

# 高层与大跨度结构 简化分析及算例

刘开国 著 ●

中国建筑工业出版社

# 高层与大跨度结构简化 分析技术及算例

刘开国 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高层与大跨度结构简化分析及算例 /刘开国著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2006

ISBN 7-112-08391-5

I. 高... II. 刘... III. ①高层建筑-结构分析

②大跨度结构-结构分析 IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 057212 号

本书论述的建筑结构包括: 框—剪、框—撑、撑—臂、交错钢桁架、巨型钢框架、变截面框筒和圆锥形框筒等高层结构; 以及预应力网架、伞状折网架、膜型扁网壳、圆孔鸟巢形网架、拉索穹顶、劲性索、椭圆开口索桁架、索承穹顶、索网架、张弦梁、索—拱体系、新型索桁架、预应力圆拱和网络拱等大跨度结构。

全书共分六章, 结构简化分析的内容涉及到风振控制与抗震优化、静力与动力以及线性与非线性等领域; 书中所介绍的简化分析技术, 概念清楚, 定性准确, 便于手算, 并有大量算例以说明其应用。

本书可供从事土建结构设计和力学研究的科技人员以及高等院校有关专业的师生参考。

\* \* \*

责任编辑: 刘婷婷

责任设计: 赵 力

责任校对: 王雪竹 张 虹

## 高层与大跨度结构简化分析及算例

刘开国 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京密云红光制版公司制版

印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13¼ 字数: 330 千字

2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月第一次印刷

印数: 1—3500 册 定价: 23.00 元

ISBN 7-112-08391-5  
(15055)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

## 作者简介

刘开国，1928年生，1950年毕业于国立南昌大学工学院土木工程学系，师从我国科学院学部委员蔡方荫教授。中南建筑设计院副总工程师、教授级高级工程师、国家一级注册结构工程师，1992年享受国务院政府特殊津贴；原武汉工业大学兼职教授、湖北省工程建设专家委员会专家、湖北省暨武汉市力学学会第二届及第三届常务理事、《工程力学》一届常务编委、《华中建筑》常务编委、《空间结构》高级顾问等。

从事建筑结构设计与研究四十余年，承担和主持几十项大型工业厂房和超高层与大跨度民用建筑结构设计；曾在膜型扁壳结构的研究中，获1978年全国科学大会奖，并为《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》JQJ/T 22—98的主要起草人之一。

发表论文九十余篇，出版专著：《杆系与板系结构的分析方法》、《伞状折板与膜型扁壳》、《结构简化计算原理及其应用》，及合著：《高层建筑设计施工》等。

# 前 言

在工程力学中，有许多纯解析方法和纯数值方法，也有不少充满智慧的数学模型和简化算法；这些都有力地促进了工程力学的研究和应用。

一般而言，纯解析方法得到的是一种理论解，精度高，计算量小，但解题范围有限，数学难度大；而纯数值方法正相反，其优点是解题范围很广，适应性强，方法统一，易于掌握，其不足之处在于给出的是一种近似解，计算工作量大；由于计算机的应用，前者已成经典，后者独领风骚。

在现有的结构分析著作中，论述各种纯数值方法（有限元法、有限差分法等）的书很多，而论述简化分析方法的书很少。为此，作者认为很有必要写一本结构简化分析技术的书。因为：

一、随着计算机技术的高度发展，解决力学问题的数值方法非常有效和普遍。但事物总有两面性，不少计算机程序对应用者而言具有黑箱性质。所以结构设计工程师要善于对结构作出准确性与简捷估算，做到心中有数，八九不离十，以便对计算机输出数据的可靠性作出应有的评价，这也是结构设计工程师必备的基本技能。

二、一个抓住问题本质的简化法，即使在有了计算机这一有力计算工具的今天，依然是结构工程师们乐于采用的。特别是在结构方案比较和初步设计阶段，简化法仍然具有不可替代的意义，因为它能提供比较清晰的受力概念。此外，对于较规则的结构体系，简化法已完全可以提供符合设计需要的较满意而完整的计算结果。

三、高层结构的风振控制与抗震优化，以及高层与大跨度结构的动力与非线性分析等，很需要有一套简化分析技术。

“十年磨一剑”。基于以上原因，作者对高层与大跨度结构简化分析技术的开发，十年如一日从未中辍，每有所得即在相关学术刊物发表文章。现将作者 1996 年以来的研究成果汇总撰写成本书，供广大建筑结构工作者参考。

跨世纪的建筑结构不只是经典的、几何单一的结构，而是由多个——不同维数和不同性能的——结构构件耦合或杂交而成的组合结构体系。例如：框—剪、框—撑、撑—臂，交错钢桁架、巨型钢框架、变截面框筒和圆锥形框筒等高层（含超高层）结构；预应力网架、伞状折网架、膜型扁网壳、圆孔鸟巢形网架、拉索穹顶、劲性索、椭圆开口索桁架、索承穹顶、索网架、张弦梁、索—拱体系、新型索桁架、预应力圆拱和网络拱等大跨度（含超大跨度）结构。

本书将以上高层与大跨度结构分成六章进行分析，简化分析的内容涉及风振控制与抗震优化、静力与动力，以及线性与非线性等领域；其中第 1~3 章论述高层结构，第 4、5

章论述大跨度结构，第 6 章论述高层与大跨度建筑中的其他结构，各章的内容在各章的首页中均有详述，兹不赘言。书中所提出的简化分析技术，不仅切合实际，理论正确，概念清楚，而且计算简便，定性准确，便于手算，同时附有大量算例以说明其应用。

希望本书的出版，能对高层与大跨度结构简化分析技术的研究工作和实用方面有所裨益。书中不足之处敬请读者指正。

著 者

# 目 录

第 1 章 高层建筑风振控制与抗震优化 .....	1
1.1 结构 TLD 风振控制设计与计算 .....	1
1.2 结构风振被动控制设计的简捷分析法 .....	6
1.3 结构风振主动控制设计与耗能控制设计 .....	11
1.4 框—剪结构抗震剪力墙数量的优化 .....	18
1.5 框—撑结构抗震支撑数量的优化 .....	22
1.6 撑—臂结构刚臂数量的优化 .....	27
第 2 章 高层钢结构 .....	31
2.1 交错钢桁架结构的侧移分析 .....	31
2.2 交错钢桁架结构的整体稳定与动力特性分析 .....	35
2.3 巨型钢框架结构的二阶分析 .....	38
2.4 巨型钢框架结构的动力特性分析 .....	43
2.5 钢框架结构的弹性和弹塑性二阶分析 .....	46
2.6 火作用下钢框架结构的分析 .....	57
第 3 章 高层变截面框筒结构 .....	62
3.1 变截面框筒结构的矩阵传递法 .....	62
3.2 变截面框筒结构的最小二乘配点法 .....	68
3.3 变截面框筒结构的有限差分法 .....	73
3.4 变截面框筒结构的剪力滞后系数 .....	74
3.5 变截面框筒结构的整体稳定分析 .....	77
3.6 圆锥形框筒结构的分析 .....	79
第 4 章 大跨度空间钢结构 .....	86
4.1 网架支座预加压力及其简化计算 .....	86
4.2 预应力正交正放网架的分析 .....	89
4.3 网架极限承载力的简捷分析 .....	93
4.4 正交正放网架的弹塑性分析 .....	97
4.5 伞状折网架结构的研究 .....	103
4.6 膜型扁网壳结构的研究 .....	111
4.7 圆孔鸟巢形网架结构的分析 .....	118
第 5 章 大跨度悬索与杂交结构 .....	124

5.1	拉索穹顶结构的弹塑性分析 .....	124
5.2	劲性索结构的分析 .....	130
5.3	椭圆开口索桁架屋盖结构的分析 .....	135
5.4	索承穹顶结构的分析 .....	142
5.5	正交正放索网架结构的分析 .....	148
5.6	张弦梁结构的分析 .....	153
5.7	索—拱体系的静力与动力特性分析 .....	158
5.8	新型索桁架结构的分析 .....	162
<b>第 6 章</b>	<b>其他结构 .....</b>	<b>169</b>
6.1	超长框架结构的温度变形与温度应力 .....	169
6.2	后张预应力混凝土梁的分析 .....	177
6.3	预应力圆拱结构的稳定分析 .....	180
6.4	超大跨度网络拱结构的分析 .....	184
6.5	板式膜结构的分析 .....	190
6.6	密桩—厚筏基础的计算方法 .....	194
6.7	不均匀布桩的桩筏基础分析 .....	199

# 第 1 章 高层建筑风振控制与抗震优化

在高层建筑的抗风设计中，除了必须满足结构的承载力和刚度外，还必须满足居住者舒适度的要求；而影响人体舒适度的最主要因素是振动频率和振动加速度。由于结构的自振频率是结构的固有特性，仅与结构的质量和刚度有关，故调整自振频率将涉及到结构本身，必然增加结构的造价。一个最有效的办法就是在结构上设置控制装置来调整结构的振动加速度，使其满足居住者舒适度的要求，这就是结构风振控制设计。

结构风振控制是近 20 年来发展起来的结构动力学的新兴分支，是结构动力学、控制论和优化理论在风工程中的应用；它是结构抗风设计思想的一个飞跃，为高层建筑的抗风设计开辟了一条新的途径；目前已在美国、日本等国的高层建筑风振控制设计中应用，我国尚处于研究开发阶段。

在本章前三节中，作者分别对 TLD 与 TMD 风振被动控制设计、拉索与挡风板风振主动控制设计及黏弹性耗能器与摩擦支撑风振耗能控制设计作了论述，并提出了一套简化分析技术<sup>[4 5 14]</sup>。

在高层建筑的抗震设计中，框—剪（框—撑）结构中的剪力墙（支撑）作为第一道抗震防线的抗侧力构件，率先抵御水平地震作用的冲击。如果剪力墙（支撑）的水平刚度设计过小，将达不到抵御地震作用的目的。反之，则结构的自振周期减小，地震作用相应加大，且不经济，这就是结构抗震优化设计。

在本章后三节中，作者分别对地震作用下框—剪（框—撑）结构中的抗震剪力墙（支撑）数量的优化及风作用下撑—臂结构刚臂数量的优化作了论述，并直接导出其优化计算公式<sup>[15 17]</sup>，简单实用。

本章各节均有算例以说明其应用。

## 1.1 结构 TLD 风振控制设计与计算

### 1.1.1 概述

风荷载包括两种：一种是长周期的（其值常在 10min 以上），另一种是短周期的（只有几秒钟左右）。考虑到前者的周期远大于结构的自振周期，因而虽其本质是动力，但其作用与静力作用相近，故可视其为静力。后者因其周期较短，故应按动力来分析。实用上常把前者叫静力风，后者叫脉动风。

结构的风振系由脉动风产生的。由于脉动风是动力的，又是随机的，故其理论分析十

分繁杂。为了便于应用，我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)<sup>[6]</sup>根据随机振动理论，考虑脉动风压的空间相关性，按振型分解法，从无限自由度体系出发，得到脉动风荷载的标准值为：

$$p_z = \xi \nu \varphi_z \mu_s \omega_0 \quad (1-1)$$

式中脉动增大系数  $\xi$ 、脉动影响系数  $\nu$ 、振型系数  $\varphi_z$ 、风荷载体型系数  $\mu_s$  及基本风压  $\omega_0$  等，在荷载规范中均有表可查，便于设计应用，是本节计算方法的基础。

结构风振控制设计，首先算出结构在脉动风作用下第一振型的最大加速度  $a$ ，看其是否满足人体舒适度要求：一般要求  $[a] < 0.015g$  (即  $0.15m/s^2$ )，对高层钢结构设计中的公寓建筑  $[a] < 0.20m/s^2$ ，公共建筑  $[a] < 0.30m/s^2$ 。若不满足以上要求，应在结构顶层设置控制装置，以调整结构的水平加速度，使其控制在舒适度范围以内。

结构风振控制可分为被动控制、主动控制和半主动控制三种。本节采用被动控制，其控制力是控制装置随结构一起振动而被动产生的。被动控制装置的种类较多，本节主要论及水箱类 TLD (Tuned Liquid Damper)，即调频液体阻尼器。

TLD 是日本 Soto 等人于 1987 年提出的，它是一种固定在结构楼层 (或顶层) 上的水箱，可以是大型水箱，也可以是多个小型水箱的组合。当结构在脉动风荷载作用下而发生振动时，将带动水箱一起运动，使水箱中的水晃动起来产生波浪，此波浪对水箱壁的水动压力，就构成了对结构的减振力 (即控制力)，从而减小了结构的风振加速度，以满足居住者的舒适度要求。

在我国经济建设飞速发展的今天，高层和高耸结构已越来越多，特别是近年我国兴建了一些高层钢结构，这类结构的风效应尤为突出。因此，TLD 风振控制设计有着广泛的应用前景。

### 1.1.2 水箱 TLD 的水动压力

基本假定：

(1) 水箱中的水是理想流体，即水是不可压缩的和无黏滞的，在结构反应的驱动下只有水平运动而无旋转运动，水的波浪运动是微幅和缓慢的。

(2) 水箱是刚性的，它与所在结构层作相同的水平运动。

(3) 水与水箱壁间无摩擦和黏附作用。

(4) 水箱所在结构层只作沿  $x$  方向的

水平运动，其水平加速度为  $\ddot{X}_k(t)$ 。

根据以上假定，可求得图 1-1 所示的水箱的速度势  $\Phi$  满足拉普拉斯方程<sup>[1 2]</sup>：

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1-2)$$

相应的水动压力：

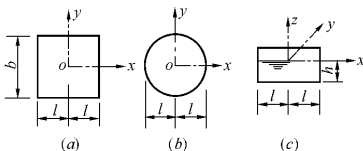


图 1-1 一般水箱

(a) 矩形平面；(b) 圆形平面；(c) 剖面

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1-3)$$

式中  $\rho$ ——水的密度。

由边界条件：

(1) 水箱的水平运动速度为  $\dot{X}(t)$ ，与所在结构层的速度相一致。

(2) 水箱底的竖向速度等于零，即  $\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$ 。

(3) 水箱表面在重力场影响下的平衡条件为

$$u = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

式中  $u$ ——水面波高度；

$g$ ——重力加速度。

对式 (1-2)、式 (1-3) 用分离变量法求解后，进而可以求得水箱水对结构的控制力<sup>[1, 2]</sup>：

$$F_{\text{TLD}} = -M_{\text{F}} \left( \ddot{X}_{\text{k}}(t) + \sum_{n=1}^{\infty} d_n F_n \ddot{w}_n(t) \right) \quad (1-4)$$

式中， $\ddot{w}_n(t)$  为式 (1-5) 的解答：

$$\ddot{w}_n(t) + 2\tilde{\xi}_n \tilde{\omega}_n \dot{w}_n(t) + \tilde{\omega}_n^2 w_n(t) = -\ddot{X}_{\text{k}}(t) \quad (1-5)$$

式中  $\tilde{\xi}_n$ ——水箱水的第  $n$  振型临界阻尼比；

$M_{\text{F}}$ ——水箱水的总质量。

$$F_n = \frac{l}{h\chi_n} \text{th} \left( \frac{\chi_n h}{l} \right) \quad (1-6)$$

水晃动的自振频率：

$$\tilde{\omega}_n^2 = \frac{g}{\lambda} \chi_n \text{th} \left( \frac{\chi_n h}{l} \right) \quad (1-7)$$

其他符号：对于矩形水箱（平面问题）为

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{F}} &= 2\rho l b h \\ \chi_n &= (2n-1)\pi/2 \\ d_n &= 2/\chi_n^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

对于圆形水箱：

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{F}} &= \rho \pi l^2 h \\ d_n &= 2/\mathcal{K}(\chi_n^2 - 1) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

$\chi_n$  为一阶贝塞尔函数  $J_n(x)$  的导数  $J'_n(x)$  的第  $n$  个根，其值依次为 1.841, 5.331, 8.5336...

### 1.1.3 TLD 风振控制设计与计算

国内外的理论与试验分析表明<sup>[1]</sup>：

(1) 将 TLD 水晃动的第一频率  $\tilde{\omega}_1$  调整至与结构的第一频率  $\omega_1$  相近时，风振控制效果最好。

(2) TLD 水的质量  $M_F$  越大，对结构的风振控制效果越好。

(3) 水深与水箱平面尺寸比  $h/2l$  越小，风振控制效果越好（但  $h/2l$  应大于 1/8，以满足深水箱的条件）。

(4) TLD 设置在结构顶层（当只考虑第一振型时）风振控制效果最好。

以上四点可作为风振控制准优设计的依据。为此，本节在风振控制设计中，主要控制第一振型，将水箱 TLD 设在顶层，并取  $\tilde{\omega}_1 = \omega_1$ 。

设水箱所在结构的顶层沿侧向作简谐周期性运动时，其侧移  $X_k(t) = e^{i\omega t}$ ，则  $\ddot{X}_k(t) = -\omega^2 e^{i\omega t}$ ，对脉动风的  $\omega$  采用结构的自振频率  $\omega_1$ ，令  $\tilde{\xi}_1 = 0$ ，由式 (1-5) 得：

$$\ddot{w}_1(t) = \omega_1^2 e^{i\omega_1 t} - \omega_1^2 w_1(t) \quad (1-10)$$

由杜哈梅积分求得  $w_1(t)$  如下<sup>[8]</sup>：

$$\begin{aligned} w_1(t) &= \int_0^t \omega_1 e^{i\omega_1 \tau} \sin(\omega_1 t - \omega_1 \tau) d\tau \\ &= e^{i\omega_1 t} (1 - \cos\omega_1 t) \end{aligned}$$

当  $t = \frac{T_1}{2} = \frac{\pi}{\omega_1}$ ， $\cos\omega_1 t = -1$  时， $w_1(t)$  最大值为：

$$w_1(t) = 2e^{i\omega_1 t} \quad (1-11)$$

将式 (1-11) 代入式 (1-10) 得：

$$\ddot{w}_1(t) = -\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} \quad (1-12a)$$

同理当  $\tilde{\xi}_1 \neq 0$  时，可导得：

$$\ddot{w}_1(t) = -\omega_1^2 e^{-\tilde{\xi}_1 \omega_1 \left(\frac{\pi}{\omega_1}\right)} e^{i\omega_1 t} \quad (1-12b)$$

将其代入式 (1-4) 得：

$$\left. \begin{aligned} F_{\text{TLD}} &= M_F (1 + d_1 F_1) \omega_1^2 e^{i\omega_1 t} \\ \text{或} \quad F_{\text{TLD}} &= M_F (1 + d_1 F_1 e^{-\tilde{\xi}_1 \omega_1 \left(\frac{\pi}{\omega_1}\right)}) \omega_1^2 e^{i\omega_1 t} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中  $\omega'_1 = \omega_1 \sqrt{1 - \tilde{\xi}_1^2}$  及  $e^{i\omega_1 t} = e^{i\pi} = -1$

具体计算步骤如下：

(1) 求出结构第一自振频率  $\omega_1$ ，由式 (1-1) 求出  $p_z$ ，由下式算出：

$$q_z = p_z \mu_r B \quad (1-14)$$

式中  $\mu_r$ ——重现期调整系数，一般取重现期为 10 年， $\mu_r = 0.83$ ；

$B$ ——建筑迎风面的宽度。

(2) 计算结构在脉动风作用下，结构顶点的水平位移  $\Delta$ 。

(3) 计算结构顶点的加速度  $a$ ，其值为  $\Delta\omega_1^2$ 。

(4) 由  $\tilde{\omega}_1 = \omega_1$ ，选择  $h/2l > 1/8$  的某一值，由式 (1-7) 求出  $l$  及  $h$ ，以确定水箱的尺寸。

(5) 由式 (1-13) 计算水箱的水平控制力  $F_{TLD}$ 。

(6) 将  $F_{TLD}$  作用在结构顶点，计算顶点的水平位移  $\Delta_F$ 。

(7) 由  $(\Delta - \Delta_F)\omega_1^2$  等于人体适应度的加速度  $[a]$ ，求出水箱的个数。

#### 1.1.4 算例

现举一算例以说明本法的应用。

**【例 1-1】** 已知：某公寓建筑平面为  $24\text{m} \times 24\text{m}$ ，共 25 层，层高  $h = 4\text{m}$ ，全高  $H = 100\text{m}$ 。采用钢框架结构，其平面如图 1-2 所示。柱的抗弯刚度  $K_c = 18 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}$ ，梁的抗弯刚度  $K_b = 10 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}$ 。

计算抗剪刚度<sup>[7]</sup>：边柱的  $Q_c = 2.934783 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ，中柱的  $Q_c = 4.821429 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ，整个结构的抗剪刚度为：

$$\begin{aligned} c_f &= h \sum Q_c \\ &= 4(2.934783 \times 8 + 4.821429 \times 8) \\ &= 248.198784 \times 10^4 \text{kN} \end{aligned}$$

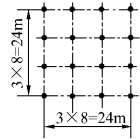


图 1-2 结构平面

计算自振频率：

沿全高质量均匀分布， $m = 117.4312 \text{kN} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-2}$

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{\pi}{2H} \sqrt{\frac{c_f}{m}} = \frac{\pi}{200} \sqrt{\frac{248.198784 \times 10^4}{117.4312}} \\ &= 2.283642 \text{s}^{-1} \\ T_1 &= 2.7514 \text{s} \end{aligned}$$

计算脉动风引起的顶点位移：

基本风压： $0.75 \times 1.1 = 0.825 \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$

由荷载规范算出：

$$\begin{aligned} p_{H=100} &= 1.821298 \text{kN} \cdot \text{m}^{-2} \\ p_{H=10} &= 0.2914 \text{kN} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

由下列式计算  $\Delta$  值：

在均匀风载作用下的顶点位移：

$$\Delta = qH^2/2c_f$$

在倒三角形风载作用下的顶点位移：

$$\Delta = q_{(H)}H^2/3c_f$$

在顶点作用集中力  $P$  时的顶点位移：

$$\Delta = PH/c_f$$

求出风荷载作用下： $\Delta = 0.063381\text{m}$  及加速度  $a = 0.063381 \times (2.283642)^2 = 0.330529 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} > 0.20$ 。

选用水箱：

选  $h/2l = 0.30 > 1/8$ ，则

$$d_1 F_1 = 0.632298,$$

$$b = 2l = 4.35\text{m}, h = 1.3\text{m},$$

$$M_F = \frac{10}{g}(4.35)^2 \times 1.3 = 25\text{kN} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\begin{aligned} F_{\text{TLD}} &= 25 \times (1.0 + 0.632298) \times (2.283642)^2 \\ &= 212.8117\text{kN} \end{aligned}$$

设矩形水箱的个数为  $N$ ，则

$$\Delta_F = \frac{212.8117 \times 100N}{248.199 \times 10^4} = 8.574237 \times 10^{-3}N$$

由  $(0.063381 - 8.574237 \times 10^{-3}N) \times (2.283642)^2 = 0.20$

求出  $N = 2.9712$ ，取 3 个水箱， $\Sigma M_F = 75\text{kN} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ，约为建筑总质量的  $1/160$ 。

小结：

(1) 调频液体阻尼器 (TLD) 具有简单、经济、易于安装、便于调整水晃动的频率、维护少等特点；且有与生活用水和消防用水的水箱设计合二而一的优点。因此，越来越多地受到国内外工程界的重视。

(2) 本节采用的风振控制准优设计的四点依据是可行的。

(3) 本节提出的计算方法，是以设计人员熟悉的荷载规范为基础，计算步骤具体，可操作性强，为结构的方案设计和初步设计提供一个简捷的计算方法，便于手算。

(4) 算例计算结果表明，设置 TLD 后，结构的顶点水平加速度由  $0.3305\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  降至  $0.20\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，减小了 40%，其效果十分明显。

(5) 本节方法同样适用于调频质量阻尼器 (TMD) 系统的设计计算。

## 1.2 结构风振被动控制设计的简捷分析法

风振控制设计的计算是比较繁复的，有学者提出了准最优控制算法和传递函数算法<sup>[1]</sup>，这些算法要靠计算机才能实现。本节以设计人员熟悉的荷载规范<sup>[6]</sup>为基础，为结构的初步设计提供一个简捷的分析方法。

### 1.2.1 风振被动控制装置的类型

风振被动控制装置的类型有很多种，但目前国内外采用较多的，主要有调频质量阻尼

器 (TMD) 和调频液体阻尼器 (TLD) 两大类。其中 TMD 又分为悬吊式和支撑式两种, TLD 又分为一般水箱 (矩形和圆形) 和 U 形水箱两种。现分别简介绍下。

### 1. TMD 控制装置

当结构在风荷载作用下产生水平风振反应时。就会带动调频质量阻尼器的振动, 而调频质量阻尼器的振动惯性力 (即被动控制力) 又会反馈回来作用于结构上, 从而减小了结构的风振加速度, 以满足居住者的舒适度要求。

图 1-3 (a) 所示的悬吊式 TMD, 是将质量块悬吊在结构上, 并将弹簧和阻尼器系统设置在悬吊的质量块与结构之间。图 1-3 (b) 所示的支撑式 TMD, 是将质量块用摩擦系数极小的支撑系统支撑在结构上, 并将弹簧和阻尼器系统设置在支撑的质量块与结构之间。TMD 的主要部件有:

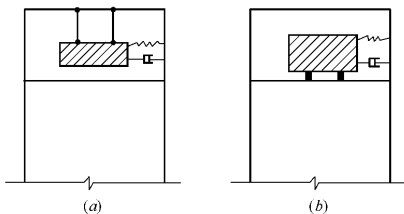


图 1-3 TMD 控制装置示意图

(a) 悬吊式 TMD; (b) 支撑式 TMD

#### (1) 质量块

一般可利用混凝土楼板, 或专门制作的混凝土块, 装铅的钢箱。质量块越大风振控制效果越好, 但也不宜过大, 否则难以实现。

#### (2) 支撑系统

悬吊式 TMD 的支撑系统采用挂钩。支撑式 TMD 可由若干个在钢板上滑动的液压平衡千斤顶来组成, 也可采用质量块与支承钢板之间增设油膜层的做法。

#### (3) 弹簧系统

弹簧系统可用普通的螺旋弹簧, 也可用气动弹簧制作而成。

#### (4) 阻尼系统

通常采用油压阻尼器, 通过调节活塞面积和油的黏滞度来控制阻尼值。一般它是与弹簧系统配对设置。

### 2. TLD 控制装置

当结构在风荷载作用下产生水平风振反应时, 将带动固定在结构上的水箱一起运动, 使水箱中的水晃动起来产生波浪, 此波浪对水箱壁的水动压力, 就构成了对结构的减振力 (即被动控制力), 从而减小了结构的风振加速度, 以满足居住者的舒适度要求。

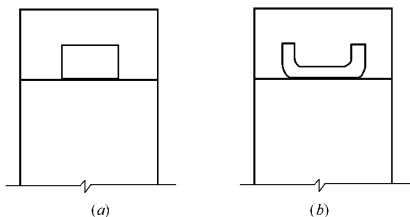


图 1-4 TLD 控制装置示意图

(a) 一般水箱; (b) U 形水箱

图 1-4 (a) 所示的一般水箱 (矩形和圆形) 可以利用生活用水和消防用水的水箱进行设计, 简单方便, 易于在高层建筑中推广。图 1-4 (b) 所示的 U 形水箱是一种特制的 U 形等截面管

状水箱，并在管道中间设有一个隔栅以增加阻尼。

### 1.2.2 各类被动控制装置设计参数的选择

结构在风荷载作用下的响应，一般只需考虑基本振型；对风振进行控制，主要就是控制第一振型的振动。因此，在控制设计中将被动控制装置设在结构的顶层，对风振控制效果最好。

国内外风振控制的理论分析和试验研究表明<sup>[1 3]</sup>：

(1) TMD (或 TLD) 的基本频率  $\tilde{\omega}$ ，与结构的基本频率  $\omega_1$  相近时，对结构的风振控制效果最好。

(2) TMD (或 TLD) 的质量越大，对结构的风振控制效果越好。

(3) 图 1-1 所示的一般水箱的水深  $h$  与水箱的平面尺寸  $l$  之比越小，对结构的风振控制效果越好 (但  $h/l$  应大于  $1/4$ ，以满足深水箱的条件)。

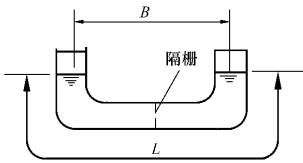


图 1-5 U 形水箱

(4) 图 1-5 所示的 U 形水箱的尺寸， $B/l$  越大 (但应小于 1)，对结构的风振控制效果越好。

综上所述，对被动控制准优参数的设计，本节建议：

- (1) 将 TMD (或 TLD) 设置在结构顶层。
- (2) 将 TMD (或 TLD) 的  $\tilde{\omega}_1 = \omega_1$ 。
- (3) 质量比取  $0.005 \sim 0.02$  之间。

(4) 由  $\tilde{\omega}_1 = \omega_1$  求出 TMD 的  $K_T$  或 TLD 的水箱尺寸。(可由式 (1-14) ~ 式 (1-16) 求之)。

而  $\tilde{\omega}_1$  的计算公式<sup>[1]</sup>如下：

对于 TMD：

$$\tilde{\omega}_1^2 = \frac{K_T}{M_T} \tag{1-15}$$

式中  $K_T$  及  $M_T$ ——TMD 的刚度系数及质量。

对于 TLD：

一般水箱 
$$\tilde{\omega}_1^2 = \frac{g}{l} X_1 \text{th} \left( \frac{x_1 h}{l} \right) \tag{1-16}$$

式中  $g$ ——重力加速度；

$$X_1 = \begin{cases} \pi/2 (\text{用于矩形水箱}) \\ 1.841 (\text{用于圆形水箱}) \end{cases}$$

U 形水箱 
$$\tilde{\omega}_1^2 = \frac{2g}{L} \tag{1-17}$$

### 1.2.3 结构风振被动控制的简捷分析

结构在 TMD 或 TLD 作用下和随机风作用下的振动方程为：

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = [P_z] - [F_{Tt}] \quad (1-18)$$

式中  $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ——结构的质量、阻尼、刚度矩阵；

$[X]$ 、 $[\dot{X}]$ 、 $[\ddot{X}]$ ——结构层的位移、速度、加速度向量；

$[P_z]$ ——作用在结构上的动力风载向量；

$[F_{Tt}]$ ——TMD 或 TLD 的作用力（即被动控制力）。

由于作用在结构上的动力风载是由脉冲风产生的， $[F_{Tt}]$ 是随机的，因此求解式(1-18)比较繁复，有学者提出了准最优控制算法及传递函数算法<sup>[1]</sup>，这些算法需应用计算机进行计算。为此，本节提出一个简捷分析方法。此法是以设计人员熟悉的荷载规范<sup>[6]</sup>为基础，将式(1-18)中的 $[P_z]$ 由荷载规范算出。如果 $[F_{Tt}]$ 能设法求出，问题则迎刃而解，现述之如下：

由文献[1]按以下公式计算 $F_{Tt}$ ：

### (1) TMD

$$F_{Tt} = -M_T[\dot{w}_1(t) + \ddot{X}_k(t)] \quad (1-19)$$

式中  $M_T$ ——TMD 的质量。

### (2) 一般水箱

$$F_{Tt} = -M_T[\ddot{X}_k(t) + d_1 F_1 \dot{w}_1(t)] \quad (1-20)$$

式中  $F_1 = \frac{1}{X_1 h} \text{th}\left(\frac{X_1 h}{L}\right)$ ；

$d_1 = 8/\pi^2$ ， $M_T = 2\rho l b h$ （用于矩形水箱）；

$d_1 = \frac{2}{1.841^2 - 1}$ ， $M_T = \rho\pi l^2 h$ （用于圆形水箱）；

$\rho$ ——水的密度。

### (3) U形水箱

$$F_{Tt} = -\rho A[B\dot{w}_1(t) + L\ddot{X}_k(t)] \quad (1-21)$$

式中  $A$ ——U形水箱的横截面积。

以上， $\ddot{X}_k(t)$ 为 TMD 或 TLD 所在结构层的反应加速度，而 $\dot{w}_1(t)$ 可由下式求得：

$$\dot{w}_1(t) + 2\bar{\zeta}_1 \bar{\omega}_1 \dot{w}_1(t) + \bar{\omega}_1^2 w_1(t) = -\ddot{X}_k(t) \quad (1-22)$$

当为 TMD 时，式中  $\bar{\zeta}_1 = \frac{C_T}{2\bar{\omega}_1 M_T}$ ， $C_T$ 为 TMD 的阻尼；可建议 TMD 的 $\bar{\zeta}_1$ 为 0.04~0.06<sup>[3]</sup>。当为 TLD 时， $\bar{\zeta}_1$ 可按相应水箱的公式<sup>[1]</sup>求之。对于 U 形水箱，应将式(1-22)

等号右边的 $-\ddot{X}_k(t)$ 改为 $-\frac{B}{L}\ddot{X}_k(t)$ 。

设 TMD 或 TLD 所在结构层沿侧向作简谐周期性运动时，其侧移 $X_k(t) = X_1 e^{i\omega t}$ ，则