

“工业上楼”高层厂房楼面活荷载分级与柱网协同优化探讨

郝猷猷 覃霜

中国中元国际工程有限公司

DOI：10.32629/jpm.v7i9.9047

[摘要] 制造业空间垂直拓展催生了“工业上楼”建设模式，但现行设计方法在荷载取值与柱网适配方面仍存在不足。以深圳坪山新能源汽车产业园（90 m 高、12 m 跨度钢框架）、东莞松湖智谷等建成项目为参照^{[1][2][3]}，依据 GB 50009—2012 附录 D 对仪器仪表、金工车间楼面活荷载的分级数据^[4]，将上楼产业按工艺特征划分为轻型（电子信息、精密仪器，活荷载 2.5~4.0 kN/m²）与重型（高端装备、汽车零部件，活荷载 4.5~8.0 kN/m²，局部集中荷载 50 kN/m²）两类。建立 8 m×8 m 及 10 m×10 m 典型框架模型完成内力计算与截面设计，并比较 6.0~12.0 m 六种柱网方案的材料消耗。研究表明：按工艺分区设计较整层统一按 8.0 kN/m² 设计可减少混凝土 12.6%、钢筋 13.4%，综合造价降幅约 13.1%；8.4~10.0 m 柱网在结构材料增量与生产工艺适配度之间达到较优平衡，可作为该类项目的首选模数^[5]。

[关键词] 现浇混凝土空心楼盖；多高层工业建筑；工业上楼；折实厚度；侧向刚度；等效解析法；等代框架法

中图分类号：TU318 文献标志码：A

Discussion on the Classification of Live Floor Loads and Collaborative Optimization of Column Grids for High-Rise Industrial Factories

Hao Youyou Qin Shuang

China Zhongyuan International Engineering Co., Ltd.

[Abstract] The vertical spatial expansion of the manufacturing industry has given rise to the "industrial verticalization" construction model; however, existing design methodologies still exhibit shortcomings regarding load determination and compatibility with column grids. Using completed projects—such as the Shenzhen Pingshan New Energy Vehicle Industrial Park (90 m height, 12 m span steel frame) and Dongguan Songhu Smart Valley [1][2][3]—as reference cases, and based on the classification data for live floor loads in instrumentation and metalworking workshops provided in Appendix D of GB 50009—2012 [4], industrial verticalization projects were categorized into two types according to their process characteristics: light-duty (electronic information, precision instruments; live load: 2.5 - 4.0 kN/m²) and heavy-duty (high-end

equipment, automotive components; live load: $4.5 \sim 8.0 \text{ kN/m}^2$, with localized concentrated loads of 50 kN/m^2).

Typical frame models of $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ and $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ were established to perform internal force calculations and cross-sectional design, and the material consumption for six different column grid configurations ranging from 6.0 m to 12.0 m was compared. The study demonstrates that designing based on process zoning—rather than applying a uniform live load of 8.0 kN/m^2 to the entire floor level—can reduce concrete usage by 12.6%, steel reinforcement usage by 13.4%, and overall construction cost by approximately 13.1%. Furthermore, column grids ranging from 8.4 m to 10.0 m achieve an optimal balance between structural material increment and process compatibility, making them the preferred modular choice for such projects [5].

[Key words] cast-in-place concrete hollow floor slabs; high-rise industrial buildings; industrial verticalization; equivalent thickness; lateral stiffness; equivalent analytical method; equivalent frame method

1 工程背景与问题提出

2023 年深圳坪山落成的新能源汽车产业园主体高度突破 90 m , 采用钢框架-支撑体系实现 12 m 楼板跨度^[1]; 同期东莞松湖智谷等园区首层活荷载普遍达 1.5 t/m^2 (15 kN/m^2) 量级^[3]。上述实践表明, “工业上楼”已由低层厂房简单叠加, 演变为真正意义上的高层工业建筑^[2,6,7]。

当前设计环节存在两类缺陷。一是荷载取值缺乏产业针对性: 多数设计直接套用 GB 50009—2012 中工业建筑楼面活荷载的通用条款^[4], 未结合入驻企业工艺类型细分, 安全储备局部不足或偏高。二是柱网尺度与生产线不匹配: 部分项目沿用 $6 \sim 8 \text{ m}$ 民用建筑柱距^[8], 难以容纳新能源汽车零部件、大型注塑等长度常超 30 m 的连续产线, 导致“柱挡门、梁压设备”冲突频发。

有必要在产业工艺特征与结构力学性能之间建立量化关联: 按工艺对楼面活荷载分级, 并通过计算分析验证不同柱网方案的力学行为与经济性。

2 产业分类与荷载分级

2.1 轻型产业: 电子信息与精密制造

电子信息及精密仪器组装类产业, 设备以 SMT 贴片机、回流焊及检测仪器为主。GB 50009—2012 附录 D 表 D.0.1-2 给出仪器仪表生产车间分级数据: 板跨不小于 1.2 m 时, “一般光学仪器装配”活荷载标准值 4.0 kN/m^2 , “光学加工”车间为 7.0 kN/m^2 ^[4]。标准层活荷载取 $2.5 \sim 4.0 \text{ kN/m}^2$ 可满足多数工况^[4], 仅精密检测区(如三坐标测量机)需单独核算集中心力。《武汉市“工业上楼”建筑设计指南》^[9]提出楼面活荷载不宜低于 5 kN/m^2 、首层不宜低于 10 kN/m^2 , 光电子信息产业首层不宜低

于 20 kN/m^2 、二至六层不宜低于 12 kN/m^2 。荷载分级示意如图 1 所示。

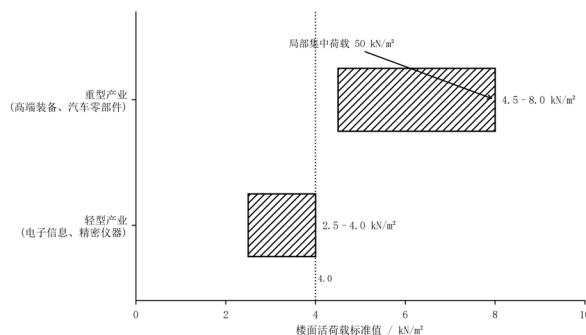


图1 楼面活荷载分级示意

此类产业对振动控制的敏感程度常超过荷载量级本身。GB 50009—2012 附录 D 表 D.0.1-3 给出半导体器件车间活荷载 $6.0 \sim 10.0 \text{ kN/m}^2$ ^[4], 但未涉及振动控制指标。工程实践中, 精密制造区域宜按 JGJ/T 441—2019 验算楼盖振动舒适度^[10], 必要时将设备底座与主体结构脱开并设置独立隔振基础^[8]。

2.2 重型产业: 高端装备与汽车零部件

高端装备制造涉及 CNC 加工中心、龙门铣床、注塑机及冲压设备。GB 50009—2012 附录 D 表 D.0.1-1 按机床型号将金工车间分为四级: 一类金工(如 CW6180、X53K)活荷载达 22.0 kN/m^2 , 四类金工(如 C6132、X50A)为 12.0 kN/m^2 ^[4]。工艺设备一般介于二类至三类金工之间, 标准层活荷载取 $4.5 \sim 8.0 \text{ kN/m}^2$ 较为合理。地方指引对重型产业的限值与之呼应: 新能源汽车与智能网联汽车产业首层不宜低于 25 kN/m^2 、二至六层不宜低于 10 kN/m^2 、七层及以上不宜低于 6.5 kN/m^2 ; 高端装备制造产业首层不宜低于 10 kN/m^2 、二层以上不宜低于 5 kN/m^2 ^[9]。

以冲压工艺为例，设备底座荷载高度集中，等效局部荷载可达 50 kN/m^2 ；GB 50009—2012 第 5.6.2 条建议搬运和装卸重物动力系数取 $1.1 \sim 1.3$ ，冲压设备宜放大至 $1.5^{[4]}$ 。深圳某百米高层工业厂房（高度 96.8 m ，柱网 $9 \sim 10 \text{ m} \times 9 \sim 9.6 \text{ m}$ ）的荷载竖向分布经验具有参考价值：首层 15 kN/m^2 、2~3 层 10 kN/m^2 、4~11 层 8.5 kN/m^2 、12 层以上 6.5 kN/m^2 ，通过竖向分级有效压缩结构成本^[11]。

2.3 荷载分区设计策略

多地已出台“工业上楼”建设指引以规范荷载取值。中山市高标准厂房和工业大厦建设技术指引（2022 版）明确荷载下限：首层不宜低于 12 kN/m^2 、2~3 层不宜低于 8 kN/m^2 、4 层及以上不宜低于 6.5 kN/m^2 ，工业大厦标准层不宜低于 5 kN/m^2 且不应低于 4 kN/m^2 ^[12]。

荷载分区设计的核心在于避免整层按最高荷载取值。以 80000 m^2 （8 层）厂房为例，若 30% 区域按重型（ 8.0 kN/m^2 ）、50% 按中型（ 5.0 kN/m^2 ）、20% 按轻型（ 3.0 kN/m^2 ）分区，较整层统一按 8.0 kN/m^2 设计可显著降低材料消耗。

3 计算模型与分析方法

3.1 软件与建模

采用 PKPM-SATWE 与 YJK 两套软件分别建立轻型与重型产业的典型框架模型。PKPM-SATWE 基于空间杆系-薄壁柱理论，楼板采用弹性假定；YJK 内置通用有限元核心，支持楼板有限元导荷与舒适度验算，可互为校核。楼盖分析采用等代框架法（等效解析法）将复杂楼盖转化为等代梁格进行内力求解。整体分析以 PKPM-SATWE 为主，楼板精细分析与舒适度验算以 YJK 为辅。

3.2 轻型产业案例关键结果

选取某 8 层电子信息厂房，柱网 $8.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$ 、层高 4.5 m 、现浇钢筋混凝土框架，楼板厚 120 mm ，混凝土 C30/C35，钢筋 HRB400。标准层恒载 $g_k=5.0 \text{ kN/m}^2$ 、活荷载 $q_k=3.5 \text{ kN/m}^2$ 。楼面活荷载取值按 GB 50009—2012（附录 D）^[4] 确定，荷载组合按 GB 55001—2021^[13] 采用：永久荷载分项系数 $\gamma G=1.3$ ，可

变荷载分项系数按楼面活荷载标准值不大于 4 kN/m^2 时 $\gamma Q=1.5$ 。楼面设计荷载为：

$$p_d = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k = 1.3 \times 5.0 + 1.5 \times 6.0 = 11.75 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

板、梁、柱按 GB/T 50010—2010（2024 年版）^[14] 与 GB/T 50011—2010（2024 年版）^[15] 设计：双向板实配 $\Phi 12@130 (A_s=870 \text{ mm}^2/\text{m})$ ，主梁 $300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ 、次梁 $200 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ ，挠度远小于 $1/250$ 限值^[14]；中柱 $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ ，考虑地震组合后最大轴力约 6720 kN ，轴压比 0.82 ，低于三级抗震框架 0.85 的限值^[15]。

3.3 重型产业案例关键结果

选取某 6 层高端装备制造厂房，柱网 $10.0 \text{ m} \times 10.0 \text{ m}$ 、层高 6.0 m 、框架-剪力墙体系，楼板厚 150 mm （设备区局部 200 mm ），混凝土 C35/C40，钢筋 HRB400。标准层恒载 $g_k=6.55 \text{ kN/m}^2$ 、活荷载 $q_k=6.0 \text{ kN/m}^2$ 。楼面活荷载取值按 GB 50009—2012（附录 D）^[4] 确定，荷载组合按 GB 55001—2021^[13] 采用：永久荷载分项系数 $\gamma G=1.3$ ，工业楼面活荷载标准值大于 4 kN/m^2 时可变荷载分项系数 $\gamma Q=1.4$ 。楼面设计荷载为：

$$p_d = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k = 1.3 \times 6.55 + 1.4 \times 6.0 = 16.92 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

楼盖折算线荷载约 25 kN/m ，第 1 阶竖向自振频率约 4.2 Hz ，但接近冲压设备工作频率的 2 倍频，存在倍频共振风险，需设置隔振垫并按 GB 50868—2013《建筑工程容许振动标准》控制振动加速度^[16]。高层工业厂房楼盖选型宜结合专项研究^[17]。

4 计算结果与优化分析

4.1 柱网尺寸对结构指标的影响

系统比较 $6.0 \sim 12.0 \text{ m}$ 六种柱网方案的材料消耗，结果见表 1。规律显示：楼板挠度与跨度四次方成正比、弯矩与跨度平方成正比； 6 m 柱网混凝土用量最低（ 612 L/m^2 ）但柱密度高达 $2.78 \text{ 根}/100 \text{ m}^2$ ，空间利用率低； 10 m 及 12 m 柱网主梁高度超过 800 mm ，净空损失显著，混凝土用量较 6 m 方案分别增加 31.7% 和 46.2% 。 8 m 柱网混凝土 691 L/m^2 、钢筋 96.0 kg/m^2 ，在材料增量与空间效益间达到可接受平衡。柱网尺寸与材料用量的关系如图 2 所示。

表 1 不同柱网尺寸材料用量对比（轻型产业，8 层）

柱网尺寸 (m)	楼板厚度 (mm)	主梁截面 (mm)	柱截面 (mm)	混凝土用量 (L/m^2)	钢筋用量 (kg/m^2)
6.0×6.0	171	200×500	550×550	612.4	88.2
7.0×7.0	200	233×583	600×600	627.4	87.9
8.0×8.0	229	267×667	700×700	691.0	96.0
9.0×9.0	257	300×750	800×800	752.3	103.8
10.0×10.0	286	333×833	900×900	806.4	110.8
12.0×12.0	343	400×1000	1050×1050	895.5	121.9

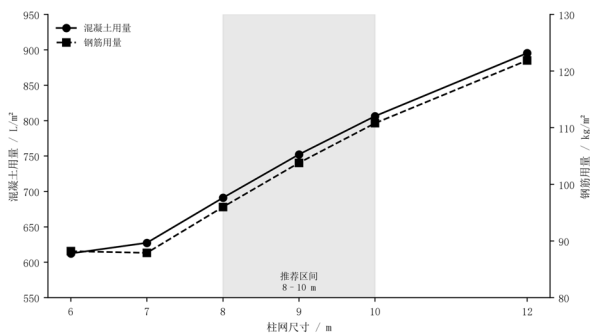


图2 柱网尺寸对材料用量的影响（轻型产业，8层）

表2 统一设计与分区设计经济性对比（80000 m² 厂房）

设计方案	混凝土用量（m³）	钢筋用量（t）	综合造价（万元）	较基准方案节省
方案A（统一设计）	34400	4640	4615.0	—
方案B（分区设计）	30080	4016	4012.5	13.1%

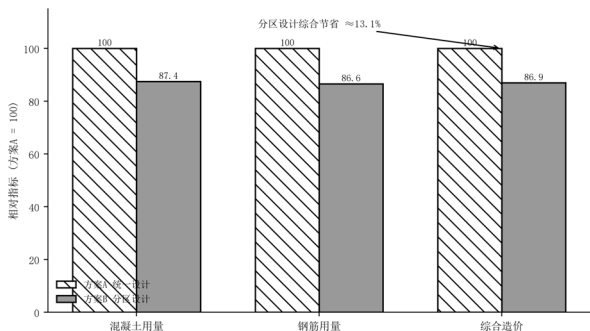


图3 统一设计与分区设计经济性对比（以方案A=100）

4.3 楼盖振动与抗震性能

模态分析显示，10 m×10 m 楼盖第 1 阶竖向自振频率约 4.2 Hz，满足 JGJ/T 441—2019 的 3.0 Hz 频率限值^[10]，但需通过隔振规避与设备频率的倍频共振。地震工况下层间位移角 X 向 1/1050、Y 向 1/1020，均低于 GB/T 50011—2010（2024 年版）框架-剪力墙结构弹性层间位移角 1/800 限值^[15]。

5 柱网布置优化建议

5.1 传统柱网布置的主要问题

（1）柱网过密导致空间利用率下降。传统 6~8 m 柱网在 24 m×24 m 单元内需布置 16~25 根柱，直接挤占有效面积；新能源汽车零部件等产线长度常超 30 m，6 m 柱网无法容纳连续布置^[8]。（2）剪力墙布置不当造成空间僵化。部分厂房为控侧移在内部密集布墙，将标准层切为小开间，产业更新时设备重新布局困难^[8]。（3）垂直交通与柱网缺乏协同，货梯、吊装口未结合柱网主轴布置，主梁穿越吊装口需局部加强。

5.2 柱网尺寸与布置形式优化

（1）轻型产业柱网宜取 8.0~8.7 m，可容纳两条 SMT 产线及物流通道，满足 3 t 叉车转弯要求；精密检测区柱距可收紧

8~10 m 区间在材料增量与空间效益之间达到较优平衡，可作为“工业上楼”项目的优先选用范围^[5]。

4.2 分区设计与统一设计经济性对比

以总建筑面积 80000 m²（8 层）厂房为对象，方案 A 整层统一按 8.0 kN/m²、柱网 10 m×10 m 设计；方案 B 按工艺分区（重型 30%、一般生产 50%、办公辅助 20%）。联合计算表明，分区设计较统一设计减少混凝土 12.6%、钢筋 13.4%，综合造价降低约 13.1%（节省 602.5 万元），结果见表 2。

至 6~7 m 并加大楼盖刚度^[1,11]。（2）重型产业柱网宜取 8.7~10.0 m、局部可达 12.0 m，深圳坪山项目以钢框架实现 12 m 跨度、百米高层采用 9~10 m 柱网，工程实践已验证可行性^[1,11]；设桥式吊车区域柱距应与吊车跨度协调。（3）大跨度、少剪力墙灵活布置，标准层面积不宜小于 2000 m²，剪力墙宜集中于电梯厅、楼梯间及建筑周边，避免插入主要生产区^[2,6,7]。

5.3 结构体系选型

8 层及以下、荷载中等的厂房优先采用现浇钢筋混凝土框架或框架-剪力墙结构；大跨度、重荷载及抗震要求高的厂房可采用钢结构或钢-混凝土组合结构^[2,5,6,7]。对比研究表明，满足相同工艺前提下钢筋混凝土结构较钢结构可降低土建成本约 15%~20%，HRB500 高强钢筋有利于进一步压缩材料消耗^[5]。

5.4 楼盖振动控制

楼盖竖向自振频率不宜低于 3.0 Hz^[10]，精密制造区域振动加速度可按 GB 50868—2013《建筑工程容许振动标准》的精密加工限值校核^[16]。措施包括：加大梁高、提高板厚以增加刚度；设备底座与主体脱开并设置独立隔振基础；冲压设备下方配置橡胶隔振垫或钢弹簧隔振器，隔振效率不低于 80%；避免设备工作频率与楼盖自振频率重合或呈整数倍关系^[8]。

5.5 基础设计要点

软弱地基上的工业上楼项目应进行地基处理并控制不均匀沉降；大型设备基础、整体地坑宜与柱基础脱开，脱开缝不小于 50 mm 并做好防水；平面长度超过 55 m 的厂房应设置后浇带或膨胀加强带^[11]。深圳某百米高层工业厂房采用桩基础，单桩竖向承载力特征值不小于 4000 kN、桩径 800 mm、桩长不小于 30 m，局部重载区采用桩帽加大、筏板局部加厚以控制沉降差^[11]。

6 结论

(1) 荷载分级应贴合产业实际。轻型产业标准层活荷载可按 $2.5 \sim 4.0 \text{ kN/m}^2$ 取值、精密检测区局部加强；重型产业宜取 $4.5 \sim 8.0 \text{ kN/m}^2$ ，冲压设备区局部等效荷载可达 50 kN/m^2 ，动力系数按规范取 $1.1 \sim 1.3$ 、冲压设备宜放大至 $1.5^{[4]}$ 。

(2) 计算分析是“工业上楼”结构设计的重要手段。PKPM-SATWE 整体计算与 YJK 楼板精细分析相结合，可获取楼盖挠度、自振频率及构件内力；典型模型轴压比均低于规范限值， $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 楼板挠度、 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 楼盖基频均满足要求^[9, 14, 15]。

(3) $8.4 \sim 10.0 \text{ m}$ 柱网为推荐取值区间。该区间在材料增量与生产工艺适配之间达到较优平衡，可作为该类项目的首选模数^[5]。

(4) 分区设计具有显著经济性。以 80000 m^2 厂房为例，按工艺分区设计较整层统一按重型荷载设计可减少混凝土 12.6% 、钢筋 13.4% ，综合造价降低约 13.1% ，设计文件应附活荷载布置平面图^[5, 12]。

(5) 结构体系应因地制宜。 8 层及以下优先采用现浇钢筋混凝土框架，大跨度重荷载可采用钢结构或组合结构；剪力墙宜布置在电梯厅、楼梯间及建筑周边，楼盖振动控制不可忽视^[2, 5, 6, 7]。

(6) 研究基于典型工程案例，结论的适用范围有待更多项目数据验证，后续宜结合参数化分析进一步细化分区荷载与柱网协同的经济性边界。

[参考文献]

[1]吕绍刚. 深圳探索“工业上楼”(一线调研)[N]. 人民日报, 2023-08-14(02).

[2]张伟, 李晓丽, 方园, 等. 基于深圳市工业上楼项目装配式结构体系选型与关键技术研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(24): 13-21+38.

[3]深圳市住房和城乡建设局. 工业上楼建筑设计通则: SJG 163—2024[S]. 深圳, 2024.

[4]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[5]李海勤. 高标准工业上楼厂房结构经济性研究[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(8): 154-156.

[6]Steel Construction Institute. P334: Design of multi-

storey braced frames[R]. Ascot: Steel Construction Institute, 2004.

[7]Lawson R M, Ogden R G, Bergin R. Application of modular construction in high-rise buildings[J]. Journal of Architectural Engineering, 2012, 18(2): 148-154.

[8]包联进. “工业上楼”建筑结构特点剖析与设计对策[J]. 建筑智能工业化, 2024(1): 35-41.

[9]武汉市自然资源和城乡建设局. 武汉市“工业上楼”建筑设计指南[Z]. 武汉, 2025.

[10]中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 441—2019 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[11]同辰建筑. 百米高层工业厂房项目超限结构设计咨询报告[R]. 2024.

[12]中山市住房和城乡建设局. 中山市高标准厂房和工业大厦建设技术指引(2022版)[Z]. 中山, 2022.

[13]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 55001—2021 工程结构通用规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[14]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50010—2010 混凝土结构设计标准(2024年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.

[15]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50011—2010 建筑抗震设计标准(2024年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.

[16]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50868—2013 建筑工程容许振动标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[17]何树岗, 唐煌, 姜正荣, 等. 某高层工业厂房楼盖结构选型研究[J]. 特种结构, 2023, 40(1): 45-49.

*资助项目: 中国机械工业集团有限公司科研专项“工业上楼工程设计关键技术研究”(ZDZX2025-07)

一作简介: 郝猷猷, 硕士, 一级注册结构工程师, 高级工程师, 主要从事结构设计与研究;

通信作者简介: 郝猷猷, 硕士, 一级注册结构工程师, 高级工程师, 主要从事结构设计与研究。