

某体育综合训练馆大跨钢结构楼盖振动舒适度分析

张郁林

中国建筑第五工程局有限公司 长沙 410000

0 引言

随着我国社会经济技术的飞速发展，楼盖结构体系向着轻质，高强、环保的方向发展，大跨度、大空间的民用建筑在生活中已随处可见。同时，经济发展也提高了人民的生活水平，更多人开始注重生活质量，跳舞、体育锻炼、大型聚会等活动已渐渐成为人们日常生活的一部分。在人们多种类多范围的日常活动下，楼盖振动舒适度问题渐渐突显出来。楼盖的振动大多数情况下并不会造成结构的安全问题，而是给建筑物内的使用者带来烦恼及不适感。大跨度楼盖结构与常规楼盖结构相比往往存在阻尼较低、刚度较小等特点，此类结构在人的正常使用荷载作用下更容易产生明显的竖向振动，故对于此类楼盖结构而言，除了裂缝和挠度变形要求以外，楼盖的舒适度分析也已成为正常使用极限状态设计中的重要一环，在《混凝土结构通用规范》(GB 55008-2021)等通用规范中更是明确对楼盖舒适度提出了要求。本文采用 YJK 对某体育综合训练馆大跨钢结构楼盖进行了振动舒适度分析，并采用 SAP2000 对结果进行了对比验证。

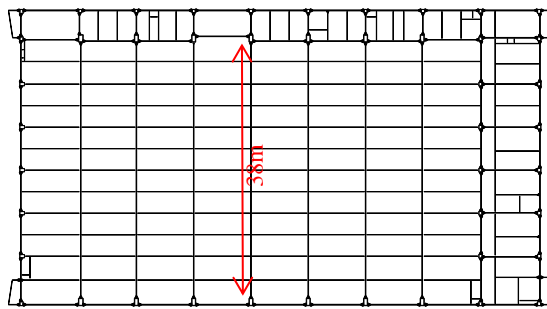
1 某体育综合训练馆舒适度分析

1.1 工程概况

某体育综合训练馆地上三层，建筑总高度约 23.4m，可进行篮球、排球、羽毛球、乒乓球、跆拳道等日常体育训练，见图 1.1-1。训练馆为钢框架结构，为确保大空间的使用要求，训练区域不设置结构柱，楼盖结构方案采用大跨桁架及钢筋桁架楼承板，考虑训练馆使用净高要求，结构桁架总高度约 2300mm，楼板厚度为 120mm，跨度约为 38m，见图 1.1-2。



图 1.1-1 某体育综合训练馆效果图



1.1-2 大跨楼盖结构布置示意图

该工程因为楼盖跨度较大，楼盖结构整体刚度及阻尼相对较小，作为综合训练馆，日常使用时常会出现多人有节奏运动、走动等情况，故在设计中控制构件强度及变形的前提下，楼盖振动舒适度控制也是本工程的重点难点问题。

1.2 有限元模型建立

由于仅分析大跨区域楼盖的竖向振动，故仅取单层模型进行分析，见图 1.2。同时对结构边

界条件、实际受力情况进行适当简化，对非必要的、自振频率较小的次要结构进行删除，以减小计算量，提高计算效率。YJK 模型中桁架上下弦杆采用梁构件模拟，腹杆采用斜杆构件模拟，YJK 舒适度模块中混凝土楼板默认考虑楼板平面内和平面外真实刚度，并且不考虑刚性楼板假定。手动设置将楼板偏移至梁顶以确保模型整体刚度与实际情况一致。舒适度计算时，由于楼盖振动相对较小，混凝土的弹性模量可采用动弹性模量，模型中按静弹性模量放大 1.35 倍考虑，楼盖阻尼比取为 0.06。

舒适度分析荷载有别于承载力设计，因为荷载激励下楼盖振动加速度响应大小与楼盖质量有关，当荷载取值大于实际情况时，计算得到的振动加速度值偏小，对于舒适度验算偏不安全，故需对模型荷载进行修改。根据《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441-2019) 表 3.2.4，对于进行有节奏运动的室内运动场地，取人群荷载 0.12kN/m^2 ，取有效均布活荷载 0 kN/m^2 。楼盖自重由程序自动计算，楼面附加恒荷载按建筑实际楼面做法取值。

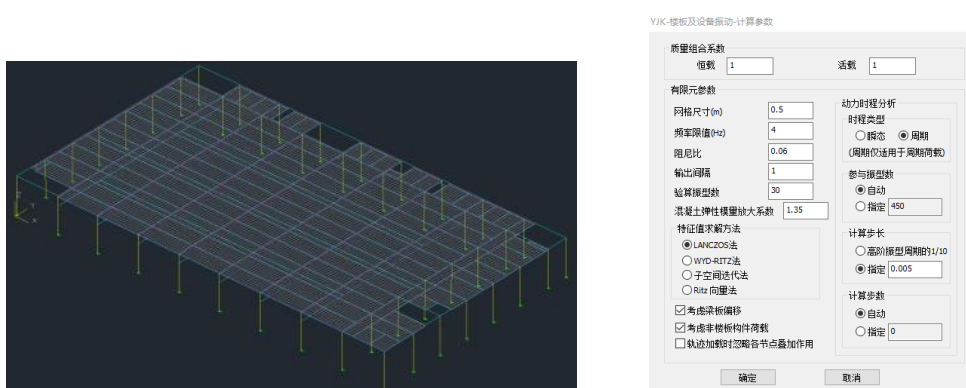
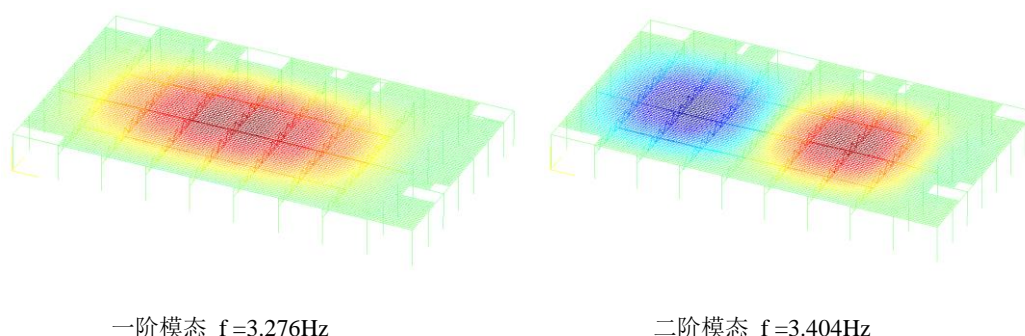
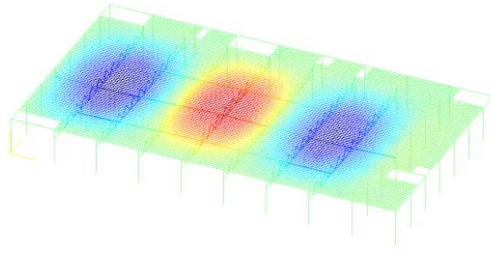


图 1.2 YJK 舒适度分析模型

1.3 模态分析

模态分析主要用来求解结构固有的动力特性，如振型及对应的竖向自振频率等。求解得到本工程二层楼盖的前三阶竖向模态及竖向自振频率如图 1.3 所示。分析结果显示本楼盖结构的一阶竖向自振频率约为 3.28 Hz，小于规范室内运动场地以有节奏运动为主结构 4Hz 的要求，可初步说明楼盖结构竖向刚度偏小，在较激烈的有节奏运动荷载激励下，可能出现舒适度问题，需关注有效最大加速度是否满足规范限值要求。





三阶模态 $f=3.656\text{Hz}$

图 1.3 YJK 模态分析结果

1.4 有节奏运动激励时程分析

本工程大跨空间可进行多种类多区域的体育活动，运动区域如何划分，激励荷载如何按区域施加，《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441-2019)未给出明确的原则。考虑场地间不同区域运动时，大跨楼盖上所有人完全同频率进行活动的概率很低，且如相邻场地不同频率运动将会对楼板振动产生相互抑制作用，对人舒适度感受是有利的，笔者认为，根据建筑场地布局划分运动区域施加单位面荷载，分多区域多工况计算加速度响应，并求取最不利工况下的有效最大加速度更为合理，也更符合工程经济性要求，本分析区域划分详见图 1.4。

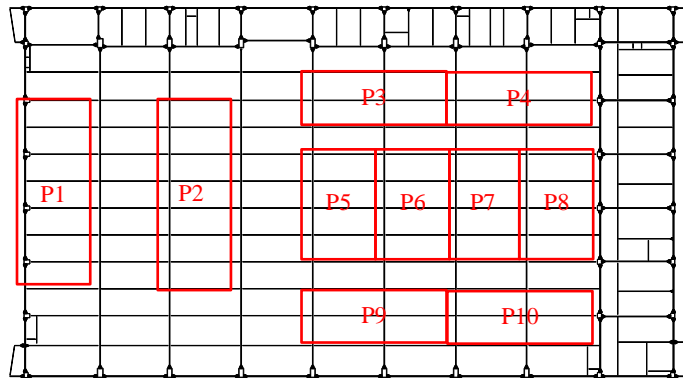


图 1.4 运动区域划分平面示意

根据《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441-2019)要求，选用有节奏运动荷载函数如下，根据标准要求可按三阶计算。通过对大量实验数据分析，有节奏运动函数第一阶荷载频率 \bar{f}_1 范围为 2.0HZ~2.75HZ，当楼盖的一阶竖向自振频率是荷载频率的整数倍时，楼盖易发生共振，此时振动加速度响应最大。由于本楼盖结构一阶自振频率约为 3.28HZ，故可分别取 \bar{f}_1 为 2.0HZ 与 2.75HZ 进行舒适度分析。人群荷载 Q_p 取值 0.12kN/m^2 ， γ_i 为各阶荷载频率对应的动力因子，第一阶取 1.5，第二阶取 0.6，第三阶取 0.1。

$$P_i(t) = \gamma_i Q_p \cos(2\pi i \bar{f}_1 t) \quad (1)$$

$$a_{pm} = \left(\sum a_{pi}^{1.5} \right)^{\frac{1}{1.5}} \quad (2)$$

根据时程分析结果，统计了各运动区域激励作用下响应最大节点的加速度 a_{pi} ，并根据公式组合求得有效最大加速度 a_{pm} ，见表 1.4-1 至 1.4-2。

YJK 模型荷载频率 2.0HZ 下楼盖结构有效最大加速度统计表

表 1.4-1

运动区域	最大响应节点号	第一阶峰值加速度 a_{p1} (m/s ²)	第二阶峰值加速度 a_{p2} (m/s ²)	第三阶峰值加速度 a_{p3} (m/s ²)	有效最大加速度 a_{pm} (m/s ²)
P1	1003357	0.062	0.235	0.031	0.262
P2	1005511	0.104	0.214	0.021	0.264
P3	1007552	0.017	0.065	0.012	0.074
P4	1009713	0.015	0.079	0.014	0.087
P5	1007546	0.079	0.168	0.013	0.205
P6	1008624	0.076	0.134	0.011	0.172
P7	1009712	0.077	0.218	0.010	0.249
P8	1010768	0.049	0.130	0.020	0.152
P9	1007632	0.018	0.069	0.013	0.078
P10	1009793	0.016	0.083	0.015	0.091

YJK 模型荷载频率 2.75HZ 下楼盖结构有效最大加速度统计表 表 1.4-2

运动区域	最大响应节点号	第一阶峰值加速度 a_{p1} (m/s ²)	第二阶峰值加速度 a_{p2} (m/s ²)	第三阶峰值加速度 a_{p3} (m/s ²)	有效最大加速度 a_{pm} (m/s ²)
P1	1003428	0.173	0.239	0.045	0.340
P2	1005491	0.341	0.198	0.040	0.443
P3	1008954	0.075	0.107	0.056	0.168
P4	1010021	0.068	0.105	0.053	0.160
P5	1007541	0.245	0.150	0.055	0.333
P6	1008644	0.242	0.103	0.057	0.302
P7	1009702	0.234	0.047	0.063	0.269
P8	1010773	0.114	0.139	0.040	0.213
P9	1008396	0.078	0.108	0.054	0.170
P10	1009372	0.066	0.107	0.058	0.164

由上表可知，当荷载以 2.0HZ 频率激励时，楼盖结构响应有效最大加速度为 0.264 m/s² (P2 区域)；当荷载以 2.75HZ 频率激励时楼盖结构激励响应有效最大加速度为 0.443 m/s² (P2 区域)。各最不利荷载频率下有效最大加速度均小于标准限值 0.50 m/s²，可认为本工程楼盖结构在有节奏运动荷载激励下舒适度满足要求。

1.5 结果对比验证

为确保分析结果真实可靠，采用 SAP2000 软件对上述结果进行对比验证。SAP2000 模型中采用杆单元模拟桁架弦杆及腹杆，采用厚壳单元模拟楼板，其余参数均与 YJK 模型保持一致，见图 1.5-1。

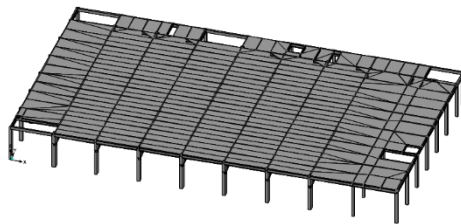


图 1.5-1 SAP2000 舒适度分析模型

图 1.5-2 列出了 SAP2000 模态分析结果。通过分析结果可知：两个软件前三阶竖向振型及自振频率基本一致，二者频率误差仅 1.98%，满足工程精度要求。

表 1.5-1 及 1.5-2 列出了 SAP2000 有节奏运动荷载激励下时程分析结果，当荷载以 2.0HZ 频率激励时，SAP2000 模型楼盖结构响应有效最大加速度为 0.241 m/s² (P2 区域)，与 YJK 结果误差约 8.7%；当荷载以 2.75HZ 频率激励时，SAP2000 模型楼盖结构响应有效最大加速度为 0.410 m/s² (P2 区域)，与 YJK 结果误差约 7.4%。从结果可以看出，受单元网格划分的影响，两种有限元软件节点响应绝对数值上略有差异，但各节点响应趋势以及有效最大加速度发生的区域均保持了较好的一致性，可认为 YJK 分析结果是合理可靠的。

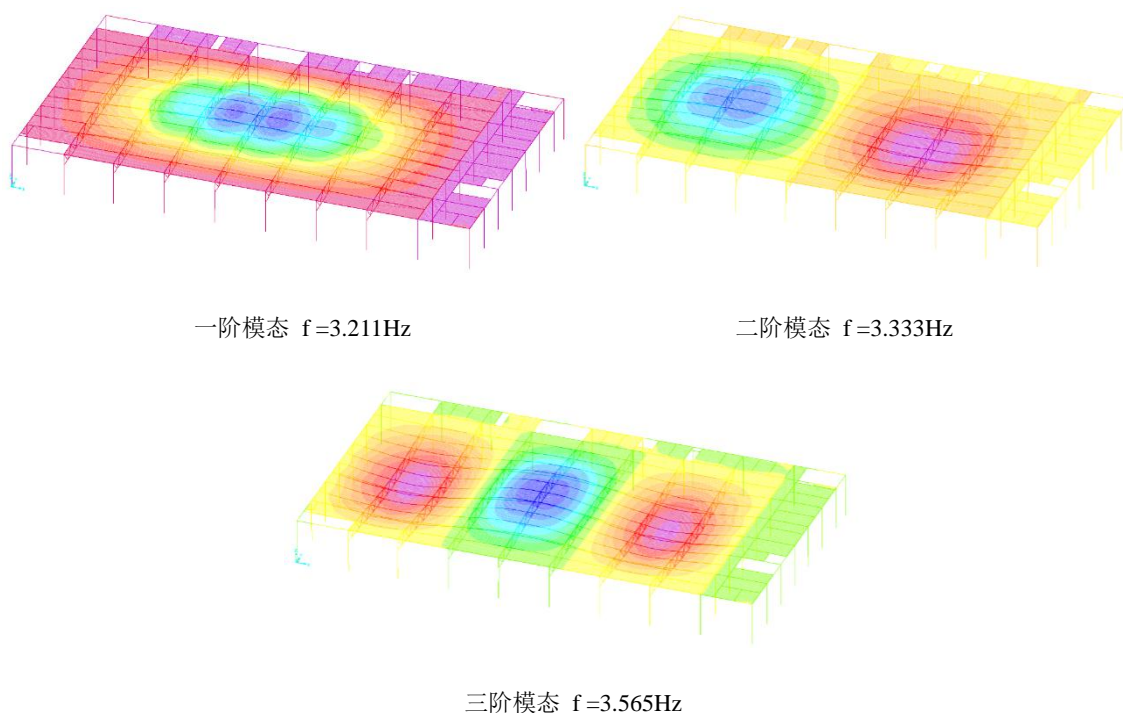


图 1.5-2 SAP2000 模态分析结果

SAP2000 模型荷载频率 2.0HZ 下楼盖结构有效最大加速度统计表

表 1.5-1

运动区域	最大响应节点号	第一阶峰值加速度 a_{p1} (m/s ²)	第二阶峰值加速度 a_{p2} (m/s ²)	第三阶峰值加速度 a_{p3} (m/s ²)	有效最大加速度 a_{pm} (m/s ²)
P1	1471	0.076	0.190	0.033	0.229
P2	5650	0.100	0.191	0.022	0.241
P3	9197	0.029	0.065	0.011	0.079
P4	13270	0.029	0.073	0.011	0.088
P5	9215	0.077	0.151	0.009	0.187
P6	11228	0.075	0.123	0.018	0.164
P7	13287	0.076	0.197	0.021	0.232
P8	16847	0.046	0.140	0.020	0.162
P9	9298	0.027	0.068	0.011	0.082
P10	13371	0.028	0.077	0.012	0.091

SAP2000 模型荷载频率 2.75HZ 下楼盖结构有效最大加速度统计表

表 1.5-2

运动区域	最大响应节点号	第一阶峰值加速度 a_{p1} (m/s ²)	第二阶峰值加速度 a_{p2} (m/s ²)	第三阶峰值加速度 a_{p3} (m/s ²)	有效最大加速度 a_{pm} (m/s ²)
P1	1710	0.192	0.169	0.039	0.297
P2	5654	0.336	0.152	0.040	0.410
P3	11728	0.078	0.081	0.052	0.147
P4	13808	0.070	0.079	0.046	0.137
P5	9216	0.242	0.102	0.051	0.298
P6	11224	0.239	0.076	0.054	0.282
P7	13289	0.228	0.047	0.062	0.262
P8	16846	0.104	0.103	0.033	0.174
P9	10790	0.080	0.081	0.051	0.149
P10	12803	0.083	0.085	0.036	0.146

2 结语

本文基于《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441-2019), 采用 YJK 有限元软件对某体育综合训练馆的大跨楼盖结构进行了模态分析和荷载激励时程分析。模态分析结果显示, 楼盖结构的一阶竖向自振频率约为 3.28HZ, 小于标准建议值 4HZ 要求, 说明在建筑净高限制下, 楼盖刚度偏小; 时程分析结果显示, 在有节奏运动荷载激励下, 本工程楼盖结构振动加速度指标均能满足规范限值要求, 说明楼盖虽刚度偏小, 但其振动加速度响应仍较小, 可满足振动舒适度要求。同时, 本文采用 SAP2000 有限元软件对 YJK 分析结果进行对比验证, 二者模态分析及时程分析结果均保持较好的一致性, 可认为 YJK 软件分析结果是合理可靠的。