

# 分散式 TLD 及其减振性能的研究

叶列平<sup>1,2</sup>, 陆新征<sup>1,2</sup>, 侯建群<sup>3</sup>, 曲哲<sup>1,2</sup>, 齐玉军<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京, 100084; 2. 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京, 100084;  
3. 清华大学建筑设计研究院)

**摘要:** 本文基于功能仿生原理, 提出利用现浇钢筋混凝土空心楼板技术中预埋管道和空盒等设置“分散式 TLD”阻尼器的减振概念。这种“分散式 TLD”阻尼器的可设置范围大, 重量可分散于各个楼层, 有利于结构的承载受力; 减振频率范围宽; 不占据建筑使用空间; 施工简便; 与传统实心混凝土结构相比, 可减轻结构自重; 当 TLD 阻尼器中的液体采用水时, 对结构防火性能和消防性能也有一定的改善, 具有良好的应用前景。本文利用通用有限元软件 ANSYS 提供的流固耦合分析功能, 对一采用“分散式 TLD”的 4 层框架结构的减振性能进行了分析研究, 讨论了关键参数对结构减振性能的影响。数值分析结果表明, 所建议的“分散式 TLD”确实有明显的减振效果。

**关键词:** TLD, 分散式, 流固耦合, 减振, 功能仿生

## Studies on distributed TLD in RC floor and its vibration reduction effect

Ye LP, Lu XZ, Qu Z, Qi YJ

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** Currently cast-in-situ hollow reinforced concrete (RC) floor has been used widely in construction. If the empty space inside the pipes and the boxes embedded in the hollow floor is filled with some cheap liquid (such as water) to build up distributed TLD (tuned liquid dampers), then the total damping of the structure will be increased which results in a reduction of vibration. And this distributed TLD has some more advantages beside vibration control such as low cost and never occupying usable space. So it is believed that distributed TLD inside hollow floor will has a bright future. This paper demonstrates the feasibility of distributed TLD with the fluid-structure coupled simulation ability of common finite element package ANSYS. Parametric discussions are presented to show the factors that may govern the effect of vibration reduction. And the numerical results proved that distributed TLD has obvious effects to reduce the seismic vibration.

**Keywords:** distributed TLD, fluid-solid coupled simulation, vibration reduction, hollow floor

## 1 引言

液体调频阻尼器 (Tuned Liquid Damper, 简称 TLD) 在结构振动控制中得到大量应用<sup>[1]</sup>。目前在结构工程中应用的 TLD 大多采用水箱, 形状一般为矩形、圆柱型或 U 型, 一般放置在结构特定的楼层中, 每层放置一个或多个水箱。已有研究表明, TLD 表现出良好的减震效果, 且其经济性也比较理想, 技术难度也不大。但是, 现有的 TLD 在应用上也存在以下一些不足:

(1) 需要安排特定楼层和空间安置, 占用建筑使用空间;

(2) 由于 TLD 水箱集中分布的恒荷载较大, 设置 TLD 楼层结构需具备较大的承载力;

(3) 因受到设置空间的限制, TLD 的数量有限, 因此其减震效果主要依靠调频得到的水箱中水晃动产

生的反向惯性力。而由于实际结构的振动频率非常复杂, 难以事先准确预测, 所以如果不能得到很好调频, 则 TLD 减震效果将受到很大影响。而 TLD 提供的阻尼效应因 TLD 数量的限制, 质量比很小, 故减震效果也很有限。

近年来, 现浇空心楼板技术在实际工程中已得到大量应用。现浇空心楼板是预先在楼板中设置空心管道或箱体, 再浇筑混凝土形成, 具有自重轻、隔音效果好等优点, 且又具有现浇结构整体性好的优点<sup>[2]</sup>。目前现浇空心楼板的空心管道或箱体一般采用 PVC 管道、或者橡胶管道, 它们本身也是很好的液体容器。因此, 本文建议直接在空心管道或箱体注入廉价液体 (如水) 作为 TLD, 形成许多个分散埋置于楼板中的小 TLD (见图 1), 以增加结构整体阻尼, 达到减少结构振动的目的。

教育部科技创新工程重大项目培育资金项目资助, 项目编号: 704003

叶列平, 男, 1960—, 浙江温州人, 工学博士, 清华大学土木工程系教授, 博士生导师, 主要从事混凝土结构、结构抗震与减震、高性能工程材料应用等方面的研究工作。

本文建议的分散内置式 TLD 具有以下优点：

(1) 目前现浇空心楼板的空心体积比率在 66%~75%以上，有充足的空间放置足够多的 TLD 来增加结构的整体阻尼。除楼板外，墙体、巨梁和巨柱等也可设置，使得结构绝大部分的构件均具备阻尼耗能能力，可设置范围大；

(2) 与传统集中设置的 TLD 相比，分散内置式 TLD 不占用专门建筑空间，且 TLD 自身的重量分散于各个结构构件，有利于结构的承载受力；

(3) 可设置范围大，减振调频范围宽；

(4) 与实心混凝土结构相比，可减轻结构自重；

(5) 设置和施工方法与现浇空心楼板相同，简便易行，造价也很低廉；

(6) 当阻尼器中的液体采用水时，对结构防火性能和消防性能均有很大的改善。

因此，分散内置式 TLD 是一个很有工程应用前景的结构减振控制方法。本文采用流固耦合数值分析方法，对这种减振系统的效果进行初步分析研究，从理论上验证其可行性，并寻求有效的减振控制参数，为实验研究和工程应用提供依据。

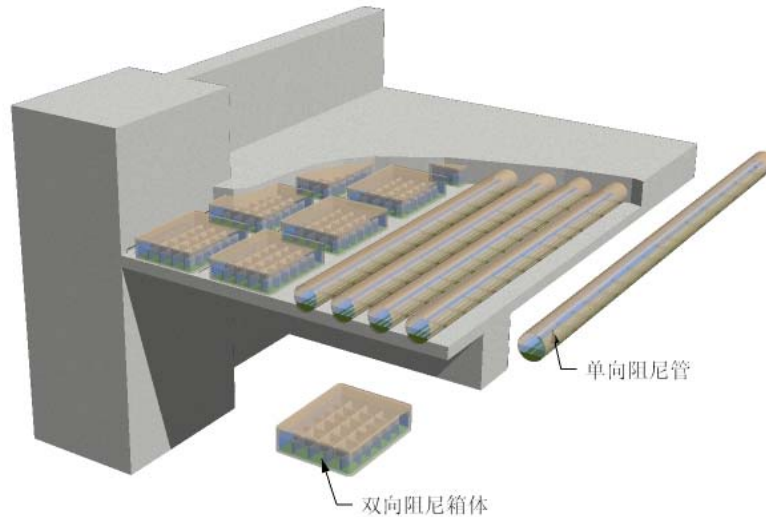


图 1 分散式 TLD 概念示意图  
Figure 1 Distributed TLD in RC floor

## 2 流固耦合分析方法

近年来，流固耦合分析在数值分析领域内受到广泛关注。所谓流固耦合分析，就是在数值模型中同时考虑流体力学问题和固体力学问题，及其相互作用。现实中大量工程问题是流体和固体共同工作，并相互影响的结果，如膜结构的风振。对于 TLD 减振问题，流固耦合分析尤其重要，因为 TLD 内部液体晃动所需的外力是由结构振动提供的，由于 TLD 内部液体振动的力学行为比较复杂，频谱成分很多，因此不同的外加激励（结构振动）可能引起不同的液体晃动行为。而 TLD 内液体晃动起来后，反过来又会对结构振动施加影响，不同的液体晃动，同样会对结构振动产生影响。因此，精确分析 TLD 减振效应必须同时考虑固体结构和 TLD 液体的力学行为及其相互作用。相对固体力学而言，TLD 内部流体的分析显然要更加复杂一些，它牵涉到自由液面运动、湍流模拟等多个流体力学难题，对分析软件模型和计算机硬件计算能力都有很高的要求，目前此类研究也非常少。

随着数值分析技术的进步和计算机能力的提高，

目前流固耦合分析已达到了比较实用化阶段。一般流固耦合问题中，包含了三个不同的分析模块<sup>[3]</sup>：

(1) 流体域：一般可以将流体看作是不可压缩的；

(2) 固体域：目前结构非线性计算已经成熟，可以考虑包括材料、几何非线性在内的各种非线性行为；

(3) 流体—固体界面：由于流体计算一般基于欧拉网格描述，而固体计算一般基于拉格朗日网格描述，因而流体和固体之间的界面是流固耦合分析的一个关键问题。目前比较成熟的分析方法是任意拉格朗日网格法（Arbitrary Lagrangian-Eulerian，简称 ALE）。

计算流程一般为：

(1) 以未变形的结构作为流体的计算边界，计算流体流场，得到作用在结构表面的压力；

(2) 将该压力作用于结构，使结构产生变形，进而根据结构的变形修改流体边界及流体网格，重新进行流体计算分析；

重复迭代步骤(1)和(2)直到流体和固体界面两次计算的压差小于误差容限。

在文献[4]的研究中，已对基于 ANSYS 的流固耦合分析进行了详细的讨论，说明了该技术的有效性，

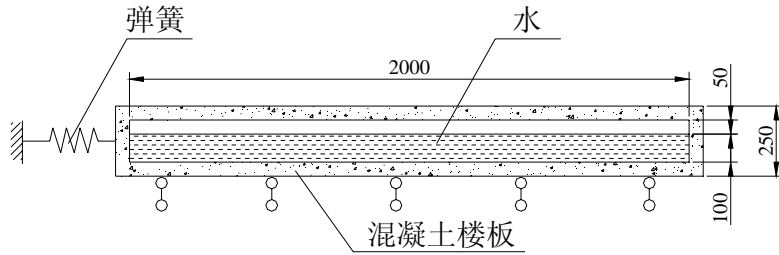


图 2 含 TLD 现浇空心楼板单元 (mm)

Figure 2. Typical unit of cast-in-situ hollow RC floor with TLD(mm)

表 1 TLD 系统的等效阻尼比变化

Table 1. Changes of equivalent damping ratio of floor TLD System

工况	无水	自振频率 1Hz, 最大振幅 0.01m	自振频率 2Hz, 最大振幅 0.01m	自振频率 1Hz, 最大振幅 0.05m	自振频率 2Hz, 最大振幅 0.05m
等效阻尼比	1%	2.83%	2.64%	2.69%	2.41%

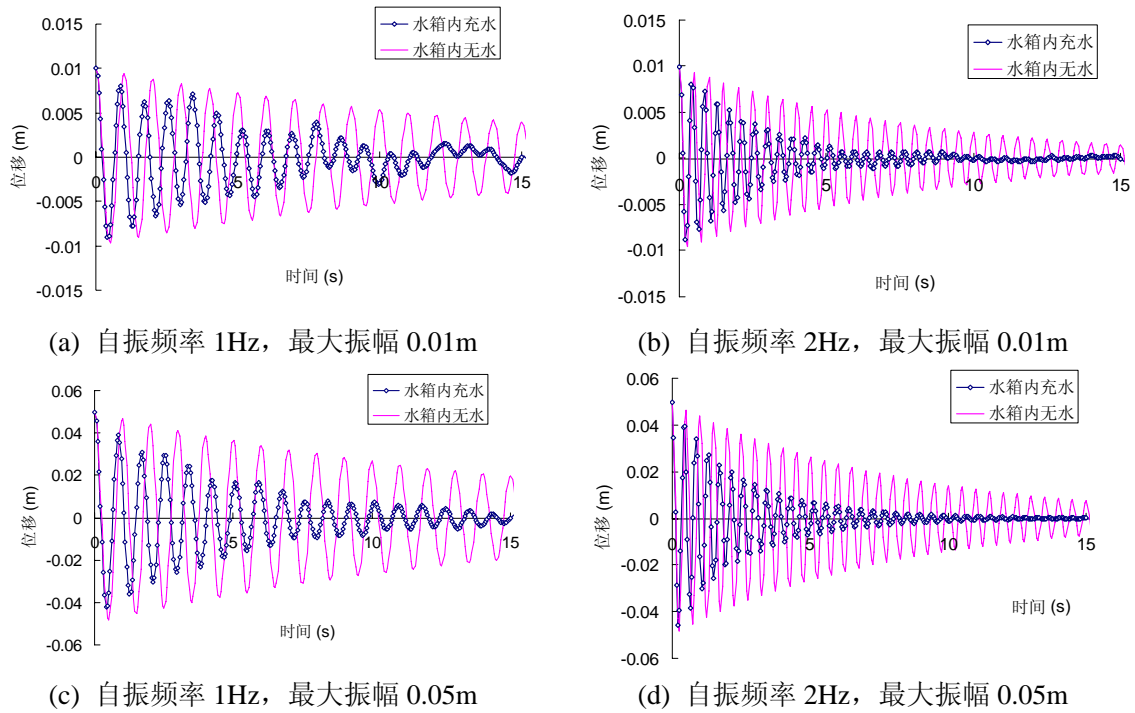


图 3 单 TLD 减震效果

Figure 3 Vibration reduction of single TLD



图 4 液体表面晃动 (自振频率 1Hz, 最大振幅 0.05m 工况)

Figure 4 Vibration of the liquid free surface (1Hz, 0.05m)

本文将进一步分散内置式 TLD 的减振效果进行流固耦合分析。

### 3 单 TLD 减振效果研究

#### 3.1 分析对象

图 2 所示为一简化的含 TLD 现浇空心楼板单元, 楼板厚度为 250mm, 其中空腔高度为 150mm, 形成水箱, 水箱空腔率和高度满足相关要求<sup>[5]</sup>。水箱内充

入水，深度为 2/3 水箱高度（100mm），水在整个结构单元中的重量比为 31%。结构刚度用一个水平弹簧代表，楼板底部为自由滑动。将楼板和弹簧拉至一定初始位移后释放，楼板将沿水平分析进行自由衰减振动。通过考察楼板振动的衰减规律，可以得到该系统的阻尼比和减振效果。

### 3.2 计算模型

取一延米图 2 所示现浇空心楼板，将其简化成二维问题，在 ANSYS 中建立数值模型，其中水箱中流体用 ANSYS 的 VOF（Volume of Fluid）技术模拟。VOF 技术可以真实模拟液体自由表面的晃动和高度变化，并能将动水压力传递给结构。流体属性为水，密度为  $1000\text{kg/m}^3$ ，运动粘度为  $1 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。水箱壁用梁单元模拟，在水箱壁和流体间布置流固耦合作用界面（Fluid-Solid Interface, FSI）。通过调整弹簧的刚度，可以设定结构的自振频率。施加的初始水平位移分别取 0.01m 和 0.05m 两种情况。为了保证计算结果的稳定性，给结构自身赋予了 1% 的初始阻尼比。

### 3.3 计算结果

图 3 所示为流固耦合计算得到的楼板单元自由振动衰减曲线，可见相对于水箱无水的情况，水箱充水后，系统的振动衰减速度显著提高。根据结构自由振动的衰减规律，可以得到充水后整个楼板的等效总阻尼比，见表 1。等效阻尼比从原来的 1% 增加到 2.4%~2.8%。阻尼比增加的主要原因是：因为水是一种具有一定粘性的液体，在水箱内液体晃动时可以耗散系统振动的能量（见图 4），增加结构的阻尼比。如果调节水箱长度，控制水箱内液体的自振频率，使其与结构自振相近，可以更加有效的减小结构的振动。但考虑到实际施工的便利，以及结构自振频率预测的难度，故在工程实践中建议分散内置式 TLD 主要利用液体晃动产生的阻尼耗能来减小结构的振动。在条件允许的情况下，可以通过水箱尺寸来达到调频减振的目的。

## 4 结构减震效果分析

### 4.1 计算模型

图 5 为一简单 4 层钢框架结构，采用现浇空心楼板，一阶自振频率为 1.78Hz，结构自身阻尼比取为 1%。混凝土楼板厚度取 250mm，空腔高度取 150mm，形成 TLD 水箱。在结构底部输入 El-Centro 地震波进行时程分析。在分析中，对以下参数进行了讨论：

(1) 单元网格密度：众所周知，数值模型计算结果与网格划分精度密切相关，为了验证本文计算结果的准确性，分别对流体域采用 3mm 和 5mm 两种不同的单元尺寸进行对比分析，以验证计算结果的稳定性。

(2) 水箱内液体高度：分别讨论了三种液体高度，

即，①水箱内无水，②1/2 水箱高度（水深 75mm）和③2/3 水箱高度（水深 100mm）。

(3) 水箱长度：分别讨论了 2 种不同水箱长度：

①单个水箱，长度为 2m；②单个水箱，长度为 4m。

另外，为了避免因水位高度变化或者水箱长度变化导致结构自振周期变化，影响对比分析的可靠性，在变化水箱内水位高度或水箱长度时，同时调整结构楼板重量，使得所有结构的总质量相等，一阶自振频率相同。

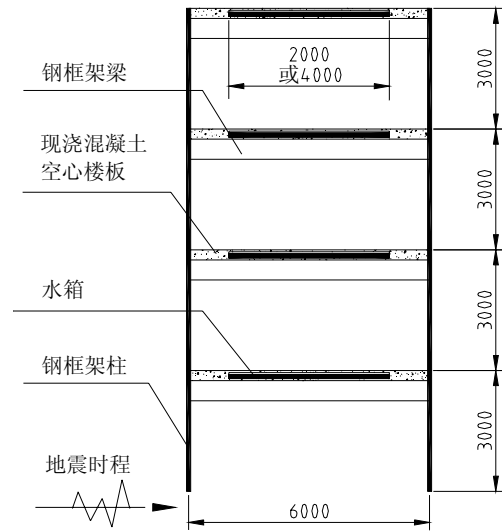


图 5 简单钢框架结构模型

Figure 5 Model for a simple steel frame

### 4.2 计算结果及其讨论

以单个水箱水深 100mm 为基准情况，对不同单元尺寸分析得到的顶层位移时程结果对比如图 6 所示。可见单元尺寸对计算结果影响很小，故而后面的计算均基于 5mm 尺寸的流体单元，以节省计算时间。

对不同水深、不同水箱长度的结构顶点位移时程分析结果如图 6 和图 7 所示，结果对比情况如图 8 所示。考虑到时程分析结果的复杂性，分别对最大位移和位移方差进行了统计对比。从图中可以看出，采用分布式 TLD 后，结构的位移响应都显著减小。无论是最大位移还是振动方差，减振幅度基本都在 30% 以上。相当于将原结构的阻尼比从 1% 增加到 3%~5%，可见分布式 TLD 确实可以有效降低结构的地震反应。

## 5 结论

本文提出了在现浇空心楼板内部空间充入廉价液体实现分散内置式 TLD 的概念，并通过基于 ANSYS 流固耦合模拟的数值模型验证了其有效性和可行性。分散内置式 TLD 不但可以有效增加结构阻尼，减小结构振动，而且还具有造价低廉，不占用结构使用空间等优点。

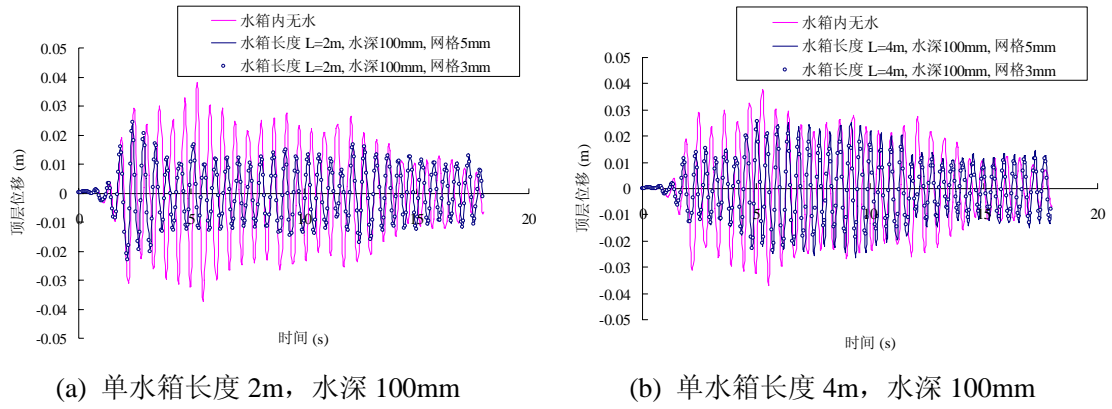


图 6 单元尺寸影响

Figure 6 Comparison for element size influence

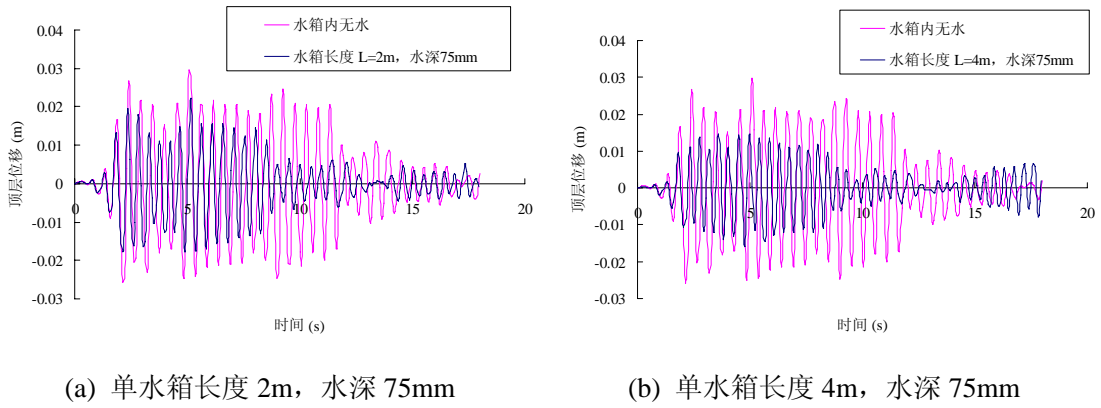


图 7 液体高度影响

Figure 7 Comparison for water height influence

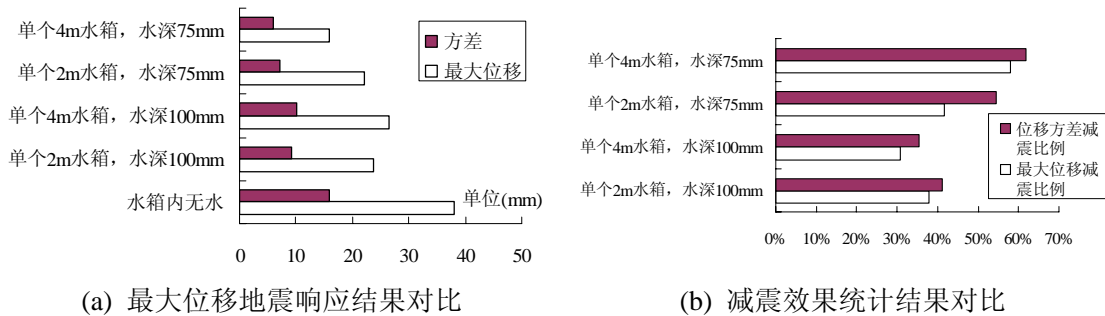


图 8 减震效果统计

Figure 8 Statistic results of vibration reductions

参考文献

[1] 李宏男, 李忠献, 祁皓, 贾影. 结构振动与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005

[2] 徐有邻, 冯大斌. 推广现浇空心楼盖, 发展节约型混凝土结构[R]. 全国现浇混凝土空心楼盖结构技术交流会, 2005

[3] 武岳, 沈士钊. 膜结构风振分析的数值风洞方法[J]. 空间结构, 2003, 9(2): 38-43

[4] 陆新征, 叶列平, 马千里, 江见鲸. CFRP 索流固耦合风振研究[C]. 第十二届全国结构风工程学术会议论文集. 西安, 2005: 69-75

[5] 《现浇混凝土空心楼盖结构技术规程》编制组. CECS 175:2004. 现浇混凝土空心楼盖结构技术规程[S]. 北京: 2004