

# D4 发动机装配线布局设计

曹阳华, 周禹辰, 教秋阳

(沈阳航空航天大学经济与管理学院, 沈阳 110136)

**摘要:** 装配线布局设计对企业的生产效率及物流效率有重要影响。以 D4 发动机装配线布局设计为研究对象, 分析其装配工艺, 构建以工作站数量最少为目标的装配线平衡模型。根据平衡结果, 确定各工作站任务划分。在工作站容量需求分析的基础上, 形成工作站布局设计。以平衡后的站间物流分析为基础, 运用系统布置设计 (SLP) 方法, 综合考虑工作站位置约束以及装配线生产柔性的需求, 确定装配线布局。该布局满足节拍需求, 满足装配工艺, 并支撑装配线高效运行。

**关键词:** 装配线平衡; SLP(系统设施布置)方法; 布局设计

**中图分类号:** TH181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)15-0081-07

长期生产实践证明, 车间内部的设施布局不仅对物料成本及物流效率有显著影响, 也直接关系到生产能力和生产效率<sup>[1]</sup>。因此, 车间布局设计受到了工业界和学术界的高度关注。

国内外关于车间设施布局的研究主要基于系统布置设计 (systematic layout planning, SLP) 方法<sup>[2]</sup>。黄鹏鹏等<sup>[3]</sup>应用 SLP 方法, 通过物流及非物流关系分析, 设计了两种布局方案, 最后运用层次分析法选出最优方案; 贾佳等<sup>[4]</sup>将快速全身评估法与 SLP 方法相结合, 建立人因视角下的车间布局优化模型, 优化后的布局有效降低了物流成本和工人疲劳程度; 张广泰等<sup>[5]</sup>采用了一种改进 SLP 方法进行车间布局设计, 对比原布局方案降低了物料搬运成本和搬运时间。一些学者通过物流仿真计算物流成本, 评估布局设计的有效性。李金辉等<sup>[6]</sup>运用改进 SLP 方法对某配送中心布局进行改进, 运用 Flexsim 软件对其作业流程进行仿真, 改善瓶颈环节和资源浪费现象; 孙伟光等<sup>[7]</sup>运用 SLP 方法和 PlantSimulation 软件仿真, 对航空导管生产线进行了布局设计; Wu 等<sup>[8]</sup>运用 WITNESS 仿真软件对车间数据进行仿真, 并对繁忙率过高的不合理部件进行推理, 提出改进方法。SLP 方法在解决大规模复杂布局问题时效率较低, 有学者将智能算法融入 SLP 方法中。吕硕和冯国红<sup>[9]</sup>运用改进猎人猎物算法对穴播机车间布局进行优化, 降低了车间搬运

费用, 消除了工人受伤风险; 张梦扬等<sup>[10]</sup>将遗传算法与和声搜索算法相结合, 对锻造厂车间布局进行二次优化, 获得最优布局方案; Prayogo 等<sup>[11]</sup>运用一种新型混合启发式算法对建筑管理现场布局做出了优化。

综上所述, SLP 方法在设施布局研究领域已经得到了广泛应用, 但很少有学者将装配线平衡、作业单位容量规划、装配车间整体布局这 3 方面结合在一起展开研究。装配线平衡和作业单位容量规划对装配车间整体布局都有着重要影响。因此本文选择以 SLP 法为切入点, 采取“先平衡, 后工位布局, 再装配线布局”的思路, 将装配线平衡、工位布局设计以及装配线布局设计有机结合, 以 D4 发动机装配线作为研究对象, 进行装配线布局设计。

## 1 装配线平衡

### 1.1 装配工艺及工时

该企业装配车间主要生产 D4、D4a 和 D4b 3 款发动机。其中 D4 为主力机型, 以该机型为基础进行装配线布局设计。经调研得知, 该产品装配工艺主要分为装配、隔热、检测 3 类。具体工序、工序工时以及工序间先后顺序见表 1。基于表 1 可得出装配工艺优先序, 如图 1 所示。

### 1.2 装配线平衡模型

#### 1.2.1 装配线平衡目标

经过与车间管理者讨论, 确定该装配线平衡设

**收稿日期:** 2025-01-18

**作者简介:** 曹阳华 (1979—), 男, 辽宁锦州人, 博士, 副教授, 研究方向为设施规划及物流系统建模与仿真; 周禹辰 (2000—), 男, 湖北安陆人, 硕士研究生, 研究方向为生产物流规划与仿真、质量管理; 教秋阳 (1996—), 女, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 研究方向为生产物流规划与仿真、质量管理。

表 1 产品工序、工时及紧前工序

序号	工序名称	工时/h	紧前工序
1	进气道自动对接+拧钉	2	—
2	尾喷管自动对接+拧钉	2	—
3	整机气密检测(纯检测+自动拧钉+上工装)	1	1和2
4	段间锁丝	3	3
5	激光跟踪仪安装	0.2	4
6	热敏阀装置安装	0.3	4
7	整机隔热/段间隔热	9	5和6
8	高温阀装配	0.5	7
9	燃烧室冷却管及导出阀装配	1.5	7
10	低温管路装配	2.5	7
11	高温管路装配	3.5	7
12	传感器安装	2	8、9、10、11
13	膜片后管路气密检测+冷却管路气密检测	2.5	12
14	燃油泵组合以及管路装配	3	13
15	主电动泵和预增压泵装后检测	0.5	14
16	管路防松	8	15
17	信号变换器安装	0.5	16
18	参数测量电缆铺设	2.5	17
19	参数测量电缆装后检测	2.5	18
20	温度传感器及设备装后检测	1.5	19
21	传感器隔热组件装配+电缆恢复	4	20
22	密封装置装配、调整及锁丝	1	21
23	段间盖板安装	0.5	22
24	点火器工艺件装配	0.5	23
25	质量质心测量	0.5	24
26	激光扫描测量	0.3	25
27	接口尺寸测量	0.2	26
28	电动泵安装	1	27
29	补充电缆以及传感器连接	1	28
30	膜片前管路气密性检测	1	29
31	点火器装前检查	0.5	26
32	点火器装后检测	0.5	31
33	烟火点火器装后检测	1	32
34	整机气密检测	1	33
35	紧固件锁丝处理	0.5	30和34
36	发动机补充隔热	2	35
37	发动机参数测量系统电气性能测量	1	36
38	控制系统性能测试	3	37
39	发动机外观拍照	0.5	38
40	多余物检查	0.5	39
41	发动机初检	3	40
42	发动机终检	5	41

计目标主要有两个：①装配线平衡率达到 85%；②装配线节拍控制在 10 h 以内。

1.2.2 假设条件

基于该车间的实际生产状况，提出以下假设条件<sup>[12]</sup>：①各工序的作业时间是预先确定的固定值；②每个工序都是不可拆分的基本工作单元，无法同时分配给两个工作站；③各工序的作业时间不会因为工作站的不同而改变；④装配线仅生产单一类型的产品；⑤装配过程全部为串行工作站，无并行工作站。

1.2.3 模型参数定义及决策变量

结合模型需求定义如下变量：CT 为装配线生产节拍；K 为装配线工作站数目；k 为每个工作站序号，用于标识第 k 个工作站，k=1, 2, ..., K；m 为工序总数量；i, j 为工序序号；t<sub>i</sub> 为第 i 个工序的作业时间，i=1, 2, ..., m；TASKS={1, 2, ..., m}，表示工序集合；Pred 为工序的优先关系集合，Pred={ (i, j) | 工序 i 为工序 j 的紧前工序 }；X<sub>ik</sub> 为决策变量，用于表示工序的分配情况，X<sub>ik</sub>=1 为工序 i 被分配到工作站 k，X<sub>ik</sub>=0 为工序 i 没有被分配到工作站 k；A<sub>k</sub> 为一个指示变量，用于表示工作站的状态，A<sub>k</sub>=1 表示工作站 k 有工序被分配，A<sub>k</sub>=0 表示工作站 k 没有被分配任何工序。

1.2.4 装配线平衡问题模型

该数学模型需满足以下约束条件。

(1)各工序仅能被分配到一个工作站内。其数学表达式为

$$\begin{cases} X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1K} = 1 \\ X_{21} + X_{22} + \dots + X_{2K} = 1 \\ \vdots \\ X_{m1} + X_{m2} + \dots + X_{mK} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

(2)确保每个工作站的总工作时间不超过装配线的预定节拍。其数学表达式为

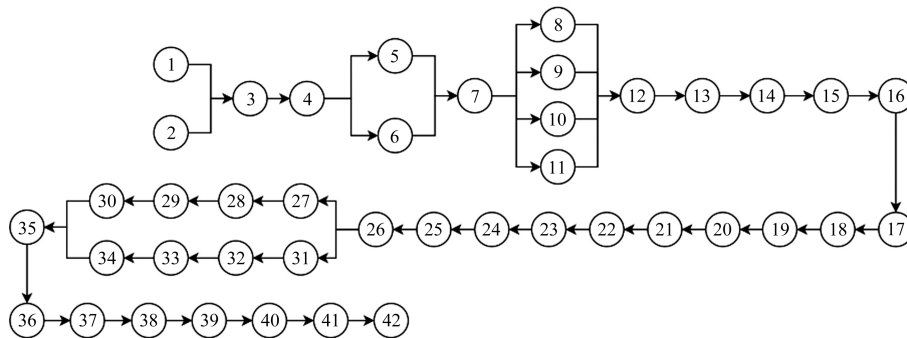


图 1 作业关系优先图

$$\begin{cases} X_{11}t_1 + X_{21}t_2 + \dots + X_{m1}t_m \leq CT \\ X_{12}t_1 + X_{22}t_2 + \dots + X_{m2}t_m \leq CT \\ \vdots \\ X_{1K}t_1 + X_{2K}t_2 + \dots + X_{mK}t_m \leq CT \end{cases} \quad (2)$$

(3)在分配各个工序到不同工作站时,必须遵循它们之间的先后顺序限制。其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^K (kX_{jk} - kX_{ik}) \geq 0; \forall (i, j) \in \text{Pred} \quad (3)$$

该模型追求装配线节拍给定时,工作站数量最小化。基于以上条件,构建发动机装配线平衡问题的第 I 类整数规划<sup>[13]</sup>模型如下。

目标函数为

$$\min = \sum_{k=1}^K A_k \quad (4)$$

### 1.3 装配线平衡结果

利用遗传算法对装配线平衡模型进行求解,得到各工序在工作站中的分配方案,见表 2。共划分为 11 个工作站,装配线平衡率达到 85.9%,装配线节拍为 9 h,满足设计要求。

表 2 装配线平衡结果

序号	工作站	站内工序	站内时间/h
1	A	1~6	8.5
2	B	7 和 17	9 和 8
3	C	8~11	8
4	D	12~15	8
5	E	16	8
6	F	18~21	7
7	G	22~28	7
8	H	29~36	6.5
9	I	37~41	7
10	J	42,43	8

## 2 工作站布局设计

该装配线工作站主要由加工设备、人员操作区域、料架、电气控制柜,以及 AGV(无人搬运车)装卸区构成,部分工作站内还需要特定的测量设备及检测设备。

以 A 工作站为例,该工作站主要完成对接及尺寸测量任务,站内需要对接设备 1 台,尺寸测量设备 1 台,还需要人员操作区域、料架、电气控制柜、AGV 装卸区。经过调研,确定该工作站各设备占地面积,见表 3。

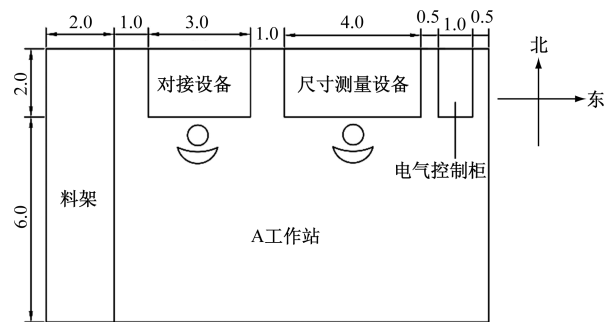
根据以上数据对 A 工作站进行布局设计,设计过程主要考虑以下因素:①料架的位置与人员工作区域不宜过远,方便工人拿取物料;②对接设备和尺寸测量设备间需要留有安全距离;③装配过程是

表 3 工作站内部设施占地面积

设备(区域)名称	长×宽/(m×m)	面积/m <sup>2</sup>
对接设备	3×2	6
尺寸测量设备	4×2	8
料架	2×8	16
电气控制柜	1×2	2
人员操作区域	—	—
AGV 装卸区	—	—
设备与工作站围挡间隔	0.5	—

由潜伏式 AGV 小车装载产品行驶至对接设备下方,再由 AGV 向上举升至适宜高度后进行对接,对接完成后再由小车运送至尺寸测量设备,因此两设备的布局应位于一条线上,方便 AGV 的搬运;④电器控制柜的位置需考虑控制柜与工作站内用电设备电路走线情况,且需考虑到与工人工作区域的距离,如果距离过远,工人在进行作业时的移动距离会有相应的增加,导致工作效率的降低。

综合以上因素分析设计,得出图 2 所示的布局图。同理可得其他工作站布局及占地面积。回转库主要存放部件及装配所需的物料,立体库主要存放成品以及主件。回转库与立体库容量与面积需求已提前计算确定。各工作站面积需求见表 4。



单位: m

图 2 A 工作站布局图

表 4 各工作站面积需求

工作站	长/m	宽/m	面积/m <sup>2</sup>
A	13	8	104
B	40	7	280
C	9	8	72
D	9	8	72
E	13	8	104
F	14	8	112
G	17	6	102
H	20	6	120
I	15	6	90
J	6	6	36
回转库	10	9	90
立体库	6	16	96

### 3 装配线整体布局设计

基于对装配线平衡及工作站容量规划的分析研究,采用 SLP 方法对装配线各工作站位置进行设计。车间可利用面积如图 3 所示。

#### 3.1 物流关系分析

车间 3 款发动机的年产量见表 5,机型 D4a、D4b 绝大部分装配工艺与主力机型 D4 相同。

因为发动机运输为单件运输,因此以发动机台数作为当量流量计算依据,因与回转库相关的物流量较小,因此并未进行物流强度的统计分析。经统计后绘制出作业单位间的物流从至表,见表 6。

为系统化处理物流系统的复杂性问题,SLP 方法论构建了基于 A、E、I、O、U 5 级分类的物流强度评估体系,其中 A 代表最高,E~U 分别指的是较高、较大、一般和可忽略。这种层级化分类策略为设施规划提供了量化依据,使生产单位的空间排布能精准匹配物料流动特征,从而实现物流成本优化

表 5 产品种类及产量

产品种类	年产量/台
D4	300
D4a	30
D4b	40

与作业效率提升的双重目标。详情见表 7。

根据物流强度从至表,按照 SLP 给定的物流强度等级划分方法,确定工作站间的物流关系等级,因回转库与其他工作站的物流量较小,因此与回转库相关的物流关系等级皆确定为“O”,如图 4 所示。

#### 3.2 非物流关系分析

在解决车间布局问题时,各作业单位区域间的非物流关系也是相对重要的影响因素。经过讨论,考虑作业流程的连续性、物料搬运的便捷性等因素,确定各工作站间的非物流关系,依据非物流强度等级标准(表 8)绘制出非物流关系相关图,如图 5 所示。

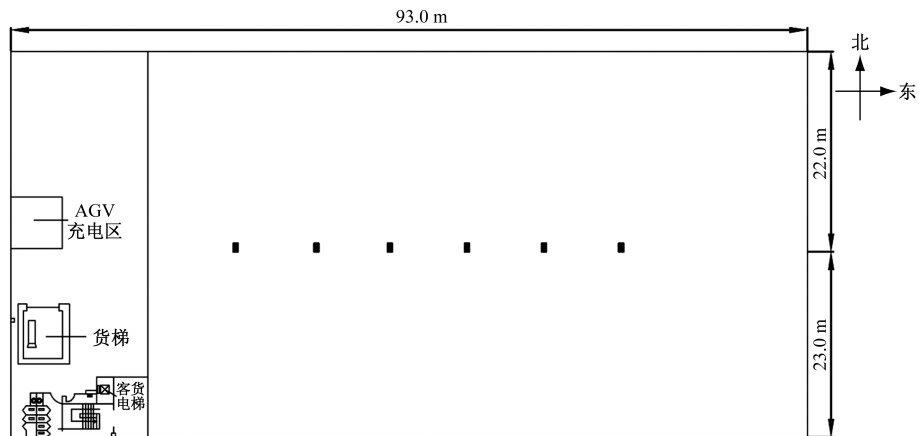


图 3 车间可利用面积示意图

表 6 物流强度从至表

工作站	至											合计	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	立体库		
从	A		370										370
	B			370		40	30				70		810
	C				300			40	30				370
	D					300							300
	E		40				300						340
	F		30					300					330
	G		40						300				340
	H		30							300			330
	I										300		300
	J											370	370
	立体库	300											300
合计	300	810	370	300	340	330	340	330	300	370	370	8 320	



(1) B 工作站为隔热区,在产品装配过程中需在 B 工作站中进行较长时间的烘干,烘干过程温度较高,需要良好的通风条件。通风口设置在车间南部,因此 B 工作站需布置在车间南部靠窗通风的位置。

(2) 由产品工艺及工作站物流关系可知,产品为单件流水线生产,因此考虑到装配效率、物料搬运成本及车间现有空间,车间装配线决定采用“U”型布局。

(3) 回转库和立体库分别作为装配线上料源和产品下线储存单位,考虑到安全因素,为方便集中管理,将两库集中设置在车间西北角位置,同时,作为装配线的上料口和下线口, A 和 J 工作站的位置与回转库和立体库的距离不宜过远。

(4) 车间中间横排有些承重立柱对布局有较为明显的影响,经过与车间建筑设计和施工方进行讨论研究,得知该横排立柱无法取消或移动。因此布局时必须考虑承重立柱对工作站的影响。

在综合考量上述所有因素后,结合车间内各工作站间的物流与非物流关系,制定车间布局方案,如图 8 所示。

### 3.5 装配线布局评价

该车间装配线平衡率达到 85.9%,节拍为 9 h,满足车间生产需求;“U”型布局保证了产品在工作站间的物流运输效率,避免了车间内部建筑结构对装配线布局可能产生的影响,同时满足了 B 工作站对环境通风的需求。考虑到车间未来的柔性布局需求,设计了隔热预留区和生产预留区。整体设计较为合理。

## 4 结论

(1) 以某发动机装配线布局设计为研究对象,采用“先平衡,后工位布局,再装配线布局”的思路,

将传统装配线平衡、工位布局设计以及装配线布局设计 3 方面内容相结合展开研究。虽然以上 3 方面均已广泛应用,但很少有学者将这 3 方面结合在一起展开研究。该研究方法通过装配线平衡确定各工作站任务划分,对各工作站进行站内布局设计,为最后 SLP 方法综合分析,确定满足生产需求的装配线布局提供了详细的数据基础,保证了最终方案的实用性。

(2) 该布局满足装配工艺,达成装配节拍要求,保证了该车间完成年产 300 台的目标,且面对订单增多的情况也可满足需求,提升了车间内物流运输效率,减少物流运输成本和浪费,满足柔性布局需求。作为车间装配线设施布局相关方法的实践应用,也可同为同类型装配车间布局设计提供一定的参考。

## 参考文献

- [1] YANG S L, XU Z G, WANG J Y. Modelling and production configuration optimization for an assembly shop[J]. International Journal of Simulation Modeling, 2019, 18(2): 366-377.
- [2] 罗来根. 生产车间设施布局优化方法研究[J]. 物流工程与管理, 2023, 45(2): 5-7, 25.
- [3] 黄鹏鹏, 魏春珊, 郑雅琳. 基于 SLP 和 AHP 的输液器组装车间布局优化及仿真[J]. 制造业自动化, 2022, 44(4): 17-21.
- [4] 贾佳, 魏旭, 杨丹, 等. 人因视角下 SLP/遗传算法集成模型车间布局优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(2): 161-164, 168.
- [5] 张广泰, 郭俏君, 张梅, 等. 改进系统布置设计法在车间布局设计中的应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5276-5283.
- [6] 李金辉, 周晴, 李玉民. 基于改进 SLP 与 FlexSim 的物流配送中心布局优化研究[J]. 物流工程与管理, 2024, 46(6): 12-17.

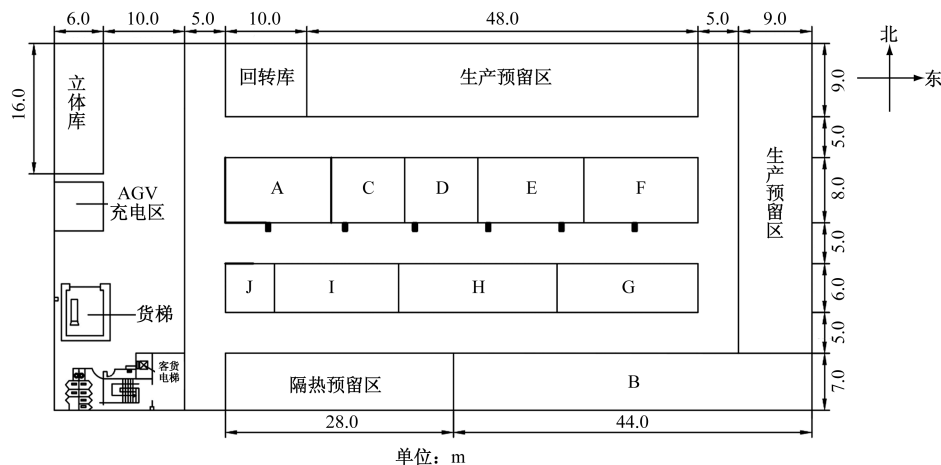


图 8 车间布局方案

- [7] 孙伟光, 祖海松, 翟锋广, 等. 基于 SLP 和系统仿真技术的航空导管生产线布局优化[J]. 物流技术与应用, 2024, 29(12): 172-179.
- [8] WU R J, HUANG Z H, XIE Y. Layout optimization of workshop equipment based on WITNESS[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1848(1): 012017.
- [9] 吕硕, 冯国红. 基于改进猎人猎物算法的穴播机车间布局优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(32): 13736-13747.
- [10] 张梦杨, 朱玉杰, 张许英龙. 基于系统布置设计与混合算法的锻造厂车间布局优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(1): 176-182.
- [11] PRAYOGO D, CHENG M Y, WU Y W, et al. Anovel-hybrid metaheuristic algorithm for optimization of construction management site layout planning [J]. Algorithms, 2020, 13(5): 117-120.
- [12] 陶帅, 张胜文, 陈银娟, 等. 基于混合优化算法的船用柴油机脉动装配线平衡优化技术研究[J]. 制造技术与机床, 2023(12): 117-122.
- [13] 王辉, 张蕾, 张仲凤, 等. 基于 IE 及整数规划理论的家  
具生产线平衡优化[J]. 林产工业, 2024, 61(3): 45-51.

## Layout Design of the D4 Engine Assembly Line

CAO Yanghua, ZHOU Yuchen, JIAO Qiuyang

(College of Economics and Management, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The layout design of an assembly line has a significant impact on a company's production and logistics efficiency. Taking the layout design of the D4 engine assembly line as the research object, the assembly process was analyzed, an assembly line balancing model was constructed with the goal of minimizing the number of workstations. Based on the balancing results, the task division for each workstation was determined. On the basis of analyzing the capacity requirements of the workstations, the design of the workstation layout was formed. Utilizing the systematic layout planning (SLP) method, and considering the constraints of workstation positions as well as the need for flexibility in assembly line production, the layout of the assembly line was determined based on the analysis of inter-station logistics after balancing. The layout is arranged to fulfill the rhythm demands, satisfy the assembly process, and support the efficient functioning of the assembly line.

**Keywords:** assembly line balancing; SLP(systematic layout planning) method; layout design