发展, 车辆空调系统的需求也在快速增长。同时, 用户对车辆空调系统的智能控制、可靠性、可用性、可维护性、安全性及生命周期成本(LCC)的要求也越来越高。因此, 提高轨道交通车辆空调系统的智能化水平已成为未来的重点发展方向<sup>[2]</sup>。我国城市轨道交通车辆空调发展主要经历了定速空调、变频空调、智能化变频空调几个主要阶段, 不同阶

段代表着城市轨道交通车辆空调系统技术的提升与发展<sup>[3]</sup>。利用大数据技术、监测及分析技术、大容量车-地传输技术等为用户提供关键零部件的健康评估、故障状态预警预测、关键故障精确定位、检修建议策略高效推送、备品备件库存智能建议及更换提醒、列车健康状态及全面监控, 提高车辆安全性和检修效率、降低维修成本, 满足动车组全生命周期管理需求, 实现列车服役性能由阈值管理向状态管理的提升<sup>[4]</sup>。

为提升客室环境舒适度, 开展高速动车组智能化空调系统创新技术研究, 本研究采用变频空调, 机组内增加具有消毒灭菌功能的空气净化器, 增加“除湿模式”降低车内湿度, 增加“隧道模式”进行车内压力保护, 增加“空调滤网脏堵预警”PHM监测功能<sup>[5-6]</sup>。

## 1 空调系统结构及原理

动车组的每节车厢配置独立的空调系统。空调系统具

收稿日期: 2021-07-29; 修回日期: 2021-09-01。

作者简介: 张英姿(1989-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事轨道交通车内环境控制技术方向研究。

引用格式: 张英姿, 刘峰. 轨道交通车辆空调系统智能控制技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(10): 123-127.

备如下功能：供应新风与排放废气、采暖和制冷、气流的输送和分配、新风过滤或与回风混合后过滤、应急通风、调节和控制等。客室内设废排风道，废气通过废排单元排出车外。卫生间内的废气不得参与回风。采暖方式采用电加热装置。强制对流的电加热装置设有可恢复和不可恢复两级超温保护。动车组每节车厢均设置应急通风功能。应急通风设备由车载蓄电池供电。应急通风流量不得少于  $10 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{人})$ ，时间不小于  $90 \text{ min}$ 。新风风口应设在无污染气体区，新风或混合过滤网便于清洁。客室内回风口和废排风口的设置保证车内气流和温度分布的均匀性，不受客室门打开或关闭的影响<sup>[7-8]</sup>。

空调系统每车设置一台车顶单元式空调机组、一套风道系统，车下设置一台废排装置，车内设置一台空控制柜，头车设置一台分体式司机室空调。空调系统制冷、制热时，由回风道吸入车厢内空气，与新风混合，通过空调过滤器，与热交换器或电加热器进行热交换，形成冷、热风送入客室，用于调节客室内的空气温度、湿度、气流速度、空气清洁度，保证客室内舒适度。空调系统结构设计如图 1 所示。

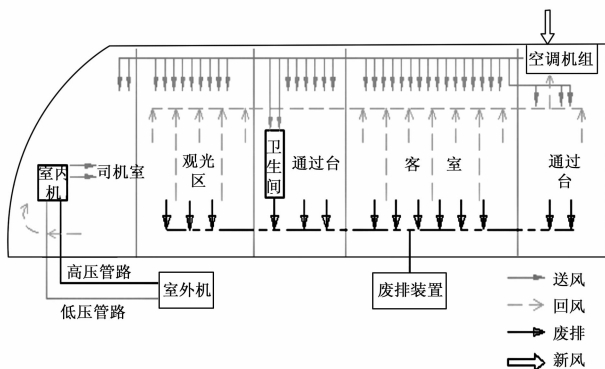


图 1 空调系统结构设计框图

在此基础上，结合高速动车组技术发展方向，本研究通过对列车状态、运行环境信息广泛感知、融合处理，在智能行车、智能运维和智能服务等方面提升智能化水平，对系统进行优化提升<sup>[9-12]</sup>。

## 2 硬件设计

### 2.1 变频控制空调机组设计

变频技术通过控制压缩机工作频率控制制冷量的输出，在提升车辆乘坐舒适性及增大定员等要求的同时，避免压缩机频繁启动，节约能耗<sup>[13-15]</sup>。

空调机组通过变频压缩机、机组内增加 2 台变频器，每台变频器各控制 1 台压缩机、电子膨胀阀实现客室内温度的精细化控制。空调变频部件布置如图 2 所示。

在结构布局方面，将变频器等电子部件放于回风口，利用回风降温，保证电子部件散热良好，同时避免受雨水等外界因素影响。对空调机组内主要部件压缩机等进行冗余设计。机组设有 2 个压缩机变频器，若 1 个变频器或 1 台

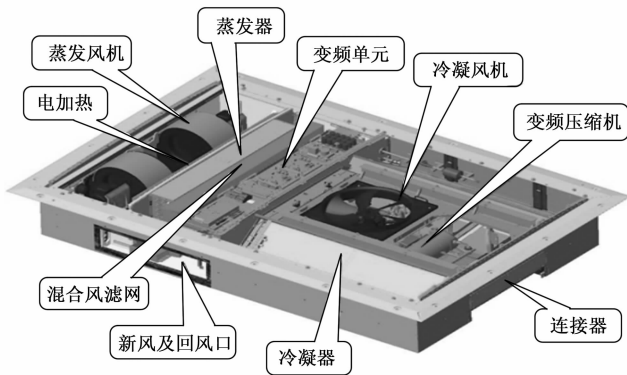


图 2 空调变频部件布置

压缩机发生故障，另一台压缩机将进入超频工作模式，以最大限度保持制冷能力（约 70%）；如空调控制器发生故障，机组可通过硬线控制实现手动全冷/半冷、全暖/半暖。变频压缩机设 7 级制冷，可实现制冷量的精确输出，能耗降低，实现节能<sup>[16-17]</sup>。

### 2.2 空气净化装置设计

本研究在空调机组内增加空气净化装置，用于处理室外空气中含有的甲醛、TVOC、PM2.5 等有害物质。空气净化装置利用特殊波长的光等离子管发出的超低频率电能，产生大量的高能量光等离子团，这些离子可以有效地破坏污染物，并将有机物等进行分解，从而起到净化空气的作用<sup>[18-20]</sup>。

空调控制器提供空气净化控制装置信号，控制空气净化装置工作或停机；空气净化控制装置可将空气净化装置的故障信息反馈给空调控制器，便于故障查询。采用等离子体空气净化技术，降低客室内甲醛及 TVOC 含量。空气净化装置采用光等离子管结构，空气净化原理如图 3 所示。

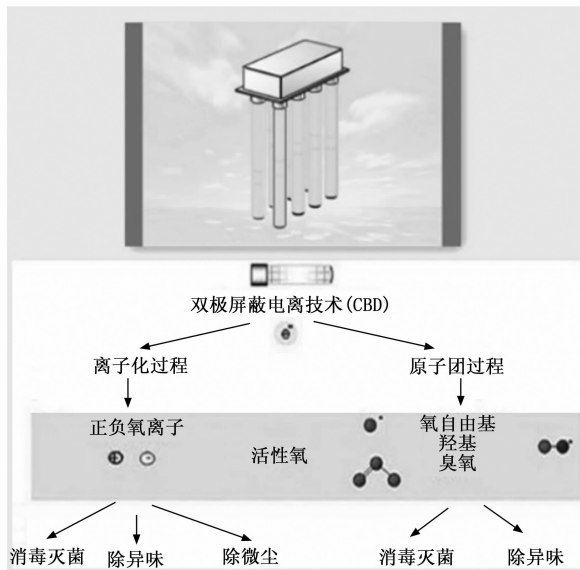


图 3 空气净化原理图

### 2.3 车内压力保护控制系统设计

智能控制动车组空调系统采用被动式车内压力保护系统。列车高速进入隧道或会车时，安装在头车的压力波传

传感器检测到车外的压力波动信号后传递给压力波控制器, 压力波控制器发出压力保护动作指令, 从而起到压力保护作用。主要由压力波传感器、压力保护装置监控单元、压力保护阀等组成。压力波传感器头尾车近司机室两侧各一个, 压力保护装置监控单元安装于车辆配电柜内, 空调机组中设新风压力保护阀和废排压力保护阀。压力保护阀是压力保护系统中的执行机构。当车外压力变化超过设定要求时, 压力保护装置监控单元驱动压力保护阀动作, 在压力波产生影响的瞬间将车内外空气通路关闭, 从而保证客室内气压的相对稳定。

为实现客室及司机室内的压力控制, 每辆端车安装 1 台压力波控制装置, 用于检测压力波动, 并发出压力波保护信号, 控制新风口及废排风口的压力波阀关闭。压力保护系统组成如图 4 所示。

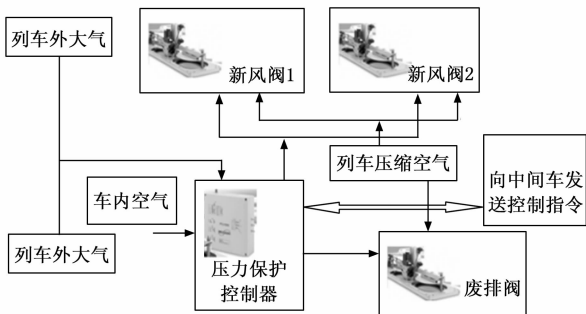


图 4 压力保护系统组成

为提高车辆乘坐舒适度, 避免列车压力波动对乘客造成不适, 在既有车内压力保护系统基础上, 增加 ATP 隧道信号自动获取。利用 ATP 信号精确获取线路隧道信息, 通过网络发送给压力波保护装置, 执行“隧道模式”, 隧道前 300 m 关闭压力保护阀, 车内压力波动由  $\leq 500 \text{ Pa/1s}$  降至  $\leq 300 \text{ Pa/1s}$ 。

### 2.4 风道系统设计

风道系统包括送风道、回风道以及废排风道。车顶送风采用侧顶隐形式送风; 回风口设在车窗上部, 通过回风风道与机组回风口相连; 废排通过侧墙下部排风道送入车下废排装置、卫生间废气通过废排风道直接排至车外。

当空调机组运转时, 外部新风通过机组两侧新风口吸入, 与来自客室的回风在空调混合箱内混合后送入空调机组内, 经空调处理后, 通过送风风机送入送风道, 并通过送风口送到客室内, 通过台处由送风支风道提供送风。客室回风通过各回风口收集并经过回风道被吸入到空调混合箱内, 混合箱将回风与新风混合后送入到空调机组进行处理, 从而实现车内温度、湿度等环境参数的控制。车辆空调风道系统布置如图 5 所示。

空调系统通过新风格栅对新风进行初级过滤, 并通过设置在机组内的混合风过滤网对混合后的空气进行二次过滤。

为提高客室内空气质量, 应对高铁沿线存在的雾霾、沙尘天气, 将空调滤网过滤等级由 G3 级提高至 F5 级。空

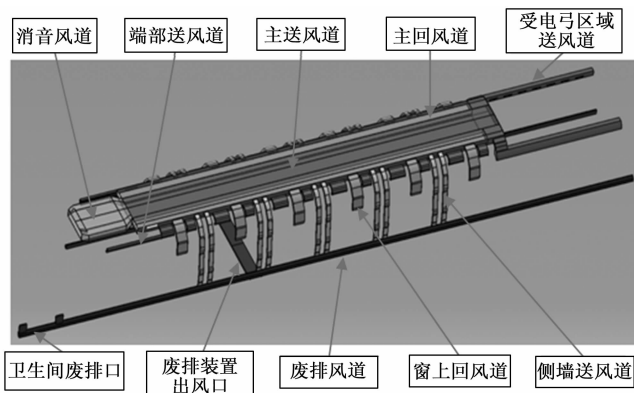


图 5 车辆空调风道系统布置

调滤网过滤等级提高通过更换滤料实现, 滤网框可与既有动车组空调通用。空调机组内设 F5 级过滤棉和空气净化装置, 通过蒸发风机强制通风, 车外新风和车内的回风通过过滤网送入客室, 从而对进入车内的空气净化过滤。

### 2.5 客室内温湿度控制设计

为提高车内环境舒适度, 本研究增加客室湿度传感器, 控制客室内温湿度在适宜范围内。在压缩机启动时开启电加热, 从而将客室内湿度控制在 65% 以下。

空调制冷工作时, 车厢内的温度和湿度超过设定值时, 开启压缩机进行除湿; 当客室内温度达到设定目标温度后, 压缩机会停机, 当车外湿度较大, 将导致车厢内湿度超标。空调增加除湿功能后, 空调控制器可根据客室内湿度传感器采集的湿度值自动与目标湿度值进行比较, 当车厢内的湿度超过设定值 (温度达到或低于设定值), 则开启压缩机和电加热进行除湿模式运行, 蒸发风机低速运转, 使用电加热补偿客室内的热量, 直至湿度达到设定值后退出除湿模式。

进入除湿模式时, 电加热器和压缩机同时工作, 蒸发风机以低速运转。电加热器的投入工作是为了提升制冷运行档位, 以便提高机组的除湿能力。蒸发风机低速运行是为了使循环风能降到更低温度, 以便能析出更多的水分, 提高机组的除湿能力。此时机组的部分制冷量用于平衡潜热, 即使空气中水蒸气凝结成水后排出; 部分用于平衡显热, 显热包括车内降温需求和电热的制热量。在除湿模式下, 为了保证整机能耗不超出车辆供给侧的允许范围, 电加热器最高仅允许其中一组工作, 此时每台机组的 2 台压缩机最高将仅允许单台压缩机满载工作, 或 2 台压缩机均运行在较低的频率下。空调机组除湿模式工作原理如图 6 所示。

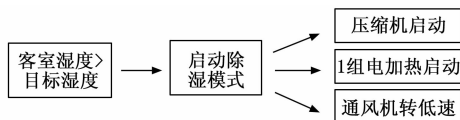


图 6 空调机组除湿模式工作原理

### 2.6 空调控制柜设计

空调控制柜采用一体化交流柜设计方案, 每辆车配置 1

台,采用以太网通讯方式,设触摸屏。除了客室空调控制功能,头尾车的控制柜还具有司机室空调和压力波控制功能。

空调系统的控制元件均集成在客室空调控制柜中,空调控制柜以空调控制器为核心,配合断路器、接触器、继电器、传感器等元件,自动完成空调装置的控制、保护、故障诊断和故障记录功能,使空调系统工作在预冷、预热、通风、制冷、加热、除湿、紧急通风等模式,调节客室内的舒适度,同时也具有以太网通讯接口,可与列车网络通讯,实现指令和信息的交换。控制柜控制本车的空调机组、废排装置等。头尾车的客室空调控制柜带有司机室空调控制功能。

空调控制器具有以太网接口,每辆车的空调控制器通过以太网相连,在端车的空调控制器上可以进行整列车空调系统数据交互、故障下载等。

### 2.7 智能运维控制设计

空调通风系统是轨道车辆系统的重要子部件,空调设备的可靠运营与否时刻影响着车辆的安全性和舒适性。智能动车组空调系统控制器是空调系统相关信号处理以及电气元件的控制中心,控制断路器、接触器、继电器等元件协同工作,使空调各部件按照要求有序运转,实现空调通风、制冷以及采暖功能同时完成空调装置的控制、保护、故障诊断和故障记录等功能,并设置网络通讯接口、数据下载接口。

空调 PHM 通过对新风温度、送风温度、客室温度、客室目标温度、温度变化率、空调运转模式、压缩机电流、压缩机排气温度、制冷系统压力、风机电流、风机振动等关键参数进行分析,发现故障的早期征兆,提供运用修、高级修指导建议,提升空调可靠性,降低在线运用故障率。

#### 2.7.1 空调滤网脏堵预警模型

1) 故障特征原理:高速动车组客室空调机组内设有 3 个混合风滤网,滤料过滤等级为 F5,主要作用是防止灰尘、污垢或固定微粒(蒸发器和风道的污染物)进入蒸发腔,并卡在换热器翅片之间,阻碍空气流通,从而引起系统故障,如吸气压力下降、车厢空气调节效率降低等。在滤网前后增加压差开关,用于判断滤网脏堵情况。空调滤网脏堵后,其本身阻力增大,滤网前后压差值增大。空调机组内增加压差控制器,压力测点设置在滤网前后,滤网前后压差超出压差控制器设定值后,压力开关闭合,表示空调滤网脏堵,需要更换。

2) 模型逻辑:满足以下条件,则生成“空调滤网脏堵预警”: (1) 空调蒸发风机处于高速运转,且无故障;(2) 车辆静止(列车速度为 0);(3) 滤网压差开关闭合持续 1 min。

3) 展示需求:

- (1) 地面展示:地面弹屏提示;
- (2) 车载展示:空调本控屏记录。

4) 检修指导:

(1) 在地面 PHM 进行“空调滤网脏堵异常预警”时,给出回库检修意见:

(2) 下载空调实时数据,分析空调当时状态;

(3) 检查滤网情况,脏堵时进行清洗、更换。

智能动车组空调系统在既有 PHM 模型的基础上,针对运用和检修过程中暴露的典型问题,增加部分部件状态异常预警,解决空调部件状态监测时空空调制器无法采集并报出的问题,为空调系统部件检修提供指导。

## 3 测试验证

### 3.1 变频空调

#### 3.1.1 测试车辆

选取智能动车组 2 车跟踪测试。测试时车辆运行,空调工作。

#### 3.1.2 测试方法

空调机组设定为“自动”模式,空调控制系统根据空调机组内新风温度传感器采集的新风温度,自动确定目标温度值。空调控制器接收客室内回风温度传感器采集温度,与目标温度值进行比较,自动控制压缩机运行频率,控制客室内温度。车厢内的湿度传感器检测客室内湿度值,并与相对湿度设定值进行比较,自动控制压缩机运行频率,控制客室内湿度。

#### 3.1.3 测试仪器

温度传感器、湿度传感器。

#### 3.1.4 测试结论

变频空调温湿度调节性能良好,客室内温度维持在 21~25℃,客室内温度波动范围在目标值的-1~0.5℃内;客室内相对湿度维持在 44%~65%。

### 3.2 空气净化装置

#### 3.2.1 测试车辆

选取智能动车组 3 车为试验对象。测试时车辆静止,空调工作。

#### 3.2.2 测试方法

选取客室内前、中、后布置 3 个测点。测试 1 小时内客室自然菌总数及 PM2.5 浓度变化,计算 1 小时客室自然菌及 PM2.5 去除率。

#### 3.2.3 测试仪器

微生物采样器、粉尘仪等设备。

#### 3.2.4 测试结论

其中甲醛去除率约为 86%;细菌去除率约为 92%;PM2.5 过滤效率可由 40%提高到 70%。

## 4 结束语

在轨道交通空调系统综合分析基础上,对高速列车空调系统智能控制技术硬件设计、测试验证进行了详细论述。结果表明,空调系统智能控制在综合经济性、环境舒适性及检修方便等均有提升。满足对轨道交通车辆设备的智能化发展推动的需求。

### 参考文献:

[1] 刘长青. 京张高铁智能动车组关键技术研究与应用 [J]. 中国

- 铁路, 2019 (9): 9-13.
- [2] 康 伟, 崔军胜, 王绅宇. 轨道交通车辆空调系统智能控制与大数据应用 [J]. 城市轨道交通研究, 2020 (4): 134-136.
- [3] 吴永深, 李玉奎, 马英华. PHM 技术在轨道车辆空调中的应用研究 [J]. 技术与市场, 2020 (10): 30-32.
- [4] 梁建英. 高速列车智能诊断与故障预测技术研究 [J]. 北京交通大学学报, 2019 (1): 63-70.
- [5] 李 平, 邵 赛, 薛 蕊, 等. 国外铁路数字化与智能化发展趋势研究 [J]. 中国铁路, 2019 (2): 25-31.
- [6] 贾利民, 秦 勇, 李 平. 新一代轨道智能运输系统总体框架与关键技术 [J]. 中国铁路, 2015 (4): 14-19.
- [7] GERDES M. Predictive health monitoring for aircraft system using decision tress [D]. Sweden: Linkoping University, 2014.
- [8] PAULA F L, TIAGOM F C, LUIS C. Towards the internet of smart trains: a review on industrial IoT-Connected railways [J]. Sensor, 2017 (16): 1457-1501.
- [9] LI H, PARIKH D, et al. Improving rail network velocity: amachine learning approach to predictive maintenance [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 45: 17-26.
- [10] 宋龙龙. 基于非规范知识处理的高速列车综合智能故障诊断方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [11] 俞展猷. 日本新干线铁路的安全技术 [J]. 现代城市轨道交通 (上接第 122 页)
- [14] RIOS H, FALCON R, GONZALEZ O A, et al. Continuous sliding-mode control strategies for quadrotor robust tracking: real-time application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66 (2): 1264-1272.
- [15] ZHAO B, XIAN B, ZHANG Y, et al. Nonlinear robust sliding mode control of a quadrotor unmanned aerial vehicle based on immersion and invariance method [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2015, 25 (18): 3714-3731.
- [16] LIU C, JIANG B, ZHANG K. Incipient fault detection using an associated adaptive and sliding-mode observer for quadrotor helicopter attitude control systems [J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2016, 35 (10): 3555-3574.
- [17] CHEN F, WU Q, JIANG B, et al. A reconfiguration scheme for quadrotor helicopter via simple adaptive control and quantum logic [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (7): 4328-4335.
- [18] TIAN B, CUI J, LU H, et al. Adaptive finite-time attitude tracking of quadrotors with experiments and comparisons [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (12): 9428-9438.
- [19] TORRENTE G, KAUFMANN E, FOHN P, et al. Data-driven MPC for quadrotors [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6 (2): 3769-3776.
- [20] ALEXIS K, NIKOLAKOPOULOS G, TZES A. Model predictive quadrotor control: attitude, altitude and position experimental studies [J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6 (12): 1812-1827.
- [12] 郭堂伟, 周 涵, 等. 基于 ARM 嵌入式的医院空气质量实时检测系统设计与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 14-18.
- [13] 高萌萌, 孙志刚, 李 硕, 等. 基于 NB-IOT 的区域空气质量监测系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 55-59.
- [14] 黄赞武, 魏学业, 刘 泽. 基于模糊神经网络的轨道电路故障诊断方法研究 [J]. 铁道学报, 2012 (34): 54-59.
- [15] 杨 捷. 地铁空调系统全面控制与节能方案 [J]. 自动化博览, 2007 (3): 60-62.
- [16] 汪 鸣. 城市轨道交通智慧化发展方向及实现途径 [J]. 现代城市轨道交通, 2020 (8): 8-11.
- [17] 清华大学, 中国标准化研究院, 西北建筑设计院, 等. 空气调节系统经济运行: GB/T1798-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 58.
- [18] 贾利民. 铁路运输智能自动化——现状、问题与挑战 [C] // 中国控制会议论文集, 北京: 科学出版社, 1994.
- [19] 贾利民, 李 平. 铁路智能运输系统一体系框架与标准体系 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [20] 贾利民, 聂阿新, 王富章. 铁路智能运输系统一现状、挑战与发展. 交通运输系统工程与信 [J]. 2001, 1 (3): 189-194.
- [21] DIERKS T, JAGANNATHAN S. Output feedback control of a quadrotor UAV using neural networks [J]. IEEE transactions on neural networks, 2009, 21 (1): 50-66.
- [22] SHAO X, WANG L, LI J, et al. High-order ESO based output feedback dynamic surface control for quadrotors under position constraints and uncertainties [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 89: 288-298.
- [23] HAN S I, LEE J M. Fuzzy echo state neural networks and funnel dynamic surface control for prescribed performance of a nonlinear dynamic system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61 (2): 1099-1112.
- [24] MOHAJERIN N, WASLANDER S L. Multistep prediction of dynamic systems with recurrent neural networks [J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2019, 30 (11): 3370-3383.
- [25] 李砚浓, 李汀兰, 姜 艺, 等. 基于 RBF 神经网络自适应 PID 四旋翼飞行器控制 [J]. 控制工程, 2016, 23 (3): 378-382.
- [26] LIN X L, WU C F, CHEN B S. Robust  $H_{\infty}$  adaptive fuzzy tracking control for MIMO nonlinear stochastic Poisson jump diffusion systems [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 49 (8): 3116-3130.
- [27] ZHOU L, ZHANG J, SHE H, et al. Quadrotor UAV flight control via a novel saturation integral backstepping controller [J]. Automatika, 2019, 60 (2): 193-206.
- [28] SHAO X, LIU J, CAO H, et al. Robust dynamic surface trajectory tracking control for a quadrotor UAV via extended state observer [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28 (7): 2700-2719.