

# 新质生产力背景下高端智能制造厂房的功能性设计优化

吴赞

无锡市城乡给排水工程设计院有限责任公司

DOI:10.32629/btr.v8i9.4893

**[摘要]** 在新质生产力驱动制造业向数字化、柔性化、高精密化转型的背景下,传统工业建筑因功能固化难以支撑高端智能制造需求。本文聚焦厂房空间布局与工艺流程的动态适配问题,通过梳理国内外工业建筑从标准化生产向数字化协同的演进脉络,揭示了传统厂房在高精密装备支撑、快速工艺迭代响应等方面的功能局限。基于功能匹配度核心目标,构建涵盖模块化柱网、重型化荷载冗余及数字化管廊集成的动态设计模型,结合智能车间实证分析,提出提升生产效能与企业长效运营收益的建筑功能优化策略。

**[关键词]** 新质生产力; 高端智能制造; 工业建筑

中图分类号: TU27 文献标识码: A

## Functional design optimization of high-end intelligent manufacturing plants under the background of new quality productivity

Yun Wu

WUXI URBAN AND RURAL WATER SUPPLY AND DRAINAGE ENGINEERING DESIGN INSTITUTE CO., LTD

**[Abstract]** In the context of the transformation of manufacturing industry towards digitization, flexibility, and high precision driven by new quality productivity, traditional industrial buildings are unable to support high-end intelligent manufacturing needs due to functional solidification. This article focuses on the dynamic adaptation of factory space layout and process flow lines. By reviewing the evolution of industrial buildings from standardized production to digital collaboration at home and abroad, it reveals the functional limitations of traditional factories in high-precision equipment support and rapid process iteration response. Based on the core goal of functional matching, a dynamic design model covering modular column grid, heavy-duty load redundancy, and digital pipe gallery integration is constructed. Combined with empirical analysis of intelligent workshops, building functional optimization strategies are proposed to improve production efficiency and long-term operational benefits of enterprises.

**[Key words]** new quality productivity; High end intelligent manufacturing; industrial building

### 引言

在新质生产力重塑全球制造业格局的背景下,高端智能制造正在推动传统工业建筑向数字化协同平台转型。传统设计范式因功能固化、空间单一、布局僵化,难以满足高精密装备的严苛环境要求,也无法适配产线动态重组需求<sup>[1]</sup>。数据显示,我国制造业核心设备迭代周期已缩短至3-5年,而配套厂房基建成本达设备投资的25%-40%,迭代即拆改,将造成成本和时间的双重重大损失。本文以功能匹配度为核心,构建涵盖模块化柱网、重型化荷载冗余及数字化管廊集成的动态设计模型,突破传统被动逻辑,实现建筑功能要素与生产系统的全周期优化,为高端制造降本增效提供技术支撑。

### 1 国内外工业建筑功能演进研究脉络

#### 1.1 工业建筑发展阶段划分

工业建筑的功能演进与制造业生产模式变革紧密关联,分为三个阶段。第一阶段为标准化单一生产阶段,以福特制流水线生产为代表,强调功能分区固化与空间尺度标准化。德国包豪斯学派提出的“形式追随功能”理念发展至顶峰,厂房设计服务于设备固定布局,刚性柱网与单向工艺流程线实现生产效率最大化,典型案例如福特汽车罗格河工厂、斯大林汽车厂,毫无迭代适应性。第二阶段为柔性化生产阶段,丰田的生产方式推动可变分区与模块化设计,大众沃尔夫斯堡工厂通过可移动隔断系统实现产线重组,空间功能从单一生产向“生产-仓储”一体化转变。第

三阶段为数字化多功能协同阶段,工业4.0与智能制造的兴起推动厂房向“生产-研发-运维”复合空间演进,如西门子安贝格工厂通过数字孪生技术实现空间布局与工艺流线的动态匹配,成为生产系统的有机组成部分。

### 1.2 工艺流程与空间布局的协同关系

工艺流程与空间布局的协同机制是工业建筑功能演进的核心逻辑。传统标准化生产模式下,工艺流程多为线性布局,设备按工序固定布置,以最小化物料搬运距离为优化目标,如富士康深圳工业园采用U型流线设计,缩短生产周期。但新质数字化生产场景下,这种刚性布局暴露缺陷,如新能源汽车电池模组生产、半导体制造中,传统固定布局难以满足工序耦合度增强、纳米级振动控制等需求。现代智能厂房通过空间-工艺双维度协同优化破解难题,如中芯国际北京工厂采用“蜂窝状”布局,特斯拉上海超级工厂挖掘垂直空间潜力,实现高效利用。这种协同关系重构推动工业建筑从“固定布局”走向“灵活适配”,实现“空间决定工艺”向“工艺定义空间”的转变。

### 1.3 传统厂房的功能局限性分析

传统工业建筑在高端智能制造场景下功能局限性凸显。使用空间适应性方面,高精设备对建筑基础振动速度要求严苛,传统厂房固定柱网与基础形式难以满足,光刻机等核心设备需额外配置独立基础,丧失改造灵活性,拆改耗时耗力,成本高企。结构安全性方面,传统厂房荷载设计预留安全系数有限,难以适应智能制造设备迭代带来的荷载需求大幅调整,某动力电池工厂产线升级时被迫拆除重建部分结构,损失巨大。运维经济性方面,传统厂房能源系统集中供应,缺乏改造灵活性,无法精准调控。某半导体工厂空气循环系统能耗占比高,而智能车间采用数字化管廊集成技术可降低单位产能能耗。传统厂房功能设计已制约技术迭代,功能重构成为高端制造企业突破桎梏的关键。

## 2 高端智能制造厂房的功能性设计要素

### 2.1 模块化柱网设计

模块化柱网设计是高端智能制造厂房实现空间动态适配的核心要素<sup>[2]</sup>,通过标准化构件与可变组合方式构建弹性空间框架。传统厂房柱网间距通常按最大设备尺寸固定设计,空间利用率偏低,难以适应工艺迭代升级需求<sup>[3]</sup>。现代模块化柱网系统采用“基础模块+扩展单元”的分级设计模式:基础模块为6m×6m或9m×9m的标准柱距,通过高强螺栓连接形成刚性骨架;扩展单元则通过可拆卸钢桁架或预应力张拉结构实现跨度延伸,最大可扩展至18m×24m的无柱空间。这种设计理念在比亚迪长沙新能源汽车工厂中得到应用,其模组生产线因迭代设备尺寸差异,需频繁调整布局,设计时尽量采用大跨度钢框架、钢桁架结构,以减少布局调整时需触动的结构柱,并且装配式钢结构也为实现快速拆装改造提供了可能性。通过模块化柱网与设备分区设计、预留充足的接口和扩容空间、搭配AGV运输车系统,使厂房在建成后,依然能低成本实现空间灵活重组,设备就位精度误差可以控制在±2mm以内。

### 2.2 重型化荷载冗余体系

重型化荷载冗余体系是支撑高端制造设备稳定运行的关键基础设施,需要兼顾静态荷载承载与动态振动控制双重需求。以集成电路制造为例,光刻机、离子注入机等核心设备自重达50-100吨,运行过程中产生0.5-2 μm的微振动。光刻机的振动频率为5-50Hz,基础固有频率需控制在2-8Hz以避免共振。共振会严重影响光刻的精度导致良品率锐减。传统厂房框架基础与独立基础的组合方式难以满足设备运行要求。现代重型化体系采用“复合基础+隔振层”的双重保障机制:基础部分采用桩筏体系,即混凝土加厚筏板下通过桩基支承,部分高标准项目的桩基甚至直达中风化岩层(单桩承载力特征值达3000kN),为设备运行提供充裕的承载能力和结构刚度;隔振层则可采用钢弹簧与橡胶隔振支座组合形式,形成三级振动衰减系统,使设备振动加速度控制在0.02g以内。中芯国际深圳工厂的厂房即采用以上设计思路,该设计对厂房的地面、楼面都提供了足够冗余的结构刚度。实践表明,该体系可使光刻机曝光精度稳定在±1.5nm,较传统设计提升3倍。

### 2.3 数字化管廊集成系统

数字化管廊集成系统是高端智能制造厂房实现能源与信息高效流通的“神经中枢”,其通过BIM技术构建三维数字模型,实现管道、电缆、桥架等设施的协同布局与智能运维。传统厂房的管廊采用分层敷设方式,动力管道、工艺介质管与电气桥架独立布置,导致空间占用率超过40%且维护困难。现代集成系统采用“综合支架+模块化管道”的设计模式:综合支架通过有限元优化确定最佳跨距与截面形式,可承载DN600以下管道与300mm×150mm以下桥架;模块化管道则采用预制化生产,通过法兰连接实现快速组装,使安装效率提升超过50%。特斯拉上海超级工厂的管廊系统集成20种工艺介质管道与10kV高压电缆,空间利用率较传统设计提高25%,其独有的生产制造控制系统MOS,以管廊系统为载体,将全厂所有车间的生产数据接入这套数字神经网络,涵盖零部件信息和工艺流程数据,为设备自动化、设备无线连接、信息数据采集、智能化决策、人机交互等提供完善的网络服务,大幅提升了工厂的自动化生产效率。

## 3 功能匹配度评价模型构建

### 3.1 评价指标体系设计

功能匹配度评价模型的构建基于高端智能制造厂房的核心功能需求,建立包括空间适应性、结构安全性、运维经济性三个维度共12项指标的量化评价体系。空间适应性聚焦柱网系统的动态重组能力,设置模块化程度、空间重组效率及设备就位精度3项指标;结构安全性强调荷载冗余与振动控制能力,包含基础承载冗余系数、隔振系统衰减率及结构变形控制值3项指标;运维经济性则从全生命周期成本视角出发,选取空间利用率、单位产能能耗及模块重复利用率6项指标。通过层次分析法确定权重,其中空间适应性占比40%、结构安全性占比35%、运维经济性占比25%,确保评价结果全面,全面客观反映厂房功能与生产需求的匹配程度。

### 3.2 量化评价方法

量化评价方法采用“多目标决策-模糊综合评价”的复合模型,解决指标量纲差异与评价主观性问题。指标标准化处理:正向指标采用线性比例变换法,反向指标采用倒数变换法,确保所有指标映射至 $[0, 1]$ 区间;构建模糊评价矩阵,专家打分确定各指标对“优秀”“良好”“合格”“不合格”4个评价等级的隶属度,例如某厂房的模块化程度为85%,则其对“优秀”等级的隶属度为0.8;结合AHP确定的权重向量与模糊评价矩阵进行复合运算,得到厂房功能匹配度的综合得分。以某动力电池工厂为例,其空间适应性得分0.78,结构安全性得分0.82,运维经济性得分0.75,综合得分0.79,评定为“良好”,与实际生产效能高度吻合,验证了该评价方法的实用性。

### 3.3 模型验证与修正

模型验证需通过实际工程数据与仿真结果的对比分析完成。选取3个典型高端制造厂房作为样本,分别采集数据:样本A(柱网模块化75%、基础承载冗余2.5倍、能耗0.08kWh/万元)得分0.83;样本B(重组效率5天、隔振衰减80%、复用率75%)得分0.76;样本C(就位精度 $\pm 2\text{mm}$ 、利用率68%、变形控制1/1000)得分0.72。得分结果与样本实际生产效能匹配,验证了模型有效。针对模型修正,引入熵权法动态优化权重,以适应不同场景需求,修正后的模型评价误差率从8.7%降至3.2%,提升了评价结果的精准度与实用价值。

## 4 设计优化策略与长效运营收益关联分析

### 4.1 空间-工艺协同优化策略

空间-工艺协同优化通过动态适配生产流程与厂房空间布局,实现运营效率的持续提升。基于模块化柱网设计,采用“工艺流程仿真-空间重组迭代”的优化方法:首先利用Digital Twin技术构建三维工艺模型,模拟物料搬运、设备协作等关键流程的时空路径;其次通过遗传算法对柱网模块进行组合优化,使设备间距、物流通道等参数满足精益生产要求。某半导体工厂实践表明,该策略使产线切换时间缩短40%,空间利用率提升25%,单位面积产值增加18%。其核心价值在于打破传统厂房“静态空间-固定工艺”的固化模式,建立空间与工艺的动态映射关系,为高端制造的柔性化生产提供支撑。

### 4.2 全生命周期成本管控

全生命周期成本管控通过设计阶段的前置优化降低运营隐性成本,形成“设计-建设-运维”的成本闭环控制体系。在结构设计环节,通过有限元分析确定基础最小承载力,避免过度设计导致的材料浪费;在设备布局阶段,运用数字化管廊集成系统的智能排布算法,优化管道走向与电缆路径,使安装工程量减少约15%,后期维护成本降低约30%。通过设计优化,以动力电池工厂为例,其全生命周期运维费用占比可从65%降至52%,投资回收

期缩短2.3年。实现全周期资源最优配置。

### 4.3 企业竞争力提升路径

设计优化策略通过降低运营成本、提高生产效率、增强技术壁垒三重机制,构建企业核心竞争力。空间-工艺协同优化使企业具备快速响应市场变化的能力,某工业机器人企业通过动态调整产线布局,将新产品导入周期从18个月压缩至9个月;某集成电路企业通过降低单位产能能耗12%,使其产品毛利率提升5个百分点;而数字化管廊集成系统形成的技术壁垒,使竞争对手的模仿成本增加约40%。这些量化收益最终体现为市场份额的扩大与品牌价值的提升,形成“设计优化-运营收益-竞争力增强”的良性循环,为高端制造企业的可持续发展提供坚实的战略支撑。

## 5 结论与展望

高端智能制造厂房的设计优化,虽会在首次建设阶段增加成本投入、提高技术难度、增加建设周期,但适配高端制造业产线频繁迭代需求,其全生命周期的经济价值与生产价值显著高于传统设计。若一味贪图初期低成本投入,沿用传统模式,企业必然会陷入不断拆改、减产停产、反复投入的恶性循环,综合成本反而会持续走高。因此,从长远发展角度来看,新质生产力背景下高端智能制造厂房功能性设计优化,是兼具必要性和经济性的选择。

本文构建的新质生产力背景下高端智能制造厂房功能性设计优化体系、评价体系与优化模型,揭示了模块化柱网、重型化荷载冗余及数字化管廊集成系统对空间适应性、结构安全性与运维经济性三大要素的协同作用。通过量化评价与实证分析验证,可降低全生命周期成本,提升生产效率,为企业构建柔性化生产能力与可持续竞争优势提供支撑。

未来研究可进一步探索AI在厂房动态重构中的应用,压缩首次建设投入成本,推动绿色建筑、零碳建筑标准与智能制造的深度融合,助力工业建筑向智能化、绿色化方向演进。

### [参考文献]

- [1] 加快培育新质生产力推动制造业向高端化智能化绿色化迈进[N]. 联合日报, 2025-05-29(003).
- [2] 刘尧. 智能制造驱动下高端装备机械设计制造的协同创新模式研究[J]. 中国机械, 2025, (32): 95-98.
- [3] 杜传忠, 林迎蕾. 人工智能标准促进中国制造业高质量发展的机制与路径[J]. 河北学刊, 2025, 45(04): 179-190.

### 作者简介:

吴赞(1977-),男,汉族,江苏省无锡市人,硕士,高级建筑师,建筑与土木工程。