海盐康体活动中心大跨钢屋盖和旋转钢楼梯结构设计

闫 锋* 刘富平 张建琮
（华东建筑设计研究院有限公司，上海 200011）

摘 要 海盐康体活动中心项目位于海盐县中心城区，包含多个运动场馆，地上建筑层高6~12 m，建筑高度为24 m，其中网球馆屋盖短向跨度为38.4 m、长向跨度为89 m，入口顶棚最大跨度为61 m、最大悬挑31 m，旋转钢楼梯高度为6.0 m，悬挑8.0 m。网球馆采用斜交箱形钢梁组成的微曲面单层网格结构，入口顶棚采用双向正交平面桁架结构和摩擦摆支座，旋转钢楼梯为异形空间结构。本文阐述了网球馆大跨钢屋盖、入口顶棚大跨钢屋盖、摩擦摆支座、钢楼梯的结构选型、方案比选、设计结果，并进行了入口顶棚钢屋盖与旋转楼梯的稳定性分析，以确保结构设计的安全性与合理性。上述结构设计均满足规范要求，具有合理的强度、刚度和稳定性，设计和研究成果可为大跨钢屋盖、连接支座、旋转钢楼梯等类似工程设计提供借鉴。

关键词 大跨钢屋盖，微曲面单层网格结构，双向正交平面桁架，摩擦摆支座，旋转钢楼梯
中图分类号：TU391 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0025

Structural Design of Large Span Steel Roof and Spiral Steel Staircase of Haiyan Health and Wellness Center

YAN Feng* LIU Fuping ZHANG Jiancong
（East China Architectural Design & Research Institute Co.,Ltd., Shanghai 200011, China）

Abstract The Haiyan Health and Wellness Center project is located in the central urban area of Haiyan County and comprises multiple sports venues. The above-ground buildings have floor heights of 6–12 m, with a total building height of 24 m. The tennis court roof features a short span of 38.4 m and a long span of 89 m. The entrance canopy has a maximum span of 61 m and a maximum cantilever length of 31 m. The spiral steel staircase has a height of 6.0 m and a cantilever length of 8.0 m. The tennis court adopts a micro-curved single-layer grid structure composed of inclined box-section steel beams, while the entrance canopy employs a two-way orthogonal planar truss structure supported by friction pendulum bearings. The spiral steel staircase is an irregular spatial structure. This paper describes the structural system selection, scheme comparison, and design outcomes for the large-span steel roof of the tennis court, the large-span steel roof of the entrance canopy, the friction pendulum bearings, and the steel staircase. Stability analyses were conducted on both the entrance canopy steel roof and the spiral steel staircase to ensure the safety and rationality of the structural design. All structural designs satisfy code requirements and exhibit adequate strength, stiffness, and stability. The design and research findings may serve as a reference for the design of large-span steel roofs, connecting supports, rotating steel staircases, and similar projects.

Keywords large span steel roof, micro curved single-layer grid structure, two-way orthogonal planar truss structure, friction pendulum bearing, spiral steel staircase

收稿日期：2024-11-16

* **联系作者**：闫 锋，男，正高级工程师，博士，主要从事建筑结构设计和复杂结构等方面的研究。E-mail：feng_yan@ecadi.com

1　工程概况

海盐县康体活动中心项目位于海盐县中心城区，地下一层、地上三层，地上建筑层高 6~12 m，包括网球场、游泳馆、篮球馆等运动场馆，最大建筑高度为 24 m。地上部分通过抗震缝分为五个单体，除 A1 区的办公楼外，其余单体顶部均设置大跨度钢屋盖。A2 区和 B1 区屋顶通过入口顶棚钢屋盖相连。海盐康体活动中心建筑效果图如图 1 所示，各单体位置关系如图 2 所示。



图 1　海盐康体活动中心建筑效果图

Fig.1　Architectural rendering of Haiyan Health and Wellness Center

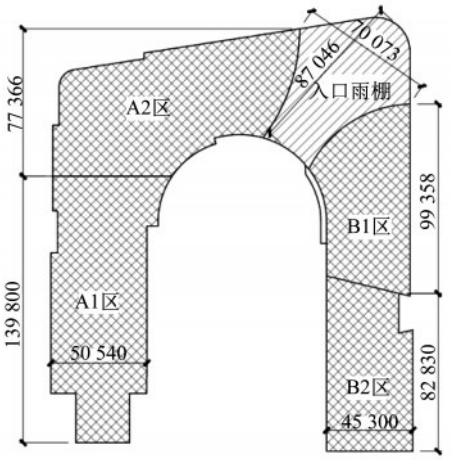


图 2　各单体位置关系（单位：mm）

Fig.2　Position relationship of each building unit (Unit: mm)

2　网球馆钢屋盖设计

B1 区为网球馆，建筑平面长 100 m，宽 40 m，首层层高为 6 m，二层层高为 4 m，三层为层高 6~13 m 的大空间。屋面短向跨度为 38.4 m，悬挑 5.4 m，长向跨度最大为 89 m，建筑要求结构构件高度小且结构构件直接裸露作为室内效果，基于建筑的设计理念选择斜交箱形钢梁组成的微曲面单层网格结构。

网格结构广泛应用在大跨空间结构中，可分为单层网格和双层网格，本项目采用的微曲面单层网格结构具有建筑表现力强、空间通透性好的特点。近年国内网格结构屋盖有部分应用案例，苏中江都机场航站楼钢屋盖采用波浪形的斜交网格结构，网格交点间距为 3.6 m，采用弯折板节点，外露结构获得了良好的受力性能及建筑效果[1]。深圳宝安国际机场 T3 航站楼大厅 A 区屋顶采用带加强桁架的斜交斜放曲面网架结构，菱形网格两个对角线长度约为 9 m 和 6 m，便于加工制作、安装，且用钢量低、经济指标好，节点形式满足受力和建筑造型要求[2]。针对铜陵站候车大厅钢屋盖进行了结构布置、屋盖杆件截面形式和网格尺寸等方面的力学分析和方案比选，并选定主受力拱+斜交菱形网格的单层网壳结构体系，网格尺寸为 3 m×3 m，兼顾了建筑效果和结构安全[3]。东营会展中心钢屋盖采用斜交网格超长屋盖结构，研究表明，斜交网格体系可显著减小结构的温度效应，相对于正交网格具有较好的温度作用适应性[4]。根据相关文献与工程实践经验，单层网格结构需重点关注几个方面：①综合考虑建筑效果、结构受力性能和材料用量，进行结构方案比选；②做好节点设计，节点构造和计算假定要相符，保证节点处的传力性能；③进行温度效应分析；④进行挠度计算和施工阶段起拱。

网球馆屋盖结构设计难点之一是选择合适的网格间距，为此进行了三种方案的比选，网格间距分别为 2.5 m×2.5m、3.3 m×3.3 m 和 5 m×5 m，各方案的对比情况见表 1。在杆件最大应力比接近的前提下，2.5 m×2.5 m 网格间距方案与 3.3 m×3.3 m 网格间距方案用钢量基本相同，5 m×5 m 网格间距方案用钢量最大；三种网格间距下挠度随着网格间距增大而减小。由于各方案的挠度变形由自重荷载引起，虽自重荷载下会变形挠曲，但结构变形均在规范要求范围内。综合考虑建筑效果、结构受力性能、钢材用量、施工便利性等因素，最终选择 3.3 m×3.3 m 的网格间距。

表 1　网格结构方案对比

Table 1　Comparison of different grid structure schemes

网格间距/m	构件截面/mm	用钢量/t	最大挠度/mm（1.0 恒载+1.0 活载）	杆件最大应力比
2.5×2.5	□900×200	894	198	0.63
3.3×3.3	□1 000×250	897	175	0.58
5.0×5.0	□1 300×400	1 348	100	0.63

网球馆屋盖网格间距为3.3 m×3.3 m。典型钢梁采用箱形截面□1 000×250×16×16(mm),悬挑区域收边梁采用箱形截面□300×200×12×12(mm),材质为Q355B。网球馆屋盖为微曲面,西侧屋面最低点标高为19.5 m,东侧屋面最高点标高为23.1 m。由于建筑造型需要,屋面局部存在"开口",结构采用折梁过渡,保持钢梁连续,分叉处小的悬挑梁形成建筑开口造型。钢屋盖通过成品固定铰支座支承于下部混凝土结构柱顶,支撑框架柱截面为(1 500~800)mm×800 mm、1 200 mm×800 mm、ϕ1 500 mm。网球馆钢屋盖三维示意图如图3所示。

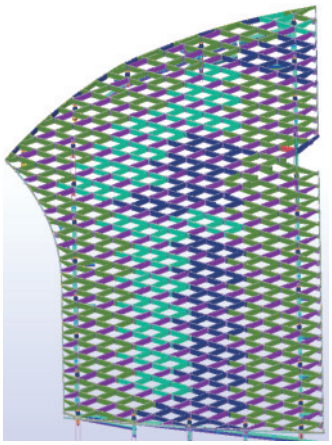


图3 网球馆屋盖三维示意图

Fig.3 Three-dimensional schematic of the tennis court roof

屋盖附加恒载(含檩条、保温层、铝板等屋面系统)为1.5 kN/m^2,活荷载为0.5 kN/m^2。屋盖风荷载基本风压取0.5 kN/m^2,体型系数分别为风吸-0.9(檐口-2.0)、风压0.5[5]。温度荷载考虑升温和降温均为25 ℃。本工程抗震设防烈度为6度,设计地震分组为第一组,场地类别为Ⅳ类,场地特征周期T_g=0.65 s。计算屋盖时,阻尼比取0.02。采用振型分解反应谱法进行水平和竖向地震作用验算,水平地震影响系数最大值α_{max}=0.05(根据地勘报告,考虑场地类型放大),竖向地震影响系数最大值α_{vmax}=0.032 5[6]。

为了减少模型分析计算量,在不影响屋面钢梁主要受力规律的情况下,采用SAP2000 V25软件对屋盖及其下混凝土柱组成的屋盖结构模型进行分析;采用YJK 5.3软件对屋盖和下部混凝土结构进行整体模型分析。屋盖结构模型如图4所示,整体模型如图5所示。

屋面构件是以承受弯矩为主的受弯构件,竖向荷载下构件的弯矩对构件应力比起控制作用。屋面钢梁与下部混凝土构件不形成框架,水平地震不会产生屋面钢梁的弯矩。屋面钢梁起到联系下部混凝土柱的类似隔板作用,水平地震下有少许轴力。竖向地震产生的弯矩较小,大约为风荷载下弯矩的30%。竖向荷载、风、小震和温度组合下的构件应力比如图6所示,构件应力比最大值为0.58,满足规范要求。屋面中震不屈服下的应力比最大为0.33,满足要求。竖向设防地震下弯矩与风压荷载作用下弯矩大致相等;中震不屈服荷载组合中风荷载不参与组合,组合中分项系数为1.0且承载力按材料强度标准值计算,所以中震不屈服荷载组合与重力荷载、风、小震和温度作用组合相比构件应力比较小,中震不屈服荷载组合不是控制荷载组合[7]。

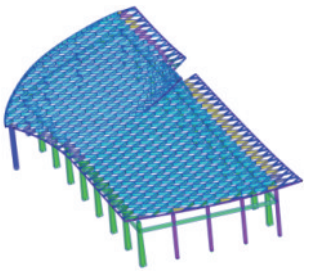


图4 网球馆屋盖结构模型

Fig.4 Numerical model of the tennis court roof

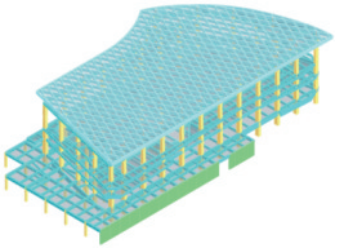


图5 网球馆屋盖和下部混凝土结构整体模型

Fig.5 Integrated numerical model of the roof and lower concrete structure of the tennis court

网球馆屋盖在自重恒载下最大挠度为95 mm,附加恒载下最大挠度为60 mm,活载下最大挠度为20 mm。荷载标准组合1.0恒载+1.0活载工况下的屋盖最大挠度为175 mm,如图7所示,约为跨度的1/219。通过对自重恒载下的挠度进行起拱,挠度最大处起拱95 mm,控制挠度小于1/400[8]。起拱后的屋盖挠度为跨度的1/480,满足规范要求,屋盖结构具有合理的竖向刚度。

本文对比屋盖结构模型和整体模型的计算结果,以验证简化分析的精确性。竖向荷载作用下,

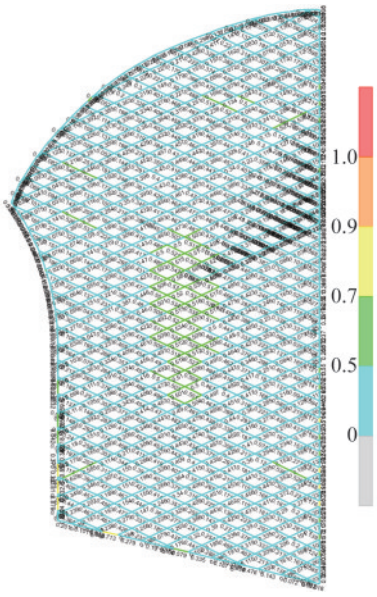


图6　网球馆屋盖应力比

Fig.6　Stress ratio of tennis court roof

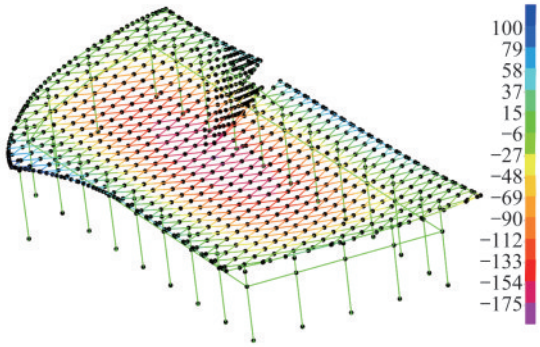


图7　网球馆屋盖挠度(1.0恒载+1.0活载)

Fig.7　Deflection of tennis court roof (1.0 dead+1.0 live)

二者构件内力没有明显变化,风荷载和地震作用下整体模型内力有所减小。整体计算模型中跨中最大应力比为0.54,屋盖计算模型中跨中最大应力比为0.57,两个模型应力比结果较为接近。整体模型在荷载标准组合1.0恒载+1.0活载工况下的屋盖挠度最大为167 mm,与屋盖计算模型结果175 mm较为接近。对比分析结果表明,屋盖设计时使用屋盖和下部混凝土柱的屋盖结构模型,可以有效减少模型分析计算量,且对屋盖的结构计算结果影响不大。

3　入口顶棚大跨结构设计

入口顶棚为大跨度大悬挑钢屋盖,位于A2区和B1区之间,最大跨度达61 m,与两个场馆连线的垂直方向最大悬挑达31 m。

桁架体系是解决大跨度问题的常见方案之一。赤壁体育场顶棚(283.2 m×43.2 m)采用倒三角管桁架空间体系,通过V形钢管柱支撑在混凝土柱及外围拉杆上,形成径向主桁架、刚性系杆、交叉支撑及环向次桁架的协同受力网络,在控制用钢量的同时,杆件应力比和悬挑端的变形限值满足规范要求[9]。长葛体育馆(117.9 m跨度)则通过选用正交平面桁架实现方案优化,结构本身受力均衡合理、整体空间刚度大、抗震性能好[10]。孔子国际文化交流中心屋盖采用圆钢管交叉桁架体系,主桁架最大跨度为30 m,支座采用固定铰支座,由于跨度不是很大,温度及地震作用下应力均较小[11]。

入口顶棚结构设计难点之一是跨度较大、悬挑较大,难点之二是如何满足建筑造型需要,难点之三是如何处理与两侧支承结构的连接关系。桁架结构可以实现大跨度、大悬挑,变截面桁架可以满足建筑变厚度需要,摩擦摆支座可以实现顶棚和支承结构之间的弱连接。为此,入口顶棚采用双向正交变截面平面桁架结构,并在顶棚和两侧支承结构之间采用摩擦摆支座连接。顶棚在两个场馆连线方向桁架高度随建筑造型变化,最大高度为4.83 m;弦杆和腹杆均采用圆钢管,弦杆最大直径为650 mm,壁厚32mm;腹杆最大直径为299 mm,壁厚12 mm。钢材材质为Q390GJC和Q355B。入口顶棚两侧各设置5个支点,支撑在两侧场馆的悬挑梁上,10个支座均采用摩擦摆支座。入口顶棚效果图如图8所示。



图8　入口顶棚建筑效果图

Fig.8　Architectural rendering of entrance canopy

入口顶棚附加恒载(含檩条、龙骨和幕墙等屋面系统)为1.3 kN/m^2,活荷载为0.5 kN/m^2。屋盖风荷载基本风压取0.5 kN/m^2,体型系数分别为风吸−2.0、风压0.5。温度荷载考虑升温和降温均为25 ℃。入口顶棚抗震设计参数同网球馆钢屋盖。

入口顶棚通过摩擦摆支座支承在下部混凝土结构的悬挑梁上,与侧边两个场馆为柔性连接,设计时可选择入口顶棚结构单独进行分析。本文采

用SAP 2000 V25软件对入口顶棚进行分析，10个支点的边界条件为Z向约束，X、Y向边界条件通过点弹簧进行模拟，弹簧刚度为摩擦摆的等效水平刚度，摩擦摆的等效水平刚度参考《建筑摩擦摆隔震支座》(GB/T 37358—2019)附录A计算得到[12]。入口顶棚结构计算模型如图9所示。

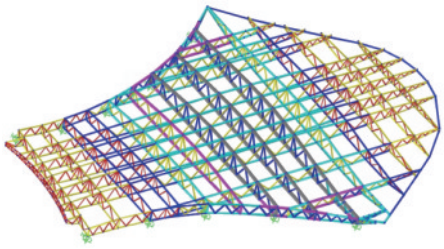


图9 入口顶棚结构计算模型图

Fig.9 Numerical model of entrance canopy structure

入口顶棚结构构件以承受轴力为主，竖向荷载组合下的构件内力对应力比起控制作用。竖向荷载、风、小震和温度作用荷载组合下的构件应力比如图10所示，构件应力比最大值为0.81，满足规范要求。屋面中震不屈服荷载组合下最大应力比为0.57，满足规范要求。类似网球馆钢屋盖，中震不屈服荷载组合不是控制荷载组合。

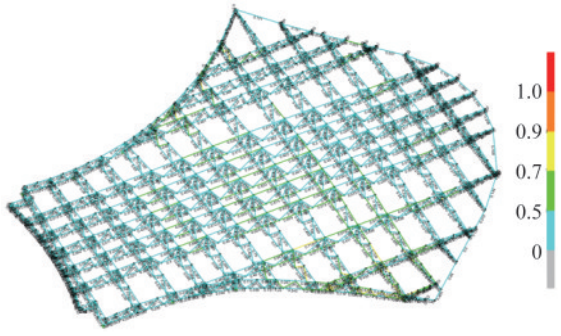


图10 入口顶棚构件应力比

Fig.10 Stress ratio of entrance canopy members

入口顶棚在1.0恒载+1.0活载工况下的变形如图11所示。P1点为横向最大跨度桁架的中点，该桁架两端支撑在场馆混凝土梁上，P2点为悬挑最大桁架的端点。在自重恒载和附加恒载下，P1点的挠度为106 mm，P2点的挠度为321 mm，P2相对于P1的挠度为215 mm；活载下P1点的挠度为21 mm，P2点的挠度为69 mm，P2相对于P1的挠度为48 mm。在1.0恒载+1.0活载工况下，横向跨度最大61 m的桁架挠度为1/480，悬挑桁架的相对挠度(按悬挑长度的两倍计算)为1/235。通过对自重恒载下的挠度进行起拱，P1点起拱56 mm，P2点起拱162 mm，起拱后横向跨度最大桁架挠度为1/870，悬挑桁架的相对挠度为1/613，起拱后挠度小于1/400，结构具有合理的竖向刚度。实际施工按照节点提供起拱值，本文只给出P1、P2点起拱值。

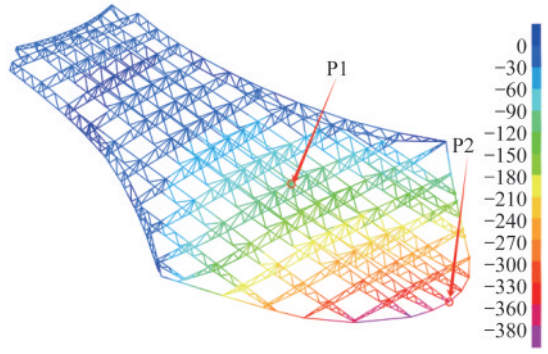


图11 入口顶棚挠度(1.0恒载+1.0活载)

Fig.11 Deflection of entrance canopy (1.0 dead+1.0 live)

4 入口顶棚支座设计和整体稳定分析

入口顶棚两侧各设置5个支点，10个支点均采用摩擦摆支座，A2区侧五个支座由北向南分别编号为B1—B5，B1区侧五个支座由北向南分别编号为A1—A5。摩擦摆支座为柔性连接的隔震支座，在地震作用和温度作用下，通过支座产生一定的位移来消耗地震能量、释放温度应力。摩擦摆支座滑动面为弧形，滑动产生位移后会产生与位移方向相反的恢复力，控制变形量同时帮助支座回到初始位置[13]。两场馆之间的顶棚采用摩擦摆支座柔性连接，避免两场馆通过顶棚强连接产生相互作用，同时减小顶棚结构受到的地震作用和温度作用，这是一种技术先进的支座连接形式。

对比两侧摩擦摆支座、一侧铰接支座一侧滑动支座、两侧铰接支座三种连接方式下，入口顶棚在地震作用、温度作用、水平风荷载下的支座水平力大小见表2。可以看出，两侧摩擦摆连接方案的支座水平力最小，这样就会对入口顶棚桁架产生最小的作用力，从而在顶棚桁架杆件产生最小的内力；也会对顶棚两侧的支承结构产生最小的作用力，减小两侧结构的相互作用。因此入口顶棚和两侧支承结构采用摩擦摆支座连接是最优方案。设计主体结构时，考虑支座反力的作用。

入口顶棚放置在A2区和B1区场馆的悬挑梁上，A2区在X向、Y向大震弹塑性计算中的最大位

表 2　入口顶棚三种连接形式的支座水平力

Table 2　Horizontal forces of supports for three connection forms of entrance canopy

支座形式	地震作用		温度作用/kN	水平风荷载	
	X方向/kN	Y方向/kN		X方向/kN	Y方向/kN
两侧摩擦摆支座	71	75	19	59	54
一侧铰接一侧滑动	243	395	935	124	104
两侧铰接	320	480	1322	59	54

移分别为 117 mm、119 mm，B1 区在 X 向、Y 向大震弹塑性计算中的最大位移分别为 79 mm、76 mm。考虑大震下两场馆可能出现相向位移，摩擦摆支座行程确定为±200 mm。摩擦摆支座动摩擦系数为 0.01~0.03，等效曲率半径为 4 m，摆动周期设计值为 4 s。摩擦摆支座的实装照片如图 12 所示。



图 12　入口顶棚摩擦摆支座

Fig.12　Friction pendulum bearing of entrance canopy

入口顶棚悬挑距离较大，在风吸荷载作用下，部分支座会出现拉力。靠近悬挑端的支座压力设计值较大，距离悬挑端最远的支座压力设计值较小。高空中的大顶棚受到风荷载作用，可能会产生向下的风压和向上的风吸，风吸荷载工况下支座会产生拉力。摩擦摆支座内力设计值见表 3。

表 3　　摩擦摆支座内力

Table 3　Internal forces of friction pendulum supports

支座编号	压力设计值/kN	拉力设计值/kN
A1, B1	5 000	1200
A2, B2	4 500	500
A3, B3	500	0
A4, B4	500	100
A5, B5	500	100

在可能产生拉力的位置使用抗拉摩擦摆[14]。为确保入口顶棚在极限情况下的抗拉能力，顶棚设置 8 根钢链，钢链连接顶棚与下方场馆框架。钢链锁环之间预留一定活动空间，使摩擦摆支座可以进行滑动。钢链的实际照片如图 13 所示。



图 13　入口顶棚钢链

Fig.13　Steel chain of entrance canopy

入口顶棚通过两侧共 10 个摩擦摆支座支撑在两侧结构悬挑梁上，在静力荷载作用下屋盖表现为整体受弯，可能因桁架弦杆的侧向失稳而产生稳定问题，因此需对入口顶棚屋盖进行整体稳定性分析。

本文采用 ABAQUS 进行入口顶棚稳定性分析，考虑荷载组合为 1.0 恒载+1.0 活载。钢材本构采用二折线随动硬化模型，并控制最大塑性应变为 0.025，钢材的弹性模量为 E_s，强化段的弹性模量为 $0.01E_s$[15]。

入口顶棚在 1.0 恒载+1.0 活载荷载组合工况下的前三阶屈曲模态均为桁架下弦杆的局部失稳，最低阶的整体失稳模态为第 84 阶，屈曲因子为 63.28。因此，以第 84 阶的模态形状作为初始缺陷加在结构上，进行非线性稳定分析。

弹塑性整体稳定性分析得到的“支座反力荷载系数-悬挑端位移”曲线如图 14 所示。可以看到，考虑材料弹塑性本构关系及初始几何缺陷得到的非线性稳定极限荷载系数为 4.15，满足规范中大于 2.0 的要求[8]。

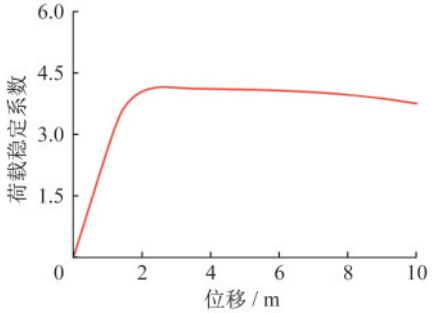


图 14　支座反力荷载系数-悬挑端位移曲线

Fig.14　Bearing reaction load coefficient-cantilever end displacement curve

当屋盖达到稳定承载力极限值时，屋盖悬挑端最大变形为2.71 m。屋盖失稳时悬挑部分第一排支座中间桁架下弦杆受压失稳并进入塑性，最大塑性应变为2.05×10^{-2}。屋盖失稳由强度破坏控制，在达到临界荷载之前屋盖部分桁架下弦杆已经进入塑性状态。

5 旋转钢楼梯设计

旋转钢楼梯具有形态美观、自重轻和杆件截面较小等特点，相比于混凝土楼梯，其施工便捷、造型轻盈，因而在建筑中经常被使用。重庆悦来温德姆酒店一层大堂设有旋转钢楼梯，楼梯主体结构采用轮廓截面为2 200 mm×311 mm的多腔箱形钢梁，采用壳单元进行三维建模分析和舒适度验算，结果均能满足设计预期目标[16]。文献[17]针对旋转钢楼梯设计中因形状不规则、跨度大所产生的复杂计算问题进行了研究，提出整体箱梁板式、边梁式、带底部封板边梁式和箱体踏步式四种不同的结构设计方案，得出各个结构方案的优缺点。根据相关文献与工程实践经验，旋转钢楼梯结构设计需重点关注几个方面：①三维建模应准确反映结构力学性能；②正确设置边界条件；③进行舒适度计算。

本项目旋转钢楼梯位于网球馆，连接首层与二层楼面。初步选定两种旋转钢楼梯截面形式，多腔异型箱形梁截面和箱形梁带侧肋截面，截面示意如图15所示。两种方案的对比情况见表4，箱形梁带侧肋方案舒适度不满足规范要求，多腔异型箱形梁截面方案虽然用钢量较大，但在挠度和应力比方面均明显优于箱形梁带侧肋方案，舒适度满足规范要求。综合考虑结构受力性能、材料用量、使用舒适度等因素，最终选择方案为多腔异型箱形梁截面。

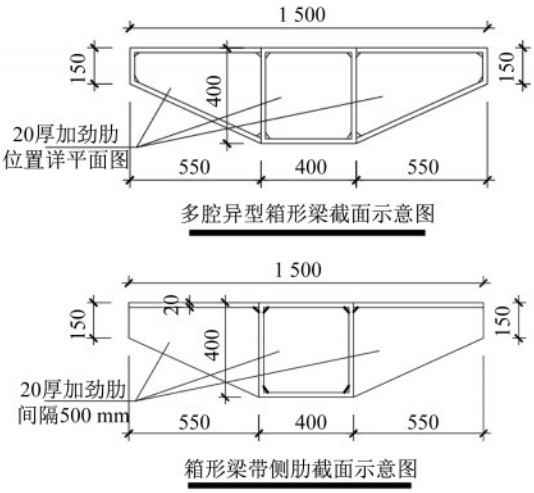


图15 旋转钢楼梯截面示意图（单位：mm）

Fig.15 Typical section of the steel spiral staircase (Unit: mm)

旋转钢楼梯上下端与混凝土边梁上的预埋板焊接。空间钢梁高度为400 mm，轮廓宽度为1 500 mm，悬挑长度约8 m。异型箱形钢梁板材厚度为20 mm，截面为多腔异型箱形梁，间隔一定长度布置横向加劲肋，材质为Q355B，结构平面如图16所示。

表4 旋转钢楼梯结构方案对比

Table 4 Comparison of different sections of the steel spiral staircase

截面形式	用钢量/t	最大挠度/mm(1.0恒载+1.0活载)	杆件最大应力比	单人行走竖向振动加速度/(m·s^{-2})
多腔异型箱形梁	12.8	5.2	0.26	0.019
箱形梁带侧肋	9.5	8.7	0.67	0.450

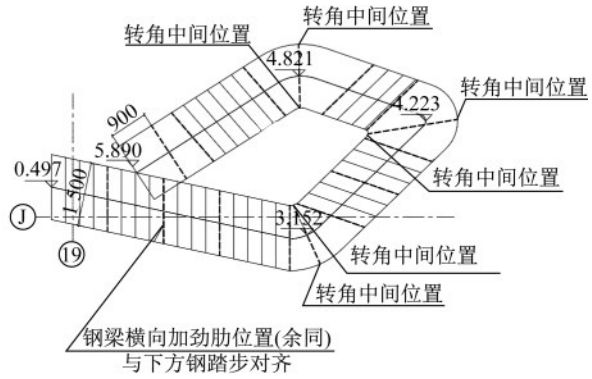


图16 旋转楼梯平面图（单位：mm）

Fig.16 Plan view of the spiral staircase (Unit: mm)

旋转楼梯附加恒载为4.0 kN/m^2，活荷载为3.5 kN/m^2。温度荷载考虑升温和降温均为25 ℃。抗震设计参数同网球馆钢屋盖。

本文采用SAP2000 V25软件对旋转楼梯进行分析，分别建立壳单元分析模型和梁单元分析模型。壳单元模型对上下端部截面上的节点施加铰接约束，梁单元模型两端为刚接。

螺旋钢楼梯模态分析结果见表5。结构的前三阶振型以X、Y、Z向平动为主，也有一定的绕Z轴转动。壳单元模型和梁单元模型的模态分析结果较为一致。

表 5　旋转楼梯振动模态分析结果

Table 5　Modal analysis results of spiral staircase

分析模型	振型	周期/s	振型质量参与方向系数/%			
			X 向平动	*Y* 向平动	*Z* 向平动	绕 *Z* 轴转动
壳单元模型	1	0.124 4	0	33	35	32
	2	0.084 2	6	39	46	9
	3	0.077 0	51	17	31	1
梁单元模型	1	0.123 7	2	11	69	17
	2	0.092 7	15	56	6	24
	3	0.075 8	6	44	38	12

旋转钢楼梯为复杂受力构件，竖向荷载下构件的受力对构件应力比起控制作用。壳单元模型在竖向荷载、小震和温度组合下的 Mises 应力比如图 17 所示，构件应力比最大区域在端部约束部位，最大值为 0.26，满足规范要求。梁单元模型在竖向荷载、小震和温度组合下的构件应力比如图 18 所示，构件应力比最大值 0.21，满足规范要求。考虑到旋转楼梯为异形空间结构，施工要求高，容易出现振动舒适度问题，所以设计应力比相对较低。竖向振动加速度是设计控制因素。

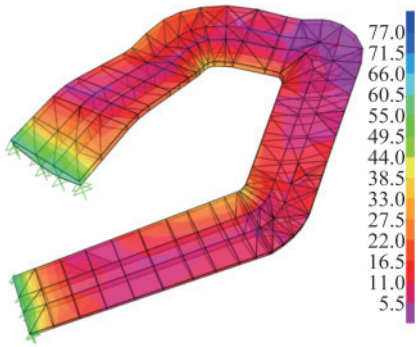


图 17　壳单元分析模型 Mises 应力结果

Fig.17　Stress of numerical model of shell unit

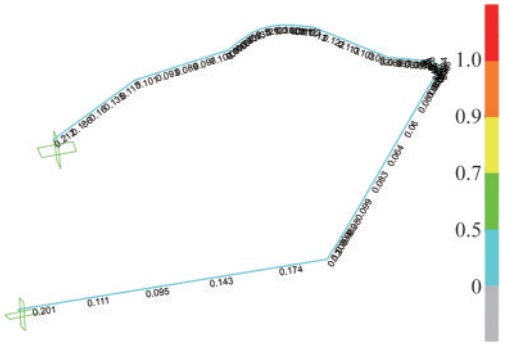
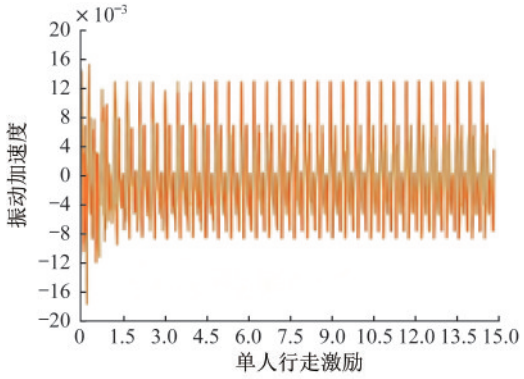


图 18　梁单元分析模型应力结果

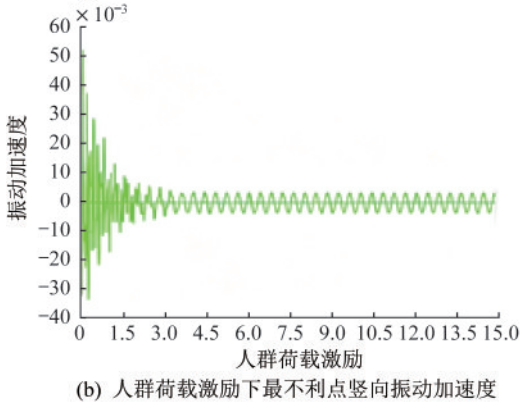
Fig.18　Stress ratio of numerical model of beam unit

壳单元模型楼梯在恒载下挠度为 3.64 mm，活载下挠度为 1.54 mm。梁单元模型楼梯在恒载下挠度为 3.36 mm，活载下挠度为 1.54 mm。楼梯在恒载、活载下的挠度分别为 1/2 700 和 1/6 500，挠度小于 1/400，结构刚度较大。

根据《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)[18]对旋转钢楼梯进行舒适度分析，楼梯第一阶频率为 8.0 Hz。施加单人行走激励，最不利点的竖向振动加速度峰值为 0.019 m/s^2；施加人群竖向荷载激励，最不利点的竖向振动加速度峰值为 0.052 m/s^2，均小于 0.15 m/s^2，满足规范要求。加速度响应时程如图 19 所示。



(a) 单人行走激励下最不利点竖向振动加速度



(b) 人群荷载激励下最不利点竖向振动加速度

图 19　旋转楼梯最不利点竖向振动加速度

Fig.19　The maximum vertical vibration acceleration at the critical point of spiral staircase

6　结　论

通过网球馆钢屋盖、入口顶棚钢屋盖、顶棚支座、旋转钢楼梯的方案比选和计算分析，可以得到以下结论：

(1) 网球馆钢屋盖采用箱形斜交梁形成的短向跨度为 38.4 m、长向跨度为 89 m 的双向传力微

曲面空间网格结构，屋面结构和其下支承混凝土柱之间采用成品铰支座连接。综合考虑建筑效果、结构受力、钢材用量等因素后采用3.3 m的网格间距。钢屋盖通过起拱可以满足挠度要求。

（2）入口顶棚结构最大跨度为61 m，最大悬挑31 m，采用双向正交变截面平面桁架结构，满足建筑造型和结构受力需要，桁架杆件主要承受轴力。入口顶棚通过起拱可以满足挠度要求。

（3）入口顶棚和其下支承结构之间采用摩擦摆支座连接，相比于采用铰接支座连接方案和一侧铰接另一侧滑动支座连接方案，其具有减小支座水平力、减小顶棚桁架杆件内力、减小其下两个结构单体相互作用的优点。入口顶棚的非线性稳定极限荷载系数为4.15，满足规范中大于2.0的要求。

（4）旋转钢楼梯悬挑长度约8 m，采用多腔异型箱形钢梁结构，端部和混凝土梁上预埋件焊接连接。旋转钢楼梯竖向振动频率为8.0 Hz，大于3.0 Hz，满足规范要求；人群荷载激励下竖向振动加速度最大值为0.052 m/s^2，小于0.15 m/s^2，满足规范要求，因此具有良好的使用舒适度。

参 考 文 献

[1] 蒋本卫，周健，张耀康.苏中江都机场航站楼钢屋盖结构设计[J].建筑结构，2012，42(5)：125-129.
Jiang Benwei, Zhou Jian, Zhang Yaokang. Structural design on steel roof of Suzhongjiangdu Airport Terminal [J]. Building Structure, 2012, 42 (5) : 125-129.(in Chinese)

[2] 束伟农，朱忠义，王国清，等.深圳宝安国际机场T3航站楼结构设计[J].建筑结构，2013，43(17)：9-15.
Shu Weinong, Zhu Zhongyi, Wang Guoqing, et al. Structural design on the building of Shenzhen Bao'an International Airport Terminal 3 [J]. Building Structure, 2013, 43(17): 9-15.(in Chinese)

[3] 陈志强，陈家丰，安伟，等.大悬挑单层斜交网格柱壳钢屋盖结构方案与复杂节点研究[J].建筑科学，2024，40(5)：141-150.
Chen Zhiqiang, Chen Jiafeng, An Wei, et al. Research on the structural scheme and complex joint of cylindrical steel roof shell with large cantilever and single layer oblique grid [J]. Building Science, 2024, 40(5): 141-150.(in Chinese)

[4] 郑毅敏，朱伟平，阮永辉，等.超长斜交网格钢屋盖温度效应分析[J].结构工程师，2010，26(5)：32-36.
Zheng Yimin, Zhu Weiping, Ruan Yonghui, et al. Analysis of temperature effect on a super-long diagonal-crossing grid steel structural roof [J]. Structural Engineers, 2010, 26 (5) : 32-36. (in Chinese)

[5] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S].(in Chinese)

[6] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S].(in Chinese)

[7] JGJ 99—2015 高层民用建筑钢结构技术规程[S].
JGJ 99—2015 Technical specification for steel structure of tall building[S].(in Chinese)

[8] JGJ 7—2010 空间网格结构技术规程[S].
JGJ 7—2010 Technical specihcation for space frame structures[S].(in Chinese)

[9] 黎玲，潘朝阳.赤壁市体育馆钢结构顶棚的倒三角空间桁架设计分析[J].建筑结构，2021，51(S1)：543-545.
Li Ling, Pan Chaoyang. Design and analysis of inverted triangle space truss of the steel structure roof of Chibi City Sports Center [J]. Building Structure, 2021, 51 (S1): 543-545.(in Chinese)

[10] 汤剑，丁世涛，孙忠国.大跨度正交平面桁架钢屋盖设计优化与分析[J].建筑施工，2015，37(11)：1319-1321.
Tang Jian, Ding Shitao, Sun Zhongguo. Design optimization and analysis of long-span orthogonal plane truss steel roof[J]. Building Construction, 2015, 37(11): 1319-1321.(in Chinese)

[11] 白泓，王莹，毛彦喆，等.孔子国际文化交流中心主馆结构设计[J].建筑结构，2014，44(18)：32-38.
Bai Hong, Wang Ying, Mao Yanzhe, et al. Structure design of the main hall in Confucius International Cultural Exchange Center [J]. Building Structure, 2014, 44(18): 32-38.(in Chinese)

[12] GB/T 37358—2019 建筑摩擦摆隔震支座[S].
GB/T 37358—2019 Friction pendulum isolation bearings for buildings[S].(in Chinese)

[13] 李晓玮，施卫星，虞终军.隔震支座在房屋顶部加层改造中的应用[J].结构工程师，2022，38(3)：164-171.

Li Xiaowei, Shi Weixing, Yu Zhongjun. Application of isolation bearings in storey-adding on the roof [J]. Structural Engineers, 2022, 38 (3): 164-171. (in Chinese)

[14] 王伟强,曹志峰,卜继玲,等.抗拔型摩擦摆支座力学性能试验研究[J].铁道建筑,2016(11):38-41.
Wang Weiqiang, Cao Zhifeng, Bu Jiling, et al. Experimental study on mechanical performance of uplift-resistance-type friction pendulum bearing [J]. Railway Engineering, 2016(11):38-41.(in Chinese)

[15] 陈惠发.弹性与塑性力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
Chen Huifa.Elasticity and plasticity[M].Beijing:China Architecture & Building Press,2004.(in Chinese)

[16] 位立强,卫东,单瑞增,等.重庆悦来温德姆酒店结构设计[J].建筑结构,2014,44(20):16-20,53.
Wei Liqiang, Wei Dong, Shan Ruizeng, et al.Structural design of Chongqin Yuelai Wyndham [J]. Building Structure, 2014, 44(20):16-20,53.(in Chinese)

[17] 刘文轩.复杂异形箱体踏步式钢旋转楼梯受力性能分析[D].济南:山东建筑大学,2023.
Liu Wenxuan. Structural performance analysis of a complex-shaped box-sectioned steel spiral staircase [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023. (in Chinese)

[18] JGJ/T 441—2019 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[S].
JGJ/T 441—2019 Technical standard for human comfort of the floor vibration[S].(in Chinese)