

工业建筑设计中轻型钢结构的特点与设计探析

文 / 王超 山东省能源建筑设计院

田玉昊 山东省建设建工(集团)有限责任公司

摘要:随着我国经济的快速发展,轻型钢结构在工业建筑设计中的应用越来越广泛。为了提高工业建筑设计水平,发挥轻型钢结构在建筑工程中的应用价值,本文对轻型钢结构的基本概念、特及应用进行了详细的阐述,并通过具体案例分析,探讨了轻型钢结构在工业建筑设计中的应用技术要点,提出优化设计措施,并且对该材料的应用问题和未来发展展望进行阐述,以期为类似工程提供参考和借鉴。

关键词:工业建筑设计;轻型钢结构;特点分析;建筑设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.09.097

引言

轻型钢结构作为一种先进的建筑结构形式,在工业建筑设计中具有明显的优势。要想更好地发挥其在工业建筑设计中的作用,就需要加强该技术的研究和应用,积极优化建筑设计方案,更好地满足不断变化的市场需求,推动我国轻型钢结构产业的健康发展。

一、钢结构在工业建筑领域的应用概况

(一) 钢结构在工业建筑领域的应用起源

19世纪末期,建筑师费迪南德·杜特尔特和工程师维克多·康塔明合作建造了巴黎世博会机械展廊,这是当时世界上最大跨度的建筑,当今工业建筑领域中的大多数钢排架厂房的形式皆参考于此^[1]。1925年,英国法拉第学会在伦敦召开了题为“炼钢过程中的物理化学”会议,标志着钢材的冶炼开始进入现代科学体系。此后,钢结构和工业建筑交织在一起,开启了其独特的发展历程。

(二) 我国钢结构在工业建筑领域的应用

我国钢结构在工业建筑领域的应用起源可以追溯至20世纪初期,主要应用于机器厂、纺织厂等的建筑中。青岛四方机车修理厂即为当时的典型实例。中华人民共和国成立之前,我国钢结构在工业建筑领域应用的发展速度十分缓慢。中华人民共和国成立之后的10年间,我国钢结构在工业建筑领域的应用迅速发展,在冶金、机械、汽车、飞机、造船等行业中有了大量应用,如鞍山钢铁厂、第一重型机器厂、洛阳拖拉机厂、沈阳飞机制造厂和大连造船厂。这期间,各有关部委都陆续成立了设计院,在北京和沈阳等地成立了6个工业设计院,在北京和重庆等地成立了6个专业性更强的钢铁设计院。这些工业院和专业院的设立,对我国工业建筑的发展起到了极大的促进作用。1961—1975年间,我国工业建筑钢结构的发展进入了低潮期,但期间仍有不少典型的工业建筑钢结构出现,四川德阳第二重型机械厂即是最具代表性的项目之一。改革开放后,我国工业建筑钢结构逐渐进入崭新的发展阶段,在上海宝山钢铁厂、武汉重型机床厂有了大量的应用实例。随着钢结构技术理论研究的不断完善,钢结构逐步成为了现代工业建筑中最重要的结构类型^[2]。

二、轻型钢结构的特点

(一) 轻型钢结构的概念

轻型钢结构,顾名思义,是一种以钢材为主要材料,具有较轻自重和较高强度的建筑结构形式,主要由型钢和钢板组成,通过焊接、螺栓连接等方式形成承重体系。轻型钢结构在工业建筑设计中的应用,起源于20世纪初期的西方发达国家,随着我国经济的快速发展,近年来在国内得到了广泛的推广和应用。

(二) 轻型钢结构的特点

轻型钢结构具有以下几个基本特点:首先,材料特性表现为高强度、良好的塑性和韧性,使得其在承受较大荷载的同时,具有良好的抗震性能和可靠性;其次,由于其采用钢材作为主要材料,具有较好的焊接性能和连接性能,为施工提供了便利;再次,轻型钢结构的自重相对较轻,有利于降低基础负荷和减少地基处理费用;最后,钢结构的施工速度较快,有利于缩短工期,提高工程效益。

轻型钢结构在工业建筑设计中的应用范围广泛,不仅可以应用于屋盖、墙面、柱等主体结构,还可以应用于屋面、墙面围护结构、楼梯、吊车梁等附属结构。轻型钢结构的应用,不仅可以提高建筑物的承重能力、抗震性能和施工效率,还可以实现建筑物的轻型化、美观化和节能化。然而,轻型钢结构在工业建筑设计中的应用也存在一定的限制^[3]。首先,钢材的价格波动较大,可能导致建筑成本的不确定性;其次,钢材的腐蚀问题需要引起足够的重视,否则将影响结构的使用寿命;再次,施工现场的焊接、螺栓连接等工艺要求较高,对施工队伍的技术水平有较高要求。

(三) 轻型钢结构的应用策略

轻型钢结构在工业建筑设计中的应用策略是其成功推广和普及的关键。为了充分发挥轻型钢结构的优势,避免其局限性,第一,应综合考虑设计、施工和维护等因素。在轻型钢结构的设计阶段,应充分考虑建筑物的使用功能、结构安全、经济性、施工工艺和维护等因素,确保设计方案的科学性、合理性和可行性。此外,在设计过程中,应注重与相关领域的专家和施工单位的沟通

与协作,以便更好地解决设计中的实际问题。第二,优化结构体系。轻型钢结构的设计应注重结构体系的优化,包括合理布置梁、柱、屋盖等承重构件,以及适当设置支撑、连接节点等辅助构件。通过优化结构体系,可以提高结构的承载能力、稳定性和抗震性能,同时降低结构自重和施工难度。第三,选用合适的钢材和连接方式。在轻型钢结构中,钢材的选择和连接方式对结构的性能和寿命具有重要影响。因此,在应用轻型钢结构时,应根据实际需求和条件选用合适的钢材和连接方式。例如,在承受较大荷载和振动的情况下,应选用高强度、良好韧性的钢材,并采用焊接或螺栓连接方式。第四,防腐和防火措施。钢材的腐蚀和火灾是轻型钢结构面临的两大主要问题。因此,在应用轻型钢结构时,应采取有效的防腐和防火措施。例如,在钢材表面涂刷防锈漆、使用防火涂料、设置防火隔离等。第五,注重施工质量和安全管理。轻型钢结构的施工质量和安全管理是其成功应用的关键环节。在施工过程中,应严格按照设计文件和施工规范进行操作,确保施工质量和安全^[4]。同时,施工单位应加强对施工人员的培训和管理,提高施工队伍的技术水平和安全意识。第六,推广与应用新技术、新工艺。随着科技的发展,不断涌现出新的技术和工艺,为轻型钢结构的应用提供了更多可能性。因此,在轻型钢结构的应用过程中,应关注新技术、新工艺的发展动态,并勇于尝试和推广。例如,智能化施工技术、绿色建筑技术等。

三、轻型钢结构在工业建筑中的应用

某工业厂房建设工程拥有 7245.62m² 的建筑面积,属于单层跨轻型钢结构,以檩条为基础铺设多色钢板为屋面呈现出来,多色钢板还应用于外墙围护。项目的建筑设计等级为丙类,整个结构安全等级为二级。由于建成后的用途为工业厂房,所以必须预留足够的操作空间,所以选择门刚轻型钢结构进行厂房设计,门式刚架 55m 长,结构为双跨。此项目设计中有关结构计算、钢结构模型、截面优化、强度预测、节点设计等内容,皆由 PKPM-STC 处理^[5]。

(一) 荷载组合设计

本工程承重构件荷载设计分为两种状态,一是承载能力极限,二是正常使用极限。承载能力极限计算式如下:

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1)$$

式中, γ_0 为结构重要性系数,与之相关的影响因素就是建筑结构的使用年限,此项目设计使用年限是 50 年,则 $\gamma_0 \geq 1.0$; S 为不计地震作用的前提下,荷载的组合设计值; R 为构件承载力的设计值。

若要将抗震因素纳入考虑,就要遵循相关设计规范用式(2)计算:

$$S_E \leq R / \gamma_{RE} \quad (2)$$

式中, S_E 为纳入地震作用时,荷载与地震相互作用

的组合设计值; γ_{RE} 为承载力抗震调整系数。

考虑到轻型钢结构重量值不高,建议使用式(3)计算荷载效应组合设计值:

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_{Q1} S_{Q1K} + \sum_{i=2}^N \gamma_{Qi} \phi_{Ci} S_{QiK} \quad (3)$$

式中, γ_G 为恒定荷载分项系数,有利于结构时的取值为 1.0,反之则为 1.2; γ_{Q1} 和 γ_{Qi} 为灵活荷载分项系数,取值为 1.4; S_{Q1K} 和 S_{QiK} 为根据灵活荷载所得的荷载效应; S_{GK} 为按照恒定荷载所得的荷载效应; ϕ_{Ci} 为灵活荷载的组合系数。

正常使用极限计算式如下:

$$S \leq C \quad (4)$$

式中, C 为结构符合正常使用标准的规定限值; S 为荷载组合设计值,该值的计算方式为:

$$S = S_{GK} + S_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \phi_{Ci} S_{QiK} \quad (5)$$

(二) 梁柱截面设计

明确每个构件的尺寸数据需要完成在构建计算模型前,与之紧密相关的是构件的长细比例和高厚比例。荷载输入计算内容包括风载、恒载和活载。恒载输入的计算方式是把屋面单位面积恒载和屋架间距相乘^[6];活载输入的计算方式是屋面单位面积活载和屋架间距相乘;风载输入的计算式为:

$$W_k = \beta_z \mu_z \mu_s W_0 \quad (6)$$

式中, W_k 为风荷载标准值, kN/m²; β_z 为高度 z 处的风振系数; μ_z 为风压高度变化系数; μ_s 为风荷载体型系数; W_0 为基本风压, kN/m²。

(三) 钢架侧移与变形

钢架结构的横向移动,是指柱顶在水平方向上的偏移。在计算钢架的最大允许侧移时,需要根据不同的墙体类型来确定限值:对于轻型钢墙板,这个限值是柱高的 1/60;对于砌体墙,则是 1/240。“ h ”是指钢架柱的高度。此外,对于斜梁的竖向挠度设计,也有其特定的限制。斜梁的挠度上限取决于其跨度“ L ”。具体来说,吊顶的挠度限值是梁跨度的 1/240,悬挂起重机和支撑屋面及檩条的限值分别是梁跨度的 1/400 和 1/180。在使用过程中,厂房结构需要承受的主要水平荷载之一就是风荷载,它会引起结构的侧移。因此,在确定一个结构的最大允许侧移值时,风荷载的作用是一个关键因素,在考虑这些因素时,设计师要特别关注柱顶节点的位移。

(四) 校核钢架截面

在设计轻型钢结构时,对钢架截面的核对是保障结构安全性、经济性和满足功能需求的核心环节,这一环节主要涉及截面在强度、刚度和稳定性方面的验证。设计工作者应依据相关的标准和规范,初步估算截面的规格,并通过一系列的计算和优化,调整截面尺寸以符合结构在承重、抗弯扭等力学要求,并确保挠度不超过允

许的范围,从而保证结构的刚性。同时,截面的稳定性也是设计时必须重视的方面,以防不合理的截面尺寸引起的安全问题。设计的关键在于均衡考虑结构的强度、刚度、稳定性以及成本效益,运用逐步逼近满应力法等设计优化手段,以实现用钢最少化、成本最小化^[7]。

(五) 墙梁和檩条设计

1. 墙梁设计如表 1 所示。

表 1 墙梁设计

工况	设计方式
刚架柱距 ≤ 9m	不添加墙架柱,设计墙梁和拉条
墙梁跨度范围 4.5 ~ 6.0m	1 道拉条
墙梁跨度 > 6m	2 道拉条

墙面板和墙梁的连接会在一定程度上约束墙梁外翼缘的各种位移,此项目的拉条设置在墙梁内翼缘 1/3 处。

2. 檩条设计作为一种关键的承重结构,檩条是支撑屋盖不可替代的构件,屋面荷载的传递渠道以檩条为主,檩条的布局与刚架紧密相关,通常位于刚架斜梁位置^[8]。此项目优选实腹式檩条,间距值为 1.5m。实腹式檩条由于其截面形状和材料厚度的设计,能够承受较大的荷载,包括屋面和墙面的自重以及风载、雪载等外部荷载,而且实腹式檩条的刚度较大,可以有效地将荷载分布到整个檩条截面上,减少檩条的挠度和变形。

(六) 支撑设计

在设计屋盖的水平支撑时,要遵守规范性文件的具体规定。一般来说,这些支撑应该设置在端部开间和柱间支撑的开间位置,每隔 40 米设置一次。如果建筑物中有抽柱的情况,需要从纵向水平支撑的角度来分析抽柱的范围。根据建筑物的使用功能和环境,选择合适的支撑类型,如横向水平支撑、纵向水平支撑、垂直支撑和系杆等。在设计前,需要详细分析屋盖的荷载,包括自重、雪载、风载等,以确保支撑系统能够承受这些荷载。同时,支撑系统的设计要考虑材料的适宜性,如使用热轧 H 型钢、C 形钢等,以确保材料具有足够的强度和稳定性。

对于柱间支撑的设计,首先要根据建筑物的使用功能和受力特点,选择合适的柱间支撑类型,如中心支撑、偏心支撑、斜撑等。然后,对建筑物可能承受的各类荷载进行详细分析,包括永久荷载(如结构自重)、可变荷载(如雪载、风载、活载)和特殊荷载(如地震作用),以确保支撑系统能够安全承受这些荷载。最后,根据荷载分析和结构设计要求,合理布置柱间支撑的位置和数量。考虑支撑之间的间距、柱子的布置以及荷载的分布,确保支撑系统均匀分布,提高结构的稳定性。本项目选择在托梁两端进行柱间支撑设计,以交叉结构为主,主要用材是规格为 2L100mm×6mm 的角钢^[9]。

四、工业建筑钢结构技术发展中的问题与展望

目前来看,工业建筑钢结构技术领域还有许多问题需要进一步深入研究和解决,包括结构设计理论不完

善、标准化型材的应用率不足、钢结构产业链效能偏低、我国标准与国际标准的一致性等问题等方面。在结构设计理论方面,虽然我国已经拥有了相对完善的计算理论和规范标准,但仍有部分问题尚未解决,如结构体系的可靠度、疲劳计算的极限状态、板间屈曲后的强度、钢材的断裂理论等。这些问题还需要进行更深入的研究。在标准化型材的应用方面,需要进一步提高热轧型钢、冷弯型钢和钢管型材的应用率,以促进工业建筑设计和制造的标准化与通用化。在钢结构产业链效能方面,全产业链的协同仍存在不足,结构体系研发、新材料应用、设计标准完善、制造运输安装等环节的衔接不够紧密,导致了高性能钢材和轧制型材应用率偏低、加工制作焊接的工作量较大、质量水平较低等系列问题。在我国标准与国际标准的一致性方面,随着我国与其他国家工程建设合作的不断扩大,必须进一步完善我国的钢结构技术标准,提高中国标准在国际上的认可度和接受度,才能在不断增强的国际工程合作中取得理想的成效。

结语

总之,轻钢结构由于其自身的优势,在建筑和工程领域得到了广泛的应用。然而,为了确保轻钢结构的安全、稳定性和经济性,我们在设计和施工过程中需要遵循一些基本要求,比如合理选择构件、荷载计算、连接设计、考虑环境和维护以及安全和可持续发展。只有充分考虑这些要素,并将其贯穿于设计和施工过程,才能确保轻钢结构的安全、稳定性和经济性,实现优质工程。在未来发展中,相关工作者要不断改进创新,加强轻钢结构在工业建筑设计中的推广和应用。

参考文献

[1] 宋浩辰. 包头市稀土永磁材料厂绿色工业建筑设计研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2023.
 [2] 相雄雄. 关于工业建筑轻钢结构设计问题的研究 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (19): 138-140.
 [3] 路斌. 工业建筑钢结构设计中存在的问题与应对策略 [J]. 四川水泥, 2023, (06): 95-97.
 [4] 刘占俭. 轻钢结构工业建筑设计及应用研究 [J]. 工程建设与设计, 2023, (05): 13-15.
 [5] 蒋冲. 对我国现代工业建筑结构设计几个问题的探讨析论 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (06): 146-148.
 [6] 宋依然. 结构理性视角下旧工业建筑博物馆化改造设计研究 [D]. 北京交通大学, 2023.
 [7] 马晓文. 工业建筑设计中轻钢结构的特点与设计探析 [J]. 安徽建筑, 2022, 29(10): 81-83.
 [8] 王莎. 关于工业建筑轻钢结构设计问题的研究 [J]. 江苏建材, 2022, (03): 47-49.
 [9] 王宝磊. 轻钢结构的工业建筑设计研究 [J]. 房地产世界, 2022, (03): 80-82.