

风的旋涡与高层建筑

1 卡门涡街

在宽广的大街上,当有风吹过时,街上的旗杆与路灯常常会轻轻地晃动.如果在一个高楼林立的城市中,住在高层建筑中的居民们,在刮大风的日子经常会产生一种对生命的不安全感.这些不定期刮来的大风,其速度高达 50—150km/h,如何避免由它们所形成的风旋涡给高层建筑带来的危害,就成为高层建筑师们要面对的问题.

大多数人都是从河流中水的旋涡或下水管道口处水的旋转中直观地认识旋涡的.从科学的角度看,当旋涡形成湍流时,它会不断地破碎并逐步地形成一连串的由大旋涡转变成小旋涡的运动,在这个过程中,湍流通过粘滞力将它的动能转化为热能.这种绕着旋涡中心旋转的运动所形成的湍流,它的旋涡高度与迅速改变旋转速度的特征可以持续很长的时间.因此这类旋涡在碰到高建筑物时就会对高建筑物产生一定影响.如果在建筑物的两侧形成了旋涡,它将对建筑物产生一个吸引力,显然,单个的旋涡是没有多大力量的,但旋涡间会产生相干性而形成一定的模式来冲击建筑物,这种由旋涡脱落产生的流动称为卡门涡街(Karman vortex street),如图 1 所示.能使一个高建筑物产生卡门涡街需要两个条件:一是建筑物从上到下要具有单一的形状;二是风速保持很稳定,足以引发湍流.对于多数城市来说,卡门涡街对建筑物的危害并不太严重.主要原因是城市内的高楼密度很大,窄小的空间将削弱旋涡的相干性并迅速地让旋涡破碎.但在城市的边缘或在高层建筑附近的建筑物,由于它具有一个开阔的上空,极易使旋涡脱落而形成卡门涡街.所以建筑师们在设计时需要考虑让建筑物能经受得住这种湍流的冲击,对于世界上许多摩天大楼来说,这种冲击的破坏力不亚于一场地震.

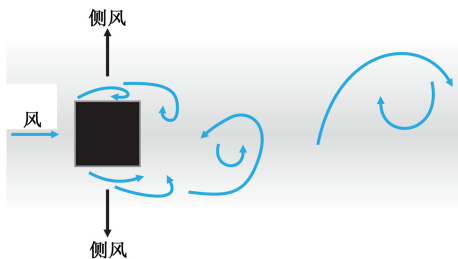


图 1 风旋涡在建筑物两侧的相干性会形成卡门涡街,并对建筑物两侧产生侧向风力.如果相干的旋涡脱落不能减轻两侧的力,则对建筑物的危害将加大

2 高层建筑的共振现象

为了掌握旋涡脱落究竟是怎样危及到高层建筑物的,我们必需掌握两个重要的振动频率:一个是建筑物的固有振动频率 f_b ;一个是在建筑物处旋涡脱落时形成涡街的频率 f_v .

当这两个频率相等时,就会产生共振效应,就像你在推动悬挂的钟摆,当推动力的频率与钟摆的固有频率一致时钟摆的振幅会变得愈来愈大一样,高层建筑物在共振时经受着由旋涡脱落带来的最大振荡压力.建筑物的固有振动频率是由它的结构系统和质量分布确定的,建筑师们常利用专用软件程序来定出建筑物的固有振动频率.通常一个 50 层的高楼,它的固有振动频率是 0.02Hz,其相应的振动周期为 5s;而一个 100 层的高楼,其固有振动频率约为 0.1—0.125Hz,对应的振动周期是 8—10s.而一些超高层的建筑,它们的固有振动频率会低于 0.05Hz,这时相应的振动周期可达到 20s.

旋涡脱落的频率是由 Strouhal 公式确定,它的表达式是:

$$f_v = \frac{SU}{\omega}$$

其中 U 是风速, ω 是面对风向的建筑物截面的宽度,而 S 称为 Strouhal 数.

S 是一个与建筑物横截面形状有关的常数.对于一个尖塔形的建筑,它可近似地看成为一个不变的常数,而对于环形的建筑,它与雷诺数有关,雷诺数的表达式为

$$R = \frac{U\omega}{\nu}$$

其中 ν 是空气的动力学粘滞系数.

尽管如此,当雷诺数在一定范围内时 S 仍然可看成为一个常数.通常它的数值取为 0.14 左右.

我们将两个频率相等时计算出的风速定义为临界风速:

$$U_{\text{crit}} = \frac{f_b \omega}{S}$$

当 $f_b = 0.1\text{Hz}$, $\omega = 50\text{m}$, $S = 0.14$ 时, $U_{\text{crit}} = 36\text{m/s}$,或 = 130km/h.

这是一个相当高的风速,要想能对建筑物激发出一个旋涡脱落还需要一定的时间,即必须维持这样高的风速长达几分钟.尽管如此,计算出的临界风速在世界上许多地区的高层建筑附近还是有可能出现的,这种现象在建筑界中称之为旋涡锁定.一个建筑物一旦被旋涡锁定,它就会开始晃动,甚至于当风速已不再是临界风速时仍然会继续晃动.为了减少旋涡脱落给建筑物带来的危害,建筑师们只能对建筑物进行加固,提高建筑物的固有振动频率,使能产生共振的临界风速加大.从原则上来说,这样做可以让临界风速提高到让共振现象很难发生.但这种加固方式必然要使用更多的建筑材料,从而加大了建筑成本,这显然不是一个好办法,必需另找出路.

3 干扰风速

从上面的讨论可以看出,对建筑物最大的危害来自于旋涡的相干性,即形成了旋涡脱落并发展成涡街.因此关键点是避免旋涡脱落的形成.建筑设计师们想出了一些办法.其中比较常用的一个有效办法就是改变高层建筑物各层的横

截面,这时建筑物横截面 ω 将随着高度变化, S 也会有一定的变化.这样建筑物的固有振动频率 f_0 将成为高度的函数.从而干扰了风速,使风速的相关性不复存在.

这项技术已被实践证明是行之有效的.最典型的成功例子是建在迪拜的高达 828m 的哈利法塔(见图 2).另外可采用的办法是改变建筑物的流线角度,使建筑物上存在一些通风道,能让风力从通风道流过,这样也能破坏旋涡脱落的相干性,这种方法就像许多烟囱上防侧风的烟突类似.

真正要让旋涡脱落的共振对高层建筑的危害达到最小,就要采用阻尼机制.每一座建筑都可以通过它特有材料的阻尼来耗散它的振动能量,也可以通过一些结合部位的摩擦来消耗各部分的能量.一般来说,高层建筑的固有阻尼不是很大,通常是用阻尼比来表示它的大小.阻尼比是一个反映振动系统在扰动后,其振动衰减程度的一个无量纲参量.对于高层建筑来说,它的值约为 0.01—0.02.设计师们为了能加强阻尼效应,还可以增加一些保护装置,例如在台北的一座高 101 层的建筑,它的阻尼器重量就达到了 600 吨.

世界人口在不断增长,许多大城市都存在着建设高层建筑的的压力,所以在超高层建筑不断涌现的今日,卡门涡街对建筑物带来的影响是我们不容忽视的一个课题.



图 2 花费 5 年时间于 2010 年 1 月建成的哈利法塔位于阿拉伯联合酋长国的迪拜城.塔高 828m 是世界上最高的一个建筑.为了降低旋涡脱落相干性对该塔的伤害,设计师们沿着建筑物的高度从上到地改变了横截面的大小.为了纪念阿拉伯联合酋长国的总统哈利法,将此塔命名为哈利法塔

(北京大学物理学院 黄昀 编译自 Physics Today, 2010,(9):68)