

浅析楼盖舒适度的改善措施及设置振动杆 对楼板舒适度的影响

徐海伦

中国建筑上海设计研究院有限公司

摘要: 本文对《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》规范中楼板舒适度的改善措施进行了阐述分析。行走激励、有节奏运动、设备振动等荷载作用引起的振动舒适度是结构正常使用极限状态设计的重要内容,楼盖在荷载作用下有可能产生较大的动力响应,可能会引起人体的不舒适感,尤其悬挑位置更甚。本文以某超高层办公楼悬挑部位为例。对以行走激励为主的荷载作用下的振动频率和竖向荷载加速度进行分析,分析悬挑构件端部振动杆设置及其尺寸对楼板舒适度的影响。

关键词: 楼板舒适度; 自振频率; 竖向振动峰值加速度; 悬挑构件; 振动杆

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2022.11.233

一、设计背景

2022年1月1日开始执行的《通用规范》(包含《工程结构通用规范》《钢结构通用规范》《组合结构通用规范》《木结构通用规范》《混凝土结构通用规范》等)对于结构楼板舒适度验算提出了要求,楼板舒适度验算被纳入强制性条文,楼板舒适度验算成为几乎所有建筑工程结构设计时都需要验算的指标。2020年1月1日起实施的《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》JGJ/T441-2019对舒适度评价标准做了规定。从该规范中舒适度评价标准来看,楼板舒适度验算成为几乎所有建筑工程结构设计时都需要验算的指标。故本文针对楼板舒适度验算及改善楼板舒适度进行阐述分析,并结合实际工程案例展示减振措施的对楼板舒适度的影响。

二、楼盖舒适度的改善措施

楼板的材料性质、结构形式、荷载大小、荷载类型以及边界条件均会影响楼盖的舒适度。楼盖舒适的改善主要有增加质量、提高楼盖的刚度、增加楼盖的阻尼以及减隔振等方法。

(一) 增加质量

永久荷载包括楼盖自重、面层、吊挂、固定隔墙等。可以增加上述荷载,但当不能确定时,宜取其下限值。

(二) 提高楼盖的刚度

提高构件刚度可以改变其自振频率,从而起到提高楼盖刚度的效果。可采用增大构件截面、增设构件支点、外加预应力等方法。

增大截面法是指增大原构件截面。对于混凝土构件可加大截面高度或宽度,对于钢构件可以通过加厚翼缘板、工字形截面为箱形截面等方式;

增设支点法指用增设构件支点或改变支座约束来改善结构受力体系。(下述工程实例采用该方法改善楼板

舒适度)主要方法有:增设柱、墙、支撑或辅助杆件来增加构件支点;将简支结构端部连接成连续结构;将构件端部支承由铰接改造成刚接;调整构件的支座位置等。

外加预应力加固法即通过施加体外预应力去提高构件刚度。

(三) 增加楼盖的阻尼

阻尼比是阻尼振动的实际阻力与产生临界阻尼所需阻力的比值。由此可见,阻尼比越大,结构刚度越大。影响阻尼比的主要影响因素有材料阻尼、周围介质对振动的阻尼、节点支座联接处的阻尼、通过支座基础散失一部分能量等。综上,可以通过增设垂直于楼板走向的隔墙、吊顶或面层等非结构构件或者通过设置调频质量阻尼器(Tuned Mass Damper,简称TMD)增加楼盖阻尼比。上述两种方式同时也起到增加质量、减隔振的作用。

TMD一般由惯性质量、弹簧系统、阻尼系统、质量块支撑系统和导向、限位系统等组成,分为悬吊式和支撑式两大类。我们构件设计时可以考虑TMD的荷载,作为一个备用措施。若楼盖舒适度有问题时,考虑设置TMD改善舒适度。

(四) 减振、隔振

减振或隔振主体通过采用调整振源、防止共振、设置TMD、采用隔振基础等措施。

不同功能类型的建筑物,可采用或组合采用上述方式去改善楼盖舒适度。

对于既有建筑,当楼盖振动舒适度有问题时,应找到与舒适度相关的主要振源,采用调整振源位置、调整楼盖的刚度、主体结构中增加垂直于楼板走向的隔墙等非结构构件、设备减振措施等方法。

对于有节奏运动区域,可设置变形缝将有节奏运动

区域与其他区域分隔开，改善其他区域楼盖的 振动舒适度。

对于设备振动影响楼盖舒适度，宜采用调整振源、防止共振、在振源固定时可以在设备底座安装减振器或隔振器，设置浮筑基础等。

对于连廊和室内天桥可采用增加刚度（增加缆索、采用箱型截面、桥面边缘增加约束构件等）、增加非结构构件（增加面层、栏杆等）、设置TMD等措施提高舒适度。

三、某工程项目楼盖舒适度分析及振动杆的工程应用

本项目位于上海市普陀区，地上为34层超高层办公楼，建筑高度180米。塔楼南北两侧有6~8m不等悬挑，由于净高要求，悬挑梁为根部最大高度1000mm的刀把梁，3m间距布置，标准层楼板厚度120mm。悬挑区域高跨比1/6~1/8，相对较大需，故作为舒适度重点分析区域。

依据《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》JGJ/T441-2019第4.2.1条，以行走激励为主的楼盖结构，第一竖向自振频率不宜低于3Hz，办公室竖向振动峰值加速度不应大于0.05m/s²。

（一）自振频率计算

主要设计参数如下：

1. 根据JGJ/T441-2019规范表3.2.3，有效均布活荷载取0.5kN/m²，恒载按实际取值。

2. 本塔楼楼盖采用钢筋桁架楼承板为钢-混凝土组合楼盖，混凝土的弹性模量可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010的规定数值放大 1.35倍。

3. 根据JGJ/T441-2019规范表5.3.2及条文解释，行走激励为主的钢-混凝土组合阻尼比取0.03。

4. 根据《高层民用建筑钢结构设计规程》JGJ 99-2015第6.1.3条，钢梁-梁刚度放大系数：两侧有楼板取1.5，一侧有楼板取1.2，两侧无楼板取1.0。

5. 动力时程分析类型按周期分析即稳态分析，重复加载时程荷载函数的时程分析。（周期分析：时程荷载函数将被反复加载，具有阻尼衰减特性的结构，随着时间的推移，其初始状态的影响将逐渐消失，达到稳定状态后，只显示周期荷载的反应。）

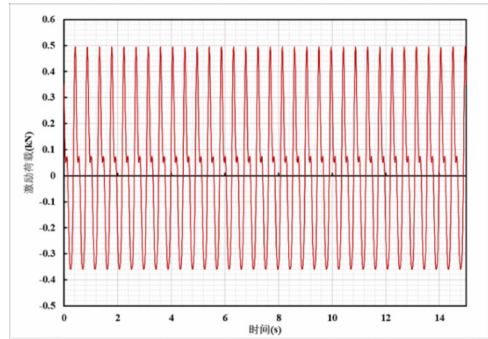
6. 楼面荷载取1.0恒载+0.5活载组合。

根据上述计算参数，选取低区和中区标准层进行舒适度分析，计算得到低区和中区标准层自振周期分别0.490s、0.409s，自振频率分别为2.041Hz、2.442Hz，楼盖一阶竖向振动模态，均小于3Hz，满足规范要求。

（二）峰值加速度计算

1) 人行激励模拟

根据规范5.1.1条，行走激励为主的楼盖结构可按单人行走激励计算楼盖的震动响应。人的行走时由连续步伐所组成的，且具有一定的周期性，当人的步频接近结构的自振频率时，结构将发生共振，根据JGJ/T 441-2019 第5.2.1条，行走激励荷载可按公式 $F(t) = PP[1 + \sum ri \cos(2\pi f_1 t + \phi_i)]$ 计算，行走激励时程函数曲线如下图所示：



荷载函数总时长 15s，积分时间步长 0.06s，满足JGJ/T441-2019 第5.3.4条，荷载函数不宜少于15s，积分时间步长不宜大于1/(72f₁)。人行荷载施加在楼盖一阶竖向振动模态位移最大点（位移最大点均位于悬挑部位端部）。

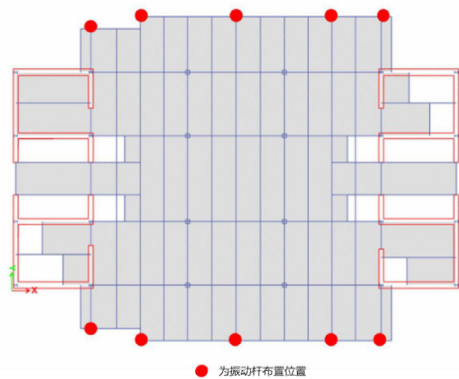
2) 单人行走时程分析结果

依据JGJ/T 441-2019 第5.3.4条，各不利振动点的竖向振动峰值加速度按下式计算： $ap=0.5$ ，低区和中区标准层有限元模型计算的单人行走不利振动点竖向加速度峰值为0.024m/s²和0.028m/s²，故单人行走不利振动点的竖向振动峰值加速度为0.012m/s²和0.014m/s²。

（三）悬挑端振动杆研究

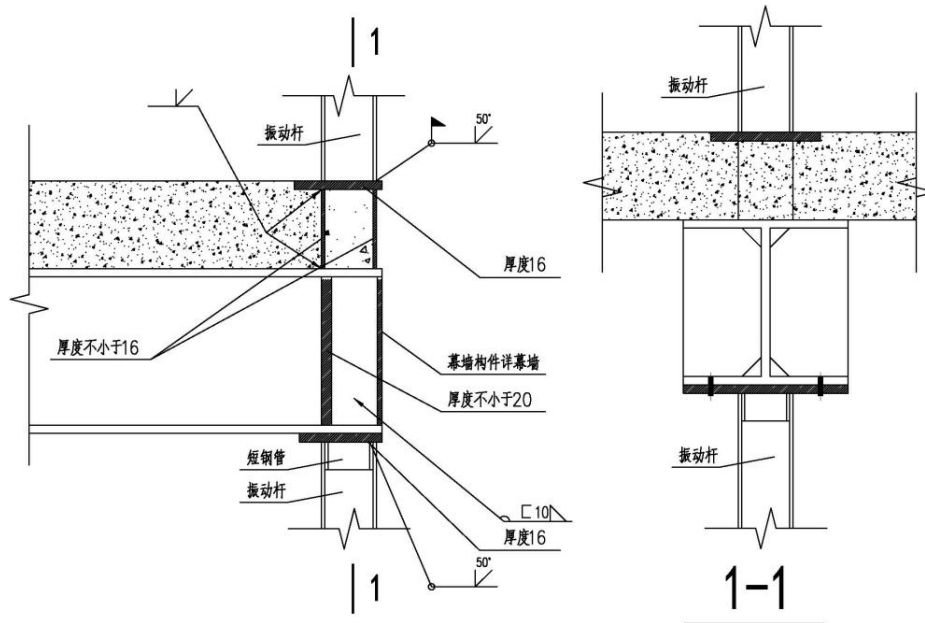
针对悬挑端楼盖除符合规范对舒适度的控制标准之外，考虑设置振动控制杆件，连接典型标准层，以进一步增强楼面舒适度。

1) 振动杆位置：振动杆主要沿悬挑端布置，同时考虑幕墙造型等因素，结合幕墙龙骨布置。具体位置如下图



2) 振动杆节点设置：振动杆以三层为一个连接单位，采用箱型截面。节点设置在各楼层处铰接连接，主

体结构完成后后装不承担重力荷载。节点处理如下图
3) 计算分析



舒适度设计准则及计算参数同上述第3.1、3.2项，选取中区标准层10~12F进行计算，未设置振动杆与设置振动杆后的自振周期分别为0.414s、0.390s，自振频率分别为2.414Hz、2.562Hz，楼盖一阶竖向振动模态如图所示，均小于3Hz，需要进行加速度控制。

楼盖竖向加速度取11F进行分析，人行荷载施加在楼盖一阶竖向振动模态位移最大点即悬挑部位端部。分别按无振动杆、不同截面尺寸振动杆（口100X100X6X6、口120X120X6X6、口150X150X8X8）进行分析，计算结果详如下表。根据下表可知，

单人行走不利振动点的竖向振动峰值加速度均小于规范要求 0.050m/s²。振动杆对楼盖竖向振动舒适度效果明显，减振率约 50%，增大振动杆尺寸对改善楼盖舒适度效率并不明显。

单人行走不利振动点的竖向振动峰值加速度			
结构布置	第一阶自振频率 (Hz)	有限元模型计算的不利振动点竖向加速度峰值 (m/s ²)	不利振动点的竖向振动峰值加速度 (m/s ²)
无振动杆	2.414	0.016	0.008
振动杆截面 100X100X6X6	2.562	0.009	0.0045
振动杆截面 120X120X6X6	2.562	0.009	0.0045
振动杆截面 150X150X8X8	2.562	0.009	0.0045

四、小结

随着人们对生活环境舒适性要求的不断提升，楼板舒适度验算与如何改善楼盖舒适度是每个设计师设计过

程中需要考虑和关注的重点。综上所述，我们可以通过增加质量、提高楼盖的刚度、增加楼盖的阻尼以及减隔振等方法改善舒适度。实际工程设计时，我们可以根据结合建筑的功能、造型要求，譬如幕墙的立柱，人行天桥增加桥宽、设置横向拉索等措施去改善楼盖舒适度。在楼盖减振措施方面，当前已有多种减振装置来降低楼板的振动响应，采用浮筑楼板、空心楼板等新型楼板结构形式来提高其减振性能。我们应当结合工程实际，采用合理、合适、经济的措施去做到改善楼盖舒适度。

参考文献

- [1] 《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T441-2019)
- [2] 《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)
- [3] 《高层民用建筑钢结构设计规程》(JGJ 99-2015)
- [4] 李华明. 楼板舒适度计算方法研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(21): 74-78.
- [5] 刘阳, 李爱群. 楼板振动舒适度评价标准探讨[J]. 工业建筑, 2018, 48(08): 168-173.
- [6] 刘晓燕, 张瑞. 基于有限元分析的楼板舒适度计算[J]. 低温建筑技术, 2022, 44(01): 30-33.
- [7] 赵广华, 李红. 楼板舒适度计算方法的比较研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(05): 130-135.
- [8] 李华明. 楼板舒适度计算理论与应用研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(17): 94-98.
- [9] 陈云, 周峰. 楼盖结构振动控制技术进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(02): 10-19.