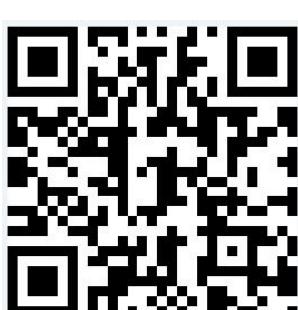


《控制工程》期刊录用通知

尊敬的 罗方佑 同志：您好！

您撰写的论文《 基于规则学习的新车型研发阶段测试车辆调度系统研发 》，稿号为 :20230381 , 经专家评审和编委会审核 , 决定作为论文被我刊录用。现将有关事宜通知如下：

- 1) 您的论文版面费为: **2300.0 元。**
- 2) 汇款时, 请务必添加“附言”: 稿件号+控制工程。(如果忘记添加附言, 请务必拨打电话或者发邮件告知, 以免影响稿件处理进程)。
- 3) 请您将缴费凭证发送至编辑部邮箱, 在邮件标题注明“**稿件号+版面费凭证**”, 如果没有凭证, 将无法从大批校外进款中找到您的进款, **无法入账等于未完成缴费**, 请重视。
- 4) 如需发票, 请在审稿系统中添加**发票信息**(必填: 发票抬头, 纳税人识别码), 我们将在两周之内为您开具电子发票, 请及时查收。如有问题请拨打电话 024-83688973, 分机号 18。
- 3) 缴费方式有两种:
 - (1) 通过扫描二维码缴费(推荐使用)



注: 东北大学校内作者, 请采用内部转账的方式进行缴费, 账号为: 04010047107001

(2) 通过银行汇款或对公转账，银行汇款账号如下：

开户行：中国银行沈阳东北大学支行（行号 104221016023）

开户名：东北大学

账号：318146100001

说明：

1. 银行汇款并非实时到账，若汇出 10 个工作日后，稿件状态仍为“待交版面费”，可来电查询。
2. 如果您同时还收到缴纳审稿费邮件，请将版面费和稿件处理费分开缴纳。
3. 未填写发票信息的，将默认为您开具个人发票。
4. 编辑部收到版面费后，会及时进行处理，届时稿件状态将变为“组版”，请自行登录系统查询确认。
5. 见刊时间依照到款的顺序及我刊组版计划拟定。

感谢您对我刊的一贯支持与信任，如有特殊情况请及时向编辑部说明，谢谢！

此致

敬礼

稿件查询网址：www.kzgc.com

E-mail：kzgcbjb@mail.neu.edu.cn

电话：024-83688973

《控制工程》编辑部

编辑部

2023-06-12

文章编号:

DOI:

基于规则学习的新车型研发阶段测试车辆调度系统研发

(1) 罗方佑¹, (2) 冯建²

1. 东北大学冶金学院 沈阳, 110819

2. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳, 110819

摘要:针对汽车生产样车试验测试调度问题具有建模困难、计算复杂,存在多约束、不确定、非凸性、大规模、多目标、离散和连续变量耦合等难点,现有的研究成果存在譬如调度模型与实际问题差距较大、问题本质特性的研究不够深入、优化算法的研究不够系统等问题,且目前还没有文献针对样车实验阶段测试问题进行建模或优化处理,难以有效服务于生产管理。本项目从生产实际出发,深入调研测试调度问题,建立数学模型,系统探讨其本质特性及优化方法,提出一种新车型研发测试阶段的测试车辆混合智能调度方法,并进行了仿真和工业应用,结果表明该方法可以丰富和深化已有的优化调度理论与方法;并能直接服务于汽车行业,促进其生产管理水平和市场竞争力的提高。

关键词: 车辆测试; 调度方法; 一阶规则学习; 新车型研发

中图分类号: TP18

文献标识码: A



Development of a rule-based learning system for scheduling test vehicles in the development phase of new models

, LUO fang-you¹, FENG Jian²

1. Northeastern University School of Metallurgy, shenyang 110819

2. Northeastern University College of Information Science and Engineering, shenyang 110819

Abstract: The existing research results have problems such as large gap between the scheduling model and the actual problem, insufficient research on the essential characteristics of the problem, and insufficient systematic research on the optimization algorithm, and there is no literature on modeling or optimization for the prototype vehicle testing problem. There is no literature on modeling or optimization of the test problems in the experimental stage, which makes it difficult to effectively serve production management. This project starts from the production reality, investigates the test scheduling problem in depth, establishes mathematical models, systematically discusses its essential characteristics and optimization methods, proposes a hybrid intelligent scheduling method for test vehicles in the development and testing stage of new models, and carries out simulations and industrial applications, the results show that the method can enrich and deepen the existing optimization scheduling theory and methods; and can directly serve the automobile industry and promote its production. The results show that the method can enrich and deepen the existing optimal scheduling theory and method; and can directly serve the automotive industry and promote its production management level and market competitiveness.

Key words: Vehicle testing; scheduling methods; first-order rule learning; new model development

1 引言

在现代社会当中,汽车行业已经发展成为国民经济的支柱产业之一,随着中国经济和社会的不断发展,汽车行业在中国经济发展中的地位越来越重要。因为汽车的产品零部件众多,使用其研发的复杂性非常的高。并且随着汽车行业竞争的不断加深,新车型研发的要求也越来越高。为了解决在新车型研发阶段出现的这些挑战,不断研发出更有竞争力的车型,汽车行业不得不持续改进车型研发测试过程中的管理方式。本项目拟从汽车行业新车型研发阶段的测试实际出发,深入调研新车型在测试期间

的调度问题,建立相应的新车型测试调度数学模型,可望直接服务于汽车行业,促进测试车型研发的测试调度水平,并提高汽车企业的市场竞争力。

Hoogeveen 和 Velde^[1,2]提出了一个调度分支定界方法。Baptiste, Peridy 和 Pinson^[3]求解带有延期工件个数的单机调度问题^[4]。Velde^[5]研究了单机调度和并行机调度问题。Venturaa 和 Kim^[6]研究了带有提前和拖期惩罚的并行机调度的求解算法。施磊等人^[7]提出了一种求解连续时间调度模型的分解算法^[8]。Yuan H W、Jing Y W 采用最短处理时间规则求

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 61673093

作者简介: 罗方佑(2004-),男,辽宁本溪人,东北大学冶金学院本科生,主要研究方向为计算机控制算法、人工势场法为将移动机器人、障碍物及目标点坐标建立虚拟能量场函数研究。

冯建,男,教授,博士生导师,主要研究方向:复杂工业系统优化控制与故障诊断、智能信息处理及智能系统在工业中的应用等。

解无间隔 flow shop 调度问题^[9]。此外, 学习动作模型^[10-12]、学习控制知识^[13,14]、学习启发式函数^[15]、学习动作策略^[16]等方法也有一些学者再进行研究。

但是, 上述研究主要针对测试测试调度进行, 取得了一些成果, 但尚未有文献针对汽车工业样车测试阶段测试调度问题开展研究。综上所述, 近几年来工业调度研究取得了丰硕的研究成果, 但在汽车行业样车实验阶段中的测试调度研究还未发现, 目前尚未出现求解该类问题的相关文献。而车型研发阶段的车辆测试调度需要结合现场实际问题的特性, 上述算法无法直接应用于测试调度测试过程中, 亟需针对车辆测试实际情况展开研究。

2 测试车辆优化调度模型

车型研发测试阶段的测试车辆调度包括是既要保证车辆测试项目的正常运行, 同时车辆测试需求在测试要求测试时不冲突, 在测试要求满足的条件下, 准时进行; 并且要求不能出现测试中断的情况, 进而确定车辆测试需求使用的测试车辆和测试开始时间和结束时间, 从而生成新车型研发测试计划。

测试计划调度以车辆研发测试的需求计划为依据, 选配合适测试需求的测试车辆, 并在此基础上确定测试车辆的生产、测试到场时间和测试作业的开始/测试结束时间, 保证车辆测试需求按新车型研发测试作业计划在规定时间到达指派的地点并准时开始测试。

针对测试车辆调度问题, 使用的所有符号定义如下。

- i : 测试阶段序号;
- j : 车辆测试需求序号;
- N_i : 第 i 个测试阶段的车辆测试需求数;
- L_{ij} : 第 i 个测试阶段的第 j 个车辆测试需求;
- θ : 车辆测试需求 L_{ij} 测试要求总数;
- g : L_{ij} 测试顺序号;
- k_g : 表示测试类型, $g = 1$ 表示必须测试测试类; $g = 2$ 表示优先测试测试类, $g = 3$ 表示本地测试类, $g = 4$ 表示非本地测试, $g = 5$ 表示低优先级类;
- k_g : 表示 g 类测试的第 k_g 个测试序号;

$T(k)$:	测试车辆 k 累积使用时间;
G_{ij} :	0-1 变量, 表示车辆测试需求 L_{ij} 是否适用, 如适用为 1, 否则为 0;
$L_{c_{ij,k}}$:	0-1 变量, 表示车辆测试需求 L_{ij} 是否选择该测试车辆 k , 如选择为 1, 否则为 0;
$L(k)$:	测试车辆 k 的已使用次数;
$ST_{ij\theta}$:	$O_{ij\theta}$ 的测试需求开始时间;
$ET_{ij\theta}$:	$O_{ij\theta}$ 的测试需求完成时间;
$x_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)})$:	车辆测试需求 L_{ij} 从第 θ 个操作到 $\theta+1$ 个操作测试的间隔开始时间;
$y_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)})$:	车辆测试需求 L_{ij} 从第 θ 个操作到 $\theta+1$ 个操作测试的间隔结束时间;
$x_{ij\theta}(k_g)$:	车辆测试需求 L_{ij} 的第 θ 个操作在第 g 类测试的第 k_g 个机器上的测试开始时间;
$y_{ij\theta}(k_g)$:	车辆测试需求 L_{ij} 的第 θ 个操作在第 g 类测试的第 k_g 个机器上的测试结束时间;
L_{min} :	对选配的测试车辆最低使用次数要求;
L_{max} :	对选配测试车辆最高使用次数要求;
Mt_{min} :	对选配测试车辆的最低质量要求;
Mt_{max} :	L_{ij} 选配测试车辆的最高质量要

现代汽车制造企业汽车制造测试过程由多台必须测试, 多数辆/多种类的测试车辆, 多台测试车辆通过多种测试方式组成。在车辆研发阶段的测试过程中包括多个内/外部测试部门参与。在新车型测试阶段, 车型的测试也分多个系统测试阶段, 在此期间, 需要测试的车辆零部件以万为单位, 且整个车型测试过程需要考虑不同气候、不同地点对车辆的影响; 这样导致车型研发测试计划编制非常复杂, 现有测试车辆在功能和时间上无法满足测试需求, 往往需要下单生产新的测试车辆, 导致研发测试计划无法按时实现。这就导致目前该厂的测试车辆计划也是由人工制定, 整体效率比较低。

对选配的测试车辆最低使用次数要求;

对选配测试车辆最高使用次数要求;

对选配测试车辆的最低质量要求;

L_{ij} 选配测试车辆的最高质量要

求;

- D_{O_k} : 对测试车辆 k 的使用次数要求;
- $D_{O_{min}}$: 车辆测试需求 L_{ij} 对选配测试车辆最低使用次数要求;
- $D_{O_{max}}$: 车辆测试需求 L_{ij} 对选配测试车辆最高使用次数要求;
- $U_{P_{min}}$: 对车辆测试需求 L_{ij} 选配的测试车辆的最低里程要求;
- $U_{P_{max}}$: 对车辆测试需求 L_{ij} 选配的测试车辆的最高里程要求;
- t_k : 测试车辆 k 到达测试现场的时间;

优化目标选取

针对车型研发测试阶段测试车辆调度的特点,本文拟使用的测试车辆选配的属性集 A 描述如下。

表 1 测试车辆选配关系数据表

Table 1 Data relationship of ladle matching

	测试车辆	测试车辆	测试车辆	测试车辆
背景知识	使用次数 更高 (1,2)	质量更高 (1,2)	里程更高 (1,2)	...
样例	测试车辆 使用次数 更高 (3,1)	测试车辆 质量更高 (1,3)	测试车辆 里程更高 (3,1)	...

	更好 (1,3)	更好 (1,4)	更好 (1,5)	...
	¬更好 (3,1)	¬更好 (4,1)	¬更好 (5,1)	...

本文采用 FOIL 提取车型研发测试阶段测试车的测性能指标, 设测试车辆优化选配最初的空规则为

$$\text{更好}(X, Y) \leftarrow . \quad (1)$$

使用下式提取:

$$F_Gain = \hat{m}_+ \times \left(\log_2 \frac{\hat{m}_+}{\hat{m}_+ + \hat{m}_-} - \log_2 \frac{m_+}{m_+ + m_-} \right) \quad (2)$$

提取的测试车辆选配测性能指标如下:

在新车型测试阶段, 由于在研发阶段使用的测

试车辆的生产成本很高, 所以期望每一辆测试车辆的总使用时间最高, 即

$$\max T(k) \quad (3)$$

其中, $T(k)$ 表示所有测试车辆 k 累积使用时间;

同样, 期望车型研发测试阶段的每一辆测试车辆总使用次数最高, 即

$$\max \sum L(k) \quad (4)$$

其中, $L(k)$ 表示研发阶段测试车辆 k 的使用总次数;

约束方程

本节针对某大型汽车制造厂实际测试情况, 在充分调研和与测试车辆调度专家共同商讨的基础上, 从人工选配测试车辆的经验中提取了测试车辆选配的约束条件。

在新车型研发的测试过程中, 测试车辆匹配是按照车辆测试需求 L_{ij} 使用测试车辆的时间先后进行排序。设在车型研发测试阶段的测试车辆调度过程中, 需要按照车辆测试需求 L_{ij} 使用测试车辆的时间先后顺序进行排序, 得到的满足测试需求的车辆集合为 $\Phi = \{L_1, L_2, \dots, L_N\}$ 。所有测试车辆匹配在按必须测试完成时间排序后的集合 Φ 中, 那么首先选配最先使用的车辆测试需求 L_1 , 然后按依次对车辆测试需求 L_2, L_3, \dots, L_N 匹配测试车辆。

$$\begin{aligned} y_{L_1, 1}(k_1) &\leq y_{L_2, 1}(k_1) \\ y_{L_2, 1}(k_1) &\leq y_{L_3, 1}(k_1) \\ &\vdots \\ y_{L_{N-1}, 1}(k_1) &\leq y_{L_N, 1}(k_1) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $y_{L_1, 1}(k_1), y_{L_2, 1}(k_1), \dots, y_{L_N, 1}(k_1)$ 为车辆测试需求 L_1, L_2, \dots, L_N 的必须测试的测试结束时间。

在新车型测试阶段, 测试车辆如果被使用就不能选配给其他车辆测试需求, 只有被释放后才能被选配。在新车型测试阶段, 定义测试车辆可用时间 t_k 为: 测试车辆最近可用时间。所以要求被选择到的测试车辆 k 的可用时间 t_k 要早于车辆测试需求必须测试测试结束时间 $y_{L, 1}(k_1)$, 即

$$t_k < y_{L, 1}(k_1) \quad (6)$$

其中, $y_{L, 1}(k_1)$ 是在新车型测试阶段的车辆测试需求必须满足测试的测试结束时间, t_k 是测试车辆 k 的可用时间。

决策变量

在新车型研发的测试过程中, 不同测试规则的测试测试要求流程是不一样的, 要使用专用的测试车辆将含有测试要求的车辆匹配需求 L_{ij} 。所以, 在新车型测试阶段, 每个车辆测试需求 L_{ij} 根据是否满足测试要求来判断是否需要选择该测试车。在新车

型测试阶段,对于每个有测试要求的车辆测试需求都要选择一个测试车 k ,即

$$IF \ Gp_{ij} = 1 \ THEN \ \sum Lc_{ij,k} = 1 \quad (7)$$

在新车型测试阶段,针对测试调度计划中每个车辆测试需求 L_{ij} 对测试车辆的要求不同,需要为每一个车辆测试需求 L_{ij} 决策出适合车辆测试需求 L_{ij} 的测试车辆 k 。在新车型测试阶段,如果车辆测试需求 L_{ij} 含测试要求,还要决策相应的测试车辆 k ,为对应的 $Lc_{ij,k}$ 赋值。在新车型测试阶段,如果车辆测试需求 L_{ij} 选配测试车辆 k 则取值为1,否则为0。

3 调度算法

3.1 测试车辆路径编制对测试效率影响程度分析

在新车型测试阶段,测试车辆调度对车辆测试需求计划的执行起到直接作用,其对车辆测试需求测试的主要影响包括如下两部分:

(1) 在新车型测试阶段,在同一台测试车辆上相邻车辆测试需求测试间隔时间尽可能小

第一种情况:在新车型测试阶段,车辆测试需求 L_{ij} 在测试车辆上未开始测试($\beta_{1,j,g_1}=0$)。

在新车型测试阶段,同一测试车辆上相邻两个车辆测试需求间的测试中断由车辆测试需求 L_{ij} 的测试开始时间 $x_{1,j,g_1}^5(1)$ 、测试需求时间 $y_{1,j,g_1}^5(1)$ 和第 $L_{1,j+1}$ 需求的测试开始时间 $x_{1,j+1,g_1}^5(1)$ 来表示

$$\Delta t_{j,j+1}(1) = \frac{(2-\beta_{1,j,g_1})(1-\beta_{1,j,g_1})}{2} \left(x_{1,j+1,g_1}^5(1) - x_{1,j,g_1}^5(1) - y_{1,j,g_1}^5(1) \right).$$

第二种情况:在新车型测试阶段,车辆测试需求 L_{ij} 在测试车辆上正在测试($\beta_{1,j,g_1}=1$)。

在新车型测试阶段,车辆测试需求 L_{ij} 的测试开始时间为 $ST_{1,j,g_1}^5(1)$ (已知常数)。在新车型测试阶段,测试中断时间表示为

$$\Delta t_{j,j+1}(1) = (2-\beta_{1,j,g_1})\beta_{1,j,g_1} \left(x_{1,j+1,g_1}^5(1) - ST_{1,j,g_1}^5(1) - y_{1,j,g_1}^5(1) \right).$$

在新车型测试阶段,将上述两种形式合并表示为

$$\begin{aligned} \Delta t_{j,j+1}(1) &= \frac{(2-\beta_{1,j,g_1})(1-\beta_{1,j,g_1})}{2} \left(x_{1,j+1,g_1}^5(1) - x_{1,j,g_1}^5(1) - y_{1,j,g_1}^5(1) \right) \\ &\quad + (2-\beta_{1,j,g_1})\beta_{1,j,g_1} \left(x_{1,j+1,g_1}^5(1) - ST_{1,j,g_1}^5(1) - y_{1,j,g_1}^5(1) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

(2) 在新车型测试阶段,车辆测试需求整体过

程的冗余时间总和最小

在新车型测试阶段,根据车辆测试需求 L_{ij} 在研发阶段测试上的测试状态 $\beta_{1,j,g}$ 包括三种情况:

第一种情况:在新车型测试阶段,,车辆测试需求 L_{ij} 在第 g_1 类测试的第 k_{g_1} 测试车上(第 θ 个操作)未开始测试($\beta_{1,j,\theta}=0$)。

在新车型测试阶段,车辆测试需求 L_{ij} 在不同测试之间的空闲时间,可以由在研发测试的第 θ 个操作在测试车 k_{g_1} 上的测试开始时间 $x_{1,j,\theta}^{g_1}(k_{g_1})$ 和测试时间 $T_{1,j}(k_{g_1})$ 。在新车型测试阶段,第 $\theta+1$ 个操作在测试车 k_{g_2} 上的测试开始时间 $x_{1,j,\theta+1}^{g_2}(k_{g_2})$ 和两测试间的间隔时间 $T_{g_1,g_2}(k_{g_1}, k_{g_2})$ 来表示

$$\frac{5}{(5-\mathbf{V}^{r_{11}})(1-\mathbf{V}^{r_{11}})} \left(x_{g_2}^{r_{11}+1}(\mathbf{V}^{g_2}) - x_{g_1}^{r_{11}}(\mathbf{V}^{g_1}) - \mathbf{L}^{r_{11}}(\mathbf{V}^{g_1}) - \mathbf{L}^{g_1+g_2}(\mathbf{V}^{g_1}, \mathbf{V}^{g_2}) \right).$$

第二种情况:在新车型测试阶段,车辆测试需求 L_{ij} 在测试车 k_{g_1} 正在测试($\beta_{1,j,\theta}=1$)。

在新车型测试阶段,车辆测试需求 L_{ij} 在第 g_1 类测试的第 k_{g_1} 测试车上的测试开始时间为 $ST_{1,j,\theta}^{g_1}(k_{g_1})$,空闲时间为

$$(2-\beta_{1,j,\theta})\beta_{1,j,\theta} \left(x_{1,j,\theta+1}^{g_2}(k_{g_2}) - ST_{1,j,\theta}^{g_1}(k_{g_1}) - T_{1,j}(k_{g_1}) - T_{g_1,g_2}(k_{g_1}, k_{g_2}) \right)$$

第三种情况:在新车型测试阶段,车辆测试需求 L_{ij} 在测试车 k_{g_1} 上测试结束($\beta_{1,j,\theta}=2$)。并且在新车型测试阶段,车辆测试需求 L_{ij} 在 g_2 类测试的第 k_{g_2} 测试车上(第 $\theta+1$ 个操作)未开始测试($\beta_{1,j,\theta+1}=0$)。

在新车型测试阶段,车辆测试需求 L_{ij} 在第 g_1 类测试的第 k_{g_1} 测试车上的测试结束时间为

$$ET_{1,j,\theta}^{g_1}(k_{g_1}), \text{ 空闲时间为}$$

$$\frac{(\beta_{1,j,\theta}-1)\beta_{1,j,\theta}}{2} \frac{(2-\beta_{1,j,\theta+1})(1-\beta_{1,j,\theta+1})}{2} \left(x_{1,j,\theta+1}^{g_2}(k_{g_2}) - ET_{1,j,\theta}^{g_1}(k_{g_1}) - T_{g_1,g_2}(k_{g_1}, k_{g_2}) \right) \quad (9)$$

综上所述,可以合并为

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(2-\beta_{i,j,\theta})(1-\beta_{i,j,\theta})}{2}(x_{i,j,\theta+1}^{s_2}(k_{s_2}) - x_{i,j,\theta}^{s_1}(k_{s_1}) - T_{ij}(k_{s_1}) - T_{s_1,s_2}(k_{s_1}, k_{s_2})) \\ + (2-\beta_{i,j,\theta})\beta_{i,j,\theta}(x_{i,j,\theta+1}^{s_2}(k_{s_2}) - ST_{i,j,\theta}^{s_1}(k_{s_1}) - T_{ij}(k_{s_1}) - T_{s_1,s_2}(k_{s_1}, k_{s_2})) \\ + \frac{(\beta_{i,j,\theta}-1)\beta_{i,j,\theta}}{2}\frac{(2-\beta_{i,j,\theta+1})(1-\beta_{i,j,\theta+1})}{2}(x_{i,j,\theta+1}^{s_2}(k_{s_2}) - ET_{i,j,\theta}^{s_1}(k_{s_1}) - T_{s_1,s_2}(k_{s_1}, k_{s_2})) \end{array} \right\} \quad (10)$$

所以, 在新车型测试阶段, 车辆测试需求 L_{ij} 在不同测试需求之间的空闲时间总计:

$$d_j(1) = \sum_{\theta=1}^{\beta_{i,j}-1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{(2-\beta_{i,j,\theta})(1-\beta_{i,j,\theta})}{2}(x_{i,j,\theta+1}^{s_2}(k_{s_2}) - x_{i,j,\theta}^{s_1}(k_{s_1}) - T_{ij}(k_{s_1}) - T_{s_1,s_2}(k_{s_1}, k_{s_2})) \\ + (2-\beta_{i,j,\theta})\beta_{i,j,\theta}(x_{i,j,\theta+1}^{s_2}(k_{s_2}) - ST_{i,j,\theta}^{s_1}(k_{s_1}) - T_{ij}(k_{s_1}) - T_{s_1,s_2}(k_{s_1}, k_{s_2})) \\ + \frac{(\beta_{i,j,\theta}-1)\beta_{i,j,\theta}}{2}\frac{(2-\beta_{i,j,\theta+1})(1-\beta_{i,j,\theta+1})}{2}(x_{i,j,\theta+1}^{s_2}(k_{s_2}) - ET_{i,j,\theta}^{s_1}(k_{s_1}) - T_{s_1,s_2}(k_{s_1}, k_{s_2})) \end{array} \right\} \quad (11)$$

3.2 调度算法

综上所述, 在新车型测试阶段, 为了减少车辆测试需求的空闲时间, 保证车辆测试需求计划的正常执行。建立调度优先级描述如下:

优先级 1: 在新车型测试阶段, 运行里程最高规则

在新车型测试阶段, 由于车辆测试需求对测试车辆运行里程的要求较高, 如果在新车型测试阶段中的运行里程未达标, 就要增加测试里程, 或对测试车辆进行替换。这样不但降低了在新车型测试阶段中的测试效率, 而且也会影响测试质量。当存在多个可用测试车的时候, 在新车型测试阶段, 优先选配运行里程高的测试车辆, 否则将其匹配给车辆测试需求 L_{ij} 。

$$\begin{aligned} IF \quad k^\# &= \operatorname{argmax} T(k_i) \\ THEN \quad k &= k^\# \quad for \quad L_{ij} \end{aligned} \quad (12)$$

优先级 2: 在新车型测试阶段, 使用次数最高规则

在新车型测试阶段, 由于测试车辆维护周期比较长。如果在新车型测试阶段的平均使用测试车辆会导致同一时间相似测试车辆堆积, 需要尽量让使用次数较多的测试车尽快退出。所以在新车型测试阶段要优先选配使用次数高的测试车辆。在新车型测试阶段, 当存在多个测试车辆运行里程相同时, 先选配使用次数高的测试车辆匹配给车辆测试需求 L_{ij} , 保证在新车型测试阶段有足够的测试车辆可用。

$$\begin{aligned} IF \quad k^\# &= \operatorname{argmax} L(k_i) \\ THEN \quad k &= k^\# \quad for \quad L_{ij} \end{aligned} \quad (13)$$

优先级 3: 在新车型测试阶段, 序号最低规则

在新车型测试阶段, 当存在多个测试车辆运行里程、寿命相同时, 默认优先选配测试车辆序号低的测试车辆。在新车型测试阶段, 将其匹配给车辆测试需求 L_{ij} 。

$$IF \quad k^\# = \operatorname{argmin} k_i \quad THEN \quad k = k^\# \quad for \quad L_{ij} \quad (14)$$

在新车型测试阶段, 车辆测试需求选配测试车辆方法如 Algorithm 1 所示:

Step1: 在新车型测试阶段, 通过车辆测试需求调度计划获取所有需要选配测试车的测试需求按照必须测试完工时间 $y_{ij1}(k_1)$ 从小到大排序, 得次集合 $\Phi = \{L_1, L_2, \dots, L_N\}$ (N 为需要匹配测试车辆的车辆测试需求总数);

Step2: 在新车型测试阶段, 初始化所有状态(测试车辆运行里程 $T(k)$, 测试车辆使用次数 $L(k)$ 和测试车辆可用时间 t_k), 初始 $n = 1$;

Step3: 确定当前选配工况, 在新车型测试阶段, 根据对应的规则为车辆测试需求 L_i 选配测试车;

(a) 在新车型测试阶段, 按照工况 R1 选配测试车;

(b) 无可用测试车, 按照工况 R2 选配测试车;

(c) 如无可用测试车,, 按照工况 R3 选配测试车;

(d) 如果存在多个可用测试车辆, 按照计算的权系数选配测试车辆;

Step4: 在新车型测试阶段, 根据车辆测试需求 L_i 选配测试车辆, 同时需要更新测试车辆使用次数 $L(k)$ 和测试车辆可用时间 t_k (测试车辆使用次数 $L(k)$ 加 1, 测试车辆可用时间 t_k 更新为车辆测试需求 L_i 的必须测试开始时间); 如果 $n = N$ 转 Step5, 否则, $n = n + 1$, 转 Step3;

Step5: 测试结束。

Algorithm 1

for $\Phi = \{L_1, L_2, \dots, L_N\}$ do

```

initialize  $T(k)$ ,  $L(k)$  and  $t_k$ 
if condition  $L_i \in R1$  then choose R1
else if condition  $L_i \in R2$  then choose R2
else if condition  $L_i \in R3$  then choose R3
else if  $N_z > 1$  or  $N_f > 1$  then choose R4
end if
 $L(k) = L(k) + 1$ 
 $t_k = x_{L1}(k_1)$ 
end for

```

4 仿真测试和工业应用

本项目具有汽车制造行业的工程应用背景和现场实际需要。对新车型研发阶段的测试调度问题已进行了深入调研和前期研究，针对新车型研发阶段车辆测试调度问题，基于现场规则开发了“某车企新车性能测试可配置任务管理与测试任务优化调度系统一期/二期”并投入使用，系统界面如图1所示，现场应用如图2所示。在新车型测试阶段，该项目负责对样车实验阶段测试任务进行调度。经过一段时间使用后，在新车型测试阶段，任务准时完成率由65%提升到83%，平均测试车数量由121辆下降到98辆，测试车平均使用次数由378次上升到573次，如图3所示；可以看出，在新车型测试阶段，跟之前人工调度相比测试效率得到了较大提升。



图1 系统界面

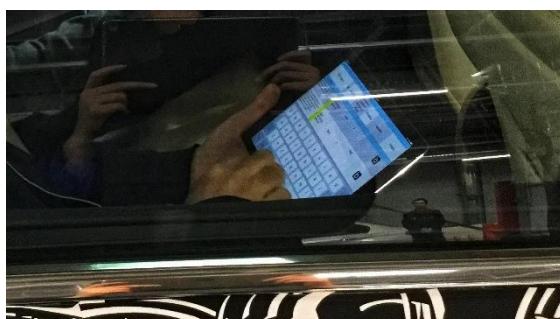


图2 系统应用

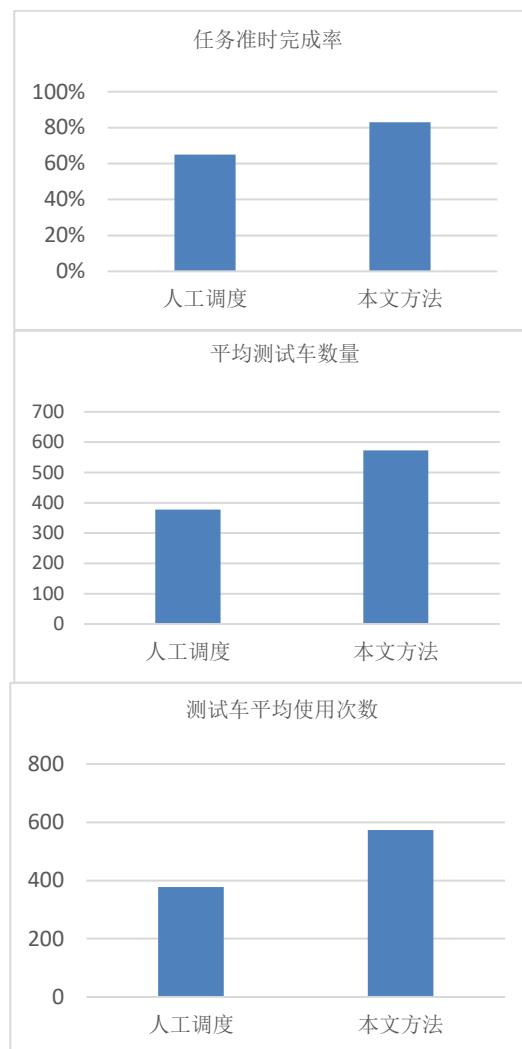


图3 性能指标对比

6 结论

通过分析现有的关于的调度文献，目前还没有关于汽车制造企业车型研发期间测试车辆优化调度问题研究的相关文献。因此，从在新车型测试阶段测试调度的实际生产过程出发，更需要研究测试车辆优化调度问题和调度算法。但目前尚未有文献针对汽车制造企业车型研发期间测试车辆优化调度问题开展研究。针对在新车型测试阶段的调度问题，研究针对在新车型测试阶段调度问题特征，并在此基础上建立对应的在测试车辆调度模型，研究在新车型测试调度问题的复杂性等。目前，这方面的研究在汽车新车型研发阶段取得的成果还比较少。因此，为了优化在新车型测试阶段调度效率，有必要对在新车型测试阶段的测试车辆调度问题及早深入地研究。

鉴于此，本项目针对在新车型测试阶段的测试车辆优化调度问题，结合多目标、多约束的生产实际，建立在新车型测试阶段的测试车调度问题数学模型，系统研究其本质特性和优化方法，设计并开

发可用于在新车型测试阶段的调度生产实际的系统平台，并应用在在新车型测试阶段调度实际现场。应用结果表明能够有效提升在新车型测试阶段的调度测试效率。

参考文献(References)

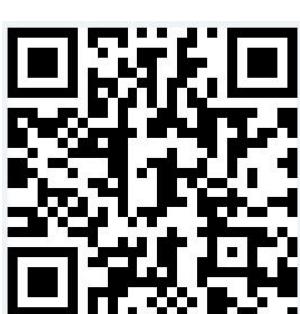
- [1] Hoogeveen J. A., van de Velde S. L. A branch-and-bound algorithm for single-machine earliness-tardiness scheduling with idle time [J]. INFORMS J. on Computing, 2016, 8(4): 402-412.
- [2] van den Akker M. J., Hoogeveen J.A., van de Velde S. L.. Combining column generation and Lagrangian relaxation to solve a single-machine common due date problem [J]. INFORMS Journal on Computing, 2022, 14: 37-51.
- [3] Baptiste P., Peridy L., Pinson E.. A branch and bound to minimize the number of late jobs on a single machine with release time constraints [J]. European Journal of Operational Research, 2021, 144: 1–11.
- [4] Ben-Yehoshua Y, Mosheiov G. A single machine scheduling problem to minimize total early work[J]. Computers & Operations Research, 2016, 73: 115-118.
- [5] Van de Velde S. L.. Machine scheduling and Lagrangian relaxation [D]. Doctoral Thesis, CWI, Amsterdam, 2016.
- [6] Ventura J. A., Kim D.. Parallel machine scheduling with earliness-tardiness penalties and additional resource constraints [J]. Computers & Operations Research, 2020, 30: 1945–1958.
- [7] 施磊, 江永亨, 王凌, 等. 一种求解炼油厂连续时间调度模型的 Lagrange 分解算法[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2016, 56(4): 437-447.
- [8] Esmaeilbeigi R, Charkgard P, Charkgard H. Order acceptance and scheduling problems in two-machine flow shops: New mixed integer programming formulations[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 251(2): 419-431.
- [9] Yuan H W, Jing Y W, Huang J P, et al. Optimal research and numerical simulation for scheduling no-wait flow shop in steel production[J]. Journal of Applied Mathematics, 2021, 2 (4): 1-5.
- [10] Yang Qing, Wu Kang-Hen, Jiang Yun-Fei. Learning action models from plan examples using weighted MAX-SAT. Artificial Intelligence, 2017, 171(2-3): 107-143
- [11] Amir E. Learning partially observable deterministic action models// Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2015). Edinburgh, Scotland, UK, 2015: 1433-1439
- [12] Ilghami O, Munoz-Avila H , Nau D S, Aha D W. Learning preconditions for planning from plan traces and HTN structure. Journal of Artificial Intelligence Research, 2005, 21(4):388-413
- [13] Aler R, Borrajo D, Isasi P. Using genetic programming to learn and improve control knowledge. Artificial Intelligence, 2022, 141(1/2):29-56
- [14] Huang Y C, Selman B, Kautz H A. Learning declarative control rules for constraint-based planning// Proceedings of International Conference on Machine Learning. Stanford, CA, USA, M organ Kaufmann, 2020:415-422
- [15] Bianchi R A C, Ribeiro C H C, Costa A H R. Heuristic selection of actions in multiagent reinforcement learning// Proceedings of the IJCAI 2007.Hyderabad, 2007: 690-695
- [16] Khardon R. Learning action strategies for planning domains. Artificial Intelligence, 2020, (113): 125-148

《控制工程》期刊录用通知

尊敬的 **罗方佑** 同志：您好！

您撰写的论文《**一种基于人工势场-蚁群算法的车间移动机器人路径规划方法研究**》，稿号为：**20220893**，经专家评审和编委会审核，决定作为论文被我刊录用。现将有关事宜通知如下：

- 1) 您的论文版面费为: **3000.0** 元。
- 2) 汇款时，请务必添加“附言”：稿件号+控制工程。（如果忘记添加附言，请务必拨打电话或者发邮件告知，以免影响稿件处理进程）。
- 3) 请您将缴费凭证发送至编辑部邮箱，在邮件标题注明“**稿号+版面费凭证**”，如果没有凭证，将无法从大批校外进款中找到您的进款，**无法入账等于未完成缴费**，请重视。
- 4) 如需发票，请在审稿系统中添加**发票信息**（必填：发票抬头，纳税人识别码），我们将在两周之内为您开具电子发票，请及时查收。如有问题请拨打电话 024-83688973，分机号 18。
- 3) 缴费方式有两种：
 - (1) 通过扫描二维码缴费（推荐使用）



注：东北大学校内作者，请采用内部转账的方式进行缴费，账号为：04010047107001

(2) 通过银行汇款或对公转账，银行汇款账号如下：

开户行：中国银行沈阳东北大学支行（行号 104221016023）

开户名：东北大学

账号：318146100001

说明：

1. 银行汇款并非实时到账，若汇出 10 个工作日后，稿件状态仍为“待交版面费”，可来电查询。
2. 如果您同时还收到缴纳审稿费邮件，请将版面费和稿件处理费分开缴纳。
3. 未填写发票信息的，将默认为您开具个人发票。
4. 编辑部收到版面费后，会及时进行处理，届时稿件状态将变为“组版”，请自行登录系统查询确认。
5. 见刊时间依照到款的顺序及我刊组版计划拟定。

感谢您对我刊的一贯支持与信任，如有特殊情况请及时向编辑部说明，谢谢！

此致

敬礼

稿件查询网址：www.kzgc.com

E-mail：kzgcbjb@mail.neu.edu.cn

电话：024-83688973

《控制工程》编辑部

编辑部

2023-05-05

文章编号:

DOI:

一种基于人工势场-蚁群算法的车间移动机器人路径规划方法研究

(1) 罗方佑¹, (2) 冯建²

1. 东北大学冶金学院 沈阳, 110819

2. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳, 110819

摘要: 移动机器人根据任务要求, 需要根据机器人的能力和任务采用不同的方式和手段进行路径规划。人工势场法为将移动机器人、障碍物及目标点坐标建立虚拟能量场函数, 其将机器人视为质点, 其运动环境视为虚拟的势能场, 以此机制决定机器人的动作路径与速度, 以达到避开障碍物并抵达目标点。并加入了移动障碍物的判断, 规划质点从高势能处向最低势能处移动的路径, 进行机器人移动速度与方向的控制, 使机器人能远离障碍物向目标点前进。本文将人工势场法和蚁群算法进行结合, 将其应用到某类移动机器人路径规划当中。本文结合多智能体的路径规划技术、人工势场法、蚁群算法、移动机器人路径规划的国内外研究情况结果。根据蚁群算法的特点, 构造了一种基于人工势场-蚁群多智能体的机器人路径规划方法。最后基于本文方法进行了仿真实验。并对实验结果进行了分析, 验证了该方法的有效性。

关键词: 蚁群算法; 人工势场; 人工势场; 路径规划

中图分类号: TP18

文献标识码: A

Research on path planning method of workshop mobile robot based on artificial potential field-ant colony algorithm

罗方佑¹, 冯建²

1. Northeastern University School of Metallurgy, shenyang 110819

2. Northeastern University College of Information Science and Engineering, shenyang 110819

Abstract: According to the task requirements, mobile robots need to use different ways and means to plan paths according to the robot's capabilities and tasks. The artificial potential field method establishes a virtual energy field function for the coordinates of the mobile robot, obstacles and target points. It regards the robot as a particle and its motion environment as a virtual potential energy field. The method uses this mechanism to determine the motion path and speed of the robot; in order to avoid obstacles and reach the target point. It adds the judgment of moving obstacles, and plans the path of the particle moving from the high potential energy to the lowest potential energy. It can control the movement speed and direction of the robot. It enables the robot to move away from obstacles and move towards the target point. In this paper, the artificial potential field method and the ant colony algorithm are combined and applied to the path planning of a certain type of mobile robot. This paper combines the domestic and foreign research results of multi-agent path planning technology, artificial potential field method, ant colony algorithm, and mobile robot path planning. According to the characteristics of ant colony algorithm, a robot path planning method based on artificial potential field-ant colony multi-agent is constructed. Finally, a simulation experiment is carried out based on the method in this paper. And the experimental results are analyzed to verify the effectiveness of the method.

Key words: Ant colony algorithm; artificial potential field; artificial potential field; path planning

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 61673093

作者简介: 罗方佑(2004-), 男, 辽宁本溪人, 东北大学冶金学院本科生, 主要研究方向为计算机控制算法、人工势场法为将移动机器人、障碍物及目标点坐标建立虚拟能量场函数研究。

冯建, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 复杂工业系统优化控制与故障诊断、智能信息处理及智能系统在工业中的应用等。

1 引言

随着科技的发展与成熟，机器人产业已经是现在科技主要发展的项目之一^[1]。为了降低人力成本在工业上已经有许多任务开始走向自动化，其中工厂或大型的生产在线所使用的机器人例如生产在线所使用的机器手臂，藉此取代传统的汽车组装等人力成本，由于其所使用的机器人都是以固定的移动轨迹来进行运作的^[2]；而车间内移动机器人其所处的环境就较为复杂，运作在未知的环境中需藉由各种型的感测装置来获取周遭环境的信息，因此机器人没有固定的移动轨迹且移动的过程中还需考虑如何避开障碍物来达成所赋予的任务，而车间移动机器人正是最典型的例子，因此在车间内的机器人以室内环境为基础的移动问题也衍生出许多的学术研究主题，其中智能机器人的自主性路径规划、自动避开障碍物正是热门的研究主题之一^[3-5]。

从20世纪70、80年代起，国内外众多的科学家和专家对运动智能体的路径规划技术进行了大量的探索^[6-9]，其中不乏新的计算方法。随着计算机、传感器、电子信息等科技的不断发展，机器人路径规划的功能日益完善^[10-12]。

移动机器人路径规划的另一个重要内容是物理上的运用，其原理与实际操作有很大的差异，受到运动速度、负载状况、实际路径状况等因素的制约，使得算法模拟的结果与智能体运动有较大的差异^[13-15]；因此，本文主要讨论了如何调整和排除这些误差，确保实际的效果。本文研究了一种基于信息素的模拟蚁群智能体环境探测的新方法，实现了后者传感器模拟蚁群智能体能够根据前者模拟蚁群智能体留下的信息素自行控制行走，从而达到环境探测和寻找到“食物”的最终目的效果。

2 蚁群算法的多智能体路径规划

2.1 蚁群算法基本原理

蚁群优化是一种以蚁群搜索行为为基础的群组优化方法，在搜索过程中，蚁群搜索路线选择是以最小路线进行的。蚁群利用信息流作为媒介，建立起一种能够传输最少的信息交流的内在机制。本文在此基础上，对常规蚁群优化方法进行了优化，达到了预期的运动轨迹优化结果。蚁群系统的搜寻与路径选取原则如图1所示。

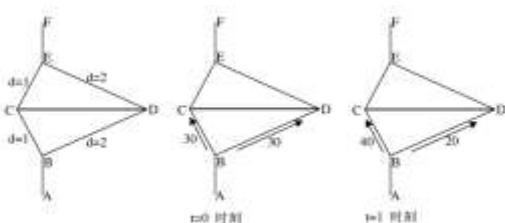


图1 蚁群搜索示意图

Fig.1 Ant colony search diagram

如图所示，设CD为障碍，EF为靶点，蚁群从AB方向开始，有两条可能的路线，即ABCEF和ABDEF，假定路线ABDEF的长度是ABCEF的两个倍数，在起始点，有60个蚁群从AB方向去EF，因为每个路线上的信息素含量都是0，所以蚁会随机选取可能的路线。一段时期后，最佳的BCE通路上的信息素将会增加一倍，届时会有20个蚁群会选择BDE路线，40个会选择BCE。在BCE的路线上，当信息素的含量增加后，后续会有更多的蚁群会在这条路线上寻找更好的路线。

2.2 蚁群算法

假定蚁群数目为m，则在t=0时间内各个通路内的信息素含量均为相同，且 $\tau_{uv}(0)=C$ (C为常数)，以m个蚁群为起点，蚁群k($k=1,2,3,\dots,m$)由蚁群依据不同的讯素密度及讯息的影响，选取合适的移动方向，并依据特定的状态转换概率来决定下一阶段所要抵达的地点。从第t步骤位置 $P_t(x,y)=u$ 向下一个步骤 $P_{t+1}(x,y)=v$ 的转换的可能性的计算方式如下：

$$P_{uv}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{uv}^\alpha(t)\eta_{uv}^\beta(t)}{\sum_{j=\text{allowed } k(t)} \tau_{uj}^\alpha(t)\eta_{uj}^\beta(t)} & v \in \text{allowed } k(t) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中，

$$\text{allowed } k(t) = \{1,2,\dots,n\} - \text{tab } u(k) \quad (2)$$

在式(2)中， $\tau_{uv}(t)$ 为时间t处的通路， (u,v) 为信息素的量值， $\eta_{uv}(t)$ 为结点u至结点v的距离启发通信函数，反应出结点 $P_t(x,y)=u$ 至下一个结点 $P_{t+1}(x,y)=v$ 的启发性：

$$\eta_{uv}(t) = 1/d_{uv} \quad (3)$$

在(3)式子中， d_{uv} 是指结点u至结点v之间的间距。很明显， d_{uv} 和 $\eta_{uv}(t)$ 是相反的， $P_{uv}^k(t)$ 和 d_{uv} 是相反的。 α 为算法中信息素浓度系数， β 为蚁群算法通路的启发信息系数。 $\text{alloweck}(t)$ 表示在移除了已经存取的一个节点之后，可以进行下一个步骤的选取。 $\text{tabu}(t)$ 为每个蚁群的禁止表，记录目前已经通过的全部路线。

在完成一次搜寻后，在进行下一轮周期前，按下式对每条路线的信息素密度进行修正：

$$\tau_{uv}(t+\varsigma) = (1-\rho)\tau_{uv}(t) + \Delta\tau_{uv}(t) \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{uv}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{uv}^k(t) \quad (5)$$

其中， $\rho(0 < \rho < 1)$ 为信息素的挥发性因子，

$\Delta\tau_{uv}(t)$ 为这一搜寻过程中通路 (u, v) 上信息素的密度递增, 开始 $\Delta\tau_{uv}(0) = 0$, $\Delta\tau_{uv}^k(t)$ 是这一次搜寻过程中, 蚁群 k 在该路线 (u, v) 上所释放出的信息素的密度。

$$\Delta\tau_{uv}^k(t, t + \varsigma) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁经过 } (u, v) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

其中, Q 为信息素的强弱系数, L_k 为该搜寻过程中的蚁群 k 路线长。

2.3 算法参数的选择

在蚁群算法中, 蚁群数量 m 、信息素浓度因子 α 、路径启发信息因子 β 、信息素的浓度挥发系数 ρ 、信息素强度因子 Q 等因素都与蚁群算法的运算效率有很大的影响。下面将逐个地论述所选择的参数。

信息素的浓度挥发性系数 ρ 可以有效地减少在较小的搜索路径上的信息素的含量, 这与该方法的整体性能有很大的相关性。由于信息素的挥发性, 使得在较少的搜索路线上, 信息素的浓度会减少, 从而导致整个算法的整体搜索能力, 如果 ρ 值太高, 则会导致信息素的大量挥发性, 在某些路线中, 信息素的含量接近为 0, 蚁群的搜寻距离减小, 导致算法的随机性下降; ρ 太少则会留下大量的信息素, 从而影响搜索的速度。

信息素浓度因子 α 增加, 蚁群对已经经过的路线进行了更多的选择, 使得搜寻的随机度下降; α 变小的时候, 其进入最优化的区域。而路径启发的资讯因子 β 是对距离资讯的感知性, β 愈大, 蚁群愈易选取最短的路线, 而陷入最小, 因而会减少整体的最佳搜寻。相反, 如果 β 太少, 搜索的区域就会增大, 因此, 搜索的收敛也会降低。

以信息素的强弱系数 Q 来描述搜寻的正面回馈效应。增加 Q 可以加速收敛, 但是 Q 太多容易使其在全局最优化中处于最优化状态。

从上述结果可以发现, 蚁群的数目 m 、信息素浓度 ρ 、信息素浓度因子 α 、路径启发信息因子 β 、信息素因子 Q 等并非相互独立的, 而是相互关联、相互制约的。通过试验和试验, 得出上述两种方法的优化区间为: $m = 20$, $0.10 \leq \rho \leq 0.99$, $0 \leq \alpha \leq 5$, $0 \leq \beta \leq 8$, $Q = 100$ 。本文定义以下取值 $\alpha = 1$, $\beta = 7$, $\rho = 0.3$ 。

2.4 蚁群算法的实现步骤

在此基础上, 采用如下的蚁群算法路径优化方法。

Step1: 对相关参数进行初始化;

Step2: 在开始网格中放置 m 个蚁群;

Step3: 蚂蚁 k 依据目前的网络连接情况, 通过式(2)来确定传输的可能性, 然后利用轮盘赌博算法来确定下一个网格, 并对禁忌表格中的数据进行修正;

Step4: 判定当前的蚁群都移动到了目标网格上, 如果, 继续进行下一个步骤, 或者进入 Step3;

Step5: 根据(4), 求出这一周期的最佳路线;

Step6: 判定是否达到了最大的运算周期, 如果, 继续进行下一步骤, 或者进入 Step3;

Step7: 输出优化的路线。

3 人工势场法

3.1 经典人工势场法

人工势场法利用运动主体工作的周围的空间作为位场, 采集信息。在作业范围内, 移动物体会受到目标物体的重力和物体的排斥, 由位势共同控制物体的运动。如图 2 所示:

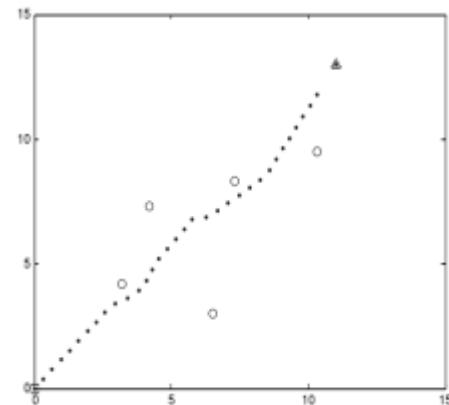


图 2 基于人工势场法的路径规划

Fig.2 Path Planning Based on Artificial Potential Field Method

人工势场方法利用了物理场论中的电磁场理论, 将车间内移动机械人工作的工作区作为位场, 其场源系为工作区内目标所形成的重力场和由单个障碍所形成的排斥场。以下是:

$$U = U_{att} + U_{rep} \quad (7)$$

在方程式中, U_{att} 是由目标所引起的重力, U_{rep} 是由阻碍所造成的排斥。

基于人工势场方法的原理, 即: 在工作范围内, 移动机器人会受到目标物体的重力和物体的排斥力, 由位场的力量共同控制。如图 3 所示:

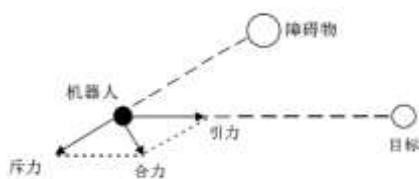


图3 人工势场法原理图

Fig.3 Schematic diagram of artificial potential field method

在此基础上，将工作区分为一个平面，并将其分解为一个粒子，并设该粒子在工作区中的坐标为 $X = (x, y)$

在运动智能体工作范围内，由目标所构成的重力场函数 $U_{att}(X)$ 是一种二次抛物线形式，其表达式如下：

$$U_{att}(X) = \frac{1}{2} K_{att} (X - X_g)^2 \quad (8)$$

其中， K_{att} 表示重力势因子， X 、 X_g 表示智能体目前的位置及运动智能体的靶点： $X = (x, y)$ ， $X_g = (x_g, y_g)$ 。

利用重力场反差的方法，可以得到运动机器人所受目标的力 \vec{F}_{att} ：

$$\vec{F}_{att} = -\text{grad}[U_{att}(X)] = K_{att} \ell(X, X_g) \vec{n}_g \quad (9)$$

在式(9)中， $\ell(X, X_g) = \|X - X_g\|$ 表示运动智能体从其空间到目标的欧氏间距。 \vec{n}_g 代表通过运动物体当前位置指向目标的单元方位向量。

同样，由在移动机器人工作范围内的障碍所构成的排斥场功能 $U_{rep}(X)$ 被表达为：

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{rep} \left(\frac{1}{\ell(X, X_0)} - \frac{1}{\ell_0} \right)^2 \ell(X, X_0) < \ell_0 \\ 0 \ell(X, X_0) \geq \ell_0 \end{cases} \quad (10)$$

其中 K_{rep} 为排斥势，为正数， $\ell(X, X_0) = \|X - X_0\|$ 为目前所处的位置与障碍的界限的欧氏间距， ℓ_0 为具有排斥的最大距离，该数值取决于障碍与靶点的距离和位置。通常，该数值要比目标与它的最接近的障碍和每个障碍的最小的间隔要小，那么它对机器人的排斥效应 \vec{F}_{rep} 为排斥场功能的负斜率，它被表达为：

$$\vec{F}_{rep} = -\text{grad}[U_{rep}(X)] = \begin{cases} K_{rep} \left(\frac{1}{\ell(X, X_0)} - \frac{1}{\ell_0} \right) \frac{1}{\ell^2(X, X_0)} \vec{n}_0 \ell(X, X_0) < \ell_0 \\ 0 \ell(X, X_0) \geq \ell_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中， \vec{n}_0 为从障碍的位置到机器人目前的位置的单位向量。

基于力的叠加原则，在移动机器人上受到的引

力和排斥力的总和，如式(12)所示。

$$\vec{F}_{tol} = \vec{F}_{att} + \vec{F}_{rep} \quad (12)$$

人工势场法由于其概念简单，方法灵活，容易实现，因此在机器人的运动轨迹设计中具有很大的实用意义。但是，人工势场法也有其缺点，即目标位置上有障碍时，会使力场的极小值发生偏移，从而使智能体脱离目标；当物体在一定的地方，由于物体的排斥力和目标物体之间的重力合力为 0，从而使智能体无法前进。为了克服以上问题，目前已有许多学者针对此问题，例如增加虚设障碍物、沿着墙壁步行等方法，以及利用两者之间的优点，例如利用遗传算法、蚁群算法对人工势场方法进行参数的优选、算法的整合等。

3.2 改进人工势场法

当物体接近时，物体会产生较少的重力，但物体周围的障碍会产生较大的排斥力，从而影响物体的运动，从而造成物体无法到达的问题。修正后的排斥场功能确保目标点为全局最优，其格式为：

$$\vec{F}_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{rep} \left(\frac{1}{\ell(X, X_0)} - \frac{1}{\ell_0} \right)^2 \ell(X, X_0) & \ell(X, X_0) < \ell_0 \\ 0 & \ell(X, X_0) \geq \ell_0 \end{cases} \quad (13)$$

根据修正后的排斥场功能，得到车间移动机器人所承受的排斥力：

$$\vec{F}_{rep} = \begin{cases} \vec{F}_{rep1} + \vec{F}_{rep2} & \ell(X, X_0) < \ell_0 \\ 0 & \ell(X, X_0) \geq \ell_0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\vec{F}_{rep1} = K_{rep} \left(\frac{1}{\ell(X, X_0)} - \frac{1}{\ell_0} \right) \frac{1}{\ell^2(X, X_0)} \ell^n(X, X_g) \vec{n}_0 \quad (15)$$

$$\vec{F}_{rep2} = \frac{n}{2} K_{rep} \left(\frac{1}{\ell(X, X_0)} - \frac{1}{\ell_0} \right)^2 \ell^{n-1}(X, X_g) \vec{n}_g \quad (16)$$

其中， \vec{n}_0 代表障碍的方位是指目前智能体所处的位置， \vec{n}_g 是指目前移动机械人所处的位置的一个单元向量。分力 \vec{F}_{rep1} 向物体施加排斥，而分力 \vec{F}_{rep2} 向物体施加重力。通过引入运动物体与目标点之间的相对间距，从而有效地克服了经典人工势场法的缺点。如图 4 所示。

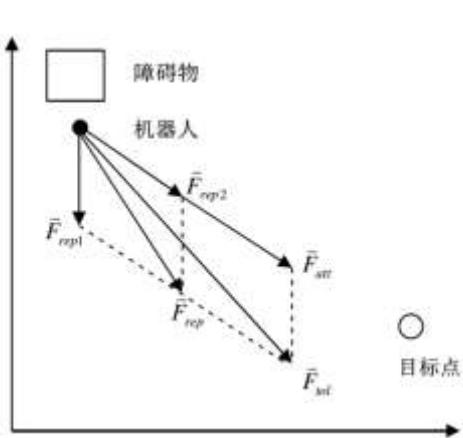


图 4 改进人工势场法

Fig.4 Improved artificial potential field method

4 混合人工势场-蚁群算法的机器人路径规划

4.1 环境建模

目前常用的环境描述方法有栅格法、单元树法和可视图法，其中栅格法是最常用的方法之一。栅格技术将机器人工作的周围空间分割成等尺寸的网格，网格的尺寸取决于机器人的长宽、机器人的移动步长和机器人的运动幅度，并将网格中的障碍物分为可选择的网栅网格和非网栅网格，机器人可以在当中选择合适的路线。

假定在理想情况下，车间移动机械人所处的位置为平面，所有障碍都是静止的，其大小、形状和位置都是确定的，并且在行进时，没有障碍改变。在建立模型时，须对车间环境边界进行合理的扩展。其中的原理是以机器人自身的直径为基准；在不超过一个网格的情况下，将其视为一个网格。这样，在不考虑实际问题的情况下，将车间环境分解为能够分析的样式。

网格分为两种形式：直角座标法和序列标记法，如图 5 所示，示例网格尺寸是 10×10 ，根据 X 轴和 Y 轴建立直角座标系统，用网格的边长尺寸为直角座标系统的单元长度，在该图中，任意一个网格均可用直角座标 (x, y) 来代表；序列规则是由左到右，由下至下依次排列，每个单元网格编号为 $1, 2, 3, \dots, n$ ，并与编号相一致。在 $m \times m$ 网格中，数字 n 和垂直座标 (x, y) 之间存在以下的对应关系：

$$\begin{cases} x = \text{mod}(n, m) - 0.5 \\ y = n + 0.5 - \text{ceil}\left(\frac{n}{m}\right) \end{cases} \quad (17)$$

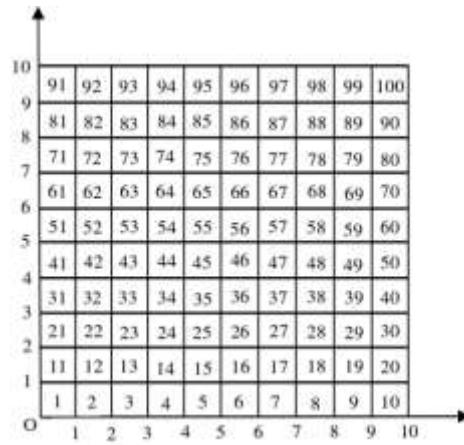


图 5 栅格的表示

Fig.5 Raster representation

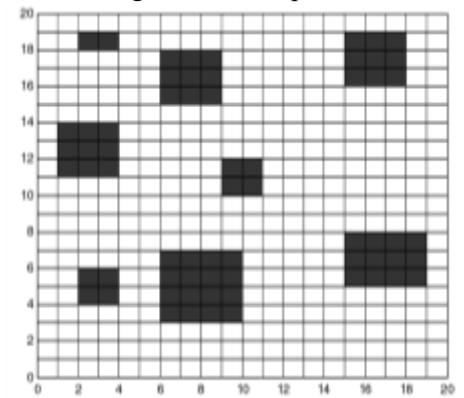


图 6 栅格环境地图

Fig.6 Raster Environment Map

在图 6 中，黑框是阻挡栅格，其他是自由栅格，设 b 是任意栅格， B 是集合 B 组成部分，障碍栅格组成的集合 $S = \{z_1, z_2, \dots, z_n\} \in B$ ，机器人可行栅格集合为 $KX = B \cap S$ ，起始点 p 与目标点 q 可以是任何栅格，并符合下列情况 $p \in KX, q \in KX$ 。为了便于描述网格的情况，在程序设计中，“0”是用于自由栅格的，而“1”是用于阻挡栅格的。

栅格方法中有八个邻近任何网格，当环境许可时，机器人可以在北，南，西，东，西北，西南，东北，东南八个方位，如图 7。所示机器人的步数是 1 到 2。在此基础上，通过构造相邻矩阵来储存各个网格间的间距，通过对邻接矩阵的查询，可以实现更快捷的操作，邻接矩阵则是将下一次移动的网格间距用 1 或 2 表示，而无法达到的网格间距则用无限表示。相邻矩阵中的第 i 行 j 栏的意思是网格 i 与栅格 j 之间的间距，从而在 $m \times m$ 的栅格环境中，相邻矩阵的大小为 $m^2 \times m^2$ 。

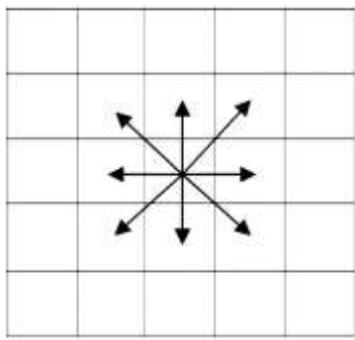


图7 机器人可移动方向示意图

Fig.7 Schematic diagram of the moving direction of the robot

4.2 混合算法

本文结合了传统的人工势场法和经典蚁群算法，利用了两种方法的优点，研究了一种基于人工势场-蚁群算法的车间移动机器人路径规划方法。

首先，将距离启发与人造势的力量相结合，得到了一个新的传递几率公式：

$$P_{uv}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{uv}^\alpha(t) \eta_{uv}^\beta(t) \eta_{Fuv}^\gamma(t)}{\sum_{j=allowed k(t)} \tau_{uj}^\alpha(t) \eta_{uj}^\beta(t) \eta_{Fuv}^\gamma(t)} & \\ 0, & else \end{cases} \quad (18)$$

其中， $v \in allowed k(t)$ 。在方程式中， γ 是一个力场的激励资讯因素，并且是一个常数。 $\eta_{uv}(t)$ 是从目前的位置到下一个地点的距离和当前地点到目标的距离的改善。

$$\eta_{uv}(t) = \frac{1}{L_{uv} + L_{vg}} \quad (19)$$

其中， L_{vg} 为结点 u 至 v 的一条直线长度， L_{vg} 为结点 v 至目标点的一条直线长度。

$\eta_{Fuv}(t)$ 表示人工势场力启发信息函数，表达式为：

$$\eta_{Fuv}(t) = \chi \cdot a^{F \cdot \cos \theta} \quad (20)$$

在方程式中， χ 是迭代系数， $a > 1$ 是常数， F 是人工势场合力， θ 是势场合力与当前可选路径方向的夹角。

$$\chi = \frac{N_{max}-N}{N_{max}} \quad (21)$$

在方程式中， N_{max} 为算法最大迭代次数， N 是当前的迭代次数。

其中，人工势场合力与路径选择的关系示意如图 8 所示：

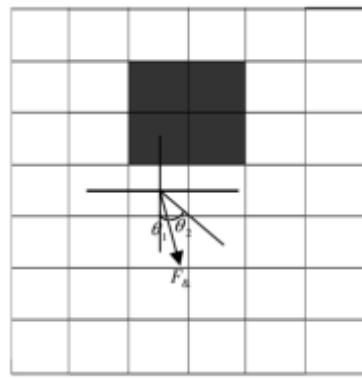


图8 势场合力与路径选择示意图

Fig.8 Schematic diagram of force and path selection

算法在栅格环内建立了人工势场，当移动机械人在栅格环内活动时，会受位场力的影响，假设位场的合力与下一条可行的通路之间的角度是 θ ，

从式(20)可以看出， θ 愈低，则 $\eta_{Fuv}(t)$ 的值愈大，传送的机会愈大，机器人愈倾向于此方向。在图 8 中，当路径①与势场合力所形成的夹角为锋利角度时，路径①与势场合力所形成的夹角为 θ_2 ，路径②与势场合力 \vec{F}_a 围成的夹角为 θ_1 ，明显看出 $\theta_1 < \theta_2$ ，机器人选择路径①的概率将大于路径②，因此机器人更会选择路线①的方向运动。

人工势场的动力激励信息也含有一个迭代性的因子，该因子的数值会随着迭代数的增大而降低，它的主要功能是针对搜寻条件，动态地调节位场的作用力。在路径搜寻初始阶段，由于各个通路的信息素含量较低，因此可以通过强化人为位场的力量，将智能体推至目标位置，从而避开因求解过程的随机因素而导致的低质量问题，从而降低了盲走率；在搜寻过程的中期阶段，在该路线上已经累积了足够多的信息素，可以有效地利用信息素与位场的力量，加速搜寻速度，改善路线品质；在路径搜寻的最后阶段，逐步减弱位场力的影响，以信息素为导向，避免了由于位场高度集中而导致的极值问题。

与实际车间环境相联系，移动机械人的运动要受其所处的环境和自身的状态所制约，并且最小的路线并不一定就是最佳的路线，其必须要兼顾运动时间、能量消耗等实际情况。由于转向过程中所消耗的能源和时间较多，所以轨迹的平滑度可以被看作是一个很好的对比参数。在此基础上，建立了评估路线的评估指数的函数 T ：

$$T = \lambda_1 t_{45^\circ} + \lambda_2 t_{90^\circ} + \lambda_3 t_{135^\circ} \quad (22)$$

在方程式中， λ_1 、 λ_2 、 λ_3 表示权重系数，并且

满足 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$, 可任意赋予定值即可; $t_{45^\circ} = \pi/4$, $t_{90^\circ} = \pi/2$, $t_{135^\circ} = 3\pi/4$ 。运动机器人的角度是指运动的运动轨迹和运动轨迹之间的角度, 如图 9 所示, 箭头指向的是目前的移动智能体的行进路线。

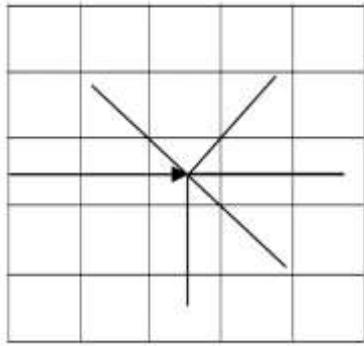


图 9 路径拐角

Fig.9 Schematic diagram of force and path selection

将路径长度与路径平滑度指标综合, 可得到机器人路径综合性能函数 H :

$$H = \omega_1 L + \omega_2 T \quad (23)$$

在方程式中, ω_1 、 ω_2 表示权值, 可赋定值, L 表示路径长度, T 表示路径平滑度。

当 m 只蚁群结束一次搜索后, 利用下式更新各路径的信息素浓度:

$$\tau_{uv}(t + \varsigma) = (1 - \rho)\tau_{uv}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{uv}^k(t) \quad (24)$$

$$\Delta\tau_{uv}^k(t, t + \varsigma) = \begin{cases} \frac{Q}{H}, & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁经过 } (u, v) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (25)$$

其中, H 为路径综合性能。

该公式包括了路线的长度和光顺度的评估, 通过反复的计算, 可以改善路线的品质, 并逐步达到最佳的效果。

5 仿真设计

仿真实验假设蚁群的运动是由左右腿的连续动作实现的。此外, 还假设传感器位于蚁群前端左侧以及右侧的固定位置。对蚁群模型的控制方法采用简易的 Braitenberg 车辆的控制方法, 即传感器和驱动机构之间进行交叉连接, 从而使蚁群能够跟随目标。在考虑的范例中, 控制函数采用基于正切的统一模 \oplus_θ 和吸收范数 \otimes_ϑ , 二者对任意 $a, b \in (0, 1)$, 都定义为:

$$a \oplus_\theta b = g^{-1}(g_\theta(a) + g_\theta(b)) \quad (25)$$

$$a \otimes_\vartheta b = g^{-1}(g_\vartheta(a) + g_\vartheta(b)) \quad (26)$$

其中, $g(a) = \tan[\pi(a^\beta - \frac{1}{2})]$, $a \in (0, 1)$,

$\beta > 0$ 参数分别表示中性与吸收的项。代入得到:

$$a \oplus_\theta b = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan(\tan[\pi(a^\beta - \frac{1}{2})]) + \tan[\pi(b^\beta - \frac{1}{2})] \quad (27)$$

$$a \otimes_\vartheta b = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan(\tan[\pi(a^\beta - \frac{1}{2})]) + \tan[\pi(b^\beta - \frac{1}{2})] \quad (28)$$

其中, $\theta = \vartheta = (\frac{1}{2})^{1/\beta}$ 。注意当 $\theta = \vartheta = \frac{1}{2}$, g^{-1}

函数与中位数 $m = 1$ 以及参数 $k = 1$ 的柯西分布 $F_{m,a}(\xi) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan(\frac{\xi-m}{k})$ 的形式完全相同。有关基于概率的统一模 \oplus_θ 和吸收范数 \otimes_ϑ 聚合器可参考 Kagan et al. (2013)。在后续仿真中, 将中性与吸收项分别设为 $\theta = \frac{1}{2} + \varepsilon_\theta$ 和 $\theta = \frac{1}{2} + \varepsilon_\vartheta$, 其中 ε_θ 和 ε_ϑ 为在 $[-0.1, 0.1]$ 区间上随机均匀分布的采样值。

用统一模 \oplus_θ 和吸收范数 \otimes_ϑ 聚合器定义了位于左右两侧的传感器与驱动机构的输入、转移函数以及输出函数:

(1) 输入函数定义了 t 时刻蚁群左右两侧传感器回传的信息素标记 $z_{left}^{phm}(t)$ 和 $z_{right}^{phm}(t)$ 与所测环境状态 $z_{left}^{env}(t)$ 和 $z_{right}^{env}(t)$ 的融合。

$$z_{left}(t) = z_{left}^{env}(t) \oplus_\theta z_{left}^{phm}(t) \quad (29)$$

$$z_{right}(t) = z_{right}^{env}(t) \oplus_\theta z_{right}^{phm}(t) \quad (30)$$

(2) 状态转移函数定义了再给定输入 $s_{left}(t)$ 、 $s_{right}(t)$ 后左右控制器在 t 时刻的状态 $s_{left}(t)$ 和 $s_{right}(t)$, 与上一时刻状态 $s_{left}(t-1)$ $s_{right}(t-1)$:

$$s_{left}(t) = z_{right}(t) \otimes_\vartheta s_{left}(t-1) \quad (31)$$

$$s_{right}(t) = z_{left}(t) \otimes_\vartheta s_{right}(t-1) \quad (32)$$

(3) 输出函数, 定义了在给定当前时刻和上一时刻的控制器状态后, 当前左右控制器的输出

$y_{left}(t)$ 、 $y_{right}(t)$:

$$y_{left}(t) = s_{left}(t) \otimes_\vartheta s_{left}(t-1) \quad (33)$$

$$y_{right}(t) = s_{right}(t) \otimes_\vartheta s_{right}(t-1) \quad (34)$$

最终蚁群左右腿的步进步长与输出值成正比关系:

$$l_{left}^{step}(t) \sim y_{left}(t), l_{right}^{step}(t) \sim y_{right}(t) \quad (35)$$

且该比值的大小与蚁群的大小有关。

仿真实验假设车间移动机器人能够实现信息素引导的运动，其中的每个机器人都配备了超声波距离传感器，传感器安装于机器人的前端。机器人的前端还安装了两个光电传感器，机器人在光电传感器引导下能够跟随白色区域上的黑色曲线。机器人的尾端还安装了一只可上下移动的笔，由此机器人可根据需求在白色区域内画出黑色区域线来记录蚁群的信息素分布，从而得到的曲线模拟了信息素轨迹曲线。

在该任务中，机器人需要在一个区域内搜索来寻找“食物”。在找到“食物”后，机器人用“信息素”来标记到达“食物”的路径。在仿真中，机器人在一个由墙壁包围的封闭场地中活动，“食物”由位于场地中心的相对较小的一个物体来模拟，如图 10 所示。

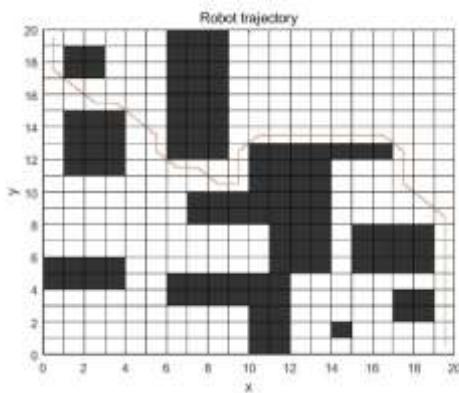


图 10 机器人场地
Fig.10 Robot Field

流程如下：

- (1) 机器人在使用场地内先随意运动，检查机器人与障碍物之间的距离。
- (2) 如果机器人检测到某个物体，他会判断是否为墙壁、其余机器人或者“食物”。判断流程如下：

如果检测到物品边缘处仍是某一物体，则表示该物体为墙壁

如果检测到物体边缘处没有其他的物体，但是在检测结束时该物体消失了，则表明该物体为其余机器人；

如果检测到物体边缘处没有其他的物体，并且在检测结束时，该物体仍在最初位置，则判断该物体为“食物”。

- (3) 如果机器人检测到“食物”，则该机器人将转向后方并放下笔，然后向前运动，画出当前位置到墙壁的路径。

(4) 其他情况下，机器人转向后方并继续随机运动。

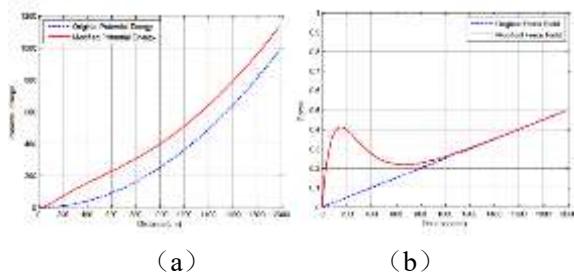


图 11 引力势场函数剖面

Fig.11 Gravitational Potential Field Function

势能场的剖面图和引力的大小的变化如图 11

(a) 所示。在图 11(b) 中可以很明显的看出，在目标点附近的引力大于原先的引力，并且在短时间之内将引力收敛至 0。感受到信息素释放的蚁群遵循环境状态开始向随机的方向移动。然而当蚁群探测到信息素的轨迹时，他们更倾向于跟随这条轨迹。相比之下，在没有信息素的情况下，蚁群开始向随机的方向移动，然后根据环境状态继续移动。

如图 12 所示，随着迭代次数的增加，路径长度逐渐收敛。仿真实验结果展示了采用信息速度机器人方法进行间接通信的人工智能体的最简单运动模式。在实验中，智能体能够感知到邻近的事物，并按照一般群集规则的要求跟随群体。

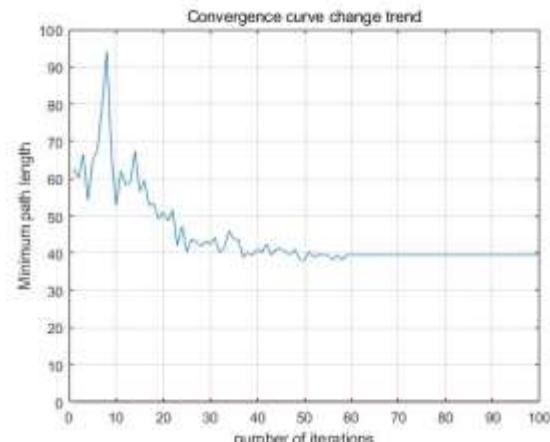


图 12 算法迭代趋势

Fig.12 Algorithm iteration trend

6 结 论

目前已多种算法被成功地用于道路优化问题，但同时也有一些不足之处，因此，如何对算法进行优化，使多种算法相互融合，取长补短，成为当前研究的主要内容。由于现实工作环境、障碍物环境是多维的，为了方便调查，本文只对二维的问题进行了简化，并将其分为两个方向：一是有效的、二是禁止的。环境模型的建立和运动分区的正确确

定，是实现有效避障和高效运动的先决条件。在机器人的移动轨迹规划中，必须充分考虑到与障碍的间距，以便对其进行适时的修正。运动智能体的路线优化问题是指在一定距离、时间、能量等条件下，在有障碍的情况下，选择最佳的路线。其中，运动代理的关键在于其算法的选取和实施。在机器人的设计中，路线选择是机器人在有障碍时，由起始到结束的最佳路线。

虽然传统的人工势场方法具有运算量少、运算速度快、运算速度快等优点，但其缺点是无法到达和容易陷入局部极值。目前，已广泛采用有序列法、非线性优化规划法、推断法等多种算法，但是它们都需要更多的数学量，并且很可能会在局部最优中出现。传统蚁群优化算法在求解过程中引入了正向反馈的平行查找策略，使其具有很好的抗干扰能力，但是在复杂的环境下，搜索速度慢，收敛性不佳。本文在前人基础上，结合了人造势场方法与基础蚁群算法，利用它们各自的优点，提出了一种基于人工势场-蚁群算法的车间移动机器人路径规划方法，并通过仿真实验进行了验证。

参考文献(References)

- [1] Orozco-Rosas U, Montiel O, Sepúlveda R. Mobile robot path planning using membrane evolutionary artificial potential field[J]. Applied Soft Computing, 2019, 77: 236-251.
- [2] Yao Q, Zheng Z, Qi L, et al. Path planning method with improved artificial potential field—a reinforcement learning perspective[J]. IEEE Access, 2020, 8: 135513-135523.
- [3] Huang Y, Ding H, Zhang Y, et al. A motion planning and tracking framework for autonomous vehicles based on artificial potential field elaborated resistance network approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(2): 1376-1386.
- [4] Huang Y, Ding H, Zhang Y, et al. A motion planning and tracking framework for autonomous vehicles based on artificial potential field elaborated resistance network approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(2): 1376-1386.
- [5] Zhang J, Yan J, Zhang P. Fixed-wing UAV formation control design with collision avoidance based on an improved artificial potential field[J]. IEEE Access, 2018, 6: 78342-78351.
- [6] Du Y, Zhang X, Nie Z. A real-time collision avoidance strategy in dynamic airspace based on dynamic artificial potential field algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 169469-169479.
- [7] Miao C, Chen G, Yan C, et al. Path planning optimization of indoor mobile robot based on adaptive ant colony algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 156: 107-130.
- [8] Luo Q, Wang H, Zheng Y, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(6): 1555-1566.
- [9] Ajeil F H, Ibraheem I K, Azar A T, et al. Grid-based mobile robot path planning using aging-based ant colony optimization algorithm in static and dynamic environments[J]. Sensors, 2020, 20(7): 188-200.
- [10] Zhang D, You X, Liu S, et al. Dynamic multi-role adaptive collaborative ant colony optimization for robot path planning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 129958-129974.
- [11] Akka K, Khaber F. Mobile robot path planning using an improved ant colony optimization[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(3): 172-183.
- [12] Zhang S, Pu J, Si Y. An adaptive improved ant colony system based on population information entropy for path planning of mobile robot[J]. IEEE Access, 2021, 9: 24933-24945.
- [13] Wang L, Kan J, Guo J, et al. 3D path planning for the ground robot with improved ant colony optimization[J]. Sensors, 2019, 19(4): 327-336.
- [14] Chen X, Zhang P, Du G, et al. Ant colony optimization based memetic algorithm to solve bi-objective multiple traveling salesmen problem for multi-robot systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 21745-21757.
- [15] Song B, Miao H, Xu L. Path planning for coal mine robot via improved ant colony optimization algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2021, 9(1): 283-289.



ROBOMASTER
机甲大师高校单项赛

CERTIFICATE
获 奖 证 书

东北大学 中鸿 TDT 战队

庄腾楷 顾问

在“第二十一届全国大学生机器人大赛 RoboMaster
2022 机甲大师高校单项赛全国赛”飞镖打靶项目中，荣获

二等奖

特发此状，以资鼓励。



dji R

CERTIFICATE
获 奖 证 书



ROBOMASTER
机甲大师超级对抗赛

东北大学 中鸿 TDT 战队

庄腾楷 同学

在“第二十一届全国大学生机器人大赛 RoboMaster 2022 机
甲大师超级对抗赛全国赛”中，荣获

一等奖

特发此状，以资鼓励。



dji R

CERTIFICATE
获 奖 证 书



庄腾楷 同学

在“RoboMaster 2022 机甲大师超级对抗赛区域赛
(南部赛区) ”中，代表_____ 东北大学

中鸿 TDT 战队，荣获

一等奖

特发此状，以资鼓励。



2023

Mathematical Contest In Modeling®

Certificate of Achievement

Be It Known That The Team Of

Yibo Wang
Pu Zhao
Tengkai Zhuang

With Faculty Advisor
Xueyi Wang

Of

Northeastern University

Was Designated As
Honorable Mention



Solomon Garfunkel, Executive Director



Administered by
With support from



Steven B. Horton, Contest Director



1、第二届边缘计算开发者大赛（国家赛）（主力）（全国个人二等奖）：

第二届边缘计算开发者大赛暨华为云IoT Edge边缘计算开发者大赛 已结束
边缘计算技术已经成为物联网解决方案开发，特别是在工业、能源等一些复杂场景下的必选技术。本次大赛要求开发者基于华为云IoT边缘开展学习实践，并进一步开展应用创新，共同释放边缘计算技术潜力！

奖金：¥400,000
1363 报名人数
报名已截止
决赛截止时间：2022/12/12

姓名	作品名称	奖项	评委点评
陈青彬	基于华为云IoT边缘实现“民航机场安检设施边云协同应用”	一等奖	作品内容立足于民航机场安检场景，对安全设施现状与痛点进行了深度剖析，并适宜地提出了边云协同应用方案；业务结构表达清晰，创新价值点明确，且技术可行性高。
徐威	基于华为云IoT Edge的云边协同智能视频分析系统	一等奖	方案紧扣赛题，创意突出，且技术可行性较高；云端训练、边缘执行、数据轻量化上云，云边协同，快速部署更新；建议进一步完善功能与实践展示。
陈闻欢	基于IoT边缘服务实现边缘AI果蔬识别	二等奖	作品展示了如何利用IoT Edge云边协同实现应用的下发部署，但缺少对边缘AI果蔬识别业务的展开介绍，内容稍显单薄，建议补充完善技术细节。
赵加乐	基于IoT的自动化农田系统	二等奖	Demo完成度较高，展示较为完整；但整体方案中欠缺对IoT边缘技术结合以及IoT平台的应用价值点体现。
张焕兵	基于华为云的北斗定位系统	二等奖	作品立意明确，应用场景清晰，但与IoT边缘能力的开发过程中，缺少对边缘设备的接入以及属性定义部分，建议补充最终应用实现的效果展示。
魏家伟	基于华为云服务的智能家居系统	二等奖	Demo完成度较高，展示较为完整；但整体方案中欠缺对IoT边缘技术结合以及IoT平台的应用价值点体现。
潘子涵	基于华为云IoT Edge与AI深度学习的青少年抑郁评估系统	二等奖	建议在作品在方案与架构上，补充展示出使用IoT Edge的必要性。
陈彦铭	基于OpenGauss的室内违规Wi-Fi接入点定位系统	二等奖	作品使用场景明确，功能完整，但与赛题的结合不够紧密，未体现出与IoT边缘的能力结合点。
张易搏	基于华为云IoT的虚拟远程教学	二等奖	方案构想特别新颖，创新性突出；但3D虚拟网络教学是否是真实市场需求，有待考证；随着疫情过去，线下教学逐步恢复，该应用价值的合理性也有待商榷。
钟洪欣	基于IoT边缘自适应管理与学习架构	二等奖	作品未介绍如何自适应管理与学习，且稍微偏离赛题，未用到或未明确交代使用了IoT边缘服务。
杨凯	基于华为云IoT边缘实现病人信息管理系统界面作品	三等奖	作品为Web应用作品，未体现出与IoT平台以及IoT边缘的关联性。
钟云鹏	基于内网可以随时随地远程接入的文件服务器	三等奖	作品介绍过于简单，且稍微偏离赛题，未用到或未明确交代使用了IoT边缘服务。



2、“智造未来，科创有你” 机械创新设计活动

我的收藏

智造未来.pdf

...

关于公布“智造未来，科创有你” 机械创新设计系列活动

活动名单的通知

“智造未来，科创有你” 机械创新设计系列活动由创新创业学院和东北大学机械工程与自动化学院团委指导，由东北大学科学技术研究学院，东北大学创新创业学院，东北大学学生创新创业基地，东北大学学生科学技术协会主办，东北大学机械工程与自动化学院学生科学技术协会承办，在2022年10月8日在线上顺利开展。该活动鼓励同学们进行创新设计，将专业知识应用于实际操作中，培养学生的创新设计能力、综合设计能力与团队协作精神；加强学生动手能力的培养和工程实践的训练，提高学生针对实际需求进行创新思维、机械设计和制作等实际工作能力；吸引、鼓励广大学生踊跃参加课外科技活动，为优秀人才脱颖而出创造条件。

本次活动获奖共计17人，其中一等奖6人，二等奖8人，三等奖3人，具体名单详见下表：

姓名	学号	学院	奖项
张易搏	20221018	工商管理学院	一等奖
项学溪	20221101	工商管理学院	一等奖
钟雨男	20204997	机械工程与自动化学院	一等奖
张怡	20214807	机械工程与自动化学院	一等奖
卢睿桐	20215117	机械工程与自动化学院	一等奖
崔欣欣	20215126	机械工程与自动化学院	一等奖
张正	20213878	材料科学与工程学院	二等奖
杨帆	20213938	材料科学与工程学院	二等奖
张莉莹	20214258	材料科学与工程学院	二等奖
胡绍丽	20193136	机器人科学与工程学院	二等奖

第1页共12

3、东北大学2023年“建龙钢铁”智能汽车竞赛

东北大学2023年“建龙钢铁”科技节之智能汽车竞赛活动证明			
比赛时间	2023年5月	比赛地点	东北大学
36	材料科学与工程学院	材料科学与工程学院	20223955
37	材料科学与工程学院	材料科学与工程学院	20223961
38	杨钰山	材料科学与工程学院	20223964
39	王晨浩	材料科学与工程学院	20223965
40	杨露华	材料科学与工程学院	20224003
41	孙佳宝	材料科学与工程学院	20224012
42	陈劲予	材料科学与工程学院	20224020
43	陈子龙	材料科学与工程学院	20224032
44	邹泽峰	材料科学与工程学院	20224054
45	李鑫洋	材料科学与工程学院	20224108
46	张士婧	材料科学与工程学院	20224118
47	焦波微	材料科学与工程学院	20224133
48	韩国栋	材料科学与工程学院	20224135
49	李泽坤	材料科学与工程学院	20224155
50	孙亦婷	工商管理学院	2001212
51	李建池	工商管理学院	20211054
52	黄群	工商管理学院	20221040
53	张易搏	工商管理学院	20221018
54	宋博文	机器人科学与工程学院	20208016
55	贾子睿	机器人科学与工程学院	20208048
56	邵祺	机器人科学与工程学院	20208050
57	黄俊楷	机器人科学与工程学院	20211309
58	张望凡	机器人科学与工程学院	20215091
59	张超凡	机器人科学与工程学院	20217621
60	郑媛媛	机器人科学与工程学院	20217695
61	黄煊浩	机器人科学与工程学院	20217857
62	李征奇	机器人科学与工程学院	20217859
63	王斐博	机器人科学与工程学院	20217860
64	王国存	机器人科学与工程学院	20217862
65	刘兆峰	机器人科学与工程学院	20217863
66	申健鹏	机器人科学与工程学院	20217887
67	韦康淳	机器人科学与工程学院	20217871
68	王哲	机器人科学与工程学院	20217874
69	崔航齐	机器人科学与工程学院	20217878
70	康宇鑫	机器人科学与工程学院	20217882
71	徐浩惠	机器人科学与工程学院	20217886