

上海大学

硕士学位论文

基于改进SLP和遗传算法的车间设施布局设计与优化

姓名：汪一第

申请学位级别：硕士

专业：机械制造及其自动化

指导教师：米智伟

20090101

## 摘 要

车间设施布局是工厂布局的重要内容之一，对整个企业生产系统运转的通畅程度有直接影响，而且，布局的优劣还直接决定着产品质量、生产率和经济效益。

本文首先阐述了论文的研究背景和研究方向，并对国内外关于车间设施布局问题的相关理论和求解方法进行综述。然后针对目前研究中的不足之处，提出了一种基于改进 SLP 和遗传算法的车间设施布局设计与优化的方法，该方法避免了传统方法过于依赖经验、约束过多及复杂难解的缺点。接着本文根据案例车间的特点，讨论了案例车间布局中存在的问题，给出布局规划的框架流程。本文以该框架为指导，本着理论与实践统一的基本立意，在对车间生产物流进行详细分析的基础上，依据改进后的 SLP 理论确定出初步的车间设施布局方案。通过对初始种群产生技术的改进，把 SLP 形成的初始方案作为遗传算法的初始种群的部分染色体，然后利用遗传算法突出的寻优能力，采用自动换行技术、PMX 交叉操作和邻域搜索技术等提高了遗传算法的全局和局部搜索能力，最终实现对案例车间设施布局设计与优化工作。

**关键词：** SLP    遗传算法    车间设施布局    设计与优化

## ABSTRACT

The workshop facility layout is one of the important content in the factory layout. It plays a key role in the operation of production system, and a good facility layout improves directly the products quality, the productivity and the economy efficiency.

Firstly, the background and the orientation of our research are summed up, and then the correlative theory of workshop facility layout problem and the methods of solution are presented. Aiming at the shortcomings in the current research, a method of the design and optimization based on improved Systematic Layout Planning and Genetic Algorithm is provided. This method avoids the demerit of the traditional way, such as relying excessively on experience, having over-restriction and being complicated. Secondly, according to the characteristics of case workshop, the problems in the workshop are discussed, and the frame of layout planning has been worked out. Directed by the frame and based on the unification of theory and practice, the logistics strength in the workshop is analyzed and calculated, and then the preliminary solutions based on the theory of improved Systematic Layout Planning are provided. Thirdly, the technology of initial population is improved in order to generate initial population combined by random and the preliminary solutions provided by SLP. Then, the global and partial searching ability is improved by using the methods of automatic new line technology, PMX crossover and contiguous search mutation. Finally, the feasibility and efficiency of this layout method are showed by an application of a practical problem.

**Keywords:** Systematic Layout Planning      Genetic Algorithm

Workshop Facility Layout      Design and Optimization

## 原创性声明

本人声明：所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已发表或撰写过的研究成果。参与同一工作的其他同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名： 汪一平 日 期： 2009.3.23

## 本论文使用授权说明

本人完全了解上海大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留论文及送交论文复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名： 汪一平 导师签名： 杨智伟 日 期： 2009.3.23

# 第一章 绪论

## 1.1 课题来源及车间设施布局问题描述

本课题来源于浙江乐清市金高高压开关厂导电元件机加工车间设施布局项目。布局问题涉及范围广泛，从纵向层次定位而言，依次可分为布局设计—工厂布局—车间设施布局—单一设备人机结合布局，本文属于车间设施布局问题。

### （1）布局设计描述

从一般意义上说，布局设计<sup>[1]</sup>就是将一些物体按一定的要求合理放置在一个空间内，它是一个涉及参数化设计、人工智能、图形学、信息处理、优化、仿真等技术的交叉学术领域，实践证明它还是一个复杂的组合优化问题。它存在于现实生活的许多行业和方面，如：航空航天工业中，航天器上各种仪器的布置摆放问题；造船、汽车等交通工具中，内部各种不同形状、大小的物体放置问题；集成电路设计中，各种元件的合理放置问题；建筑设计中，各房间的合理布局及厂房、设备等布局问题；机械设计领域中，各种基于装配的机床布局设计问题。

布局设计具有广泛的应用背景，布局结果的好坏对整个行业生产的合理性、经济性、安全性等都有重大的影响。

### （2）工厂布局描述

工厂布局设计是布局设计的一个重要分枝，主要是合理的安排工厂各个组成部分，包括生产车间、辅助生产车间、仓库、动力站、办公室、露天作业场地等各种作业单位和运输线路、管线、绿化设施的相互位置，同时解决物料的流向和流程、厂内外运输的连接及运输方式等。

工厂布局主要包括选择最佳厂址（仅限于新工厂布局）、工厂全域的总体布局、车间内部设施布局、建设（包括建设的计划、申请批准及做实际必要的搬迁）等四个阶段。

### （3）车间设施布局描述

车间设施布局是工厂布局中的一个重要环节，是在工厂选址和全域总体布

局完成后，对具体车间生产系统进行详细布局的过程。

设施（Facilities）的英文含义是“使工作便利的工具、环境或设备”。设施的具体含义取决于研究对象系统的物理环境，对不同的系统可以有不同的解释。对车间系统而言，设施意指设备及其它辅助服务部门（办公室、生活服务部门等）。

车间设施布局就是根据的生产任务，在已确定的车间空间场地内，合理安排车间各组成部分及其各种设备、装置、辅助服务部门的具体位置，使设备、人员与物料的移动做最适当的分配和最有效的组合，既保证生产活动有效进行，又节省生产费用，并为职工提供一个安全、舒适、美观的工作环境。

车间设施布局作用的具体表现可以概括为以下几个方面：首先，车间设施布局是针对车间生产系统的全局布局设计，对企业投产后的利润与效益产生巨大的影响，它能够简化加工过程，有效的利用人员、设备、空间和能源，缩短了生产周期，是提高企业竞争力的重要措施；其次，设施布局设计被认为是科学管理企业的开端，是企业管理的蓝图，由于它最大限度的减少物料的搬运，降低了工人的劳动强度，所以也是提高劳动生产率的重要措施；再次，布局为职工提供了方便、舒适、安全的工作环境，调动了工人工作的积极性；最后，在现代市场与技术条件下，固定资产的投资循环周期越来越短，设备更新越来越快，在美国每年都有四分之一的工厂需要更新改造，因此，车间设施布局是企业快速响应市场不可缺少的手段。

由此可见，车间设施布局的设计方案，直接影响到整个生产系统的运行，因此，对于布局方案是否优良的评价也至关重要。一个好的车间设施布局可以用埃普尔(Apple)的“良好布局标准”来衡量<sup>[2]</sup>。“良好布局标志”主要包括：围绕某一预先计划好的布局设计建造建筑物；通道笔直、清楚、有标记；保持最低限度的后退倒行；有关作业紧靠在一起；生产时间可以预测；安排进度计划的困难最小；最少量的在制品；条件改变时容易调整，具有高柔性；扩展计划时容易编制；实际加工时间对生产总时间之比最大；检查最少且质量最好；材料搬运距离最短；手工搬运最少；无不必要的材料重复搬运；材料放在负载单元中搬运；作业之间的搬运最少；材料能及时传递给工人；材料能从工作区

域及时搬开；由间接工人来做材料搬运工作；有秩序的搬运和储存材料；工人能以最高效率工作等。

#### （4）单一设备人机结合布局描述

单一设备人机结合布局运用人机工程学，将“人体科学”与“工程技术”有机结合，利用人体测量学、生理学、心理学等科学研究手段和成果，把人体特性、能力和活动限度等方面数据用于系统及所处环境的布局设计中去，以寻求人、设备、环境三者的最佳结合参数，实现高度协调统一，使操作者能安全、舒适和高效率的工作。单一设备人机结合布局设计主要包括：宜人化设计、安全性设计和舒适性设计等方面的内容<sup>[3]</sup>。

本课题主要研究布局设计中的车间设施布局问题，针对金高高压开关厂导电元件机加工车间，探索合理的设计方法，以寻找车间设施布局优化的最佳方案。

## 1.2 课题的研究意义

### 1.2.1 课题研究的理论意义

在全球制造业竞争激烈的今天，制造业的发达水平及增长速度在很大程度上决定着一个国家的总体经济状况和发达程度；当今经济竞争已经成为世界各国竞争的焦点和世界发展的重要推动力。与此同时，消费者的需求也在日新月异的变化，这给制造业带来了很大的机遇和挑战。对制造业而言，每个企业都面临着持续多变、不可预测的全球化市场竞争，为了在日益激烈的市场竞争中生存下去，很多企业不得不顺应市场的变化而做出相应的产品结构调整，这就牵涉到制造资源的安排和管理，即必须对生产系统进行相应的调整和优化。一个优良的生产系统对于增强企业的竞争力来说是至关重要的，其中，布局是一项关键性的工作。

在中华人民共和国科学技术部公布的《国家高技术研究发展计划（863计划）先进制造技术领域2007年度专题课题申请指南》中，车间布局与生产线规划方法被列入制造系统建模与优化方向的重要课题。

由此可见，对于车间布局的研究仍是目前制造技术领域的一个热点和难点。

车间布局的优劣直接决定着产品质量、生产率和经济效益。一个好的车间布局和一个较差的车间布局相比较，两者在投资方面可能相差无几，但良好的车间布局可以提高生产率，改进质量，消除或减少间接劳动成本，简化物流。国内外的资料表明，在工厂的生产活动中，从原材料进厂到成品出厂，物料真正处于加工检验的时间只占生产周期的5%—10%，而90%—95%的时间都处于停滞和搬运阶段，这严重影响了企业经济效益的提高。在制造业中，总经费的20%—50%是物料搬运费用，而优良的平面布置可使这一费用至少减少10%—30%<sup>[4]</sup>，也为企业赢得效益和收益，从而在激烈的市场竞争中处于不败之地。

### 1.2.2 课题研究的工程意义

浙江乐清市金高高压开关厂是传统制造企业的典型代表，在企业发展过程中，由于市场的变化、生产计划的调整、新设备的添加和旧设备的报废、淘汰等因素，要求各生产车间设施布局需要进行重新调整。在此背景下，企业制定了一系列的战略改造部署，采用科学布局方法，分阶段对所有车间及企业全局进行重新布局，以适应生产需求、响应市场。该厂的导电元件机加工车间是首批重组优化的试点车间。

通过对该车间调研，发现其物流状况及车间设施布局存在许多问题，集中表现在：布局方式落后、物流线路长，普遍存在倒流、交叉现象，工序间物流强度与设备的布局距离安排不合理，不符合物流距离短的要求，在制品的停滞、等待时间长等。

本课题通过对该车间设施布局存在的问题进行分析，按科学的方法对车间设施进行布局优化，使车间实现物流顺畅、运输线路最短、在制品停滞最少，从而达到提高生产效率、缩短生产周期和降低生产成本的目的。

## 1.3 车间设施布局规划领域的发展历程及研究现状

### 1.3.1 车间设施布局规划领域的发展历程

从最初原始作坊中无意识的布局到现在融合多学科的科学布局，车间设施布



局规划自始至终伴随着工业的发展而不断完善,其研究的发展历程大体可以分为如下三个阶段:

(1) 二十世纪初至三十年代,以 Taylor 的科学管理方法和 Ford 的流水线生产方法为标志,布局规划问题进入了萌芽期。现代科学管理之父的 Taylor 于 1911 年出版了著作《科学管理的原理》,标志着人们开始从经验管理向科学管理的迈进,加速了工业化的进程,激发了研究生产管理的热潮。二十世纪初, Taylor 和 Gantt 等在进行工作研究、时间研究、生产控制时已开始关注制造厂的设计工作,认识到工厂设计对工厂效益有重大影响,此时,他们的注意力还局限于特定工作场所内工人的活动上,称为操作法工程。目标主要局限于设备的布置上。Gantt 的工作进度图标和 Ford 的移动装配线给生产管理研究注入了新的激情,数字和统计在工业生产管理中的应用也有了长足的发展,人们开始认识到物流在生产管理及工厂设计中的意义,设施布局已在理论及实践上准备迎来一次蜕变。

(2) 二十世纪四十年代至六十年代,布局规划问题成为具有独立的学科方向和技术体系的学科。1961 年美国的 Muther 提出了极具代表性的系统布置设计理论;随着计算机技术的发展,以 Moore 等为代表的一批设施规划与设计学者,研究应用计算机技术进行平面布置及其优化的问题,并产生了许多用高级语言写成的平面布置程序,如用于新建设施的 CORELAP、ALDEP 程序和用于改建布置的 COFAD、CRAFT 程序,形成了计算机辅助设施布局方法,为生产系统的新建和重新布局提供了强有力的支持和帮助,节省了大量人力财力。国内在 80 年代以后引进 Muther 的 SLP(Systematic Layout Planning)理论,收效显著。

(3) 二十世纪七十年代后,计算机在生产管理中的应用标志着设施布局规划进入了现代发展阶段。在这个时期,涌现出大量的解决设施布局规划的方法和技术手段,可以归纳为以下几类:二次分配问题 QAP (Quadratic Assignment Problem) 模型、二次布置占有 QSP (Quadratic Set Covering Problem) 模型、线性整数规划模型、混合整数规划模型和图论模型。

在该阶段初期,设计人员多采用由 Koopmans 和 Beckman<sup>[5]</sup>提出的 QAP 模

型解决设施布局规划问题，并被广泛的应用于城市规划、计算机控制面板布局及配线布局等多个领域。但 QAP 模型解决的是一个布局问题的特例，因为它假定所有的布局实体都是具有相互关系的等面积实体，且所有可能的放置点都是事先指定的，实体和放置点一一对应。另外，Kusiak 和 Heragu<sup>[6]</sup>等人对 QAP 模型进行了改进，将每个布局实体都规划成若干个同样大小的块，用以解决不等面积实体的布局问题。但由于该方法增加了布局实体的形状约束，因此求解效率较低<sup>[7]</sup>。

1976 年，Sahni 和 Gonzalez<sup>[8]</sup>证明设施布局规划问题是一个 NP 完全问题，此后研究人员多采用近似优化方法获得问题的近似最优解，这些方法可以大致归纳为以下基本类别：构造法、改进法、图论法、模拟退火算法、遗传算法、混合法等。

### 1.3.2 车间设施布局规划领域的研究现状

近几年，国内外高校和研究机构针对车间设施布局规划问题进行了大量深入的研究，并取得了一定的成果。目前，就车间设施布局规划的方法而言，主要可以分为以下三类：

#### （1）启发式方法

启发式方法是以布局设计人员经验为基础，借助一定的计算方法和计算工具，以寻求布局方案较优解。该方法的典型代表是 Muther 提出的 SLP(Systematic Layout Planning)法。SLP 是将研究工厂布局问题的依据和切入点归纳为五个基本要素：产品、产量、生产路线、辅助部门和时间。前二个基本要素是一切其他特征或条件的基础。在上述各要素充分调查研究并取得全面、准确的各项原始数据的基础上，通过绘制各种表格和图形，有条理地细致分析和计算，最终求得工程布局的最佳方案。它是一种条理性很强、物流分析与作业单位相互关系密切程度分析相结合、求得合理布局的技术。该方法标志着系统布局设计由定性阶段向定量阶段的转变。因其实用性较强且高度系统化的特点，在系统布局领域具有方法论的地位<sup>[9]</sup>。

目前, 在应用启发式方法进行设施布局规划的研究方面有代表性的探索有: University of Cincinnati 的 Hammad 提出一种对传统 U 型流水线进行改进的启发式布局方法<sup>[10]</sup>; National Cheng Kung University 的 Taho Yang 等基于 TOPSIS 法在设施布局中的多目标决策分析<sup>[11]</sup>; 北京科技大学程国全应用 SLP 实现化工厂总平面布置设计<sup>[12]</sup>; 上海交通大学邓静等基于 SLP 理论在精密铸造车间的布局研究<sup>[13]</sup>; 武汉科技大学唐秋华等提出一种 SLP 和 Flexsim 软件相结合解决车间重构的方法<sup>[14]</sup>; 北京科技大学琚科昌等基于 SLP 在大型流程型制造企业设施布局中的应用研究<sup>[15]</sup>; 清华大学刘阶萍等利用可重组制造系统模型解决车间布局问题的研究<sup>[16]</sup>。

## (2) 现代优化计算方法

现代优化计算方法主要包括禁忌搜索算法、模拟退火算法、遗传算法、蚁群优化算法和人工神经网络算法等。这些算法都以人类、生物的行为方式或物质的运动形式为背景, 经过数学抽象建立算法模型, 通过计算机的计算来求解组合最优化问题。目前, 遗传算法在车间设施布局规划领域的应用最为广泛。

遗传算法 (Genetic Algorithm) 是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的计算模型, 是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法, 它是由 The University of Michigan 的 Holland 教授于 1975 年首先提出来的, 并出版了颇有影响的专著《Adaptation in Natural and Artificial Systems》, GA 这个名称才逐渐为人所知, Holland 教授所提出的 GA 通常为简单遗传算法。随着遗传算法的普及和应用, 在简单遗传算法的基础上, 又产生了多种变形的遗传算法, 比如混合遗传算法、并行遗传算法等。这些算法在解决实际问题的过程中显示了其良好的优化能力和适应能力。

近些年, 国内外在应用现代优化计算方法进行设施布局规划研究方面有代表性的探索有: Lebanese American University 的 Zouein 等提出了利用遗传算法解决不等面积设施布局问题<sup>[17]</sup>; Hong Kong Polytechnic University 的 Heng Li 等采用改进的遗传算法实现设施布局优化的研究<sup>[18]</sup>; 中国科学技术大学齐继阳

等提出将增加记忆功能的模拟退火算法应用于布局设计<sup>[19]</sup>；上海交通大学李岩等基于遗传算法和嵌套布局方式处理柔性制造系统设施布局的研究<sup>[20]</sup>；四川大学经小川等采用改进遗传算法解决机器布局问题<sup>[21]</sup>；华中科技大学周亦波等应用模拟退火算法对成组车间设施布局优化的研究<sup>[22]</sup>；南京航空航天大学陈希等针对布局设计中遗传算法的高效性和有效性分析<sup>[23]</sup>；中国科学技术大学曾议等基于群智能算法的设备布局离散优化研究<sup>[24]</sup>。

### （3）计算机辅助设施布局及仿真软件

目前市场上主要的计算机辅助设施布局及仿真软件主要有 STORM、FACTORY-CAD、PROMODEL、FACTORY-FLOW、FACTOR/AIM 和 ARENA 等，它们能够根据输入的生产数据和物料搬运数据，生成一个与实际相符的物流路径，自动生成布局图，并清晰的表示出总的移动距离、物流强度和发生的成本，以此来辅助设计人员实现车间设施布局的规划。

### 1.3.3 目前车间设施布局规划方法的不足之处

应用启发式方法进行车间设施布局规划时，设计人员主要以经验为启发要素来完成设计工作。以 SLP 为例，虽然该方法简单易行、实用性较强且高度系统化，但是，它也存在本身固有的一些缺陷，主要是由于在绘制作业单位位置相关图和面积相关图时，需不断的手工调整和修正原有方案以求符合相应条件，因此，布局方案的最终结果受设计人员主观经验、自身知识及能力等多种因素影响，而且当车间规模较大、设备数量较多时，使用 SLP 进行手工布局十分繁琐，甚至无法完成设计。

由于设施布局问题具有非线性特征且属于 NP 完全问题，采用传统的求解算法（如贪心算法）会产生“组合爆炸”问题，即当问题的规模大到一定程度时，计算量会随问题规模成指数增长。而现代优化计算方法（如遗传算法、模拟退火算法）在求解一些复杂优化问题中却显现出良好的求解特性，因此，在车间设施布局规划中被广泛应用。但是，各类现代优化计算方法都有其优势和

劣势的方面，如：模拟退火算法搜索的全局性差、遗传算法局部寻优能力不强、蚁群优化算法收敛速度慢且易陷入局部最优解等<sup>[25]</sup>。以遗传算法为例，在车间设施布局应用中，初始种群的选择将直接影响算法的寻优性能。目前初始种群广泛采用随机产生的方式，但随机产生的种群无法保证种群的合理性和多样性，也无法确定算法的高效性<sup>[26]</sup>。

随着计算机的普及和信息科学的飞速发展，计算机辅助设施布局及仿真软件也在不断推陈出新，但是，由于布局问题属于 NP 完全问题，且车间的实际生产情况和各类约束各不相同，因此，从商业应用的角度来看，至今尚没有成熟用于车间设施布局的商品化软件。

## 1.4 本文的研究内容和文章结构

### 1.4.1 本文的主要研究方法

本课题针对 SLP 和遗传算法的不足之处，首先对 SLP 进行必要的改进，简化了 SLP 的设计流程，以避免绘制大量作业单位位置相关图和面积相关图，减少繁琐的手工调整和方案修正，在物流强度分析的基础上，根据各作业单位联系的密切程度和车间实际约束，形成三组初步布局方案；然后，在遗传算法初始种群的选取上进行改进，采用经验信息与随机选取相结合的方式<sup>[27]</sup>，将改进 SLP 形成的三组初始方案作为初始种群的部分染色体，而其它染色体随机产生，同时，对遗传算子进行必要的改进，以避免发生早熟现象。这样，改进 SLP 提供的经验信息就进入到遗传算法的进化当中，两种方法实现了优势互补。

### 1.4.2 本文的主要工作内容

本文研究的主要工作有：

(1) 采集金高高压开关厂导电元件机加工车间产品种类、产量、加工工艺路线、标准工时、使用设备能力及相关参数、车间空间尺寸等数据资料；

(2) 归纳、整理数据资料；

- (3) 查阅相关书籍、论文资料；
- (4) 引入成组技术分析产品数据，确定设备组成、设备数量、产品族；
- (5) 分析 SLP 在车间设施布局设计中的不足之处，并对 SLP 进行了改进，简化其中的繁琐之处；
- (6) 根据改进 SLP 的设计流程，计算物流强度并绘制面积相关图；
- (7) 利用改进 SLP 布局设计方法，确定三组初始方案作为后期遗传算法初始种群的部分染色体；
- (8) 分析基本遗传算法的不足之处，对基本遗传算法进行改进，并利用改进 SLP 提供的部分染色体，结合改进后的遗传算法，对设施布局进行优化；
- (9) 利用 MATLAB 进行编程，实现改进遗传算法的优化计算；
- (10) 绘制车间设施布局简图，并对布局结果进行评价。

### 1.4.3 文章的主要结构

本文主要研究车间设施布局规划的相关理论和方法，根据目前研究中存在的不足之处，提出了改进 SLP 和遗传算法相结合的车间设施布局设计与优化方法，并以金高高压开关厂导电元件机加工车间设施布局为实例，验证了方法的可行性和实用性。文章的主要结构如下：

第一章为绪论。首先对车间设施布局问题进行了描述，接着分析了车间设施布局规划的发展历程及国内外研究现状，并指出目前研究中的不足之处，阐明本论文研究的理论和工程意义，最后阐述了本课题研究的方法和主要工作内容。

第二章对案例车间设施布局总体方案进行了规划，以车间现场调研数据为基础，对车间设施布局现状进行了需求分析，最后就案例车间设施布局的基本目标、基本形式、方法及实施阶段等几个方面进行了总体规划。

第三章阐述了 SLP 的基本理论和改进 SLP 的设计程序，结合案例车间实际数据，进行案例车间设施布局初始方案设计。

第四章简单介绍了遗传算法的产生及发展，对基本遗传算法进行了必要的改进，并提出了改进的优化步骤，建立案例车间数学模型，最后应用改进遗传

算法对案例车间设施布局进行优化，并评价最终结果。

第五章为全文总结及对下一步工作展望。

第二章 案例车间设施布局总体规划

2.1 案例车间需求分析

浙江乐清市金高高压开关厂主要生产高压隔离开关、负荷开关、操作机构、高压电器产品等，该厂的导电元件机加工车间主要负责加工产品中的导电元件。导电元件种类繁多，经统计有近两百种，该车间属于多品种中小批量生产方式。

车间原始布局主要采用工艺原则布局方法（相似设备或功能相近设备集中布置在一起），即机群式布局，车间划分为四个生产单元，分别是下料单元、焊接单元、金工单元、表面处理单元，每个单元都设有各自的在制品缓冲站，各单元工序安排如表 2-1 所示。

表 2-1 各单元加工工序安排

单元	下料单元	焊接单元	金工单元	表面处理单元
工序	下料	车、铣、铆装、 焊接、打磨	铣、车、镗、划、 钻、攻丝	碱洗、酸洗

案例车间包括工作区、办公室、更衣室、职工休息室和洗手间等设施，其中工作区用于设备布置，其面积为 15m×13m 的矩形，所需设备有：锯床、钻床、铣床、镗床、砂轮机、车床、划线平台、酸洗槽和碱洗槽等。该车间采用一班制工作，每日工作八小时，根据车间资料统计，设备停修系数平均为 0.94。

通过对案例车间现场调研，发现其物流状况及车间设施布局存在许多问题，主要表现在以下几个方面：

- （1）布局方式落后，采用单一的工艺原则布局方法，不适应企业当前的生产方式；
- （2）不注重物流系统设计，不符合物流距离短的要求，导致过多不必要的物流运输距离和物流量；
- （3）设备的布置安排不合理，物料搬运中普遍存在倒流、交叉现象；
- （4）车间部分设备的负荷不满，设备能力发挥不完全，造成相对投资较大；



(5) 在制品停滞、等待时间长,同时,在制品缓冲站多,占用大量车间生产面积;

(6) 产品生产周期长,不符合快速响应市场的要求。

另外,该机加工车间酸洗和碱洗两道工序在车间内部完成,由于在酸洗和碱洗金属的时候,往往会伴有酸、碱雾的逸出,损害工人的身体健康,而且对车间其它设备及厂房也有一定的腐蚀。同时,酸洗、碱洗产生大量有毒有害工业废水,严重的污染环境。

由于酸洗、碱洗这两道工序都属于工艺路线中的最终工序,所以应该在车间附近成立专门的酸洗、碱洗单元,同时在单元内配备酸雾、碱雾净化设备,最大程度的保证职工健康。而且,随着环保意识的不断强化,企业可考虑将产品委托给污水处理公司集中进行酸洗、碱洗加工,既最大限度的减少环境污染,又能实现资源的合理配置。

根据上述分析可知,在后续的车间设施布局规划中,酸洗和碱洗两道工序及设备不再加以分析。同时,本课题属于旧车间改造项目,并非新车间布局规划,而且原有车间的生产辅助设施(如办公室、更衣室、职工休息室和洗手间等)延车间边界布置,布局合理,因此对原有的辅助设施位置不作变更。综上所述,该车间布局工作主要集中在生产的工作区域内,即  $15\text{m} \times 13\text{m}$  的矩形区域。

## 2.2 案例车间设施布局基本目标规划

基于上述需求分析,案例车间设施布局需实现的基本目标有:

(1) 符合工艺过程的要求

尽量使生产对象流动顺畅,避免工序间的往返交错,使设备投资最小,生产周期最短。

(2) 最有效的利用空间

使布局空间内部设备的占有空间和单位制品的占有空间最小化。

(3) 物料搬运费用最少

要便于物料输入和产品、废料等物料运输路线短捷,尽量避免运输的往返

和交叉。

(4) 保持生产和安排的柔性

布局需适应产品需求的变化、工艺和设备的更新及扩大生产能力的需要。

(5) 适应组织结构的合理化和管理的方便

使有密切关系和性质相近的作业单位布置在一个区域并就近布置，甚至合并在同一区域。

(6) 为职工提供方便、安全、舒适的作业环境

布局需合乎劳动者生理、心理要求，为提高生产效率和保证职工身心健康创造条件。

## 2.3 案例车间设施布局基本形式规划

生产现场的车间设施布局的形式多种多样，从表面上看种类繁多，但根本上都是由工艺原则布局、产品原则布局、固定工位布局、成组技术布局等四类基本布局形式演化而来。

案例车间原始布局形式属于工艺原则布局，又称机群式布局或功能式布局，是一种将相似设备或功能相近设备集中布置的布局形式<sup>[28]</sup>，车间被划分为四个生产单元，分别为下料单元、焊接单元、金工单元、表面处理单元，被加工零件根据预先设定好的流程顺序，从一个单元转移到另一个单元，每项操作都由适宜的机器完成。这种布局形式通常仅适用于单件生产及多品种小批量生产模式，其优缺点如表 2-2 所示。

基于本章第一节需求分析并结合案例车间的生产实际，为有效避免车间原始布局的诸多缺点，同时保留工艺原则布局的优点，本课题建议采用成组技术布局方法，对案例车间进行布局改进。

成组技术布局<sup>[28]</sup>是在产品品种较多、每种产品的产量又是中等程度的情况下，将工件按其外形与加工工艺的相似性进行编码分组，同组零件用相似的工艺过程进行加工，同时将设备成组布置，即把使用频率高的机器群按工艺过程顺序布置，组合成成组制造单元，整个生产系统由数个成组制造单元构成。这

表 2—2 工艺原则布局的优缺点

优点	缺点
1.机器利用率高，可减少设备数量；	1.由于流程较长，搬运路线不确定，运输费用高；
2.可采用调用设备；	2.生产计划与控制较复杂；
3.设备和人员的柔性程度高，便于更改产品品种和数量；	3.生产周期长；
4.设备投资相对较少；	4.库存量相对较大；
5.操作人员作业多样化，提高人的工作兴趣和职业满足感	5.由于操作人员从事多种作业，需要较高的技术等级

种布局方式优点主要表现在：

- （1） 由于产品成组，设备利用率高；
- （2） 流程通畅，运输距离较短，搬运量少；
- （3） 有利于发挥班组合作精神；
- （4） 有利于扩大工人的作业技能；
- （5） 缩短生产准备时间。

2.4 案例车间设施布局方法规划

当前车间设施布局方法主要集中于三种：启发式方法、现代优化计算方法和计算机辅助设施布局及仿真。各种布局方法都有其优越性及不足之处，由于布局对象的多样性，各类约束的不确定性，所以很难找出一种通用于所有模型的布局方法。

应用启发式方法进行车间设施布局时，设计人员主要以经验为启发要素来完成设计工作，虽然简单易行、实用性较强，但该方法对布局设计人员提出很高的经验知识要求，而且布局设计过程繁琐，也不利于成功布局方法的推广及优秀案例的借鉴。而对于各类现代优化计算方法，在解决车间设施布局问题时都有其优势和劣势的方面，如：模拟退火算法搜索的全局性差、遗传算法局部寻优能力不强、蚁群优化算法收敛速度慢且易陷入局部最优解等。

本课题针对启发式方法和现代优化计算方法各自的不足之处,提出了将改进的 SLP 和遗传算法相结合的布局设计与优化方法,利用改进后的 SLP 得到三组初步布局方案,然后在遗传算法初始种群的选取上进行改进,采用改进 SLP 形成的三组初始方案作为经验信息,再与随机选取相结合的方式<sup>[27]</sup>,将改进 SLP 形成的三组初始方案作为初始种群的部分染色体,而其它染色体随机产生,同时,对遗传算子进行必要的改进,以避免发生早熟现象。这样,改进的 SLP 提供的经验信息就进入到遗传算法的进化当中,两种方法实现了优势互补。

该方法具体可分为两大步骤:

步骤一,利用 SLP 高度系统化、条理性强的优点,同时,对 SLP 进行了必要的改进,简化了设计步骤中的繁琐程序,避免了绘制大量作业单位位置相关图和面积相关图,减少了大量繁琐的手工调整和方案修正。然后利用改进后的 SLP 布局设计流程进行物流分析和作业单位相互关系密切程度分析,得到三组初步布局方案,作为车间设施布局规划后期遗传算法优化的基准和参照。

步骤二,将改进 SLP 得到的三组初始方案作为遗传算法的部分初始种群,实现改进 SLP 与遗传算法的结合。由于初始种群的选择直接影响算法的寻优性能,目前广泛采用的随机产生方式无法保证种群的合理性和多样性,也无法确定算法的高效性<sup>[26]</sup>,因此,有学者提出<sup>[29]</sup>应采用启发式算法或经验选择较好的染色体作为初始种群。本课题采用经验知识与随机技术相结合的初始种群产生方法,合理地将改进 SLP 提供的经验信息代入到遗传算法的进化当中去,借助两种方法各自优势,用以解决车间设施布局问题。

## 2.5 案例车间设施布局阶段规划

案例车间设施布局采用四阶段进行,如图 2-1 所示。

阶段 I ——需求分析:该阶段主要工作是搜集车间现场数据资料,并根据资料进行布局的需求分析;

阶段 II ——总体规划:该阶段主要根据需求分析结果,规划出案例车间的布局目标、形式、方法及流程等;

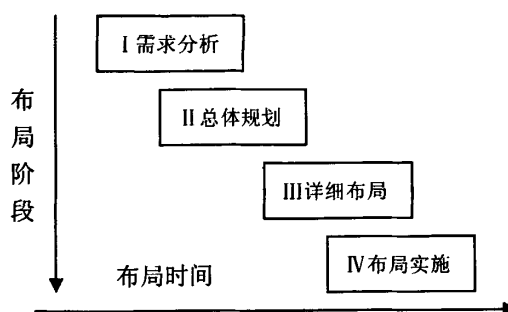


图 2-1 车间设施布局阶段结构

阶段Ⅲ——详细布局：该阶段主要是运用改进后的 SLP 和遗传算法对案例车间设施布局进行详细的设计和优化。该阶段的具体流程如图 2-2 所示；

图 2-2 中虚线内部分为利用改进后的 SLP 方法，得到三组初始方案；点划线内部分为遗传算法对设施布局进行优化部分，最终输出最优布局结果。流程的具体步骤将在后续章节中详细介绍。

阶段Ⅳ——布局实施：根据布局设计与优化结果进行现场施工。

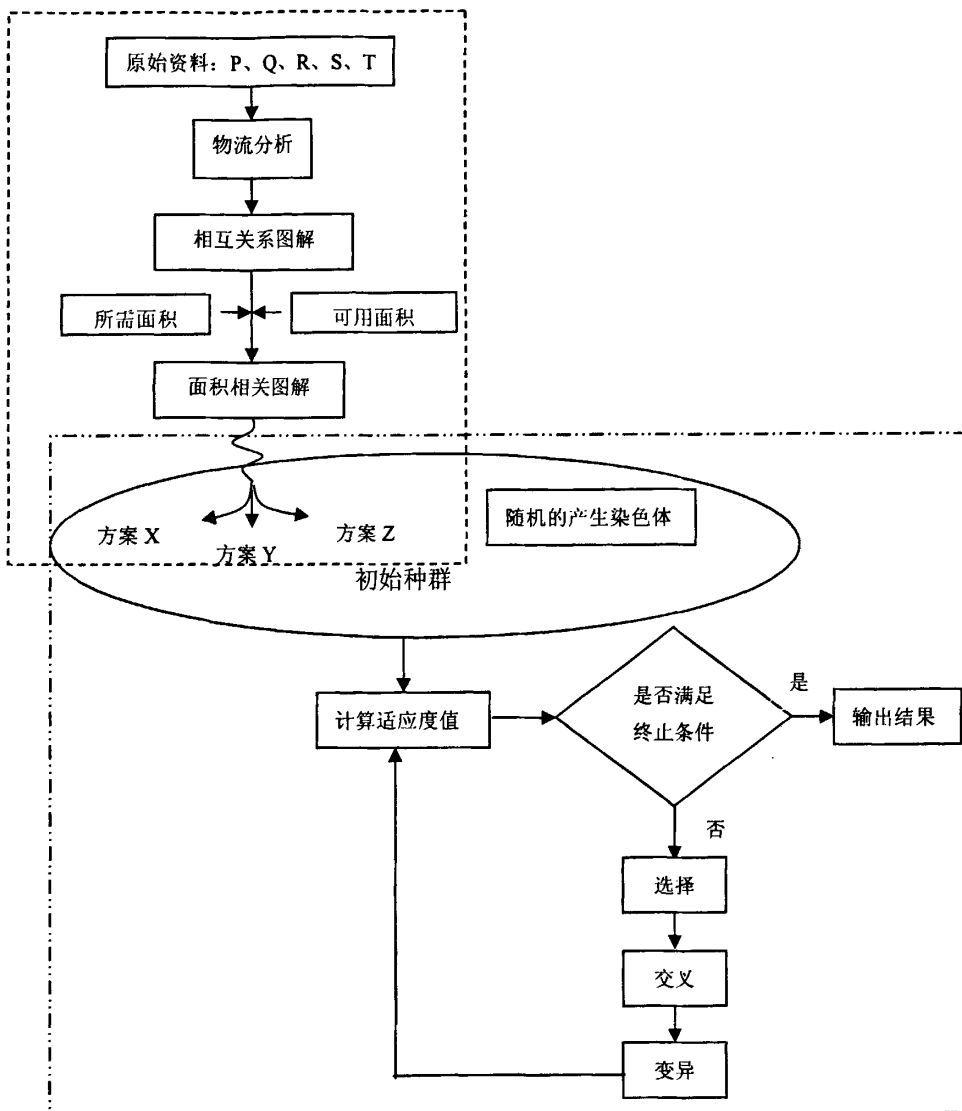


图 2-2 车间设施布局流程图

## 第三章 基于改进SLP的车间设施布局初始方案设计

### 3.1 SLP 基本理论

SLP 是一种最早应用于工厂、车间设计的系统布局方法，它以作业单位物流与非物流的相互关系分析为主线，采用一套表达力极强的图例符号和简明工作表格，通过一套条理清晰的设计程序解决工厂、车间布局设计问题。该方法提出了作业单位相互关系的等级表示法，使布局问题由定性阶段发展到定量阶段<sup>[30]</sup>。物流分析则是把物流全过程所涉及的装备、器具、设施、路线及其布局作为一个系统，运用现代科学和方法进行设计、管理，达到物流合理化的综合优化技术。

自 SLP 诞生以来，设计人员不但把它应用于各种机械制造厂的布局设计中，而且不断发展应用到一些新的领域，如公司办公室布局、连锁餐厅布局、物流配送中心布局等服务领域。国内从上世纪八十年代开始引入这一技术，收效显著，目前应用仍很广泛。

#### 3.1.1 SLP 的基本要素

在 SLP 方法中，Muther 将研究工厂布局问题的依据和切入点归纳为五个基本要素：P 产品（材料）；Q 产量（数量）；R 生产路线（工艺过程顺序）；S 辅助部门（包括服务部门）；T 时间（时间安排）。

（1）P（产品或材料或服务）：产品 P 是指待布局工厂、车间将生产的商品、原材料或者加工的零件和成品等。这些资料由生产纲领（工厂的或车间的）和产品设计所提供，包括项目、种类、型号、零件号、材料、产品特征等。产品这一要素影响着生产系统的组成及其作业单位间互相关系、生产设备的类型、物料搬运方式等方面。

（2）Q（数量或产量）：是指生产、供应或使用的商品量或服务的工作量。其资料由生产纲领和产品设计所提供，可以用件数、重量、体积或销售的价值

来表示。数量这一要素影响着生产系统的规模、设备的数量、运输量、建筑面积大小等方面。

(3) R (生产路线或工艺过程): 这一要素是工艺过程设计的成果, 可用工艺路线卡、工艺过程图、设备表等表示。它影响着各作业单位之间的关系、物料搬运路线、仓库及堆放地的位置等方面。

(4) S (辅助服务部门): 在实施系统布局工作以前, 必须就生产系统的组成情况有一个总体的规划, 可以大体上分为生产车间、职能管理部门、辅助生产部门、生活服务部门及仓储部门等。可以把除生产车间以外的所有作业单位统称为辅助服务部门 S, 包括工具、维修、动力、收货、发运、铁路专用路线、办公室、食堂、厕所等, 由有关专业设计人员提供。这些部门是生产的支持系统, 在某些意义上加强了生产能力。有时, 辅助服务部门的占地总面积甚至大于生产车间所占面积, 所以布局设计时应给予足够的重视。

(5) T (时间或时间安排): 是指在什么时候、用多少时间生产出产品, 包括各工序的操作时间、更换批量的次数。在工艺过程设计中, 根据时间因素, 可以确定生产所需各类设备的数量、占地面积的大小和操作人员数量, 以平衡各工序的生产时间。

在这五个基本要素中, P、Q 两个要素是一切其他特征或条件的基础。只有在上述各要素充分调研并取得全面、准确的各项原始数据的基础上, 通过绘制各种表格、数学和图形模型, 有条理的细致分析和计算, 才能最终求得布局的最佳方案。

### 3.1.2 SLP 设计程序步骤

SLP 的设计程序步骤如图 3-1 所示, 一般经过以下几个步骤:

(1) 准备原始资料。在 SLP 设计开始时, 首先必须明确给出基本要素 P、Q、R、S、T 及作业单位等原始资料, 同时也需要对作业单位的划分情况进行分析, 通过分解与合并, 得到最佳的作业单位划分状况。所有这些均作为系统布局设计的原始资料。

(2) 物流分析与作业单位相互关系分析。对于某些以生产流程为主的工厂,



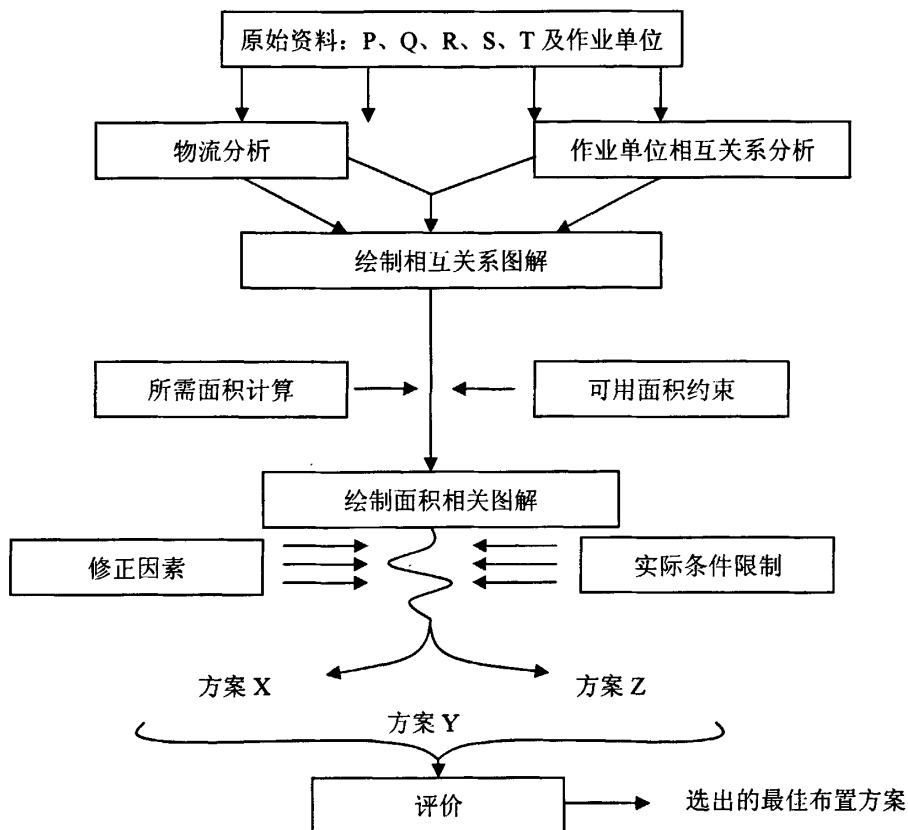


图 3-1 SLP 设计程序步骤图

物料移动是工艺过程的主要部分时，如一般的机械制造厂，物流分析是布局设计中最重要方面；对某些辅助服务部门或某些物流量小的工厂来说，各作业单位之间的相互关系（非物流关系）对布局设计就显得更重要了。介于上述两者之间的情况，则需要综合考虑作业单位之间物流与非物流相互关系。物流分析的结果可以用物流强度等级及物流相关表来表示。非物流的作业单位间的相互关系可以用量化的关系密级及相互关系表来表示。在需要综合考虑作业单位间物流与非物流的相互关系时，可以采用简单加权的方法将物流相关表及作业单位间相互关系表综合成综合相互关系表。

（3）绘制作业单位位置相关图。根据物流相关表与作业单位相互关系表，考虑每对作业单位间相互关系等级的高或低，决定两作业单位相对位置的远或近，得出各作业单位之间的相对位置关系，有些资料上也称之为拓扑关系。这时并未考虑各作业单位具体的占地面积，从而得到的仅是作业单位相对位置，

称为位置相关图。

(4) 作业单位占地面积计算。各作业单位所需占地面积与设备、人员、通道及辅助装置等有关, 计算出的面积应与可用面积相适应。

(5) 绘制作业单位面积相关图。把各作业单位占地面积附加到作业单位位置相关图上, 就形成了作业单位面积相关图。

(6) 修正。作业单位面积相关图只是一个原始布局图, 还需要根据其它因素进行调整与修正。此时需要考虑的修正因素包括物料搬运方式、操作方式、存储周期等, 同时还需要考虑实际限制条件如成本、安全和职工倾向等方面是否允许。考虑了各种修正因素与实际限制条件以后, 对面积图进行调整, 得出数个有价值的可行工厂布局方案。

(7) 方案评价与择优。针对得到的数个方案, 需要进行技术、费用及其他因素评价, 通过对各方案比较评价, 选出或修正设计方案, 得到最终布局方案图。

依照上述说明可以看出, SLP 是一种采用严密的系统分析手段及规范的系统设计步骤的布局设计方法, 具有很强的实践性。

### 3.2 SLP 的改进及设计程序步骤

由于在 SLP 的设计流程中, 绘制作业单位位置相关图和面积相关图时需不断的手工调整和修正原有方案, 因此, 布局方案的最终结果受设计人员主观经验、自身知识及能力等多种因素影响, 而且当车间规模较大、设备数量较多时, 使用 SLP 进行手工布局十分繁琐, 甚至无法完成设计。

针对上述 SLP 设计流程中的繁琐之处和案例车间的生产实际, 本课题尝试对 SLP 进行如下的改进: 由于本课题主要是针对车间生产的工作区域进行布局, 故对非物流作业单位相互关系不作分析; 同时, 由于在本文的设施布局方法中, SLP 仅提供初始方案设计, 后续优化及评价由遗传算法完成, 故在 SLP 中暂时不考虑空间约束以外的修正因素, 对初始方案也不作加权评价分析。通过这样的改进, 避免了反复绘制作业单位位置相关图和面积相关图, 简化了手工调整和方案修正。但是改进后的 SLP 在基本原理上仍与 SLP 一致。

改进 SLP 设计程序步骤如图 3-2 所示。

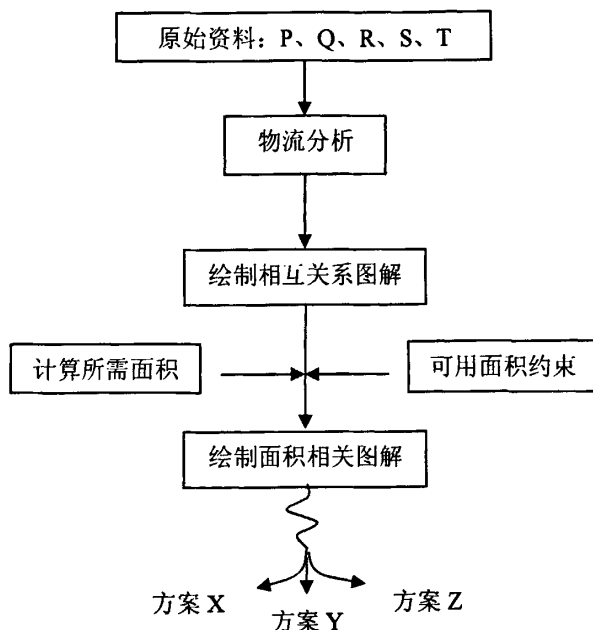


图 3-2 改进 SLP 程序图

### 3.3 基于改进 SLP 的案例车间设施布局初始方案设计

根据图 3-2 所示，针对案例车间设施布局的初始方案设计，需要经过物流分析、绘制相互关系图解、计算所需面积、绘制面积相关图解等几个步骤。

#### 3.3.1 物流及物流强度分析

##### (1) 产品零件族分析

根据收集的车间原始资料，该车间加工的导电元件共有近两百种，属于多品种中小批量生产方式，布局方式采用成组技术布局，因此，在物流分析时，也有必要利用成组技术，将零件划分为族。

成组技术<sup>[3]</sup>简称 GT，简单地说就是识别和利用事物的相似性，基于不同事物之间客观上存在的相似性，根据一定的目的，按它们相似特征进行归类分组，把原来多样化、无序的事物有序化，并找出同一类事物中的典型事物，总

结出其存在形式的内在规律或制订出处置它的合理的原则和方法，以便在以后遇到该类事物时避免不必要的重复劳动或在处理上出现不应有的多样化，达到简化、统一、高效和经济的目的。

在生产制造过程中，成组技术就是将企业生产的多种产品、部件和零件按照特定的相似性准则分类归族，并在分类的基础上组织产品生产的各个环节，从而实现产品设计、制造工艺和生产管理的合理化。

构造零件族的方法主要有直观检查法、生产流程分析法和零件分类编码法三种。直观检查法，又称目测法，是最简单的一种方法，它必须由工艺知识丰富的有经验的技术人员，查阅全部零件图样，把具有相同特征的零件先粗分成大组，然后仔细分析有关的工艺因素后划分成小组，将异常零件挑出，再进行综合平衡，作出调整，最后获得零件族。该方法完全由人工处理，非常烦琐。生产流程分析法，是一种以零件制造方法为依据的分类方法，也就是对加工零件的工艺流程和工艺规程中的加工方法、设备、工装等进行相似性分析的一种方法。零件分类编码法，是根据零件的几何形状、尺寸、精度和工艺特征等来描述零件的相似特征，并且将零件的特征数字化。

本课题采用生产流程分析法对零件进行分族，以工艺过程为基础，同时考虑其功能、形状、尺寸、材料等因素，将产品划分为 9 个零件族，分别为接头 I、接头 II、接头 III、触座、导体 I、导体 II、导体 III、导体 IV 和导体 V，如表 3-1 所示。

## （2）物流及物流强度分析

物流分析是车间设施布局设计的核心工作，针对不同的生产类型，物流分析方法也不同，主要有以下几种：

I. 工艺过程图。在大批量生产中，产品品种少，用标准符号绘制的工艺过程图能够直观的反映工厂生产的详细情况，此时，进行物流分析只需在工艺过程图上注明各道工序之间的物流量，就可清楚的表现出工厂生产过程中的物料搬运情况。另外，对于某些规模较小的工厂、车间，不论产量如何，只要产品比较单一，都可以用工艺过程图进行物流分析。

表 3-1 车间零件族种类

代码	名称	材料	工艺过程
P1	接头 I	紫铜棒	下料→车→划线→钻孔→攻丝→酸洗
P2	接头 II	铝合金棒	下料→车→碱洗
P3	接头 III	铸硅铝合金件	划线→车→划线→钻孔→碱洗
P4	触座	铸硅铝合金件	划线→车→划线→钻孔→攻丝→划线→镗→碱洗
P5	导体 I	铝合金管	下料→车→划线→钻孔→攻丝→碱洗
P6	导体 II	铝合金管	下料→划线→车→划线→铣→碱洗
P7	导体 III	铝合金管	下料→划线→车→划线→铣→钻孔→攻丝→打磨→碱洗
P8	导体 IV	铝合金管	下料→划线→车→划线→铣→打磨→碱洗
P9	导体 V	铝合金管	下料→车→划线→钻孔→攻丝→碱洗

II.多种产品工艺过程表。在多品种且批量较大的情况下(如产品品种为 10 种左右),符合产品的生产工艺流程汇总在一张表上,就形成了多种产品工艺过程表,在这张表上各产品工艺路线并列给出,可以反映出各个产品的物流路径。为了在布局上达到物料顺序移动,尽可能减少倒流,通过调整图表上的工序,使彼此之间有最大物流量的工序尽量靠近,直到获得最佳的顺序。

III.成组方法。当产品品种达到数十种时,若生产类型为中、小批量生产,进行物流分析时,就有必要采用成组方法,按产品结构与工艺过程的相似性进行归类分组,然后对于每一类产品采用工艺过程图进行物流分析;或者采用多种产品工艺过程表表示各组产品的生产工艺过程,再做进一步的物流分析。

IV.从一至表。当产品品种很多,产量很小且零件、物料数量又很大时,可以用一张方阵图表来表示各作业单位之间的物料移动方向和物流量,表中方阵的行表示物料移动的源,称为从;列表示物料移动的目的地,称为至,行列交叉点标明由源到目的地的物流量。当物料沿着作业单位排列顺序正向移动时,即没有倒流物流现象。从一至表中只有上三角方阵有数据。这是一种理想状态。当存在物流倒流现象时,倒流物流量出现在从一至表中的下三角方阵中,此时,从一至表中任何两个作业单位之间的总物流量(物流强度)等于正向物流量与逆向(倒流)物流量之和。运用从一至表可以一目了然地进行作业单位之间的

物流分析。

如上所述，不同的分析方法应用于不同的生产类型，其目的是为了工作方便，在物流分析时，应根据具体情况选择恰当的分析方法。本课题采用的是成组方法，对零件族进行物流分析。

物流强度是指在一定时间内通过两个物流节点间的物流数量，但是，通常在一个给定的物流系统中，物料从几何形状到物化状态都有很大差别，其可运性或物料的搬运难易程度相差很大，简单地用重量作为物流强度计量单位并不合理。因此，在物流强度分析过程中，必须找出一个标准，把系统中所有的物料通过修正、折算为一个统一量，即当量物流量，才能进行比较、分析和运算。迄今为止，关于当量物流量的计算尚无统一模式，常用的有两种方法：玛格数法和经验估算法。

玛格数法<sup>[32]</sup>是 Muther 提出的一种当量物流量计量方法，它先按物料的大小定出一个基本值，然后对于其他影响因素用一些修正值来对基本值进行增减。其计算公式如下：

$$M = A + \frac{A(D + Z + Y + E + F)}{4} \tag{3.1}$$

其中，M 为玛格数，A 为基本值，D 为密度，Z 为形状，Y 为损伤危险性，E 为其他因素，F 为价值因素。

玛格数求解步骤：计算物料体积——确定玛格数基本值——确定各修正参数——确定玛格数。

由于本课题车间中涉及的物料几何形状及搬运方式基本相同，故采用重量作为物流强度计量单位加以分析，各零件族物流强度如表 3—2 所示。

表 3—2 各零件族物流强度

代码	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
名称	接头 I	接头 II	接头 III	触 座	导 体 I	导 体 II	导 体 III	导 体 IV	导 体 V
物流强度 (吨/月)	92	46	98	146	18	183	84	88	29

3.3.2 绘制相互关系图解

在绘制相互关系图解时，不直接考虑各作业单位的占地面积及其外形几何形状，而是从各作业单位间相互关系密切程度出发，安排各作业单位的相对位置，关系密切程度高的作业单位之间距离近，关系密切程度低的作业单位间距离远，由此形成设备作业单位相互关系图。

根据表 3-2 所给出的各零件族物流强度，结合表 3-1 提供的工艺过程，可以得到各作业单位间的物流强度，如表 3-3 所示。

表 3-3 各作业单位间物流强度

各作业 单位对	碱洗— 钻床	碱洗— 铣床	碱洗— 镗床	碱洗— 打磨	碱洗— 车床	酸洗— 钻床	下料— 车床	下料— 划线
物流强度 (吨/月)	145	183	146	172	46	92	185	355

各作业 单位对	钻床— 铣床	钻床— 打磨	钻床— 划线	铣床— 打磨	铣床— 划线	镗床— 划线	车床— 划线
物流强度 (吨/月)	84	84	529	88	355	146	1337

根据表 3-3 所提供的各作业单位物流强度，可以绘制出各作业单位相互关系图，如图 3-3 所示。

由图 3-3 可知，物流强度大的作业单位之间距离近，如：划线平台—车床、划线平台—钻床，物流强度小的作业单位之间距离远，如：砂轮机—钻床、钻床—铣床，根据这样的相互关系进行布局，有利于减少物料搬运成本，缩短物流距离，提高车间生产效率。

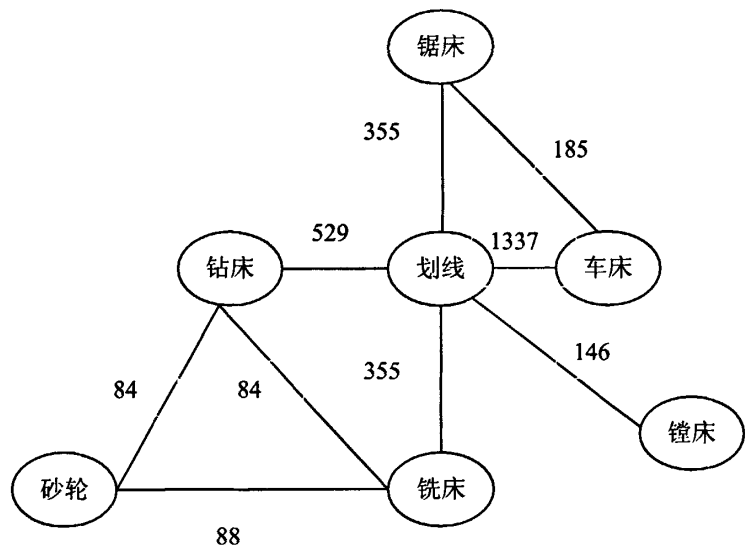


图 3-3 各作业单位相互关系图

3.3.3 计算所需面积

布局所需面积是由设备数量、设备尺寸及设备间距约束等因素决定的。

除酸洗槽、碱洗槽外，案例车间各设备尺寸如表 3-4 所示。

表 3-4 设备尺寸表

设备	锯床	钻床	铣床	镗床	砂轮机	车床	划线平台
尺寸	1.2*1.0	1.4*0.8	1.5*0.7	1.4*0.8	0.7*0.7	1.7*1.2	2.0*0.8

案例车间设备采用延车间水平方向多行布置方式，水平方向设备最小间距要求如表 3-5 所示。

设备数量由零件的需求量、加工时间、工作及设备的停修情况等因素决定，计算公式如下：

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \times t_{ij}}{F_0 \times \eta_j} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

其中， $N_i$ 为零件  $i$  的年需求量（件）； $t_{ij}$ 为零件  $i$  在设备  $j$  上加工的单件工时（小时）； $F_0$ 为设备的全年工作基数（小时）； $\eta_j$ 为设备  $j$  的停修系数（一



般取 0.9~0.98)，n 为零件种数。

表 3—5 设备水平方向最小间距要求

单位 (m)	锯床	钻床	铣床	镗床	砂轮机	车床	划线平台
锯床	1.6	1.8	1.7	1.8	1.5	2	2.1
钻床	1.8	1.7	1.5	1.6	1.4	1.8	2
铣床	1.7	1.5	1.8	1.7	1.6	1.9	2.1
镗床	1.8	1.6	1.7	1.5	1.5	1.8	1.9
砂轮机	1.5	1.4	1.6	1.5	1.2	1.7	1.9
车床	2	1.8	1.9	1.8	1.7	2	1.9
划线平台	2.1	2	2.1	1.9	1.9	1.9	2.5

案例车间采用一班制工作，每日工作八小时，设备停修系数平均为 0.94，根据收集的车间文件资料，利用公式 3.2 计算后取整，设备需求量如表 3—6 所示。

表 3—6 设备组成及需求量

工序	设备	$\sum N_i \times t_{ij}$ (小时)	$F_0 \times \eta_j$ (小时)	$S_j$ (理论值)	设备数 (台)
下料	锯床	3996		1.74	2
钻孔、攻丝	钻床	4043	$306 \times 8 \times 0.94$	1.77	2
铣	铣床	4186	$=2301.12$	1.82	2
镗	镗床	1685		0.85	1
打磨	砂轮机	2174		0.96	1
车	车床	15100		6.6	7
划线	划线平台	1690		0.73	1

根据表 3—6 可知，车间共有 16 台设备，分别为：锯床 1、锯床 2、钻床 1、钻床 2、铣床 1、铣床 2、镗床、砂轮机、车床 1、车床 2、车床 3、车床 4、车床 5、车床 6、车床 7、划线平台。

由于车间布局最终是对每台设备位置的布置，因此，有必要在上节物流强

度分析的基础上，将物流强度分配到每一台设备上。结合表 3-1、表 3-2 和表 3-3 所提供的数据，车间各设备对物流强度如表 3-7 所示。

表 3-7 车间各设备对物流强度

各设备对	锯床 1-车	锯床 1-车	锯床 2-车	锯床 2-车	钻床 1-铣	钻床 1-砂
	床 1	床 3	床 2	床 4	床 2	轮机
物流强度 (吨/月)	92	18	46	29	84	84
各设备对	铣床 1-砂	划线平台	划线平台	划线平台	划线平台	划线平台
	轮机	—锯床 1	—锯床 2	—钻床 1	—钻床 2	—铣床 1
物流强度 (吨/月)	88	160	195	180	349	178
各设备对	划线平台	划线平台	划线平台	划线平台	划线平台	划线平台
	—铣床 2	—镗床	—车床 1	—车床 2	—车床 3	—车床 4
物流强度 (吨/月)	177	146	130	172	175	175
各设备对	划线平台	划线平台	划线平台			
	—车床 5	—车床 6	—车床 7			
物流强度 (吨/月)	185	185	185			

3.3.4 绘制面积相关图解

根据表 3-4、表 3-5、表 3-7、图 3-3 所提供的数据，将各设备的占地面积与车间几何形状结合到作业单位相互关系图上，就得到了面积相关图，X 方案如图 3-4、Y 方案如图 3-5、Z 方案如图 3-6 所示。

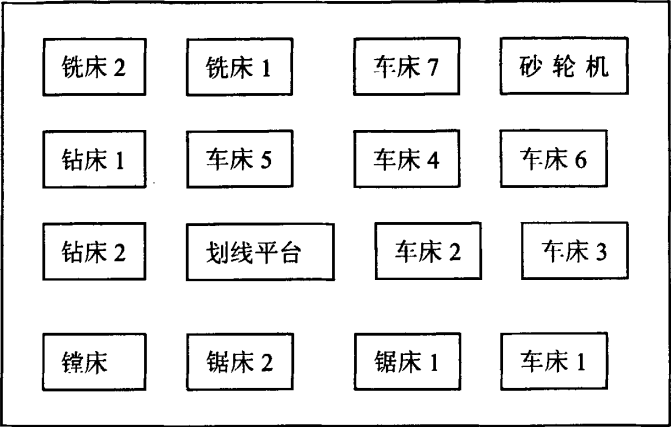


图 3—4 X 方案面积相关图

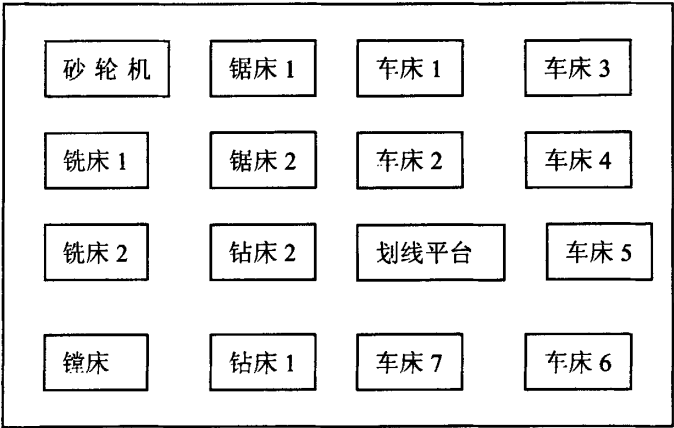


图 3—5 Y 方案面积相关图

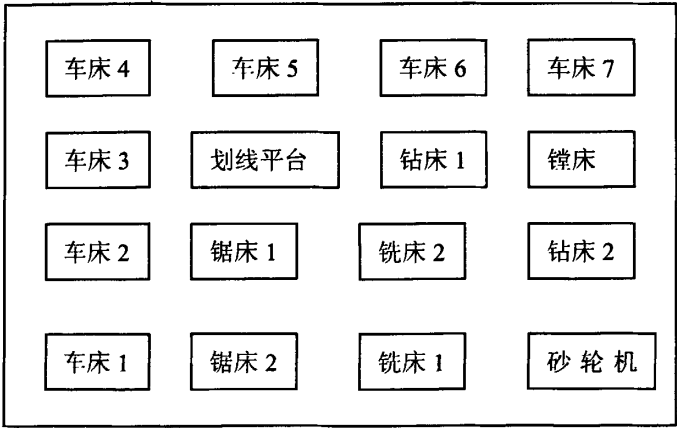


图 3—6 Z 方案面积相关图

由于未考虑足够的约束条件限制，面积相关图只能代表一个理论的、理想

的布局方案，必须要通过调整修正才能成为最终可行的布局方案，但是，在本课题中，利用改进 SLP 得到的方案只是作为后期遗传算法的初始种群中的部分染色体，各类车间及设备的实际约束和调整修正将在遗传算法的进化中实现，故无需再对 X、Y、Z 三组方案作手工修正和调整。

## 第四章 基于改进遗传算法的车间设施布局优化

### 4.1 概述

#### 4.1.1 遗传算法的产生和发展

遗传算法起源于对生物系统所进行的计算机模拟研究<sup>[3]</sup>。早在上世纪 40 年代,就有学者开始研究如何利用计算机进行生物模拟的技术,他们从生物学的角度进行了生物的进化过程模拟、遗传过程模拟等研究工作。

上世纪 60 年代后, The University of Michigan 的 Holland 教授及其学生们认识到生物的遗传和自然进化现象与人工自适应系统的相似关系,运用生物遗传和进化的思想来研究自然和人工自适应系统的生成以及它们与环境的关系,提出在研究和设计人工自适应系统时,可以借鉴生物遗传的机制,以群体的方法进行自适应搜索,并且充分认识到了交叉、变异等运算策略在自适应系统中的重要性。1967 年 Holland 的学生 Bagley 在其博士论文中首次提出了“遗传算法”一词,并发表了遗传算法应用方面的第一篇论文。他发展了复制、交叉、变异、显性、倒位等遗传算子,在个体编码上使用了双倍体的编码方法。这些都与目前遗传算法中所使用的算子和方法相类似。他还敏锐地意识到了在遗传算法执行的不同阶段可以使用不同的选择率,这将有利于防止遗传算法的早熟现象,从而创立自适应遗传算法的概念。

上世纪 70 年代初, Holland 教授提出了遗传算法的基本定理——模式定理 (Schema Theorem),从而奠定了遗传算法的理论基础。模式定理揭示出了群体中的优良个体(较好的模式)的样本数将以指数级规律增长,因而从理论上保证了遗传算法是一个可以用来寻求最优可行解的优化过程。1975 年, De Jong 在其博士论文中结合模式定理进行了大量的纯数值函数优化计算实验,树立了遗传算法的工作框架,得到了一些重要且具有指导意义的结论。同年, Holland 出版了第一本系统论述遗传算法和人工自适应系统的专著《Adaptation in Natural

and Artificial Systems》<sup>[34]</sup>。

上世纪 80 年代, Holland 教授实现了第一个基于遗传算法的机器学习系统——分类器系统 (Classifier Systems, 简称 CS), 开创了基于遗传算法的机器学习的新概念, 从而为分类器系统构造出一个完整的框架。1989 年, Goldberg 出版了专著《Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning》<sup>[35]</sup>。该书系统总结遗传算法的主要研究成果, 全面而完整的论述了遗传算法的基本原理及其应用。可以说这本书奠定了现代遗传算法的科学基础, 为众多研究和发​​展遗传算法的学者所瞩目。

从上世纪 90 年代开始, 遗传算法的应用无论是解决实际问题还是建模, 其范围都在不断扩展。1991 年, Davis 编辑了《Handbook of Genetic Algorithms》一书, 书中包括了大量遗传算法在科学计算、工程技术和社会经济中的应用实例<sup>[36]</sup>。这本书为推广和普及遗传算法的应用起到了重要的指导作用。1992 年, Koza 将遗传算法应用于计算机程序的优化设计及自动生成中, 提出了遗传编程 (Genetic Programming, 简称 GP) 的概念, 成功应用于人工智能、机器学习、符号处理等方面。

近年来, 遗传算法逐渐趋于成熟和完善, 发展出更多样的遗传基因表达方式、交叉和变异算子、再生和选择方法, 引入了各类特殊算子, 使遗传算法已经趋于一个“算法族”, 通常人们用进化计算 (Evolutionary Computation) 来包容这样的遗传“算法族”, 将其划分为四个分支: 遗传算法 (GA)、进化规划 (EP)、进化策略 (ES) 和遗传程序设计 (GP)。

#### 4.1.2 基于改进遗传算法的车间设施布局优化步骤

本文基于改进遗传算法的车间设施布局优化步骤如下:

(1) 建立车间设施布局优化的数学模型, 确定模型的假设条件及参数、决策变量等坐标系, 将布局优化目标和车间实际限制转化为目标函数和各类约束;

(2) 将改进 SLP 产生的 X、Y、Z 三组布局方案进行编码, 作为遗传算法初始种群的三组染色体;

(3) 对基本遗传算法进行必要改进, 从编码、选择、交叉、变异等多个方面提高算法的性能;

(4) 对布局优化结果进行评价。

## 4.2 车间设施布局问题的数学模型

### 4.2.1 建模的基本要求

建立数学模型就是根据所观察到的现象, 归结成一套反映其数量关系的数学公式与具体算法, 用以描述对象的运动规律。具体的说, 就是对于现实中的原型, 为了某一特定目的, 做出一些必要的简化和假设, 运用适当的数学工具得到一个数学结构。也可以说, 是利用数学语言(符号、式子与图像)模拟现实的模型。把现实模型抽象、简化为某种数学结构是数学模型的基本特征。它或者能解释特定现象的现实状态, 或者能预测到对象的未来状况, 或者能提供处理对象的最优决策或控制。数学建模(Mathematical Modeling)是把现实世界中的实际问题加以提炼, 抽象为数学模型, 求出模型的解, 验证模型的合理性。

通常对数学模型有以下基本要求:

(1) 足够的精度: 对精度的要求取决于研究对象, 一般来说, 研究对象越复杂、问题越宏观, 精度要求不可能很高。

(2) 可操作、实用: 可操作性和实用性是检验模型的重要指标。模型的复杂程度与其实用性呈负相关, 但复杂模型往往又是表达一个复杂系统所必需的。因此, 在建模过程中, 需要花费一定的精力, 权衡模型的精度和实用性。

(3) 依据充分: 建立模型的条件要明确, 要有比较充分的数据表达用以建模的自变量和因变量之间的相关关系, 同时, 模型应用的时空条件即各种约束需要有明确的表达。

(4) 存在可控变量: 对于一个人工系统来说, 模型变量中必须有可以控制的变量, 以便人们按照既定的目标, 控制研究对象向着有利于系统目标的方向变化和调整。模型的可控变量也称决策变量。

#### 4.2.2 车间设施布局建模的思想

多年来,设施布局问题一直是跨学科的研究课题。设施布局的发展过程既包含艺术因素又包含科学因素。它经常被看作优化问题:即在设施布局满足一定约束的条件下,使得某些性能指标达到最优。在制造环境中,布局设计主要是指在确定的区域内最适宜的布置设备。通常的设计准则是最小化物料储运费用。

车间设施的布局不同于一般的几何形体的布局,常见的几何形体布局主要是在满足单纯的几何约束的条件下,实现包络面积或体积最小,各布局形体之间是没有必然联系的,而车间设施布局是根据生产物流、车间和设备的几何信息及约束、实际生产需要等多方面的条件来使设备在车间平面内形成合理、高效的布局,各设备之间存在紧密的物流方向和工序顺序等方面的关系。

在实际的车间中,设备之间除了不能互相重叠以外,还必须留出适当的距离用作物料搬运通道,车间布局平面中还会存在限制区域,设备的布置方向,设备最小间距要求等。这些都是布局设计建模过程中需要考虑的问题。

#### 4.2.3 案例车间设施布局数学模型的建立

针对案例车间的实际情况,该布局问题可视为连续优化的多行设备布局问题。根据以往车间布局问题相关文献所提供的方式,同时考虑本课题的研究对象,现列出建立车间设施布局优化模型的假设条件:

- (1) 假设车间和所需布局的设备为矩形块状结构,忽略其细节形状,且长和宽都已知;
- (2) 假设进行设备布局的平面为共平面;
- (3) 各设备分行排列,并与车间水平边(X轴)平行;
- (4) 设备间的水平(X轴)间距要求已知,纵向(Y轴)间距可根据物料储运系统和实际设备的特点综合考虑,事先确定,且认为在同一行内的各设备中心线的Y轴坐标相同;
- (5) 假设进、出货点都设在各个设备的中点上。



该模型的参数、决策变量、参考线和坐标系的建立如图 4-1 所示。

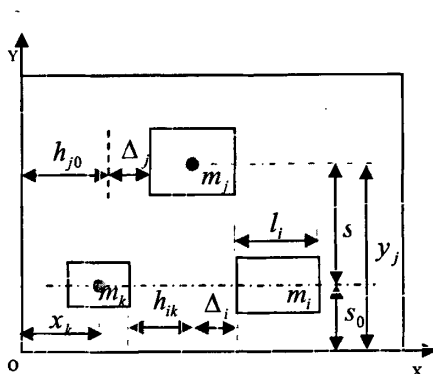


图 4-1 参数、决策变量、参考线

车间的多行设备布局是使设备间总的物料搬运成本最小化。其目标函数可表达为：

$$\min C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_{ij} D_{ij} \quad (4.1)$$

$$D_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} x_i &= x_k + (l_i + l_k)/2 + h_{ik} + \Delta_i \\ &= h_{k0} + \Delta_k + (l_i + l_k)/2 + h_{ik} + \Delta_i \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$y_i = (k-1)s + s_0 \quad \text{如果 } z_{ik} = 1 \quad (4.4)$$

$$i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m;$$

S.T. 各设备在 X 方向不重叠约束：

$$\begin{aligned} |x_i - x_j| &\geq [(l_i + l_j)/2 + h_{ij}] z_{ik} z_{jk} \\ i, j &= 1, \dots, n; \end{aligned} \quad (4.5)$$

确定设备所在行：

$$\begin{aligned} z_{ik} &= \begin{cases} 1, & \text{如果设备 } i \text{ 在第 } k \text{ 行上;} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases} \\ i &= 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m; \end{aligned} \quad (4.6)$$

每台设备只能被布局一次：

$$\sum_{k=1}^m z_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, n; \quad (4.7)$$

所有设备不能只布局在同一行：

$$\sum_{i=1}^n z_{ik} \leq n \quad k = 1, \dots, m; \quad (4.8)$$

设备坐标非负约束：

$$x_i, y_i \geq 0, \quad \Delta_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.9)$$

布局设备对于车间界限约束将在遗传算法中利用惩罚函数等相关策略加以实现。

其中：

$C$ ——搬运的总费用；

$P_{ij}$ ——设备  $i$  和  $j$  之间的单位物料每单位距离的搬运费用矩阵；

$Q_{ij}$ ——设备  $i$  和  $j$  之间物流强度矩阵；

$D_{ij}$ ——设备  $i$  和  $j$  之间的矩形距离矩阵；

$n$ ——设备的总数量；

$x_i$ ——设备  $i$  中心的 X 坐标；

$y_i$ ——设备  $i$  中心的 Y 坐标；

$m$ ——设备布局的总行数；

$l_i$ ——设备  $i$  的长度；

$h_{ij}$ ——设备  $i$  和  $j$  之间的水平最小间距要求；

$h_{i0}$ ——设备  $i$  和车间边界的水平最小间距要求；

$\Delta_i$ ——设备  $i$  和设备  $i-1$  或边界之间的净距离；

$s$ ——设备行间距；

$s_0$ ——第一行设备到车间下边界的距离。

## 4.3 遗传算法的改进及在案例车间中的应用

### 4.3.1 基本遗传算法的原理

遗传算法的概念与想法是源自于达尔文进化论的物竞天择自然进化法则。依据进化论，在多变的外在环境下，物种为了适应环境、求取生存，必须不断地彼此竞争，让更能适应环境的物种生存下来。在适者生存，不适者淘汰的大环境下，物种个体本身的基因也会因为险恶的外在环境压力，通过交叉、变异等过程，逐渐演化调整，使物种基因更能适应环境考验。

遗传算法是从问题可能潜在解集的一个种群（Population）开始的，而一个种群则由经过基因（Gene）编码（Coding）的一定数目的个体（Individual）组成。每个个体实际上是染色体（Chromosome）带有特征的实体。染色体作为遗传物质的主要载体，即多个基因的集合，其内部表现（即基因型）是某种基因组合，它决定了个体的形状和外部表现。因此，在一开始需要实现从表现型到基因型的映射即编码工作。由于仿照基因编码的工作很复杂，我们往往进行简化，如二进制编码、实数编码等。初始种群产生后，按照适者生存和优胜劣汰的原理，逐代（Generation）演化产生出越来越好的近似解。在每一代中，根据问题域中个体的适应度（Fitness）大小挑选（Selection）个体，并借助于自然遗传学的遗传算子（Genetic Operators）进行组合交叉（Crossover）和变异（Mutation）。产生出代表新的解集的种群。这个过程将导致种群像自然进化一样的后代种群比前代更加适应于环境，末代种群中的最优个体经过解码（Decoding），可以作为问题近似最优解<sup>[37]</sup>。

### 4.3.2 遗传算法的改进及应用

遗传算法提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架，它不依赖于问题的具体领域，对问题的种类有很强的鲁棒性，因此被广泛应用于很多学科<sup>[38]</sup>，其求解步骤如图 4-2 所示。但是，在实际工程应用中，基本遗传算法由于自身固有的缺陷，往往会表现出局部搜索能力不足、优化过程的收敛速度较慢、

易早熟、算法稳定性较差等问题。为此，本课题针对车间实际，对基本遗传算法进行了部分改进，以下将根据图 4-2 所提供的求解步骤，对遗传算法各构成要素的改进部分进行详细介绍。

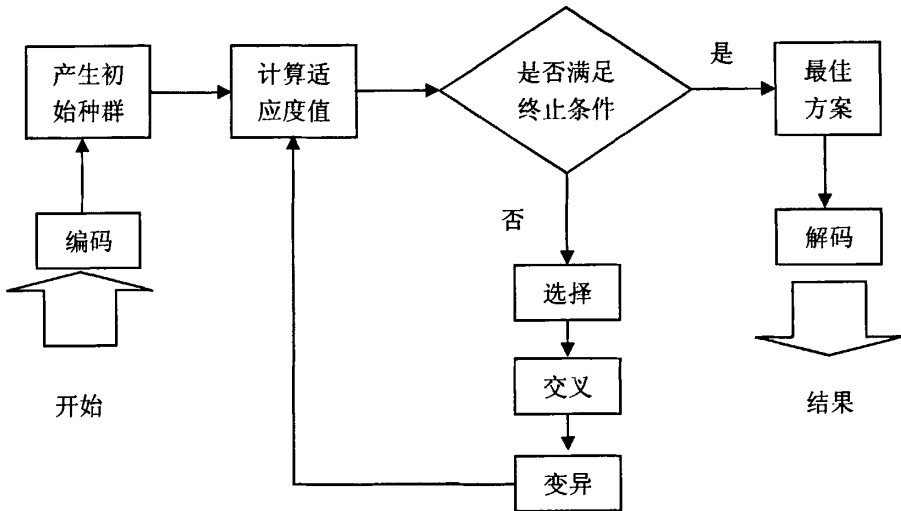


图 4-2 基本遗传算法求解步骤

### (1) 编码

在遗传算法中，如何描述问题的可行解，即把一个问题的可行解从其解空间转换到遗传算法所能处理的搜索空间的转换方法就成为编码。

编码是应用遗传算法时要解决的首要问题，也是设计遗传算法时的一个关键步骤。编码方法除了决定了个体的染色体排列形式之外，还决定了个体从搜索空间的基因型转换到解空间的表现型时的解码方法，同时，它还影响到交叉算子、变异算子等遗传算子的运算方法。由此可见，编码方法在很大程度上决定了如何进行群体的遗传运算以及遗传进化运算的效率。一个好的编码方法，有可能会使得交叉运算、变异运算等遗传操作可以简单的实现和执行。而一个差的编码方法，却有可能会使得交叉运算、变异运算等遗传操作难以实现，也有可能产生很多在可行解集合内无对应可行解的个体，这些个体经解码处理后所表示的解称为无效解，大部分情况下无效解会影响遗传算法运行效率。

针对一个具体应用问题，如何设计一种完美的编码方案一直是遗传算法的应用难点之一，也是遗传算法的一个重要研究方向。可以说目前还没有一套既

严密又完整的指导理论及评价准则能够帮助我们设计编码方案。对于实际应用问题，必须对编码方法、交叉运算方法、变异运算方法、解码方法等统一考虑，以寻求到一种对问题的描述最为方便、遗传运算效率最高的编码方案。

**基本遗传算法：**基本遗传算法使用固定长度的二进制符号串来表示群体中的个体，它使用的编码符号集是由二进制符号 0 和 1 所组成的二进制符号集 {0, 1}，其长度与问题所要求的求解精度有关。其优点主要表现在编码、解码操作简单易行，交叉、变异等遗传操作便于实现等，但对于车间设施布局问题，这种编码方式很难准确地描述解空间和搜索空间。

**改进遗传算法：**本课题编码表达采用设备符号和净间距两个列表的扩展换位表达方式<sup>[39]</sup>：

$$[\{m_1, m_2, \dots, m_n\}, \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n\}]$$

其中： $m_i$  代表设备  $i$ ， $\Delta_i$  代表设备  $i-1$  和设备  $i$  之间的净间距。 $\Delta_i$  的作用是实现在行内设备间距离微调，以寻求列间设备物流距离优化， $\Delta_i$  的取值范围为  $[0m, 1m]$ ，由计算机随机生成。我们用一个实例介绍这一描述机制建立的布局，为描述简洁， $\Delta_i$  都取 0。假定有如下染色体：

$$[\{8, 7, 6, 1, 2, 3, 4, 5, 11, 10, 9, 13, 15, 12, 14, 16\} \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}]$$

根据这一编码，有实际布局简图如图 4-3 所示。

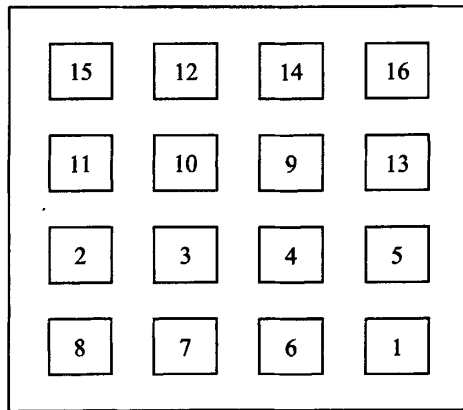


图 4-3 编码布局简图

本课题在采用此种编码方式的同时，配合使用自动换行策略，即如果在同

一行内的各设备长度和相互实际间距之和超过了最大水平空间长度限制，本行最后一台设备将自动进入下一行。

## (2) 初始种群

遗传算法在进行完编码动作后，必须产生一初始种群来作为初始解，所以必须先决定种群的个体数目。而初始种群的个体数目大小对于求解效益与效率具有决定性影响，若种群的个体数目太小，则难以达到目标函数的要求而有较早收敛的可能，反之，如果种群个体数目过大，则会消耗相当多的计算时间，一般取 20—100 比较适宜。

对于初始种群的产生有两种方式：随机产生和配合启发式经验产生。一个好的初始解能够缩短搜寻时间，使结果快速收敛到稳定状态。

**基本遗传算法：**基本遗传算法采用随机产生初始种群的方式，该方法虽简单易行，但无法确保种群的合理性和多样性，也无法确定算法的高效性<sup>[26]</sup>。

**改进遗传算法：**在遗传算法的应用中，初始种群的选择直接影响其寻优性能。一些专家提出，应该用其它的一些启发式算法或经验选择一些好的染色体作为部分初始种群<sup>[27]</sup>。因此，本课题采用改进 SLP 形成的三组初始方案作为经验信息，与随机选取相结合产生初始种群。

案例车间共有 16 台设备，分别为：锯床 1、锯床 2、钻床 1、钻床 2、铣床 1、铣床 2、镗床、砂轮机、车床 1、车床 2、车床 3、车床 4、车床 5、车床 6、车床 7、划线平台。为了使 MATLAB 程序编写方便，本文依据上述顺序，将这些设备分别定义为：设备 1、设备 2、设备 3、设备 4、设备 5、设备 6、设备 7、设备 8、设备 9、设备 10、设备 11、设备 12、设备 13、设备 14、设备 15、设备 16。因此，SLP 得到的三组初始方案编码如下，

X 方案：[{7,2,1,9,4,16,10,11,3,13,12,14,6,5,15,8} {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}];

Y 方案：[{7,3,15,14,6,4,16,13,5,2,10,12,8,1,9,11} {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}];

Z 方案：[{9,2,5,8,10,1,6,4,11,16,3,7,12,13,14,15} {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}].

## (3) 适应度函数

遗传算法中以个体适应度的大小来评定各个个体的优劣程度，从而决定其遗传机会的大小。适应度较大的个体遗传到下一代的概率就较大；而适应度较

小的个体遗传到下一代的概率就相对小一些。度量个体适应度的函数称为适应度函数 (Fitness Function)。

**基本遗传算法：**基本遗传算法仅使用所求问题的目标函数值评价个体适应度，从而得到下一步的有关搜索信息。其评价个体适应度的一般过程是：首先，对个体编码串进行解码处理后，可得到个体的表现型；然后，由个体的表现型可计算出对应个体的目标函数值；最后，根据最优化问题的类型，由目标函数值按一定的转换规则求出个体的适应度。

**改进遗传算法：**在实际应用中的优化问题一般都含有一定的约束条件，因此在评价个体适应度函数时，必须要对这些约束条件进行处理。本课题根据车间实际情况，在适应度函数评价中引入了罚函数法。

罚函数法的基本思想：对在解空间中无对应可行解的个体，计算其适应度时，处以一个罚函数，从而降低该个体适应度，使该个体被遗传到下一代群体中的机会减少。

在该案例车间设施布局过程中，除了存在本章第二节中已提出的数个约束外，还有可能出现两类不合理的：设备重叠和超出车间区域。

根据公式 4.5 可知，在 X 方向上设备不会产生重叠的不合理；而在 Y 方向上，行间距是根据物料搬运系统和实际设备的特点综合考虑确定的，因此也不会产生重叠的不合理。

由于在编码的同时，采用自动换行策略，因此在 X 方向上设备不会超出车间区域。

在 Y 轴方向上设备是否超出车间区域，只需要判断最后一行设备是否超出，即，若  $2s_0 + (m-1)s \leq H$ ，则代表最后一行设备未超出车间边界；反之，则超出。

$$P_k = \begin{cases} 0, & \text{如果 } 2s_0 + (m-1)s \leq H; \\ T, & \text{否则;} \end{cases} \quad (4.10)$$

其中：H 为车间的宽度 (Y 方向)， $P_k$  为不合理惩罚项，T 为正的大数惩罚值。

综上所述，案例车间适应度函数由两部分组成：物流总费用和不合理惩罚。

根据目标函数可计算总费用，令  $v_k$  是进化种群中的第  $k$  个染色体，则  $v_k$  所表示的布局的搬运总费用为：

$$\min C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_{ij} D_{ij}$$

对于染色体  $v_k$  的适应度函数定义为：

$$Eval(v_k) = 1/(C_k + P_k) \quad (4.11)$$

#### (4) 选择

在生物的遗传和自然进化过程中，对生存环境适应程度较高的物种将有更多的机会遗传到下一代；而对生存环境适应程度较低的物种遗传到下一代的机会就相对较少。模仿这个过程，遗传算法使用选择算子（或称复制算子，Reproduction Operator）来对群体中的个体进行优胜劣汰操作：适应度较高的个体被遗传到下一代群体中的概率较大；适应度较低的个体被遗传到下一代群体中的概率较小。遗传算法中的选择操作就是用来确定如何从父代群体中按某种方法选取哪些个体遗传到下一代群体中的一种遗传运算。因此，选择操作是建立在对个体的适应度进行评价的基础之上，其主要目的是为了 avoid 基因缺失、提高全局收敛性和计算效率。

**基本遗传算法：**基本遗传算法采用比例选择算子。所谓比例选择算子，就是指个体被选中并且遗传到下一代群体中的概率与该个体的适应度大小成正比。比例选择实际上是一种有退还随机选择，也叫做赌盘（Roulette Wheel）选择，因为这种选择方式与赌博中的赌盘操作原理颇为相似。如图 4-4 所示为一赌盘示意图。整个赌盘被分为大小不同的一些扇面，分别对应着价值各不相同的一些赌博物品。当旋转着的赌盘自然停下来时，其指针所指扇面上的物品就归赌博者所有。虽然赌盘的指针具体停止在哪一个扇面是无法预测的，但指针指向各个扇面的概率却是可以估计的，它与各个扇面的圆心角大小成正比：圆心角越大，停在该扇面的可能性也越大；圆心角越小，停在该扇面的可能性也越小。与此类似，在遗传算法中，整个群体被各个个体所分割，各个个体的适应度在全部个体的适应度之和中所占比例也大小不一，这个比例值瓜分了整个



赌盘盘面，它们也决定了各个个体被遗传到下一代群体中的概率。

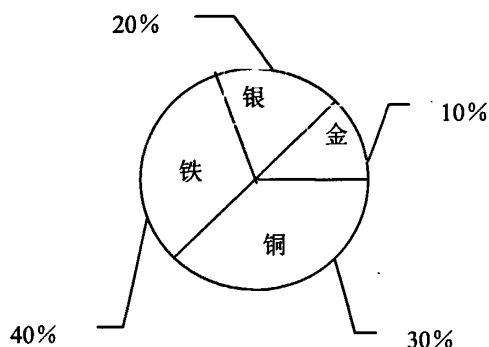


图 4-4 赌盘示意图

比例选择算子具体执行过程是：先计算出群体中所有个体的适应度的总和；其次计算出每个个体的相对适应度的大小，它即为各个个体被遗传到下一代群体中的概率；最后再使用模拟赌盘操作（即 0 到 1 之间的随机数）来确定各个个体被选中的次数。

改进遗传算法：本课题在采用比例选择算子同时，并以最优保存策略为辅助，将当前群体中适应度最高的个体与下一代适应度最高个体进行比较，若此个体适应度值大，则自动进入下一代种群，这样，既保证了遗传算法的收敛性，又可避免局部最优解的快速扩散<sup>[33]</sup>。

在遗传算法的运行过程中，通过对个体进行交叉、变异等遗传操作而不断地产生出新的个体。虽然随着群体的进化过程会产生出越来越多的优良个体，但由于选择、交叉、变异等遗传操作的随机性，它们也有可能破坏掉当前群体中适应度最好的个体。而这却不是我们所希望发生的，因为它会降低群体的平均适应度，并且对遗传算法的运行效率、收敛性都有不利的影响。所以，我们希望适应度最好的个体要尽可能地保留到下一代群体中。为达到这个目的，可以使用最优保存策略进化模型（Elitist Model）来进行优胜劣汰操作，即当前群体中适应度最高的个体不参与交叉运算和变异运算，而是用它来替换掉本代群体中经过交叉、变异等遗传操作后所产生的适应度最低的个体。最优保存策略进化模型的具体操作过程是：

I. 找出当前群体中适应度最高的个体和适应度最低的个体；

II.若当前群体中最佳个体的适应度比总的迄今为止的最好个体的适应度还要高,则以当前群体中的最佳个体作为新的迄今为止的最好个体;

III.用迄今为止的最好个体替换掉当前群体中的最差个体。

最优保存策略可视为选择操作的一部分。该策略的实施可保证迄今为止所得到的最优个体不会被交叉、变异等遗传运算所破坏,它是遗传算法收敛性的一个重要保证条件<sup>[33]</sup>。

### (5) 交叉

所谓交叉运算,是指对两个相互配对的染色体按某种方式相互交换其部分基因,从而形成两个新的个体。交叉运算是遗传算法区别于其它进化算法的重要特征,它在遗传算法中起着关键作用,是产生新个体的主要方法。遗传算法中,在交叉运算之前还必须先对群体中的个体进行配对。目前常用的配对策略是随机配对,即将群体中的  $M$  个个体以随机的方式组成  $M/2$  对配对个体组,交叉操作是在这些配对个体组中的两个个体之间进行的。

交叉算子的设计和实现与所研究的问题密切相关,一般要求它既不要太多的破坏个体编码串中表示优良性状的优良模式,又要能够有效地产生出一些较好的新个体模式。另外,交叉算子的设计要和个体编码设计统一考虑。

**基本遗传算法:**基本遗传算法采用单点交叉算子。单点交叉(One-point Crossover)又称为简单交叉,它是指在个体编码串中只随机设置一个交叉点,然后在该点相互交换两个配对个体的部分染色体。单点交叉算子的具体执行过程如下:首先,对群体中的个体进行两两随机配对。若群体大小为  $M$ ,则共有  $M/2$  对相互配对的个体组;然后,对每一对相互配对的个体,随机设置某一基因座之后的位置为交叉点,若染色体的长度为  $n$ ,则共有  $(n-1)$  个可能的交叉点位置;最后,对每一对相互配对的个体,依设定的交叉概率在其交叉点处相互交换两个个体的部分染色体,从而产生出两个新的个体。

**改进遗传算法:**根据编码方式的要求,本课题采用两种不同的交叉方式分别对设备序列和净间距序列进行处理:采用部分映射交叉(Partially Mapped Crossover)方法处理设备排列序列,采用算术交叉(Arithmetic Crossover)方法处理净间距序列。

部分映射交叉的主要思想是：整个交叉操作过程由两步来完成，首先对个体编码串进行常规的双点交叉操作，然后根据交叉区域内各个基因值之间的映射关系来修改交叉区域之外的各个基因座的基因值。算术交叉是指由两个个体的线性组合产生出两个新的个体。

#### (6) 变异

所谓变异运算，是指将个体染色体编码串中的某些基因座上的基因值用该基因座的其它等位基因来替换，从而形成一个新的个体。从遗传运算过程中产生新个体的能力方面来说，交叉运算是产生新个体的主要方法，它决定了遗传算法的全局搜索能力；而变异运算只是产生新个体的辅助方法，但它也是必不可少的一个运算步骤，因为它决定了遗传算法的局部搜索能力。交叉算子与变异算子的相互配合，共同完成对搜索空间的全局搜索和局部搜索，从而使得遗传算法能够以良好的搜索性能完成最优化问题的寻优过程。

**基本遗传算法：**基本遗传算法采用基本位变异算子。基本位变异（Simple Mutation）操作是指对个体编码串中以变异概率随机指定的某一位或某几位基因座上的基因值作变异运算。例如，对于基本遗传算法中用二进制编码符号串所表示的个体，若需要进行变异操作的某一基因座上的原有基因值为 0，则变异操作将该基因值变为 1；反之，若原有基因值为 1，则变异操作将其变为 0。

基本位变异算子的具体执行过程是：先对个体的每一个基因座，依变异概率指定其为变异点，再在每一个指定的变异点上，对其基因值做取反运算或用其它等位基因值来代替，从而产生出一个新的个体。

**改进遗传算法：**针对本课题的编码方式，改进遗传算法采用只对设备净间距进行变异操作，使用基本位变异算子和邻域搜索技术相结合的方式进行处理。

假设给定染色体的净间距序列是：

$$\{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_i, \dots, \Delta_n\},$$

根据变异概率指定其变异点  $\Delta_i$ ，令  $r$  是一个给定的整数（局部寻优次数）， $[U_{\min}, U_{\max}]$  是设备净间距的取值范围，即  $[0m, 1m]$ ，则在该区间内可随机产生  $r$  个净间距： $\Delta_i^1, \Delta_i^2, \dots, \Delta_i^r$ ，用它们分别取代变异点  $\Delta_i$ ，可产生  $r$  个新染色体，

视为原染色体的邻域。计算它们的适应度值，从中挑选最好的染色体作为下一代。

## 4.4 案例车间设施布局结果及评价

### (1) 案例车间设施布局结果

案例车间用于设备布局的空间为  $15\text{m} \times 13\text{m}$  的矩形场地；由于物料搬运工具相同，经过现场测试，单位物料每单位距离的搬运费用基本相等，故矩阵  $P_{ij}$  为一个  $16 \times 16$  的矩阵，其主对角线为 0，其它元素都为 1；物流强度矩阵由表 3-7 所提供； $\Delta$  的取值范围为  $[0\text{m}, 1\text{m}]$ ；设备行间距  $s$  为  $2\text{m}$ ； $s_0$  为  $1\text{m}$ ；设备尺寸如表 3-5 所示；各设备和车间边界最小水平距离

$$[h_{i0}] = [1, 1, 0.8, 0.8, 0.9, 0.9, 0.7, 0.8, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.2];$$

根据表 3-5 可知，各设备间水平最小间距要求矩阵为

$$h_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1.6 & 1.8 & 1.8 & 1.7 & 1.7 & 1.8 & 1.5 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2.1 \\ 1.6 & 0 & 1.8 & 1.8 & 1.7 & 1.7 & 1.8 & 1.5 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2.1 \\ 1.8 & 1.8 & 0 & 1.7 & 1.5 & 1.5 & 1.6 & 1.4 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 2 \\ 1.8 & 1.8 & 1.7 & 0 & 1.5 & 1.5 & 1.6 & 1.4 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 2 \\ 1.7 & 1.7 & 1.5 & 1.5 & 0 & 1.8 & 1.7 & 1.6 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 2.1 \\ 1.7 & 1.7 & 1.5 & 1.5 & 1.8 & 0 & 1.7 & 1.6 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 2.1 \\ 1.8 & 1.8 & 1.6 & 1.6 & 1.7 & 1.7 & 0 & 1.5 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 1.9 \\ 1.5 & 1.5 & 1.4 & 1.4 & 1.6 & 1.6 & 1.5 & 0 & 1.7 & 1.7 & 1.7 & 1.7 & 1.7 & 1.7 & 1.7 & 1.8 \\ 2 & 2 & 1.8 & 1.8 & 1.9 & 1.9 & 1.8 & 1.7 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1.9 \\ 2 & 2 & 1.8 & 1.8 & 1.9 & 1.9 & 1.8 & 1.7 & 2 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1.9 \\ 2 & 2 & 1.8 & 1.8 & 1.9 & 1.9 & 1.8 & 1.7 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1.9 \\ 2 & 2 & 1.8 & 1.8 & 1.9 & 1.9 & 1.8 & 1.7 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1.9 \\ 2 & 2 & 1.8 & 1.8 & 1.9 & 1.9 & 1.8 & 1.7 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 1.9 \\ 2 & 2 & 1.8 & 1.8 & 1.9 & 1.9 & 1.8 & 1.7 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 & 1.9 \\ 2.1 & 2.1 & 2 & 2 & 2.1 & 2.1 & 1.9 & 1.8 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 0 \end{bmatrix}$$

优化过程中遗传算法的优化环境如下：种群数量为 50；最大遗传代数为 500；交叉率为 0.6；变异率为 0.5；惩罚函数值  $T$  为 500；变异过程中局部寻优

次数  $r$  为 10。算法进化过程如图 4-5 所示：

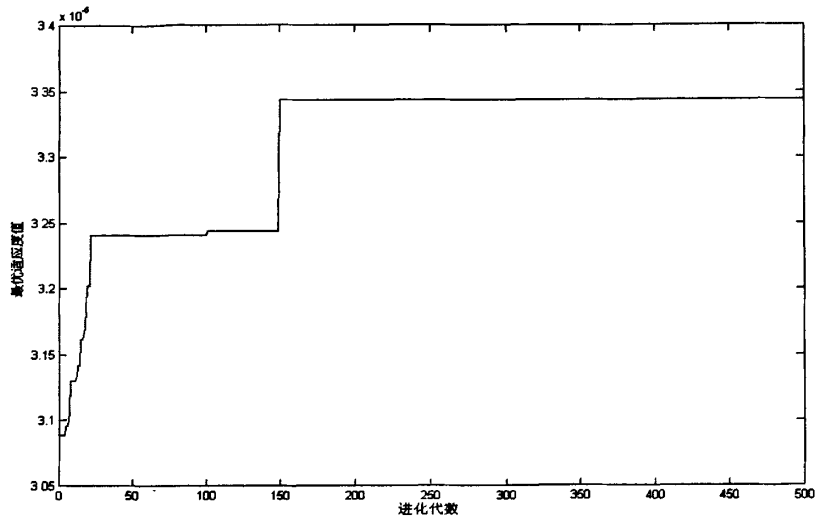


图 4-5 算法进化过程图

最好的染色体为：

$[\{7,3,8,6,10,4,5,12,13,16,2,1,15,11,9,14\}\{0.02,0.18,0.96,0.14,0.07,0.01,0.13,0.05,0.04,0.17,0.25,0.17,0.05,0.24,0.30,0.07\}]$ ，适应度值为： $3.3432 \times 10^{-5}$ ，最终优化结果布局简图如图 4-6 所示：

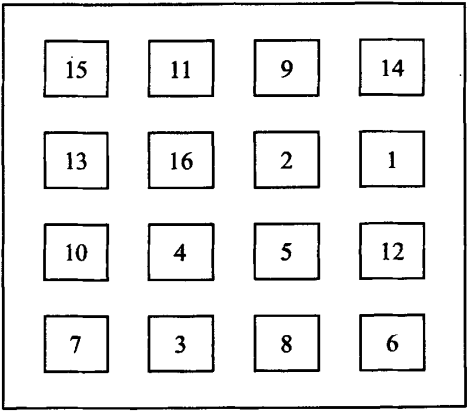


图 4-6 优化结果布局简图

(2) 案例车间设施布局结果评价

本课题的最终布局方案得到了企业的认可并投入实施，但由于项目完工时

间较短，对车间生产效率和经济效益的改善数据尚在统计之中，为了对结果进行评价，本文运用单一遗传算法布局结果与之比较。

采用单一遗传算法进化过程如图 4-7 所示：

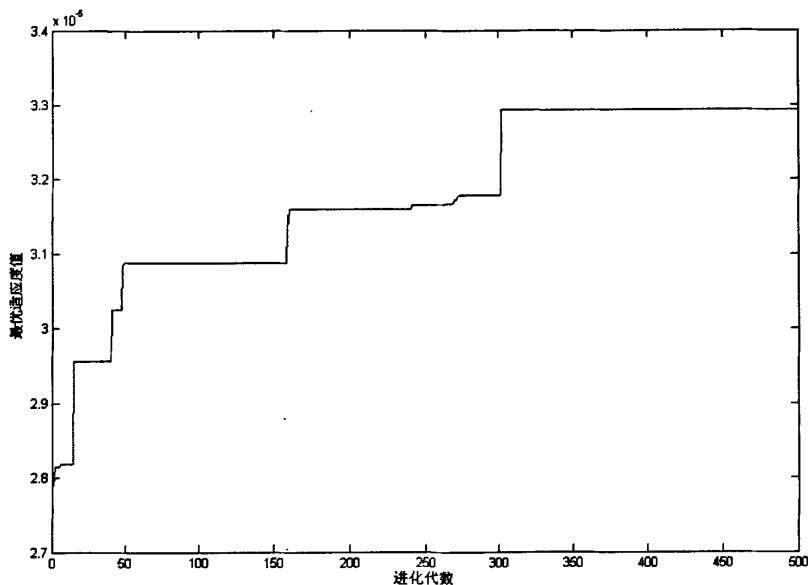


图 4-7 单一遗传算法进化过程图

比较图 4-5 和图 4-7 可知，从最优解出现的代数来看：前者最优解出现在 150 代，后者出现在 301 代；从最优适应度值来看：前者为  $3.3432 \times 10^{-5}$ ，后者为  $3.2932 \times 10^{-5}$ ；因此，本课题采用改进 SLP 和遗传算法相结合的方法具有收敛速度快、性能稳定等特点，且结果令人满意。

## 第五章 结论和展望

### 5.1 论文的工作总结

本文的主要研究工作与创新点概括如下：

(1) 阐述了车间设施布局规划的研究背景和研究方向，对国内外关于车间设施布局规划的理论 and 求解方法进行综述；

(2) 针对目前车间设施布局研究中的不足之处，提出了一种基于改进 SLP 和遗传算法的车间设施布局设计与优化的方法，该方法避免了传统方法过于依赖经验、约束过多及复杂难解的缺点；

(3) 根据案例车间的特点，讨论了案例车间设施布局中存在的问题，给出布局规划的总体框架，并以该框架为指导，以车间调研资料为依据，对案例车间设施布局总体方案进行了规划；

(4) 利用 SLP 高度系统化、条理性强的优点，同时，对 SLP 进行了必要的改进，简化了设计步骤中的繁琐程序，然后利用改进后的 SLP 布局设计流程进行物流分析和作业单位相互关系密切程度分析，得到三组初步布局方案，作为车间设施布局规划后期遗传算法优化的基准和参照；

(5) 分析了基本遗传算法中存在的不足之处，对基本遗传算法进行了改进，提出将改进 SLP 形成的三组初始方案作为遗传算法初始种群的部分染色体，并结合随机选择形成初始种群，同时，采用设备符号和净间距两个列表的扩展换位编码方式，应用了最优保存策略、邻域搜索技术、自动换行策略等，有效的保证了改进遗传算法的性能。

### 5.2 后续工作展望

车间设施布局规划问题是一个复杂而又富含矛盾的优化问题。在该问题的研究上，我们大多是将问题简化后进行求解，即模型都是在一定的假设条件下建立的，这就导致了车间实体和数学模型之间或多或少会有一定的偏差。论文后续将着重对如何量化实体与模型之间偏差这一方向进行深入研究，以实现该问题定性向定量的转变。

## 参考文献

- [1] 刘弟新.机械加工设备布局方法及其仿真技术研究[D].大连:大连理工大学,2007.
- [2] 张礼镇.工业工程[M].北京:科学出版社,1995.
- [3] 曹琦.人机工程[M].成都:四川科学技术出版社,1991.
- [4] Tompkins J A. Facility Planning [M]. New York: John Wiley, 1996.
- [5] Koopmans J, Beckmann M. Assignment Problem and Location of Economic Activities [J]. *Econometrics*, 1967, 25: 53~47.
- [6] Heragu S S, Kusiak A. Efficient Models for the Layout Problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 1991, 53(1):1~13.
- [7] Szykman S, Cagan J. Synthesis of Optimal Non-orthogonal Routes [J]. *ASEM Journal of Mechanical Design*. 1996, 118(3):419~424.
- [8] Sahni S, Gonzalez T.P. Complete Approximation Problem [J]. *Journal of Association for Computer Machinery*, 1976, 23(3):555~565.
- [9] R Muther.系统布置设计 [M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [10] Ayman Abu Hammad, Makarand Hastak and Matt Syal. Comparative Study of Manufactured Housing Production Systems [J]. *Journal of Architectural Engineering*, 2004, 12:136~142.
- [11] PTaho Yang, Chih-Ching Hung. Multiple-attribute Decision Making Methods for Plant Layout Design Problem [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(1):126~137.
- [12] 程国全. SLP 法在化工工厂总平面布置中的应用[J]. *物流技术与应用*, 1997, 2(2): 34~37.
- [13] 邓静.系统布置设计理论在涡轮精密铸造车间的应用[D].上海:上海交通大学, 2006.
- [14] 唐秋华,肖飞,王雪兰.基于 SLP 和 Flexsim 的车间重构研究[J]. *武汉理工大学学报*,2008,32(5):697~698.



- [15] 据科昌,王转.基于 SLP 的流程型制造企业物流设施布局分析方法及应用[J].物流技术,2006,10:79~81.
- [16] 刘阶萍,陈禹六,罗振璧等.敏捷化可重组制造系统及其布局原则和方法研究[J].制造业自动化,2002,24(12):22~27.
- [17] P.P.Zouein, H.Harmanani and A.Hajar. Genetic Algorithm for Solving Site Layout Problem with Unequal-Size and Constrained Facilities[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2002, 4:143~151.
- [18] Heng Li, Peter E.D.Love. Site-Level Facilities Layout Using Genetic Algorithms[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1998, 10: 227~231.
- [19] 齐继阳,竺长安.改进型模拟退火算法在设备布局设计中的应用[J].计算机工程,2007,33(1):241~243.
- [20] 李岩,吴智铭.基于 GA 和设备嵌套思想的制造单元布置优化[J].上海大学学报,2001,25(8):1125~1128.
- [21] 经小川.遗传算法在机器布局问题中的应用[D].成都:四川大学,2001.
- [22] 周亦波,李志华,戴同等.单元制造系统布局模型及其求解[J].华中科技大学学报,2002,30(1):65~67.
- [23] 陈希,王宁生.基于遗传算法的车间设备虚拟布局优化技术研究[J].东南大学学报,2004,34(5):627~631.
- [24] 曾议,竺长安,齐继阳等.基于群智能算法的设备布局离散优化研究[J].计算机集成制造系统,2007,13(3):541~547.
- [25] 蒋金山,何春雄,潘少华.最优化计算方法[M].广州:华南理工大学出版社,2008.
- [26] 何大阔,王福利,贾明兴.遗传算法初始种群与操作参数的均匀设计[J].东北大学学报(自然科学版),2005,26(9):828-831.
- [27] 刑文训,谢金星.现代优化计算方法[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [28] 马汉武.设施规划与物流系统设计[M].北京:高等教育出版社,2005.
- [29] 宋晓霞.遗传算法中初始群体技术的改进与实现[J].计算机工程与设计,2007,28(22): 5485~5487.
- [30] 蔡临宁.物流系统规划—建模及实例分析[M].北京:机械工业出版社,2004.

- [31] 许香穗.成组技术[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [32] R Muther, K Haganaes.搬运系统分析[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [33] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [34] Holland J H. Adaptation in Nature and Artificial Systems[M]. MIT Press, 1992.
- [35] Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning[M]. Addison—Wesley, 1989.
- [36] Davis L D. Handbook of Genetic Algorithms[M]. Van Nostrand Reinhold,1991.
- [37] 王小平, 曹立明.遗传算法—理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社,2002.
- [38] 陈国良.遗传算法及其应用[M].北京:人民邮电出版社,1996.
- [39] 于瑞峰,王永县,彭海.工作地中设施布局问题的改进遗传算法[J].清华大学学报(自然科学版),2003,43(10):1351-1354.
- [40] 程国全,柴继峰,王转等. 物流设施规划与设计[M]. 北京:中国物资出版社,2003.
- [41] 孟初阳. 物流设施与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [42] 印鉴, 李明. 基于遗传算法的最优布局问题求解[J]. 计算机研究与发展, 2002 (10): 1270~1273.
- [43] 唐飞, 腾弘飞. 一种改进的遗传算法及其在布局优化中的应用[J]. 软件学, 1999 (10): 1097~1101.
- [44] 王金敏, 王玉新. 基于遗传算法的布局求解[J]. 天津大学学报. 2001, (3): 307~311.
- [45] 邹湘军. 加工车间设计方案决策[J].企业物流, 1999, (1): 3~4.
- [46] 张承谦. SLP 及其在调整生产布局中的应用[J]. 运筹与管理, 1995, 4 (4): 45~50.
- [47] 黎冬翠,王开松. 成组车间设备布置的分析与研究[J]. 矿山机械, 2005, 33 (3): 123~124.
- [48] 段永炎. 粘胶原液车间设备布局方案[J]. 人造纤维, 2005, (4): 14~17.
- [49] 王定益, 王丽亚. 一种改进遗传算法在生产车间设备布局中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2005, (14): 190~192.
- [50] 李火生, 李志华, 钟毅芳等. 生产车间设备布局线性模型及算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2002, (11): 221~224.

- [51] 曹振新, 朱云龙, 宋崎. 制造系统的设备布局方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(3): 413~416.
- [52] 曾志斌, 李言, 李淑娟等. 改进遗传算法及其在车间布局优化中的应用[J]. 生产力研究, 2005, (2): 177~179.
- [53] 李树刚, 吴智铭, 庞小红. 批量及路径可变时机器 ROBUST 布置问题[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(5): 762~765.
- [54] 马玉敏, 陈炳森, 张为民. 基于敏捷制造理念下的车间布局设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2002, (4): 41~43.
- [55] 李郝林, 杨敏. 基于生物遗传算法的车间布局优化算法[J]. 江苏机械制造与自动化, 2001, (4): 35~38.
- [56] 金哲, 宋执环, 杨将新. 可重构制造系统工艺路线与系统布局设计研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(1): 7~12.
- [57] 应保胜, 张华, 杨少华. 敏捷制造车间布局优化的启发式算法[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(8): 962~965.
- [58] 吴明华, 张培森, 杨人凤. 关于设备布局的最短路径算法模型[J]. 洛阳工业高等专科学校学报, 2006, 16(5): 15~17.
- [59] 刘旺盛, 兰培真. 系统布置设计—SLP 法的改进研究[J]. 物流技术, 2006(10): 82~85.
- [60] 马彤兵, 马可. 基于精益生产的车间设施规划改善设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005, (11): 110~112.

## 作者在攻读硕士学位期间公开发表的论文

- [1] 汪一筵,米智伟. SLP 和遗传算法结合在车间设备布局中的应用.计算机工程与应用, 2009, 11.

## 致 谢

本文是在导师米智伟教授的悉心指导下完成的。承蒙米老师的亲切关怀和精心指导，虽然有繁忙的工作，但仍抽出时间给予我学术上的指导和帮助，特别是给我提供了良好的学习环境，使我从中受益匪浅。米老师对学生认真负责的态度、严谨的科学研究方法、敏锐的学术洞察力、勤勉的工作作风以及勇于创新、勇于开拓的精神是我永远学习的榜样。在此，谨向米老师致以深深的敬意和由衷的感谢。

还要感谢我的父母，他们在生活上给予我很大的支持和鼓励，是他们给予我努力学习的信心和力量。

最后，感谢所有关心我、支持我和帮助过我的同学、朋友、老师和亲人。在这里，我仅用一句话来表达我无法言语的心情：感谢你们！