

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.11.001

旋转机械现场动平衡方法研究进展*

张雪辉¹, 焦瀚晖², 胡东旭², 李文^{2,3}, 左志涛^{1,2,3}, 陈海生^{1,2,3*}

(1. 毕节高新技术产业开发区 国家能源大规模物理储能技术研发中心, 贵州 毕节 551712; 2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; 3. 中科院工程热物理研究所 南京未来能源系统研究院, 江苏 南京 211135)

摘要: 现场动平衡是一种多学科交叉的技术手段, 可以有效地解决复杂高速转子的不平衡故障问题, 该研究需要同时考虑方法的适用性、稳定性、结构设计及实施方法。针对现场运行过程中旋转机械的不平衡问题, 对目前整机动平衡技术的发展状况及其现场应用进行了综述, 主要包括: 概述了现场动平衡方法的基础和研究现状, 从方法原理及现场应用的角度分析了各种方法的优、缺点; 根据现场实际案例, 对各方法在现场动平衡中的应用现况进行了介绍, 对现场动平衡各方法存在的问题, 以及其在推广时所面临的困难进行了总结; 为解决旋转机械不平衡问题, 提出了三维一体的动平衡体系。以上系统性方法可作为今后动平衡方法研究的重要方向。

关键词: 旋转机械; 现场动平衡; 复杂高速转子; 不平衡故障

中图分类号: TH113.1; TH17

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2021)11-1367-11

Research progress on field dynamic balancing method of rotating machinery

ZHANG Xue-hui¹, JIAO Han-hui², HU Dong-xu², LI Wen^{2,3},
ZUO Zhi-tao^{1,2,3}, CHEN Hai-sheng^{1,2,3}

(1. National Energy Large Scale Physical Energy Storage Technologies R&D Center, Bijie High-tech Industrial Development Zone, Bijie 551712, China; 2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 3. Nanjing Institute of Future Energy System, Institute of Engineering Thermophysics (Chinese Academy of Science), Nanjing 211135, China)

Abstract: The field dynamic balance is a multi-disciplinary and cross-disciplinary technology which can effectively solve the unbalance faults of complex high-speed rotors. The applicability and stability of the method, structural design and implementation methods should be considered in the study of this method. The structural design and the implementation method are also important indicators of the research. Aiming at the problem of unbalance of rotating machinery in field operation, the development and field application of integral dynamic balancing technology were reviewed. Firstly, the basis and research status of the field dynamic balancing methods were summarized, and the advantages and disadvantages of various methods from the perspective of method principle and field application were analyzed. Then, according to the actual cases, the application status of the dynamic balancing methods in the field was introduced. The existing problems and the resistance and difficulties in the application of the field dynamic balancing methods were summarized. Finally, the dynamic balance system layout of "three-dimensional integration" was proposed to solve the imbalance of rotating machinery. The above systematic method can be an important direction of the research on the dynamic balance method in the future.

Key words: rotating machinery; field dynamic balancing; complex high-speed rotors; unbalance faults

收稿日期: 2021-04-26

基金项目: 国家杰出青年学科基金资助项目(51925604); 贵州省科技计划资助项目(黔科合基础[2017]1164号); 中国科学院国际合作局国际伙伴计划项目(182211KYSB20170029); 2019 贵州省科技厅科研机构创新能力建设专项资金资助项目(黔科合服企[2019]4011号)

作者简介: 张雪辉(1987-), 男, 四川南充人, 博士, 高级工程师, 主要从事叶轮机械气动热力学、转子动力学方面的研究。E-mail: zhangxuehui@iet.cn

通信联系人: 陈海生, 男, 博士, 研究员, 博士生导师。E-mail: chen_hs@mail.etp.ac.cn

0 引 言

目前,工业发展迅速,旋转机械逐渐向着高速化、大型化、精密化和自动化发展,对设备的安全性和可靠性要求越来越高。因此,有效地监测并抑制振动是保证设备正常运行的关键。据统计,超过 50% 的设备和系统故障可以直接或间接地归因于转子的不平衡^[1],对于汽轮机转子等复杂旋转机械,振动故障 75% 以上是由不平衡引起的^[2]。因此,如何快速、有效地解决转子不平衡问题是解决旋转机械振动问题的重中之重。

转子平衡问题贯穿了机组的制造、安装、运行及维护过程^[3]。转子平衡情况会受到制造加工工艺、设备材料均匀度、质量分布、装配技术和运行情况的影响^[4]。对于工作转速低于临界转速的刚性转子来说,动平衡在动平衡机上即可完成,且效果良好。对于工作转速高于一阶临界甚至二阶临界转速的柔性转子,应当采用高速度动平衡法,但是高速动平衡有诸多限制。某些大型航空发动机在设计阶段要求一阶临界转速高于工作转速,使其转子为刚性转子,减小转子不平衡对整机的影响^[5]。如无法避免柔性转子,实际生产中一般利用低速动平衡代替高速动平衡^[6]。基于低速动平衡方法,进一步发展出了组合平衡法,该方法将转子分解为单元体进行低速平衡后再进行总装。我国中国航发沈阳发动机研究所、中国燃气涡轮研究院和沈阳黎明发动机制造公司等利用了该方法对高压转子进行了组合平衡;之后,提出了模拟转子平衡技术,利用模拟轴对转子部件进行了动平衡,可以实现部件级单独平衡。GE 公司 CMF56 发动机及我国中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司某型号发动机高压转子均实现了模拟动平衡技术,并取得了良好的效果^[7,8]。

不论是刚性转子还是柔性转子,使用上述的动平衡方法,对转子的设计水平、加工工艺和装配精度要求极高,要求转子在各个方向均有良好的定位,保证每次装配位置相同。转子动平衡前后及整机装配的一致性是对工艺水平的极大挑战。

综上所述,目前普遍应用的动平衡机低速动平衡的方法有以下不足之处:(1)低速动平衡无法满足设备高速化趋势及柔性转子动平衡需求;高速动平衡限制条件多,价格昂贵。并且,在动平衡机上无法真实模拟转子实际运行情况,实际运行有诸多影响因素无法预测;(2)装配精度对平衡效果影响大,装配工艺要求高,转子从动平衡至总装过程必须保证高度一致性;

(3)设备拆装工序复杂、工期长,无法满足现场生产需求。

为解决以上问题,研究人员提出了旋转机械现场动平衡技术。现场动平衡是指转子在现场条件下或者在试验场所的条件下,利用通用的振动测试设备测量幅值和相位,在转子原配轴承基座上进行平衡^[9,10]。新投产的汽轮发电机组中,大约有 70% 需要进行现场在线动平衡^[11]。在今后的生产应用中,现场动平衡将是解决高速、复杂轴系不平衡问题的重要技术手段^[12]。

本研究主要阐述现场动平衡技术国内外发展现状,对现场动平衡技术现场应用进行综述;对各个方法的特点进行阐述,并以现场实际应用的角度出发,对各方法的优缺点进行分析总结;最后针对现场不平衡问题突出的现象,提出“三维一体”动平衡体系,提出现场动平衡推广过程中亟需解决的问题,同样也是未来研究的主要方向。

1 影响系数法

影响系数法同时适用于刚性转子和柔性转子现场动平衡,是平衡方法中最容易实现的一种,是现场动平衡的主要方法^[13]。在计算平衡校正量时,影响系数法本质上将转子-轴承系统视为一个“黑箱”,不涉及转子系统的动态特性^[14]。

影响系数法的主要原理如图 1 所示。

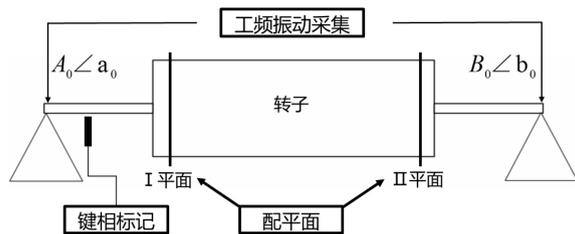


图 1 影响系数法原理

1.1 方法原理

对于刚性转子,影响系数法通过求取影响系数,来反映配平面对整个转子系统振动的影响。在 I 平面添加试重 Q_1 后,I 平面影响系数求解方法如下:

$$\alpha_1 = \frac{A_1 - A_0}{Q_1}$$

$$\beta_1 = \frac{B_1 - B_0}{Q_1} \quad (1)$$

式中: α_1, β_1 —I 平面对 AB 两测点的影响系数; A_0, B_0 —AB 两测点原始振动矢量; Q_1 —在 I 平面添加的试重矢量; A_1, B_1 —AB 两测点添加 Q_1 后振动矢量。

同理,可以求得 II 平面影响系数 α_2 及 β_2 ,即:

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= \frac{A_2 - A_0}{Q_2} \\ \beta_2 &= \frac{B_2 - B_0}{Q_2}\end{aligned}\quad (2)$$

式中: α_2, β_2 —II 平面对 AB 两测点的影响系数; Q_2 —在 II 平面添加的试重矢量; A_2, B_2 —AB 两测点添加 Q_2 后振动矢量。

利用影响系数法对刚性转子进行平衡,通常通过一两次加重就可以得到满意的平衡效果,即:

$$\begin{cases} \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 = -A_0 \\ \beta_1 P_1 + \beta_2 P_2 = -B_0 \end{cases}\quad (3)$$

式中: P_1, P_2 —I 平面和 II 平面所需添加的配平矢量。

通过求解矢量方程组,就可以得到配平矢量 P_1 和 P_2 。

由于柔性转子动力特性的影响,柔性转子影响系数法也有弊端。影响系数法平衡柔性转子的求解方程组如下:

$$V_0 + A \cdot P = 0\quad (4)$$

式中: V_0 —原始振动矩阵,维度为 $M \times N$ (N 为转速个数); A —影响系数矩阵,维度为 $M \times N \times K$; P —校正质量矩阵,维度为 $1 \times K$ 。

如果轴系轴承数目多,测点数 M 也增多,但是校正平面 K 却有一定限制,所以会出现 $K < M \times N$,式(4)无法求得唯一解的情况发生。

1964 年,GOODMAN T P^[15] 提出了最小二乘影响系数法,来求解矛盾方程,寻求一组矫正质量,使各测点在各平衡转速下残余振动值的平方和最小。

1.2 研究现状

经过多年的发展,研究人员对柔性转子动平衡技术进行了改进,主要通过引入启发式算法,如遗传算法^[16,17]、粒子群算法^[18],来解决柔性转子平衡寻优的问题,并均已在实验台上对这些算法进行了可行性的验证。

除了最小二乘法以外,国内外研究人员都对影响系数法进行了大量的研究。YUAN Kang 等人^[19]的研究发现,影响系数矩阵维度代表测量平面和校正平面的个数,其维度减少有助于提高校正质量的精度,但是最小的维度不一定对应最佳平衡质量,也无法得到最小的残余不平衡量;同时,测量平面和校正平面数量的确定也需要作进一步的研究。

针对影响系数法需转子多次重启的不足,徐宾刚^[20]提出了基于影响系数法的柔性转子无试重平衡法,利用遗传算法对平衡配重进行优化搜索,实现了残

余振动量的极小化。影响系数法假设转子响应是线性的,而由于油膜支撑的存在,大型转子的轴承有时会在轴承力和轴颈位移之间表现出很强的非线性关系,严重影响系数法的动平衡效果。

针对以上问题,ALVES D S^[21] 提出了利用轴承座加速度信号计算影响系数,可以准确计算出原始不平衡量的位置;但是该方法仅在结构简单的试验台上得到了验证。YAO Jian-fei 等人^[22] 提出了通过双目标优化方法,实现了多转速柔性转子的动平衡;分别通过遗传算法和最小化残余振动获得了最佳校正权重,并通过实验与仿真验证了该方法优于传统的最小二乘影响系数法。韩平利^[23] 通过实验研究,提出了转子动平衡影响系数优劣评价和提取方法,该方法对评价转子重启得到的影响系数性能具有一定的参考价值。GYAN R 等人^[24] 提出了基于高转速影响系数及低转速下的振动值,实现了柔性转子的动平衡。GYAN R 和 TIWARI R^[25] 提出了广义影响系数法,利用主动磁轴承实现了转子平稳通过临界转速。

除了对不同影响系数法的选用外,转子振动工频幅值和相位的提取也是能否完成动平衡的关键。提取转子工频幅值和相位,主要是去除会对工频产生影响的频率。

CHEN Dong-ju 等人^[26] 使用小波变换和功率谱密度准确提取了不平衡相位。李传江等人^[27] 提出了一种基于 EMD 和瞬时频率估计的不平衡幅值相位提取方法。王展等人^[28] 提出了基于全相位快速傅里叶变换的不平衡幅值相位准确提取方法。江志农等人^[29] 提出了基于互功率谱的相位检测算法,在文献[30]40-42 中该方法已经被应用于现场试验^[30]。

对于双转子结构转子,当转速差较小的时候会产生“拍频”。YANG J S、PONCI L P 和李传江等人^[31-33] 对速度差很小的转子工频信息的提取进行了研究,准确提取工频后,利用影响系数法实现了良好的转子动平衡效果。CAO Hong-rui 等人^[34] 提出了利用同步压缩变换和角域重采样的方法,消除了转速波动对转子相位计算的影响。

对于不同类型的设备,其振动监测方式和信号特点均有差异,如何高效、准确地提取工频幅值和相位,需要现场技术人员根据现场情况灵活选取信号处理方法。

1.3 现场应用

1.3.1 影响系数法

影响系数法在国外的的发展已比较成熟,但在国内仍处于技术积累与模型转子实验阶段。影响系数法在

国内的现场应用存在重复启机、可靠性和稳定性不足的问题。

冯建鹏^[30]利用影响系数法,完成了低压转子整机动平衡,其配平效果良好。影响系数法在其他现场动平衡均有应用。张朝平等人^[35]利用 SB-7700 动平衡仪和双平面影响系数法,对 400 kW/10 MJ 飞轮储能系统轴系进行了在线动平衡。针对大型风机存在的不平衡故障,凡飞龙^[36]利用双平面影响系数法,对大型风机不平衡转子进行了现场整机动平衡,有效降低了设备振动值。谭秀婷等人^[37]利用影响系数法,在特定转速下对汽轮机高压转子进行了现场在线动平衡,实现了柔性转子整机的现场动平衡。

大型水轮机一般为刚性转子,丁永胜、王斌等人^[38,39]利用影响系数法,完成了大型水轮机组现场动平衡。陈曦^[40]基于最小二乘影响系数法,实现了发动机低压转子的现场动平衡。美国 KUNZ D L 等人^[41]利用数值模拟方法,分析了 AH-64 尾旋翼振动响应,并根据旋翼振动特性和影响系数法开发出了一种精确计算去除叶尖质量的配平方法。

1.3.2 三圆法

基于影响系数法原理,此后又发展出了三圆法。该方法仅需要测量转子振动幅值,不要求得转子工频相位,通过画图法即可求得配平矢量^[42,43]。

沈阳鼓风机集团利用三圆法,对离心压缩机进行了现场动平衡,成功解决了压缩机现场振动超标的问题^[44]。罗立等人^{[6]59-60}利用三圆法,在 CFM56 系列发动机上实现了良好的本机动平衡效果。沈阳的姜广义等人^[45]利用三圆法,实现了某型大型转子的动平衡,有效地减小了转子整机振动。孙国维^[46]利用三圆法实现了 WJ5A-I 型发动机的本机动平衡。

三圆法缺点主要是需要的启停机次数多,单平面动平衡至少需要 4 次,双平面配平则至少需要 7 次。同时,该方法计算精度不高,计算难度大,无法实现自动化;当遇到对配重不敏感的转子,三圆法的平衡精度无法满足需求。

与三圆法相对比,影响系数法所需启停机次数少、计算效率高。但是该方法需要准确测算振动工频相位,因此要求设备具有可直接用于键相测量的外伸轴;若无法满足该条件,其实际现场操作难度则远高于三圆法。

1.4 小结

影响系数法和三圆法均将转子不平衡问题转化为数学问题,但是在实际操作中的动力学问题是无法忽略的。试重添加主要是盲试,试重添加的大小和角度

依靠经验,试重过程可能会导致振动过大或者过小,均会对平衡效果产生影响。平衡面选取、各阶模态确定、转子振动测量、试重添加方法和组件平衡次序等诸多问题^[47],均不是简单数学模型可以解决的,需要严谨的理论验证和实验验证。

针对影响系数法存在需要重复启停的问题,研究人员结合有限元模型对转子的模态和不平衡响应进行了精确的数值模拟,通过模型对原始不平衡量的大小和位置进行了逆推,提出了无试重动平衡方法。该方法的内核同样是影响系数法,该方法在各实验台上均得到了验证,在理论上是可行的;但是,该方法要求准确模拟设备的动力学特性,现场操作难度较大。目前,该方法仅可用于现场结构简单的设备^[48],尚无法对大型机组实施动平衡。

2 模态平衡法

2.1 方法原理

模态平衡法又称振型平衡法,即在转子各阶主模态具有正交性的前提下,分别使所有配平矢量产生的模态不平衡响应与转子原始不平衡模态响应相抵消,其数学表达式如下:

$$\int_1^0 \rho(z) \varepsilon(z) \varphi_j(z) dz + \sum_{i=1}^n m_i r_i \varphi_j(z_i) = 0 \quad (5)$$

式中: $\int_1^0 \rho(z) \varepsilon(z) \varphi_j(z) dz$ — 转子原始不平衡模态响应; $\sum_{i=1}^n m_i r_i \varphi_j(z_i)$ — 配平矢量产生的模态不平衡响应。

配平平面的数量需要大于平衡模态数,同时考虑不破坏转子的刚性平衡,一般将配平平面数量选为 $N+2$ (N 为平衡模态数量),即:

$$\sum_{i=1}^n m_i r_i = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n m_i r_i z_i = 0 \quad (7)$$

式中: m_i — 第 i 阶模态所需的校正质量; r_i — 校正质量的轴向位置; z_i — 校正质量的周向位置。

2.2 研究现状

国内外对模态平衡法进行了大量研究。DEEPTHIKUMAR M B^[49]利用模态平衡法对分布式不平衡的转子配平进行了研究,首次引入了用偏心多项式函数的“范数”来量化分布式不平衡,利用模态平衡法计算了一阶弯曲临界转速下转子所需的模态校正质量。该研究还提出,量化不平衡量分布的因素对于现场判断不平衡量的分布具有很好的借鉴意义。PALAZZO-

LO A B^[50] 提出了类似的方法,即利用奈奎斯特图生成了振动测点的极坐标图,从而确定了模态偏心的 90° 相移位置;并利用转子的模态质量和模态形态,计算得到了转子的模态平衡分布。该方法不需要对转子提前进行试重,解决了试重过程重复启机而造成较大振动的问题。

模态平衡法分别针对转子每个振型进行配平,且尽量避免高阶振型配平结果对低阶振型产生影响,其最大的优势是可以保证柔性转子全部形态下的平衡效果,转子可以平稳地通过各阶临界转速。但是,模态平衡法需要在试重的过程中,在临界转速附近停留,这对于旋转机械是非常危险的,会因振动过大而导致设备损坏,限制了该方法在现场的使用。

此外,因设备结构的复杂,现场对转子模态产生影响的因素多,转子模态的精确计算困难。同时,转子系统的阻尼和交叉刚度是不可忽略的,在众多条件的影响下,各阶模态不再具有正交特性^[51]。这是模态平衡法及基于模态的动平衡方法无法避免的问题。

当然,对整个转子系统的动态响应进行先验研究是有必要的,它对于平衡面及振动测点的选择具有重要参考价值。模态计算可以确定转子系统在工作转速范围内经过临界的个数,以及转子在升速、工作和降速过程中的振动形态^[52],因此,研究人员提出了基于模态平衡法的分析结果和动平衡方案。

KHULIEFY A^[53] 基于对转子模态特性的研究,利用影响系数法和模态平衡技术,实现了高速转子的低速平衡,在柔性转子实验台上对方法进行了验证;并利用一阶临界转速 70% 的转速进行配平,实验结果表明,在运行状态下剩余不平衡量明显减小。该方法仅在轻载低阻尼的试验台得到了验证,系统线性度高,而现场实际转子系统通常是非线性的,因此,该方法需要在非线性度高的试验台上进行进一步验证。

LEVECQUEA N^[54] 利用静止状态下的模态测试结果,建立了完整可靠的有限元模型,根据模型利用影响系数法对压缩机转子-曲柄施行了动平衡。黄金平、王四季等人^[55] 对基于模态平衡法和影响系数法的混合平衡法进行了改进,并对该方法进行了验证,证明其具有可行性。陈曦^[56] 提出了一种在准确测量转子支撑刚度的前提下,基于有限元模型的模态动平衡方法。

2.3 现场应用

唐卫新^[57] 对某转子热弯曲故障进行了准确的识别,并利用模态平衡法对转子进行了平衡,取得了良好效果。

模态平衡法实质是一种解析方法,无法形成固定流程并通过计算机实现,因此,其现场应用较少。

2.4 小结

模态平衡法要求技术人员对设备转子的动力特性和支撑系统相关的知识有深入的了解,且其平衡的准确性会受到转子支撑动力特性差异、多跨转子各跨之间相互作用等多种复杂因素的干扰。

由于现场设备的转子-轴承系统非常复杂,无法准确计算其模态。目前,模态平衡法通常与影响系数法结合使用,为影响系数法提供了转子动力特性的理论支撑。

3 全息动平衡技术

3.1 方法原理

影响系数法和模态平衡法都是基于转子各向同性的假设基础之上的^[58],而实际上大多数转子-轴承系统采用的是流体润滑支撑,轴承的刚度和阻尼一般都是各项异性^[59],若使用传统平衡方法可能会出现较大的平衡误差。因此,上述两种方法均有各自明显的缺点^[60]。

基于以上问题,屈梁生院士^[60] 首次提出了基于全息动平衡方法的基本概念,该方法的基础为模态动平衡法。基于三维全息谱的柔性转子动平衡方法,利用三维全息谱表示机组的振动,使轴振和加重响应直观化,可利用计算机模拟进行优化。

该方法采集 X 、 Y 两个方向的振动信号,提取工频的幅值和相位,形成了简单的转频椭圆,如图 2 所示。

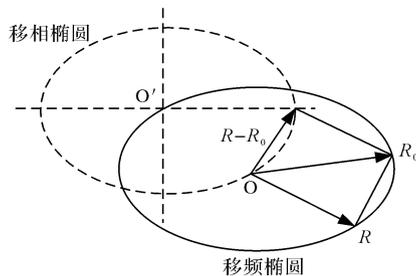


图 2 移相椭圆

图 2 中,转频椭圆上的基准点是转子键相槽通过键相传感器的时刻,该点称为初相点;初相点转频椭圆上的位置与转子重点在转子截面上的位置相关,转频椭圆的大小反映了转子不平衡量的大小;把加试重后初相点的向径 R_0 仍然在原始转频椭圆上的试重椭圆的初相点连接起来,形成了移相椭圆,最后利用转子的试重轨迹和移相椭圆,完成转子配平^[61]。

旋转机械转子周振中工频分量的函数式为:

$$x = s_x \cdot \sin(\omega t) + c_x \cdot \cos(\omega t) \quad (8)$$

$$y = s_y \cdot \sin(\omega t) + c_y \cdot \cos(\omega t) \quad (9)$$

式中: s_y, c_y —信号中 y 的正弦项和余弦项系数; ω —转子回转的圆周频率。

全息谱轴承支撑处的表达式如下:

$$\mathbf{r} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m]$$

$$\mathbf{r}_i = [s_{x_i}, c_{x_i}, s_{y_i}, c_{y_i}]; i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

式中: \mathbf{r} —转频椭圆参数; m —测点截面的数量。

1 个正进动的椭圆轨迹可以分解为 2 个圆轨迹, 一个为正进动, 一个为反进动, 全息谱表达式为:

$$\mathbf{e}_i = [r_{p_i}, r_{m_i}, a_i, \beta_i] \quad (11)$$

式中: r_{p_i} —正进动圆半径; r_{m_i} —反进动圆半径; a_i —进动点处的初相点; β_i —椭圆长轴的倾角。

在转子上有 a, b, c, \dots, n 个平衡面, 则可得平衡面的全息谱矩阵为:

$$\mathbf{r}_a = [s_x, e_x, s_y, c_y] \\ \mathbf{r}_b, \mathbf{r}_c, \dots, \mathbf{r}_n \quad (12)$$

式中:矩阵 $\mathbf{r}_a, \mathbf{r}_b, \mathbf{r}_c, \dots, \mathbf{r}_n$ —在平衡面 A, B, C 上配重形成的三维全息谱。

3.2 研究现状及小结

自全息动平衡技术被提出之后, 国内外学者通过实验和现场应用证明了其可行性^[62-64]。如果转子为刚性转子, 或者能精确得知转子滞后角, 就可通过该方法实现无试重动平衡。全息动平衡最理想的方式是直接测量转子轴振, 而且需要转子有多个测量平面, 每个平面需要两个互相垂直的测点。该方法必须保证待平衡的转子有外伸轴或者联轴器用于标记键相位置, 否则无法应用。

相较于模态平衡法和影响系数法, 全息动平衡能够更为直观地反映不同转速下的转子振动形态和不平衡量的分布, 为工程技术人员提供更为完整准确的转子运行信息。但随着工业技术的发展, 旋转机械的轴系结构越来越复杂, 布局也越来越紧凑, 已无法满足全息动平衡的使用条件, 这使得该方法的应用受到了制约。

4 自动平衡技术

对于大型转子系统而言, 停机带来的经济损失是巨大的。以上方法并未从根本上解决由于转子不平衡导致停机的问题。对此, 研究人员提出了自动平衡的概念^[65]。

作为新兴的平衡技术, 研究人员一般将其作为单独的方法进行研究, 以在设备运行过程中, 对因不平衡

引起的振动进行实时控制^[66]; 同时在现场条件下, 在转子原配轴承基座上对其进行平衡。

因此, 在线自动平衡技术适用于不平衡量可能随着设备运行而发生变化的情况, 可以实时抑制不平衡振动, 减少设备大修、返厂次数, 提高设备使用寿命^[67]。

4.1 原理及研究现状

自动平衡技术主要分为被动式和主动式两种。

4.1.1 被动式自动平衡技术

自动球平衡器(ABB)是被动式自动平衡装置, 可以通过补偿转子不平衡质量来减少旋转机械振动。它由一系列的球构成, 这些球被设定在一个固定的范围, 可以自由地在轨道中移动; 当设备的运行转速远大于临界转速时, 利用转子自动定心的特性平衡球将重新定位, 从而实现自动平衡^[68]。

由于该方法可能导致低转速下设备振动增大^[69], ABBs 并没有得到广泛的采用。同时, 由于该机构本身是非线性的, 并且对转速和初始条件都表现出极大的敏感性, 需要先验建模或者模态识别, 这也限制了其商业应用。SPERLING L 还提出了一种刚性转子双平面自动平衡装置, 该装置需要正确选择阻尼系数。但是由于不同转子的刚度和阻尼不同, 需要对转子的运动情况进行充分分析, 并选择合适的参数设置, 造成其实际应用难度大。

4.1.2 主动式自动平衡技术

主动式自动平衡装置分为: 电磁力平衡和质量平衡两种。电磁平衡主要是利用同频电磁力直接作用于转子; 质量平衡主要是利用电机^[70]、电磁环驱动^[71, 72]不平衡补偿质量, 或者注液对转子不平衡量进行补偿^[73]。电机和电磁环称为机械式自动平衡装置, 注液式称为液体式自动平衡装置, 这两种方式是目前主要的商用自动平衡装置。

由于机械式平衡装置需要在转子上装配额外的机械装置, 可能造成转子-轴承系统其他的故障, 此类装置一般适用于转速低于 10 000 r/min 的设备。而液体式装置不存在以上问题, 更适用于高转速设备。潘鑫^[74]就曾对国内外转子-轴承系统液体式在线自动平衡装置的发展情况进行过总结。

主动式动平衡算法主要是基于影响系数法^[75, 76]实现的。影响系数法一般需要预知设备的可靠的影响系数, 但是不同设备影响系数是不同的。顾超华提出了一种平衡头装置, 可以在转子运行过程中, 利用自动平衡装置完成对影响系数的在线识别, 实现影响系数测算及平衡在线化。但是, 该研究仅验证了机械平衡

头的初步可行性,实际应用时仍有很多问题需要解决^[77]。

除影响系数法外,还有一种直接测算原始不平衡量位置的方法。该方法对相位的测算要求高,仅适用于结构简单、转子运行转速远低于临界转速、转子-轴承系统线性程度高的设备。对于大型复杂设备或者柔性转子设备,该方法不适用。

另外,常用的自动平衡方法还有寻优平衡法^[78,79]。该方法中最为常见的是幅-相轮换寻优法,目前已在高端磨床上得到广泛应用。该法的本质是计算机自动试凑,其原理如图 3 所示。

衡量反向位置的过程;图 3(c) 表示幅值平衡,即将 2 个平衡块同时相向或者反向移动,以调整平衡块夹角的位置,从而调整合成的配平矢量大小,最终确定振动最小的夹角。

4.2 现场应用

目前,自动平衡技术在美国已经实现在航空发动机上的列装,在国内则暂无相关报道。自动平衡技术大大减小了发动机维护费用,且其平均故障维修时间几乎接近于设备整体设计寿命。

国内的在线动平衡技术仍主要处在理论研究阶段,但有少量的自动平衡技术已应用于高速机床^[80,81]领域,还未在大型旋转机械现场得到应用。

关于现场应用的研究,除了要考虑在线自动动平衡实现方法、动平衡减振效果外,现场实施的可行性也应该是重要的考察指标。

4.3 小结

自动平衡技术是目前动平衡技术发展的最前沿,也是未来的发展方向,其核心主要是平衡方法和自动平衡结构。近年来,对于自动平衡技术的研究主要集中在平衡装置的结构设计方面,而对于平衡方法的研究,则主要是延续传统的方法。

有关自动平衡技术的应用,在国外已经实现发动机的自动平衡,国内则更多应用于车床,并未真正用于大型旋转机械。其主要原因是:(1)设备在设计阶段未将自动平衡装置考虑在内;(2)大型设备不平衡激励响应更为复杂,方法的安全性和可靠性需要经过反复实验与现场的验证。

5 现场动平衡讨论与展望

旋转机械不断向着高速化和精密化发展,其工作转速越来越高,转子不平衡问题也越发突出,尤其是柔性转子。因此,对于各种旋转机械,现场在线动平衡在实际生产中的作用显得尤为突出。

动平衡技术的发展是所有现场动平衡的基础,其中的重点和难点是柔性转子动平衡。目前主要通过模态平衡法和影响系数法来进行动平衡,其他方法均为这两种方法的改进。这两种方法在单独使用都有明显的缺点:(1)模态平衡法需要准确计算转子模态,对人员的专业技术要求高,计算难度大;(2)影响系数法较易实现,但是仍有许多方面需要作进一步研究,主要包括振动测试面、配平面的选择,配平转速的选择,添加试重的角度和重量,以及影响系数优劣的评定;目前该方法依赖于现场经验或者参考经验公式,若想避免现

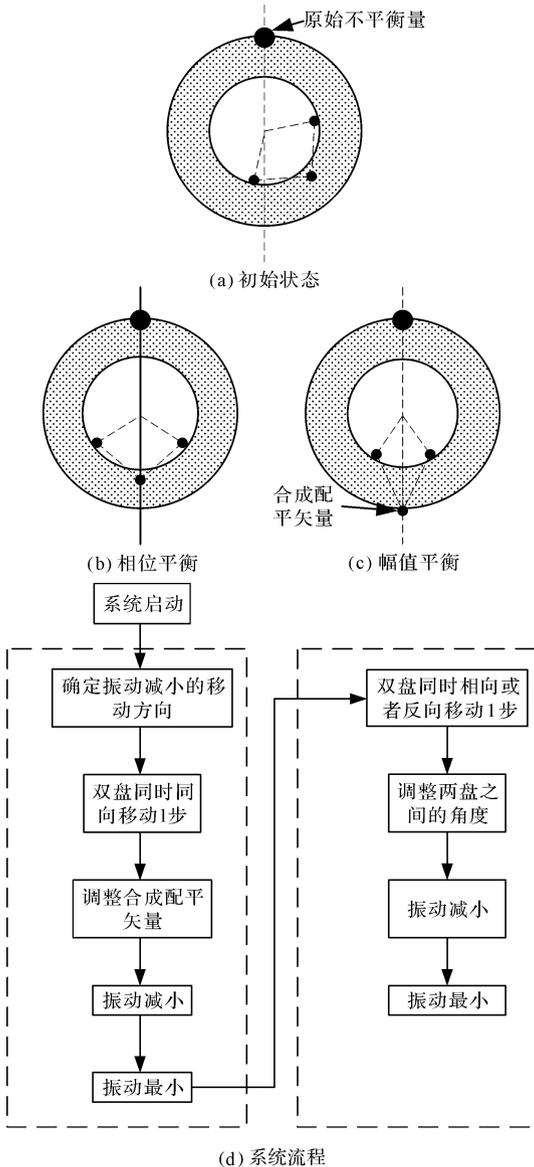


图 3 幅-相轮换寻优法

图 3 中,首先进行相位平衡,同方向移动 2 个配重块,如果振动增大,则反向移动;如果振动减小,则继续向该方向移动,直至确定振动最小的位置。

图 3(a,b)是将合成的配平矢量移动到原始不平

场盲目测试而导致重复开机,甚至设备振动超标^[82,83],需要制定更为详细的标准和方案。

为了应对以上问题,研究人员对两种方法的综合使用进行了研究,通过实验验证了综合使用具有较为良好的效果,但现场实际应用仍较少。

出厂前动平衡良好的转子可能受到装配工艺、精度等原因的影响,发生不平衡故障,而现场动平衡是解决该问题的最好方法。由于环境复杂测试条件有限,现场动平衡方法主要为:三圆法和影响系数法。在现场应用中,上述影响系数法的问题更加突出。

此外,由于现场测试条件有限,有些情况无法直接测试转子的轴振信号,需要将传感器安装在轴承座或者机匣上,甚至有些情况无法直接测试转子键相信号,因此,转子工频幅值和相位的准确提取是影响系数法动平衡的关键。虽然人们对工频幅值提取和相位测算进行了大量研究,但其仍需根据设备的特点在现场进行检验。

在线自动平衡是对转子现场动平衡技术智能化、自动化的应用,是未来的主要发展方向,其应用前景广阔。自动平衡是一种多个领域、多种技术交叉融合的新型动平衡方法,其基础主要是转子动平衡技术、不平衡量实时测算及自动补偿技术。其实现则需要结构设计部门、控制系统设计部门的配合,在设计阶段将自动平衡装置所需结构和辅助系统考虑在内。因此,以上所述也是制约自动平衡装置实际应用的主要原因。在线自动平衡目前仍在发展阶段,在逐渐完善平衡技术的同时,还需要将装置可实施性考虑在内。

国内外学者对转子动平衡技术做了大量的研究和试验,但是现场不平衡问题仍然突出。由于现场动平衡测试分析难度大、可靠性不足,平衡效果不尽理想,设备使用部门和人员对现场动平衡认可度不足,导致动平衡问题的解决方法仍然多为返厂或者现场进行拆解、维修^[84-87],以及对转子重新做动平衡。因此,现场动平衡在提高动平衡精度的同时,应向着集成化、高效化、普适化发展。

为将转子不平衡对设备的影响降到最低,转子出厂动平衡、现场动平衡及在线自动平衡 3 种技术缺一不可。出厂动平衡是所有转子具有良好的平衡效果的基础;现场动平衡技术可以弥补在装配过程中产生的不平衡对设备的影响;而在线自动平衡可应对突发不平衡故障,使设备保持良好的运行状态,为设备停机整修时间的选取提供依据。

因此,3 种动平衡技术的协同应用,可以实现对每台旋转设备形成一套“出厂可以平,停机可以修,运行

可以调”的三维一体动平衡体系,为旋转机械的安全运行保驾护航。

6 结束语

本文对目前旋转机械现场动平衡方法的研究及现场应用进行了归纳、总结,并提出了目前现场动平衡技术亟需解决的问题。

旋转机械现场动平衡方法研究进展状况为:

(1) 现场动平衡方法主要基于模态平衡法和影响系数法,其他方法多为该两种方法的延伸和变形。两种方法单独使用均有明显的缺陷,结合使用具有良好的效果,但是目前该方法仍在实验阶段,现场整机应用案例较少;

(2) 现场整机动平衡应用主要以影响系数法为主,该方法便于实现自动化,但是盲加试重导致的振动是不可忽略的问题。国内外研究学者对无试重方法进行了大量研究,其可实施性仍待验证;

(3) 在线自动平衡是未来发展的主要方向,动平衡技术的发展是其理论基础。此外,如何实现对转子平衡状态的实时监测、诊断及调控是该技术的重点和难点。针对以上问题,国内进行了大量实验研究,对在实际设备上列装还有一定距离。

现场动平衡方法亟需研究的问题有:

(1) 发展动平衡技术。继续发展和完善动平衡理论,现场动平衡方法应该以现场应用为前提,提高现场动平衡的可靠性和普适性,以及现场应用效率;总结规律,将现场动平衡规范化、自动化,降低对专业技术人员的依赖程度;

(2) 旋转机械加入动平衡结构设计。在设备设计阶段就将动平衡结构考虑在内,从而降低现场动平衡的条件限制和操作难度;

(3) 推广现场应用。由于整机系统复杂,诸多约束条件和影响因素导致现场动平衡具有一定的不确定性,企业现场认可度不高。而实际上,对于同一类设备,在充足的理论研究和实验模拟的条件下,现场动平衡可以满足企业需求。

参考文献 (References):

- [1] ZHAO Shi-bo, REN Xing-min, DENG Wang-qun, et al. A transient characteristic-based balancing method of rotor system without trail weights[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2021, 148(107117): 1-19.
- [2] 李录平, 卢绪祥. 汽轮发电机组振动与处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

- [3] 何国安, 闵昌发, 张学延, 等. 国产 600 MW 汽轮发电机组轴系动平衡研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(4): 282-288.
- [4] 马 超. 旋转机械转子不平衡故障的诊断分析[J]. 中国高新技术企业, 2014(22): 51-52.
- [5] 刘永泉, 王德友, 洪 杰, 等. 航空发动机整机振动控制技术分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(5): 1-8, 13.
- [6] 罗 立, 唐庆如. 航空发动机振动与平衡研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2014, 25(2): 57-60.
- [7] 李 敏. 民用航空发动机整机转子动平衡浅析[J]. 内燃机与配件, 2018(13): 73-75.
- [8] 刘丛辉, 王 娜, 陈玲玲. 模拟平衡工艺方法在新一代航空发动机转子动平衡中的应用[J]. 航空制造技术, 2012(15): 77-80, 90.
- [9] 杨黎明. 转子现场动平衡技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [10] 钟一鄂. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [11] XIE Dan-mei, YANG Yi, LIU Zhan-hui, et al. A balance method without trial mass based on lag phase[J]. **American Society of Mechanical Engineers**, 2013, 15(21): 1-6.
- [12] ALVES D S, MACHADO T H, Cavalca K L, et al. Characteristics of oil film nonlinearity in bearings and its effects in rotor balancing[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2019, 459(114854): 1-16.
- [13] 黄 峰. 刚性转子现场动平衡技术分析[J]. 装备维修技术, 2019(2): 157-158, 114.
- [14] TESSARZIK J M, BADGLEY R H, ANDERSON W J. Flexible rotor balancing by the exact point- speed influence coefficient method[J]. **Journal of Engineering for Industry**, 1972, 94(1): 148.
- [15] GOODMAN T P. A least-squares method for computing balance corrections[J]. **Journal of Manufacturing Ence & Engineering**, 1964, 86(3): 273-277.
- [16] 章璟璇, 唐云冰, 罗贵火. 最小二乘影响系数法的优化改进[J]. 南京航空航天大学学报, 2005(1): 110-113.
- [17] 朱珏颖, 杨 珏, 方 翔, 等. 基于遗传算法的影响系数法在挠性转子平衡中的应用[J]. 计量技术, 2017(9): 3-5, 9.
- [18] 王星星, 吴贞焕, 杨国安, 等. 基于改进粒子群算法的最小二乘影响系数法的理论及实验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(8): 100-104.
- [19] 黄金平, 任兴民, 邓旺群. 混合平衡法的改进及其在柔性转子平衡中的应用[J]. 振动与冲击, 2008, 27(12): 47-51, 178.
- [20] 徐宾刚, 屈梁生, 孙瑞祥. 基于影响系数法的柔性转子无试重平衡法研究[J]. 西安交通大学学报, 2000(7): 63-67.
- [21] ALVES D S, MACHADO T H, Cavalca K L, et, al. Characteristics of oil film nonlinearity in bearings and its effects in rotor balancing[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2019, 459: 114854.
- [22] YAO Jian-fei, YANG Feng-yu, SU Yong-fei, et, al. Balancing optimization of a multiple speeds flexible rotor[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2020(480): 1-18.
- [23] 韩平利, 黄树红, 贺国强, 等. 基于实验的转子动平衡影响系数优劣评价与提取[J]. 振动与冲击, 2003(2): 83-86, 98, 105-106.
- [24] GYAN R, TIWARI R. On-site high-speed balancing of flexible rotor-bearing system using virtual trial unbalances at slow run-ScienceDirect [J]. **International Journal of Mechanical Sciences**, 2020(183): 105786.
- [25] GYAN R, TIWARI R. Application of active magnetic bearings for in situ flexible rotor residual balancing using a novel generalized influence coefficient method [J]. **Inverse Problems in Science and Engineering**, 2018, 27(7): 1-26.
- [26] CHEN Dong-ju, FAN Jin-wei, ZHANG Fei-hu. Extraction the unbalance features of spindle system using wavelet transform and power spectral density [J]. **Measurement**, 2013, 46(3): 1279-1290.
- [27] 李传江, 费敏锐, 张自强. 一种非平稳转速下不平衡信号提取方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2016, 36(2): 390-395, 408.
- [28] 王 展, 杜思远, 贺文治, 等. 基于全相位快速傅里叶变换的主轴不平衡特征提取及实验[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 138-146.
- [29] 江志农, 冯 坤, 高金吉. 相位补偿滤波方法在自动平衡系统中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2006(3): 234-239, 250.
- [30] 冯健朋, 赵小勇. 航空发动机振动不平衡相位检测方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2018, 31(3): 38-42.
- [31] YANG J S, HE S Z, WANG L Q. Dynamic Balancing of a Centrifuge: Application to a Dual-Rotor System with Very Little Speed Difference[J]. **Journal of Vibration & Control**, 2004, 10(7): 1029-1040.
- [32] PONCI L P, CRECI G, Menezes J. C. Simplified Procedure for Vibration Analysis and Dynamic Balancing in Mechanical Systems with Beats Frequency [J]. **Measurement**, 2021(4): 109056.
- [33] 李传江. 高精度硬支承动平衡机通用测量系统的研究与实现[D]. 上海: 上海大学机电工程及自动控制学院, 2014.
- [34] CAO Hong-rui, HE Dong, XI Song-tao, et al. Vibration signal correction of unbalanced rotor due to angular speed fluctuation[J]. **Mechanical Systems & Signal Processing**,

- 2018,107:202-220.
- [35] 张超平,戴兴建,孟祥泳,等. 飞轮储能系统轴系本机动平衡实验研究[J]. 储能科学与技术,2013,2(3):181-184.
- [36] 凡非龙,宣海军. 大型风机现场整机动平衡系统的研发[J]. 风机技术,2015,57(2):79-84.
- [37] 谭秀婷,唐贵基. 汽轮机启动过程中的振动故障分析与处理[J]. 云南电力技术,2018,46(2):37-39.
- [38] 丁永胜. 大型水轮发电机组动平衡[J]. 云南电力技术,2010,38(1):29,40.
- [39] 王 斌. 大型水轮发电机组动平衡测试[J]. 云南电力技术,2014,42(2):75-77.
- [40] 陈 曦,廖明夫,张霞妹,等. 大涵道比涡扇发动机低压转子现场动平衡技术[J]. 航空动力学报,2017,32(4):808-819.
- [41] KUNZ D L, NEWKIRK M C. A generalized dynamic balancing procedure for the AH-64 tail rotor[J]. **Journal of Sound & Vibration**,2009,326(1-2):353-366.
- [42] AHMED A, TOUACHE A, HAKIMI A E, et al. A new hybrid method for rigid and flexible rotor balancing without phase response measurements[J]. **Australian Journal of Mechanical Engineering**,2020(20):184-196.
- [43] BHENDE, AMIT R. A new rotor balancing method using amplitude subtraction and its performance analysis with phase angle measurement-based rotor balancing method[J]. **Australian Journal of Mechanical Engineering**,2017,9(14):1-7.
- [44] 李洪升,刘 丹,朱世林,等. 利用三圆法处理压缩机驱动侧振动问题[J]. 风机技术,2017,59(S1):64-66.
- [45] 姜广义,王德友,焦业秋. 大型发动机转子本机平衡技术试验研究[J]. 航空发动机,2008(1):19-22,6.
- [46] 孙国维. 悬臂式单盘柔性试验转子的三圆法本机动平衡[J]. 热能动力工程,1987(2):33-37.
- [47] 陈 曦,廖明夫,刘展翅,等. 一种弹性支撑柔性转子模态动平衡方法[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(3):402-409.
- [48] 钱广华. 转子无试重现场动平衡方法研究[J]. 机床与液压,2012,40(3):58-61.
- [49] DEEPTHIKUMAR M B, SEKHAR A S, SRIKANTHAN M R. Modal balancing of flexible rotors with bow and distributed unbalance[J]. **Journal of Sound & Vibration**,2013,332(24):6216-6233.
- [50] PALAZZOLO A B, GUNTER E J. Modal Balancing of a Multi-Mass Flexible Rotor Without Trial Weights[J]. in **Asme International Gas Turbine Conference & Exhibit**,1982(5):1-11.
- [51] 傅 超,任兴民,杨永锋,等. 基于加速不平衡响应的柔性转子无试重动平衡[J]. 西北工业大学学报,2017,35(05):898-904.
- [52] FOILESW C, ALLAIRE P E, GUNTER E J. Review: rotor balancing[J]. **Shock and Vibration**,1998,5(5,6):1-10.
- [53] BISHOP R E D, PARKINSON A G. On the isolation of modes in the balancing of flexible shafts[J]. **ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**,1963,177(16):407-423.
- [54] KHULIEF Y A, OKE W, MOHIUDDIN M A. Modally tuned influence coefficients for low-speed balancing of flexible rotors[J]. **Journal of Vibration & Acoustics**,2014,136(2):024501.1-024501.5.
- [55] 王四季,廖明夫. 航空发动机柔性转子动平衡方法[J]. 噪声与振动控制,2011,31(6):91-94,115.
- [56] 王四季. 发动机转子高速动平衡系统的设计与实现[D]. 西安:西北工业大学动力与能源学院,2005.
- [57] 唐卫新. 应用模态平衡法消除发电机转子热弯曲[J]. 新疆电力,1999(1):25-28.
- [58] SPERLING L, RYZHIK B, LINZ C. et al. Simulation of two-plane automatic balancing of a rigid rotor[J]. **Mathematics and Computers in Simulation**,2002,58(4):10-31.
- [59] 屈梁生,邱 海,徐光华. 全息动平衡技术:原理与实践[J]. 中国机械工程,1998(1):3-5.
- [60] 屈梁生,王琇峰. 全息动平衡原理[J]. 陕西电力,2007(1):1-7.
- [61] 张亚磊. 全息谱技术在汽轮发电机组轴系不平衡故障中的应用[D]. 西安建筑科技大学机电工程学院,2010.
- [62] 刘淑莲,李 强,郑水英. 基于全息谱分析的非线性转子系统不平衡量识别[J]. 机械工程学报,2010,46(17):62-67.
- [63] 何 斌. 全息动平衡技术在汽轮发电机组轴系动平衡中的应用[J]. 东方汽轮机,2010(1):26-30,34.
- [64] 刘 石,屈梁生. 全息谱技术在现场动平衡前故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2004(4):16-20,64.
- [65] 欧阳红兵,曾 胜,汪希萱. 转子系统在线动平衡综述及展望[J]. 机械强度,1997(4):21-25,69.
- [66] DYER S W, NI J. Adaptive influence coefficient control of single-plane active balancing systems for rotating machinery[J]. **Journal of Manufacturing Science & Engineering**,2001,123(2):291-298.
- [67] 陈立芳,王维民,高金吉. 航空发动机自动平衡技术发展综述[J]. 航空动力学报,2019,34(7):1530-1541.
- [68] RODRIGUES D J, CHAMPNEYS A R, FRISWELL M I, et al. Experimental investigation of a single-plane automatic balancing mechanism for a rigid rotor[J]. **Journal of Sound and Vibration**,2010,330(3):385-403.
- [69] RODRIGUES D J, CHAMPNEYS A R, FRISWELL M I,

- et al. Automatic two-plane balancing for rigid rotors [J]. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, 2008, 43(6):527-541.
- [70] DYER S W, NI J, et al. Robust optimal influence-coefficient control of multiple-plane active rotor balancing systems [J]. **Journal of Dynamic Systems Measurement & Control**, 2002, 124(1):41-46.
- [71] MOON J D, KIM B S, LEE S H. Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficients [J]. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2005, 46(9):978-987.
- [72] 张珂,张驰宇,张丽秀,等. 电磁滑环式在线动平衡系统特性分析与实验 [J]. **振动. 测试与诊断**, 2018, 38(1):34-38, 203.
- [73] 李燕,王维民,黄立权,等. 基于蠕动泵的注排液式转子自动平衡实验研究 [J]. **振动与冲击**, 2011, 30(4):38-41.
- [74] 潘鑫,吴海琦,高金吉. 转子-轴承系统液体式在线自动平衡装置研究综述 [J]. **振动与冲击**, 2015, 34(6):95-100.
- [75] ZENG S, WANG X X. The electromagnetic balancing regulator and the automatic balancing system [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1998, 209(1):5-13.
- [76] KIM J S, LEE S H. The stability of active balancing control using influence coefficients for a variable rotor system [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2003, 22(7):562-567.
- [77] 顾超华,曾胜,罗迪威,等. 一种机械式在线平衡头的设计与实验研究 [J]. **振动与冲击**, 2014, 33(12):151-155.
- [78] 潘鑫,吴海琦,高金吉. 旋转机械气压液体式不平衡振动故障靶向自愈调控系统 [J]. **机械工程学报**, 2015, 51(1):146-152.
- [79] 陈立芳,陈哲超,王维民,等. 基于自适应粒子群优化的非稳态自动平衡控制算法研究 [J]. **振动与冲击**, 2018, 37(24):131-136.
- [80] ZHANG Long-fei, ZHA Jun, ZOU Chao, et al. A new method for field dynamic balancing of rigid motorized spindles based on real-time position data of CNC machine tools [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2019(6):56-79.
- [81] YAN Xun-shi, ZHAO Jing-jing, SHI Zhen-gang, et al. A Method to Select Weights in Online Dynamic Balance Technology Based on Rotor-Active Magnetic Bearing System [C]. in 2017 25th International Conference on Nuclear Engineering, 2017(13):1-16.
- [82] 章云,孙虎,胡振邦,等. 高速主轴不平衡振动行为分析与抑制策略 [J]. **西安交通大学学报**, 2019, 53(5):24-29, 99.
- [83] HE Xiang, MA Hong-Wei, ZHANG Jun, et al. Wavelet analysis of the shaft order perturbation and stall inception in an axial compressor [J]. **Journal of Thermal Science**, 2013(6):13-25.
- [84] CHATZISAVVAS I, DOHNAL F. Unbalance identification using the least angle regression technique [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2015, 50-51:706-717.
- [85] ZHANG Yun, MEI Xue-song, SHAO Ming-ping, et al. An improved holospectrum-based balancing method for rotor systems with anisotropic stiffness [J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, 2013, 227(2):246-260.
- [86] LIAO Yu-he, ZHANG Peng. Unbalance related rotor precession behavior analysis and modification to the holobalancing method [J]. **Mechanism & Machine Theory**, 2010, 45(4):601-610.
- [87] CASTRO H F D, CAVALCA K L, CAMARGO L W F D, et al. Identification of unbalance forces by metaheuristic search algorithms [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2009, 24(6):1785-1798.

[编辑:雷敏]

本文引用格式:

张雪辉,焦瀚晖,胡东旭,等. 旋转机械现场动平衡方法研究进展 [J]. **机电工程**, 2021, 38(11):1367-1377.ZHANG Xue-hui, JIAO Han-hui, HU Dong-xu, et al. Research progress on field dynamic balancing method of rotating machinery [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2021, 38(11):1367-1377.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>