

建筑科学研究报告

REPORT OF BUILDING RESEARCH

1982

No.17

北京气象塔的振动与减振措施

The vibration and Damping of the Beijing Atmospheric
Monitor Guyed Mast

中国建筑科学研究院
CHINESE ACADEMY OF BUILDING RESEARCH



目 录

一、前言.....	(1)
二、塔的使用功能与结构特点	(1)
三、塔振宏观、实测情况.....	(3)
四、塔振起因、危害性的分析	(6)
五、减振措施的设计和主要特性	(6)
六、橡胶减振器的使用效果	(11)
七、小结	(14)

北京气象塔的振动与减振措施^{*}

中国建筑科学研究院建筑标准设计研究所

姜 峻 岳

一、前 言

北京气象塔是目前亚洲最高的气象专用塔,由中国建筑科学研究院建筑标准设计研究所设计,中央广播事业局广播设备制造厂制造安装。于1977年建成后发生振动现象,影响塔的使用功能。中国建筑科学研究院建筑标准设计研究所会同中国科学院大气物理研究所组织开展了北京气象塔的振动与减振措施研究工作,参加的单位有北京橡胶制品研究所、中国科学院力学研究所、中国建筑科学研究院工程抗震研究所、清华大学建工系等。经过两年多的现场观测、试验分析,终于查清塔的振动为微风风激振动,系由卡门旋涡所引起;与此同时,还研制成功橡胶减振器,安装于塔的各层纤绳上,利用橡胶阻尼吸能原理,消减纤绳振动能量,从而消除风激振动对塔的危害影响,保证塔的良好使用功能。这一问题的解决,为我国高耸塔桅结构、桥梁结构、输电线路等工程的防振、减振设计、研究和施工,积累了经验。

二、塔的使用功能与结构特点

(一) 塔的使用功能

北京气象塔高度325米,塔上沿高度设有15层工作平台,每个平台上对称设置2付伸臂,伸臂上面装有观测风向、风速、温度、湍流等仪器设备。主要为开展大气污染规律研究和大气物理科学研究提供科学数据。

(二) 塔的结构特点

如图1所示,塔的结构为三边形格构拉线式塔,横截面三角形的边宽2.7米,塔体在纤绳节点间的平均间距60米,塔顶悬臂长度25米。结构材料采用优质碳素钢20号和普通低合金钢16Mn的无缝钢管,钢管直径为 $\phi 95 \sim \phi 219$ 。

纤绳设置为三方、五层共15根,纤绳间在水平投影面上的夹角互为 120° ,纤绳与水平面间的夹角为 $28^\circ \sim 50^\circ$,单根纤绳的长度为114~389米,纤绳材料采用镀锌圆股钢丝绳,规格为 $7 \times 19 - \phi 36$, $7 \times 27 - \phi 44.5$, $7 \times 37 - \phi 50.5$,其相应的单位长度重量为5.3、7.3、10.0公斤/米,钢丝绳的钢材为95MnNb,抗拉强度为180~210公斤/平方毫米,纤绳安装时施加的初应力为16~22公斤/平方毫米,初拉力为13.2~25.2吨。

结构连接:工厂内的连接全部为焊接,工地连接全部为螺栓连接,塔节单元之间为法

* 参加这项工作的还有标准所刘其祥同志。本研究工作得到标准所李瑞群同志的指导。

三、塔振宏观、实测情况

(一) 塔振宏观情况

1977年5月至7月,进行塔体结构安装。于6月20日凌晨1时左右,塔第一次发生振动,主要振动特征:纤绳和平台栏杆、爬梯等柔性构件有明显颤动,用手触摸有发麻感,同时伴随有类似金属撞击、波浪翻腾的嗒嗒响声,振动持续的时间约一小时。此后,塔的振动和响声即经常不定时的发生,每次振动持续的时间长短不等,长则可达几小时,短则仅十多分钟。根据观测分析,响声是由于塔体振动时,塔上柔性构件颤动而发生,并通过塔底部空腔加以放大。这种响声夜间在距塔250米远的村庄内,可清晰地听见。

通过对塔振宏观现象的多次观察,可概括塔振的相对规律性如下:发生振动的次数,夜间多于白天,早晨、傍晚和午夜多于其他时间,阴天稍多于晴天,一般是在微风(约二级风、风速3米/秒左右),大气气流比较稳定的状态下发生;在无风、大风和下雨天的情况下没有发生振动。

(二) 塔振实测情况^[9]

1977年6月至9月,进行了第一阶段塔振实测,先后由中国科学院力学所、地质所和中国建筑科学研究院抗震所、物理所等单位分别进行了多次现场观测工作。主要数据资料如下:

1. 纤绳自振频率:第一、二层为13、17赫兹,第三、四、五层为10~11赫兹;
2. 塔体振动频率:各次测得的数值有一定的变化幅度,大致为10、12.5、13.5赫兹;
3. 塔体振动以水平振动为主,垂直振动微弱,垂直振幅比水平振幅小很多倍;
4. 塔振与地面外界机械振动干扰源无关。

其中,1977年8月23日、24日记录到的一次塔振情况:地面无明显干扰,塔体有明显的12.5赫兹的谐振,波形呈拍状,并有1赫兹左右的大波,塔振有响声,持续时间约20分钟。其振动波形图及功率谱图示于图2、图3,各测点位移幅值列于表1。

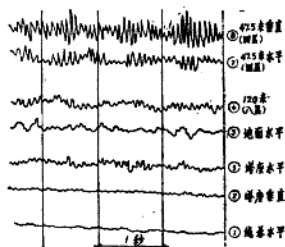


图2 塔振有响声、有谐振时,塔体和地面的振动波形图

表1

测点位置	1	2	3	4	5	6	7	8
	绳基水平	塔座垂直	塔座水平	地面垂直	地面水平	120米水平	47.5米水平	47.5米垂直
12.5Hz的位移(μ)	0.114	0.832	3.26	很小	0.04	27.8	35.0	18.0
1Hz的位移(μ)						21.2	22.2	

1978年9月~11月进行了第二阶段塔振实测,纤绳和塔体分别由中国科学院力学所和

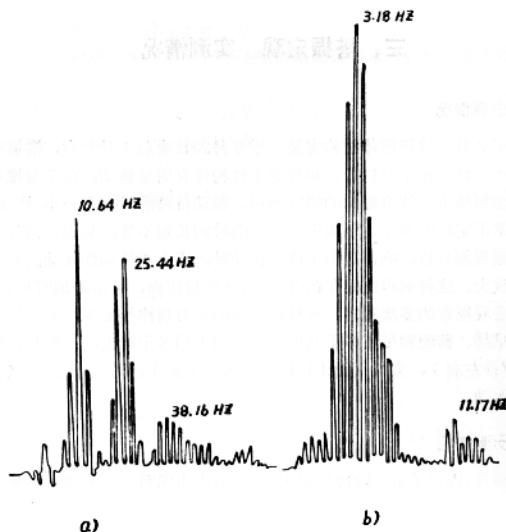


图 3 塔振有响声时塔体振动和地面运动的功率谱图

a) 塔体120米处水平振动 b) 地面水平运动

中国建筑科学研究院抗震所进行。主要数据如下：

1. 纤绳自振频率：第一、二、三层分别为13~15、17、14赫兹，第四、五层为11赫兹；
2. 塔体振动频率为14赫兹左右。

其中，1978年11月7日、8日记录到的两次塔振情况如下：

1. 塔振无响声，塔体主要为1.5赫兹左右的谐振；
2. 塔振有响声，塔体有明显的14赫兹左右的谐振，同时有1赫兹左右的大波，塔振时的响声较大，持续时间约30分钟。

以上两次振动波形图示于图4、图5，各测点位移幅值列于表2。

表 2

测 点 位 置	塔 振 情 况			
	塔 振 无 响 声、有 谐 振		塔 振 有 响 声、有 谐 振	
	频 率		与 方 向	
	1.5Hz		14.0Hz	
	位		移 (μ)	
	东 西 向	南 北 向	东 西 向	南 北 向
160米(十层平台)	12.20	6.78	27.05	31.69
240米(十三层平台)	11.04	17.05	29.16	48.96
280米(十四层平台)	28.30	32.46	46.38	40.38

注：位移指峰——峰值

(三) 纤绳振动半波长的观测

1978年9月22日早晨第一次详细观察了纤绳振动呈现驻波分布情况,能清楚地看到纤绳靠近地锚一端第一、二个波腹点与波节点,第三、四、五层纤绳的振动半波长约为5~6米。

事后按两端固定的弦线振动半波长计算公式^[1]

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{d}{400V} \sqrt{\frac{9.81T}{q}} \quad (1)$$

进行验算,其结果列于表3。

表3中所列风速是按当时观察到的实际情况,并结合观测塔振时实测的风速值进行估算的。计算所得振动半波长5.7~6.6米,与后来实际测量的结果是很接近的。

再以3米/秒的风速,应用卡门旋涡频率计算公式^[1]

$$f_w = 200 \frac{V}{d} \quad (2)$$

可得相应的纤绳上的卡门旋涡频率

$$f_w = 200 \times \frac{3}{50.5} = 11.9 \text{赫兹}$$

这个数值与第三、四、五层纤绳自振频率的实测值10~11赫兹是接近的。

(四) 人体抑制塔振的实验

在观测塔振过程中,一次偶然发现木杉杆(6~7米长)用麻绳捆绑在振动着的纤绳上,纤绳的振动即可停止。于是进行了直观而有趣的实验,利用人体的阻尼作用来抑制塔的振动。即同时由三个人分别站在三个方向的第四层纤绳上,用双手紧握第五层纤绳,大约有1/2~2/3的人体重量悬挂在第五层纤绳上,其余1/2~1/3的人体重量系压在第四层纤绳上。这样以来,大约经过二分钟左右,塔的振动即可抑制住;接着人离开纤绳,又大约经过二分钟左右,塔的振动状态又重新恢复,这样的实验反复进行过多次。充分证明纤绳的起振在塔的起振之前,塔的振动是由纤绳振动所引起,同时也说明利用人体阻尼抑制塔振是有效的。

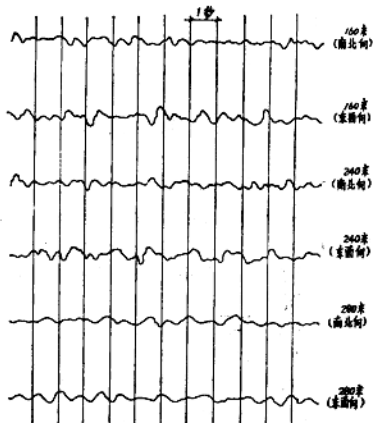


图4 塔振无响声、有谐振时,塔体振动波形图

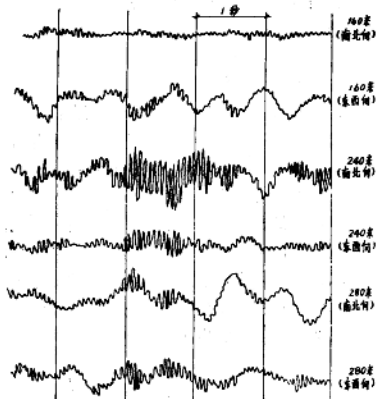


图5 塔振有响声、有谐振时,塔体振动波形图

表 3

纤 绳 层 次	纤 绳 直 径 d (毫米)	纤 绳 重 量 Q (公斤/米)	纤 绳 初 拉 力 T (公斤)	风 速 v (米/秒)	振 动 半 波 长 $\frac{\lambda}{2}$ (米)
三	50.5	10	18740	3	5.7
四	50.5	10	23420	3	6.3
五	50.5	10	25200	3	6.6

四、塔振起因、危害性的分析

(一) 塔振起因的分析

根据对塔振观测实验情况的综合分析,得知塔振大多数发生于早晨、傍晚、夜间平稳微风(风速3米/秒左右)情况下,即气象学中称为稳定场的状态(中性场也有发振情况,但发振概率低而且能量小),在这种情况下,大气气流中的各层很少能量交换,正是流体力学中形成卡门旋涡的适宜条件。卡门旋涡效应可以造成圆形截面物体的涡流激振^[1],而该塔是一个高柔度、低阻尼的高耸构筑物,各层纤绳均为圆形截面的钢丝绳,自振频率实测值为10~17赫兹,彼此之间频差范围较小,容易形成谐振。而这些数值与前面按经常发生塔振时的风速3米/秒计算所得纤绳上的卡门旋涡频率11.9赫兹,以及塔振时(即塔有响声时的振动)的振动频率10~14赫兹是很接近的。另一方面塔体自振频率近似计算值为0.32~0.37赫兹,远小于上述塔振时的振动频率,从而可以判断塔振的发生不可能首先在塔体上产生。同时从现场人体抑制塔振的实验情况表明纤绳起振在塔的起振之前,进一步证明塔体振动是由于微风产生卡门旋涡,激发纤绳振动并形成谐振,最终导致整个塔发生振动。

(二) 塔振危害性的分析

塔振的危害性概括起来有以下四点:

1. 影响塔的使用功能,因为气象塔本身就是气象观测仪器设备的组成部分,塔发生微风振动,必然影响到观测数据的精度;
2. 塔振是在稳定微风情况下发生的,塔体振动位移幅值较小,最大位移幅值为50微米左右。而塔的设计是根据最大风荷载进行控制的,故塔振一般不会构成塔的安全问题。但从长远考虑,不能排除导致超高频次疲劳破坏的可能性;
3. 塔振过程中,塔上工作人员能明显地感到不适;
4. 塔振过程中发生的喀喀响声,其音量为50~60分贝,远远小于形成声疲劳时的140分贝,故判断不会发生声疲劳问题。但其噪音干扰却明显地影响到周围环境。

五、减振措施的设计和主要特性

(一) 影响塔振的结构内在因素

正如前面所述,北京气象塔是属于高柔度、低阻尼的高耸构筑物,其影响塔振的结构

内在因素，概括起来有以下几点：

1. 纤绳及塔体杆件均为对涡流激振敏感的圆形截面；
2. 塔底部连接为球铰支座，能在任意方向转动；
3. 纤绳上没有一般的绝缘子等附属配件，即没有一般的天然附加阻尼；
4. 每根纤绳均为整根绳，无一般的中间构造连接点，而且纤绳长度大，最长的将近400米；
5. 纤绳抗拉强度较一般纤绳高，故其初拉力亦稍高；
6. 纤绳在水平投影面上的夹角互为 120° ，纤绳与水平面间的夹角为 $28^\circ \sim 50^\circ$ 。因此，风不论为任何方向、或在任何时间都有可能与部分纤绳间的夹角保持在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间（易产生风激振动的角度），这比架空电线和斜拉桥的斜绳索对风激振动更为敏感，起振概率更高。

所有这些对于纤绳在风力作用下产生卡门旋涡效应、形成塔的振动都是极其不利的，既增大了出现临界风速的风频带宽，又增大了风激振动的能量。

（二）减振措施的方案选择

概括有以下两个方面：

1. 改变结构动力特性方面：

- （1）改变纤绳的初拉力，或在纤绳上增设固定曳线，即增加纤绳中间弹性支承点，减小纤绳的跨度以改变纤绳的自振频率等；
- （2）改变纤绳截面形状，即将钢丝绳的圆形截面改为流线型或其他形状，以破坏卡门旋涡效应，消减涡流激振力；
- （3）改变整根纤绳为分段纤绳，即增加纤绳中间链板铰接点以消减涡流激振的能量；
- （4）改变塔体支座结构形式，即将塔基支座处的铰接连接改装成刚接连接，以适当增加结构的阻尼。

这些方案都具有各自的特点，对新设计的塔来说都是值得深入考虑研究的，但对已经建成的塔，要设想在塔的结构上作较大的改动，有些是难以实现的，有些本来技术上很简单也变得复杂起来，有些技术效果还难以判断是否理想，因而放弃了这一方面的方案。

2. 附加阻尼设施方面：

- （1）F型防振锤^[7]：如图6所示，这是目前我国架空电线中普遍应用的定型产品，它与世界各国在架空电线上广泛应用的防振锤同属著名的司托克布里基（Stockbridge）防振锤类型。



图6 F型防振锤

F型防振锤的结构原理是用一段钢绞线，在其两端各固定一筒形铸铁锤，作为惯性重量，于钢绞线的中央用线夹将防振锤紧固在电线上，电线振动时产生的能量，由防振锤的钢绞线弯曲变形、摩擦所吸收。防振锤的性能取决于钢绞线的弹性和重量，频率的适应范围由钢绞线的长度及重量进行调整。其主要特点：a、适于水平方向悬挂，消减垂直方向的振动效果好；b、制作安装方便；c、经济、可靠、耐久；d、定型产品最大型号F1型防振锤，其重量仅8.5公斤，难以满足特殊用途的需要。

关于司托克布里基防振锤在高耸塔桅钢结构中的应用，国内尚缺乏实践经验，国外情

况参见文献^{[5][6]}。

(2) 橡胶减振器：如图7所示，主要参考文献^[4]关于架空输电线路用的海绵式减振器和美国某斜拉桥斜缆索上用的开口环式橡胶减振器进行设计研制，其主要特点：

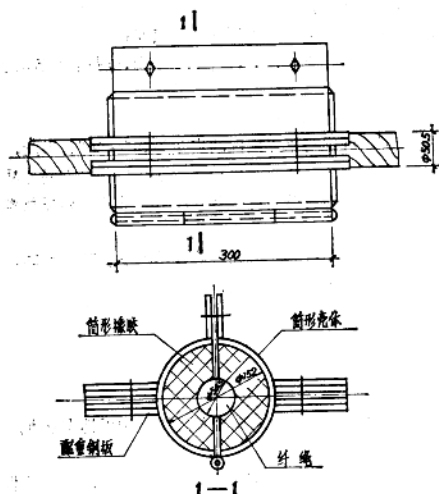


图7 橡胶减振器

a、多方向性能好，可适于任意方向设置，能消减任意方向的振动；b、采用橡胶作为阻尼体，较金属材料阻尼性能好；c、成型灵活，便于试验调整改型，宜在振动情况比较复杂的情况下使用；d、存在橡胶天候老化问题。

在综合比较上述两种减振设施后，认为采用橡胶减振器的方案比较合适。

(三) 橡胶减振器的构造原理和参数特性

1. 减振器的构造与基本原理：由图7可知，减振器主要由筒形壳体与橡胶阻尼体两部分组成。筒形壳体系利用300毫米长

的无缝钢管对开切割成两个半圆筒形，然后一边用铰链、一边用两个螺栓连接，并在两个半圆筒形壳体外面各焊接一片连接翼板，用以连接调整减振器所需要的配重。橡胶阻尼体由两个半圆筒形橡胶块组成。减振器按需要设在纤维的适当部位，将纤维一段长度固定在减振器的筒形橡胶阻尼体内。由于将减振器的自振频率设计得低于或接近纤维振动时的频率，当纤维发生振动时，减振器相对处于静止状态，在筒形壳体及配重的惯性作用下，对橡胶阻尼体即产生压缩、剪切作用；同时，橡胶阻尼体产生相应的反作用力，纤维的振动能量通过变形过程吸收到橡胶阻尼体内，并转化为热能而逸散，从而达到减振的目的。

2. 减振器的自振频率：减振器的自振频率主要取决于橡胶阻尼体的刚度与筒形壳体及配重的重量。通过设计、试验进行测定调整，控制减振器的自振频率低于或接近于塔振时的纤维振动频率10~17赫兹。

(1) 填充丁腈/树脂发泡橡胶阻尼体的减振器的自振频率为7~28赫兹。

(2) 填充氯化丁基橡胶阻尼体的减振器的自振频率为6~23赫兹。

3. 筒形壳体的尺寸：筒形壳体长度，通过对填充300毫米（6倍纤维直径）与200毫米（4倍纤维直径）两种长度的橡胶阻尼体的试验对比，证明300毫米长度比较合适。

筒形壳体内径，通过对 $\phi 122$ （2.4倍纤维直径）、 $\phi 152$ （3倍纤维直径）、 $\phi 187$ （3.7倍纤维直径）三种内径尺寸的试验对比，证明在选定的橡胶刚度条件下，筒形壳体内径大的比小的性能为好，但筒形壳体内径过大，则用胶量急剧增加，而且性能提高很有

限,故综合考虑以采用筒形壳体内径为 $\phi 152$ 比较合适。

2. 4. 减振器的重量: 减振器的重量主要取决于筒形壳体重量及配重。橡胶阻尼体的重量大致为3.6~4.7公斤,筒形壳体重量及配重的总重量为40公斤,系根据前面所述人体抑制塔振实验,按2/3人体重量设计,并注意控制减振器的重量不超过半波长纤维的重量60公斤^[11],试验测定中曾在此基础上进行过加重和减轻的试验对比,表明上述设计数值是合适的。

5. 橡胶阻尼体的特性: 橡胶阻尼体是橡胶减振器的关键部分,它决定着减振器的使用功能和寿命。北京橡胶制品研究所通过一年的研制工作^[12],对胶种选择以及配方等进行了多方案比较,经几十次试验、试制和测定分析,最终选定高阻尼、低频率、综合性能比较好的丁腈/树脂发泡胶和氯化丁基胶搭配组合使用。橡胶的特性曲线如图8图9所示。

从图8图9中可知,丁腈胶常温性能较好,当温度为0~30°C时,阻尼系数 β 值较高,剪切模量 G 值随温度变化尚较平缓;丁基胶对负温的适应性较好,当温度为-30~0°C时,阻尼系数 β 值较高,剪切模量 G 值随温度变化很平缓。两种胶搭配组合使用,可以有效地保证在-30~40°C的温度范围内,即不论在严寒的冬季或炎热的夏季,橡胶减振器都能保持比较稳定的动力特性和可靠的减振效能。

关于橡胶阻尼体的老化问题,限于设备条件,从1979年6月开始,做了半年天候老化实验。两种胶经过拉伸40%,在阳光下进行曝晒。丁腈胶曝晒15天后发现有裂纹现象;丁基胶曝晒5个多月后未发现龟裂现象。考虑到减振器中的橡胶阻尼体系放置在筒形壳体内,并非直接曝露在阳光下,估计丁腈胶和丁基胶阻尼体的使用寿命分别为5年和10年左右。

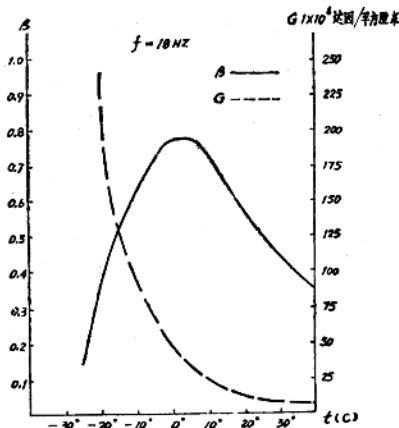


图8 DNB-20丁腈胶动态模量温度谱图

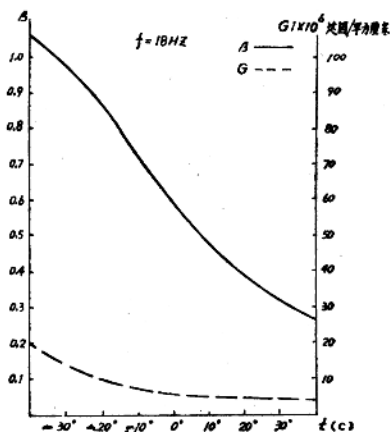


图9 DI-14丁基胶动态模量温度谱图

(四) 减振器的设置数量与部位

根据观测资料分析,塔振的主要矛盾为第四、五层纤绳、故减振器的设置数量,在这两层纤绳的每根纤绳上各装三个;第三层纤绳的每根纤绳上各装一个;第一、二层纤绳的振动对塔振影响较小,但为安全起见,这两层纤绳的每根纤绳上也各装一个,减振器的总数为27个。

减振器在纤绳上的设置部位:为了使减振器对出现各种波长的振动都能发挥一定的减振作用,减振器的安装位置应照顾到出现最大及最小半波长(最低及最高频率)的情况,每根纤绳上装一个减振器的即装在距锚固连接点3米处,即半波长为5~6米的波腹点,每根纤绳上装三个减振器的装在距锚固连接点的距离为3、6、9米,即按等距离法装设。

(五) 橡胶减振器的安装

橡胶减振器的安装工作很简便,两位工人利用一具普通竹梯搭靠在纤绳上即可进行,包括安装辅助工作时间内,大约半小时到一小时可以安装一个减振器。橡胶减振器元件及安装情况如图10~图13所示。



图 10 橡胶减振器元件



图 11 橡胶减振器在安装中

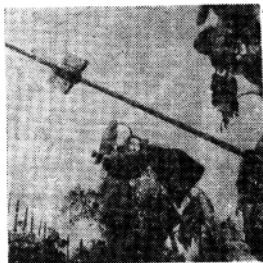


图 12 安装后的橡胶减振器(第三层纤绳)

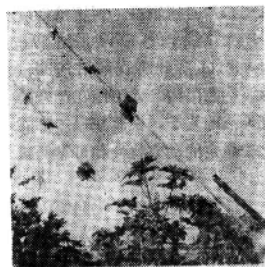


图 13 安装后的橡胶减振器(第四、五层纤绳)

六、橡胶减振器的使用效果

(一) 装减振器前的塔振宏观、实测情况

已如前所述,装减振器前的塔振宏观情况,可概括为:1.看得见:纤绳上振动呈现驻波分布;2.听得到:塔振时伴随有嗒嗒响声;3.摸得着:手触摸平台栏杆有颤动发麻感。

装减振器前的塔振实测情况,见图2~图5及表1、表2。

(二) 装减振器后的塔振宏观、实测情况

1979年4月开始在第四、五层纤绳上试装研制的橡胶减振器6个,经过5个多月的观测考察,得知装减振器前的塔振时嗒嗒响声基本上得到消除,塔振次数有所减少,塔振烈度大大减轻。

1979年9月正式安装最后定型制作的橡胶减振器21个,塔振情况进一步得到消减,一般已很少能直接观察到塔振现象。

1979年9月和10月,先后由中国科学院力学所和清华大学建工系进行了第三阶段塔振实测,^[10]由中国科学院大气所对气象背景条件作了配合监测记录。1979年10月17日~19日连续进行两昼夜的监测,这其间的气象条件一般较稳定,风速大致为2~4米/秒。共记录到三次塔有谐振情况,两次发生在凌晨,一次发生在午夜。其振动烈度较轻微,但用手指尖接触平台栏杆时,能感到有颤动。其结果如下:

1.在一般情况下,没有高频振动分量(这相当于装减振器前,塔振无响声、无谐振时的振动情况),或者说高频振动分量很小(至少要小于1微米),仪器的灵敏度还感觉不到,记录到的某瞬间振动波形如图14所示。

2.1979年10月18日早晨记录到的振动波形图有高频振动分量(这相当于装减振器前,塔振有响声、有谐振时的振动情况),如图15所示,放大器的衰减均为10,拾振头放置在东西方向。

经过数据处理以后,得到的高频振动的频率和位移幅值列于表4。

经信号处理机所得位移幅值谱图如图16所示。

3.1979年10月19日早晨记录到的振动波形图有高频振动分量,其波形图与图15是相近的,拾振头放在南北方向。

经过数据处理以后,得到的高频振动的频率和位移幅值列于表5。

由表1、表2与表4、表5所列塔体振动频率和位移幅值比较,可知装减振器前、后

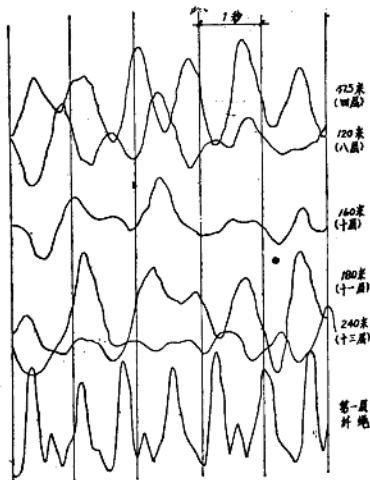


图 14 装减振器后塔体及纤绳无谐振时的振动波形图

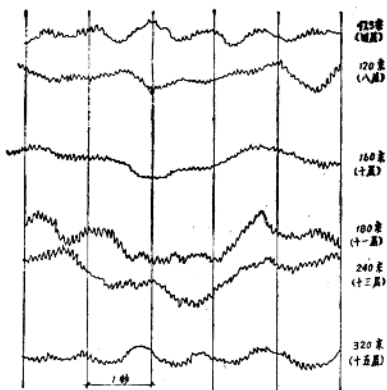


图 15 装减振器后塔体有谐振时的振动波形图

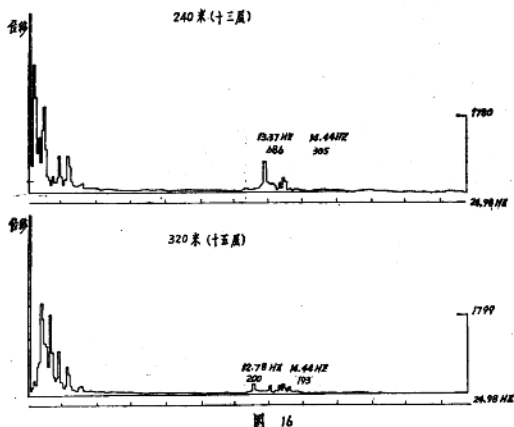


图 16

图 16 装减振器后塔体有谐振时的频谱图

的塔体振动频率基本上没有大的变化，而塔体振动位移幅值则有显著的下降。如将表 1、表 2、与表 4、表 5 中 47.5 米、120 米、240 米平台处各种频率下的位移幅值加以对比，即将装减振器前、后的位移最大幅值或最小幅值分别进行对比，则装减振器后位移幅值约为装减振器前位移幅值的 10~65%，即减小约 90~35%，见表 6。

装减振器前、后的纤绳振动最大幅值降低更为显著，大致降低约 95%。

以上仅仅是对位移幅值变化的趋向和轮廓作一粗略的概念性的描述，用以表明减振器

表 4

测 点 位 置	频 率				测 点 位 置	频 率			
	12.78Hz	13.37Hz	13.66Hz	14.44Hz		12.78Hz	13.37Hz	13.66Hz	14.44Hz
	位 移 (μ)					位 移 (μ)			
47.5米 (四层平台)	12.1		6.7	6.7	180米 (十一层平台)		6.7		27.7
120米 (八层平台)		7.9		25.2	240米 (十三层平台)		31.5		14.0
160米 (十层平台)		11.9		20.6	320米 (十五层平台)		11.1		10.8

注：位移指峰——峰值

表 5

测 点 位 置	频 率			测 点 位 置	频 率		
	10.35Hz	12.0Hz	14.25Hz		10.35Hz	12.0Hz	14.25Hz
	位 移 (μ)				位 移 (μ)		
47.5米(四层平台)		4.7		180米(十一层平台)	12.3	6.8	
120米(八层平台)		5.9		240米(十三层平台)		3.8	2.6
160米(十层平台)		5.8		320米(十五层平台)	2.1		

注：位移指峰——峰值

表 6

测 点 位 置		装 减 振 器 前		装 减 振 器 后			
47.5米 (四层平台)	频 率 (Hz)	12.5		12.0	12.78	13.66	14.44
	位 移 (μ)	35.0		4.7	12.1	6.7	6.7
	对 比	100%		13.4%	34.6%		
160米 (十层平台)	频 率 (Hz)	14.0		12.0		13.37	14.44
	位 移 (μ)	27.05	31.69	5.8		11.9	20.6
	对 比	(100%)	100%	(21.4%)			65%
240米 (十三层平台)	频 率 (Hz)	14.0		12.0	13.37	14.25	14.44
	位 移 (μ)	29.16	48.96	3.8	31.5	2.6	14.0
	对 比	(100%)	100%		64%	(9%)	

注：对比项次中，按有括号者或无括号者相应对比。

的效果是很显著的，它并不能精确地反映位移幅值数量上的变化情况。因为卡门旋涡效应激起纤绳共振而导致塔振的因素和过程是极其复杂的，需要通过大量监测统计分析工作才有可能搞清楚，而上述监测的次数和记录到的数据是很有限的。

由以上装减振器前、后的塔振宏观情况和实测资料的对比，可以充分说明橡胶减振器

的效果是显著的、可靠的。基本上消除了风激振动对塔的危害影响,保证了塔的正常运行使用。但同时注意到减振器从试装使用到正式安装使用,总计只有三年多时间,因此还需要经受较长时间的考验,继续发现问题和总结经验。

七、小 结

(一)北京气象塔的振动属于风激振动,是在稳定的微风下由涡流激振所形成,振动的幅值是微小的、有限度的,一般不会构成结构安全问题,但不能排除超高频次的振动疲劳问题。这种振动带来的损害是:影响塔的气象观测使用功能;塔振响声噪音干扰周围环境;塔振过程中使塔上工作人员感到不适。

(二)橡胶减振器,经过半年的试装使用和两年多的正式安装使用,根据宏观及实测资料表明,减振效果是良好的,风激振动对塔的危害影响已基本消除。

(三)风激振动问题,影响面很广,它与架空电线、桥梁结构、高耸构筑物和高层建筑等都有十分密切的关系,因此系统深入开展研究这一课题,不论从当前或从长远来看都是十分必要和迫切的。

(四)我国现行《工业与民用建筑结构荷载规范》(TJ9-74)对高耸构筑物仅规定了考虑风的脉动动力作用影响的风振系数 β ,为了更好地适应工程建设的需要,建议增加关于风的涡流激振动力作用影响的有关规定^[1]。

参 考 文 献

- [1] J.P.邓哈陀:机械振动学,科学出版社,1961。
- [2] 苏联高耸构筑物风荷载计算技术规范(CH40-58),建筑设计,1959年第二期。
- [3] 水利电力部东北电力设计院:高压送电线路设计手册,吉林人民出版社,1975。
- [4] R.R.Bouche L.C. Ensor R. Tengwall, A Single-Degree-of-Freedom Damper for Overhead Conductors, AIEE Transaction Vol.81, February 1963。
- [5] Baltimore's Candelabra, Civil Engineering, July 1959。
- [6] World's Tallest Structure, Civil Engineering December 1966。
- [7] 董吉涛:高压输电线路的防振器,电力金具,第二期,电力部南京线路器材厂,1978。
- [8] 北京橡胶制品研究所:北京气象塔橡胶减振器技术报告,1979。
- [9] 中国建筑科学研究院抗震所:北京气象塔振动测试报告,1979。
- [10] 清华大学建工系:北京气象塔减振措施效果及动力特性实测,1979。
- [11] 程应镗等:防振锤的设计,电力部南京线路器材厂,1980。

建筑科学研究报告

编辑：中国建筑科学研究院科技管理处

印刷：中国建筑工业出版社印刷厂

出版发行：中国建筑科学研究院建筑情报研究所
(北京市西直门外车公庄大街19号)

资料编号8264

工本费：0.15元