

联想融科资讯中心C座无柱大堂设计

陈彬磊 刘 笛

(北京市建筑设计研究院 北京 100045)

摘要:联想园C座无柱大堂采用悬索、拉索和揽风索相结合的结构形式,采用预应力技术,配合点式玻璃幕墙,整体结构与建筑要求完美结合。本文介绍其结构设计以及风洞试验的情况。

关键词:无柱大堂 双鱼腹式拉杆(索)体系 节点 风洞试验

1 工程概况

联想融科资讯中心C座位于北京市中关村科学院南路,该工程由两栋高近72m、相距63m的矩形板楼和两楼间的玻璃大堂构成。工程的建筑主设计方是美国SOM事务所,北京市建筑设计研究院作为合作方参与该工程的设计,并承担了全部结构设计工作。

工程结构设计使用年限为50年,安全等级为二级。地震设防烈度为8度,设防分类为丙类,设计地震分组为第一组,场地类别为II类。

结构主体采用全现浇钢筋混凝土框架—剪力墙结构体系(图1),设计过程中,结构师不仅仅解决了令人瞩目的大堂设计,同时还在很多细节设计上努力尝试,取得了成功,达到了理论与实际的紧密结合,完成了结构工程师“创造优雅结构”的梦想。

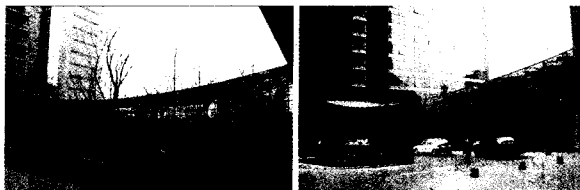


图1 主体结构

工程竣工后,由于各方面的密切配合,特别是63m跨度玻璃大堂采用悬索、拉索和揽风索相结合的结构形式,采用预应力技术,配合点式玻

注:《联想园区C座》项目获第二届欧维姆预应力技术奖二等奖。

璃幕墙,整体结构与建筑要求完美结合,工程竣工后提升了整个建筑群的品质(图2),租金较周边的写字楼高出约30%。使该建筑成为中关村地区的亮点,基于最初限额设计的要求,业主也取得了极大的经济效益。



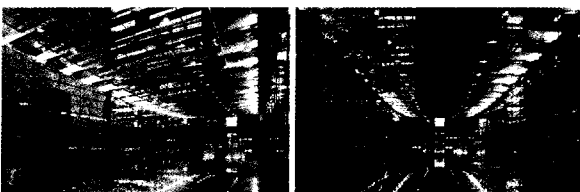
(a) 大堂室外

(b) 大堂室外



(c) 大堂室外

(d) 大堂室内



(e) 大堂室内

(f) 大堂室内

图2 大堂室内外结构

2 结构体系

大堂结构:采用悬挂在两侧塔楼、跨度63m的悬索结构结合点式玻璃幕墙,规模为世界上该类结构之最。

玻璃大堂位于两栋塔楼之间,最初方案为传统的钢框架结构,幕墙采用框式幕墙,建筑规模相当。作为整个建筑的入口和门面,大堂设计平平。

当最初的钢框架设计进行到初设阶段时,建筑方案设计方美国SOM公司建筑师因为拿不准是否能实现,犹犹豫豫地提出了一个“激动人心”(建筑师自语)的方案,这就是最终方案的雏形:整个大堂主要采用拉索承重体系,幕墙全部采用点式幕墙。该方案可以说是把悬索桥的创意引入建筑中来。

大堂的最初结构体系方案如图3(a)所示。顶面抵抗水平风荷载交叉索,虽然很细小,不过有几个“x”形的东西悬在头顶,给人一种不太舒服的感觉,视觉上也感到很乱。

在深入研究该结构的传力体系,特别是水平风的传力途径后,决定采用双鱼腹式拉杆(索)体系,作为一种柔性体系,它能够解决正负两个方向的风压问题,有碍于撑杆长度(即结构高度)的尺寸,体系的刚度较小,应用的跨度一般也不大。将这种构想引入工程,达到了建筑师所追求的最佳效果,结构竖向荷载通过悬索传至两侧主楼、悬挂在悬索上的紧绷拉索为结构提供刚度并成为点式玻璃幕墙的悬挂点,水平风荷载则通过屋顶揽风索传至两侧结构塔楼,整个大堂出两侧连接两塔楼外,前、后和顶面均由点式玻璃封闭。最终实施方案如图3(b)所示。悬索、揽风索、竖向拉索的截面积分别为7710、1473、281mm²。新的揽风索方案不仅在建筑效果上让人满意,而且在受力性能上较交叉索方案更为合理,原因如下:

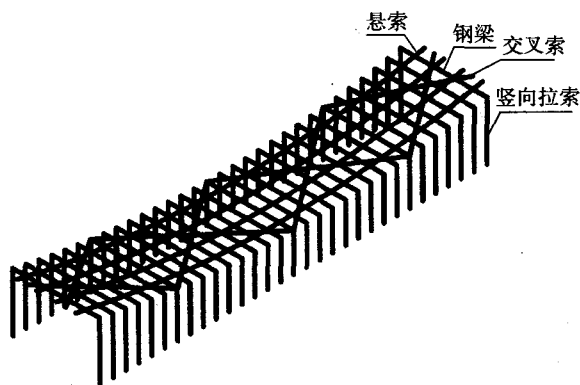
(1) 传力方式明确,路径短。作用在立面幕墙上的风荷载通过竖向拉索传至下端基础和上端钢梁,后者以钢梁轴向压力的方式传给凹向揽风索,揽风索直接将荷载传到两侧主楼剪力墙。而交叉索方式传递风荷载路径需要转折,且路径较长。

(2) 交叉索的受力原理是将两榀刚性构件连成一体,索的作用与桁架中的腹杆相似,这首先需要两侧构件自身具有较大的刚度。而本工程中悬索几乎没有面外刚度,交叉索的作用大打折扣。

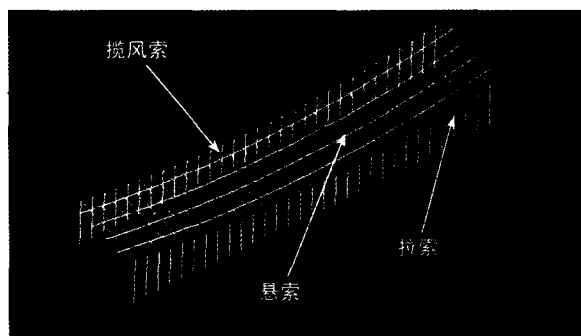
(3) 原结构顶面分布有很密的横向钢梁,在双鱼腹索系结构中,正好用来充当索间的受压撑杆。撑杆过长容易失稳及双层索系结构的高度

问题都不是问题,前者是利用了本来就需要较大截面的钢梁,后者则正好利用了大堂结构的宽度。

方案确定的过程是一个不断优化的过程,经过努力,最终我们找到了各方都满意的结果,图4即是最终的大堂结构平面图。



(a) 初始方案



(b) 实施方案

图3 大堂结构体系初始方案及实施方案

3 整体计算分析

计算模型为整体空间模型,采用ANSYS有限元软件分析,考虑了拉索预张力及结构非线性的影响。

除恒荷载、活荷载、雪荷载、风荷载(按风洞试验结果)以及地震作用外,计算时考虑的荷载还有(1)积水荷载2kN/m²,分布于10m宽的范围内;(2)温度荷载:±40℃。结构位移控制为悬索竖向位移不超过1/300,拉索水平位移不超过1/50。各阶段的计算结果如下:

(1) 结构在玻璃安装前:悬索最大内力为3570kN,揽风索中出现的最大内力为575kN,拉索中出现的最大内力为106.4kN。

(2) 玻璃安装后:在自重作用下,悬索最

大内力为3630kN, 揽风索中出现的最大内力为581.5kN, 拉索与地面连接处的最大内力为79.8kN, 与屋顶钢梁相连处最大内力为128.2kN。以下挠度值均以此时作为结构的初始状态。

(3) 结构在正常使用时, 主要受拉索水平挠度控制, 结构竖向挠度很小。在积水和风荷载组合工况下, 跨中拉索水平挠度及结构竖向挠度均达到最大, 分别为119.6mm和14.8mm; 在风荷载和升温作用组合下, 两边靠近楼房的拉索挠度及拉索顶端水平位移均达到最大, 分别为180mm和25.6mm。各索最大内力为: 悬索4220kN, 揽风索1010kN, 拉索与地面相连处110.4kN, 与屋顶钢梁相连处128.2kN。

此外, 由于结构很轻, 地震作用较小, 不起控制作用。计算结果也证明了这一点。

4 结构细部设计

节点设计在索系结构中非常重要, 且节点形式很多^[2], 如果节点形式选择不当则可能留下安全隐患。

4.1 悬索锚固节点

采用了普通的节点, 如图5所示。

4.2 竖向拉索接地节点

为了减小温度荷载及偶然荷载对拉索内力和支座的影响, 各拉索下端采用一种新型的弹簧节点, 如图6所示。

4.3 悬索、揽风索与钢梁的连接节点

受悬索桥及观光缆车等思路的影响, 首先想到的节点形式是钢梁悬挂在拉索下面, 钢梁顶焊接耳板与拉索扣件通过螺栓连接。揽风索由于截面和拉力都较小, 则不需要采用耳板, 如图7所示。

悬索悬挂钢梁的方式简单明了, 但是悬索之间的横向联系太弱, 结构的横向刚度很差, 因为在揽风索不能有效发挥作用的边部若干跨, 各钢梁间主要靠悬索的侧向刚度保证其整体受力。如果仅仅依靠钢梁顶端的耳板来传递水平力, 则它显然是一个薄弱部位, 且拉索中心与钢梁中心有一段距离, 传力不直接。因此, 后来在钢梁中部开孔, 悬索穿过其中, 二者直接接触传力。该节点形式及完工后效果见图8、图9。

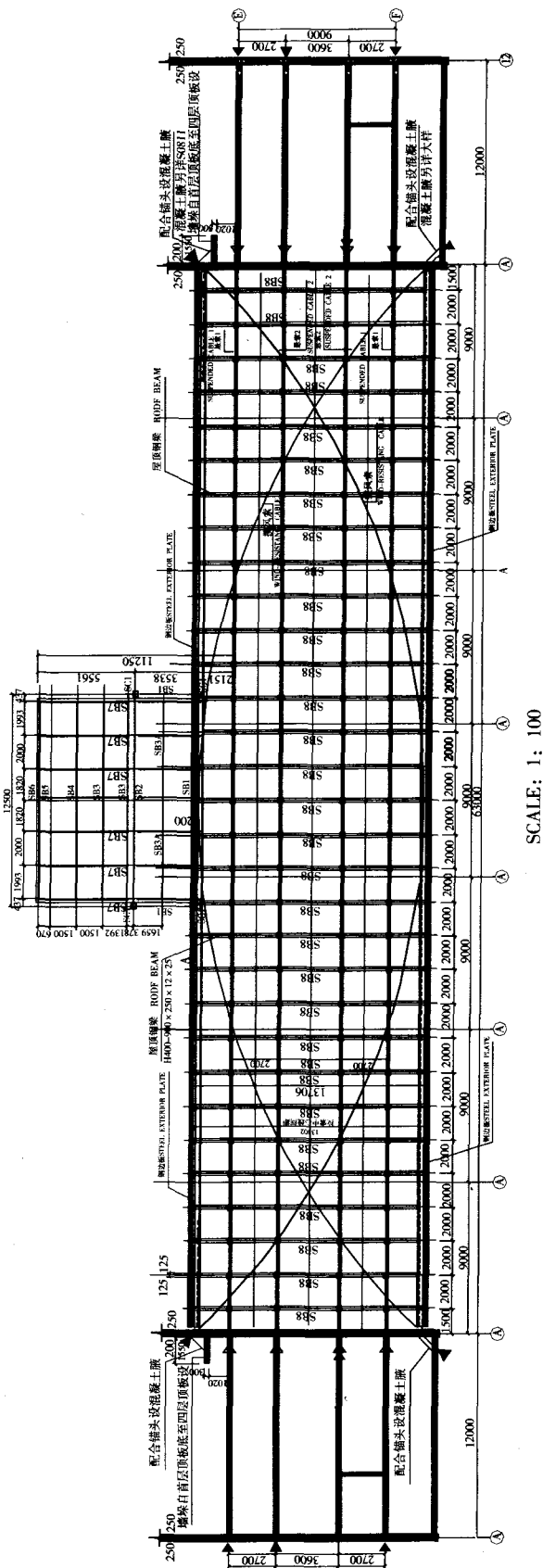


图4 大堂结构平面图

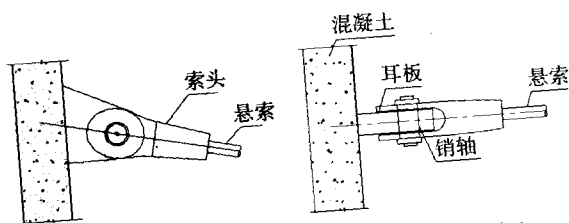


图5 悬索锚固方式(剪力墙内钢骨未示出)

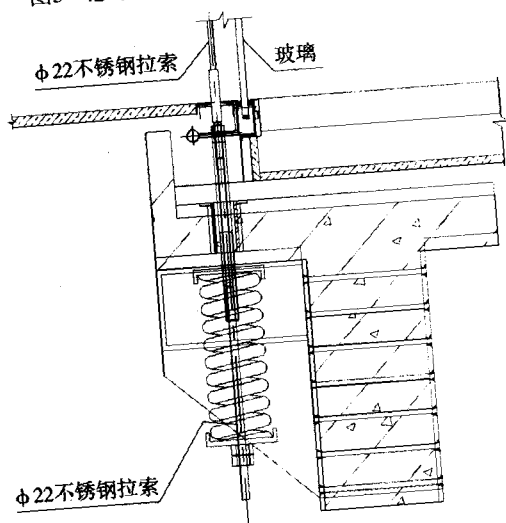


图6 弹簧节点

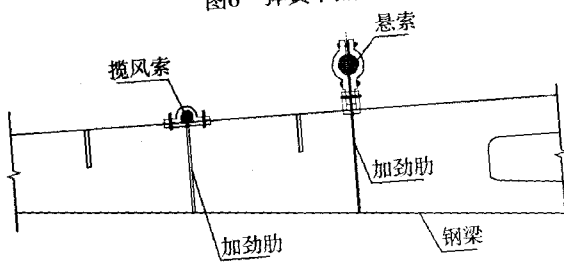


图7 悬索、揽风索与钢梁连接节点一

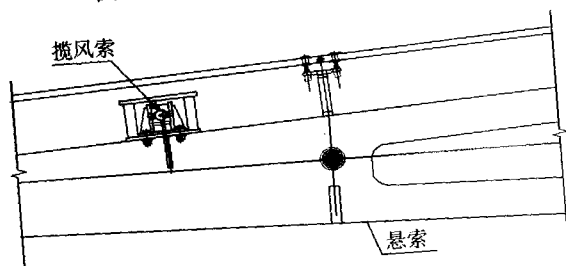


图8 悬索、揽风索与钢梁连接节点二

5 结构钢梁

大堂的横向钢梁较为密集,梁间距离为2m,它并没有采用通常的工形截面,只是将两块腹板通过肋板连成一体,而且腹板还开了大洞,开洞面积几乎占整个截面的一半,如图9所示。除了从提高大堂通透性上考虑以外,这种截面梁更有它受力合理的地方。

首先,与普通结构的梁不同,该钢梁并非以竖向荷载下的受弯为主。由于四根悬索给钢梁提供了四个跨中支承点,而且屋面采用的是轻型的点式玻璃幕墙,因此由恒载引起的弯矩相当小,仅用无上下翼缘的空腹梁来承受弯矩。

其次,在风荷载作用下,钢梁的作用是将立面拉索传来的风压力(吸力)传至揽风索,然后传至大堂两侧的主体结构上。这时钢梁是以轴压(拉)为主,截面形式并不太重要。

最后,双腹板的截面显著增加了钢梁与悬索的联系,使得悬索能够给钢梁提供更有有效的支承。



图9 悬索、揽风索与钢梁连接节点三

6 风洞试验

悬索玻璃大堂高度较低,自重较轻,地震荷载一般不起控制作用,而由于采用悬索、揽风索和拉索等柔性结构,在风荷载下结构较敏感,易产生变形,造成玻璃幕墙的损坏。此外,由于大堂一般位于两楼间的夹道,会使风速增加,周围其它建筑物使风场变得更加复杂,直接影响到总体风环境,同时影响到中间相连廊道的风荷载。

风洞试验在北京大学湍流研究国家重点实验室进行,分为刚性模型风荷载试验和弹性模型结构风致振动试验。前者试验模型比例为M1:200,以C座建筑物为主,包括周边建筑群影响的刚性模型风荷载试验,提供该地区风环境报告、刚性模型结构风荷载体型系数;后者试验模型比例M1:50,提供弹性模型结构风荷载风致振动风洞试验报告。

6.1 刚性模型风荷载试验

刚性模型的试验报告给出了每个测点在每个风向角下的时均压力系数、脉动压力系数、极大值压力系数、极小值压力系数以及这些系数在各

个风向角下的最大值（其中时均压力系数包含最大值和最小值）。考虑工程上的需要，报告还给出了悬索玻璃大堂顶部和东、西两个立面50，100年重现期最小极值风压和最大极值风压，二者在重现期为50年时的分布如图10所示，可见正风压时角部比中部大很多，而负风压各部分相差不是很大。100年重现期风压与此分布相似，但有些区域增大了0.1kN/m²。

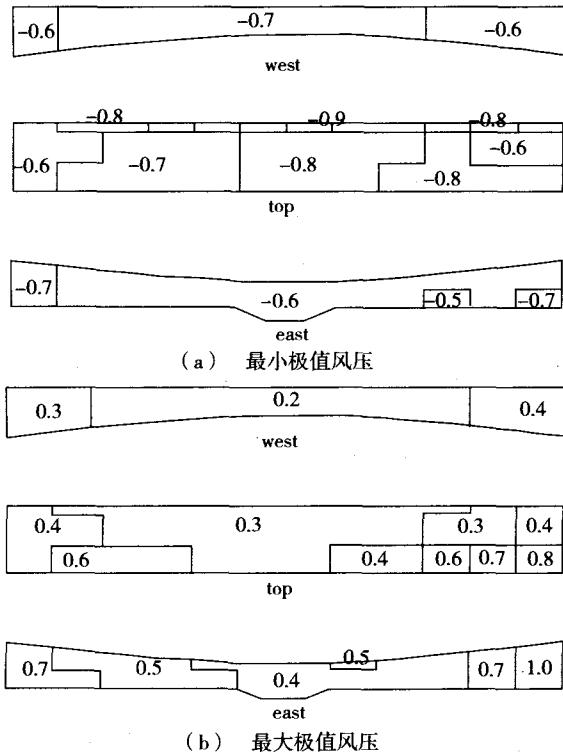


图10 风压区域分布图 (kN/m²)

6.2 弹性模型结构风致振动试验

悬索结构等柔性结构具有很强的气动弹性效应，在风荷载作用下会产生风振。风振对悬索玻璃大堂的安全性有重大影响，而现行规范只有高层和高耸结构风振系数的近似取值^[3]，因此有必要采用弹性模型，直接测量结构物的风致响应。弹性模型试验除满足刚性模型试验的几个相似参数以外，还需模拟出结构物的质量、阻尼、刚度特征，建模复杂，试验费用较高，故在国内建筑结构工程中极少采用。

弹性模型试验只考虑了两种荷载作用：恒载G_k，即钢结构、索、玻璃自重；风载W_k，采用刚性模型风荷载试验得到的数据。荷载组合取以下

三种：1.0G_k，即预应力态；1.0G_k+1.0W_{k1}，风荷载为正西向；1.0G_k+1.0W_{k2}，风荷载为西北向。

弹性模型中对悬索、揽风索、拉索等主要受力构件本身及其预张力进行了精确相似模拟，并考虑了材料、安装等因素。对于钢梁和边板，则进行了适当的简化。

在进行模型试验前，先要进行大量计算，得到模型和实际结构的各种受力性能，如预应力状态各索的内力、两种风荷载作用下的索内力和位移（悬索跨中、拉索顶点），以及二者的振动频率、振型。由于屋面整体刚度较大，而竖向拉索为单独工作，导致结构振动的模态主要表现为竖向拉索的振动，呈现出由两边向中间发展的趋势，因此位移和加速度测点只布置在东、西两个侧面的玻璃幕墙上。

西北风时各测点的风振系数如图11所示。从图中可以看出，测点的风振系数变化范围相当大，从1.522到13.24，但是从分布上来看则是：1.5~1.7占28.1%，1.7~1.9占25.8%，1.9~2.1占21.3%，2.1~2.3占20.1%，2.3以上占6.7%。

从风洞试验的结果来看，融科C座大堂在风荷载作用下有如下特点：侧风对结构的影响大于正风影响，风吸力影响大于风压力影响。

结构整体计算时，按规范GB50009-2001，基本风压取0.45kN/m²，风压高度变化系数取0.74（C类）。按风洞试验结果，风压体型系数为屋顶取-1.6，迎风墙面0.8，背风墙面-1.4；风振系数取2.0。可见，如果按荷载规范GB50009取风压体型系数和风振系数进行设计将偏于不安全。

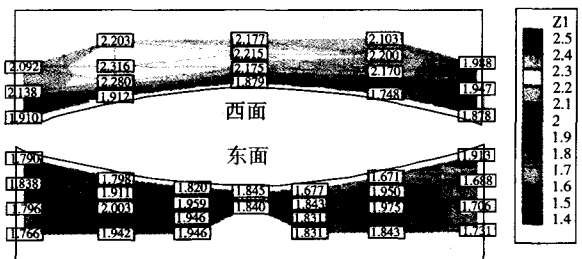


图11 西北风时玻璃幕墙各测点风振系数

7 结语

联想融科C座14m×63m跨玻璃大堂采用悬

(下转第23页)

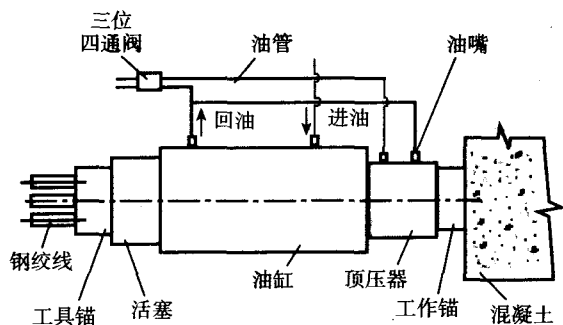


图4 锚索测力仪应用示意图

8 结束语

山东科技大学研究生产的振弦式锚索测力仪在上海磁悬浮预应力轨道梁检测工程中,在轨道梁的制作、安装过程中,在预应力的张拉控制过程中,发挥了重要的作用。通过工程实践表明,振弦式锚索测力仪具有以下优点:

(1) 精确度高,技术先进,达到了国际领先水平。

(2) 承载体结构设计合理,消除了偏载造成的影响,使全部荷载作用在传力装置上。

(3) 所设计的锚索测力仪量程大,可以做到1000t以上。

(4) 锚索测力仪的适用温度范围大,可以用在环境恶劣、潮湿的工况。

(5) 数字化显示,直接显示力值,操作简单,使用方便。

参考文献

- [1] 邓铁六,王清标,胡建明. 振弦传感技术的新进展及新型锚索测力计[J]. 中国岩石与力学工程学报. 2001.20(增): 1769~1771 (Deng Tie-liu Wang Qing-biao Hu Jian-ming, new developments of self-excitation vibrating-wire sensor technology and new type force sensor for pulling force measurement of anchor cable. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20 (Special Edition), 1769-1771.)
- [2] 马俊亭, 邓铁六, 郑丰隆. 一种测量物理量力的大小的钢弦式传感器[P]. 中国: ZL96156680.5 (Ma Jun-ting, Deng Tie-liu, Zheng Feng-long. Steel Wire Sensor Used for Measuring Physical Force. China: ZL96156680.5)
- [3] 崔玉亮, 邓铁六, 于凤. 《谐振式传感器理论及测试技术》. 北京: 煤炭工业出版社, 1997 (Cui Yu-liang, Deng Tie-liu, Yu feng. Resonant Mode Sensor Theory and Testing

Techniques, Beijing: Coal Industry Press, 1997, 1-20)

- [4] 郑丰隆, 邓铁六, 赵振远. 双线圈钢弦激发器[P]. 中国: ZL9323121.8, 1993. (Zheng Feng-long, Deng Tie-liu, Zhao Zhen-yuan. Double Coil Steel Wire Exciter. China: ZL9323121.8, 1993)
- [5] 邓铁六, 于凤, 邓伟. 大量程自激振弦式传感器及相关技术. [J]. 传感器技术. 2001, 9, 41-46. (Deng Tie-liu, Yu Feng, Deng Wei. Big Measurement Range Self-excited Vibrating Sensor and Relevant Techniques. [J], Sensor Techniques, 2001, 9, 41-46.)
- [6] Wang Qing-biao, Deng Tie-liu, Chen Bing-zhi. NEW DEVELOPMENTS AND APPLICATION OF SELF-EXCITATION VIBRATING-WIRE SENSOR. [J], NEW PROGRESS ON CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE—Proceeding of the Third China-Russia Symposium on Underground Engineering of City and Mine. 2004, 51-56.

(上接第7页)

索、拉索和揽风索相结合的结构业已竣工,并已于2004年9月投入正常使用。在设计过程中,对于这一“世界第一”的结构,遇到并解决了许多新问题,主要有以下几点:

(1) 通过悬索、拉索和揽风索三种柔性构件的组合,实现了大跨度楼间玻璃大堂的结构体系,传力途径明确、简洁。

(2) 提出了拉索接地端的弹簧节点形式,减小了温度荷载及偶然荷载对拉索内力及支座反力的影响。

(3) 进行了悬索结构的弹性模型结构风致振动试验。

致谢: 承蒙院柯长华、张青两位总工程师、院研究所甘明博士、中国建筑科学研究院钱基宏、马明同志提出了很多宝贵意见和建议,特此致谢。

参考文献

- [1] 安妮特·博格勒等著. 轻·远—德国约格·施莱希和鲁道夫·贝格曼的轻型结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] 沈世钊等著. 悬索结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 建筑结构荷载规范 (GB50019-2001) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.