

化工车间设备布局的合理性设计研究

高天祥

河北英科石化工程有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]化工行业的生产过程具有特殊性,做好化工设备的布置十分重要,化工设备可以确保生产的安全性,防止化学物质的排放或泄漏,保障化工生产过程中工作人员的安全。本文明确布局设计核心原则,构建安全、工艺、经济、环保四维合理性评价体系,提出多目标优化布局设计方法,为化工车间设备科学布局提供理论方法支撑,助力化工车间生产安全、高效运行。

[关键词]化工车间;设备布局;合理性设计;多目标优化

DOI: 10.33142/ect.v4i1.18845

中图分类号: TQ02

文献标识码: A

Research on the Rational Design of Equipment Layout in Chemical Workshop

GAO Tianxiang

Hebei Enco Petrochemical Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: The production process in the chemical industry is unique, and it is very important to arrange chemical equipment properly. Chemical equipment can ensure the safety of production, prevent the discharge or leakage of chemicals, and ensure the safety of workers in the chemical production process. This article clarifies the core principles of layout design, constructs a four-dimensional rational evaluation system for safety, process, economy, and environmental protection, proposes a multi-objective optimization layout design method, provides theoretical and methodological support for the scientific layout of chemical workshop equipment, and assists in the safe and efficient operation of chemical workshop production.

Keywords: chemical workshop; equipment layout; reasonable design; multi-objective optimization

引言

在化工生产过程中,常常会涉及有毒且具有腐蚀性的化学物质^[1,2]。据研究表明^[3],通过合理的布局设计,可以降低化工厂内部的物料输送费用,并将总布局费用降低。此外,合理的布局设计还可以有效地减少事故风险,根据对历年化工安全事故案例的分析和研究,多数化工过程事故都由设计错误引发,其中布局不当是最关键的因素之一^[4]。因此,推进科学规划布局,促进过程工业中物料、能源、人力和土地空间等资源的合理分配,是化工行业实现经济性、安全性和环保性平衡发展的关键举措。

1 化工车间设备布局的核心设计原则

1.1 安全优先原则

化工车间设备布局安全优先,以保障生产安全为前提。严格遵守安全规范,设置必要的通道、平台、楼梯、安全出入口,合理安排设备的间距、净空高度等^[5]。

1.2 工艺连续原则

工艺连续原则要求设备布局依工艺流程顺序,保障物料输送连续顺畅。按原料到成品工艺顺序布局,形成清晰路线;上下游关联紧密的设按照就近原则进行布置,减少管道长度、阻力与能耗;避免物料交叉折返与意外混合;预留操作空间,确保工艺顺利实施。

1.3 经济合理原则

在化工车间的设备布局规划中成排塔或储罐设置联合平台;依据管道进出口中心线或设备支座基础中心线布

置换热器;离心泵成排排列的时按照泵出口管中心线或泵体一端的基础中心线进行对齐^[6]。

2 典型化工设备的具体布置要求

2.1 泵的布置

泵的布置形式灵活,可根据气候条件、工艺需求选择露天、半露天或室内布置。车间内泵布置要保障操作检修空间:两排泵净距 $\geq 2\text{m}$,泵与墙净距 $\geq 1\text{m}$;成排布置可泵端出口中心线或基础边对齐;单排布置两泵净距 $\geq 0.8\text{m}$,联合基础上 $\geq 0.4\text{m}$ 。此外,在化工装置的泵类设备布置设计中采用一台泵一个基础的配置模式,泵基础宜高出地面 $100\sim 300\text{mm}$,满足防洪防涝要求。若在泵吸入口前设置过滤器,根据过滤器型号及滤芯更换方式设计泵基础高度。

2.2 塔的布置

塔既可以放在装置内部,也可以放在装置边缘,普遍具有较高的高度特征,且配备的管道长度较长,优先考虑在室外进行布置,为安装和检修作业提供便利条件;直径 $\leq 1\text{m}$ 的塔可根据车间的实际布局情况,选择在室内进行布置。塔的排列布局应当按照尺寸规格进行确定,尺寸较大的塔类设备实施单排排列,尺寸相对较小的塔类设备,采用双排或三角形排列方式。在进行单排排列时确保各塔的中心线或者切线处于对齐状态。关于间距,两塔净距 $\geq 2.5\text{m}$,塔外壁与管廊柱中心之间的距离 $\geq 3\text{m}$ 。成排布置的塔,其人孔以及直爬梯的方位应尽量保持一致。关联设备(像中间槽这类)应按照既定的工艺流程要求,合理布

置在塔周围区域,除泵类设备之外,其余相关设备通常布置于塔框架的相应位置。当于塔间搭建联合平台,对于可调节的基础,需将基础高度调整至一致。规定塔的基础高度 $\geq 200\text{mm}$ 。

2.3 立式容器的布置

在车间范围内,立式容器的类型多样、品类繁多,结合工艺需求与环保标准,合理选定设备在室外或室内的布置方案。中间罐的容量应遵循不宜超过一昼夜生产用量的原则,对于丙类液体中间罐,应将其布置于独立的房间内,而且其容量必须严格控制在 5m^3 。若立式容器以成排的形式进行布局安排时,可依据实际情况选择设备中心线对齐或切线对齐的排列方式,设备在室内布置,基础通常 200mm ;室外布置时,高度要比地坪高 300mm 。反应釜以立式的结构形式为主,采用悬挂在楼面的安装形式且中心线对齐布置,挂耳边缘的净间距需满足 $\geq 0.8\text{m}$ 的要求。当于混凝土楼面开展设备开孔工作时,在开孔四周设置高度为 100mm 的翻边结构,当对一排釜进行规划布局时,尽量使各釜的人孔朝向保持一致,釜的顶部需配备吊钩或吊轨相关装置。

2.4 卧式设备的布置

对于卧式容器、换热器等卧式设备,建议进行成组布置安排,依据支座基础中心线进行对齐。在地面卧式容器的布置过程中推荐优先采用封头顶端对齐的方式进行布置,两台净距 $\geq 0.8\text{m}$ 。若容器位于泵的前方,确保泵具备足够的净正吸入压头。对于底部带有集液包的设备,排液管线的最低点与地面或平台之间的距离应不小于 150mm 。若容器中设置有加热或冷却功能的管束结构,针对抽出侧,需预留管束长度加上 0.5m 的净空区域。

2.5 离心式压缩机的布置

离心式压缩机应安装在敞开或具备半敞开结构的建筑物内,输送比空气重的气体时,厂房宜采用尖顶设计。在压缩机布置方案中,优先选取单层布置的方式,若基础具有较高高度搭建操作平台,并在合适位置预留吊装孔,上方设吊钩。所布置的对象靠近边缘区域,距离墙或栏杆的净间距须 $\geq 2\text{m}$,压缩机上方区域严禁布置甲、乙、丙类液体的工艺设备。

2.6 平台与梯子的布置

对于需要操作和经常维修的设备及管道区域,应设置专用平台,并按防火规范要求配套安全梯,具体布置要求如下:(1) $\text{DN}\leq 100$ 的阀门手轮距平台,其手轮距平台(或地面)的高度不得超过 1.8m ; $\text{DN}=150$ 的阀门,鉴于其操作特点,采用链条或伸长杆操作,同步配套搭建操作平台与安装梯子;(2) 安装在容器上的止回阀、 $\text{DN}\leq 80$ 手动阀之类,设置直梯以方便操作与维护;(3) 调节阀、换热器等设备所在位置,在其下方设置符合规范要求的操作平台;(4) 针对人孔所配套设置的操作平台,以人孔中心线为基准,其至相关平台面的垂直高度不宜超过 0.75m ;(5) 针对卧式容器设置的联合平台,其高度必须低于设备管口 $\geq 150\text{mm}$ 。

3 化工车间设备布局合理性评价体系构建

3.1 评价指标选取

评价指标的选取遵循科学性、系统性、可量化性、针对性的原则,基于前文分析的影响因素与设计原则,从安全、工艺、经济、环保四个维度选取12项具体评价指标,形成完整的评价指标体系,如表1所示。

表1 化工车间设备布局合理性评价指标体系

评价维度	评价指标	指标定义	量化方法
安全维度	安全间距达标率	满足安全间距要求的设备对数量占总设备对数量的比例	$(\text{达标设备对数量}/\text{总设备对数量})\times 100\%$
	高危设备隔离程度	高危设备与关键设施的距离满足隔离要求的程度	实际距离/规范要求距离,取值 ≥ 1 为达标,数值越大隔离程度越高
	消防通道通过率	消防通道实际可用宽度与规范要求宽度的比例	$(\text{实际可用宽度}/\text{规范要求宽度})\times 100\%$
工艺维度	物料输送平均距离	所有物料输送管道的平均长度	总管道长度/输送管道数量(单位:m)
	设备关联紧密性	上下游关联设备的平均距离	关联设备总距离/关联设备对数量(单位:m),数值越小紧密性越高
	操作空间满足率	满足操作空间要求的设备数量占总设备数量的比例	$(\text{达标设备数量}/\text{总设备数量})\times 100\%$
经济维度	单位产能建设成本	车间建设总投资与设计产能的比值	建设总投资/设计产能(单位:元/t)
	年运营能耗成本	生产过程中设备运行、物料输送等产生的年度能耗成本	统计年度总能耗费用(单位:万元)
	运维成本系数	年度运维成本与设备总价值的比值	年度运维成本/设备总价值(单位:%)
环保维度	污染物处理效率	污染物处理设备的处理效率	$(\text{处理后污染物量}-\text{处理前污染物量})/\text{处理前污染物量}\times 100\%$
	卫生防护距离达标率	车间与周边环境敏感点的距离满足卫生防护要求的程度	实际距离/规范要求距离 $\times 100\%$, $\geq 100\%$ 为达标
	环保监测覆盖率	实际设置的环保监测点数量占应设置监测点数量的比例	$(\text{实际监测点数量}/\text{应设置监测点数量})\times 100\%$

3.2 指标权重确定

采用层次分析法(AHP)确定指标权重:

构建层次结构模型:目标层是设备布局合理性评价;准则层含安全、工艺、经济、环保四维度;指标层为表1中12项具体指标。

构建判断矩阵:邀多领域专家依1-9标度法对同层次指标两两比较构建矩阵。

权重计算与一致性检验:用特征根法算最大特征根与向量,归一化得权重;算CI与CR,CR < 0.1 时权重合理,否则调整矩阵。

通过上述步骤,得到各评价指标的权重值如表 2 所示。

表 2 评价指标权重表

评价维度	维度权重	评价指标	指标权重	综合权重
安全维度	0.35	安全间距达标率	0.45	0.1575
		高危设备隔离程度	0.35	0.1225
		消防通道畅通率	0.20	0.0700
工艺维度	0.30	物料输送平均距离	0.40	0.1200
		设备关联紧密性	0.35	0.1050
		操作空间满足率	0.25	0.0750
经济维度	0.20	单位产能建设成本	0.50	0.1000
		年运营能耗成本	0.30	0.0600
		运维成本系数	0.20	0.0400
环保维度	0.15	污染物处理效率	0.45	0.0675
		卫生防护距离达标率	0.35	0.0525
		环保监测覆盖率	0.20	0.0300

3.3 量化评价方法

采用模糊综合评价法量化评价设备布局合理性,具体步骤如下:

(1) 确定评价等级: 合理性分优秀 (90~100 分)、良好 (80~89 分)、合格 (60~79 分)、不合格 (<60 分) 四级。

(2) 指标标准化: 因指标量纲、量级不同, 正向指标 (数值越大越好, 如安全间距达标率) 用公式 (1) 处理, 负向指标 (数值越小越好, 如物料输送平均距离) 用公式 (2) 处理。

$$x'_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

式 (1) 中, x'_i 为标准化后的指标值, x_i 为指标实际值, x_{max} 为指标最大值, x_{min} 为指标最小值。

$$x'_i = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \quad (2)$$

式 (2) 中, 各参数含义同公式 (1)。

(3) 模糊综合评价计算: 根据标准化后的指标值与指标权重, 采用加权平均法计算综合评价得分, 公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \times x'_i \times 100 \quad (3)$$

式 (3) 中, S 为综合评价得分, w_i 为第 i 项指标的综合权重, x'_i 为第 i 项指标标准化后的数值, n 为评价指标总数。

(4) 结果判定: 依综合得分定布局合理性等级, 为方案优化提供依据。

4 基于多目标优化的设备布局设计方法

4.1 多目标优化模型建立

以最大化布局合理性综合得分 (S) 为核心目标, 构建多目标优化模型。

(1) 目标函数

以综合评价得分最大化为目标函数, 即:

$$\max S = \sum_{i=1}^{12} w_i \times x'_i \times 100 \quad (4)$$

式中, S 为综合评价得分, w_i 为第 i 项指标的综合权重, x'_i 为第 i 项指标标准化后的数值。

(2) 约束条件

根据设计原则与相关规范, 建立以下约束条件:

①安全约束: 高危设备与关键设施距离 \geq 规范最小值; 安全间距达标率 $\geq 95\%$; 消防通道畅通率 $\geq 100\%$ 。

②工艺约束: 设备关联紧密性 \leq 设计最大值; 物料输送平均距离 \leq 设计最大值; 操作空间满足率 $\geq 90\%$ 。

③经济约束: 年运营能耗成本 \leq 预算值; 单位产能建设成本 \leq 预算值。

④环保约束: 卫生防护距离达标率 = 100%; 污染物处理效率 $\geq 90\%$; 环保监测覆盖率 = 100%。

⑤几何约束: 设备之间无碰撞 (设备外接圆半径之和小于设备中心距离); 设备中心坐标需位于车间边界范围内。

(3) 优化算法选择

鉴于化工车间设备布局优化多目标、非线性且约束复杂, 选 NSGA-III 算法。其多目标优化性能佳, 能在复杂约束下找帕累托最优解集供决策。核心步骤: 初始化种群 (生成随机布局方案)、算适应度值 (依综合评价得分)、非支配排序 (按支配关系分类个体)、算拥挤度 (保多样性)、选择交叉变异 (生成新种群), 迭代至收敛 (达最大迭代次数或适应度值稳定)。

5 结论与展望

本文研究化工车间设备布局合理性设计, 经分析影响因素、确立设计原则、构建评价体系、提出优化方法。其受安全、工艺、经济、环保四类因素综合影响, 安全为首要制约因素; 确立五大核心设计原则, 构建含 12 项指标的多维度量化评价体系并确定权重; 提出基于 NSGA-III 算法的多目标优化方法, 建立优化模型得帕累托最优解集实现多目标协同优化。研究成果提供理论与方法指导, 未来可结合动态因素构建动态优化模型, 还可引入 BIM、数字孪生等技术构建数字化模型, 提升设计效率精度。

[参考文献]

- [1]魏大鹏.化工设备与三维管道布置和管道材料优化设计[J].建筑工程技术与设计,2021(19):436.
 - [2]周少强, 秦皓辰.化工工程设备布置及管材选择的优化建议[J].产业与科技论坛,2020(7):266-267.
 - [3]中华人民共和国工业和信息化部.化工装置设备布置设计规定:HG/T 20546-2009[S].北京:中国计划出版社,2010.
 - [4]孟明.化工工艺中的设备安装设计问题与对策的探索[J].化学工程与装备,2014,213(10):52-54.
 - [5]孙光明.化工工程设备布置与管道材料的优化设计[J].建筑工程技术与设计,2018(28):884.
 - [6]吴艳, 王或斐, 冯霄.石化工厂设施布局研究进展[J].计算机与应用化学,2016,33(10):1039-1044.
- 作者简介: 高天祥 (1995.3—), 毕业院校: 河北工业大学城市学院, 专业: 化学工程与工艺, 当前工作单位: 河北英科石化工程有限公司, 职务: 工艺工程师, 职称级别: 工程师。