

5-25-2022

Multi-Objective Optimization Configuration of AGV System Based on Response Surface and NSGA-II

Jianlin Fu

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;;
jlfuhappy@163.com

Guofu Ding

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Jian Zhang

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Haifan Jiang

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-Objective Optimization Configuration of AGV System Based on Response Surface and NSGA-II

Abstract

Abstract: Automated guided vehicle(AGV) system plays an important role in the production flexibility and efficiency in manufacturing systems. Due to the dynamic and stochastic characteristics of AGV system with many variables, its optimal configuration is relatively complex. *A method combining system simulation, mathematical analysis and multi-objective optimization is proposed to optimize the configuration of AGV system. The discrete event simulation is used to simulate the operation of AGV system, the sensitivity analysis is used to separate design variables, the factorial experiments and response surface methods are used to build the fitting multi-objective optimization mathematical model, and the non-dominated sorting genetic algorithm-II(NSGA-II) is used to solve the multi-objective optimization problem.* The effectiveness of the method is proved by an industrial case study, which provides an effective systematic analysis method for the optimal configuration of AGV system in manufacturing or logistics systems.

Keywords

automated guided vehicle(AGV), response surface methodology, discrete event simulation, NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm-II)

Authors

Jianlin Fu, Guofu Ding, Jian Zhang, Haifan Jiang, and Peipei Guo

Recommended Citation

Jianlin Fu, Guofu Ding, Jian Zhang, Haifan Jiang, Peipei Guo. Multi-Objective Optimization Configuration of AGV System Based on Response Surface and NSGA-II[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(5): 994-1002.

基于响应面和 NSGA-II 的 AGV 系统多目标优化配置

付建林, 丁国富, 张剑, 江海凡, 郭沛佩

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: AGV(automated guided vehicle)系统对于制造系统的生产柔性和生产效率具有重要作用, 由于 AGV 系统具有许多的变量且有动态性、随机性特点, 其优化配置比较复杂。提出了一种将系统仿真、数学解析和多目标优化相结合的方法, 对 AGV 系统进行了优化配置; 运用离散事件仿真模拟 AGV 系统运行, 利用敏感性分析分离设计变量, 采用析因试验和响应面方法拟合多目标优化数学模型, 基于非支配解排序多目标遗传算法求解多目标优化问题。通过 AGV 系统实例, 证明了该方法的有效性, 可为制造系统和物流仓储领域中 AGV 系统的优化配置提供一种有效的系统性分析方法。

关键词: AGV; 响应面; 离散事件仿真; 非支配解排序多目标遗传算法

中图分类号: TH166; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2022) 05-0994-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0908

Multi-Objective Optimization Configuration of AGV System Based on Response Surface and NSGA-II

Fu Jianlin, Ding Guofu, Zhang Jian, Jiang Haifan, Guo Peipei

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Automated guided vehicle(AGV) system plays an important role in the production flexibility and efficiency in manufacturing systems. Due to the dynamic and stochastic characteristics of AGV system with many variables, its optimal configuration is relatively complex. A method combining system simulation, mathematical analysis and multi-objective optimization is proposed to optimize the configuration of AGV system. The discrete event simulation is used to simulate the operation of AGV system, the sensitivity analysis is used to separate design variables, the factorial experiments and response surface methods are used to build the fitting multi-objective optimization mathematical model, and the non-dominated sorting genetic algorithm-II(NSGA-II) is used to solve the multi-objective optimization problem. The effectiveness of the method is proved by an industrial case study, which provides an effective systematic analysis method for the optimal configuration of AGV system in manufacturing or logistics systems.

Keywords: automated guided vehicle(AGV); response surface methodology; discrete event simulation; NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm-II)

引言

AGV(automated guided vehicle)作为一种集成了多种先进技术的柔性智能物流装备, 在制造系统和物流仓储等领域得到越来越多的应用, 以多 AGV 组成的 AGVs(AGV system)物流系统正在成

为车间物流自动化、柔性化配送的常态, 并在提升制造系统效益以及降低成本方面发挥了巨大的作用^[1]。其中 AGV 系统的设计与配置对于 AGV 能否在制造系统中高效发挥作用至关重要, 然而, 由于 AGV 系统变量众多且具有高度复杂性、动态性和随机性的特点, 因此, 对 AGV 系统进行最优化配

收稿日期: 2020-11-19

修回日期: 2021-08-09

基金项目: 四川省重大科技专项(2020YJ0215)

第一作者: 付建林(1978-), 男, 博士生, 讲师, 研究方向为生产系统建模仿真、物流优化等。E-mail: jlfuhappy@163.com

置是较为困难的。

目前解决 AGV 系统优化配置的方法一般有数学解析的方法和基于仿真的方法。采用数学解析方法的有: 文献[2]将车辆需求问题表述为二进制整数规划模型, 并用枚举算法求解。文献[3]采用混合整数规划方法求解柔性制造系统(flexible manufacture system, FMS)的最佳 AGV 数量, 在考虑了装载时间、空行程时间、等待时间和拥堵时间下使得车辆的空行程最小化, 与仿真研究结果进行比较得出此方法的 AGV 数量被低估。文献[4]运用统计学方法建立回归模型, 用于评估车间需要的 AGV 数量, 该方法在系统设计初始阶段有一定参考价值。文献[5]针对汽车车身车间 AGV 物料搬运系统小车数量配置规划问题, 采用排队论模型, 以最小总成本为目标, 建立静态调度模式和动态调度模式下的 AGV 数量配置模型进行求解, 建模成本低、求解速度快, 但模型并不能完全反映实际细节。文献[6]将解析法与灰狼优化算法相结合, 研究 FMS 不同布局下的 AGV 车辆数量优化问题。文献[7]建立数学模型, 在考虑电池电量消耗和充电策略的情况下规划 AGV 小车和充电桩数量, 以保证 AGV 搬运工作效率最大化。

数学解析方法具有显示解析表达式, 可以快速求解, 不过只适用于特定的简化模型, 而通常情况下 AGV 系统由于其复杂性, 求解问题往往很难显式解析表达。基于此原因, 有很多学者采用基于仿真的方法解决 AGV 系统优化配置问题: 如文献[8]建立了一个基于 SIMAN 的仿真模型, 用来研究满足物料搬运要求所需的 AGV 数量。文献[9]建立数学估算与仿真优化组成的仿真优化模型, 求解柔性制造环境下的 AGV 车辆规模问题, 弥补了解析方法求解误差较大的缺点, 同时提高了仿真效率。文献[10]以输出产品数最大化为目标, 以不同类型 AGV 的数量配置为决策变量, 建立了问题的数学模型, 采用仿真和遗传算法结合, 求解空调装配车间不同 AGV 的最佳配置数量。文献[11]采用仿真分析方法, 结合多目标非线性规划和进化策略优化

技术, 对带 AGV 的 FMS 参数进行优化设计, 以满足最小化拥堵、最大化车辆利用率和最大化产量 3 个目标。文献[12]将解析模型的结果作为仿真模型的输入, 采用解析与仿真相结合的方法评估 FMS 车间 AGV 需求问题。

基于仿真方法的优点在于能够最真实地模拟 AGV 系统的运行本质, 尤其是在描述系统的动态随机性方面。但若仅依靠仿真寻求最佳解决方案同样面临问题, 当有许多变量需要确定时, 参数空间可能非常大, 从而需要大量的仿真观测来确定最优解, 实际计算难以负担。另外, 若同时考虑多个目标时, 多个目标之间的权衡使得仿真方法解决问题较为困难。基于以上因素综合考虑, 既要能利用仿真方法准确真实反映 AGV 系统本质, 又要避免过多的仿真计算量, 同时还能结合数学解析方法快捷求解。本文将仿真方法与数学解析方法相结合, 利用离散事件建模与仿真、参数敏感性分析、析因试验、响应面与多目标遗传优化算法等方法, 为 AGV 系统的优化配置提供了一种系统性解决方案, 并用一个实例验证了该方法的有效性。

1 AGV 系统多目标优化配置方法

AGV 系统多目标优化配置问题一般可以采用通用数学模型进行表述:

$$\begin{aligned} \min Y = F(\mathbf{x}) &= (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))^T \\ \text{s.t. } g_j(\mathbf{x}) &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \\ h_m(\mathbf{x}) &= 0, \quad m = 1, 2, \dots, M \\ x_i^L &\leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})$ 指多个优化目标, 即各个系统性能指标; $\mathbf{x} = x_1, x_2, \dots, x_n$ 是决策向量, 即设计参数; $g_j(\mathbf{x}), h_m(\mathbf{x})$ 为不等式和等式约束; $\mathbf{x}$ 受下界和上界的范围约束, 分别反映了设计参数的约束和范围。

AGV 系统的设计参数包括本体设计参数和非本体设计参数。本体设计参数包括 AGV 数量、速度、装载时间、卸载时间、加速度、容量、充电阈值等; 非本体设计参数包括 AGV 系统路径与布局、

路径选择策略、工件任务级别、任务调度策略等。非本体设计参数也会不同程度地影响优化性能指标,不过为减少研究的复杂性,本文主要考虑 AGV 本体设计参数,将非本体设计参数当做系统的运行参数。常用的性能指标一般包括:完工时间、产量、生产率、AGV 利用率、机床利用率、物流成本等,各指标之间存在耦合和相关性。由于 AGV 系统具有随机动态复杂性,式(1)难以进一步显示解析表达并求解,采用仿真代理模型来表述式(1)是较为可行的方法,本文构建响应面模型作为仿真代理模型以表述式(1),并基于 NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm-II)进行响应面模型的多目标优化求解,方法如图 1 所示。

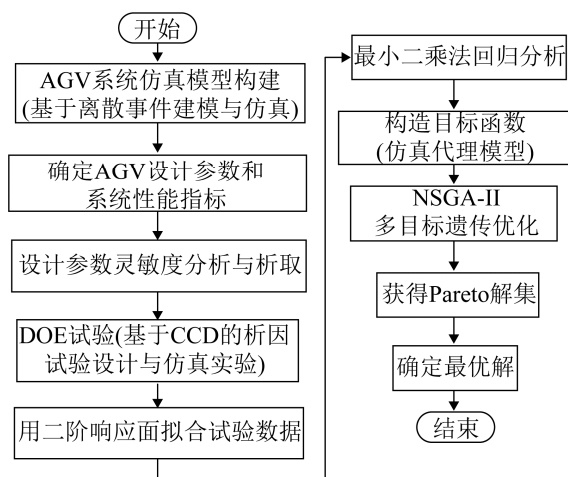


图 1 基于响应面与 NSGA-II 的 AGV 系统优化配置流程
Fig. 1 Flow chart of optimization configuration of AGV system based on response surface and NSGA-II

具体流程如下:

(1) AGV 系统仿真模型的建立: 仿真模型采用离散事件建模与仿真方法建立,对模型中各类元素进行参数设置,对工艺过程和物流过程进行逻辑配置和模拟,并对仿真模型进行校核与验证。

(2) 设计参数与优化目标的确定: 根据设计需要、约束和目标等,确定 AGV 系统的设计参数及其数值范围,设计参数包括 AGV 数量、速度、加载时间、加速度、电池充电阈值等。确定系统优化目标,即性能指标,包括完工时间、产量、AGV 利用率、AGV 拥堵率等。

(3) 设计参数灵敏度分析与析取: 采用灵敏度分析方法测试 AGV 系统的设计参数对性能指标的敏感程度,对设计参数进行筛选与析取,不敏感的参数作为固定运行参数,敏感的设计参数作为可变设计参数,以减少设计参数,降低设计复杂度,提高模型拟合效率。

(4) 试验设计与响应面仿真代理模型的建立: 试验设计方法中的 CCD (central composite designs) 方法用来设计析因试验的试验点,对各个试验点分别进行仿真实验,对得到的性能指标响应值采用二阶响应面模型进行拟合,采用最小二乘法回归分析获得响应面模型的系数,得到响应面数学模型,即仿真模型的数学代理模型,同时也是目标函数。

(5) 多目标优化求解: 基于 NSGA-II 求解 AGV 系统多目标函数的 Pareto 优化解集,根据性能指标重要程度或其他因素,从解集中选择合适的 AGV 优化参数集作为最优解。

2 AGV 系统仿真模型及参数分析

2.1 AGV 系统建模与仿真

以文献[13]中 FMS 中的 AGV 系统为例进行分析,图 2 所示为车间布局,包含有 12 个加工中心 ($M_1 \sim M_{12}$) 和一个 H (Home) 站点,每个加工中心设置输入和输出缓冲区, H 站点为 AGV 充电和停靠区,也是工件出入口。AGV 无任务时,在 H 站点等待调度命令,AGV 沿着固定的单向/双向引导路径在多个加工中心间转运工件。

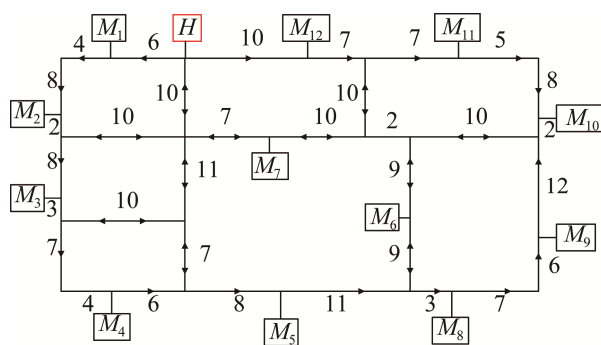


图 2 带 AGV 的 FMS 柔性制造系统
Fig. 2 FMS flexible Manufacturing system with AGV

假设和约束如下: 加工中心和 AGV 能连续工作不发生故障; 每个加工中心一次只能处理一个工件的一个工序; 工件的某个工序一旦开始就必须被处理完不能中断; 每个 AGV 一次只装载一个工件; AGV 的调度规则是最近利用原则, 即工件选择最近的空闲 AGV, 空闲 AGV 选择最近的待运工件; 同一工件不同工序有先后约束, 不同工件间无约束。

共有 6 类工件需要加工, 其工艺路线如表 1 所示, 每类工件需经过 5 或 6 道工序, 依工序依次在若干加工中心完成。工件按照 1~6 类工件顺序按正态分布时间间隔(270 s, 30 s)随机到达, 每一类工件每次有 2 个到达。由 AGV 载运工件自 H 站点进入系统, 然后依照工序顺序进行转运及加工, 加工完毕由 AGV 载运从 H 站点离开系统。

表 1 工件的工艺路线和工时

Table 1 Process route and man-hour of the workpiece

工件类型	工序	机床	工序时长/s	工件类型	工序	机床	工序时长/s
1	O_{11}	M_2	234	4	O_{41}	M_7	277
	O_{12}	M_6	211		O_{42}	M_5	397
	O_{13}	M_8	123		O_{43}	M_{12}	255
	O_{14}	M_{12}	78		O_{44}	M_8	256
	O_{15}	M_7	264		O_{45}	M_9	216
	O_{16}	M_5	231	5	O_{51}	M_1	356
2	O_{21}	M_3	156		O_{52}	M_7	157
	O_{22}	M_4	67		O_{53}	M_9	192
	O_{23}	M_{11}	273		O_{54}	M_4	234
	O_{24}	M_{10}	223		O_{55}	M_{12}	225
	O_{25}	M_9	243		O_{56}	M_{10}	225
3	O_{31}	M_1	78	6	O_{61}	M_3	452
	O_{32}	M_4	254		O_{62}	M_2	254
	O_{33}	M_6	542		O_{63}	M_{10}	195
	O_{34}	M_8	399		O_{64}	M_{11}	236
	O_{35}	M_{11}	244		O_{65}	M_1	123
...	...	...	...		O_{66}	M_4	235

FMS 仿真模型采用西门子 PlantSimulation 系统仿真软件按照离散事件建模与仿真的方法建立, 如图 3 所示。首先是物流路径、加工中心、缓冲区、 H 站点、AGV 等元素的建模; 然后是生产计划的配置、工件工艺表的编辑、加工中心的参数设置以

及 AGV 的参数配置; 系统工艺过程和物流过程的逻辑控制采用 simTalk 语言二次开发实现, 最终实现对整个制造过程的仿真并对仿真模型进行校验。

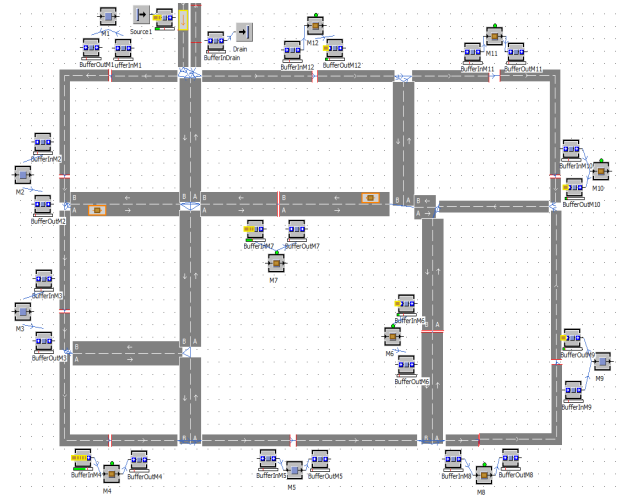


图 3 带 AGV 的 FMS 仿真模型

Fig. 3 Simulation model of FMS with AGV

2.2 设计参数与性能指标

AGV 系统的优化目标与设计参数根据实际配置需求确定, 本实例中 AGV 系统优化目标即性能指标, 包含: AGV 拥堵率、AGV 利用率、加工中心利用率和 10 天的产量。产量是评价系统性能常用的衡量指标, 加工中心利用率标示了关键设备的利用程度, AGV 利用率和拥堵程度用于评价系统物流的效率。AGV 系统设计参数包括: AGV 数量、速度、加速度、装载时间、卸载时间和输入输出缓冲容量大小。设计参数的约束范围和初始值根据实际设计情况和专家经验确定, 表 2 列出了各个设计参数的初始取值、最小增减量和变量取值范围。

表 2 设计变量

Table 2 Design variables

设计参数	初始取值	最小增减量	取值范围	可变/固定
AGV 数量(个)	3	1	[1,5]	可变
AGV 速度/(m/s)	2	0.5	[1,3]	可变
AGV 加速度/(m/s ²)	1.5	0.5	[0.5,2.5]	固定
AGV 装载时间/s	10	2.5	[5,15]	可变
AGV 卸载时间/s	10	2.5	[5,15]	可变
出入口缓冲容量(个)	8	2	[4,12]	固定

2.3 设计参数敏感性分析

关于敏感性分析,文献[14]对模型先拟合然后进行敏感性分析,存在的问题是设计变量非常多,拟合模型非常复杂,试验次数与计算工作量非常大。本文在拟合前首先采用敏感性分析方法对设计变量进行过滤,将对指标影响很弱的变量剔除,可以降低设计复杂度,提高模型拟合的精度和效率。具体方式是每次选取一个设计变量而固定其他设计变量,对其进行敏感性测试^[11],依次测试所有设计变量对各个性能指标的灵敏度,然后对比不同设计变量的灵敏度,选出灵敏度很弱的变量作为固定运行参数,以减少设计变量提高效率。按照表2中

的设计变量初始值和最小增减量,对每个设计变量的各个性能指标进行灵敏度测试,各个性能指标的值归一化处理后呈现在绝对值[0,1]范围内,结果如图4所示,可以看出:AGV加速度和缓冲容量对四大性能指标几乎没有影响,其他4个设计变量有如下影响:AGV数量、速度与AGV拥堵次数、机床利用率、产量呈正相关;AGV数量、速度、卸载时间、装载时间皆与AGV利用率呈负相关;AGV卸载时间、装载时间与机床利用率、产量呈负相关;AGV卸载时间、装载时间与AGV拥堵次数呈正相关。据此,设计参数被分为4个可变参数和2个固定参数,如表2所示。

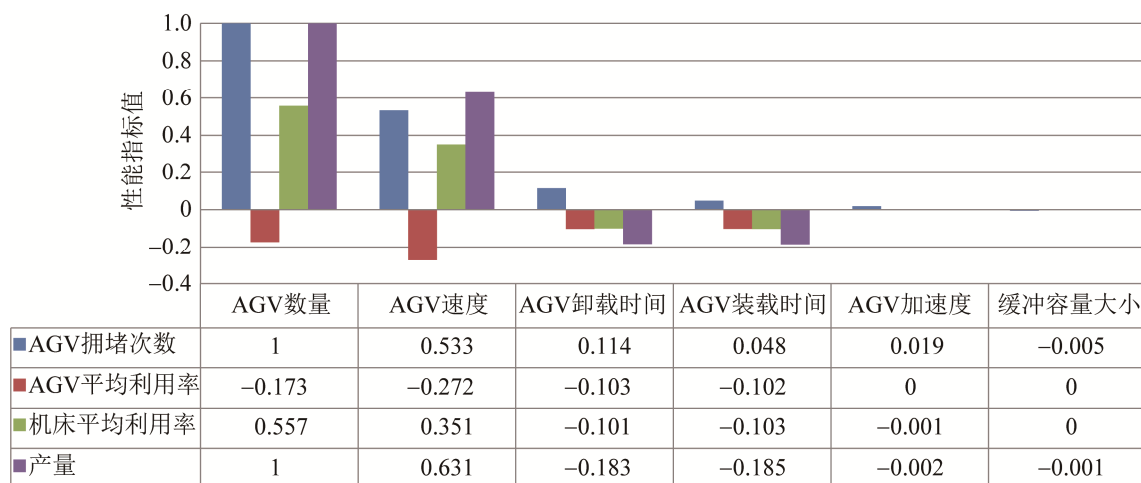


图4 设计参数对性能指标的灵敏度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of design parameters to performance indicators

3 响应面仿真代理模型的建立

响应面法(response surface methodology, RSM)是文献[15]提出的一种优化方法,采用析因试验方法获得试验值,用二阶多项式或其他数学模型来拟合目标函数和约束函数,并利用目标函数来预测非试验点以及寻找设计优化点。采用响应面方法进行优化的有:文献[14]基于响应面法构建了立式加工中心的整机动静态多目标优化模型,并采用多目标遗传算法进行求解,方法具有较高的精度。文献[16]采用多项式响应面模型和遗传算法相结合,进行翼型气动优化设计,优化效率大大提

高。文献[17]采用均匀试验和逐步回归分析,建立喷丸指标与喷丸工艺参数间的二阶响应面模型,验证了基于响应面模型的应力场数值模拟方法完全可以应用于喷丸成形数值模拟分析。文献[18]为了提高柔性机构可靠性分析的精度和效率,将智能算法与可靠性分析的极值响应面法相结合,提出动态可靠性分析的先进极值响应面法,在保证计算精度的前提下,大大提高了计算速度。文献[19]将响应面和字典目标规划方法结合,对集成电路包装车间的产量和节拍时间进行优化。文献[20]将仿真和响应面结合,对半导体晶圆制造系统调度中的动态瓶颈调度策略进行评估和优化。文

献[21]为了最小化多机易故障制造系统的长期平均库存和积压成本, 提出了一种将随机最优控制理论、离散事件仿真、试验设计和自动响应面相结合的方法, 用来控制不同机器的生产速率和生产策略。

响应面方法具有易于构造和便于求解的优点, 本文采用响应面数学模型实现了对 AGV 系统仿真模型的代理描述, 按照 4 个性能指标分别建立 4 个响应面拟合函数, 组成 AGV 系统优化配置问题的多目标优化数学模型。响应面方法一般采用二阶多项式数学模型构建响应面模型, 其具体表达式为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

式中: y 为响应变量; $\beta_i (1 \leq i \leq k)$ 为主效应系数; $\beta_{ii} (1 \leq i \leq k)$ 为平方效应系数; $\beta_{ij} (1 \leq i, j \leq k)$ 为交互效应系数; $x_i, x_j (1 \leq i, j \leq k)$ 为第 i, j 个输入变量; k 为设计变量个数; β_0 为常量; ε 为表示拟合误差的随机值。

试验点的选择在响应面的构建过程中起着重要作用, 它直接影响着响应面构造的精度, 不合理的试验点甚至导致构造不出响应面。文中试验点的选择采用 CCD 方法, 它能以最少的试验次数来获得关于试验变量和试验误差的诸多信息。CCD 试验点由以下部分组成: ① 析因点, 最多 2^k 个, 用于估计线性项和交互项。② $2k$ 个轴向点, 用于估计曲性二次项。③ 1 个中心点重复多次, 用于提供一致精度及纯误差项的估计。通过 CCD 试验方法确定试验点, 通过仿真实验获得响应值, 表 3 给出了试验点和响应值。其中, x_1, x_2, x_3, x_4 分别为 AGV 数量、速度、装载时间和卸载时间, y_1, y_2, y_3, y_4 分别为 AGV 拥堵次数、AGV 利用率、加工中心利用率和 10 天的产量。

采用式(2)对响应值进行拟合, 二阶多项式数学模型的系数用最小二乘法回归分析即可求得。拟合完成的二阶模型为

$$f(1) = \lg y_1 = 0.1606 + 1.2669x_1 + 1.1020x_2 - 0.0157x_3 + 0.01160x_4 - 0.0952x_1x_2 + 0.0046x_1x_3 + 0.0022x_1x_4 + 0.00419x_2x_3 - 0.00214x_2x_4 - 0.0029x_3x_4 - 0.1341x_1^2 - 0.1576x_2^2 + 0.0017x_3^2 + 0.0012x_4^2 \quad (3)$$

$$f(2) = y_2 = 0.9933 + 0.2022x_1 + 0.0207x_2 - 0.0336x_3 - 0.0343x_4 - 0.0575x_1x_2 + 0.0031x_1x_3 + 0.0031x_1x_4 + 0.0014x_2x_3 + 0.0014x_2x_4 + 0.00003x_3x_4 - 0.0309x_1^2 - 0.0088x_2^2 + 0.0006x_3^2 + 0.0007x_4^2 \quad (4)$$

表 3 CCD 试验设计和响应值

Table 3 CCD test design and response values

No	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4
1	2	1.5	7.5	7.5	8 773	0.799 512	0.445 52	3 500
2	4	1.5	7.5	7.5	5 120	0.765 543	0.812 203	6 380
3	2	2.5	7.5	7.5	1 824	0.705 768	0.648 24	5 092
4	4	2.5	7.5	7.5	5 886	0.523 901	0.811 137	6 374
5	2	1.5	12.5	7.5	1 047	0.748 572	0.417 823	3 281
6	4	1.5	12.5	7.5	6 451	0.738 016	0.813 193	6 388
7	2	2.5	12.5	7.5	2 118	0.641 999	0.589 434	4 630
8	4	2.5	12.5	7.5	8 985	0.514 027	0.811 232	6 373
9	2	1.5	7.5	12.5	1 028	0.749 232	0.417 263	3 276
10	4	1.5	7.5	12.5	6 265	0.738 452	0.812 872	6 386
11	2	2.5	7.5	12.5	1 998	0.642 495	0.590 785	4 641
12	4	2.5	7.5	12.5	7 667	0.514 716	0.811 775	6 379
13	2	1.5	12.5	12.5	1 103	0.704 424	0.392 879	3 084
14	4	1.5	12.5	12.5	6 601	0.697 34	0.778 196	6 113
15	2	2.5	12.5	12.5	2 063	0.589 703	0.541 42	4 253
16	4	2.5	12.5	12.5	8 923	0.504 503	0.811 642	6 379
17	2	2	10	10	1 525	0.692 047	0.510 053	4 007
18	4	2	10	10	7 048	0.613 785	0.812 635	6 386
19	3	1.5	10	10	2 944	0.746 891	0.622 647	4 890
20	3	2.5	10	10	5 649	0.616 453	0.812 066	6 380
21	3	2	7.5	10	4 370	0.715 551	0.794 983	6 245
22	3	2	12.5	10	4 795	0.660 532	0.734 758	5 771
23	3	2	10	7.5	4 345	0.715 068	0.795 499	6 249
24	3	2	10	12.5	4 751	0.661 539	0.734 395	5 769
25	3	2	10	10	4 456	0.687 192	0.763 956	6 002
26	3	2	10	10	4 545	0.687 244	0.763 495	5 998
27	3	2	10	10	4 424	0.687 147	0.764 593	6 007
28	3	2	10	10	4 475	0.687 277	0.763 663	5 998
29	3	2	10	10	4 445	0.686 992	0.764 774	6 007
30	3	2	10	10	4 444	0.687 087	0.764 416	6 004

$$f(3) = 1/\sqrt{y_3} = 3.4094 - 0.9126x_1 - 1.0589x_2 + 0.0461x_3 + 0.0468x_4 + 0.1204x_1x_2 - 0.0047x_1x_3 - 0.0047x_1x_4 - 0.00007x_2x_3 - 0.0004x_2x_4 + 0.0002x_3x_4 + 0.1021x_1^2 + 0.1432x_2^2 - 0.0014x_3^2 - 0.0014x_4^2 \quad (5)$$

$$f(4) = 10000/y_4 = 9.4239 - 3.0812x_1 - 3.5754x_2 + 0.14408x_3 + 0.1467x_4 + 0.4386x_1x_2 - 0.0176x_1x_3 - 0.0176x_1x_4 - 0.0028x_2x_3 - 0.0039x_2x_4 + 0.0007x_3x_4 + 0.3413x_1^2 + 0.4675x_2^2 - 0.0035x_3^2 - 0.0035x_4^2 \quad (6)$$

拟合模型式(3)~(6)需要采用 F 检验来检验模型的显著性, p 值 <0.05 说明拟合模型是显著的, 即模型是充分代表了真实函数的, 没有偏倚误差。采用相关系数 R^2 (R-Squared)和调整后的相关系数 Ra^2 (Adj R-Squared)对响应面的精度进行评估, 反映了响应面符合给定数据的程度, 大小在 $[0,1]$ 之间, 其值越接近于1表示拟合的效果越好。

表4给出了二次响应面模型的 F 值、 p 值以及相关系数 R^2 值等拟合度量值, 从中可以看出, 响应面模型是显著的, 总体精度可以满足要求。

表4 响应面拟合度量值

Table 4 Values of response surface fitting degree

度量值	$f(1)$	$f(2)$	$f(3)$	$f(4)$
R -Squared	0.997 506	0.991 576	0.997 775	0.998 859
Adj R -Squared	0.995 178	0.983 714	0.995 699	0.997 795
Pred-Squared	0.984 839	0.947 048	0.988 658	0.994 566
Adeq Precision	68.845 79	44.510 09	71.908 1	102.106 8
F	428.5	126.12	480.53	938.34
p -value	$<0.000\ 1$	$<0.000\ 1$	$<0.000\ 1$	$<0.000\ 1$

4 基于 NSGA-II 的多目标优化

经过检验的4个函数即式(3)~(6)一起组成了AGV系统优化配置的多目标优化数学模型。将多目标优化问题转为单目标问题进行求解是过去常用的方法, 如约束法、线性加权法、理想点法, 实质上是单目标优化, 不能完全反映问题的本质。

而基于 Pareto 解集的多目标优化方法首先获得 Pareto 解集, 然后根据设计要求或实际经验, 从解集中选择满意的最优解, 这样更能客观地反映多目标优化问题的实质。现在较多的是采用遗传算法求解, 非支配解排序遗传算法(NSGA)是一种有效求解 Pareto 解集的多目标优化方法。在此基础上, 文献[22-23]进一步改良提出了受控精英遗传算法 NSGA-II (NSGA 的变种), 除了能够快速排序非支配解, 还能控制精英数量, 保持种群多样性, 能够更好地收敛到最优帕累托前沿, 被认为是目前最有效的多目标优化方法之一。

本文采用 NSGA-II 来寻求 AGV 系统优化配置的多目标优化 Pareto 解集, 其流程如图5所示。设置种群大小50, 最大进化代数100, 停止代数100, 最优个体系数0.35, 适应度函数偏差 $1e-4$ 。针对4个目标函数, 运用此算法获得了 Pareto 解集, 考虑性能指标重要度按照产量、机床利用率、AGV 利用率和拥堵次数依次递减, 经过对比不同的 Pareto 解, 从中选择最优解排序, 如表5所示。

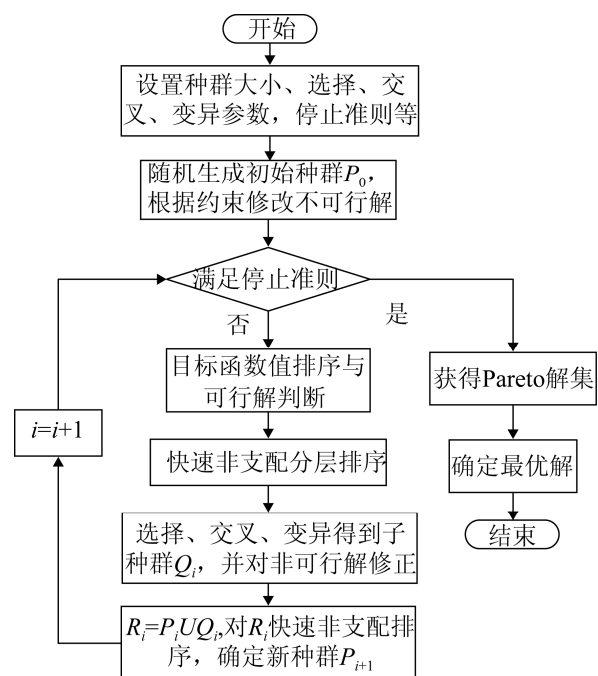


图5 NSGA-II 求解多目标优化流程

Fig. 5 Flow chart of multi-objective optimization by NSGA-II

表 5 AGV 系统多目标优化配置最优解集
Table 5 Optimal solution set of AGV system multi-objective optimization configuration

序 号	数量 (个)	速度/ (m/s)	装载 时间/s	卸载 时间/s	拥堵 次数	AGV 利用率	机床 利用率	产量 (件)
1	4	1.72	5.02	5.05	4 737	0.760	0.940	7 428
2	3	1.84	5.10	5.16	3 243	0.820	0.907	7 172
3	4	1.55	5.03	5.00	4 345	0.799	0.908	7 148
4	4	1.50	5.00	5.00	4 206	0.812	0.896	7 037
5	4	1.44	5.02	5.09	4 070	0.823	0.878	6 880
6	3	1.73	5.32	5.20	3 045	0.835	0.864	6 763
7	4	1.32	5.04	5.02	3 733	0.851	0.842	6 575
8	4	1.28	5.06	5.02	3 627	0.860	0.829	6 463
9	3	1.58	5.04	5.12	2 725	0.865	0.824	6 380
10	2	2.91	5.00	5.00	1 733	0.722	0.792	6 325

5 结论

本文针对制造系统中 AGV 系统的优化配置问题,提出了一种将系统仿真与数学解析相结合的多目标优化方法。该方法综合运用了离散事件仿真、灵敏度分析、析因试验、响应面方法和多目标遗传算法,充分利用了各种方法的优点:离散事件仿真适用于处理复杂动态随机系统,敏感性分析方法能够析出重要设计参数,响应面法可用较少的试验次数拟合数学模型,NSGA-II 能够高效求解多目标优化问题。本文方法具有原理简单、适应面宽、快速易行,且精度高等特点,对于 AGV 系统的优化配置问题具有一定的普遍适应性,适用于制造系统、物流系统及自动化集装箱码头等需要运用 AGV 系统的场合。

不过,响应面方法的应用,应注意合理选择设计变量区间^[16]。如果设计区间较小,响应面模型精度很高,但最优解可能不在设计区间内,结果可能是非最优解;设计区间过大,响应面模型精度下降导致结果数值偏差大,在实际应用中应该予以充分考虑。

参考文献:

- [1] 付建林, 张恒志, 张剑, 等. 自动导引车调度优化研究综述[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(9): 1664-1675.
Fu Jianlin, Zhang Hengzhi, Zhang Jian, et al. Review on

- AGV Scheduling Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(9): 1664-1675.
- [2] Johnson M E, Brandeau M L. An Analytic Model for Design of a Multivehicle Automated Guided Vehicle System[J]. Management Science (S0025-1909), 1993, 39(12): 1477-1489.
- [3] Rajotia S, Shanker K, Batra J L. Determination of Optimal AGV Fleet Size for an FMS[J]. International Journal of Production Research (S0020-7543), 1998, 36(5): 1177-1198.
- [4] Arifin R, Egbelu P J. Determination of Vehicle Requirements in Automated Guided Vehicle Systems: a Statistical Approach[J]. Production Planning & Control (S0953-7287), 2000, 11(3): 258-270.
- [5] 黄一钧. 车身车间 AGV 物料搬运系统小车数量配置规划[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(4): 156-162.
Huang Yijun. Planning on the Number of Vehicle Requirement for Body Shop AGV Material Handling System[J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(4): 156-162.
- [6] Chawla V K. Automatic Guided Vehicles Fleet Size Optimization for Flexible Manufacturing System by Grey Wolf Optimization Algorithm[J]. Management Science Letters (S2417-2424), 2018, 8(2): 79-90.
- [7] 宋绍京, 羊铭雨, 孙磊, 等. AGV 数量规划及电池充电策略研究[J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2019, 42(6): 73-77.
Song Shaojing, Yang Mingyu, Sun Lei, et al. Research on AGV Quantity Plan and Battery Charging Strategy[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 42(6): 73-77.
- [8] Gopal S L, Kasilingam R G. A Simulation Model for Estimating Vehicle Requirements in Automated Guided Vehicle Systems[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 1991, 21(1-4): 623-627.
- [9] 陶翼飞, 陈君若, 刘美红, 等. 柔性制造环境下 AGV 车辆规模仿真优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(5): 1044-1048.
Tao Yifei, Chen Junruo, Liu Meihong, et al. Study of AGV Fleet Size in Flexible Manufacturing Environment Based on Simulation Optimization[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(5): 1044-1048.
- [10] 张远春, 范秀敏, 驹田邦久. 基于仿真优化的多种类型 AGV 数量配置优化方法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(14): 1680-1685.

- Zhang Yuanchun, Fan Xiumin, Komada Kunihisa. Multi-Types AGVs Quantity Configuration Optimization Based on Simulation Optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(14): 1680-1685.
- [11] Um I, Cheon H, Lee H C. The Simulation Design and Analysis of a Flexible Manufacturing System with Automated Guided Vehicle System[J]. Journal of Manufacturing Systems (S0278-6125), 2009, 28(4): 115-122.
- [12] Yifei T, Junruo C, Meihong L, et al. An Estimate and Simulation Approach to Determining the Automated Guided Vehicle Fleet Size in FMS[C]// 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology. Chengdu: IEEE, 2010: 432-435.
- [13] Mousavi M, Yap H J, Musa S N, et al. A Fuzzy Hybrid GA-PSO Algorithm for Multi-objective AGV Scheduling in FMS[J]. International Journal of Simulation Modelling (S1726-4529), 2017, 16(1): 58-71.
- [14] 姜衡, 管贻生, 邱志成, 等. 基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 125-133.
- Jiang Heng, Guan Yisheng, Qiu Zhicheng, et al. Dynamic and Static Multi-objective Optimization of a Vertical Machining Center Based on Response Surface Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 125-133.
- [15] Box G, Wilson K. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions[J]. Journal of the Royal Statistical Society (S1369-7412), 1951, 13(1): 1-45.
- [16] 李沛峰, 张彬乾, 陈迎春. 基于响应面和遗传算法的翼型优化设计方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(3): 395-401.
- Li Peifeng, Zhang Binqian, Chen Yingchun. An Effective Transonic Airfoil Optimization Method Using Response Surface Model (RSM)[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(3): 395-401.
- [17] 田硕, 尚建勤. 基于均匀设计的喷丸指标响应面模型建立及应用[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(4): 260-267.
- Tian Shuo, Shang Jianqin. Establishment and Application of Response Surface Model for Shot Peening Index Based on Uniform Design[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(4): 260-267.
- [18] 张春宜, 宋鲁凯, 费成巍, 等. 柔性机构动态可靠性分析的先进极值响应面方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 47-54.
- Zhang Chunyi, Song Lukai, Fei Chengwei, et al. Advanced Extremum Response Surface Method for Dynamic Reliability Analysis on Flexible Mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 47-54.
- [19] Yang T, Tseng L. Solving a Multi-Objective Simulation Model Using a Hybrid Response Surface Method and Lexicographical Goal Programming Approach—A Case Study on Integrated Circuit Ink-marking Machines[J]. Journal of the Operational Research Society (S0160-5682), 2002, 53(2): 211-221.
- [20] Zhang H, Jiang Z B, Guo C T. Simulation-based Optimization of Dispatching Rules for Semiconductor Wafer Fabrication System Scheduling by the Response Surface Methodology[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2009, 41(1/2): 110-121.
- [21] Sajadi S M, Esfahani M M S, Sorensen K. Production Control in a Failure-Prone Manufacturing Network Using Discrete Event Simulation and Automated Response Surface Methodology[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2011, 53: 35-46.
- [22] Deb Kalyanmoy. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms[M]. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2001.
- [23] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation (S1089-778X), 2002, 6(2): 182-197.