

薄壁挠性高速转子动平衡技术原理及应用

Principle and Application of High-Speed Balancing of Thin-Walled Flexible Shaft

哈尔滨东安发动机集团有限公司 汪永琴
空军驻 120 厂军事代表室 刘兴龙
哈尔滨东安汽车发动机制造有限公司 刘师坤

[摘要] 挠性转子在高速旋转时产生强烈振动,而且一个转速下的平衡将造成上一个转速平衡状况的破坏。挠性转子动平衡不同于刚性转子,采用刚性力传递理论的平衡方法不能消除挠性轴的振动,也达不到平衡的目的。经过大量的理论研究和实际摸索,总结出了多种国际领先的工艺方法,进行薄壁挠性高速转子的动平衡,取得了很好的成效。

关键词: 动平衡 挠性转子 平衡技术 挠曲振动

[ABSTRACT] The vibration will be very strong when the flexible shaft is rotating, and the balancing in one speed will break the balancing in another speed. The balancing of flexible shaft is different from the balancing of rigid shaft. The vibration of the flexible shaft can not be eliminated and the balancing purpose also can not be reached by adopting the rigid delivering method. Many methods which are keeping ahead in international are concluded by many theory researches and practical experiences, and good effects are obtained.

Keywords: Balancing Flexible shaft Technique for balancing Flexibility Vibration

1 动平衡相关的概念及原理

挠性转子的概念: 随着机组容量的增大,机组转子轴向尺寸越来越大。细而长的转子,挠(柔)性增加,因而临界转速大大下降,工作转速将超过第一阶临界转速或第二、第三阶临界转速。这样的转子称为挠性转子。

平衡的概念: 不平衡的转子经过测量其不平衡量和相位,并加以校正以消除其不平衡量,使转子在旋转时,不致产生不平衡离心力的平衡工艺叫做动平衡。

挠性转子平衡原理分析: 现在以简单的例子加以说明,设有一质量为 M 的挠性转子(见图 1),在 H 平面处存在一不平衡质量 m_H , 半径为 r_H 。转子质心 s (不计不平衡质量 m_H 时)位于离 H 不远的旋转轴上(图 1 ①)。

先将这一转子放在低速平衡台上进行低速动平衡。在转子二端面 I、II 面上, m_H 的对侧加上二平衡质量,使 $m_1 r_1 + m_2 r_2 = m_H r_H$ 、 $m_1 r_1 l_1 = m_2 r_2 l_2$, 即达到平衡(刚性转子的动平衡)。但不平衡质量和校正质量(图 1 ②)所产生的离心力将引起转子沿轴向产生弯矩(图 1 ③),此弯矩在低速时使转子产生的变形较小,但在高转速时将使转子产生很大变形(图 1 ④),其质心挠度为 y_s 。

转子处在弯曲状态下旋转,将产生很大的附加离心力 $M y_s \omega^2$, 此力促使二轴承产生动反力 R_1 、 R_2 (图 1 ⑤), 因而使轴承产生振动,只有在 s 所处平面上加一适当质量 m_m , 才能消除动挠度 y_s , 并且同时在 I、II 平面上再平衡量,以抵消 m_m 的作用,才可使支反力 $R_1=0$ 、 $R_2=0$, 且弯矩最小(图 1 ⑥)。但是转速一变,平衡又破

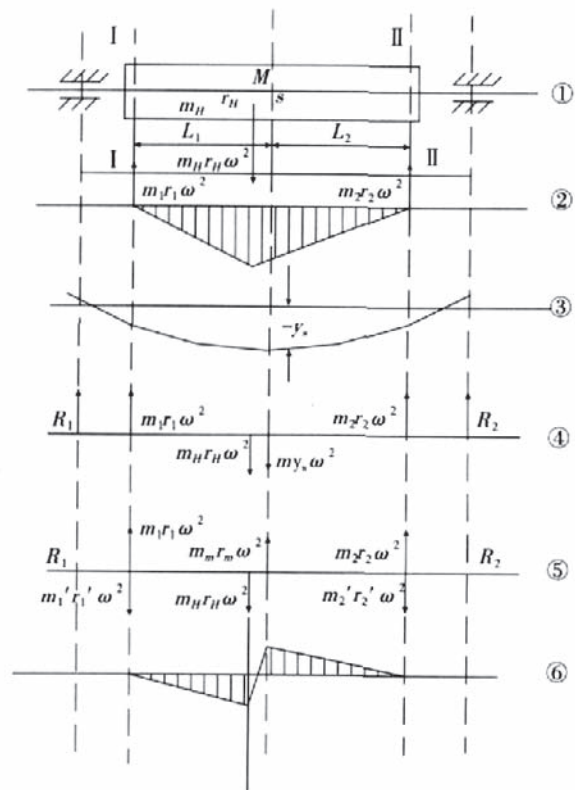


图1 挠性转子平衡图示
Fig.1 Balancing of flexible shaft

坏了,轴承又产生动反力。

挠性转子在旋转时的挠度曲线是一条绕 OS 轴随转轴旋转的空间曲线(如图 2 所示),这条曲线相对于转轴是静止的,当转速恒定时,也是稳定的,各向量曲线所处的平面一般不相重合,各平面间具有一定的相位差。当转速变化时,这条空间曲线在轴上的位置和幅值也发生变化。所以挠性转子的动平衡校正需要从启动越过临界转速,直到工作转速全部运行到转速范围内进行。

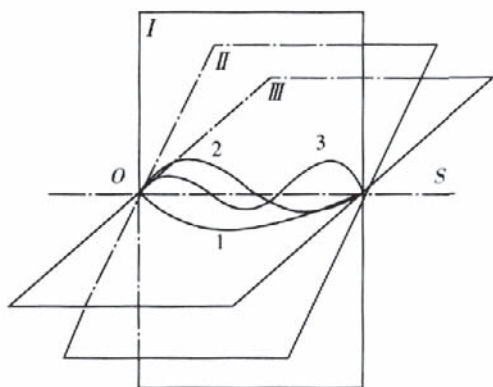


图2 转轴旋转的空间曲线
Fig.2 Space curve of round shaft

2 动平衡机的使用和调整方法

挠性转子的动平衡技术深奥,对于实际经验和平衡设备要求较高,是现代化生产中的重要技术关键问题之一。下面以德国进口的HK4卧式平衡机为例(见图3),阐述薄壁挠性高速动平衡的原理和方法。

KH4高速动平衡机适用于高速弹性零件的动平衡,具有足够的静态、动态刚度,热稳定性和精度。传感器精度高、抗干扰力强、响应速度快。



图3 德国HK4卧式平衡机
Fig.3 HK4 horizontal balancing machine made in Germany

2.1 定标

对于给定的转子及其他基本相同的转子,使规定的校正平面上的不平衡量指示器读数用选定的校正单位来表示的平衡机调整过程为定标。必要时可包括相角位置的调整。

定标是否准确的检验方为:定标程序完成后,将转子进行简单补偿(将工装和转子的不平衡量完全补偿掉),测量后得到一个理想转子的不平衡量,然后在已知角相,增加已知质量的平衡块,测量后如果得到了相应的已知角度和已知质量的不平衡量,此时说明定标有效;如果有偏差则定标无效,需重新定标。

2.2 支承方式

HK4平衡机配2套摆架、1套法兰式支撑(如图4所示)一套滚轮支撑(如图5所示)。

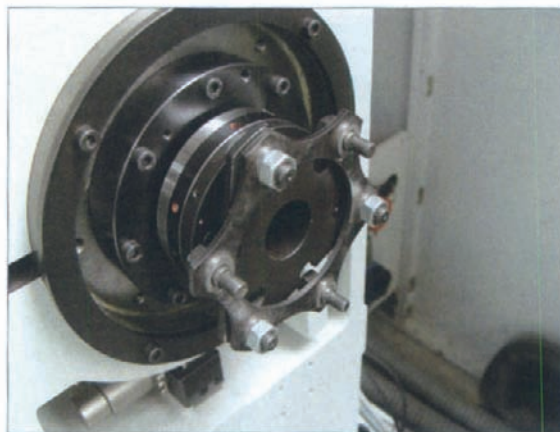


图4 法兰式支架
Fig.4 Flange style bracket

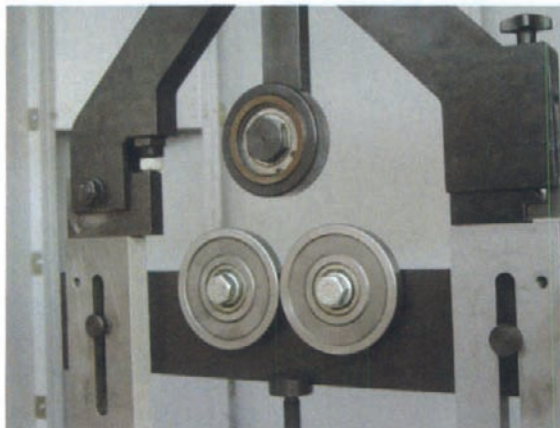


图5 滚轮支架
Fig.5 Trolley style bracket

2.3 转子与平衡机连接时不平衡量的影响因素

由于连接螺栓与尾轴法兰盘配合存在间隙(见图6),每次装配时都不能在同一位置,如果每次偏心值为 L (0.01mm),那么每次引起的装配误差公式为:

$$M=2m \cdot L,$$

其中, M 为动不平衡量, m 为转子质量(2.5kg)。

为了保证平衡过程中每一次安装位置的相对稳定,减少转子的偏心带来的误差(见图6),克服方法是,每次安装平衡转子时,在未紧固前,在一个固定的角度,用

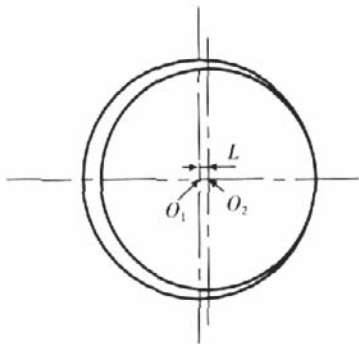


图6 配合间隙示意图
Fig.6 Assortment clearance

榔头朝一个方向轻轻的敲几下,使每次的装配间隙都累计到一个方向,从而减少装配位置随机性的误差带来的不平衡量。

2.4 平衡机的补偿模式

为了真实地反映出挠性轴的不平衡量值,消除工装、夹具带来的不平衡量,在平衡前需对轴进行 120° 翻转补偿,根据受力方向,矢量 B 值不变,为工件的不平衡量。矢量大小不变,角相相差 120° 的 A 和 A1,设备可以自动识别为工装、夹具的不平衡量,并将其补偿掉。几何原理图如图 7 所示。

工作翻转 120° 补偿后,需评定翻转补偿是否有效,方法是将工件再翻转 -120°,设备屏显的数据与翻转前的区别是不平衡量的角度差 120°,不平衡量的大小基本不变。也就是说,不平衡量不随夹具的不平衡变化,而是随着工件翻转的角度变化,此时说明工装夹具不平衡量对工件没有影响,是理想的平衡状态。

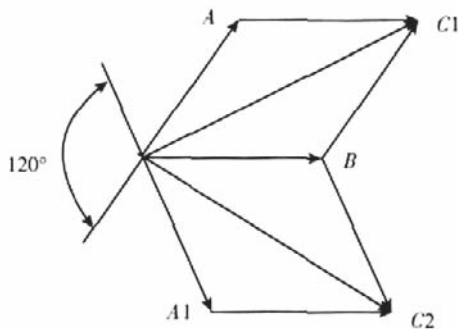


图7 翻转补偿矢量分析
Fig.7 Vector analysis of overturn compensation

A- 工装夹具的矢量; B- 工件的矢量; C1- 合力 1 次;
C2- 合力 2 次; A1- 翻转后工装夹具的矢量

3 动平衡的故障分析及方法

3.1 挠性转子接近临界转速时振动大

挠性转子的挠度随转速的增加而增加,而且当接近

临界转速时,挠度趋于无穷大,但因阻尼存在,挠度趋于有限最大值。当转速越过临界转速而继续增加时,挠度反而减小。这种通过临界转速附近运行振幅很快增大的现象就是“共振”。由于轴本身的刚度差,挠性轴在高速旋转中其不平衡离心力产生的轴动挠度将进一步产生附加离心力,甚至达到相当大以致造成轴的强烈振动。在接近临界转速处,采取转子在平衡机上翻转补偿工装的不平衡量,并对每个翻转角度的不平衡量在显示屏雷达图上的位置进行打点记忆,综合分析不平衡量的变化轨迹,通过雷达图打点记录的不平衡量的角向和不平衡的重量找到一个适宜的位置进行平衡,可以降低旋转时的振动。

3.2 挠性转子动平衡的不平衡量波动较大

平衡过程中用矢量图进行分析,如图 8 所示。在雷达图上,以 O 点为中心,按比例绘制矢量三角形,当转子在 0°、120°、240° 时,分别读取不平衡量,并将其量化为 A、B、C 三点,连接 A、B、C 三点,绘制三角形,OB 的长度 L1 为 120° 时转子的真实不平衡量,OC 的长度 L2 为 240° 时转子的真实不平衡量,OA 的长度 L3 为 0° 时转子的真实不平衡量。

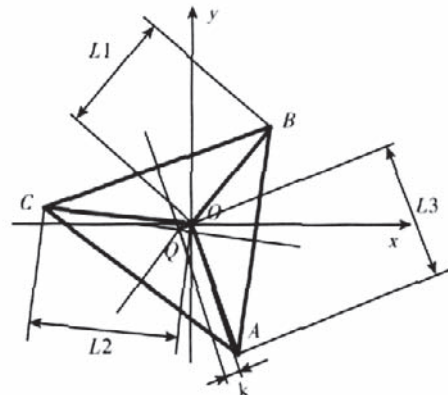


图8 矢量分析图
Fig.8 Vector analysis

分别做 AB、BC、CA 的中垂线,交点为 Q, OQ 的长度 K 为工装、夹具及安装引起的不平衡量,通过以上的定性分析,可以综合评定引起转子不平衡量的各种因素,从而有针对性地提高动平衡的稳定性。

试验证明,挠性转子在平衡时,如果采用刚性转子(不计转子变形影响)的动平衡理论和方法,挠性转子的平衡达不到预期地效果。挠性转子的动平衡技术是近代高速大型转子设计、制造及运行的关键问题之一。

挠性转子与刚性转子振动的不同特点在于挠性转子在不平衡质量离心力作用下要产生变形,即所谓弹性弯曲(动挠度),同时其变形程度(弹性弯曲线)亦随转

(下转第 82 页)

究时,很多工作都是假定材料内部是周期性分布的,比较具有代表性的是 GMC^[48-50] 方法和 TFA^[51] 方法。Chaboche^[52-53] 在 TFA 方法的基础上,引入渐近切线刚度,对材料局部塑性进行了研究,提出了纠正。Bansal^[54] 在 GMC 模型的基础上进行了发展,并采用有限元方法得到实现。Oahr^[55] 研究发现, GMC 方法比较适合于求解弹性性质,对于非弹性性质, FE 单胞模型能够取得更好的精度。Zhu^[56] 采用宏观模型研究了材料中的塑性流动。

5 断裂损伤分析模型

Tvergaard and Needleman^[57] 较早把塑性损伤模型引入到连续介质力学。Chaboche^[53] 基于 TFA 模型在连续损伤力学的框架内,利用两种方法引入了损伤的概念,其中之一是直接简化模型,另外一种为广义特征应变模型。Bao^[58] 研究了局部不均匀区域的塑性变形模型。Bekheet^[59] 通过研究时效以及颗粒对材料的疲劳断裂性能的影响,发现颗粒的加入影响了基体的结构,随着颗粒体积分数的增加,基体的晶粒尺寸逐渐变小,并且颗粒的加入极大地提高了材料的疲劳性能,提高了疲劳寿命。Nan^[60] 基于等效介质近似结合位错塑性理论和连续介质力学,对材料的颗粒效应和断裂行为进行了研究,讨论了增强颗粒体积分数、颗粒大小以及颗粒分布对材料性能的影响,引入 Griffith 断裂判据考虑材料的损伤。Drabek^[61] 和 Naboulsi^[62] 等在热力学第一和第二定律的基础上建立了损伤模型,用来预测高强度动态载荷下材料的响应。Zhang^[63] 利用 Mises-Schleicher 屈服准则建立了粘塑性多轴连续模型,研究了材料扭转和压缩情形下材料的破坏,并与试验结果进行了对比。Thomson^[64] 采用 Gurson-Tvergaard-Needleman 模型研究了团簇情形下材料中空洞的聚合,认为材料的破坏和团簇的方向有较大的关系。LLora^[65-66] 对非连续增强材料的损伤研究成果进行过比较系统的阐述。Zhang^[67] 通过材料不均匀性对晶体塑性滑移影响的描述模型对多晶材料晶界区域的力学性质的影响进行了研究,同时对材料微观破坏判据与破坏方式的关系开展了研究,这一方法应该可用于 SiC_p/Al 材料增强颗粒-铝基晶粒结构、增强颗粒尺寸和铝基晶粒尺寸对材料力学行为影响的分析,以及用于 SiC_p/Al 材料微观破坏方式的分析。

6 发展与展望

颗粒增强材料有着广泛的应用前景,特别是在较高温度环境下的应用,必将得到更广泛的研究。在颗粒增强复合材料的研究中,尚有许多问题需要解决,最重要的就是更有效的模型的建立。现在的工作主要集中在

对材料基体的有效描述上,多考虑材料的增强相为弹性性质。目前的力学模型主要是建立在连续介质力学或者是晶体滑移理论基础上的唯象模型,建立普适的能够准确描述材料的各种力学性能模型尚需要很多人的努力。

随着计算能力的增强,位错力学已经成为一种比较有潜力的材料性能研究工具,但是这一工具的缺陷就是其苛刻的计算条件,是建立在分子动力学基础上的,而且模型能考虑的空间尺度和时间尺度范围都非常小。因此有必要对现有连续介质力学和晶体塑性理论进行合理的改进,并进一步研究不同尺度和跨尺度描述的分析方法。

在今后的研究中,材料中变形、损伤的初始化和演化以及材料的破坏需要引起更多的关注。SiC_p/Al 是典型的非均质材料,在细观或微观尺度下其力学性质的不均匀性对材料宏观行为的影响,尺寸关联效应(例如增强颗粒和基体晶粒尺寸改变会对材料宏观行为产生明显影响)产生的原因,以及材料微观损伤破坏判据与过程描述和模拟还需要在理论和分析方法上作进一步的研究。更有效的预测模型和理论以及适合支持大型结构的材料力学模型迫切需要建立,以便为以后这种材料在各种工程以及基础设施中的应用提供依据。

利用我们现有的知识框架,考虑上述关于进一步改进设想,是可以在 SiC_p/Al 材料性能、相应结构性能和损伤破坏研究方面取得更大进展的。

本文共有参考文献 67 篇,由于篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 岩石)

(上接第 78 页)

速而变化(即不同转速下对应的挠度曲线的形状不同)。挠性转子由于其本身的刚度差,在高速旋转时其不平衡离心力产生的转子动挠度将进一步产生附加离心力,甚至达到相当大以致造成转子强烈振动。显然,刚性转子动平衡方法不能消除挠性转子的振动,也达不到平衡的目的。

4 结论

总结归纳挠性转子平衡的特点是:(1)在多转速(或在整个转速范围)下均能消除轴承的动反力;(2)在工作转速时(或临界转速附近),消除转子的弯矩(或使转子动挠度最小);(3)高速平衡加重不应破坏已进行了的低阶平衡,并且要求全工作转速工况下达到运行平稳,所以挠性转子的平衡是多转速下的平衡,或全速工况下的平衡。(责编 小颖)