 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i4.9997

Research on Design and Construction Technology of Three-dimensional Grid Structure

Guofeng Sun

CNOOC Petrochemical Engineering Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

In response to the high-standard requirements for large spans, heavy loads, and adaptability to complex environments faced by petrochemical three-dimensional warehouses under the frequent occurrence of strong typhoons and heavy rainfall in coastal areas, the safety and durability of grid structures have become critical control aspects in engineering design and implementation. Focusing on the combined effects of extreme typhoon wind pressures and heavy rainfall, this study, in accordance with the SH3147-2014 code, integrates wind tunnel test results with SAP2000 finite element analysis to optimize the lateral force-resisting system and load transfer paths at joints. The wind resistance stability is enhanced by improving the overall structural stiffness and wind-induced vibration control capabilities. To address corrosion issues in the coastal high-humidity and high-salinity environment, a composite protection system comprising Sa2.5-grade surface treatment, epoxy zinc-rich primer, and polyurethane topcoat is employed. Utilizing a multi-objective collaborative control model and a real-time strain monitoring system, dynamic regulation of the structural stress state and geometric configuration is carried out throughout the entire process, ensuring uniform stress distribution during formation and controllable structural precision.

Keywords

petrochemical automated warehouse; space grid structure design; seismic and wind resistance; durability protection; integral lifting construction

立体库网架结构设计与施工技术研究

孙国锋

中海油石化工程有限公司，中国·山东 济南 250000

摘　要

根据石油化工立体库在沿海地区面临强台风与暴雨频发工况下对大跨度、重载及复杂环境适应性的高标准要求，网架结构的安全性与耐久性成为工程设计与实施的关键控制内容。围绕台风极端风压与暴雨叠加作用特征，研究依据SH3147-2014规范，结合风洞试验结果与SAP2000有限元分析，对抗侧力体系与节点受力路径进行优化设计，并通过提高结构整体刚度与风致振动控制能力，增强其抗风稳定性。针对沿海高湿高盐环境下的腐蚀问题，通过Sa2.5级表面处理工艺配合环氧富锌底漆与聚氨酯面漆复合防护体系，依托多目标协同控制模型与实时应变监测系统，对结构受力状态与几何形态进行全过程动态调控，确保成型过程受力均匀与结构精度可控。

关键词

石油化工立体库；网架结构设计；抗震抗风性能；耐久性防护；整体顶升施工

1 引言

石油化工立体库的网架结构在沿海地区强台风与暴雨频发工况下，其安全性与耐久性面临更为严峻的考验。结构体系选型、节点构造、施工精度及防腐策略的协同优化成为工程实践中的关键难题。设计与施工过程中需重点强化抗风性能与排水防涝能力，通过提升结构整体刚度与抗风稳定性、优化节点连接形式及受力传递路径，以适应强风荷载与雨水冲刷叠加作用。同时，依托精细化安装控制技术，提高网架结构空间定位精度与整体成型质量，并结合高湿高盐环境特点构建长效防腐防护体系。通过多维受力调控与环境适应性设计的协同推进，有效应对大跨度重载条件下强台风与暴雨带来的复合影响，保障结构长期安全稳定运行。

【作者简介】孙国锋（1989—），男，中国山东牟平人，本科，助理工程师，从事施工管理相关研究。

2 石油化工立体库网架结构体系选型与布局优化

2.1 大跨度网架立体库荷载计算与结构体系优化分析

石油化工立体库大跨度网架结构的荷载计算需结合工程实际工况进行系统化分析，主要包括恒载、活载及风荷载等关键作用。其中恒载来源于网架自重、围护结构及固定设备荷载，活载则与仓储物料的堆载形式及设备运行状态相关。针对沿海地区强台风与暴雨环境，应重点强化风荷载取值与分布特性的精细化计算，并考虑风压高度变化、

体型系数及局部风振效应对结构的不利影响。在大跨度条件下，传统普通钢结构柱难以满足整体刚度与承载力要求，需对结构体系进行优化设计，优先采用箱型钢柱以提升构件抗弯刚度与稳定性能。箱型柱在承受大跨度网架传递的集中荷载及水平风荷载时，能够有效降低柱顶位移与整体侧移变形，同时增强结构抗扭性能与空间受力协调能力。结构响应分析应结合有限元模型，对不同荷载组合下杆件内力分布、节点变形及整体稳定性进行综合评估，重点识别控制工况与薄弱部位。不同跨度下网架结构关键响应指标对比如图 1.1 所示。

随着网架跨度从 30 米增至 70 米，结构最大竖向位移呈非线性增长，跨度 50 米后增长加剧，反映了刚度下降。用钢量指标同步上升，表明为控制变形需增加材料用量，两者变化趋势共同印证了大跨度网架设计中刚度与经济的平衡挑战 [1]。

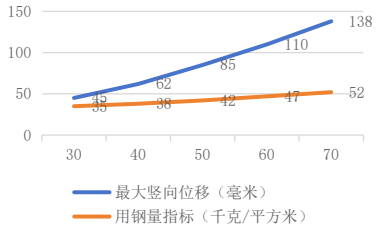


图 1.1 不同跨度下网架结构关键响应指标对比

2.2 空间网架形式比选与适用性评估

空间网架形式的选择需遵循安全可靠、技术先进、经济合理及美观适用的原则。针对石油化工立体库的矩形平面、大跨度及重荷载特点，需重点评估不同网架体系的力学性能与适用边界。平板网架与曲面网架是两种主要形式，其选型需融合库房规模、储存物料特性及全生命周期成本实行融合比选。石油化工立体库主要空间网架形式适用性对比如表 1.1 所示。

表 1.1 石油化工立体库主要空间网架形式适用性对比

网架结构形式	主要力学特点	适用跨度范围	经济性指标	推荐适用场景
正放四角锥网架	受力明确，构造简单	中小跨度（≤ 60m）	材料用量中等，施工便捷	矩形平面、荷载均匀的中小型立体库
两向正交正放网架	空间刚度大，整体性好	大跨度（＞ 60m）	用钢量较高，节点构造复杂	长宽比较大、需承受重型设备荷载的立体库
正放抽空四角锥网架	减轻自重，保持刚度	大跨度（＞ 60m）	经济性优于非抽空形式	对净空及自重有要求的大跨度立体库
三向网架 / 三角锥网架	多向受力，稳定性极佳	大跨度、异形平面	造价最高，施工精度要求高	圆形、六边形平面或抗震设防要求高的特大型立体库
曲面网架（如柱面网壳）	以薄膜内力为主，受力合理	超大跨度（＞ 100m）	结构效率高，但造价与施工难度大	超大跨度、有特殊工艺或美观要求的标志性立体库

3 网架节点构造与连接技术设计

3.1 焊接球节点精细化设计方法

焊接球节点的精细化设计方法注重于空心球节点的构造改良，其球外径以及壁厚之比一般控制在 25 至 45 的区间内，球外径与主钢管外径之比则维持在 2.4 到 3.0 的范围，球壁厚以及主钢管壁厚之比设定为 1.5 至 2.0 且球壁厚不应低于 4 毫米，该类参数共同决定了节点的力学性能与材料经济性，节点以及钢管的连接必须使用可以保证焊透的坡口焊缝并在其间预留适当间隙以实现焊缝以及钢管的等强度，节点构造设计还需顾及后期维护的便利性，避免形成易于积聚湿气及灰尘的构造死角，同时要求对钢管端部实行封闭处理，此类精细化考量意在增强节点的承载可靠性并优化结构的整体耐久性 [2]。

3.2 螺栓球节点装配精度控制要点

螺栓球节点装配精度控制构成网架结构安全的重点环节，其关键在于高强螺栓的拧紧力矩与套筒接触面的周密贴合必须到了设计规范，施工过程需要使用经过标定的扭矩扳手实行分阶段施加力矩，同时利用三维坐标测量技术对球体空间位置实行动态监测，这种分层坐标控制方法可以捕捉安装过程中出现的累积偏差，偏差数据反馈至施工环节用于教导杆件微调，继而保证螺栓孔的对准精度与杆件轴力传递符合设计要求，最终实现网架整体几何形态以及内部受力状态的精确匹配。

4 施工安装关键技术与过程控制

4.1 高空散装法施工流程与支撑体系设计

网架安装采用高空散装法并结合整体同步顶升技术实施，将结构划分为若干受力控制单元，在各单元布设液压千斤顶，依托同步控制系统实现协调顶升。受既有建筑边界条件约束，形成三侧支撑体系，以确保施工阶段结构整体稳定。千斤顶增强力按网架自重的 0.5%~1% 进行设计，相邻顶升点位移差控制在 5 mm 以内，以保证受力均衡与结构安全 [3]。

在此基础上，需统筹考虑消防喷淋系统的同步安装与预留布置。针对立体库内部空间复杂、管线密集的特点，在网架分区安装阶段提前完成喷淋主管支架预埋与吊点布置，合理避让网架杆件与节点位置，避免后期交叉作业引发结构受力扰动。喷淋管道安装应与网架顶升节奏保持协调，在结

构达到设计标高并完成初步固定后，分区开展管网安装与连接，确保系统整体连续性与施工安全。

4.2 整体提升工艺参数优化

整体加强工艺参数的改良过程需要融合考虑结构刚度与载荷分布的动态耦合关系，其重点在于建立多目标协同控制模型，该模型融合了拓扑改良与深度学习的前沿算法，可以对增进点位的空间布局、液压同步精度以及临时支撑体系的刚度配置实行系统性迭代计算，然后在保证网架整体稳定性的前提下最大限度地减少增强过程中的附加应力，这种基于数据驱动的参数寻优方法明显加强了施工过程的可预测性与可控性，为大型冗杂空间结构的安全高效安装给出了核心的技术支撑。

4.3 结构成型阶段内力重分布监测措施

结构成型阶段的内力重分布监测措施注重于网架体系从临时支撑状态向完全自承重状态转换过程中的力学行为追踪，施工团队在核心节点区域布设振弦式应变传感器以及光纤光栅监测点，实时采集杆件轴向应力以及节点位移数据，上述监测数据借助无线传输系统汇集至云端分析平台，平台使用有限元模型实行施工阶段模拟与实测数据对比，当监测到杆件应力超过设计预警值的百分之八十时，系统自动触发分级报警机制，现场技术人员随即调整千斤顶顶升顺序或暂停后续单元安装，这种动态调控方案有效避免了因局部应力集中致使的杆件失稳现象，监测周期持续至屋面荷载完全施加后的七十二小时，保证结构内力分布趋于设计预期状态。

5 结构安全性能与耐久性保障措施

5.1 抗台风性能与排水体系协同强化设计

石油化工立体库网架结构在沿海地区需重点应对强台风及连续暴雨带来的极端环境作用，其安全性能设计以抗风稳定性与高效排水能力为核心。抗风设计依据相关规范并结合沿海地区风环境特征，通过建立三维有限元模型，对结构在不同风速等级及风向组合下的受力状态进行精细化分析，重点控制大跨度网架在强风作用下的整体侧移、局部振动及杆件稳定性。在排水设计方面，针对连续暴雨条件下屋面及网架上弦系统易形成积水的问题，构建以虹吸排水系统为核心的高效排水体系。通过精确计算降雨强度与汇水面积，优化排水管径及布置路径，使排水系统在满流状态下形成稳定虹吸效应，显著提升排水效率并降低屋面积水荷载。排水节点布置与网架结构体系协同设计，在保证结构完整性的前提下合理设置雨水斗位置，避免局部荷载集中对杆件产生不利影响 [4]。

5.2 腐蚀环境下的防护涂层选型与施工

腐蚀环境对石油化工立体库网架结构构成严峻考验，防护体系设计需在耐腐蚀与耐火性能之间实现协同优化。材料选型阶段应综合考虑沿海高湿高盐环境特点与化工介质影响，耐候钢因具备良好的耐蚀性能可作为优选基材。在涂层体系构建方面，通常采用环氧富锌底漆与聚氨酯面漆的复合防护方案，以形成稳定的阴极保护与致密屏障结构，同时在其外层或中间层增设防火涂层体系，使结构在火灾工况下具备必要的耐火极限。防火涂层可依据设计要求选用膨胀型或厚型防火涂料，通过受热膨胀形成隔热炭层或依靠材料自身耐火性能延缓钢构件升温，从而提升整体结构的耐火安全性。

施工前必须对钢结构表面进行彻底喷砂处理，处理等级达到 Sa2.5 级，以完全清除氧化皮与锈蚀产物，保证各类涂层与基材之间形成良好的附着基础。涂装过程采用高压无气喷涂工艺，确保防腐层与防火层均匀覆盖且无漏涂现象，各层涂装厚度需严格符合设计与规范要求，并根据不同涂层体系合理控制间隔时间与固化条件。施工环境需严格控制温度与湿度参数，避免在强风、降雨等不利气候条件下进行作业，以防影响涂层成膜质量与粘结性能 [5]。

6 结语

石油化工立体库网架结构的安全性以及耐久性依赖于荷载响应的准确建模、节点构造的力学适配及施工过程的动态闭环控制，恒载、活载、风荷载以及地震作用的耦合效应凭借 SAP2000 有限元分析与风洞试验协同标定，平板网架与曲面网架的选型边界由全生命周期成本、物料流动途径及防火防爆分区共同约束，焊接球节点的外径壁厚比、球管径比以及壁厚匹配关系直接决定其承载冗余度，螺栓球节点的三维坐标误差反馈机制与分阶段扭矩施加流程保障几何形态以及内力传递的一致性，高空散装与整体顶升融合工艺借助液压同步系统以及振弦式应变传感网络实现毫米级位移调控，耐候钢基材配合 Sa2.5 级喷砂处理、环氧富锌底漆与聚氨酯面漆的梯度涂层体系在腐蚀环境中形成物理屏障以及电化学防护双重机制，环境监测数据驱动的维护方案使结构服役寿命明显延展。

参考文献

[1] 袁贺菊.自动立体库在熔铸生产中的应用浅析[J].有色金属加工,2026,55(01):28-31.

[2] 高春晓,杨峰,董庆峰,宋晨亮,游瑞光.四向穿梭车立体库在汽车备件中心的应用[J].物流技术与应用,2026,31(02):52-56.

[3] 李晋玲,李瑞保,张明瑞,王戌萌.基于稼动率的自动化立体仓库运行效率优化[J].物流技术与应用,2026,31(02):106-111.

[4] 柴明.智能设备在自动化立体库盘库中的应用与研究[J].化工管理,2019,(30):125-126.

[5] 孙景华.润滑油立体库消防设计探讨[J].工业用水与废水,2018,49(05):80-84+87.