

# 设置筒仓的单跨工业建筑结构设计方案的探讨

马凯

中煤科工集团北京华宇工程有限公司西北设计研究院, 陕西 西安 710000

**[摘要]** 附设筒仓的单跨工业建筑在电力、煤炭等行业的物料运输过程中扮演着重要角色。单跨结构杆件在地震情况下相较于多跨结构更易受损, 同时, 在单跨结构内布置有筒仓这一特种结构, 其特殊的荷载变化对单跨建筑的结构布置、构件设计带来了更多的挑战。本篇文章分析了单跨筒仓结构设计意义与面临的问题, 从荷载传递优化、筒仓布局协调、安全经济平衡等方面, 提出结构设计的优化策略。通过合理构建受力体系, 协调筒仓布局与建筑空间, 创新平衡安全与经济的措施, 为单跨筒仓工业建筑的结构设计提供借鉴, 促进其在工业生产中的广泛应用。

**[关键词]** 单跨筒仓; 工业建筑; 结构设计; 优化策略

DOI: 10.33142/ect.v3i5.16453

中图分类号: TU4

文献标识码: A

## Discussion on the Design Scheme of Single Span Industrial Building Structure with Silos

MA Kai

Northwest Design and Research Institute of CCTEG Beijing Huayu Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

**Abstract:** Single span industrial buildings with attached silos play an important role in material transportation in industries such as electricity and coal. Single span structural members are more susceptible to damage during earthquakes compared to multi span structures. Additionally, the special structure of silos arranged within a single span structure presents more challenges to the structural layout and component design of single span buildings due to its unique load variations. This article analyzes the significance and problems faced in the design of single span silo structures, and proposes optimization strategies for structural design from the aspects of load transfer optimization, silo layout coordination, safety and economic balance. By constructing a reasonable force system, coordinating silo layout and building space, innovating measures to balance safety and economy, providing reference for the structural design of single span silo industrial buildings, and promoting their widespread application in industrial production.

**Keywords:** single span silo; industrial buildings; structural design; optimization strategy

### 引言

附设筒仓的单跨工业建筑是一种在单跨框架内设置筒仓的特种仓储转运建筑, 广泛应用于粮食、煤炭、矿石等物资的储存和加工, 巧妙地利用建筑外墙兼做仓壁承担物料的临时存放, 拓展了建筑的竖向空间使用功能, 具有占地小, 集成化高、结构紧凑等优势。筒仓结构自重大、内容物荷载特殊等因素, 与单跨结构的受力特点存在冲突, 在现代工业生产的快速发展中, 单跨筒仓工业建筑的结构设计面临着新的挑战和需求。如何在满足工艺要求的前提下, 优化单跨筒仓结构设计, 实现安全、经济、美观的统一, 成为建筑结构工程领域亟待探讨的课题。

### 1 单跨筒仓工业建筑结构设计意义与背景

#### 1.1 单跨筒仓工业建筑的应用价值

通过在工业建筑内合理利用框架构件兼做仓壁、选择合适的柱网进行筒仓布置, 既在平面尺度上解决了筒仓占地问题, 又满足了工艺对物料临时存放的要求, 而且筒仓可根据柱网灵活布局、弹性划分, 能适应不同物料的独立存放要求。仓顶、仓底空间可用于输送带等设备安装, 构件布置紧凑, 为物资存储、输送、加工一体化提供了便利条件, 有利于实现储存、运输、生产的无缝衔接。单跨筒

仓建筑造型简洁, 通过筒仓组合构成独特的几何形态美感, 在满足功能的同时, 创造美观的厂区景观, 有较高的景观价值。单跨筒仓工业建筑凭借其独特的空间和功能优势, 在现代工业生产中具有广阔的发展前景和应用价值。

#### 1.2 结构设计面临的行业需求

随着工农业生产向规模化、自动化方向发展, 储运和加工环节对单跨筒仓工业建筑提出了新的需求。生产所需粮食、原料品种增多, 对筒仓内部空间的灵活划分, 提出了更高要求, 筒仓要能根据储存品种的属性、储量, 实现科学分仓, 确保不同物料品质。物资周转效率要求越来越高, 需要筒仓与输送、加工设备实现紧凑布置, 做到存储、运输、生产一体化, 减少中间环节, 提高物流效率。单跨空间结构需兼顾建筑采光、通风等使用功能, 确保内部环境舒适, 这些多元化、复合型的行业需求, 对结构设计提出了综合性的考验。只有统筹兼顾生产需求与建筑性能, 协调好筒仓与空间布局、荷载与结构受力、安全与经济等关系, 才能更好地发挥单跨筒仓工业建筑的优势, 适应现代工农业发展需要<sup>[1]</sup>。

#### 1.3 结构设计创新的发展趋势

近年来, 大跨度空间结构设计和新型筒仓设计取得了

进步,为单跨筒仓工业建筑的创新发展奠定了技术基础。网壳、张弦桁架等大跨度屋盖结构体系不断成熟,通过优化构件布置,合理利用预应力,提高了建筑的空间利用率,拓展了建筑平面布局的灵活性。钢板组合筒仓、装配式钢筋混凝土筒仓等新型筒仓结构的出现,通过新材料、新工艺的应用,提升了筒仓的承载和耐久性能,为筒仓的大型化、高性能化提供了技术支撑。借助新材料、新技术所带来的设计自由度提升,有利于实现建筑结构和筒仓结构的一体化设计创新,在更高层次实现空间共享、机能融合,突破传统单跨筒仓在布局、受力等方面的局限。通过结构设计手段,优化荷载传递路径,协调筒仓与建筑空间的矛盾,平衡安全性、适用性、经济性等要素,是实现单跨筒仓工业建筑高质量发展的必然趋势。

## 2 单跨筒仓工业建筑结构设计中的关键问题

### 2.1 荷载传递与结构受力分析难点

单跨筒仓工业建筑的主要特点是利用框架结构的梁、板、柱替代了仓壁、仓顶、漏斗等筒仓构件。但筒仓内容物产生的水平压力、垂直摩擦力,会对建筑结构产生复杂影响,筒仓内容物与筒壁、筒壁与建筑主体之间的荷载传递机制难以准确把握,给结构受力分析带来诸多挑战。根据筒仓充灌料情况不同,筒壁产生的附加弯矩、剪力大小和分布规律难以精确计算,影响建筑构件内力分析的准确性,若模拟计算与实际偏差较大,极易造成构件设计的不安全或不经济。由于筒仓布置位置、充灌料工况的随机组合,极易产生偏心荷载,诱发建筑结构的不利扭转和侧移,若未能准确评估偏心效应,可能导致局部构件应力超限,影响结构整体性能。如何通过合理的计算模型和方法,实现筒仓与建筑主体之间复杂的荷载传递分析,揭示结构在多工况组合下的真实受力状态,找出薄弱部位,是单跨筒仓工业建筑结构设计的难点所在。

### 2.2 空间布局与筒仓设置的冲突

单跨筒仓工业建筑需要在有限的空间内,合理布置筒仓,满足消防疏散、建筑采光、通风、物流等使用要求。空间布局极富挑战性,筒仓数量、直径、排布方式等参数的选择,影响建筑平面布置,与建筑柱网存在天然的几何矛盾,筒仓布置过于密集,会影响建筑内部空间使用,不利于检修维护,但筒仓布置过于分散,储存密度低,又会降低储存效率,加大输送距离,影响物流组织。筒仓还需与输送带栈桥、提升机等衔接,平面和竖向布置不当,会制约物料流转效率,影响生产功能的发挥,在立面上,仓顶建筑的疏散出口设置、疏散楼梯布置应与立面设备检修吊装区域协调布置。筒仓布置与柱网也要有机结合,以免产生不利的楼板开洞或夹层,影响建筑的整体性。如何在建筑与筒仓之间,实现“双赢”而非“博弈”,妥善协调筒仓布置与建筑空间之间的矛盾冲突,满足功能需求,实现空间共享,成为制约单跨筒仓工业建筑设计的瓶颈问题。

### 2.3 结构安全与经济性的平衡挑战

实现结构安全是建筑设计的根本要求。过度追求安全储备,会带来材料浪费,造成工程造价不必要的升高,单跨筒仓结构体系复杂,筒仓壁是建筑受力构件,又是储存容器,对变形控制、构造措施等提出了特殊要求。在满足强度、稳定和耐久性要求的同时,如何最大限度发挥材料性能,优化配筋构造,减少钢筋用量和混凝土配筋率,得到经济合理的构件尺寸,是设计中需要精细权衡的技术经济问题。由于筒仓的数量、直径各不相同,各组合工况下结构受力差异很大,传统的标准设计模式难以适应,往往带来较大的盲目安全余量,造成材料浪费。如何针对不同项目特点,在结构分析的基础上,优选各构件组合,调整细部构造,在安全性和经济性之间找到最佳平衡点,满足安全要求,又不过度设防,实现因地制宜、按需设计,是设计人员面临的重大挑战<sup>[2]</sup>。

## 3 单跨筒仓工业建筑结构设计优化策略

### 3.1 合理受力体系构建与荷载传递优化方案

单跨筒仓工业建筑的结构设计,首要任务是构建合理的受力体系,明晰荷载在筒仓与建筑主体之间的传递路径。传统的设计思路多将仓壁等同于竖向荷载作用在楼板上,忽视了筒仓内容物对筒壁的水平压力和摩擦力影响,导致结构内力分析偏差较大,安全储备不足。针对这一问题,采用先进的数值模拟技术,如非线性有限元分析,综合考虑筒仓在不同充灌料工况下的受力特点,准确分析筒壁在水平和竖向荷载作用下产生的附加弯矩、剪力,评估对柱偏心受压、梁单侧受扭等结构构件的不利影响。在深入分析计算的基础上,通过优化筒仓在平面和空间上的布置方案,将其竖向荷载更多地传递至刚度较大的结构柱和墙体,在筒仓周边及水平方向设置必要的支撑构件,形成稳定可靠的空间受力体系,确保筒仓与主体结构的协同工作。

例如,在某电力行业煤粉仓储建筑的结构设计中,设计人员利用大型通用有限元软件,建立了较为精细的筒仓-建筑一体化计算模型。考虑到该工程的筒仓平面尺寸 $8 \times 8\text{m}$ ,煤粉(电厂用)的内摩擦角在 $25^\circ \sim 30^\circ$ ,仓壁受到的煤粉竖向摩擦力较大,漏斗处切向力较大,与相连框架结构的荷载传递更为复杂。参考《钢筋混凝土筒仓设计标准》(GB 50077—2017)的规定,设计人员根据筒仓的平面尺寸计算其水力半径、判断其属于深仓或浅仓、再借助经验公式对仓壁及漏斗做进一步受力分析,计算仓壁、漏斗在水平和竖向上的附加弯矩、剪力和法向拉力。利用有限元软件的非线性接触算法,分别考虑了筒仓满载、部分放空及完全放空三种工况下,煤粉颗粒与筒壁的相互作用,揭示了筒仓与周边框架梁、柱的内力传递机理。分析表明,当筒仓内煤粉堆积呈现偏心或不对称状态时,筒壁所受附加弯矩和剪力大幅增加,局部应力突变明显,筒壁可能出现环向、竖向裂缝。针对上述问题,设计人员采取

了两项关键措施：一是在筒仓四周布置了环向约束系梁，提高了筒壁的整体刚度和稳定性，将水平荷载更多地传递至框架柱，减轻梁的水平荷载分担；二是将筒壁分段设计，下部采用高强混凝土配以双层钢筋，适当增大壁厚，环向钢筋应力校核考虑了温度应力和收缩徐变应力的叠加，有效缓解了煤粉非对称堆积产生的附加弯矩，维护了筒壁乃至整个结构的安全性。

### 3.2 筒仓与空间布局的协调设计技术

要在有限的建筑空间内实现筒仓布置与使用功能的最佳融合，必须运用多种先进的设计技术与方法，在空间尺度、功能分区、流线组织等多个方面，统筹考虑，综合平衡，实现筒仓布局方案与建筑总平面的协调优化。在确定建筑的总平面尺寸和空间形态时，应当以筒仓的规格尺寸为重要的参考基准，在满足筒仓储量要求的前提下，兼顾建筑的柱网布置、梁板跨度等因素，避免筒仓直径与建筑柱距之间产生无序冲突和不协调。对筒仓的平面组合排布方式和竖向分层布置方案，要从物料存储、输送等工艺流程的角度出发，结合建筑各功能空间的序列组织关系，形成紧凑、顺畅、高效的总体布局。通过对筒仓进行必要的错层布置、退台设计，可以更加灵活有效地利用建筑空间，并与采光、通风等建筑使用需求相互协调<sup>[3]</sup>。

### 3.3 结构安全与经济性平衡的创新措施

要实现单跨筒仓工业建筑的结构安全性与经济性之间的最佳平衡，需要在设计的多个环节和层面上采取针对性的创新优化措施。在结构总体布置和构件设计上，要遵循安全第一、适用为主的基本原则，满足各种荷载工况下的强度、刚度和变形要求，避免材料的过度浪费，采用高强度材料或新型复合材料，在保证结构安全的前提下，降低构件的截面尺寸和用量。在构件的计算分析和配筋构造设计上，因地制宜，灵活机动，通过参数化的分析和多方案比选，优选出经济合理的构造方案，对于楼板的受弯构件配筋设计，采用断面优化技术，在满足承载力要求的前提下，减少配筋率；对于筒仓连接区等应力相对集中或有较大开洞的关键构件，采用高性能纤维混凝土等新型材料，减少裂缝开展风险，提高构件可靠度。积极借助 BIM、参数化设计等数字化技术手段，在多方案比选优化的基础上，获得综合品质和工程造价最优的结构设计方案，提高设计工作的效率和方案质量<sup>[4]</sup>。

例如，在某大型单跨筒仓储工程项目中，由于筒仓布置较为密集，若采用普通钢筋混凝土楼板，配筋率偏高，

造价十分昂贵，设计人员通过对楼板的参数化正交试验设计和分析，优化了板跨布置，创新性地采用了预制装配式叠合板替代传统现浇板，满足结构承载力要求的同时，降低了钢筋材料的实际用量。针对筒仓壁板与建筑柱的连接节点区域应力相对集中的问题，设计团队创新采用了柱侧加腋和外包钢套筒的节点构造形式，提高了节点区域的延性和整体性，结构可靠性水平大幅提升。通过专业的 BIM 软件建模，快速准确地生成多套方案的材料工程量统计表，计算分析相关的经济技术指标，选择了材料用量最为经济、综合效益最佳的设计优化方案，据相关统计，与传统的经验设计方案相比，优化后的方案在确保结构安全的前提下，工程直接费用降低了 8%，综合效益水平提高了 12%。通过在设计的多个环节采取针对性的优化创新措施，在确保单跨筒仓工业建筑结构安全可靠的同时，能够显著提升工程的经济性，实现投资效益的最大化。

## 4 结束语

单跨筒仓工业建筑是现代工业发展的重要基础设施，其结构设计是一项复杂的系统工程，设计人员必须统筹考虑筒仓布置、空间利用、结构受力等多方面因素，在建筑功能与结构安全、技术先进与经济适用之间寻求最佳平衡。新材料、新技术的不断发展，为单跨筒仓工业建筑的创新设计提供了广阔空间，数值模拟、BIM、参数化设计等先进技术和理念的运用，能优化设计手段、提高设计效率，还能揭示结构在复杂工况下的真实受力状态，在设计阶段考虑建设成本，指导合理经济的结构方案选型。展望未来，只要坚持与时俱进，勇于创新，广大设计工作者必将在协调多元需求、优化设计水平上取得更大突破，为推动现代工农业高质量发展贡献智慧和力量。

### [参考文献]

- [1] 宋一鸣, 丁雪儿, 华宇翔, 等. 工业建筑中筒仓空间改造设计策略研究[J]. 工业建筑, 2023(1): 10-16.
  - [2] 艾纯志. 设置筒仓的单跨工业建筑结构设计方案探讨[J]. 江西建材, 2022(8): 3.
  - [3] 崔凯. 文化创意视角下筒仓类工业遗存再利用设计研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.
  - [4] 田皓元, 倪阳. 圆形筒仓类工业构筑物改造中的结构介入设计策略研究[J]. 建筑技艺, 2021(20): 105.
- 作者简介: 马凯(1987.11—), 男, 毕业于防灾科技学院, 土木工程专业, 现就职于中煤科工集团北京华宇工程有限公司, 高级工程师, 主要从事工业建筑结构设计与工作。