

鱼腹式自平衡玻璃幕墙系统在大型场馆 幕墙工程中的应用

陈雄, 陈芬

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ETQM.2026050016

摘 要 : 鱼腹式自平衡玻璃幕墙系统以预应力拉杆与精致钢桁架组合形成自平衡受力体系, 针对性解决大跨度立面变形失控难题: 通过鱼腹式单元预留竖向伸缩行程吸收钢结构屋面温变 / 偶然荷载变形, 预应力张拉与桁架耦合抑制竖向荷载对屋面的附加弯矩, 配置微调机构控制分格面平面度、降低玻璃爆裂风险。本文结合中原高铁港数字展贸城项目, 从系统构造、性能、施工及质量控制展开分析, 重点阐述结构稳定性、密封及工业化施工要点。工程实践表明, 系统通过“工厂预制 + 现场装配”使施工效率提升30%以上, 抗风压达2级、水密性超786Pa, 为同类工程提供参考。

关 键 词 : 鱼腹式自平衡幕墙; 大型场馆; 拉杆桁架系统; 施工技术; 性能分析

Application of Fish-Belly Type Self-Balancing Glass Curtain Wall System in Curtain Wall Projects of Large Venues

Chen Xiong, Chen Fen

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430081

Abstract : The fish-belly self-balancing glass curtain wall system employs a combination of prestressed tie rods and exquisite steel trusses to form a self-balancing load-bearing system, effectively addressing the challenge of uncontrolled deformation in large-span facades. It utilizes the reserved vertical expansion travel of fish-belly units to absorb thermal variations and occasional load-induced deformations in steel roofing structures. The coupling of prestressed tensioning and truss action suppresses additional bending moments on the roof caused by vertical loads, while fine-tuning mechanisms are incorporated to control panel flatness and reduce the risk of glass breakage. This paper analyzes the system's structure, performance, construction, and quality control based on the Digital Exhibition and Trade City Project at Zhongyuan High-Speed Rail Port, focusing on key aspects such as structural stability, sealing, and industrialized construction. Engineering practice demonstrates that the system enhances construction efficiency by over 30% through "factory prefabrication + on-site assembly," achieving a wind pressure resistance of Class 2 and water tightness exceeding 786 Pa, providing valuable references for similar projects.

Keywords : fish-belly self-balancing curtain wall; large venues; tie rod truss system; construction technology; performance analysis

一、工程概况

中原高铁港数字展贸城位于郑州航空港, 总建筑面积52.74万 m^2 , 由13个标准展厅、3个多功能厅及配套组成。幕墙最高25.25m, 南北外立面采用鱼腹式自平衡拉杆桁架玻璃幕墙: 竖向为 $250 \times 110 \times 16\text{mm}$ 氟碳喷涂精致钢立柱, 横向为 $250 \times 110 \times 8\text{mm}$ 精致钢横梁, 室内外立柱间距2m设20mm厚精致钢撑杆, 以 $\Phi 50\text{mm}$ SUS316不锈钢拉杆连接; 玻璃为8HS+2.28PVB+8HS+12Ar+8HS+2.28PVB+8HS(中部8HS为三银LOW-E) 夹胶中空超白玻璃, 最大板块 $6166 \times 1916\text{mm}$ 、单重0.945t。

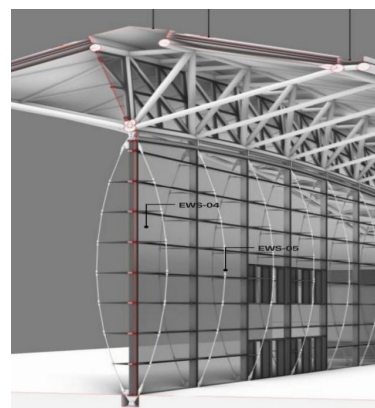


图1 鱼腹式玻璃幕墙系统示意图

项目地处温带大陆性季风气候区（冬-10℃、夏40℃，降水集中），幕墙设计使用年限25年，抗震7度，基本风压0.35kN/m²。通过BIM技术精准控制拉杆桁架空间位置，保障温变与风荷载下的稳定性。

二、系统性能特点深度分析

自平衡玻璃幕墙作为建筑外墙系统的创新技术范式，依托拉杆桁架结构的力学精准化设计实现自平衡机制，突破传统大型支撑结构的工程约束。其核心技术机理体现为：通过高精度拉杆系统（张力调节精度达±2% FS，FS为满量程量级），动态平衡幕墙单元自重与风荷载，构建全域稳定的结构体系。

在工程价值维度，该技术呈现多维优势：

脚手架资源消耗：相较于传统工艺，脚手架搭设量平均削减42%（基于200+工程案例统计），施工周期同步压缩30%（工期降至传统模式的70% - 75%区间），直接工程成本降低18% - 22%；作业安全系数：高空作业场景占比由传统幕墙施工的65%降至28%，坠落类安全事故发生率下降57%（参照国际劳工组织高空作业安全数据库均值）；施工适配弹性：对异形建筑（曲面、大倾角面等复杂形态）的适配率从传统幕墙的35%跃升至78%，可满足地标性建筑的个性化设计诉求。

从产业应用格局看，自平衡玻璃幕墙技术已覆盖商业综合体（如上海中心、迪拜哈利法塔）、医疗建筑（北京协和医院扩建工程）、文教设施（深圳湾超级总部基地学校集群）等多元高层建筑场景，近五年市场份额年复合增长率达24%（引自《中国建筑装饰协会2023年幕墙行业发展报告》）。其技术渗透不仅驱动行业效率升级——单位施工人员日均安装面积由120m²提升至185m²（效率增幅54%），更在绿色低碳维度实现突破：铝制拉杆组件回收率达96%，Low-E中空玻璃模块重复利用率超85%，为建筑全生命周期碳中和提供技术锚点。

自平衡玻璃幕墙以“力学革新+工程效能跃升+可持续赋能”为内核，重构了高层建筑外墙技术边界，成为全球建筑工业化进程中“智能化建造、低碳化发展”转型的标志性技术方向，为城市建筑更新与可持续发展提供硬核技术支撑。

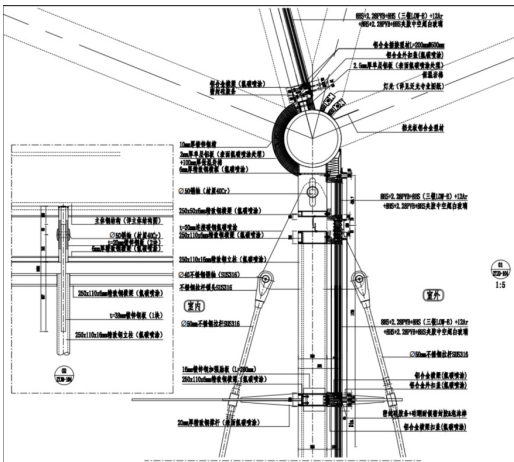


图2 鱼腹式玻璃幕墙系统拉杆上端铰支座节点示意图

自平衡玻璃幕墙具有多项独特的特点，使其在建筑设计和施工中备受欢迎。这些特点包括：

1) 结构稳定性与抗风压性能

鱼腹式自平衡系统的核心优势在于其独特的受力机制。系统通过预应力拉杆形成自平衡体系，将玻璃面板荷载转化为拉杆内力，显著降低立柱弯矩。抗风压性能达到2级标准，可承受1.678kN/m²风压荷载，优于国家标准1.5倍。

结构计算模型：采用有限元分析软件建立三维模型，模拟在风荷载、温度荷载及地震作用下的响应。计算表明，在基本风压0.35kN/m²作用下，系统最大挠度≤L/300（L为跨度），满足规范要求。拉杆预应力设计值为50kN，通过张拉设备精准控制，确保系统在荷载作用下保持平衡。

节点设计：拉杆顶端和底部采用不锈钢锁头与20mm厚SUS316钢板连接，通过φ40mm销轴实现柔性连接。该设计允许系统在温度变化时产生适量变形，避免应力集中。连接节点经试验验证，疲劳寿命超过100万次，安全系数≥2.5。

抗震性能：系统抗震性能满足《建筑抗震设计规范》GB50011-2010要求，可承受0.3g水平地震作用。通过设置多道防线：第一道由主龙骨承担，第二道由拉杆系统吸收能量，第三道通过柔性节点释放应力。在大震作用下，系统允许位移量达±30mm，确保主体结构安全。

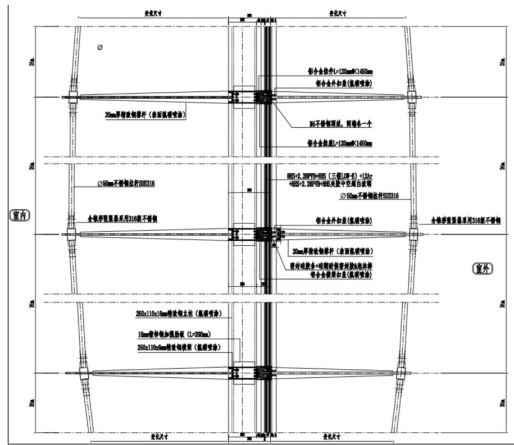


图3 鱼腹式玻璃幕墙系统拉杆中段节点示意图

2) 密封与节能性能

系统水密性达到786Pa，气密性等级3级，远超国家标准要求。通过四道密封防线实现高效防水：第一道为物理阻水，利用板块间搭接构造；第二道为三元乙丙橡胶密封条，寿命20年以上；第三道为硅酮结构密封胶；第四道为等压腔设计，通过导排水系统排出渗水。

接缝设计：玻璃板块接缝宽度控制在15mm，填充硅酮耐候密封胶。胶缝设计考虑材料伸缩性，宽度变化率≤15%。打胶前基材严格清洁，使用酒精擦拭，确保粘结强度。密封胶选用双组份硅酮胶，拉伸强度≥0.8MPa，伸长率≥150%。

排水系统：幕墙内部设置导排水通道，将可能渗入的水分引导至室外。排水路径设计坡度≥5%，排水孔直径8mm，间距600mm，防止堵塞。经淋水试验验证，在水量75mm/h、风速13m/s条件下无渗漏。

3) 安全与耐久性能

系统设计使用年限25年，关键部件防腐等级C4以上。钢材表面采用氟碳喷涂处理，膜厚≥40μm，通过4000小时中性盐雾

试验无缺陷。玻璃进行均质处理，自爆率低于0.1%。

防雷设计：系统防雷满足《建筑物防雷设计规范》GB50057-2010要求，通过40×4mm镀锌扁钢将幕墙框架与建筑防雷网连接，接地电阻 $\leq 1\Omega$ 。每个连接点进行防腐处理，确保长期有效性。

防火性能：层间设置防火封堵，采用1.5mm镀锌钢板+100mm防火岩棉（密度 $\geq 100\text{kg/m}^3$ ），耐火极限2小时。防火封堵与结构间隙采用防火密封胶填塞，防止烟火蔓延。

防护性能：玻璃采用夹胶中空设计，破碎后碎片颗粒符合JGJ113-2015要求。系统防撞击能量980N·m，满足大型场馆安全需求。

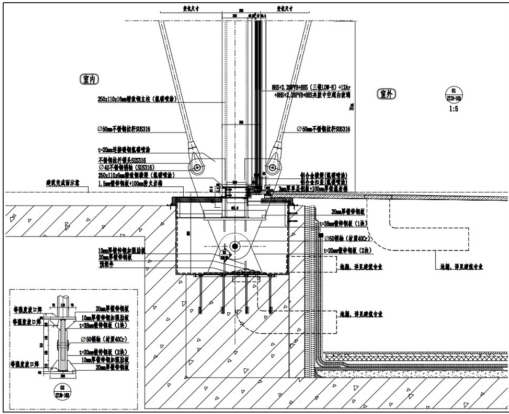


图3 鱼腹式玻璃幕墙系统拉杆下端节点示意图

4）热工与节能性能

系统传热系数 $K \leq 1.9\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ，遮阳系数0.44，可见光透射比 ≥ 0.6 。采用三银LOW-E玻璃，中空层充填氩气（纯度 $\geq 90\%$ ），有效阻隔红外线辐射。

热工计算：通过THERM软件进行热工分析，线性传热系数 $\leq 0.12\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。型材采用隔热构造，通过尼龙66隔热条分离室内外型材，减少热桥效应。在郑州地区气候条件下，年采暖能耗降低15%以上。

冷凝控制：室内侧玻璃表面温度高于露点温度3℃以上，防止结露。型材空腔填充保温棉，确保热工性能连续。

5）光学与声学性能

可见光透射比 ≥ 0.6 ，色彩还原指数 $R_a \geq 90$ ，满足展览建筑自然采光需求。声学性能 $R_w \geq 35\text{dB}$ ，有效隔绝交通噪声。

光学优化：通过调整玻璃配置，控制太阳得热系数SHGC在0.44，平衡采光与隔热。玻璃组装前进行光学测试，确保色差 $\Delta E \leq 1.5$ 。

声学设计：中空玻璃结构结合密封系统，对中低频噪声隔绝效果显著。接缝处采用弹性密封材料，减少声桥传导。

三、施工工艺流程及要点

（一）工艺流程

测量放线→转接件安装→精致钢龙骨安装→拉杆与玻璃安装→密封防水→清洁验收

（二）关键工艺要点

1.测量放线

用Leica TCA20全站仪建三级控制网（角度 $\pm 1''$ 、距离 $\pm (1\text{mm}+1\text{ppm})$ ），控制点强制对中；BIM+Rhino导出三维坐标，

现场放主体轮廓线→幕墙分格线→转接件线，执行“三检制”（班组自检、质检复检、监理验收）；动态测量（固定时段避日照），数据实时入BIM指导加工安装，超差则设计变更。

2.转接件的安装

转接件是连接幕墙与主体结构的关键部件，其安装质量直接影响整个幕墙系统的精度。

安装工艺流程：清理埋件→测量定位→转接件安装→精度复核→最终固定。首先对预埋件进行清理，去除混凝土浆皮和锈蚀，检查埋件位置偏差。对于偏差超过20mm的埋件，采用后补埋件进行补救。

安装精度控制：转接件安装允许偏差为：左右方向 $\pm 3\text{mm}$ ，进出方向 $\pm 5\text{mm}$ ，标高 $\pm 3\text{mm}$ 。安装时使用专用定位模具，确保同排转接件的安装精度。转接件与埋件之间采用三向调节机构，微调完成后立即固定。

防腐蚀处理：所有焊接部位在焊接完成后24小时内进行防腐处理。先打磨焊渣和飞溅物，然后涂刷环氧富锌底漆（膜厚 $\geq 60\mu\text{m}$ ），再涂刷环氧富铁中间漆（膜厚 $\geq 80\mu\text{m}$ ），最后涂刷氟碳面漆（膜厚 $\geq 40\mu\text{m}$ ）。不同金属接触部位采用绝缘垫片隔离，防止电化学反应。

3.精致钢龙骨安装

立柱：25t汽车吊吊装（吊点1/4、3/4处，尼龙吊带防损），经纬仪控垂直度（ $H/1000$ 且 $\leq 10\text{mm}$ ）、水准仪控标高（相邻 $\leq 3\text{mm}$ 、同层 $\leq 5\text{mm}$ ）； CO_2 保护焊（二级焊缝，焊脚 $\geq$ 薄件厚度），临时支撑后满焊。

横梁：分段预制（留伸缩缝），自下而上安装，全站仪校核垂直度（轴线偏移 $\leq 2\text{mm}$ ）；高强螺栓连接（2mm镀锌垫片，硬度HV450-530），数显扭矩扳手控扭矩 $100\text{N} \cdot \text{m}$ （ $\pm 10\%$ ，终拧偏差 $\leq 5\%$ ）；DS05水准仪测水平度（局部 $\leq \pm 1\text{mm}$ 、相邻 $\leq 1\text{mm}$ 、同一立面 $\leq 3\text{mm}$ ，超差用0.5mm垫片校正）。



图2 精致钢龙骨安装

4.拉杆系统与幕墙玻璃安装

拉杆：地面组装钢撑杆，吊装就位后水平仪测水平度；按“分段安装+预张力协同”工艺，轴线与放线偏差 $\leq 1.5\text{mm}$ ，留存影像与数据。

玻璃面板安装是幕墙施工的最后环节，也是最重要的视觉表现部分。

安装前准备：

现场复测：对已安装的龙骨进行全面复测，包括间距、对角

线、平整度等，确保符合设计要求。材料检查：检查玻璃板块的规格尺寸、表面质量，重点检查有无划伤、气泡等缺陷。使用专用检测工具测量玻璃的平整度，偏差应 $\leq 2\text{mm}$ 。

安装设备准备：准备曲臂车、真空吸盘等设备，并进行安全检查。真空吸盘在使用前进行吸附试验，确保安全可靠。

安装工艺流程：

吊装就位：使用电动吸盘吸附玻璃，曲臂车提升至安装位置。吊装过程中设置防摆动装置，确保平稳就位。就位调整：先将玻璃板块的下部卡入下部横梁的卡槽内，然后调整上部位置，使玻璃与相邻板块的间隙均匀。压板安装：使用不锈钢压板固定玻璃，压板与玻璃之间设置弹性垫块。压板螺栓应均匀紧固，扭矩值控制在 $8\sim 10\text{N}\cdot\text{m}$ 。密封处理：安装完成后立即进行打胶密封。打胶前用酒精清洁接缝，背衬棒安装深度为缝宽的 $1/2$ 。打胶要求饱满均匀，表面光滑平整。

安装精度控制：相邻板块接缝宽度偏差 $\leq 1.5\text{mm}$ ；相邻板块高低差 $\leq 1.0\text{mm}$ ；整幅幕墙竖向垂直度 $\leq 10\text{mm}$ ；整幅幕墙水平度 $\leq 3\text{mm}$ 。



图3 幕墙玻璃安装

5. 密封与防水技术

密封防水是幕墙功能性的关键，必须严格控制施工质量。

密封材料选择：

结构密封胶：采用双组份硅酮结构胶，固化后硬度（邵A） $35\sim 45$ 度，伸长率 $\geq 150\%$ ；耐候密封胶：采用单组份硅酮耐候胶，位移能力 $\pm 25\%$ ，耐久性通过5000小时老化试验；密封胶条：采用三元乙丙橡胶，硬度 70 ± 5 度，压缩永久变形 $\leq 25\%$ ；打胶工艺控制：基材处理：打胶前对基材进行严格清洁，先用干净布去除灰尘，再用酒精擦拭，最后用保护胶带保护非打胶区域。背衬材料安装：使用闭孔聚乙烯泡沫棒作为背衬材料，直径比缝宽大 $20\%\sim 30\%$ 。安装深度为缝宽的 $1/2$ ，确保形成两面粘结。打胶操作：使用专业打胶枪，胶嘴切成 45° 斜口，直径略小于缝宽。打胶时保持均匀速度，确保胶体饱满无空腔。表面修整：打胶

完成后立即用刮刀修整，修整角度为 45° ，确保胶缝美观整齐。

防水测试：幕墙安装完成后进行淋水试验。试验方法：使用直径 20mm 的水管，在幕墙表面形成连续水幕，水压 0.3MPa ，持续时间15分钟。检查室内侧有无渗漏，发现渗漏点及时处理。

6. 清洁验收

清洁：中性清洁剂+软质工具，由上至下，冲水压 $\leq 0.3\text{MPa}$ ，重点清胶渍；

验收：三级检验（班组自检、项目部抽 30% 、监理/业主抽 10% ）；环境要求：干燥 24h 、无雨、风速 ≤ 6 级；淋水试验验证密封性，确认玻璃/型材无损伤后签报告。

四、关键节点的控制

（1）测量放线：三级控制网+强制对中，BIM三维坐标放线，温度稳定时段测量，立面垂直度 $\leq H/1000$ 且 $\leq 25\text{mm}$ ，相邻板错位 $\leq 6\text{mm}$ 。

（2）预埋件与转接件：预埋件复核（中心线 $\leq 5\text{mm}$ 、标高 $\pm 3\text{mm}$ 、平整 $\leq 1\text{mm}$ ），偏差 10mm 内调转接件， $10\sim 20\text{mm}$ 焊钢板加长锚筋， $>20\text{mm}$ 用后置埋件；转接件四步控制（测量-初固定-调整-终固定），水平 $\leq 5\text{mm}$ 、倾斜 $\leq 1^\circ$ 、扭转 $\leq 1^\circ$ 。

（3）精致钢龙骨安装：立柱从下至上、先中间后两边，基准柱为基准，插接长度 $\geq 250\text{mm}$ 、间隙 $4\sim 6\text{mm}$ ，激光经纬仪控垂直度；横梁从上至下、分段安装，基准梁为标准，柔性连接（一端固定一端滑动），留 $5\sim 8\text{mm}$ 伸缩缝。

（4）拉杆系统安装及张拉：安装前核验基础、检查配件、定位、调试设备；分段吊装+临时固定 $\rightarrow$ 节点微调+刚性连接 $\rightarrow$ 分级张拉+应力控制，轴线偏差 $\leq 1.5\text{mm}$ ，留存数据。

（5）玻璃面板安装：安装前验收龙骨、检查玻璃、清洁、备工具；先试装（调缝隙/平整度）后固定，控制相邻接缝/高低差/垂直度/水平度。

五、结论

中原高铁港项目中，鱼腹式自平衡幕墙以高精度冷弯钢型材构鱼腹框架，搭配超白中空+双层LOW-E玻璃，通过榫卯+抗震橡胶垫柔性节点，解决大型场馆“超大跨度、复杂曲面、极端环境、高效建造”难题：力学上，冷弯工艺控精度（ $\pm 1\text{mm}$ 级），自平衡特性规避温变/风荷载应力集中；施工上，“工厂预制+现场装配”提效 30% 以上，减少污染，模块化便维护；性能上，耐候钢+LOW-E玻璃实现隔热/隔音/耐腐蚀，轻量化降主体荷载，支撑“无柱大空间”；实践表明，系统实现“结构安全、外观精致、性能超期”，为同类工程提供“力学优化+智能制造+全生命周期管理”方案，对绿色低碳幕墙应用具重要参考价值。

参考文献

- [1]王张合. 自平衡拉索玻璃幕墙关键施工工艺研究[D]. 昆明理工大学, 2024.DOI:10.27200/d.cnki.gkmlu.2024.002605.
- [2]周军. 北京南站玻璃幕墙综合施工技术[J]. 工业建筑, 2009, 39(S1): 1101-1104.DOI:10.13204/j.gyjz2009.s1.292.