

从蜻蜓翅痣谈飞机机翼颤振及其抑制

张华

(流体力学教育部重点实验室,北京航空航天大学流体力学研究所 100191)

1. 蜻蜓翅痣对平稳飞行的重要性

在蜻蜓长长的翅膀端部前缘都能发现一小块加厚的角质层,这一小块角质层称为翅痣,参见图1所示。翅痣对于蜻蜓的平稳飞行有着非常重要的作用,如果将蜻蜓翅痣人为破坏或去除掉,则蜻蜓将失去平稳飞行的能力,飞行会变得摇摇晃晃。实际上,不仅仅是蜻蜓具有翅痣,在许多具有相对较长翅膀昆虫的翅膀前端(前缘)都能够发现翅痣,参见图2所示。翅痣对于这些昆虫的平稳飞行而言同



图1 各种蜻蜓的翅痣



图2 一些长翅昆虫的翅痣

样具有关键而重要的作用,如果没有翅痣,这些昆虫在飞行中可能会出现一种破坏性的不利振动——颤振。

2. 机翼变形与颤振的基本概念

颤振也正是飞机飞行所面临且需要解决的重要问题。颤振是当飞机在气流中运动并加速到某一临界速度值时,在结构的弹性力、惯性力和气动压力等耦合作用下出现的一种振幅不衰减的自激振动,颤振对飞机的飞行安全构成极大威胁,飞机飞

行必须避免颤振的发生。图3是机翼颤振风洞实验与飞行试验片段^①。



图3 机翼颤振风洞实验与飞行试验

飞机机翼尺寸通常较大、刚度有限,飞行中受外力扰动可能产生弹性弯曲变形。由于机翼上气动力及作用点的变化、机翼扭心和重心位置不同,机翼会产生扭转变形。当舵面(如副翼)操纵机构存在缝隙或松弛时舵面会发生偏转。因此机翼存在两种典型的耦合变形,即弯曲/扭转变形和弯曲/舵面偏转变形。这些变形和运动不仅对应着机翼结构弹性力和惯性力的变化而且会产生附加气动力的变化。相应地,一定速度下机翼弹性力、惯性力和气动力等耦合作用而形成的振幅不衰减的自激振动也包含了两种典型的颤振,即弯曲/扭转颤振和弯曲/舵面偏转颤振。以下将讨论弯曲/扭转颤振以及弯曲/舵面偏转颤振产生的机理及其抑制方法。

3. 机翼弯曲/扭转颤振机理及其抑制

图4是机翼弯曲/扭转颤振原理图^②,翼型代表机翼翼端某翼剖面,其中空心圆圈、叉号和实心圆圈分别代表机翼的焦点、刚心(扭心)和重心,假设重心位于刚心之后,如图4所示。

假设扰动前翼剖面位于位置2,扰动去除后其位于位置0,此后翼剖面在机翼弹性力作用下向上运动(位置0~4)。由于翼型重心处作用的惯性力 F_i 靠后,从位置0~4翼型形成顺时针扭转角,翼型迎角

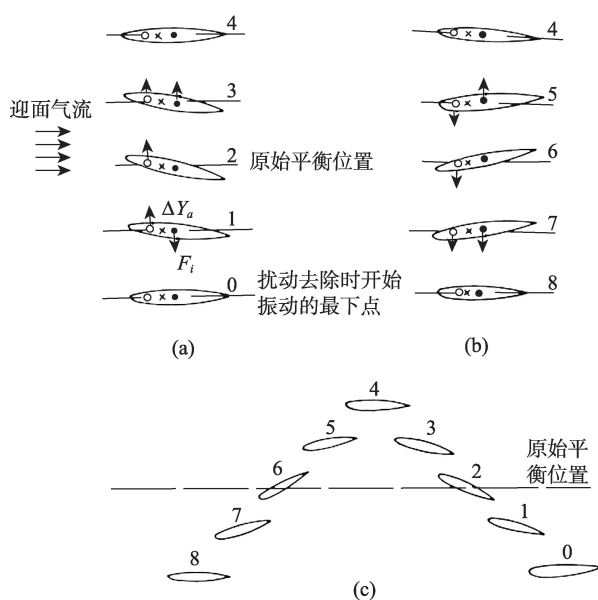


图4 机翼弯曲/扭转颤振原理

始终为正,产生的附加升力始终向上并有加大扭转的趋势,该气动力与振动方向一致是激振力,且该激振力随速度平方增加。另一方面,翼型从位置0~4向上运动时,相对速度向下倾斜使有效迎角减小,形成向下的负升力,此力与机翼振动方向相反是减振力,且该力随速度一次方增加。位置4~8的向下振动过程与此类似,也存在上述激振力和减振力。由于随速度增加气动激振力比气动减振力增加得更快,一旦速度达到或超过某临界值就会发生颤振甚至造成结构破坏。图4(c)将弯曲和扭转变形与飞行距离结合显示了其临界颤振过程。

显然,机翼重心位于刚心之后而因惯性力产生的机翼扭转及气动激振力是造成弯曲/扭转颤振的根本原因,因此增加配重使重心前移是抑制机翼弯曲/扭转(提高颤振临界速度)的有效措施。配重宜布置在翼端前缘,这是因为翼端的弯曲挠度大,配重在这里能够获得最大的效率。

蜻蜓翅端前缘的翅痣实际上就是通过长期进化而形成的防止弯扭颤振的配重。提高机翼刚度也能抑制机翼弯扭颤振的提前发生,例如单块式机翼的刚度比梁式机翼大幅度提高,从而提高了飞机的颤振临界速度。在现代飞机上还经常采用人工阻尼器,更为先进的则采用颤振主动控制技术提高

颤振临界速度。

另外在机翼上安装发动机并将发动机短舱吊架尽量布置在翼弦前部,也能起到有效抑制弯扭颤振的作用。采用大后掠角、大根梢比的后掠翼和三角翼,它们在发生弯曲变形时引起顺气流翼剖面的迎角减小,减小了振动时产生的附加的气动力,因此也有利于抑制颤振的提前发生。

图5是美国塔科马大桥在卡门涡街诱发下产生的弯曲/扭转颤振及其破坏情况。据调查大桥设计师为降低成本使设计和建造的桥梁厚度降低、刚度不足,这是造成事故的结构原因。现代桥梁设计中主要采用三种技术措施解决桥梁颤振问题:结构措施——提高桥梁结构刚度,机械措施——加装人工阻尼器,气动措施——优化或改善气动外形。

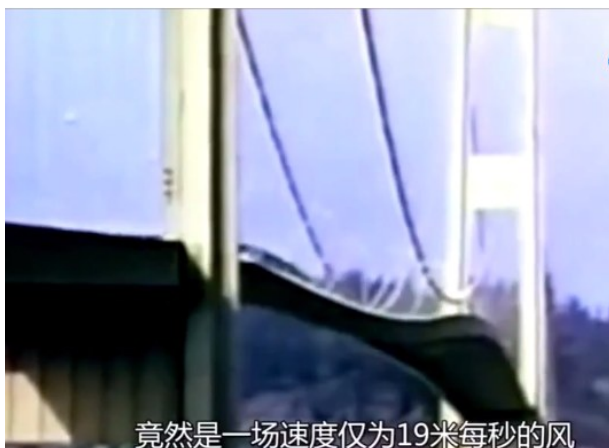


图5 美国塔科马大桥因弯曲扭转颤振而破坏

4. 机翼弯曲/舵面偏转颤振机理及其抑制

图6是弯曲/舵面偏转颤振原理图^②,这里假设机翼和舵面本身均无扭转变形,仅存在随机翼弯曲而产生的舵面偏转。图中叉号是舵面转轴,黑点是舵面重心。

假设扰动前翼剖面位于位置2,扰动去除后其位于位置0,此后翼剖面在机翼弹性力作用下向上运动(位置0~4)。由于舵面重心处惯性力 F_i 靠后,从位置0~4舵面形成顺时针偏转角,翼型弯度始终

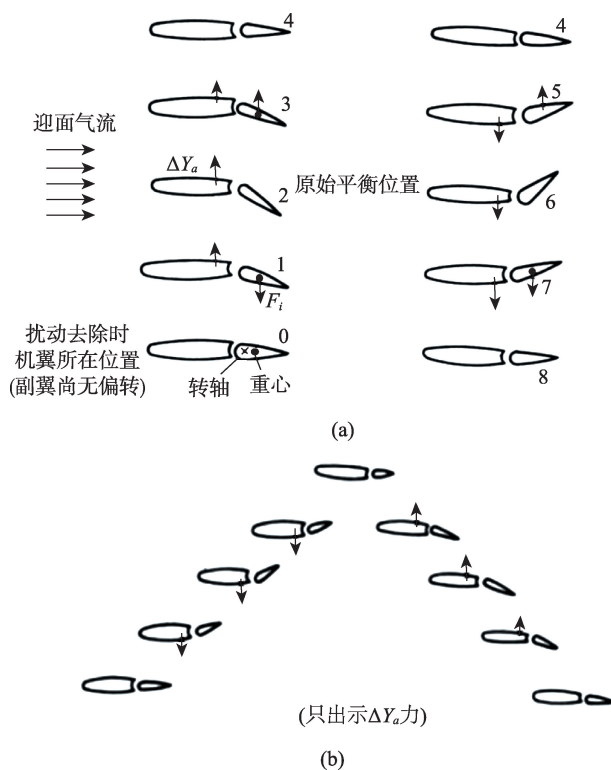


图6 弯曲/舵面偏转颤振原理

为正,产生的附加升力始终向上与振动方向一致是激振力,且该激振力也随速度而增加。另一方面,翼型从0~4的向上运动过程中,相对速度向下倾斜使有效迎角减小,形成向下的负升力,此力与机翼振动方向相反是减振力,由于随速度增加上述相对迎角的变化量减小,因此随速度增加减振力不如激振力增加得快。位置4~8的向下振动过程与此类似,也存在上述激振力和减振力。由于随速度增加气动激振力比气动减振力增加得更快,一旦速度达到或超过某临界值就会发生颤振甚至造成结构破坏。图6(b)将弯曲和舵面偏转与飞行距离结合显示了其临界颤振过程。

显然舵面重心位于转轴之后由惯性力产生的舵面偏转及气动激振力是造成弯曲/舵面偏转颤振的关键原因。采用舵面重心配平、提高操纵系统刚度、消除操纵系统中的间隙等措施都有助于提高弯曲/舵面偏转颤振临界速度。在舵面上加配重通常有分散式配重和集中式配重两种方法,参见图7所示^③。

分散式配重的优点是舵面偏转时对机翼形状

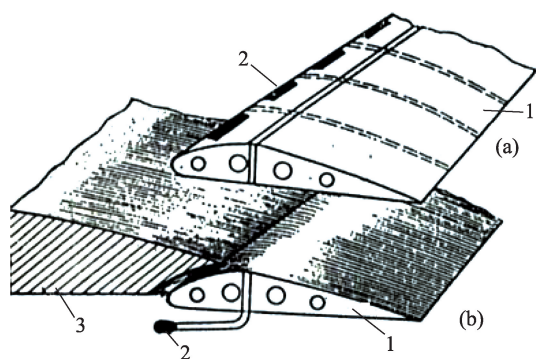


图7 两种舵面配重形式(1. 舵面, 2. 配重, 3. 翼面)
(a) 分散式; (b) 集中式

影响不明显,但由于配重距离转轴较近使得配重可能偏重,图8是一种舵面分散式配重的结构。在舵面转轴后方采用轻质的蜂窝夹芯结构可以减小配重质量。采用集中式配重可使配重安排在距转轴较远的操纵面前缘处,从而可减小配重质量,但其缺点是舵面偏转时会影响局部外形。图9是方向舵采用集中式配重的波音737-800飞机,图10是方向舵集中式配重的放大图。

一些飞机的操纵面转轴(铰链)适当后移,为在

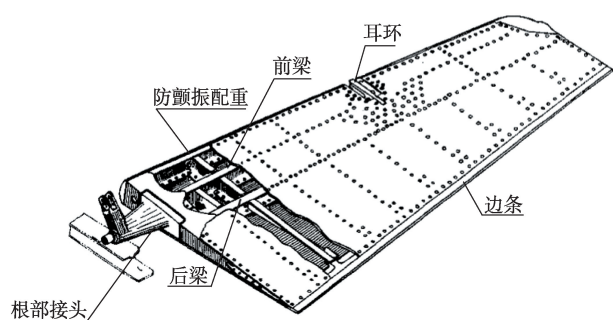


图8 一种舵面分散式配重结构



图9 波音737-800飞机方向舵采用了集中式配重



图10 方向舵集中式配重放大图

操纵面前缘布置分散式配重提供了条件,同时对操纵面前缘外形进行修形,避免偏转时产生过大的扰动,参见图11所示。



图11 舵面转轴(铰链)适当后移的飞机尾翼

此外,现代飞机上为抑制弯曲/舵面偏转颤振提前发生,还可采用人工阻尼器、颤振主动控制等先进技术。

5. 结束语

蜻蜓翅痣是经过长期进化后形成的一种质量平衡装置,为蜻蜓平稳飞行、防止出现颤振提供了重要条件。机翼存在两种典型的颤振:弯曲/扭转颤振和弯曲/舵面偏转颤振。抑制机翼颤振或提高机

翼颤振临界速度的措施主要包括:提高系统的刚度、采用质量平衡、采用人工阻尼、采用主动控制防颤振技术等。

值得指出,采取各种技术措施提高颤振临界速度是设计师在设计阶段努力追求的目标,这些技术措施可以使颤振临界速度提高而不是消灭颤振。一旦飞机完成设计、制造,其颤振临界速度就限制或决定了该种飞机飞行包线的最大速度范围并需要通过试飞验证以求安全。正常飞行中飞行员只能在飞行包线的速度范围内飞行,避免颤振的发

生,一旦速度超过颤振临界值就会发生毁灭性的结果。

参考文献:

① NASA Langley Research Center, Film Serial L-1274, Flutter At a Glance.

② 贺尔铭,赵志彬,飞行器振动及测试基础,西北工业大学出版社,2014.2

③ 史超礼,航空概论[M],国防工业出版社,1978.7

注:本文图片、录像均来自网络,图片与录像版权归原作者所有。



科苑快讯

大型强子对撞机团队发现第三种“五夸克”粒子

记者从清华大学工程物理系副教授张黎明处获悉,他所在的大型强子对撞机(LHC)LHCb团队近日发现了第三种“五夸克”(pentaquarks)粒子。新结果有望进一步揭示夸克理论的诸多奥秘。

此前,五夸克态的物质存在,只停留在理论阶段,2015年,LHCb宣布发现首个“五夸克”粒子。如今,该团队在对该五夸克粒子进行检查时发现,它已一分为二。原来,最初的五夸克实际上是两个独立的五夸克(被称为第一种和第二种五夸克粒子),它们质量相近,宛若一个粒子。

张黎明对记者说:“我们现在拥有的数据比2015年多十倍,这使我们能看到更精细的结构。此次我们发现的第三种五夸克,质量略小于前两种。但三者都由一个底、两个顶、一个粲和一个粲反夸克组成。”

夸克理论是粒子物理学标准模型的关键组成部分。该理论认为,存在上、下、粲、奇、底和顶6种夸克,它们都拥有自己的反物质。夸克和反夸克结合会形

成“强子”。强子分两类:由3个夸克构成的“重子”(包括质子和中子)和由夸克、反夸克组成的“介子”。

据张黎明介绍,科学家也提出了其他更奇特的夸克组合,比如,由两个夸克和两个反夸克组成的四夸克(tetraquarks)粒子,以及由四个夸克和一个反夸克组成的五夸克粒子。

那么,已经被发现的三种“五夸克”内部结构如何?它们是五个夸克均匀混合?还是由一个重子和一个介子粘在一起形成的松散“分子”?团队目前倾向于后者。

张黎明说:“新发现使我们对五夸克态的理解又进了一步。五夸克的内部结构无法直接测量,需要理论学家和实验学家共同努力。我们将进一步测量这3个五夸克粒子的更多性质(如自旋等),为其寻找更多‘同伴’,研究其性质可以让我们更好地理解物质构成的秩序。”

(文章来源 2019年4月3日《科技日报》)