

建筑幕墙结构的设计优化分析

王泽¹ 姚艺² 赵倩¹ 郑德志¹

1 中国建筑科学研究院有限公司

2 北京华美装饰工程有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17158

[摘要] 本文针对建筑幕墙结构优化这一系统性问题,提出其核心在于打破传统静态设计,实现从宏观体系到微观构造的全过程精细化控制。优化设计首先需基于建筑形态与边界条件,在刚性或柔性结构体系中进行精准选择,构建高效传力路径;进而通过风洞试验、非线性分析及有限元模拟等手段,实现荷载的精确界定与构件节点的应力优化,以替代保守估计,挖掘材料潜力。同时,必须将施工过程和全生命周期性能纳入核心考量,确保结构从安装、成型到长期使用均安全可靠。

[关键词] 建筑幕墙结构; 优化方法; 精细化设计; 全生命周期

中图分类号: TU227 **文献标识码:** A

Design Optimization Analysis of Building Curtain Wall Structures

Ze Wang¹ Yi Yao² Qian Zhao¹ Dezhi Zheng¹

1 China Academy of Building Research Co., Ltd.

2 Beijing Huamei Decoration Engineering Co., Ltd.

[Abstract] This paper addresses the systematic issue of building curtain wall structural optimization, proposing that its core lies in breaking away from traditional static design and achieving refined control throughout the process from macro systems to micro structures. Optimization design must first involve precise selection between rigid or flexible structural systems based on architectural form and boundary conditions, establishing efficient load transfer paths. Furthermore, through methods such as wind tunnel testing, nonlinear analysis, and finite element simulation, accurate load definition and stress optimization of components and joints are achieved, replacing conservative estimates and unlocking material potential. Simultaneously, the construction process and full lifecycle performance must be incorporated as core considerations to ensure structural safety and reliability from installation and formation to long-term use.

[Key words] Building Curtain Wall Structures; Optimization Methods; Refined Design; Full Lifecycle

引言

建筑幕墙作为现代建筑的表皮,其功能已远超单纯的围护与装饰,集成了美学表现、结构安全与环境性能于一体的复杂系统。随着建筑形态日益新颖、跨度不断增大,传统基于静力分析与经验估算的幕墙设计方法,常因过于保守而牺牲经济性,或因忽视施工过程与长期性能而隐含风险。为此,本文旨在系统探讨幕墙结构的优化设计路径,从结构体系选型、荷载精细化分析、构件节点设计,到施工控制与全生命周期考量,构建一个综合性的精细化设计框架,以实现安全、经济、耐久与建筑表现力的统一目标。

1 结构体系建立与传力途径设计

建筑幕墙的结构体系可根据其核心受力特性,划分为刚性支撑与柔性支撑两大类型。刚性支撑体系主要依靠构件自身的

截面刚度来承担荷载,其典型代表如框架式幕墙与单元式幕墙,它们通过竖挺、横梁等杆系结构形成传力骨架;以及玻璃肋支撑结构,其通过刚性玻璃构件为面板提供线性支撑。柔性支撑体系的核心则在于利用高强度材料(如钢索)的轴向拉力与预张力来形成稳定受力体系,如点支承式幕墙中采用的索网或索桁架结构^[1]。这两种体系最根本的区别在于,刚性体系以抵抗弯矩为主,而柔性体系以承受轴向拉力为主,二者对边界条件的要求和结构行为模式截然不同,直接影响幕墙的力学性能、经济性与建筑表现力。

传力途径与结构形式的选择,本质上是针对特定边界条件与荷载需求所提出的力学解答。对于常规的框架式幕墙,其设计已形成标准化模式,荷载通过面板传递至横梁、竖挺,最终汇至与主体结构连接的转接件,传力路径清晰。而对于大跨度的雨

棚、采光顶结构,其面临的挑战主要是巨大的自重、风荷载乃至雪荷载。拉索等柔性体系在此类应用中的优势在于通过施加预张力在荷载态下维持形态稳定并提供抵抗变形的“几何刚度”。当建筑主体结构边界稳固,能提供强大的反力时,柔性体系可以高效地实现轻盈跨越。然而,当主体结构边界本身较为薄弱或预期变形较大时,则需采用刚性更强的自立式结构,例如设置独立的抗风桁架或钢架,使其将荷载直接传递给基础,从而与主体结构解耦,确保系统的独立性与安全性^[2]。

基于主体边界的结构条件,选择合理的幕墙体系。同时,减少传力路径,可有效降低对结构的不利影响。结构设计优化过程应细化主体边界与幕墙体系的匹配关系。

2 精细化荷载设计

幕墙结构设计的精确性根本上有赖于对所受荷载的精细化界定与评估。其所承受的荷载主要包括永久荷载,如幕墙体系的自重;以及可变荷载,如风荷载、雪荷载、地震作用和温度变化引起的作用。设计需采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,对不同类型的荷载赋予基于其变异性的分项系数,并进行严格的荷载组合,以考虑多种荷载同时出现的可能性。尤其关键的是对风荷载非均匀性的认知,建筑物的角区、边缘等部位由于气流分离会产生远大于大面区的局部风压(吸力),规范对此有明确的体型系数划分^[3],这构成了荷载精细分区设计的基础。

荷载的精细化分析是一个渐进的过程。最基本的设计依据是规范提供的体型系数和风压计算方法,这为常规项目提供了安全且通用的设计输入。然而,对于体型复杂或超出现行规范覆盖范围的重大工程,则需采用更为精确的方法。物理风洞试验,如刚性模型测压试验,能够通过模拟实际大气边界层流动,直接获取建筑表面精确的风压分布和动力响应数据,是当前最受认可的精细化荷载确定手段。此外,随着计算流体动力学的发展,数字风洞(CFD技术)也成为一种重要的辅助工具,虽在工程中完全替代物理风洞尚需验证,但其在方案阶段的快速比选和流动机理分析中发挥着日益重要的作用。基于这些精细化手段获得的荷载数据,设计便可按不同的风压分区进行差异化配置,实现材料性能的最优利用。

荷载的大小直接影响了幕墙的构件尺度及经济效益,优化设计应着眼于细化荷载取值方式及荷载精细化分区,以避免保守的“超规格”设计。

3 构件与节点的精细化设计

幕墙系统的性能最终取决于其基本构件——面板与支撑龙骨——在荷载作用下的精确力学行为。面板的设计,尤其是玻璃面板,需严格依据规范进行。规范方法通常基于薄板小挠度理论,将玻璃简化为四边支承的弹性板模型进行计算,这种方法具有较好的安全保证,但计算结果相对保守。现代精细化设计则进一步考虑几何非线性影响,即大变形效应。大变形会使面板的中面产生薄膜应力,从而改变其应力分布和挠曲形态,这种考虑可以更真实地反映面板的实际受力状态,往往能充分发挥材料的承载潜力,提高面板的利用率^[4]。支撑龙骨(杆件)的力学性能主

要由其材质特性与边界支撑条件共同决定。铝合金型材与钢型材在弹性模量、强度和热膨胀系数上的差异,直接影响了杆件的截面设计和结构刚度。同时,杆件是按简支梁还是多跨连续梁模型计算,直接关系到其内力分布和变形控制,需根据实际的连接构造进行精细化选取,并可在不同跨度或荷载分区采用差异化的设计。此外,为兼顾耐腐蚀性与高强度,铝包钢复合构件等特殊材料也在特定部位得到应用。对于跨越较大距离的支撑结构,通常采用以钢材为主的格构式构件(如钢桁架、空腹钢桁架),其设计更侧重于整体稳定性与节点构造。

在构件设计之上,连接节点的精细化是确保结构安全可靠的生命线。节点设计需综合考虑多重因素:在连接构造上,必须实现有效的荷载传递,同时通过长圆孔、滑动支座等方式释放因温度变化和主体结构位移引起的约束应力,避免产生过大的附加内力。在细部处理上,应极力避免尖锐凹角、截面突变等引起的应力集中现象,通过优化几何形状、增设加劲肋等手段使力线平顺过渡。对于复杂的三维节点,仅凭经验公式已难以准确评估其性能,需借助有限元分析进行弹性计算,精确模拟其应力分布和潜在的屈服区、屈曲模态,从而实现从宏观体系到微观构造的全面把控。

构件与节点构成了幕墙的安全体系,通过精细化设计方法,可以在保证体系可靠性的前提下,实现材料性能的最优解。

4 施工状态考量

幕墙结构的最终状态,特别是对于预应力体系而言,与其施工过程和方法密不可分,这一点在拉索式幕墙中表现得尤为显著。拉索结构的成型并非一蹴而就,其最终的设计预张力是通过特定的张拉工艺和施工顺序逐步建立的。整个过程中,索力的变化是一个动态调整的系统工程,后张拉的索会对先张拉的索内力产生显著影响,因此必须通过施工全过程模拟分析来确定合理的张拉顺序和分级张拉值,以确保最终成形态的索力分布符合设计要求。此外,施工时的环境温度(季节)是一个至关重要的因素。由于钢索对温度变化敏感,若在异于结构基准温度的工况下进行张拉,温度变化会引起索内预应力的显著增加或损失^[5]。因此,精细化施工必须依据实测温度对张拉力进行修正,或选择在接近年平均温度的季节进行张拉作业,以最大限度地减少温度效应对最终索力的不利影响。

幕墙的精准安装高度依赖于对主体结构施工偏差的预见性与适应性设计。钢筋混凝土或钢结构主体在施工过程中不可避免会产生允许范围内的尺寸偏差,如层间位移、竖向偏差以及最为常见的立面进出位偏差。这些偏差若不能在幕墙系统中得到有效吸收和调节,将导致幕墙无法正常安装或产生巨大的安装应力。因此,幕墙的支撑结构及其与主体的连接节点必须设计有足够的三维调节能力。通过设置具有长圆孔、滑动垫片或螺纹微调功能的专用转接系统,可以消化吸收主体结构的施工误差,确保幕墙板块的精确定位,并避免在连接部位形成次应力。这种对施工偏差的包容性设计,是连接理想化设计模型与复杂施工现实的关键桥梁。

施工状态与结构设计密不可分,应对施工过程合理预判,避免留下安全隐患。

5 设计年限内的考量

幕墙作为建筑的外围护结构,在其长达数十年的设计使用年限内,将持续承受周期性温度变化带来的长期影响。这种影响远不止于施工阶段的温度修正,而是贯穿于结构使用的全生命周期。由于幕墙所用材料,如铝型材、玻璃、钢材及密封胶等,均具有不同的线膨胀系数,在年复一年的夏冬交替中,整个系统会随之产生显著的膨胀与收缩。若在构造设计中对此种变形约束过强,未能通过设置有效的温度伸缩缝、采用长圆孔连接和弹性垫片等措施释放温度应力,将会在构件和连接节点中产生累积的疲劳应力,轻则导致密封胶开裂、连接件松动,重则引发玻璃爆裂或支承结构损坏。因此,幕墙的结构与构造设计必须具备适应温度变化的“呼吸”能力,这是保证其长期工作性能的基础。

确保幕墙结构在设计使用年限内安全可靠,耐久性设计是关键一环,其核心在于采取有效的防护措施以抵御环境侵蚀。对于铝合金构件,阳极氧化或氟碳喷涂等表面处理不仅为了美观,更是形成一层致密的保护膜,有效阻隔水分和腐蚀性介质的侵蚀。夹胶玻璃的耐久性在很大程度上依赖于中间层胶片及其封边剂的稳定性,优良的封边能防止湿气侵入夹层,避免出现脱胶、气泡等失效现象。而对于钢结构支承体系,其防腐则依赖于一个完整的涂层系统,通常包括起附着和防锈作用的底漆、提供屏障保护的中间漆以及耐候性优异的面漆,通过多层协同作用延长钢材寿命。这些防护措施的选取与等级,直接与建筑所处环境的腐蚀性等级及设计使用年限的要求相匹配。

幕墙结构应采用全寿命周期维度考量,力求实现结构与材料在整个服役过程中的性能协同与耐久稳定。

6 总结

本文围绕建筑幕墙结构的优化设计这一核心议题,从多个维度,进行了系统性的综述与分析。可以得出以下核心结论:

(1) 优化设计的核心在于“精准匹配”而非“过度强化”。幕墙结构的设计并非追求绝对的强度,而是一个寻求最优解的系统工程。优化的首要步骤是基于具体的建筑形态、跨度及边界条件,在刚性体系与柔性体系之间做出精准选择。这种选择本质上是对力学模型的筛选,旨在构建最高效的传力途径,使荷载以最直接的方式传递至主体结构,从而避免不必要的材料浪费和复杂的构造。

(2) 精细化是贯穿设计全过程的核心方法论。优化设计建立在“精细化”这一基石之上。它始于对荷载,特别是风荷载的精

细化分区与确定,从依赖规范到采用风洞试验等先进手段,其目的是用精准的输入取代保守的估计,实现材料性能的“物尽其用”。它深化于构件与节点的精细化分析,通过考虑几何非线性、精准模拟边界条件、运用有限元技术消除应力集中,从而在保障安全的前提下挖掘结构潜力。这种精细化思维确保了优化不是盲目地削弱,而是基于科学认知的精准强化与合理弱化。

(3) 优化设计必须超越静态模型,拥抱动态过程与全生命周期视角。一个优秀的幕墙设计,必须将其“生命历程”纳入考量。这包括施工过程的动态影响(如预应力的张拉顺序、温度补偿、对主体结构偏差的适应性调节)和使用阶段的长期性能(如循环温度应力的释放、材料耐久性的保障)。优化设计不仅是针对竣工理想状态的静态优化,更是确保结构从安装、成型到长期使用过程中,内力始终处于受控状态,性能随时间衰减最小的动态优化。忽略施工与时间维度,任何基于理想模型的优化都可能在实际应用中失效。

(4) 未来的优化方向将走向多目标的深度集成与智能化。建筑幕墙作为建筑技术与艺术的交汇点,其优化设计必然是力学性能、建筑材料、构造技术与建筑美学的深度融合。未来,随着计算能力的提升和新材料的发展,优化设计将更加依赖于参数化、算法生成等数字化工具,实现从形态到性能的一体化生成与评估。同时,基于传感技术的健康监测与智能化运维,也将为幕墙在全生命周期内的性能维持与优化提供数据支撑和决策依据。

综上所述,唯有坚持精准化、动态化和全生命周期的设计理念,才能最终实现幕墙结构在安全、效能与艺术表现上的高度统一。

[参考文献]

- [1] 韦军,陈伟伟.高速·滨湖时代广场C1#楼拉索幕墙结构计算与设计[J].工程技术研究,2018,(02):29-32.
- [2] 花定兴.大型机场航站楼建筑幕墙设计关键点分析[C]//钢结构建筑工业化与新技术应用.深圳市三鑫幕墙工程有限公司,2016:23-428.
- [3] 中国建筑科学研究院GB 50009-2012建筑结构荷载规范.北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [4] 周容方.点支撑玻璃面板有限元模拟与规范计算对比分析[J].门窗,2019,(15):9-10.
- [5] 唐雄威.大跨度双向单索幕墙施工关键技术[J].绿色建筑,2022,14(03):188-191.