

文章编号: 1000-6893(2001) 02-0155-05

## 部分充液悬臂转子在不稳定区的动力特性

祝长生

(浙江大学 电机系, 浙江 杭州 310027)

### DYNAMIC BEHAVIOUR OF A ROTOR PARTIALLY FILLED WITH FLUID IN THE UNSTABLE REGION

ZHU Chang-sheng

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**摘 要:** 描述了试验中部分充液转子系统在失稳过程中的动力特性, 注意了转子在不稳定区的涡动频率和方向, 流体表面的状态与转子失稳之间的关系; 研究了充液量对转子的涡动频率和不稳定区的影响。报道了部分充液转子系统在失稳过程中的一些重要现象, 为深入研究部分充液转子系统失稳机理提供了实验依据。

**关键词:** 转子动力学; 不稳定; 旋转流体; 液固耦合; 转子

**中图分类号:** TH133. 3; TB114. 2      **文献标识码:** A

**Abstract:** The whirling behaviour of an over-hung rotor partially filled with fluid in the unstable region is investigated experimentally. Specific attention is paid to the developing process of the rotor instability, the whirling frequency and direction within the unstable region, the fluid free surface characteristics and the dynamical behaviour of the rotor system while the instability occurs. The effects of the fluid fill ratio on the whirling frequency and the unstable region are also studied. The results clarify many issues and show many new phenomena about the instability of the rotor partially filled with fluid for the first time. These new phenomena include the subsynchronous frequency occurring before the instability which does not result in the instability of the rotor system and disappears in the unstable speed region at large fluid fill ratios, different whirling frequencies existing in the unstable region between the slowing increasing and decreasing speed operation, the breaking-down phenomenon of the fluid free surface and the chaotic motion.

**Key words:** rotordynamics; instability; rotating fluid; fluid-solid interaction; rotor

部分充液转子的不稳定现象自从 Kollmann<sup>[1]</sup>在实验中观察到之后, 已有一些学者研究过这个问题, 但大多数都是从理论上对部分充液转子的不稳定进行分析, 试验研究开展得较少<sup>[2~6]</sup>, 缺乏必要的能够验证理论模型的实验数据。本文详细地描述了实验中观察到的部分充液转子系统在失稳过程中转子系统的动力特性及充液量对转子涡动频率及不稳定区的影响。

### 1 实验设备

实验转子是一个垂直地支承在两个轴承上的单盘刚性转子, 具有圆柱形空腔的圆盘安装在转子的顶端形成悬臂结构。下轴承为具有较大刚性的球轴承, 上轴承为刚度较小的弹性支承。转子的长度为 486mm, 轴承之间的跨度为 210mm, 重量为 15.56kg。圆柱形空腔与圆盘同心, 圆盘的上端

由透明的有机玻璃制成以便观察流体表面的运动状态。圆盘的外径为 300mm, 空腔内径为 270mm, 空腔深度为 40mm。上下轴承均为刚性支承时转子的一阶临界转速约为 180Hz; 下轴承为刚性支承而上轴承为弹性支承时转子的一阶临界转速为 7.8Hz, 二阶临界转速为 87.3Hz。在圆盘与上轴承之间安装了一个滚动轴承, 滚动轴承的内圈与轴之间形成了一个单边间隙约为 0.5mm 的限幅器, 以防止转子在不稳定区振动过大引起实验设备的破坏。为进行转子系统不稳定性主动控制研究, 在悬臂端安装了一个电磁阻尼器。实验转子系统如图 1 所示。试验中水作为工作流体。

用非接触式电涡流传感器测量转子上悬臂盘处的振动。通过示波器来观察转子的涡动方向及轨道的变化。对转子系统振动信号频谱特性的分析, 得到转子的涡动频率。实验前对转子进行了动平衡, 以减小转子系统在临界区的振动从而能够较准确地确定转子出现不稳定的边界。

收稿日期: 1999-11-12; 修订日期: 2000-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(19802015)和国家教委回国人员启动基金资助项目

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2001/02/0155/>

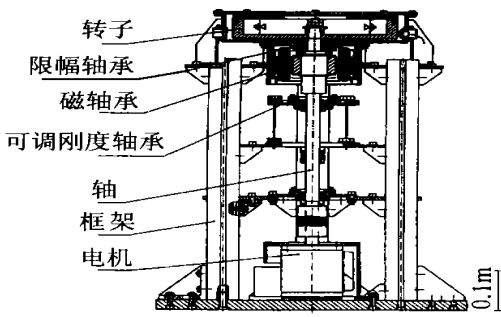


图 1 实验转子系统

Fig. 1 Schematic of the test rig

### 2 实验结果及分析

(1) 空转子系统的动力特性 在进行充液转子系统的动力特性试验前, 对空转子系统的动力特性进行了详细研究。实验结果表明空转子系统基本上是线性系统, 所存在的非线性因素很弱不可能导致转子系统出现非协调轨道或不稳定, 限幅轴承在工作时对转子系统也没有产生明显的非线性, 故在充液转子的试验过程中出现的非协调轨道或不稳定必为旋转流体对转子的作用所致。

(2) 转子系统失稳过程、转子系统的动力特性及流体的表面形状 通过对大量的失稳过程的详细观察和分析, 发现在不同充液量的情况下, 转子的失稳过程有着明显的差异。

图 2 给出了充液量较小时转子的响应曲线及不同状态下振动信号的频谱结构。结果说明当充液量较小时, 在低转速区转子作单频同步的正进动。当转速增大到某一转速后, 转子系统虽然还作同步的正进动, 但转子的振动信号中出现了一个小于转速频率的亚转速频率。这个亚转速频率一般为转速频率的 70% ~ 90%。充液量越大, 亚转速频率与转速频率之比越小。随着转速进一步地增大, 亚转速频率所对应的振动强度随之增大, 转子的涡动轨道也从协调的同步轨道变为非协调的异步轨道。在接近失稳边界, 亚转速频率的振动强度可能会接近或大于转速频率的振动强度, 但由于转子的振动较小, 即便对转子或流体表面进行扰动, 转子系统仍然能够回到原来的异步涡动状态稳定地运行。只有在亚转速频率的振动强度大于转速频率振动强度的一定值后, 转子的振动突然增大使转子与限幅轴承相接触, 转子的涡动频率完全由亚转速频率所决定。这时如果降低转子的转速, 转子系统的涡动轨道也不能立即恢复到原来的状态, 实际上转子已进入了失稳区。失稳后

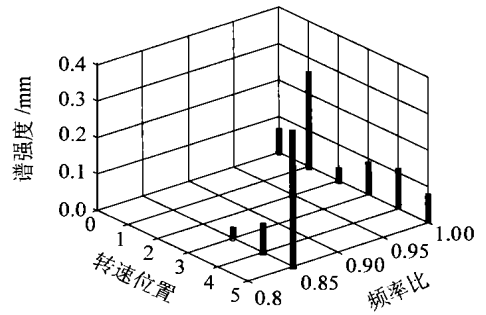
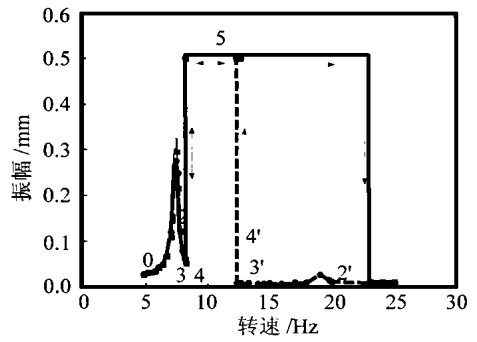


图 2 充液量 250g 时转子的响应曲线及不同状态下转子振动信号的频谱

(0- 表示在亚临界区; 1- 在临界区; 2- 在超临界区; 3- 在亚转速频率出现时; 4- 在失稳前; 5- 在失稳后)

Fig. 2 Unbalance response and frequency spectrum of the vibration of rotor system with 250g water (0 in subcritical speed region, 1 in resonant region, 2 in supercritical speed region, 3 occurring sub-synchronous frequency, 4 before losing stability, 5 after losing stability)

转子仍作亚异步的正进动, 转子的涡动频率与转速频率之比与失稳前出现的亚转速频率与转速频率之比相同。在亚转速频率出现到转子失去稳定这段转速范围内, 由于这两个频率所对应的振动强度的相对变化, 转子轨道的变化十分复杂。

转子在失稳前和刚进入失稳状态后, 流体表面基本上为一个光滑的圆柱状。只有当转子的振动很大或直接对流体表面进行扰动后, 流体表面才会出现严重的失稳发生脱落, 这时流体表面不再是一个光滑的圆柱状, 流体在深度和圆周方向上的厚度不停地发生着剧烈的非连续的变化。这时在实验中也可以清楚地听到流体表面发生脱落的声音。图 3 给出了流体发生脱落后最上端截面流体表面的形状。流体表面发生脱落后转子系统的振动随之减小, 流体表面又重新形成一个圆柱面, 然后又出现脱落, 流体的这个脱落- 形成- 再脱落的运动过程反过来对转子的运动产生影响使转子系统的运动也出现与流体的这种运动基本

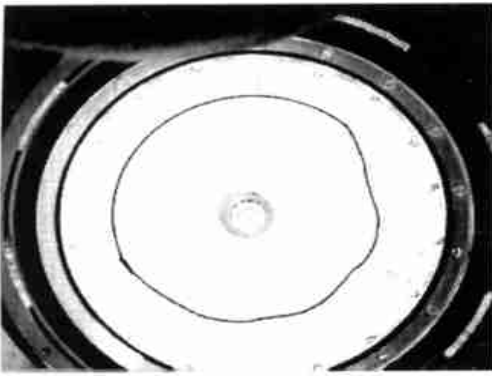


图 3 流体表面发生脱落后流体的表面形状

Fig. 3 Fluid free surface after occurring breaking-down phenomenon

同步的时大时小的复杂运动, 转子的振动频谱中也出现了更多的频率分量。实际上由于流体表面脱落- 形成- 再脱落运动过程的随机性, 转子的运动已经进入了混沌态。混沌态转子系统的运动轨道、振动信号和对应的频谱如图 4 所示。

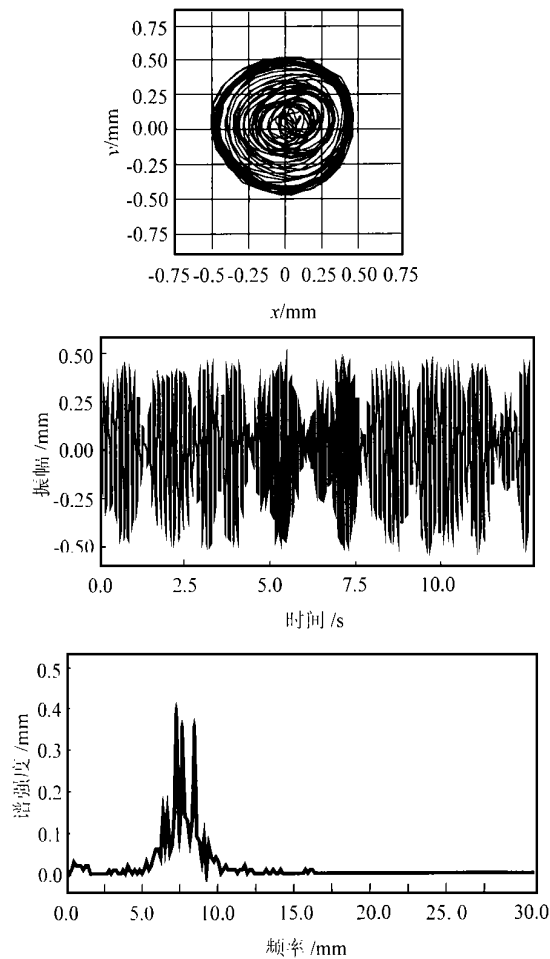


图 4 混沌态转子系统的运动轨道、振动信号和频谱

Fig. 4 Rotor orbit, time history and spectrum in chaotic motion

围内, 转速的增大或减小并没有影响转子和流体表面的失稳状态, 只有在转速远大于由降速过程确定的不稳定的上边界转速之后, 转子和流体表面又重新恢复为稳定的同步运动状态。

当转子从高速区稳定的同步运动状态逐渐降速时, 转速小于由增速过程确定出的不稳定的上边界转速后, 转子仍然作单频同步的正进动, 并没有出现不稳定。当转速降低到一定值时, 转子的振动信号中才出现了一个小于转速频率的亚转速频率。随着转速进一步降低, 亚转速频率对应的振动强度也随之增大。只要亚转速频率的振动强度不超过转速频率振动强度的一定范围, 转子在扰动后都能回到原来的状态。只有在转速降低到一定值之后, 转子的振动才会突然增大使转子与限幅轴承相接触, 转子进入失稳状态, 其后转子及流体表面的特性与增速过程相似。当转速稍低于由增速过程确定的不稳定的下边界转速时, 如果让转子运行较长时间, 转子和流体表面的不稳定现象将逐渐消失, 转子的运动和流体表面的形状最后基本上恢复到增速过程中相应转速下的状态。这说明只在不稳定的上边界区存在明显的滞后现象。

在充液量较大或很大时, 随着转子的转速由低速向不稳定边界靠近, 在某一转速处, 转子的振动信号中也同样出现了一个约为转速频率 80% 的亚转速频率, 但这个亚转速频率不随充液量变化。随着转速进一步向不稳定边界靠近, 转子的振动信号中除了已出现的第 1 个亚转速频率外, 还出现了第 2 个亚转速频率, 而且第 2 个亚转速频率的振动强度随着转速向不稳定区靠近而迅速地增大。第 2 亚转速频率一般为转速频率的 60% ~ 70%, 并且随着充液量的增大而减小。同样, 虽然这时转子系统作亚异步的正进动, 亚转速频率对应的振动强度也可能会接近或大于转速频率对应的振动强度, 但是转子的振动较小, 转子在扰动后仍然能够回到原来的状态稳定地运行。只有在第 2 个亚转速频率的振动强度大于转速频率的振动强度的一定值之后, 转子的振动才会突然迅速增大, 使转子与限幅轴承相接触, 转子进入不稳定状态。失稳后转子振动信号中原来首先出现的第 1 个亚转速频率反而完全消失, 只剩下第 2 个亚转速频率。在不稳定区, 转子的亚异步涡动频率与转速频率之比始终与失稳前的第 2 个亚转速频率与转速频率之比相同。从第 2 个亚转速频率出现到转子系统失去稳定性这一转速范围内, 由于转子

振动信号中含有 3 个振动强度不断变化的频率, 所以转子系统的运动轨道比充液量较小时转子系统的运动轨道更为复杂。当转速从高速逐渐减小时, 不稳定发生的过程与转速逐渐增大时观察到的现象相似, 只是开始出现不稳定的转速不同, 在不稳定的上边界区存在着明显的滞后现象。充液量较大时转子的响应曲线及转子系统在不同状态下振动信号的频谱结构如图 5 所示。

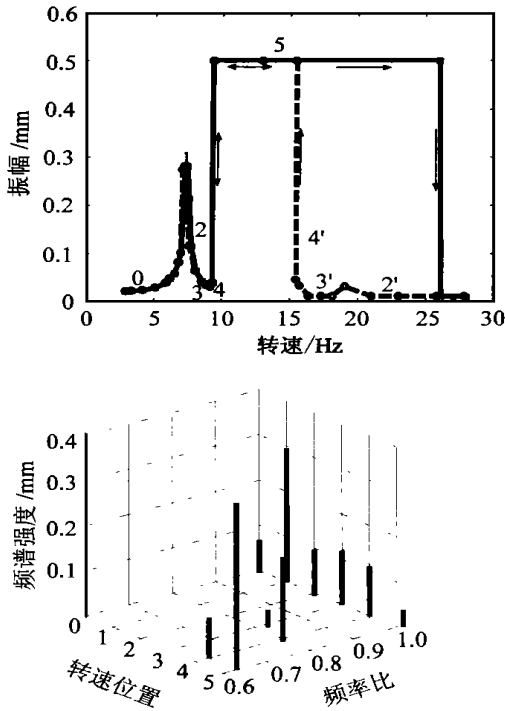


图 5 充液量 1kg 时转子的响应曲线及不同状态下转子振动信号的频谱

(0- 亚临界区; 1- 临界区; 2- 超临界区; 3- 亚转速频率出现时; 4- 失稳前; 5- 失稳后)

Fig.5 Unbalance response and frequency spectrum of the vibration of rotor system with 1000 g water

(0 in subcritical speed region , 1 in resonant region, 2 in supercritical speed region, 3 occurring sub-synchronous frequency, 4 before losing stability, 5 after losing stability)

失稳区内转子的振动很大, 限幅轴承始终起着 一个辅助轴承的作用, 与失稳前出现亚转速频率状态相比, 转子系统的固有特性虽已发生变化, 例如转子系统的刚性明显增大, 但转子系统的涡动频率与转子的转速频率之比并没有发生明显的变化。这种现象似乎说明了, 在相同充液比的情况下, 转子系统在失稳区的涡动频率与转速频率之比与转子系统的结构动力学特性关系不大。

状态的观察还说明流体表面的运动状态决定了转子的运动状态。所以提高旋转流体的稳定性有助于改善整个转子系统的稳定性。这就是在空腔内的轴向设置槽或隔板能够改善转子的稳定性的原因。另一方面, 这也说明了研究转子的稳定性与旋转流体稳定性之间的关系和相互影响可能是弄清部分充液流体转子系统失稳机理的一个关键问题。

(3) 不稳定区转子系统的涡动频率 转子的涡动频率与转速频率同步地变化, 只是转子的涡动频率与转速频率之比保持不变(图 6)。这是部分充液转子系统不稳定特性与其它一些不稳定因素引起的转子系统失稳特性之间的一个明显的不同之处。

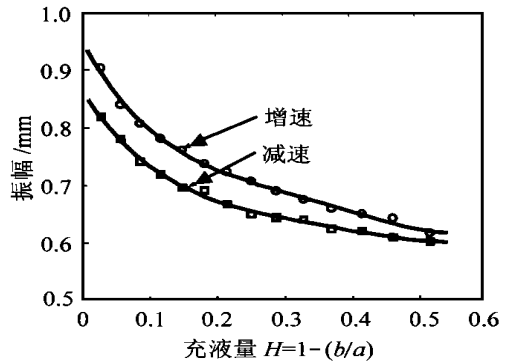


图 6 不同充液量情况下转子在不稳定区内的涡动频率与转速频率之比

( $b$  - 旋转流体内表面的平均半径;  $a$  - 空腔的内半径)

Fig. 6 The ratio of whirling frequency to rotational frequency in unstable region versus fluid fill ratios

(where  $\bullet$  is for deceleration operation;  $\square$  is for acceleration operation.)

( $a$  is the radius of the fluid free surface;  $b$  is the radius of the chamber)

特别注意的是图 6 中转子在转速逐渐增加和减小通过不稳定区时, 转子在不稳定区的涡动频率与转速频率之比存在着明显的不同, 转速逐渐增大时转子的涡动频率与转速频率之比大于转速逐渐减小时转子的涡动频率与转速频率之比。在不稳定区内转子的运动并不是唯一的, 可能存在着多个运动状态。这种现象有待进一步的研究。

(4) 充液量的大小对不稳定区的影响 一般情况下由转子系统首先出现亚异步频率确定出的不稳定区最大, 由转子系统的振动突然迅速增大确定出的不稳定区次之, 而由液体表面出现失稳现象确定出的不稳定区最小。由于不能肯定何种

判据得到的不稳定转速最接近转子的不稳定边界,所以在实验中要准确地确定出部分充液转子系统的不稳定边界是非常困难的。图7给出了在不同充液量的情况下测得的不稳定区。图中不稳定区的下(上)边界是在增(减)速运动过程中分别由转子系统的振动迅速增大以致于与限幅轴承相接触和由首先出现导致转子系统失稳的亚异步频率确定的。显然,采用不同的判据,测定出的不稳定边界并不相同,其间的差异随充液量的增大而变得更为明显。部分充液转子系统在转速超过转子的一阶临界转速后就会出现不稳定,而不是要转速大于2倍的转子系统一阶临界转速后才会出现。

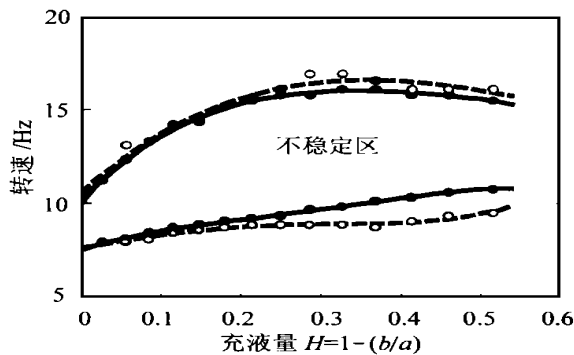


图7 部分充液转子系统的不稳定边界转速随充液量变化

(○表示由首先出现亚异步频率确定的不稳定边界;  
·表示由转子系统振动迅速增大确定的不稳定边界)

Fig. 7 Unstable boundary speeds of the rotor system versus fluid fill ratios where ○ is determined by first occurrence of the destabilising sub-synchronous frequency; · is determined by sharply growth vibration amplitude

### 3 结论

(1) 部分充液转子系统失稳过程中转子系统的动力特性极为复杂,转子系统的稳定性与旋转流体的稳定性密切相关,失稳机理有待更深入地研究。

(2) 在不同充液量的范围内,部分充液转子系统失稳的过程各异,导致转子失稳的亚转速频率的特性相似,但是出现的次序不同。在较大充液比的情况下,首先出现的与充液比无关的亚转速

频率并非导致转子系统失稳。

(3) 部分充液转子系统在转速超过转子的一阶临界转速之后就会出现不稳定。转子在不稳定区内的涡动频率并不是一个固定的频率,更不是转子系统的某阶固有频率,转子的涡动频率随转速的增大而同步增大。在给定充液量的条件下,转子在不稳定区的涡动频率与转速频率之比保持不变,其比随充液量的增大而减小。

(4) 转子在加速和减速通过不稳定区时,在不稳定区转子的涡动频率与转速频率之比存在着明显的不同,在不稳定区内转子的运动并不唯一。在不稳定的上边界区存在着明显的滞后现象。

(5) 采用不同判据测定出的不稳定边界并不相同,由转子首先出现异步涡动轨道确定的不稳定区最大,由转子系统的振动迅速增大确定的不稳定区次之,而由液体表面出现不稳定所确定的不稳定区最小。

### 参 考 文 献

- [1] Kollmann F G. Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die Kritischen Drehzahlen flüssigkeitsgefüllter Hohlkörper[J]. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Ausgabe, B, 1962, 28: 115 ~ 123.
- [2] Wolf J A. Whirl dynamics of a rotor partially filled with liquid[J]. J of Applied Mech, 1968, 35(4): 676 ~ 682.
- [3] Kaneko S. Hayama S. Self-excited oscillation of a hollow rotating shaft partially filled with a liquid[J]. Bulletin of JSME, 1985, 28(246): 2994 ~ 3001.
- [4] Ota H, et al. Experiments on vibrations of a hollow rotor partially filled with fluid[J]. Bulletin of JSME, 1986, 29(256): 3520 ~ 3529.
- [5] Berman A S, et al. Asynchronous whirl in a rotating cylinder partially filled with liquid[J]. J Fluid Mech, 1985, 150(2): 311 ~ 327.
- [6] 张杰,等.部分充液转子系统的异步振动[J].上海交通大学学报,1991,25(1):1~9.

作者简介:



祝长生 男,1963年出生。博士,浙江大学电机及控制研究所副教授。长期从事转子动力学、振动主动控制、电机的噪声及振动控制、智能流体的工程应用等方面的研究工作,对挤压油膜阻尼器有深入的研究。在国际学术会议和国内外刊物上发表论文50余篇,获国家教委科技进步三等奖一项。