

空间网架结构的振动控制研究

倪军 胥传喜

(河海大学, 南京 210098)

摘要

简要评述了适用于空间结构的振动控制方法, 研究了隔振技术应用于网架结构的可能性。结合某升船机工程, 提出了机房整体网架结构方案及其抗振与抗风控制措施。

关键词: 空间结构 网架 振动 控制

1 前言

大跨度空间网格结构及张力结构刚度低、阻尼小, 对地震作用和脉动风荷载等振动荷载十分敏感。而过度的振动变形, 将导致使用者心理及生理上的不适, 影响结构的使用功能甚至结构的安全。控制结构的振动响应, 对大跨度空间结构显得尤为重要。

传统的抗振方法是纯粹从强度设计角度考虑的, 即依靠结构主体本身的非弹性状态来消耗振动能量, 这是一种“硬碰硬”的消极抵御的设计思想。60年代末以来, 各国对建筑物基底隔振投入了较多的研究力量, 70年代, 新西兰已开发出铅芯叠层橡胶垫。基于现代控制理论的结构控制的概念, 也是在70年代由T.P.Yao提出的。许多学者对此进行了广泛的研究。进入80年代, 研究的重点转移到主动控制的设计方法上, 而被动控制则在理论和应用上都取得了可喜的成果。

我国学者从60年代开始关注基础隔振理论, 70年代中期开始进行工程试点, 80年代研究工作得到了更广泛的开展。在基础隔振方面, 目前的理论和技术已较为成熟, 我国已建成数十座各类试点工程, 同时已在1996年底着手编制有关技术规程; 在结构控制的其他研究领域, 也取得了一定的理论研究成果。

到目前为止, 结构的振动控制已发展为包括被动控制(Passive Control)、主动控制(Active Control)及半主动控制(Semi-Active Control)三种形式的多种方法。就空间结构而言, 网架等网格结构以采用基础隔振控制方式为宜, 充气结构(Pneumatic Structures)以采用内部超压自动控制方式较为合适, 而悬索结构(Cable-Suspend Structures)、索撑结构(Cable-Support Structures)及张力薄膜结构(Tensioned Membrane Structures)等张力结构则可借鉴主动拉索控制方式。通过液压设备张拉或放松拉索, 控制结构的刚度, 从而控制结构的振动。本文着重研究网架结构的振动控制。

2 隔振技术与网架结构的振动控制

地震发生时, 强烈的地面运动迫使结构产生振动。受迫振动的结构有着不容忽视的惯性作用, 从而使结构产生很大的内力和变形, 并有可能导致结构丧失使用功能, 甚至破坏或倒塌。隔振技术或者说基础隔震技术, 是在结构物的底部与基础面间设置隔振装置, 用以延长结构的自振周期, 吸收地震能量, 从而降低上部结构的反应。

一个有效的隔震装置必须具有如下的功能:

1. 在满足必要的竖向承载力的同时, 应尽量给结构提供较大的侧向位移能力;
2. 应尽可能增大结构的阻尼;
3. 具有足够的初始刚度及弹性恢复力。

目前常用的结构基础隔震装置有橡胶隔震垫、摩擦滑板以及与其原理相似的粉粒垫层、涂层垫层、滚珠及滚轴隔震器等。其中有的隔震器本身阻尼很小, 必须结合阻尼器一起使用。常用的阻尼器有铅挤压阻尼器、钢梁屈服阻尼器及摩擦阻尼器等。

网架结构的自振特性研究表明, 网架的边界条件及约束强弱对网架结构的动力反应有较大的影响。当水平约束很强时, 主要激发竖向振型; 反之, 则激发水平振型。水平约束越弱, 结构的基本周期越长, 地震反应就越小。当沿某个方向上的约束加强后, 该方向上的水平地震作用也将增大。这就是说, 可以通过改变支座的水平约束强弱来控制结构所受的地震作用, 从而控制网架结构的动力反应。尤其是对于坚硬场地上的网架结构, 利用水平约束较弱的“隔震支座”, 就可能大大减低结构的地震反应。

目前在网架及网壳等空间网格结构中普遍采用的各种支座, 大多数已具备了上述隔震装置的基本功能, 具有一定的隔震效果。例如, 在单面及双面弧形压力支座中, 常将支承垫板的锚栓孔做成椭圆形, 其作用也就是使支座在满足必要的竖向承载力的同时, 在水平方向能作微量移动; 平板橡胶支座则完全可以看成是橡胶隔震垫在网架支座上的具体形式, 而文献[3]中的球形复合支座则可以看出是平板橡胶支座的一种改进形式, 当支座处产生一定量的水平位移后, 支座能在该方面予以一定的约束。至于文献[4]提出的弹性滑动支座或滚动支座, 其原理则分别类似于粉粒垫层或滚珠与滚轴隔震器。

然而, 由于网架结构本身的抗震性能较好, 再加上一般网架工程的支座在柱顶或圈梁上, 设置隔震支座有一定的困难, 因此直到目前为止, 人们在研制和选用上述支座时, 更多的是为了适应温度或荷载变化的要求, 而很少考虑到它们的隔振功能; 在进行网架结构动力分析时, 也未考虑支座的隔振效果。随着隔震技术的发展和成熟, 将隔振技术应用于网架等网格结构, 从结构隔震的角度来研究、设计支座, 并寻求一套考虑支座隔振作用的结构分析方法, 从而把空间网格结构设计成隔振结构, 也将势在必行。更进一步, 还可以将耗能减振技术应用于网格结构, 即在采用上述“隔振支座”的同时, 将某些特定的节点设计成“隔振节点”或称为“耗能减振节点”, 将某些特定的杆件设计成类似于铅挤压阻尼器或摩擦阻尼器的“阻尼杆件”。地震发生时, 通过这些“耗能节点”或“阻尼杆件”来消耗地震能量。由于这些节点或杆件是预先设计确定的, 在它们受地震作用消耗能量乃至屈服后, 并不致于危及整个结构。而在震后, 可以通过更换节点或通过外力使“阻尼杆件”复位来修复整个结构, 方便可行。对于一些特殊的网

架结构, 上述思想特别有意义。

3 某开船机机房整体网架结构及其振动控制方案

3.1 工程背景及机房整体网架结构方案的提出

开船机是一种快速过坝设施, 它类似于高层建筑中的电梯, 是一种垂直运输装置, 船只从下游开进承船箱, 经开船机提升后直接开往上游, 反之亦然。因此经开船机过坝比经船闸可节省许多时间。

某工程的开船机的承船箱有效尺寸为长 \times 宽 \times 水深 $=120\text{m}\times 18\text{m}\times 3.8\text{m}$, 悬吊升程为 113m , 最大起重量为 118000kN , 采用钢丝绳卷扬提升平衡重方案。卷扬机布置在距基岩 150m 高的4个“双日字”型钢筋混凝土筒体塔柱的顶部, 每个“双日字”型塔柱的平面尺寸为 $53.2\text{m}\times 16.0\text{m}$, 壁厚为 1m ; 塔柱顶部平台钢筋混凝土厚 2.5m , 4个塔柱间用钢筋混凝土梁板体系相连接, 上下游塔柱间 13.6m 范围内开有吊物孔, 见图1。因检修卷扬机等需要, 在塔柱顶部平台布置有一台吊轨中心距 48m 、高 26m 、起重量为 2000kN 的大型门机。因此, 柱顶机房要求跨度不小于 57m , 净高不小于 28m , 长度为 120m , 同时在两侧及下游设有附属机房。

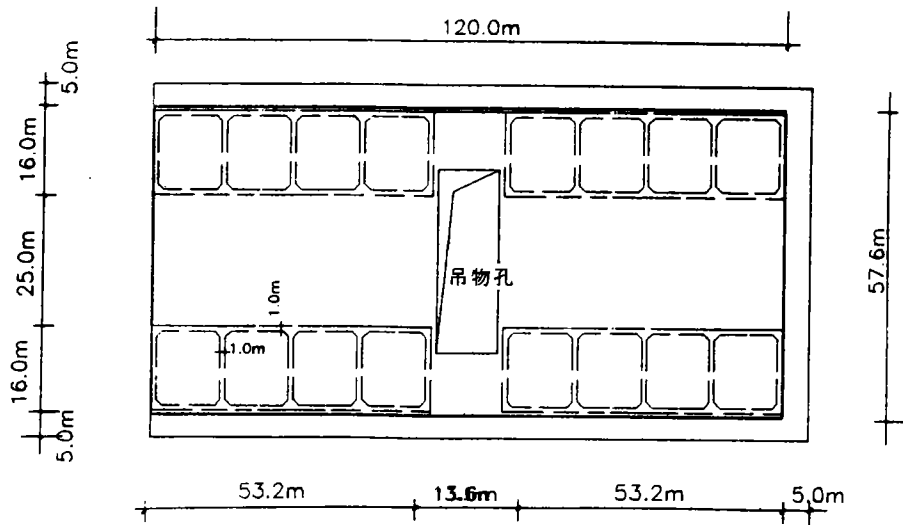


图1 塔柱平面布置图

与一般的工程相比, 本工程具有以下特点: 1. 机房不是建造在地上, 而是座落在高度 150m 的开船机塔柱的顶端。由于塔柱由4个“双日字”型钢筋混凝土筒体组成, 仅在顶部以梁板体系相连接且开有较大的吊物孔, 同时, 上、下游筒体下部实体混凝土厚度不一样, 导致各筒体刚度不同, 因此, 在风、地震、日照等作用下, 4个筒体间将产生不协调变形; 2. 机房位于 150m 高的塔柱顶部, 地震经塔柱传至机房下部将有较大的放大作用(初步研究结果表明将放大至 $2\sim 2.5$ 倍); 3. 工程地处谷口, 在风载作用下机房将产生变形和振动。

因此, 机房结构方案应能解决这样几个问题: 1. 较好地适应下部结构的不协调变形; 2. 方便中间 13.6m 范围内梁柱与围护结构的处理; 3. 便于控制结构的振动反应。

经研究, 提出的方案之一是整体网架结构方案。该方案是屋盖及四周墙体均由网架构成, 屋盖网架与墙体网架通过节点组成一整体, 承重墙体网架的支座直接落在塔柱顶部平台上。采用压型钢板围护。经选型分析, 确定采用正方形四角锥体系, 网架的网格尺寸为: 屋盖部分长度方向为 $33 \times 3.6\text{m}$, 跨度方向为 $16 \times 3.6\text{m}$, 网架厚 4.0m; 单向双坡起拔, 起拱高 1.2m, 墙体部分长度方向为 $33 \times 3.6\text{m}$, 跨度方向为 $16 \times 3.6\text{m}$, 高度方向为 $7 \times 3.6\text{m} + 5.5\text{m}$, 墙体厚 3.0m; 门洞处作抽空处理。整个网架结构共有 2 870 个节点, 11 276 根杆件。

3.2 机房整体网架结构的振动控制

对于本工程网架结构而言, 致振原因主要是地震和风。由于前述原因, 对本工程采取适当的抗振及抗风控制措施就显得更为重要, 也更有意义。

前文提出的整体网架结构方案, 除了为适应下部结构外, 在很大程度上正是为了便于对其实施振动控制。该方案整个机房犹如一个倒扣在塔柱顶部平台上的网架盒子, 网架的支座直接落在平台上。只要在网架与平台接触处设置合适的隔振支座, 在强烈地震或脉动风振作用下, 整个机房在柱板平台上就犹如船浮在水面上, 这样, 机房结构的振动反应就会大大降低, 见图 2。

振动控制的效果及安全性能如何, 关键在于隔振支座的选择和设置。为防止机房在平台上出现过大的滑移, 可采用适当的限位装置。

采用上述振动控制方案, 除能消耗地震及风振能量、控制结构的振动反应外, 还有两个显著的好处: 一是便于释放温度应力; 二是可以较好地适应下部结构, 尤其是上、下游塔柱间可能出现的不协调变形。

由于工程地处谷口, 机房位于塔柱顶部, 且本身体型尺寸又很大, 因而风荷载是机房网架结构受力分析的主要荷载。在抗风设计方面, 除了采用前述隔振方法来消耗脉动风载的能量, 控制机房结构的振动外, 还可以采用增大结构表面粗糙度、开窗卸风及导风等方法^[9]。

4 结语

本文在分析了适用于空间结构的振动控制方法之后, 着重就隔振技术应用于空间网架结构进行了分析。

在充分顾及结构振动控制要求的前提下, 提出了某升船机机房整体网架结构方案, 研究成果可供实际工程施工图设计时参考。

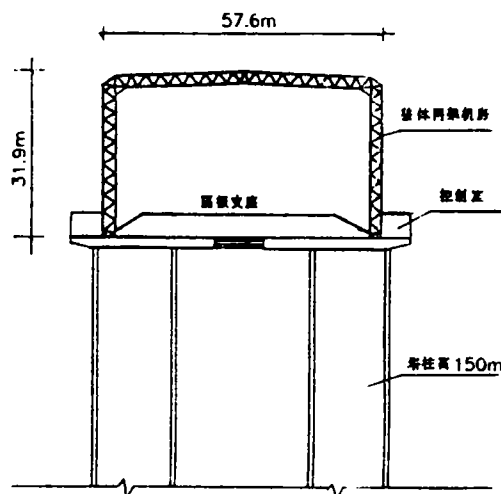


图 2 机房网架振动控制方案

参 考 文 献

- 1 胥传喜. 基础隔振技术的研究及应用. 工业建筑, 1993(2)
- 2 胥传喜, 钱若军. 隔震技术及其在空间网格结构中的应用. 第六届空间结构学术会论文集, 北京: 地震出版社, 1992
- 3 陈丙, 王志明. 橡胶支座与球形复合支座性能及其在网架结构中的应用. 建筑结构学报, 1991, 12(2)
- 4 孟凌. 弹性滑动 < 滚动 > 支座. 第五届空间结构学术会议论文集, 1990
- 5 胥传喜, 张光富. 结构的概念性设计及其应用. 结构工程师, 1997

A STUDY OF CONTROLLING THE VIBRATION OF SPACIAL TRUSS STRUCTURE

Ni Jun Xu Chuanxi

(Hehai University, Nanjing 210098)

ABSTRACT

This paper briefly throws light on the methods suitable for controlling the vibration of the space structure, studies the possibilities of using technique of base isolation to the truss structures. For some ship-lifting machinery room, the scheme of integral truss structure and the controlling measures against earthquake and wind vibration are presented.

KEY WORDS: Space structure Space truss Vibration Control