

复合材料离心机转子动力学分析中的几个问题

申 仲 翰

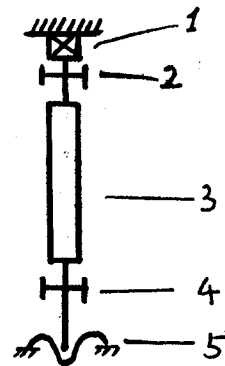
(中国科学院力学研究所)

前言 应用离心机分离铀是目前技术先进国家都在使用的方法，由于离心机分离功的大小随线速度的增加而大大增加，所以，尽力提高线速度是离心机转子设计中追求的主要目标。鉴于复合材料具有较高的比强度和比刚度，而且材料的力学性能可根据实际需要进行调整，从而使它成为制造离心机转子的理想材料。在这个基础上，对转子的结构形式、所选材料的种类和结构的铺层设计等方面提出了一系列要求，这些要求都与转子的动力分析有密切关系，亦即关系到复合材料转子的振动和稳定。关于普通材料转子的动力分析问题，已有相当成熟的研究结果，仅在80—82年，就有近200篇文章和报告从不同角度讨论了转子的稳定问题^[1]，但是由于复合材料离心机转子在结构形式、运行状态与构造材料方面所具有的特殊性，我们必须着重研究以下问题。

复合材料离心机转子的结构和动力学计算的特点 利用复合材料制造离心机转子的主要目的是利用材料的较高的比强度和比刚度。和普通材料转子不同的是，复合材料转子的结构形式不是一根带有盘和叶片的主轴，而是一个薄壁圆柱形壳体，由于双向铺层工艺的限制，使得沿壳体壁厚的平均材料强度仅能达到手册上所列额定值的2/3到3/4。一般说来，以树脂为基体的碳纤维和玻璃纤维复合材料，其应用于结构的实际模量约为 1.0×10^6 公斤/厘米²，相当于钛合金的模量。因此，与金属材料相比，其最大的好处在于比重小（约为1.5）。为了增加阻尼和抵抗振动、疲劳和断裂的能力，可利用对称杂交铺层的构造方式。

由于加工工艺的要求，转子采用单节的形式。至于是采用细长的圆筒还是短粗的圆柱壳，这是离心机转子设计中一直有争论的问题，这里除了提高分离功的因素外，振动和稳定性要求也需要考虑。一般说来，细长圆筒的临界转速偏低，要取得跟粗短圆柱壳同样的线速度，单位时间的转数要提高，从而增加了过临界数。这样看来，短的圆柱壳体可能更好些；但壳体会产生局部屈曲，以致产生动不平衡，导致转子运动的不稳定性，这又是不利的因素。因此两种形式各有优缺点，应根据具体情况进行充分计算分析后再决定取舍。

下面对转子的稳定问题做一些讨论。转子的简化模型示意如图1。假定转子系统是线性的，无轴向振动，且不平衡度很小，可忽略，于是有如下形式的运动方程：



1 磁力轴承 2 上阻尼器 3 转子
4 下阻尼器 5 悬置轴承

图 1

$$M \ddot{Z} + C \dot{Z} + KZ = 0 \quad (1)$$

这里, Z 表示横向位移矢量; M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵, 由上、下阻尼器的阻尼, 轴承阻尼及转子本身材料内阻尼构成; K 为刚度矩阵, 它包括轴承刚度和转子本身刚度。

由于基体和纤维之间的摩擦使得复合材料具有较大的内阻尼, 从而在复合材料转子的动力

分析中必须对它加以研究。其作用有二, 一是对转子的振动响应给予控制, 即限制和减小振动幅值; 另一方面, 由于高速离心机转子是超临界运行, 所以材料的内滞作用将不利于转子的稳定, 这种现象可作如下解释: 在金属材料构造的转子中, 材料内耗很小, 应力和应变的关系曲线基本为一直线 (见图2a)。因此这一作用一般可忽略。但对复合材料, 其应力和应变的关系曲线将类似于一狭长椭圆 (见图2b), 即所谓滞后回线。

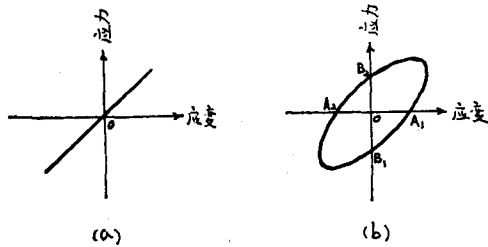


图 2

回线。回线表明, B_1, B_2 处应变为零, A_1, A_2 处应力为零。分别以 ω, P 代表轴的转速和轴的回转振动速度, 当 $\omega = P$ 时, 轴将进行拉伸面和压缩面之间的交替变化。当转速慢于弓状回转速度即 $\omega < P$ 时, 材料的内耗将产生一阻尼力; 而当 $\omega > P$ 时, 则会产生自激式回转振动。对此必须加以认真考虑, 例如加大作为外阻尼的上、下阻尼器的阻尼, 以控制转子的稳定性。

复合材料的阻尼性能通常以特殊阻尼能力 $\phi = U_d/U$ 来表示, U_d 为每个振动周期中单位体积的耗散能, U 为单位体积的最大应变能。 ϕ 可通过稳态正弦能量耗散法而测得。此外, 一般常用的稳态正弦激励的半功率点法, 正弦激励下的损耗正切法以及自由衰减法等都是阻尼测量中常用的办法。另外, 复合材料的特殊阻尼能力 ϕ 也可以根据其定义 U_d/U , 通过有限元分析或其他能量分析的方法确定^[2]。因此, 采用测量与分析相结合的方式确定复合材料的阻尼性能并以恰当的形式应用到转子的动力分析中去是必要的和可行的。

在对复合材料转子的刚度和阻尼性能作出充分研究的前提下, 可针对方程 (1) 对离心机转子的稳定问题进行讨论。显然, 在方程 (1) 的解中包括了很多特征模态, 而在这些特征模态中只要有一个是不稳定的, 那么相应这一模态激发起来的振动将会越来越大, 于是整个系统就变得不稳定了。换句话说, 只要找出一个不稳定模态, 就可以判定整个系统是不稳定的。所以, 欲知系统的稳定性, 只要研究一个不稳定模态就够了。为此, 取一个周期中系统振动的总能量为 E , 则有

$$E = \oint \dot{Z}^T M \ddot{Z} dt + \oint \dot{Z}^T C \dot{Z} dt + \oint \dot{Z}^T K Z dt \quad (2)$$

这里, 符号 \oint 表示一个周期内的积分。对于一个真实的解, 总能量 E 为零。但是如果将与不稳定模态对应的特征矢量的谐和解代入方程 (2) 时, 通常 E 将不再为零, 而是一个非零值。于是, 当系统从稳定状态向不稳定状态变化时, 必然存在着一个临界点, 在这点上, 特征值的实部为零, 解呈周期性, 这个状态就相当于 $E = 0$, 从而 E 的符号将表示系统的耗散能量和非耗散能量。换言之, 转子系统的稳定程度或不稳定程度将取决于 E 的符号和大小, 即若 $E > 0$, 系统的能量是吸收的, 系统是稳定的; 若 $E < 0$, 系统的能量是耗散的, 系统是不稳

定的。对于复合材料转子，构成系统阻尼的因素很多，材料本身阻尼也很复杂，因此，利用能量判别来研究它的稳定性将是一个很好的办法。

另外，在高速转动的复合材料转子的动力计算中，必须考虑剪切变形，且轴承的油膜刚度具有非线性特征，它的高速旋转和本身的挠性可能形成大变形。因此在实际计算中，非线性的考虑有时是必要的。

铺层设计对转子动力学性能的影响 复合材料应用于离心机转子的主要目的，在于通过材料搭配与铺层设计来满足结构的特殊要求，其中包括利用与轴线呈 90° 的铺层来解决高速旋转下的周向强度问题，以 0° 铺层满足轴向弯曲的刚度要求等。于是可根据需要并针对铺层方式的几种因素进行优化，以达到设计目的。基于这种想法的空心轴的设计中^[3]，通过纤维取向和层数变化，进行不同组态匹配的优化研究，得到了相当好的组合情况。总之，在复合材料转子的设计中，在周向强度满足工作转速要求的前提下，可调整轴向的铺层设计而取得一个合适的刚度，从而使转子的工作频率落在转子系统的某相邻两阶的固有频率之间。

以上几点是针对复合材料转子动力分析中的特点而提出的一些见解，可供从事转子动力分析和转子设计时参考。

参 考 文 献

- 1 Iwatsubo T. Stability problems of rotor systems. *Shock Vib. Dig.*, 15, 8 (1983) : 13—24
- 2 Lin DX, Ni RG, Adams RD. Prediction and Measurement of the vibrational damping parameters of carbon and glass fibre-reinforced plastics plates. *Journal of Composite Materials*, 18 (1984): 132—152
- 3 Oliver, DR, Bauchau A. Optimal design of high speed rotating graphite/epoxy shafts. *ibid*, 17 (1983) : 170—181

《力学进展》征 订

本刊由中国科学院力学研究所主办，《力学进展》编辑部编辑出版。主编谈镐生，副主编钱伟长。国内外公开发行。

本刊是反映国内外力学及有关学科研究进展、评论和动向的学术刊物，主要刊登力学重大科研方向的综述评论，各有关分支学科及重要课题的研究进展，力学研究中新设想、新理论、新方法、新技术和高技术的评介等。读者对象主要为与力学有关的科学研究人员、工程技术人员和高等院校师生。

本刊主要内容为：

总 论	生物力学	实验与测量技术	理性力学与数学方法
一般力学	物理力学	岩土与冰雪力学	物理化学流体力学
固体力学	摩擦学	材料力学性能	等离子体与电磁流体力学
流体力学	传热传质学	宇宙流体力学	非牛顿流体力学与流变学
爆炸力学	多相流体力学	地球构造动力学	海洋工程与能源工程力学
计算力学	农业工程力学	地球物理流体力学	环境工程与风工程力学

本刊为季刊，每期144面，定价2.30元。全年四期每份共9.20元。国内由北京报刊发行局总发行，全国各地邮局均可订阅（代号：82-331）。边远地区读者如未订到本刊，可直接邮汇款给本刊编辑部订阅，

（下转第12页）