



地上管道和悬吊管道的 空气动力稳定性

〔苏〕 М. И. 卡扎凯维奇 著

石油工业出版社



4921

地上管道和悬吊管道的 空气动力稳定性

〔苏〕M.И.卡扎凯维奇著

施 奈 赵元弼译 何钟怡校

石油工业出版社

内 容 简 介

近来地上管道和悬吊管道的空气动力稳定性问题很受注意。一是由于对这类构筑物的兴趣显著增长。再是由于管道运输迅猛发展。

本书叙述了关于空气动力稳定性、因风荷引起的振动的计算方法和减振方法的研究工作。此外，对苏联国内外的空气动力计算问题的现状也作了分析。

本书可供从事地上管道和悬吊管道的管理和设计的科技人员之用。也可供从事高耸构筑物的设计研究人员参考。

本书由石油工业部管道局职工学院施奈(第一至四章)、管道勘察设计研究院赵元弼(第五、六章)翻译，哈尔滨建筑工程学院何钟怡校审。

М. И. Казакевич
АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НАДЗЕМНЫХ
И ВИСЯЧИХ ТРУБОПРОВОДОВ
НЕДРА МОСКВА 1977

地上管道和悬吊管道的
空气动力稳定性
〔苏〕М. И. 卡扎凯维奇著
施 奈 赵元弼译 何钟怡校

石油工业出版社出版
(北京和平里七区十六号楼)
大厂回族自治县印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

开本 $787 \times 1092^{1/8}$ ，印张 $7^{1/8}$ ，字数165千字 印数1—3,000

1981年7月北京第1版 1981年7月北京第1次印刷

书号15037·2247 定价0.79元

前 言

目前苏联正在加紧建设输气管道干线，其线路部分有不少是地上敷设或悬吊敷设形式。这首先是由于新采气区的地理、气象条件难以做地下敷设或设置中间支座。

苏联最大的这类构筑物，作为特殊的悬吊输气管道跨越的例子，是建于1974年跨度为660米的跨过阿姆河的跨越结构。

输气管道干线建设的趋向，是以线路部分带有地上敷设和悬吊敷设为特点，这不仅在苏联如此，在加拿大和斯堪的纳维亚半岛诸国也是如此。

地上和悬吊管道跨越型的构筑物具有一系列特点，可以将其归入单独的一类，这类构筑物具有柔性大、阻尼性低、频谱不均匀的特点。加之，由于跨度大，悬吊跨越的垂直和水平弯曲振动以及扭转振动的固有振动频率都很低，所有这些都造成这类构筑物不利的空气绕流条件，并能导致空气弹性振动。

地上和悬吊管道跨越在各种气象条件下的使用经验证明了空气动力失稳现象的危险性，这种失稳现象常常导致构筑物或其个别构件的破坏；也表明了必须特别注意风力作用及其一切表现，即空气弹性失稳的各种现象。

地上或悬吊管道的空气动力稳定性（也即抵抗风力作用的能力）是最重要的课题之一，它的解决可以保证该类构筑物的可靠性和耐久性。

本书反映并概括了苏联国内外在实用计算、理论研究和实验研究方面，以及在提高构筑物动力稳定性的实用措施方面所积累的经验。

目 录

前言

第一章 空气力学基础 风荷	1
一、大气圈	1
二、气流	2
三、空气力学基础 空气动力	7
四、风荷	10
五、空气动力学实验研究	17
六、地上输气管道和悬吊输气管道纵向结构部件和靠近 《镜面》时对空气动力荷载的影响	23
七、工业管束上的空气动力荷载	27
第二章 地上跨越和悬吊跨越的动力特性	35
一、地上管道梁式体系的固有振动频率	35
二、多跨地上管道的固有振动频率谱	41
三、悬吊输气管道跨越的固有振动频率	47
四、地上跨越和悬吊跨越的阻尼性质 振动的衰减	58
第三章 地上输气管道和悬吊输气管道的空气弹性振动	61
一、圆柱体的空气绕流	61
二、作用在空气流中振动的圆柱体上的力	63
三、圆柱体在空气流中的空气弹性振动	65
四、圆柱体在空气流中的空气弹性振动的同步和滞后 效应	72
五、地上输气管道和悬吊输气管道的空气动力计算 方法	82
第四章 带刚性梁的悬吊跨越的空气动力稳定问题	85
一、吊桥和悬吊跨越空气动力稳定问题的现状 理论和 实验研究的方法	85

二、吊桥和悬吊跨越上的空气动力荷载	97
三、吊桥和悬吊跨越在空气流中振动的微分方程	105
四、吊桥和悬吊跨越空气动力失稳的定性分析	122
五、疾振型空气弹性振动	136
六、吊桥和悬吊跨越的实用空气动力计算方法	151
七、移动荷载对空气动力稳定性的影响	160
八、安装时空气动力稳定性的保证	167
第五章 提高地上跨越及悬吊跨越空气动力稳定性的	
途径	171
一、地上管道的减振方法	172
二、地上管道空气动力减振方法	174
三、地上管道的机械减振方法	184
四、其他几种减振方法	200
第六章 克利弗地区阿姆河输气管道悬索跨越的空气动力	
稳定性	202
一、悬索跨越的基本数据	202
二、悬索跨越动力特性的求算	204
三、悬索跨越模型的风洞空气动力试验	208
四、悬索跨越空气动力稳定性和保证构筑物空气动力稳定	
性的措施	215
五、在实际风力作用下悬索跨越的空气动力性状	223
参考文献	228

第一章 空气力学基础 风荷

一、大气圈

大气圈由各种气体混合物组成，其中下部近地圈主要是氮和氧。大气圈空气的重要特性是其粘性。粘性应理解为任何气体（或液体）抵抗剪切力的能力。固态物体颗粒的内聚力很大，具有的粘性最大。与之相反，气体（其中包括空气）分子间的距离大，几乎不能抵抗颗粒层的相对剪切。至少在自由流动时气体的粘性实际上并不呈现。只有当气流在固态物体表面附近运动时才显示其粘性。固体表面阻止了运动着的气流，导致边界层的形成。粘性的定量评价以其运动粘性系数 ν 表示，标准大气*下空气的 ν 为 $1.46 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ 。

空气的另一个重要特性是其压缩性，也即在外界压力和温度变化时改变其体积和密度的能力。但是对于大气圈的空气，在研究其对静止的和振动的固态物体的作用时，压缩性可忽略不计。

大气的状态以其密度来表征，这是一个当大气与某一物体作相对运动时决定它们之间动力作用的参数。标准大气下空气的质量密度 ρ （单位体积内的空气质量）等于 $0.125 \text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ 。

随着远离地球表面，大气圈空气的组成及其参数发生变化：压力和密度单调地下降，而温度按复杂的规律变化。但

* 空气在标准大气压760mm水银柱和温度15℃下的状态称为标准大气。

是对本书中所研讨的构筑物来说，这一情况不起实际作用，因为我们所感兴趣的空间，通常位于近地圈。

二、气 流

大气圈空气压力沿地球表面的分布是不均匀的。除此之外，在地球的不同地方太阳对空气团的加热也不一致。正因为这些情况必然引起空气团的流动，称为气流或简称风。苏联最强的风在太平洋、北冰洋沿岸和在南乌拉尔。山区的风有很突出的特点，其局部地形条件能够促成强劲的气流。风的主要参数是风向和风速，风速以每秒米计 (m/sec)。有时风速是按国际风级表用风力等级来估定的，风级表根据的是一个人为规定的分级方法，以便按照风对地面物体的作用靠目测评定风力等级；这一分级方法是英国气象学家 F. 蒲福 (Beaufort) 于1806年制定的 (表1)。

地表某一地区一年中各种风向的重复次数以同一比例尺按罗盘方位用线段表示，可得出气流的重要特性图，称为《风向玫瑰》。由《风向玫瑰》可以求得主导风向，这在选择各种构筑物的位置时无疑是要考虑的。

大气圈中空气团的运动几乎是平行地表的。空气质点对地表的摩擦大大阻滞了气流。所以风速随距地平高度的增加而增大，特别是在开始几百米的范围内。在较高的高度上，那里空气对地表摩擦的影响消失，风的运动具有较大的稳定性和均匀性。

风还有一个参数，表征气流随时间的均匀程度，即阵发性。风的阵发性取决于大气湍流状况，湍流时空气质点在横向强烈掺混，随后发生无规则的涡流。由于空气质点对地表的摩擦阻，空气团各层之间的对流交换以及具有不同速度的运

表 1 蒲 福 风 力 分 级 表

等级	风 速 (m/sec)	风的名称	风 力 目 测 评 价
0	0	无风	烟囱的烟直上
1	0.9	软风	烟稍倾斜
2	2.4	轻风	人面感觉空气流动, 树枝微响, 旌旗、风向标开始微动
3	4.4	微风	微枝摇动, 旌旗展开, 雪沿屋面开始轻轻搬移
4	6.7	和风	灰尘和纸张吹起, 小枝摇动, 降雪转为雪暴
5	9.3	清劲风	小树干摇动, 水面出现白色泡沫
6	12.3	强风	大树枝摇动, 电线呼呼有声, 室内听到风呼声
7	15.5	疾风	树干摇动, 步行困难
8	18.9	大风	树枝折断, 中等树摇摆, 迎风行走十分困难
9	22.6	烈风	粗树枝和小树折断, 烟囱损坏, 屋瓦揭起, 海上有巨浪
10	26.4	狂风	构筑物损坏, 树连根拔起, 电线杆折断
11	30.5	暴风	重大损坏
12	34.8	飓风	毁灭性破坏

注: 17级风速等于58.6m/sec.

动着的各层之间的摩擦, 产生风的阵发。风的阵发性借助于熟知的气流脉动的各种统计值来评定: 数学期望、均方差、作为连续随机量的气流脉动随时间的分布规律。短时间内急剧增强达到20m/sec以上的风, 称为飑。

风的阵发以周期或波长及相应的动能蕴藏量来描述。A. G. 达文波特 (Davenport) (123, 125) 在对地球不同地点的强风作观察的基础上, 得以阐明水平阵风的谱线密度随阵风波长而变化的有趣的规律。如图 1 可以看出, 阵风的动能的分布符合于高斯的正态分布律。该图中采用下列符号: L ——具有最大动能的阵风的波长, $L = vT$ (v ——阵风风速; T ——阵风振动周期); A ——无因次函数, $A = S(\omega)/kT\bar{v}^2$, ($S(\omega)$ ——阵风的谱线密度; k ——表面摩擦参数; $\bar{v}$ ——平均风速)。分布曲线表明: 波长约 600m 的阵风具有最大的能

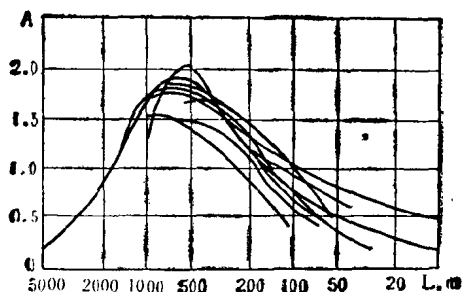


图 1 阵风的动能分布

量。这表示，当最大风速 $v = 40\text{m/sec}$ 时，阵风的振动周期 $T = 15\text{sec}$ 。这样的或相近的水平振动周期值，在某些跨度很大的悬索和悬垂管型的柔性构筑物中可能遇到。在这种情况下阵风必须作为一个十分不利的因素加以考虑。

阵风的范围也是重要的特性。虽然阵风的范围在高度上和宽度上均带有偶然性质，A. G. 达文波特^[125]的研究结果还给出了最可能的值：阵风高度大致为 $L/4$ ，而宽度—— $L/15$ 。在计算高耸构筑物和平面上延伸广的构筑物时必须考虑这一情况。

许多国家对风进行了系统的观察。在苏联，全苏水文气象总局的气象站也进行这类观察。对风的构成，一天观察若干次，随后按不同时间间隔加以平均：统计年平均的、月平均的、昼夜平均的、时平均的等等。在利用这些数据时，根据这些数据的用途，采用不同的平均值。例如，在求算各种各样构筑物（塔型的、房屋、桥梁、管道、起重机、石油化工企业的工艺设备等）上的风荷时，是根据两分钟的平均值。

求算风的作用必须了解其构成：方向、瞬时的和平均的（对不同的时间间隔）速度值、阵发性、各种不同速度的风

的延续时间和重复性。此外，大气状况：温度、湿度、降水量的情报资料也是重要的。为此，在天文台和气象站利用各种测风仪器：维利德风标、风速计（M-92）、风罗盘仪（M-63）、罗盘风速计（M-12、M-64）进行系统的观察。另外，在野外经常采用手提旋杯式风速计或野外风速计。

根据对苏联不同地点风的构成的长期观察试验资料，绘制了苏联风强分区图（图2）。在这份地图上将整个苏联国土分成七个风区。阴影地带是苏联的山区。相应于每个地区的，为地表上10m高度处测得的5年一遇的某一风速。大部分苏联国土（65%）属于Ⅰ～Ⅲ类风区，只有8%——属于Ⅴ～Ⅶ类特强风区，20%国土属于山区。

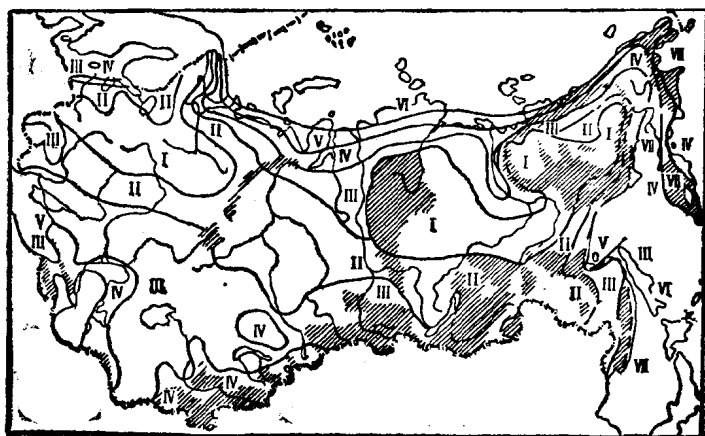


图 2 苏联国土风强分区图

——各种风压区的分界线
 ——山区各种标准风压区的分界线

当地局部地形对改变风的构成有着重要的作用。在比较

市内与郊区，林区与旷野，冲沟、丘陵发育的陡峭地区与平原，峰岚满布的山区与围成的河谷的风的构成资料时，这就特别明显。所以，考虑微地形特点的当地水文气象站的资料，有时显得特别重要。

风的构成在大气圈下层随着距地表高度的增大而改变，反映在平均风速垂直断面图上。

通常采用风速对高度的指数关系：

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

或对数关系：

$$v(z) = v_{10} \frac{\ln z / z_0}{\ln 10 / z_0} \quad (2)$$

式中 $v(z)$ 和 v_{10} —— 高度 z 和 10 m 处的风速；

z_0 —— 粗糙度参数 (在该高度上风速等于零)；

α —— 与近地层湍流有关的参数。

这些关系式反映了因湍流的风对地表摩擦而引起的，在直接靠近地球的边界层的变化规律。可见大气圈边界层中风速断面图的组成，完全由位于下面的地表粗糙度所决定。在苏联的科学文献中主要采用公式 (2)，而国外的研究者采用公式 (1)。

大量的实验研究确认，指数 α 主要与当地的粗糙度有关。的确， α 值在平原地区比在布满各种粗糙单元的地区为小。在障碍不大的开阔地区（草原、内河两岸和低的岛屿）取 $\alpha = 0.16$ 。对均布高 $10 \sim 15\text{ m}$ 障碍的地区（城市居民郊区、大片森林）， $\alpha = 0.22$ 。对大块粗糙单元地区（建有多层房屋的大城市中心）， $\alpha = 0.33$ 。

三、空气力学基础 空气动力

研究气体（其中包括空气）运动规律及其与各种物体相互作用的科学，称为空气力学。液体力学是研究水力学的科目。气体和液体，当所研究的是它们与固体的相互作用，其主要区别就在于粘性不同。空气力学和水力学固有的共同规律性，在国外科学文献中归之为流体力学。但是在苏联文献中，除了翻译的以外，这一术语未被公认。与之相近的是水-空气力学。在建筑工程中研究气流对各种用途的具有各种各样横截面形状的结构物和构筑物构件的绕流，就与空气力学有关。但是，应当指出，空气力学作为一门有其突出成就的科学，应归功于飞机制造的迅猛发展及其科学上和实践上的需要。

建筑工业的现代趋势要求吸收理论和实验空气力学的成果，以解决许多重要的课题来保证在不利的气象条件下，首先是在风的作用下，结构构件和整个构筑物的强度、可靠性和耐久性。在苏联，这个课题是由建设者与起主导作用的国家空气动力学中心密切协作解决的。

水-空气力学的基础是由杰出的科学家Л. 欧拉、Д. 柏努利、Н. Е. 茹科夫斯基、С. А. 恰普雷金 (Чаплыгин)、Л. 普朗特、Т. 卡门的著作奠定的。苏联科学家А. А. 多罗尼秦 (Дородницын)、М. В. 克尔迪什 (Келдыш)、Н. Е. 科钦 (Кочин)、М. А. 拉夫连季叶夫 (Лаврентьев)、Л. И. 谢多夫 (Седов)、С. А. 赫里斯季安诺维奇 (Христианович) 等对空气力学的发展作出了重大的贡献。

经典空气力学分为三部分：空气静力学、空气运动学和空气动力学。其中只有研究气体与固体在它们相对运动时的

相互作用的空气动力学，在设计和计算构筑物的实践中得到应用。它可促使正确地选择结构的形状和构件的合理断面，以保证可靠地实现构筑物的功能。为了作相应的计算，必须

具备在绕流条件下作用于结构构件上力和力矩的有关知识。

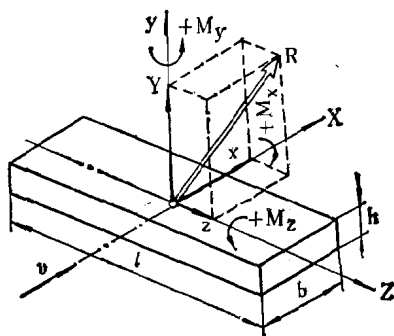


图 3 气流下的一个物体和作
用在物体表面上空气动力

研究气流下的一个物体(图 3)。作用在物体表面上的空气动力可以化为一个合力 R ，称之为空气总动力和一个合力矩 M ，称之为空气总动力矩。空气动力学中以右直角的速度(流向)坐标系和以物体重心为原点的约束坐标系采用最广。

在第一种情况下坐标系与气流的速度向量有关，而在第二种情况下与惯性主轴有关。这两种坐标系相互以迎角 α 和滑动角 β 制约。但是，在建筑空气动力学中一般以采用速度坐标系为主。图 3 引入了速度坐标系，该坐标系在给定的特殊情况下与约束坐标系重合。 x 、 y 、 z 轴相应地被称为纵向轴、法向轴和横向轴。在一般情况下前进中的气流与平面 xz 形成某一角 α ，名之为迎角，与平面 xy 形成某一角 β ，名之为滑动角。

空气总动力向量 R 和空气总动力矩向量 M 在所选定的座标轴上的投影，在空气动力学中称为：正面阻力 X ；升力 Y ；侧向力 Z ；滚转力矩 M_x ；偏转力矩 M_y ；俯仰力矩 M_z 。

这些要素的正方向如图 3 所示。被绕流物体的横截面称

为中截面。物体的长度 l 称为展长。当 $l/b > 20$ 且 $l/h > 20$ 时，称该物体为无限展长。

按水-空气动力学理论，物体对气流的总阻力由下式求算：

$$R = \frac{1}{2} C_R \rho v^2 S \quad (3)$$

式中 ρ ——空气质量密度；

v ——前进气流的流速；

S ——中截面面积。

系数 C_R 称为空气总动力系数。将无因次系数 C_R 看作一方向与空气总动力向量 R 方向相重合的向量，设其在轴 x 、 y 、 z 上的投影相应为 C_x 、 C_y 、 C_z 。这些系数（也是无因次的）在空气动力学中具有下列名称： C_x ——正面阻力系数； C_y ——升力系数； C_z ——侧向力系数。同样，在空气动力学中列入滚转力矩系数 m_x 、偏转力矩系数 m_y 和俯仰力矩（纵向力矩）系数 m_z 。

在地上管道和悬吊管道类型的细长构筑物，也即无限展长物体的空气动力学中，通常只限于研究正面阻力 X 、升力 Y 和纵向力矩（在航空中称为俯仰力矩） M_z 。相应的表达式为：

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{1}{2} C_x \rho v^2 S \\ Y &= \frac{1}{2} C_y \rho v^2 S \\ M_z &= \frac{1}{2} m_z \rho v^2 S b \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

① 原书公式 (4)、(5) 中之 X 、 Y 、 M_z 采用相同的符号，似欠妥，仍照录——译注。

一般采用单位长度上的空气动力荷载，则表示更为简便：

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{1}{2} C_x \rho v^2 h \\ Y &= \frac{1}{2} C_y \rho v^2 b \\ M_z &= \frac{1}{2} m_z \rho v^2 b^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

应该指出，所有空气动力系数和空气动力矩系数是在风洞中用空气动力天平由实验方法求得的。根据所测得的空气动力荷载 X 、 Y 、 M_z ，可按下式求算相应的系数：

$$\left. \begin{aligned} C_x &= \frac{2X}{\rho v^2 h} \\ C_y &= \frac{2Y}{\rho v^2 b} \\ m_z &= \frac{2M_z}{\rho v^2 b^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将这些表达式和前面的相比较，可以得一结论：即根据不同要求求系数 C_x 、 C_y 和 m_z 时应当注意选择物体横截面的特征尺寸。特别是，在某些情况下当计算系数 C_x 时不是取物体横截面的高度 h 作为特征尺寸，而是取宽度 b 。有时在计算系数 C_y 时取高度 h 作为特征尺寸。

四、风 荷

许多构筑物上风的作用是如此的重要，即在形成构筑物的应力状态中，风荷经常起着决定性的作用。所以，研究各种形状物体上的风荷，对于保证构筑物的强度和稳定具有首要的意义。在 Г. А. 萨维茨基 (Савицкий)^[82] 的书中对构

筑物上的风荷有十分详尽的叙述。

空气动力荷载公式 (3)~(5) 中包含有一个共同的因子:

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

在空气动力学称为速度压头(即风压——译注)。苏联采用的风压区域划分是:

苏 联 分 区	I	II	III	IV	V	VI	VII
速度压头 kg/cm^2	27	35	45	55	70	85	100

风荷借助专门的规范求算。许多国家有自己的地方性规范。这样的规范在苏联是《建筑法规 荷载及其作用》(93、96)。由这些规范引用的风的速度压头称为标准风压。除上述规范之外,苏联现行的还有《建筑法规 建筑气候学和地球物理学》,在风的那一章中有关于苏联各地区风按方向的重复杂数和平均速度,1年、5年、10年、15年和20年一次的最大风速的详细数据。当上述建筑法规中没有拟建地区的风构成的资料或资料不足时,就必须采用当地水文气象站五年重复一次的风速观测数据。这一观测中取离地高10米处连续两分钟内瞬时风速的平均值。标准风压按下式计算:

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \alpha^2 \quad \text{①}$$

也即对风速 v 引入一修正系数,是根据风标观测结果校正后得出的:

$$\alpha = 0.75 + \frac{5}{v}$$

① 原书风压与标准风压采用相同的符号 q , 似欠妥。——译注。