

燃气管网水力工况模拟系统的研究与开发

姚先威¹, 史云怡²

(1.哈尔滨天源石化工程设计有限责任公司武汉分公司, 湖北 武汉 430000;

2.广东技术师范大学自动化学院, 广东 广州 510665)

✉1119482568@qq.com; 1067075834@qq.com



摘要: 随着燃气管网系统越来越复杂, 管网水力运行状况的研究难度也随之增大。为了精确掌握管网中各类气源的供气范围及压力情况, 开发一个基于有限元节点法的系统用来模拟管网运行时的水力工况情况。系统采用改进遗传算法辨识当量粗糙度参数后, 将所得参数辨识真实值代入水力计算程序, 进而得出气源供气范围及压力数据值, 所得实验值结果较为精准, 与真实值相差小; 为管网的优化设计、运行调度和自动监控提供了理论依据, 有助于提高管网运行的可靠性、稳定性和经济效益。

关键词: 燃气管网; 水力计算; 当量粗糙度; 遗传算法

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Development of Hydraulic Regime Simulation System for Gas Pipeline Network

YAO Xianwei¹, SHI Yunyi²

(1. Wuhan Branch, Harbin Tianyuan Petrochemical Engineering Design Co., Ltd., Wuhan 430000, China

2. School of Automation, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

✉1119482568@qq.com; 1067075834@qq.com

Abstract: With the increasing complexity of gas pipeline system, it is more and more difficult to study the hydraulic operation of pipeline networks. In order to accurately understand the supply range and pressure situation of various gas sources in the pipeline network, this paper proposes to develop a system based on finite element node method to simulate the hydraulic regime of the pipeline network during operation. An improved genetic algorithm is used in the system to identify equivalent roughness parameters, the identified actual values of which are brought into the hydraulic calculation program, and the gas supply range and pressure data values are obtained. The experimental results obtained are relatively accurate and have a small difference from the actual values. The proposed system provides a theoretical basis for optimal design, operation scheduling and automatic monitoring of pipeline network, and helps to improve the reliability, stability and economic benefits of pipeline network operation.

Keywords: gas pipeline network; hydraulic calculation; equivalent roughness; genetic algorithm (GA)

1 引言(Introduction)

随着我国发展轨迹逐步实现低碳化, 人们对作为清洁能源的天然气需求量也不断增加。天然气的开发与利用是与管

网建设相辅相成的。为满足人们对天然气的使用需求, 输配气网络的规模和结构越来越大且越来越复杂。近年来, 管网系统已不再是简单的枝状或环状管网, 而是呈现出点多、面

广、线长的发展趋势^[1-2]。国内城市输配燃气系统的管网形态，大多采用多气源的复杂结构，即由环状和环枝状管网组成。

天然气是一种安全性高、环保清洁、价格优势明显的优质能源^[3]，其成分中含有85%的甲烷和少量的硫化氢等有毒物质，若对其管理或使用不当，易引发爆炸、气体中毒等安全隐患，因此对天然气输配管网系统的安全性和可靠性的要求将更加严格。此外，由于天然气输配管网通常集中在人口或公共设施密集处，若发生燃气泄漏事故，将极大地影响周边居民的生命财产安全。考虑到燃气管网的复杂性、测试成本、环境保护等因素，开发城市燃气输配管网水力工况模拟系统具有一定的应用价值。应用该仿真系统，用户可以更好地掌握管道泄漏的风险程度，如泄漏点、泄漏事故范围等，可作为燃气供应商优化管网系统及其运行调度管理的理论依据，具有实际指导意义。

2 燃气管网水力计算数学模型(Mathematical model of hydraulic calculation of gas pipeline network)

天然气管网水力计算是天然气管网规划设计的基础。水力计算的目的是求解合适的管道口径、长度和截面压力，确保供气计划在技术上可行、经济上合理。环形燃气管网由各种气源组成。本文将复杂的管网系统简化为一系列节点和管段。管网有多个节点，而节点处可由不同管段进行连接，因此一个节点的供气，可由多种不同的气源组合而成。为了满足居民的供气需求，要求保证同一节点的燃气进出量保持平衡。当燃气管网的一段内径发生变化时，不仅相应段内的气流分布方式会发生变化，而且每个节点的压力也会发生变化。本文所提模拟系统按需设置三个初始变量：管段流量、压力降、管径。

设环状燃气管网的管段数为 N 、节点数为 m 、环数为 n ，三者符合关系式：

$$N = m + n - 1 \quad (1)$$

以下为求解环状管网中未知量的步骤。

(1)每一管段压力降计算公式：

$$\Delta P_j = k_j \frac{Q_j^\alpha}{d_j^\beta} l_j \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

公式(2)中、 α 、 β 与管道内气体流动状态、 k_j 管道粗糙度相关，常数与燃气性质和管段材质有关。

(2)每一节点的流出量与流入量保持平衡：

$$\sum Q_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m-1) \quad (3)$$

(3)环内管段压力降的代数和为0：

$$\sum \Delta P_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

(4)管网的计算压力降等于气源点到环状管网最末管段终点的各个管段压力降之和：

$$\sum \Delta P_i - \Delta P = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m-1) \quad (5)$$

求解上述方程，需先进行流量预分配，再根据等压力降法选择管径作为补充条件求解。

燃气管网正常工作时，需满足三个方程：管段压力降方程、节点流量方程和环能量方程。根据上述方程组，可得节点压力方程组：

$$[A \cdot C \cdot A^T] \cdot P + Q = 0 \quad (6)$$

主流解法有解环方程法、解节点方程法和解管段方程法，均涉及迭代计算。对三种方法在解方程时计算的工作量、精确度、适用范围进行比较。解节点方程法计算量在三种方法中处于居中位置且可以自动生成管网关联矩阵，适用范围广，更适用于处理多气源供气的复杂管网^[4]。所以，本文采用有限元节点法对天然气管网进行水力计算。

2.1 管道摩擦阻力损失计算公式

(1)低压燃气管道：

$$\frac{\Delta P}{L} = 6.26 \times 10^7 \lambda \frac{Q^2}{d^5} \rho \frac{T}{T_0} \quad (7)$$

(2)中高压燃气管道：

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{L} = 1.27 \times 10^{10} \lambda \frac{Q^2}{d^5} \rho \frac{T}{T_0} Z \quad (8)$$

公式(7)和公式(8)中的参数均为燃气管道相关参数： ΔP 为摩擦阻力损失(Pa)； λ 为摩擦阻力系数； L 为计算长度(m)； Q 为计算流量(m^3/h)； d 为内径(mm)； ρ 为燃气密度； T 为燃气热力学温度， T_0 为273.15(K)； P_1 为管道起点的压力(绝对压力，kPa)； P_2 为管道终点的压力(绝对压力，kPa)； Z 为压缩因子。

2.2 摩擦阻力系数的确定

管道摩擦阻力系数受多种因素影响，如管段材质、内径、管内气体组成、管道安装方式等，它是影响燃气管网水力计算精度的主要因素。对该系数进行处理，对于提高水力计算的准确性、收敛性、适用性都具有至关重要的作用。

对比《城镇燃气设计规范》(GB50028—93)和《城镇燃气设计规范》(GB50028—2006)中的燃气管网水力计算求解公式可知，《城镇燃气设计规范》(GB50028—2006)采用的是柯列勃洛克公式，其适用于低压和中高压燃气输配管道。公式如下：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{K}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right] \quad (9)$$

公式(9)中： λ 为摩擦阻力系数； K 为管壁内表面的当量绝对粗糙度(mm)； d 为管道内径(mm)； Re 为雷诺数。

柯氏公式则适用于各种管材，既适用于湍流状态下摩擦阻力系数的计算，也可替代层流状态、临界状态摩擦阻力系数计算公式，适用范围非常广泛^[5]。

3 管网水力工况模拟系统计算程序编制(Programming of simulation system for hydraulic regime of pipeline Network)

本文以有限元节点法为基础，使用VS 2017 C++语言编写了管网水力工况仿真系统的计算程序。摩擦阻力系数依据《城市燃气规划规范》(GB50028—2006)中指定的Colebrook公式。通过遗传算法对当量粗糙度参数进行辨识，并将其真实值引入仿真系统的计算程序中，得到接近实际工况的水力计算结果。由此，获得了管网中各类气源的供气范围，确定了供气压力，为管网水力工况模拟系统研发工作奠定了基础。

3.1 有限元节点法模拟步骤

(1)根据收集到的数据，整理总结管网所需的基本数据，如管段数、节点数、管径、管材、途泄流量等，以Excel格式录入系统。

(2)确定环状管网最末管段终点位置及气流方向。默认气流方向与高压流向低压的方向相同。

(3)初始时，设管段流量 $q^{(0)}$ ，求解途泄流量和输运流量。

(4)依次求解节点压力、管段压力降、管段流量。

(5)准确性校验。若所得精度满足要求，则输出计算结果；否则，将所得结果进行平差计算修正后，重复第(4)步骤，直到准确性达标，即第 $K+1$ 次的 $q^{(k+1)}$ 与 $q^{(k)}$ 差的绝对值满足精度^[6]。

工程计算中常使用高斯赛德尔迭代法和雅可比迭代法，本文程序编写采用的是基于高斯赛德尔迭代法求解节点压力。相比雅可比迭代法，高斯赛德尔迭代法节约的内存空间更多，收敛速度更快，效果更优越^[7]。

3.2 当量粗糙度辨识流程

在天然气管网水力工况模拟系统中，一些参数是根据工程经验或理论计算得来的。由于日常使用时，受管道使用年限变化及管内气体的影响，管道数据参数可能会有偏差。基于此，本文采用管道过气能力系数替代容易出现偏差的参

数，进一步保障管网安全稳定可靠的运行状况。管道过气能力系数包含多种影响因素，如摩擦阻力系数、摩擦阻力损失、当量粗糙度等，其中当量粗糙度是影响最大的因素。

鉴于遗传算法可视为由可行解组成的群体迭代进化的进程^[8-10]，针对我国管网结构兼具复杂性和广泛性的特点，已有利用改进遗传算法进行燃气管网设计的研究^[11-14]。本文采用的遗传算法对选择、交叉和变异三个步骤进行了改进：①本文所使用的选择运算有赌轮盘法、锦标赛选择法、精英保留法；②通过自适应的方式调整交叉概率 P_c 的大小，其取值可根据遗传算法的进化程度和后代个体的优化程度而定；③变异概率 P_m 也采用自适应的方法确定，其取值大小取决于遗传算法个体进化情况的好坏。参数辨识当量粗糙度 K 的算法流程如图1所示。

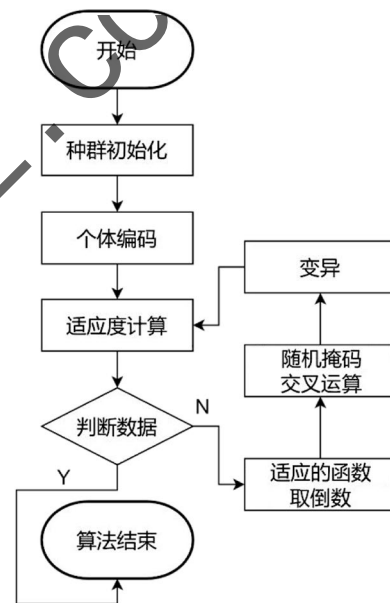


图1 当量粗糙度参数辨识

Fig.1 Parameter identification of equivalent roughness

首先，获取管网所需的实测数据，包括管段压降、节点流量和节点压力等，推算出 K 值。如果 K 值符合准确性要求，则结束程序；否则，利用改进的遗传算法对参数进行辨识，使得其理论值与实际值的差值最小，从而获得管网中每一根管道当量粗糙度 K 的优化值。改进后的遗传算法在对 K 值寻优的过程中，迭代的稳定性好，最终结果逐渐收敛于定值。

4 燃气管网水力工况模拟系统及水力计算案例分析 (Hydraulic regime simulation system of gas pipeline network and case analysis of hydraulic calculation)

本文开发的燃气管网水力工况模拟系统主界面如图2所

示，其数据包含管段、源点、节点处数据表。系统界面有四个功能按键：“数据确认”“流量预测计算”“当量粗糙度辨识”“CAD数据回显”。

管段数据表								
环号	管段号	起点	终点	长度	管径(cm)	材质	沿途流量(m ³ /h)	最终管段流量
1	1	1	49	0.61	50	2	41.8251	
2	2	1	2	0.51	40	2	53.7266	
2	3	3	2	1.75	40	2	184.356	
2	4	51	3	1.14	20	2	313.674	
3	5	51	5	1.33	40	2	419.1	
3	6	3	4	1.38	40	2	200.522	
3	7	5	4	0.82	20	2	356.114	
5	8	5	6	3.34	30	2	1628.51	
7	9	10	6	1.67	30	2	756.921	
5	10	6	7	1.33	15	2	648.479	
26	11	7	17	1.21	80	2	120.233	

源点数据表			节点数据表	
序号	气源厂节点	气源厂压力(绝压)	节点号	节点集中流量
1	51	250	1	0
2	52	250	2	0
3	53	250	3	0
4	54	250	4	0

图2 燃气管网水力工况模拟系统主界面

Fig.2 Main interface of hydraulic regime simulation system for gas pipeline network
模拟系统使用步骤如图3所示。

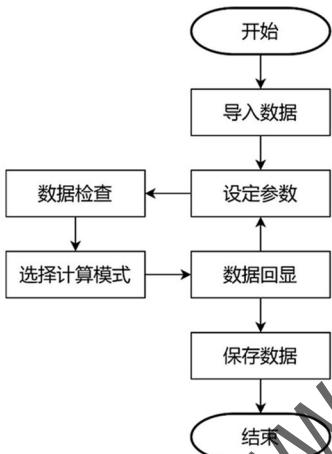


图3 燃气管网水力工况模拟系统使用流程

Fig.3 Application process of hydraulic regime simulation system for gas pipeline network

鉴于篇幅有限，本文按辨识值进行软件仿真，并对其产生的数据进行结果分析。以某城市中高压天然气管网为例，其为多气源环状和环枝状管网，由不同管材组成，同时压力级别不同。将具体信息以Excel格式录入，该城市燃气管网有100个管段、86个节点和6个气源厂，总环数为15个，管网具体参数设计如下：温度为293.15 K；运动黏度为0.000 015 m²/s；气体密度为0.75 kg/m³；压缩因子为1；中高压(表压)阈值为131.325 kPa；当量粗糙度为0.01—3 mm。

管网各管段的信息详见表1，其中管材1为PE管，管材2为新钢管，管材3为旧钢管。

表1 管网信息表

Tab.1 Table of pipeline network information

管段号	环号	管段起点	管段终点	长度/km	管径/cm	材质
1	2	1	2	2.38	40.6	3
2	4	2	8	1.53	29.04	1
3	0	8	10	2.455	30.7	3
4	2	1	15	3.979	20.7	3
5	2	15	13	1.045	40.6	3
.....						

当量粗糙度 K_n 的辨识结果详见表2。

表2 管段当量粗糙度辨识值

Tab.2 Identification value of equivalent roughness of pipe segment

管段号	K_n 辨识值	管段号	K_n 辨识值
1	0.054 300 7	6	0.302 038
2	0.938 125	7	2.287 22
3	0.174 154	8	1.300 92
4	0.109 825	9	0.909 61
5	0.505 839	10	0.481 431
.....			

按 K_n 辨识值进行仿真的计算结果详见表3至表5。

表3 按辨识值仿真管段数据表

Tab.3 Identification value of equivalent roughness of pipe segment

管段号	初始管段流量/ m ³ /h	最终管段流量/ m ³ /h	单位平方压力降/ (kPa) ² /km
1	5 163.10	5 634.04	1 196.75
2	3 693.02	-2 653.22	-1 602.37
3	3 904.12	144.998	6.565 42
4	2 632.42	1 490.09	5 037.59
5	5 163.10	-7 226.47	-1 187.08
.....			

表4 按辨识值仿真气源数据表

Tab.4 Simulating the source data table according to the identification value

序号	气源厂节点	气源厂压力(绝压)/ kPa/km	气源厂流量/ m ³ /h
1	81	250	9 365.4
2	82	250	21 640.9
3	83	220	21 428.8
4	84	200	21 818.8
5	85	250	6 901.49
6	86	250	21 630.9

表5 按辨识值仿真节点数据表

Tab.5 Simulating the node data table according to the identification value

节点号	节点集中流量/ m ³ /h	节点总流量/ m ³ /h	节点压力(平方)/ (kPa) ² /km	节点压力(绝压)/ kPa/km
1	1 529	1 529	47 546.4	218.051
2	748	748	46 349.6	215.29
3	315	315	45 740.1	213.869
4	1	1	45 784.2	213.972
5	542	542	45 816.7	214.048
.....				

对辨识值仿真结果进行分析可知，相较于按工程理论值仿真气源厂流量和节点压力，按辨识值仿真的结果更接近真实值。获得的气源厂相关数据对比结果详见表6至表7。

表6 气源厂数据对比表

Tab.6 Data comparison table of gas source factory

比较数据	气源厂1	气源厂2	气源厂3	气源厂4	气源厂5	气源厂6
实测数据/ m ³ /h	9 355	21 603	21 395	22 090	6 347	22 000
按理论值仿真 计算值/m ³ /h	11 064.73	20 030.98	23 189.47	16 170.9	9 574.57	22 762
按辨识值仿真 计算值/m ³ /h	9 365.4	21 640.9	21 428.8	21 818.8	6 901.49	21 630.9
按理论值偏差值/ m ³ /h	1 709.73	-1 572.02	1 794.47	-5 919.1	3 227.57	762
按辨识值偏差值/ m ³ /h	10.4	37.9	33.8	-271.2	554.49	-369.1
按理论值偏差 百分比/%	18.28	-7.28	8.39	-26.80	50.85	3.46
按辨识值偏差 百分比/%	0.11	0.18	0.16	-1.23	8.74	-1.68

表7 节点数据对比

Tab.7 Node data comparison

节点压力平方值	节点33	节点46	节点57	节点66	节点77
实测数据/ (kPa) ² /km	33 856	22 801	17 161	30 084.9	22 500
按理论值仿真计算值/ (kPa) ² /km	36 123.63	31 645.73	33 689.56	36 023.17	34 828.24
按辨识值仿真计算值/ (kPa) ² /km	33 844	21 472.9	18 668.7	24 747.9	24 431.1
按理论值偏差值/ (kPa) ² /km	2 267.63	8 944.73	16 528.56	5 938.27	12 328.24
按辨识值偏差值/ (kPa) ² /km	-12	-1 328.1	1 507.7	-5 337	1 931.1
按理论值偏差百分比/%	6.70	39.23	96.31	19.74	54.79
按辨识值偏差百分比/%	-0.31	-5.82	8.79	-17.74	8.58

通过数据对比后发现，相较于按工程经验值或理论值对气源厂流量和节点压力进行仿真，采用辨识值得到的仿真结果更贴近真实值。案例中共迭代19次为0.02，运算时间约为3 s。实验表明，本文设计的管网水力工况模拟系统可对当量粗糙度进行合理辨识，适用于多环、多气源点、环状、枝状管网。

5 结论(Conclusion)

本文开发了一种天然气管网水力工况模拟系统，并介绍了该系统的数学模型。模型经案例验证，其运算速度快、迭代次数少，大大提高了计算精度和工作效率；可用于多环、多气源点、环状、枝状管网的水力计算，有效地解决燃气管网计算时出现的收敛速度慢或不收敛的问题。经实验模拟，先对当量粗糙度进行参数辨识，再将其带入水力计算公式得到的数据结果更精确。

鉴于本实验管道水力计算是在模拟环境中进行的，其对于管网运作的工况分析以及水力计算结果的可靠性还有待进一步的实践验证和理论研究。

参考文献(References)

[1] 郭彬.城市燃气输配管网建设之研究[J].科技创新与应用,2019,263(07):86-87.

[2] 王乾.复杂天然气管网安全运行研究[J].石化技术,2022,29(05):214-216.

[3] 贺秀峰.我国天然气供求现状、问题及对策研究[D].重庆:重庆师范大学,2013.

[4] 张树玉,刘克江.燃气管网优化设计方法研究[J].辽宁化工,2019(9):873-875.

[5] 中华人民共和国建设部.城镇燃气设计规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2020:47.

[6] 肖蕾,肖嵩.水力计算自适应优化算法仿真研究[J].计算机应用与软件,2013,30(03):154-157.

[7] 赵丹.雅可比迭代法与高斯-塞德尔迭代法研究[J].兴义民族师范学院学报,2012(02):108-112.

[8] SIMPSON A R, DANDY G C, MURPHY L J. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1994, 120(4):423-443.

[9] ZHANG Z W, LIU X T. Study on optimal operation of natural gas pipeline network based on improved genetic algorithm[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(8):355-374.

- [10] 舒爽.关于加强城镇燃气管网优化设计的分析[J].中国新技术新产品,2016(08):46.
- [11] 王建刚.城市天然气输配管网的数学模型及优化[D].西安:西安电子科技大学,2008.
- [12] YANG Y K, LIU J C, TAN S B, et al. Application of constrained multi-objective evolutionary algorithm in multi-source compressed-air pipeline optimization problems[J]. IFAC PapersOnLine, 2018, 51(18):168-173.
- [13] 张喜明,宁淑媛,张帆,等.遗传算法在城市燃气管网优化中的

(上接第62页)

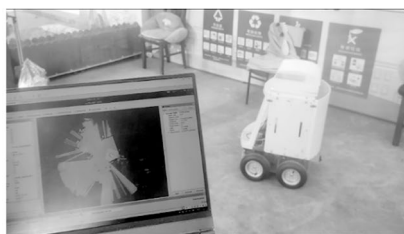


图11 垃圾督导机器人实地测试

Fig.11 Field test of garbage supervision robot

6 结论(Conclusion)

本文设计了基于ROS的垃圾督导机器人导航巡逻系统。该机器人能够快速响应控制信号,及时移动或者停止。主控制器使用ROS,实现了建图、定位导航等功能,并且通过其提供的仿真功能,节省了在实体机上调试的时间,使用状态机对复杂的移动巡逻任务进行规划。通过实地实验,证明机器人能够完成巡逻任务,其导航功能能够满足现实需要。同时,该机器人移动导航系统的软、硬件设计为移动机器人的开发具有较强的指导意义和应用价值,对于不同的移动机器人模型,只需要修改对应的运动学模型,即可实现导航功能。

由于该机器人必须通过手动建图、手动设置目标点,才能完成相应的功能,因此自动探索和生成导航路径也是该导航系统需要进一步研究的方向,并且可以逐步融合视觉、语音等方面以增加并完善该机器人的功能,做到真正的商业化落地。

参考文献(References)

- [1] 奚晓丽.上海高校垃圾分类从“新时尚”到“好习惯”[J].上海教育,2021(30):53.
- [2] 冯德胜.基于ROS的移动机器人导航系统研究[D].济南:齐鲁工业大学,2021.

应用[J].节能,2019,38(03):28-30.

- [14] 赵羽,蔡磊,管延文,等.基于遗传算法的燃气管道阻力系数辨识研究[J].煤气与热力,2022,42(05):1-6,10.

作者简介:

姚先威(1994-),男,本科,助理工程师.研究领域:油气储运设计,自动化系统开发集成,软件开发.

史云怡(2000-),女,硕士生.研究领域:自动化系统开发集成,软件开发.

- [3] 李恒,杨亮,曾碧,等.基于ROS的移动机器人仿真实验平台设计与实现[J].电子设计工程,2022,30(14):53-57,63.

- [4] 史小露,郑友胜,张磊.基于ROS的智能代步车嵌入式运动控制系统[J].软件工程,2016,19(06):48-51.

- [5] 鲁翔,彭绪富.基于ROS机器人的自主探索建图算法研究[J].湖北师范大学学报(自然科学版),2022,42(03):37-41.

- [6] 林衍照,王亚刚,丁大民.基于FreeRTOS的智能助行器设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2022,22(09):54-57,62.

- [7] 代怡鹏.基于视觉的对战撞靶机器人车靶检测与撞靶控制研究[D].哈尔滨:黑龙江大学,2022.

- [8] GRISETTI G, STACHNISS C, BURGARD W. Improved Techniques for Grid Mapping With Rao-Blackwellized Particle Filters[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(1):34-46.

- [9] KALOGEITON V S, LOANNIDIS K, SIRAKOULIS G C, et al. Real-Time Active SLAM and Obstacle Avoidance for an Autonomous Robot Based on Stereo Vision[J]. Cybernetics and Systems, 2019, 50(3):239-260.

- [10] 叶强强,郑明魁,邱鑫.基于ROS的室内自主导航移动机器人系统实现[J].传感器与微系统,2022,41(02):90-93.

- [11] 桂前进,姚昕,汪李来,等.基于分层有限状态机的检修工作票智能防误技术[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(04):458-463.

- [12] 曾彪.基于多传感器信息融合的机器人建图研究与实现[D].成都:电子科技大学,2021.

作者简介:

何海涛(1998-),男,硕士生.研究领域:嵌入式,智能控制.

陈劲杰(1965-),男,硕士,副教授.研究领域:人工智能,智能机器人.