

调谐质量阻尼器 TMD 基本原理及减振效果评价

胡争锋

一、TMD 简介

调谐质量阻尼器 (Tuned Mass Damper, 简称 TMD) 是附加在结构上的一个子结构。由质量块、弹簧和阻尼器组成, 质量块通过弹簧和阻尼器与主结构相连接。如图 1 所示。其中质量单元用来产生对结构的控制力 (惯性力), 弹簧单元用来调谐 TMD 的自振频率, 获得最优的控制效果, 此外弹簧单元也起到将 TMD 的质量单元恢复到初始状态的作用, 阻尼单元吸收从结构传到 TMD 的能量并限制 TMD 的运动位移。

其减振原理是: 当主结构发生振动时导致 TMD 产生相对主结构的振动, TMD 的相对振动产生的惯性力又反作用到结构上, 从而抑制主结构的振动。

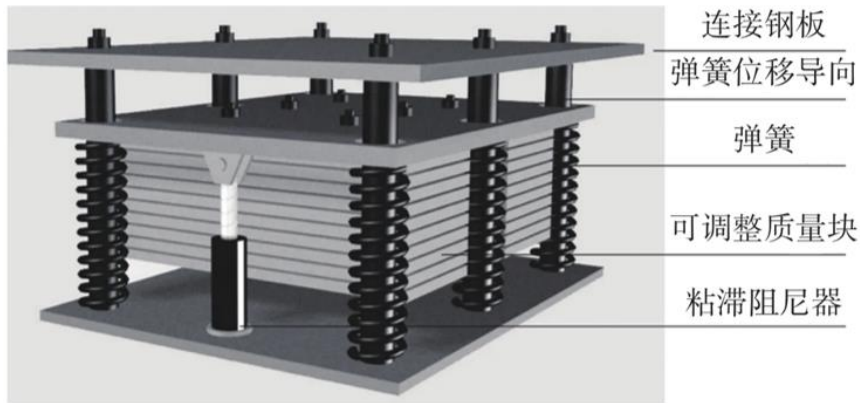


图 1 调谐质量阻尼器

二、TMD 的理论模型

TMD 是一个典型的二阶质量弹簧阻尼系统, 忽略主结构的阻尼, 其工作原理如图 2 所示。

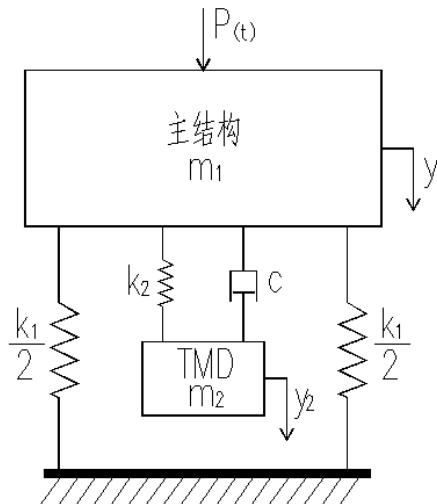


图 2 调谐质量阻尼器 (TMD) 模型

由牛顿第二定律写出 TMD 模型的振动微分方程为:

$$\begin{cases} m_1 y_1'' + c y_1' + (k_1 + k_2) y_1 - c y_2' - k_2 y_2 = P_{(t)} \\ m_2 y_2'' + c y_2' + k_2 y_2 - c y_1' - k_2 y_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

m_1 、 m_2 : 主结构质量、TMD 质量;

k_1 、 k_2 : 主结构弹簧刚度、TMD 弹簧刚度;

y_1 、 y_2 : 主结构相对地面的位移、TMD 相对地面的位移;

y_1' 、 y_2' : 主结构运动速度、TMD 运动速度;

y_1'' 、 y_2'' : 主结构运动加速度、TMD 运动加速度;

c : TMD 阻尼系数

$P_{(t)}$: 主结构上施加的外部激励 (其中 $P_{(t)} = P \sin \omega t$)

引入中间符号:

$$X_0 = \frac{P_{(t)}}{k_1}, \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \quad \mu = \frac{m_2}{m_1}, \quad \delta = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad g = \frac{\omega}{\omega_1},$$

$$\zeta = \frac{c}{2m_2\omega_2}$$

代入振动方程求解得主系统的振幅倍率为:

$$\frac{X_1}{X_0} = \sqrt{\frac{(g^2 - \delta^2)^2 + 4\zeta^2 g^2}{4\zeta^2 g^2 (1 - g^2 - \mu g^2)^2 + [\mu \delta^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - \delta^2)]^2}} \quad (2)$$

X_1 : TMD 的稳态解振幅

X_0 : 系统的静变形。

由上式可以得到设置 TMD 后主结构的位移振动响应是关于 μ 、 δ 、 g 、 ζ 的函数。

通过数理分析可知: TMD 质量越大, 减振频带越宽, 减振效果越好, 但实际结构总是希望附加的质量尽可能小, 所以 TMD 质量只能根据实际条件酌情选取。研究表明当质量比取值在 0.005~0.03 之间时, 可以获得较好的减振效果。

Den Hartog 以无阻尼主结构质量在简谐荷载作用下的稳态响应最小为设计目标保持质量比和固有频率比(g)不变, 改变阻尼比的值, 可以获得动力放大系数与频率之间的关系曲线, 通过对该曲线分析可推导出 TMD 阻尼器的两个优化条件, 即最优频率比和最优阻尼比。

最优频率比:

$$\delta_{opt} = \frac{1}{1 + \mu}$$

最优阻尼比:

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}}$$

再利用质量比及两个优化参数求出 TMD 的最优质量、TMD 的阻尼系数和 TMD 的弹簧刚度:

TMD 的最优质量:

$$m_{opt} = \mu M$$

M = 计算振型的动力参与系数乘以 m_1 得到。

TMD 的最优阻尼系数:

$$c_{opt} = 2m_{opt}\delta_{opt}\omega_1\zeta_{opt}$$

TMD 的最优弹簧刚度:

$$k_{opt} = m_{opt}\delta_{opt}^2\omega_1^2$$

据此完成 TMD 最优参数设计。

三、TMD 减振效果对比

以某商贸大楼室内封闭连廊为例来验证 TMD 对楼板竖向振动加速度的影响，大跨连廊横跨在左右两栋建筑之间，跨度 36m，连廊结构桁架的上下弦杆采用梁单元模拟，腹杆采用杆单元模拟。楼板采用钢筋混凝土楼板厚度 150mm。设置有连廊层的结构有限元模型如图 3 所示。

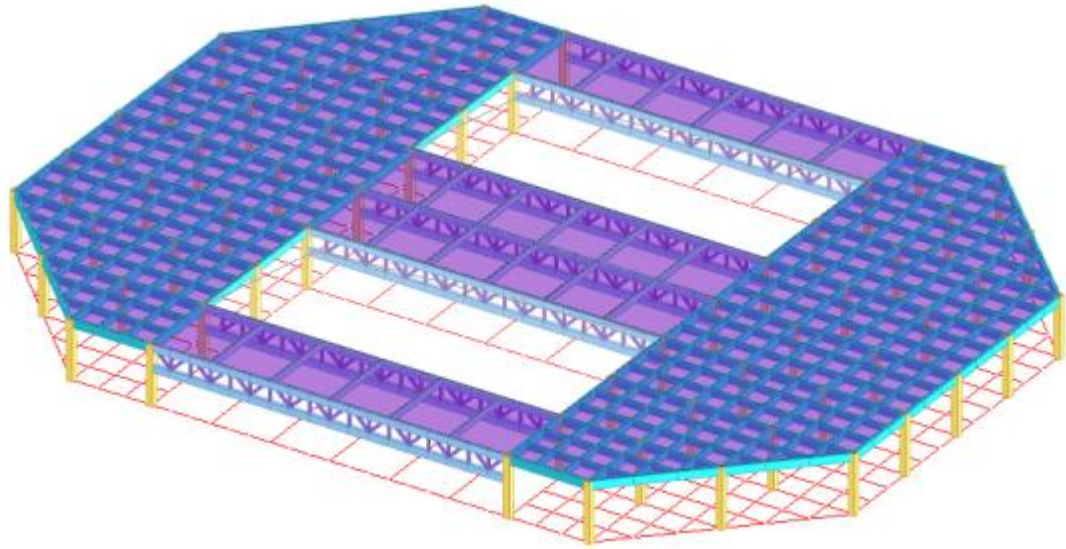


图3 连廊层结构计算模型

计算软件 YJK5.2 版本，结构阻尼比取值 0.01，混凝土弹性模量放大系数 1.35，采用 Ritz 向量法对大跨度连廊进行模态分析，保证结构的竖向振型质量参与系数不小于 90%。前 3 阶振型模态见图 4。

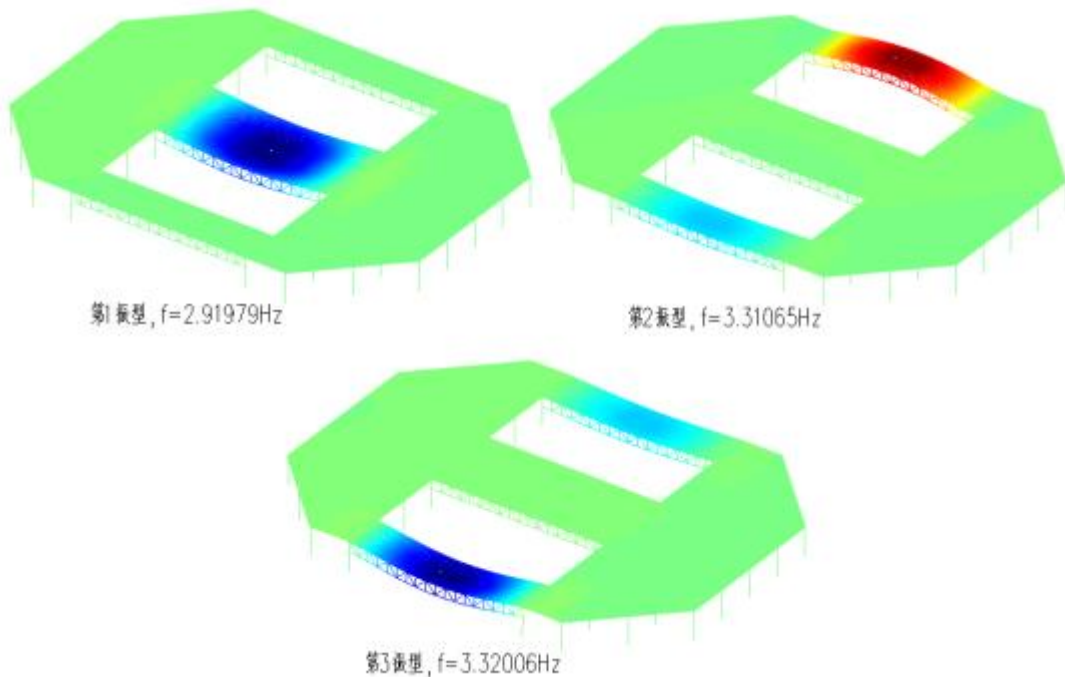


图4 大跨连廊前3阶振型模态

由前 3 阶振型模态可知，第 1 阶竖向振动的自振频率 f 接近人的正常活动的步频范围，可能在正常人行荷载激励下引起共振，且第 1 阶频率 $f_1 < 3\text{Hz}$ ，不满足规范要求，容易产生舒适度问题。因此须对大跨连廊进行舒适度分析。按规范要求，在 YJK 软件中定义好时程荷载类型，将其布置在第 1 阶振动比较大的中间连廊区域。进行舒适度分析得到 1000474 号节点的 Z 方向振动峰值加速度 $= 0.225 \text{ m/s}^2 > 0.15 \text{ m/s}^2$ ，不满足规范要求。加速度时程曲线如图 5 所示。

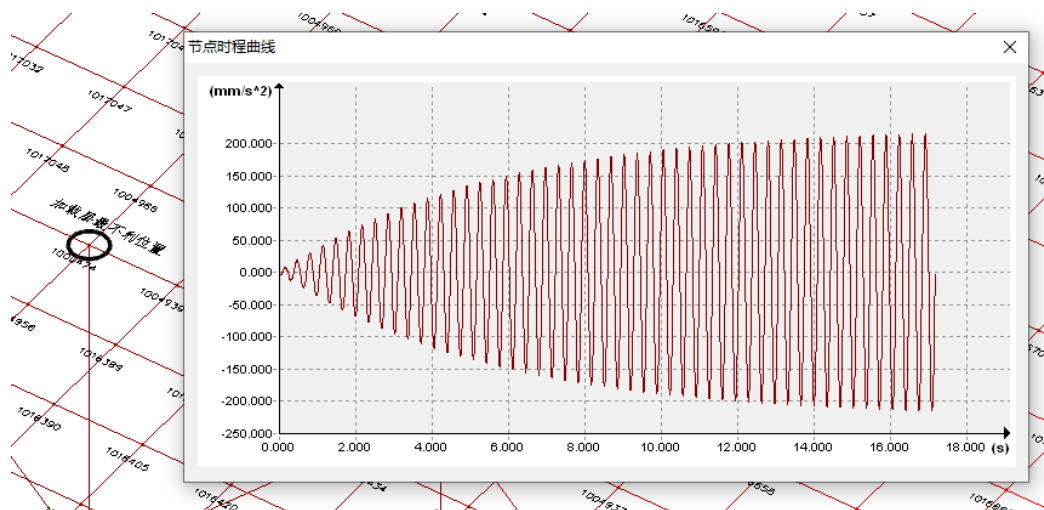


图 5 未设置 TMD 模型连廊竖向最大加速度时程曲线

TMD 调谐质量阻尼器是具有刚度阻尼特性的质量块，在改变结构自振特性的同时还可以有效降低结构的峰值加速度。在图 5 计算得到加速度最不利位置(节点编号 1000474)布置一个 TMD 调谐质量阻尼器,TMD 布置位置如图 6 所示。

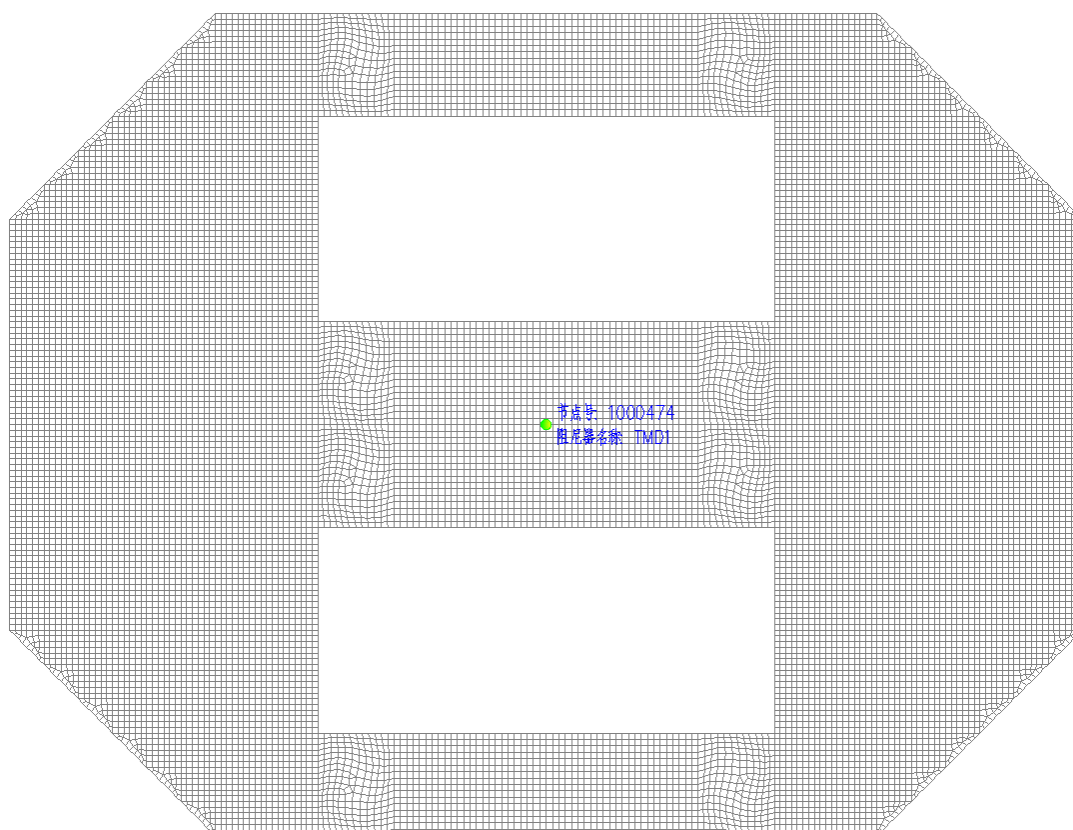


图 6 TMD 阻尼器布置图

TMD 的最优设计参数可按本篇文章第二部分的有关公式确定，其中质量比取 0.005，最终确定好的 TMD 设计参数见表 5

表 5 TMD 设计参数

编号	总质量 (kg)	刚度(kN/m)	阻尼系数(kN.s/m)
----	----------	----------	--------------

TMD1	1521	511.39	2.389
------	------	--------	-------

增设 TMD 后竖向最不利位置加速度时程曲线如图 7 所示。竖向加速度峰值由原来的 0.225 m/s^2 降低到 0.052 m/s^2 ，降幅 76.89%，设置 TMD 前后竖向振动加速度时程曲线对比如图 8 所示。且增加 TMD 后竖向最大振动加速度为： $0.052 \text{ m/s}^2 < 0.15 \text{ m/s}^2$ ，满足规范要求，同时设置 TMD 后连廊的自振频率由原来的 2.91979Hz 降低到 2.77568Hz 。降幅 4.93%，控制在 10%以内是比较合理的。

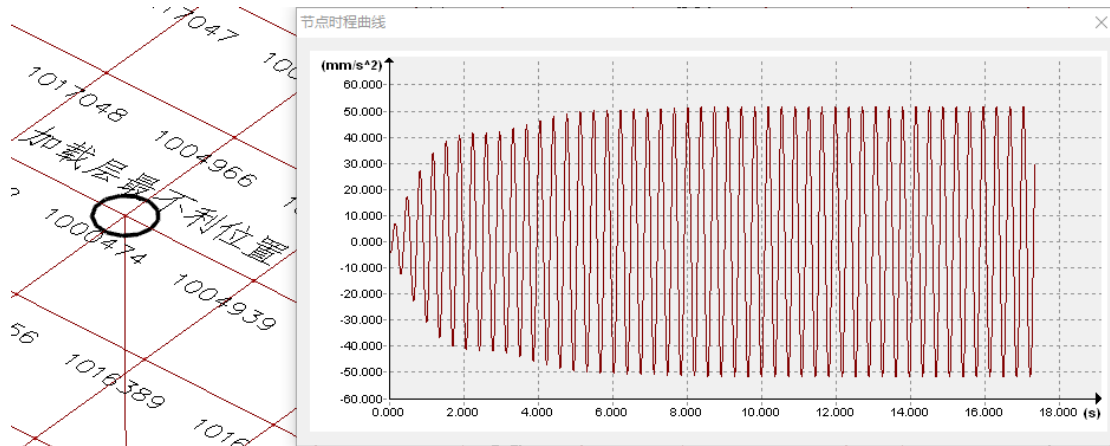


图 7 设置 TMD 模型连廊竖向最大加速度时程曲线

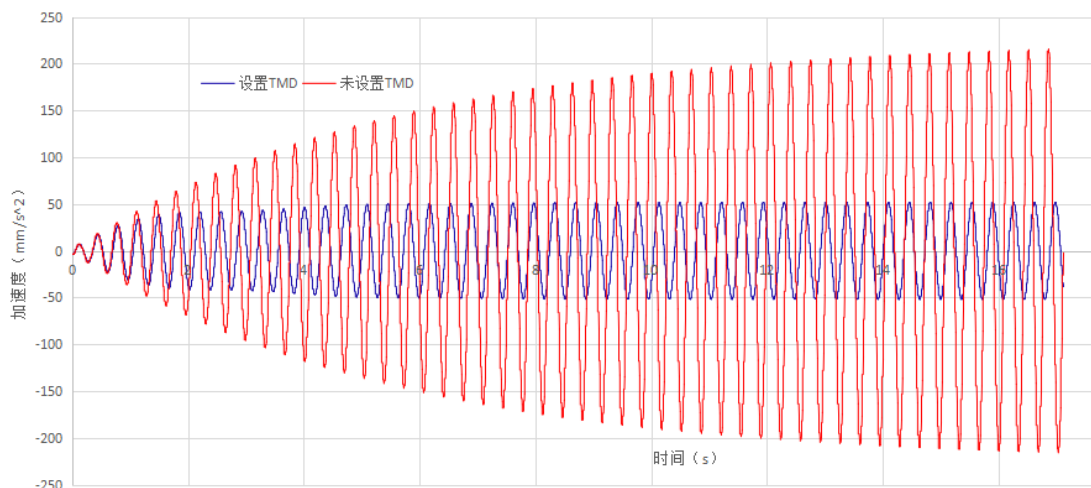


图 8 设置 TMD 前后连廊竖向振动加速度对比

四、结论

对于大跨度连廊竖向振动加速度较大且很难满足规范要求，采用 TMD 质量调谐阻尼器可有效降低大跨度结构的竖向自振加速度响应，而且 TMD 安装方便，经济实用。从计算结果的合理性判断，YJK 软件计算楼板舒适度结果正确可靠，适用于大跨度楼盖舒适度分析。

参考文献：

1. 调谐质量阻尼器参数优化及其应用（同长虹、张小栋）
2. TMD 分析手册
3. 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准