

叶轮机气动弹性力学引论

周盛 等著

国防工业出版社

叶轮机气动弹性
力学引论

国防工业出版社

内 容 简 介

叶轮机气动弹性力学是介于空气动力学和固体力学之间的一门新兴的边缘科学,它涉及与叶轮机械气动弹性相关联的定常流与非定常流动特性、自激振动机理以及各种颤振现象的物理图画及数学模型等的描述。本书作为引论侧重阐述叶轮机气动弹性力学的工程背景、物理概念、研究方法及理论分析。全书共十二章,书中编入了笔者们的科研和实验成果,以及国内外新近的有关资料,是第一本介绍叶轮机气动弹性力学的专门著作。

本书可供有关叶轮机械的设计、研究、维修、工程人员参考,并可作为有关叶轮机械专业的教师、研究生和大学生的一本参考书。

叶轮机气动弹性力学引论

周 盛 等 著

责任编辑 林国方

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 13/4 203 千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷 印数: 0,001—1,825册

ISBN 7-118-00072-8/V5 定价: 4.80元

写在前面

在多种有关军、民用产品发展的推动下，本世纪七十年代由“理论与应用力学国际联盟（IUTAM）承认了一个新的学科分支，这就是叶轮机气动弹性力学（Aeroelasticity in Turbo-machinery）。近年来在航空燃气涡轮发动机和蒸汽轮机等产品的研制与运行过程中出现了为数不少的叶轮机气动弹性故障，叶轮机气动弹性力学正是在生产需要的推动之下而得到发展的。尽管有关叶轮机气动弹性力学领域的论文数目不断增多，并且有以这一分支为主题的专门性国际会议，但至今还没有一本以叶轮机气动弹性力学来命名的专门著作问世。因此，笔者们不顾学识浅薄，谨写成这本引论献给读者。

任何一门技术科学分支均应包含如下三个要素。一是有关的工程背景或科学事实；二是有关的科学概念或理论；三是相应的研究方法、技术和工具。从一门学科分支发展的内部原因来考察，将会发现，由于上述三要素之间不断出现矛盾，又不断得到克服，从而推动这一分支的不断发展。叶轮机气动弹性力学作为技术科学中的一个新的分支也不例外。对于它的三要素可以简略描述如下。它的工程背景涉及到能源及国防领域中很多重要的工业部门，而且随着单机容量的提高、产品结构日益轻型化、以及某些运行方式的发展，对于这个分支的需求将会日益迫切；从这个分支的科学概念和理论体系角度来看，尽管还发展得远未完善，但却涉及到颇为艰深的数学与力学理论，因而属于比较严谨的学科分支；从它的研究方法、技术和工具角度来看，从理论和实验角度都要求甚高，并且常常耗资巨大。

技术科学是作为生产领域和基础科学之间的桥梁而出现的。叶轮机气动弹性力学作为技术科学的一个分支亦不例外。因此，

笔者们希望这本书能在有关工程技术人员和机理研究人员中都能找到读者。对于工程技术人员来说，书中对于工程背景方面的有关文献作了整理和归纳，并介绍了此学科分支的基础研究方法思路。对于从事基础和应用基础研究的科研人员说来，本书有助于了解工程背景和物理现象，并可作为与有关基础学科相联系的跳板。对于博士、硕士研究生和高年级大学生说来，这本引论性书籍可以作为了解这个新的分支的入门读物，以便为进一步阅读文献和开展研究工作做准备。

由于叶轮机气动弹性力学作为一门学科分支尚处于创建阶段，至今只有一些以此名称为名的会议录及论文集，还没有一本以此学科分支为主题命名的专著。这就给笔者们撰写此书带来了困难。因此，我们只打算将本书写成一本描述一个技术科学分支概貌的引论。也就是说，尽管叶轮机气动弹性力学这一分支涉及到很多数学工具和力学理论，但作为一本引论，笔者们希望能在较短的篇幅之内，着重阐述其工程背景和物理图画，并把有关数学工具及公式推导压缩到最低限度。

书中第三章由郑叔琛撰写；第五、六、十章由冯毓诚撰写；第七章由吴士祥和瞿致欢撰写；第八章由魏星禄撰写；其余各章由周盛撰写。限于笔者们的水平，谬误之处在所难免，恳切希望读者们批评、指正。

笔者于北航校园

一九八六年九月

目 录

第一章	叶轮机械中的流体诱发振动	1
§ 1.1	从航空燃气涡轮发动机与水轮机的结构完整性谈起	1
§ 1.2	什么是叶轮机气动弹性力学	5
第二章	航空燃气涡轮发动机中的叶片颤振	13
§ 2.1	引言	13
§ 2.2	亚/跨音失速颤振和超音失速颤振	16
§ 2.3	轴流压气机的堵塞颤振与负攻角失速颤振	23
§ 2.4	轴流风扇的超音非失速颤振	27
§ 2.5	A100型超音颤振与系统耦合颤振	30
§ 2.6	小结	31
第三章	蒸汽轮机的叶片颤振	33
§ 3.1	引言	33
§ 3.2	小相对容积流量及高背压运行条件下末级的流动特点	34
§ 3.3	末级叶片动应力突增现象	42
§ 3.4	小结	51
第四章	如何定量描述叶片颤振	54
§ 4.1	引言	54
§ 4.2	飞机机翼颤振基本考虑简述	55
§ 4.3	机翼颤振与叶片颤振之间的基本差别	60
§ 4.4	判别叶片颤振发作的能量法	62
§ 4.5	判别叶片颤振发作的特征值法	65
§ 4.6	小结	73
第五章	叶片失速颤振机理	75
§ 5.1	引言	75
§ 5.2	孤立叶片排的定常分离流型	77
§ 5.3	振荡二维叶栅非定常分离流	84
§ 5.4	分离区内部对于叶型振荡的响应	91

§ 5.5	耦合振动对于叶片失速颤振发作的影响	92
§ 5.6	小结	99
第六章	叶片颤振的实验研究	102
§ 6.1	引言	102
§ 6.2	叶片颤振的高空台实验研究	104
§ 6.3	叶片颤振的旋转实验研究	108
§ 6.4	叶片颤振的静止环形叶栅实验研究	112
§ 6.5	叶片颤振的二维平面振荡叶栅风洞实验研究	118
§ 6.6	小结	121
第七章	叶片振动的非接触测量方法	124
§ 7.1	引言	124
§ 7.2	间断相位测量振动的基本原理	125
§ 7.3	脉冲传感器及其安装	130
§ 7.4	非接触式叶片振动显示器简介	133
§ 7.5	小结	139
第八章	描述孤立振荡叶片排中非定常流动的基本方程组	140
§ 8.1	引言	140
§ 8.2	转子旋转角速度 ω_1 随时间改变的无粘气动方程组	141
§ 8.3	相对运动下的位函数方程	147
§ 8.4	三维非定常扰动速度位方程	151
§ 8.5	三维非定常扰动速度位振幅方程	152
§ 8.6	简化成二维平面叶栅过程中分析三维非定常扰动效应	153
§ 8.7	对于定常平均流的进一步简化	155
§ 8.8	小结	157
第九章	预测叶片颤振发作的计算流体力学方法	159
§ 9.1	引言	159
§ 9.2	非定常扰动速度位振幅方程数值解	164
§ 9.3	非定常欧拉方程组的数值解	174
§ 9.4	与失速颤振相对应的非定常分离流场数值解	180
§ 9.5	小结	184
第十章	预测叶片颤振发作的经验方法	187
§ 10.1	引言	187

§ 10.2	预测叶片失速颤振发作的经验方法发展简介	187
§ 10.3	预测叶片失速颤振发作经验方法的理论基础	189
§ 10.4	预测叶片失速颤振发作经验方法的发展	197
§ 10.5	小结	200
第十一章	预测叶片颤振发作的变形激盘法	202
§ 11.1	引言	202
§ 11.2	预测叶片失速颤振发作的变形激盘法简述	205
§ 11.3	变形激盘法预测轴流压气机叶片失速颤振	217
§ 11.4	变形激盘法预测蒸汽轮机叶片颤振	222
§ 11.5	变形半激盘法简述	227
§ 11.6	小结	230
第十二章	本学科分支发展展望	232
§ 12.1	对于本学科分支主要内容的回顾	232
§ 12.2	可能的某些发展趋向	240

第一章 叶轮机械中的流体诱发振动

§ 1.1 从航空燃气涡轮发动机与水轮机的结构完整性谈起

在叶轮机械的多种应用中，航空燃气涡轮发动机是最有代表性的用途之一，所以在介绍叶轮机械中的流体诱发振动时，我们就从航空燃气涡轮发动机的结构完整性谈起。所谓航空燃气涡轮发动机的结构完整性，具体来讲就是指发动机零部件结构与强度的完善程度，或者说是发动机的可靠性与耐久性的保证。航空燃气涡轮发动机结构完整性这一概念是美国军方于六十年代末期提出来的。出现这一概念的工程背景是：在此期间美国军用发动机事故在数量与严重性两方面都显著增加。例如：据美国空军统计，在一九六三年以后的十六年中，空军军用飞机发生了 3824 起飞行事故，其中由发动机引起的有 1664 起，占 43.5%。而发动机因结构强度或寿命问题而导致事故者占半数以上。之所以出现这一类问题，主要原因在于飞机和发动机的性能在不断提高，因而发动机零部件工作负荷增加，与此同时又要求尽量压低重量，从而不可避免地导致零部件应力水平提高，刚性下降，于是强度、变形、振动、寿命等等都呈现矛盾。然而在这些情况发生之前，发动机的可靠性与耐久性问题并未受到重视，结构分析以及实验验证手段都不够完善，又缺乏较为准确的发动机结构设计准则。综合这些原因可知，一系列事故的发生并非偶然。

我国国内情况亦不例外，从外场发生的大量发动机事故来看，加强发动机结构完整性研究也是非常迫切的。

加强发动机结构完整性的研究工作，将会使得投入使用的发动机更加可靠，寿命大为延长，从而实现可观的经济效益。

从发动机结构完整性工作来看，这包括从结构设计准则、结

构分析方法、结构试验要求、寿命监控等不同方面来保证发动机的可靠性和耐久性。粗看起来，似乎应局限于固体力学及材料科学领域。但是，与一般的工程机械结构完整性不同，发动机结构完整性问题有其自身的特点。最突出的特点之一，在于发动机中绝大部分零部件均处于高速气流包围中。当故障发生时，直接表现形式虽为断裂、裂纹等，但过高的应力往往是由于定常及非定常气动负荷的直接后果。特别是非定常气动负荷，由于从理论到实验都研究得不够，过去在设计中常常无法估计得很充分，这就更易于引起一些意想不到的问题。例如，F100-PW-100 风扇发动机第一级风扇转子叶片在研制过程中出现的失速颤振故障，以及 J85-GE-21 涡轮喷气发动机多级压气机在研制中出现的两级动叶颤振事故等等。这些并不是常见的强迫振动共振现象，它们还涉及很多非定常气动理论、分析方法以及实验技术等问题。因此，对于发动机结构完整性问题说来，从结构、强度、振动等固体力学角度出发进行研究自然构成主体，材料科学构成一翼，另外一翼也是不容忽视的，这就是从气动力学角度出发所进行的研究，特别是关于非定常气动力学研究。因为过高的交变气动负荷往往是零部件动应力过高的起因。为了溯本求源，在设计或排故过程中，对于相关联的气动问题，特别是非定常气动问题应当予以充分考虑。

尽管航空燃气涡轮发动机的进气道、风扇、压气机、主燃烧室、涡轮、加力燃烧室以及尾喷管都可能出现流体诱发振动问题，但是如本书标题所限定的，本书将只讨论与叶轮机械有关的一部分。因此，研究范围限于风扇、压气机及涡轮。由于叶轮机械都是高速旋转部件，所以在可能发生的故障中有一部分与气动问题无关，而是类型较为单纯的转子动力学问题，这一部分亦非本书所讨论的内容。本书所感兴趣的只是与气动问题紧密相关联的那一部分。

上面所论述的问题自然并非航空燃气涡轮发动机中叶轮机械所独有。各类叶轮机械都需要在流体工质与叶片之间实现能量交

换，为流体所包围乃是必然的。无论是发电用的蒸汽轮机；工业用透平压缩机；风机；水轮机与水泵；作为新能源的风力透平等，都存在有类似的结构完整性问题。其中流体诱发振动问题占有相当比重。对于航空燃气涡轮发动机和蒸汽轮机，第二章与第三章还要专门叙述，这里以水轮机为例来简述其大体情况。

我国水能资源极其丰富，可经济开发的水电装机容量为3.8亿kW，居世界首位。然而至今全国水电总装机容量只有2100万kW，水电装机总容量利用率仅为5.5%。若按水电年发电量利用率计算则只有3%。因此，优先开发水电势在必行。随着水电资源的逐步开发，水轮机机组的容量、尺寸与水头日益加大，将有一系列科学技术问题有待解决。其中较为突出的一个问题便是水轮机振动。例如，在八十年代初，水电部曾调查了大中型水轮机组293台，从水电设备质量调查的初步统计可知，约有80%以上的水轮机转轮叶片在运行中产生了不同程度的裂纹，已有17台水轮机先后从裂纹扩展到产生叶片断裂事故。

由于各种原因所引起的水轮机振动，不仅影响水轮机及其零部件的使用寿命，而且还影响机组的安全和整个电力系统的供电质量。严重的振动将使机组无法正常运转，当引起电力系统的电力共振时，电力系统也无法正常工作，所造成的直接与间接经济损失是可以预期的。

强烈的振动是水轮机组运行中最常见的一类故障。究其原因，主要源起于机械、水力与电力三方面。引起机组振动的水力学原因，最常见的有如下几种：涡列所激起的振动；转轮及叶片的颤振；尾水管中水流低频压力脉动。现分别简述如下。

由于水轮机经常在非设计工况之下运行，叶片绕流条件不良。当附面层分离之后，就会导致转轮出口脱流旋涡的形成。当旋涡在弹性叶片后面以非对称的形式交替脱落时，就构成脱流涡列（图1.1）。但是，这种涡列与典型的Van Karman涡列尚不完全一致，因为存在着叶栅对于涡列的影响。总之，随着旋涡的不断出现，必将产生垂直于流向的交变侧向力。此交变侧向力作

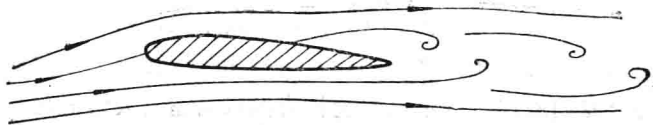


图1-1 叶片的脱流旋涡和涡列

用于弹性叶片上，逐渐激起叶片的振荡。由于叶片振动的反馈作用，叶片附近的水流受到激发和扰动，这就又产生作用于叶片上的周期性脉动压力。经过如此反复与持续的相互作用，对应于一定的几何尺寸与绕流速度，脱流旋涡的脱落频率有可能接近于流体弹性体系的自然频率。当脱落频率突然进入流体弹性体系振动频率的同步状态时，就发生共振，于是就有能量输入到弹性变形体中，并激起大幅度的振动。

苏联高尔基水电站机组在甩负荷时，其转桨式水轮机转轮叶片曾发生颤振。文献〔2〕也曾提到水泵式水轮机在飞逸工况下发生失速颤振等技术事故。国产轴流转桨式水轮机组在30%负荷以下时振动一般较大。有的轴流转桨式机组还发现在空载运行时不稳定，并影响了机组的并网，有的蓄能机组在开机停机过程中发现振动剧烈。这些现象可能与叶片失速颤振发作有关。总的看来，有关水轮机叶片颤振的研究尚有待开展，这很可能有助于分析一些用其它方法难以解释的故障。

关于水轮机尾水管中水流的低频压力脉动问题，与大涡带的出现有较密切关系。混流式水轮机或定桨式水轮机在非设计工况下运行时，由于转轮出口处的旋转水流以及脱流旋涡和汽蚀等因素的影响，在尾水管内常引起水压的脉动。尤其是在尾水管内出现大涡带以后，涡带以近于固定的频率在管内转动，从而引起水流的低频压力脉动，并有可能直接影响到电力系统的稳定性。因此，尾水管中的大涡带已成为当前许多水电站稳定运行的一项重大障碍。

除开上述几种情况之外，水轮机迷宫上漏通道中的压力脉动所激起的机组振动也是属于水力诱发振动。这种情况多发生于高水头混流式机组。由于转轮止漏装置的间隙过小或者结构不当，当转轮出现很小的周期性偏心运行时，也会引起转轮背压与止漏间隙中压力的显著变化，压力脉动达到一定程度就会引起机组的自激振动。

文献〔2〕指出，对于水轮机叶片产生裂纹乃至断裂等故障，当进一步探讨其起因时，一方面固然与金属材料本身质量、铸造缺陷、加工粗糙和结构不合理等有关，但另外值得考虑的还有对于水轮机的构件在各种实际运行条件下的强度计算方法有关。例如，对于动态应力、疲劳强度、断裂力学等还缺乏很好的研究。特别是当机组长期偏离设计工况和在不利负荷下运行时，对于此时所产生的振动与动应力，以及相应的计算方法更是缺乏研究。所以会出现此薄弱环节，原因之一在于水流诱发振动是个边缘问题，涉及到几个学科分支。例如偏离设计工况时叶片绕流流场的计算，以及水压脉动形成的机理及其规律研究，属于流体力学范畴；水压脉动引起水轮发电机组的振动，属于机械振动学范畴；水轮机组大振幅自激振动过程，则属于水动弹性力学范畴。这些问题不仅今天存在，随着我国水电事业的发展——机组尺寸不断增加，单机容量越来越大，设计水头越来越高——势必造成机组的强度与稳定性问题日益突出。

在本节中我们从航空燃气涡轮发动机和水轮机的结构完整性问题谈起，简单地讨论了流体诱发振动与这两类动力机械的结构完整性之间的关系。采用这样一个话题作为引子，主要目的是想说明，流体诱发振动问题乃是一个边缘学科，在这样一个边缘学科里，流体力学应发挥其应有的作用。

§ 1.2 什么是叶轮机气动弹性力学

从学科分类角度看，与叶轮机械流体诱发振动问题相对应的学科分支，通常被称为叶轮机气动弹性力学。因此，在本节中首

先对于工程中存在的形形色色的流体诱发振动问题作一分类。

所谓流体诱发振动问题，乃是指由于流体动力与由于流体动力所引起的绕流弹性体的变形和位移发生相互作用，而产生的弹性体振动，也就是指位于流场中的弹性结构体的振动稳定性问题和动力响应问题。

在自然界和工程结构中，流体诱发振动现象是广泛存在的，并早已被人们所注意。例如根据犹太教文献的记载，大卫王夜间把他的多弦琴挂在床头，在午夜的微风里多弦琴嘤嘤鸣响。再如我国古语“树欲静而风不止”，这也与流体诱发振动现象不无关联。在人们创造的各种工程结构中，小到单簧管的簧片，大到巨型飞机和摩天大楼，流体诱发振动现象俯拾即是。有时人们借助这种现象形成有益的振动，更多的场合则是由于人们忽略了这种现象而造成破坏性的振动事故。特别是近年来，设计师们都倾向于把材料利用到极限，因而各种结构都变得越来越轻巧和富有挠性。在这样的工程背景之下，忽视流体诱发振动将会造成更为严重的后果。因此，对于流体诱发振动现象的研究就愈来愈显得重要。

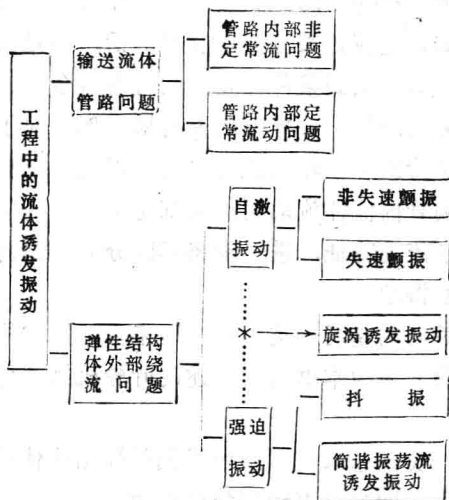
尽管流体诱发振动问题涉及到国民经济与国防的很多重要领域，并且其重要性随着工程结构轻型化的趋势与日俱增，但相对说来，这在古老的力学家族中还算是一个新分支。例如，以流体诱发振动为名的专著以及以其为主题的国际会议还都是七十年代才出现的。

对于涉及到许多工程领域的流体诱发振动问题，表 1.1 给出了一个分类。此分类表考虑到了弹性结构体的形状、流动特征与振动类型，并在最后给出了一些工程举例。

由表 1.1 可见，第一级分类是根据弹性结构体的流动特征进行的。共分为两大类，即输送流体的管路的流体弹性稳定性问题，以及弹性结构体外部绕流所导致的流体诱发振动问题。前者则是指当管道内部有流体流过时所诱发的振动。

前一类问题的具体含义如下。在管路中流动的流体必将对管壁施加压力，在一定条件下将使管路变形甚至丧失稳定性。流体

表1.1 工程中的流体诱发振动



举
例

输送流体管路的气动弹性稳定性	液体火箭发动机输送燃料管路 水轮机输水管道 石油输送管道 水力输煤管路系统
非失速颤振	飞机机翼的经典颤振 风扇叶片的超音非失速颤振
失速颤振	直升机旋翼失速颤振 轴流压气机失速颤振 蒸汽轮机长叶片失速颤振
旋涡诱发振动	换热器 桥梁 高层建筑 海底电缆
抖振	飞机尾翼抖振 航空燃气涡轮发动机叶片抖振
简谐振荡流诱发振动	轴流压气机 旋转失速团诱发振动 轴流压气机 转子-静子干扰诱发振动 轴流压气机 进口畸变流诱发振动

输送管道的稳定性在实用上是很重要的，因为管路的固有频率通常总是随着流体流动速度的提高而降低。在某些涉及以很高速度流动的液体，如果是流过柔性薄壁管路的话，一旦由于高速流动而使管路固有频率降低到某种程度，则管路就会变成不稳定的，这时很容易疲劳或断裂，并导致严重后果。例如对于液体火箭发动机的燃料输送管路和水轮机的进水管，以及长距离输油管路，管路固有频率因管内流体流动而降低都是关系重大的。还可进一步根据管路内部流动特征，进一步将其区分为管路内部定常流动或变速流动诱发振动。

本书主要关心的是后一类问题，即来自弹性结构体外部绕流的流体诱发振动。因为本书所要描述的叶轮机械流体诱发振动问题属于后者。

对于这后一类问题来说，还可根据弹性结构体振动类型进一步区分为两大类，即自激振动与强迫振动。

所谓强迫振动，乃是指除开弹性结构体自身的机械振动之外，还存在着来自弹性结构体之外的周期性外力，此外力与弹性结构体的振动运动无关。一旦周期性外力的频率与弹性结构体的固有振动频率重合时，振幅将急剧增长，这就是共振。总之，只有当来自系统之外并且与系统运动无关的周期性外力存在时，才会出现系统的强迫振动。相对于自激振动说来，强迫振动是在工程问题中更为多见的振动形式。

另外一类是自激振动。尽管从振幅呈灾难性增长的角度来看，自激振动与强迫振动中的共振现象颇为类似，但究其力学内容，则二者颇有不同。如前所述，强迫振动乃是周期性外力与系统自身运动无关的振动形式。然而，对于自激振动说来，振动系统所承受的周期性外力是由于系统自身的振动运动而出现的。以最简单的单自由度线性振动系统为例，一旦阻尼项为负值时，振幅就将随时间而逐渐增长，这时就会引起自激振动。一旦自激振动发作，则振动系统就会不断从外界获取能量并导致振幅迅速增大，也就是振动系统丧失了稳定性。所以有的文献认为，应把自激振

动称为不稳定振动^[6]。

对于弹性结构体系外部绕流的流体诱发自激振动问题，根据位于流场中的被绕流结构体形状，可进一步区分为两类，即流线体的流体诱发自激振动，以及钝体的流体诱发自激振动。前者就是通常所说的颤振，这自然是典型的自激振动。根据自激振动的定义，弹性结构体上所受的周期性外力应与结构体自身运动密切相关。考查机翼或者叶轮机各类颤振问题可知，都是符合上述定义的。

就相关的流体力学成因来看，颤振问题基本上可分为两类。对于第一类，可以认为流动分离和边界层效应对于颤振发作没有重要影响，于是可按照位流模型处理。例如飞机机翼的古典颤振。第二类颤振发作机理则与流动分离和旋涡形成关系密切。可以统称为失速颤振。

与流线体的颤振相对应，另外一类是钝体的流体诱发振动。当钝体位于流场中时，在钝体后面就会发生周期性旋涡脱落现象，并在一定条件下可能引起弹性体振动。显然，这种现象与冯·卡门（Von Karman）涡街直接相关。冯·卡门涡街在流体绕过具有圆形剖面的钝体后面特别明显，但对于其它形状钝体结构说来，在其后方也能出现。对于这一类钝体流体诱发振动问题，经常称之为旋涡诱发振动。

由于钝体在定常自由来流中也会产生振动激励，所以有的说法认为这乃是一类自激振动。但是，在机械振动学中，自激振动的概念始终是与具有反馈过程的动力不稳定性概念联系在一起。然而在旋涡诱发振动问题中，这种导致不稳定性的气动弹性反馈过程有时比较微弱。也就是说，在定常的自由来流中的静止钝体上就已经作用有由于旋涡脱落而产生的非定常气动力，而且这个激振力可能不随振动振幅而发生实质性改变，所以与自激振动的基本定义不尽相符，因此应将旋涡诱发振动归入强迫振动一类。也许可以将旋涡诱发振动问题考虑为自激振动与强迫振动之间的过渡形态更为恰当。