既有建筑工业上楼改造楼盖“结构加固＋设备隔振”联合减振技术研究

郝猷猷　康义荣

中国中元国际工程有限公司 北京 100089

【摘　要】：针对既有建筑改造为工业上楼时高频精密设备引起的楼盖振动控制难题，提出“结构加固+设备隔振”联合减振技术方案。以某 4 层框架电子厂房改造为背景，对比三种方案。结果表明：联合方案将楼盖峰值加速度由 0.491 m/s²降至 0.014 m/s²（降低率 97.1%）；单纯加固在 50 Hz 高频下仅微幅波动（0.492~0.494 m/s²），几乎无效。设备满载时联合结果低于工艺容许值 0.15 m/s²，亦满足 JGJ/T 441—2019 生产操作区 0.40 m/s²限值。文中给出设计流程与施工要点。

【关键词】：既有建筑；工业上楼；联合减振；结构加固；设备隔振；振动控制

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.091

引言

随着我国产业结构调整与土地资源日趋紧张，“工业上楼”已成为制造业高质量发展的重要空间组织模式[1]。既有建筑改造为工业上楼普遍面临楼盖刚度偏低、振动控制困难等问题。

工业设备振动经基础传至楼盖引起竖向振动，幅值超限时影响生产与产品质量[2]；单纯加固虽提高刚度与承载力，却难经济地降至工艺限值[2]。现行 JGJ/T 441—2019 生产操作区限值 0.40 m/s²远高于工艺容许值，GB 50463—2019、GB 50868—2013 虽规定隔振与设备容许值，但既有楼盖多按人员活动设计，未预留高频设备振动裕度[3-5]。已有研究对楼盖加固、TMD、隔振支座等单一或组合措施分别验证[6-8]，但多用于新建厂房或大跨楼盖；本文面向既有厂房改造，定量比选三类方案。

1 联合减振技术原理

1.1 结构加固减振机理

既有建筑楼盖加固主要通过增大截面或增设钢构件提高竖向刚度。楼盖竖向自振频率 f1 与抗弯刚度 EI、等效质量 m 的关系为[6]：

$$f_1 = C_1 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad （1）$$

式中 C1 为频率系数（简支时 C1=π/2），L 为楼盖跨度。增大梁截面或增设钢梁可提高 EI 与 f1[6]。但当激励频率远高于自振频率时，峰值加速度渐近于扰力幅值与有效模态质量之比，增大刚度几乎不改变极限值，故高频设备不宜寄望单纯加固。

1.2 设备隔振减振机理

设备隔振在设备与支承结构间设隔振器，形成质量-弹簧-阻尼体系。力传递率 T 定义为传至基础的力幅值与设备扰力幅值之比[4]：

$$T = \sqrt{\frac{1+}{(1-r^2)^2+(2\zeta r)^2}} \quad （2）$$

式中 r=f/f0 为频率比，f、f0、ζ分别为激励频率、固有频率与阻尼比。当 r>√2 时 T<1，系统进入隔振区，频率比越大效率越高[4]。设计按 GB 50463—2019 确定参数，以 GB 50868—2013 容许值为控制目标[3,4]。钢弹簧隔振器承载力高、刚度稳定，动刚度随工况变化[4,9]。

1.3 联合减振协同效应

其优势为：加固提高楼盖刚度与承载力，为隔振提供平台；隔振削减传至楼盖的振动能量；二者协同以较小代价实现远超单一措施的减振效果。

2 工程案例概况与设备参数

2.1 工程概况

本项目为某 4 层框架电子厂房改造为工业上楼，原设计柱网 8.0 m×8.0 m，层高 4.5 m，楼板厚 120 mm，主梁 300 mm×700 mm，次梁 250 mm×500 mm，混凝土 C30；改造后 3 层布置高速贴片机生产线。

高速贴片机为微米级精密装配设备，贴装头定位精度±25~50μm。经验表明峰值加速度超 0.15~0.20m/s²

资助项目：中国机械工业集团有限公司科研专项“工业上楼工程设计关键技术研究”（ZDZX2025-07）

时误判率与抛料率明显上升，故工艺容许值取 0.15 m/s²。动力识别得原结构满载峰值加速度 0.491 m/s²，远超 0.15 m/s²及 JGJ/T 441—2019 限值 0.40 m/s²[5]，亟需改造。

改造前安全性鉴定表明，3 层楼盖混凝土强度满足 C30，主梁截面实测偏差在规范允许范围内；原设计楼面活荷载 5.0 kN/m²，新增设备区荷载经核算不超过原设计，故仅需针对振动控制。

本文按厂家给定工作转速 3000 r/min 换算得激励频率 50 Hz，扰力幅值 8.5 kN 取自设备技术资料。

3 三种方案振动响应对比分析

3.1 计算模型与分析方法

本文采用集总参数模型，将楼盖等效为单自由度体系，设隔振器时按两自由度体系求解楼盖-设备耦合振动[6,11]；以原结构未加固峰值加速度 0.491 m/s²为基线反算有效模态质量。

设备扰力采用简谐荷载 $P(t)=P_0\sin(2\pi ft)$，峰值加速度取设备作用点与跨中最大值，各方案降低率均以原结构未加固状态为基准。

3.2 三种加固方案

方案 A（增大截面）：主梁截面由 300 mm×700 mm 增大至 350 mm×800 mm，楼板厚由 120 mm 增大至 150 mm，混凝土强度等级由 C30 提高至 C35[11]。

方案 B（增设钢梁）：在原楼盖下方增设 H400 mm×200 mm×8 mm×13 mm 焊接 H 型钢梁，钢梁与原主梁通过高强螺栓连接形成组合梁[11]。

方案 C（联合减振）：在方案 B 基础上于设备基础与钢梁间设钢弹簧隔振器，形成“钢梁加固+钢弹簧隔振”联合减振体系。

3.3 自振频率对比

各方案楼盖竖向自振频率计算结果如表 1 所示。原结构一阶频率 4.50 Hz，高于 JGJ/T 441—2019 不宜低于 3 Hz 的要求[5]，仍需减振。

表 1 各方案楼盖竖向自振频率对比

方案	一阶频率/Hz	频率提高幅度(%)	备注
原结构	4.50	—	计算值
A 增大截面	5.10	13.3	计算值
B 增设钢梁	5.80	28.9	计算值

3.4 峰值加速度对比

各状态设备作用点处楼盖竖向峰值加速度如表 2 所示。原结构 0.491 m/s²，为工艺容许值 0.15 m/s²的 3.27 倍、JGJ/T 441—2019 限值 0.40 m/s²的 1.23 倍。方案 A、B 为 0.492、0.494 m/s²，单纯加固在 50 Hz 高频下几乎无减振效果；方案 C 降至 0.014 m/s²，降低率 97.1%。

表 2 各方案楼盖竖向峰值加速度对比

方案	峰值加速度 /(m·s⁻²)	降低率 (%)	与工艺容许值之比
原结构（未加固）	0.491	—	3.27
A 增大截面	0.492	—0.2	3.28
B 增设钢梁	0.494	—0.5	3.29
C 钢梁+钢弹簧隔振	0.014	97.1	0.093

机理上，单纯加固（A、B）靠提高刚度减小动力放大系数；但 50 Hz 时峰值加速度渐近 $a\approx P_0/m_{eff}$，仅与扰力幅值和有效模态质量有关，数值 0.492~0.494 m/s²，与基线无实质改善[6,8]。联合方案中钢弹簧隔振器使体系固有频率降至约 8.0 Hz，频率比 $f/f_0=6.25$，传递率 0.028，隔振效率 97.2%，需指出，集总参数模型为确定性模型，而隔振器动反力呈随机特征[10]，故 0.014 m/s²属偏安全设计预测值。

3.5 方案适用性与比选讨论

方案 A、B 仅适用于低频或振动控制宽松场合；对 50 Hz 高频精密设备，单纯加固既难降响应又增自重造价。方案 C 虽增隔振器与台座造价，但减振显著且台座兼顾稳定性。

方案 C 隔振器与台座在原结构加固完成后、设备就位前安装，不占额外净高，便于在有限停产窗口内完成。

频率比 $r=6.25$ 已进入高频隔振区，故取 $f_0=8.0$ Hz 兼顾效率与稳定。

4 联合减振方案设计方法

联合减振设计遵循“先识别、后加固、再隔振”原则：先动力识别掌握楼盖频率与响应。

4.1 设计流程

联合减振设计流程为：（1）获取楼盖自振频率、阻尼比与峰值加速度；（2）结构加固设计[11]；（3）确定设备质量、工作转速、扰力幅值及作用点；（4）隔振器参数设计，确定固有频率、刚度与数量[4]；（5）隔振器选型与布置；（6）构造与防护设计；（7）施工后振动复测与验收。

步骤（1）原始数据是设计基础，建议优先现场振动测试；不具备条件时可采用同类结构动力识别或集总参数模型估算[6,11]。隔振器参数与加固宜同步迭代，避免楼盖频率变化影响频率比，其数量宜按设备底面尺寸与荷载分布确定，一般不少于 4 只对称布置[4]。

4.2 钢弹簧隔振器参数计算

（1）隔振体系固有频率确定：根据设备工作频率 f 和目标隔振效率η确定 f0。频率比按 GB 50463—2019 确定[4]，不宜小于 2.5，通常取 2.5~5.0。

目标传递率 T=1−η，未计阻尼时频率比可近似取：

$$r=\sqrt{\frac{1+\frac{1}{T}}{1}} \quad (3)$$

本工程目标效率取η=97.2%，即 T=0.028，由式（3）得 r=6.06；考虑隔振器实际阻尼比ζ=0.03，按式（2）迭代反算，最终取 r=6.25，则 f0=f/r=50/6.25=8.0 Hz。

（2）隔振体系总刚度计算：总刚度 K 由固有频率 f0 与被隔振总质量 m 确定，m 应计入设备质量与台座质量，不可仅取设备质量[4]，按式（4）计算：

$$K=(2\pi f_0)^2 m \quad (4)$$

本工程设备质量 3500 kg，配套钢筋混凝土台座质量约为设备质量的 1.2 倍（4200 kg），被隔振总质量 m=3500+4200=7700 kg，由式（4）得总刚度 K，单只刚度按式（5）计算，则：

$$K=(2\pi f_0)^2\times 7700=1.945\times 10^7 \text{N/m}\approx 19\,455 \text{ kN/m} \quad (5)$$

采用 4 个隔振器对称布置，按等刚度分配，单个隔振器竖向刚度 k=K/4=4863.75 kN/m≈4864 kN/m。

（3）隔振器静态压缩量：隔振体系静平衡位置处的静态压缩量为[4]：

$$\delta=\frac{mg}{K}=\frac{g}{(2\pi f_0)^2} \quad (6)$$

由式（6）可见，δ仅与隔振体系固有频率 f0 有关。代入 f0=8.0 Hz 得δ≈3.9 mm，须满足产品标称额定静压缩量不小于计算值，并据以核对台座标高与设备就位净空。

（4）隔振器选型与承载力验算：4 个隔振器对称布置于设备基础四角，单只隔振器承受的竖向静荷载按式（7）计算：

$$N_k=\frac{(m_{设备}+m_{台座})g}{4}=\frac{7700\times 9.8}{4}=18.9 \text{ kN} \quad (7)$$

按单只额定竖向荷载不小于 1.5 倍工作荷载确定所需额定荷载 Nk,req=1.5×18.9=28.4 kN，最终选用单只额定承载力不小于 30 kN 的重载钢弹簧隔振器 4 只，满足要求。

隔振器水平刚度约为竖向刚度的 0.15 倍，阻尼比约 0.03。该阻尼比取经验值，过大将削弱高频隔振效率[9]。

4.3 构造措施

（1）钢梁加固构造：新增钢梁通过化学锚栓与原混凝土梁连接，锚栓直径 16 mm、间距 200 mm、锚固深度 120 mm；钢梁与原梁接触面设 5 mm 橡胶垫层。

（2）隔振器安装：设备基础为钢筋混凝土台座，质量约为设备 1.2 倍（4200 kg）以降低重心、提高稳定性[4]；台座双层双向配筋。隔振器与台座、钢梁的连接钢板厚不小于 20 mm，锚栓抗剪与抗拔承载力分别验算[4,11]。

（3）限位与防护：隔振器水平向设橡胶限位块，防止地震或冲击下过大水平位移[4]；限位块与隔振器间预留 5~10 mm 间隙。隔振器表面热浸镀锌，满足防火防腐要求。

5 施工要点与验收标准

5.1 施工要点

（1）结构加固施工：增大截面时原构件表面凿毛并涂刷界面剂；增设钢梁应分级加载并监测变形，防止施工荷载致次生损伤。加固后检测混凝土强度与钢梁焊缝[11]。

（2）隔振器安装：隔振器应在楼盖加固完成并达设计强度后安装[4]；安装保持水平，各隔振器压缩量偏差不超±10%，就位后复核顶面标高。

（3）设备就位：设备吊装至隔振台座，调平后紧固连接螺栓。试运行监测各隔振器压缩量与台座水平度；安装完成后进行一次全面振动测试，。

减振改造工程验收应包括[2,4,5]：（1）核查结构加固质量，混凝土强度与钢结构焊缝等级满足设计要求[11]；（2）检查隔振器型号、数量、布置与安装质量[4]；（3）楼盖振动复测，工况含空载、半载与满载，测点布于设备基础下、跨中及相邻柱上楼盖，每点取不少于 3 个稳定样本最大值[4,5]；（4）验收以工艺容许峰值加速度 0.15 m/s²为控制，并核查 JGJ/T 441—2019 限值 0.40 m/s²及楼盖一阶频率不低于 3 Hz[5]。

按本文方案预测，改造后楼盖一阶竖向自振频率 5.80 Hz，设备满载运行时峰值加速度 0.014 m/s²，同时满足工艺容许值 0.15 m/s²与 JGJ/T 441—2019 限值 0.40 m/s²。

6 结论

本文针对既有建筑工业上楼改造楼盖振动控制问

题，提出“结构加固+设备隔振”联合减振技术方案。主要结论如下：

（1）高频工业设备（激励频率≥50 Hz）单纯结构加固基本无效，楼盖峰值加速度仅 0.492~0.494 m/s² 微幅波动，提高刚度几乎不改变极限响应。

（2）“增设钢梁＋钢弹簧隔振”联合方案将楼盖峰值加速度由 0.491 m/s²降至 0.014 m/s²，降低率 97.1%，远优于单纯加固，满足工艺容许值 0.15 m/s²且安全裕度大。

（3）给出了联合减振设计流程、钢弹簧隔振器参数计算方法与关键构造措施，指出选型须计入台座质量验算承载力。

（4）联合减振方案施工便捷、对原结构扰动小。结论基于单台高速贴片机单机工况，未考虑多台设备振动叠加及人行激励耦合；推广至低频冲击设备或大跨楼盖须另行验算。

（5）本文集总参数模型给出的振动控制效果为设计预测值，建议工程实施后现场复测以验证并修正隔振器参数与楼盖动力特性。

参考文献：

[1] 深圳市住房和建设局.工业上楼建筑设计通则:SJG 163—2024[S].深圳:深圳出版社,2024.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工业建筑振动控制设计标准:GB 50190—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑工程容许振动标准:GB 50868—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程隔振设计标准:GB 50463—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑楼盖结构振动舒适度技术标准:JGJ/T 441—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

[6] 冯竹君,王秀丽,王康妮.基于动力设备振动舒适度问题的楼板加固分析[J].工程抗震与加固改造,2022,44(4):138-145.

[7] 姚宗健,杨沁恬,姜娜,等.周期性冲击载荷作用下井字梁楼盖竖向振动的控制[J].计算机辅助工程,2021,30(3):1-5,11.

[8] 宋跃飞.多层框架结构厂房的共振规律与加固技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.

[9] 何庆烈,朱胜阳,蔡成标,等.地铁浮置板用钢弹簧隔振器力学特性试验研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(8):1492-1498.

[10] 朱志辉,黄宇佳,黄承志,等.钢弹簧浮置板隔振器垂向动反力随机振动特征研究[J].振动与冲击,2021,40(16):204-212.

[11] 王玉岭,肖绪文,殷惠君,等.既有建筑结构加固改造技术手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.