

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.006

高速主轴动平衡技术研究现状*

王 展^{1,2}, 朱峰龙^{1,2*}, 涂 伟^{1,2}

(1. 沈阳建筑大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 高档石材数控加工装备与技术
国家地方联合工程实验室, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:针对高速主轴在运行过程中产生的振动对零件加工精度、表面质量等造成的破坏问题,对离线动平衡技术、在线动平衡技术及其在线动平衡装置的发展情况进行了研究与总结,对高速主轴在线动平衡装置的动平衡原理和应用过程中存在的优点与不足进行了分析与归纳,对高速主轴在线动平衡技术及其动平衡装置的未来研究方向进行了展望。研究表明,广泛应用的混合式在线动平衡技术以及电机驱动式、喷液式和电磁驱动式3种最具代表性的在线动平衡装置是未来发展趋势;该技术重点是提高动平衡效率、快速响应能力、精度、适应性和耐用性;混合式在线动平衡技术及其高性能在线装置在高速主轴动态平衡方面具有广阔前景。

关键词:离线动平衡技术;在线动平衡技术;高速主轴;机械振动;动平衡装置

中图分类号:TH113.2+5;TG502.14

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0455-05

Summary of high speed spindle dynamic balancing techniques

WANG Zhan^{1,2}, ZHU Feng-long^{1,2}, TU Wei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. National-local joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-Grade Stone, Shenyang 110168, China)

Abstract: Aiming at solving the problem which was caused by the high-speed mechanical spindle vibration that could damage elements manufacturing precision and surface quality under the working condition, the development from off-line dynamic balancing techniques to online dynamic balancing techniques and their balancing devices in recent years were reviewed and summarized. The dynamic balancing devices principles and their advantages and disadvantages were analyzed and classified. The high-speed spindle online dynamic balancing techniques and their devices development were discussed and prospected. The results indicate that the hybrid online dynamic balancing techniques and the current three most representative balancing devices which are respectively motor driving type, spray type and electromagnetic drive type will be widely accepted and spotted in the future. Dynamic balancing development on promoting balance efficiency, rapid response, precision, adaptability and durability should be emphasized. The application of dynamic balancing techniques and their highly performance balancing devices have a promising future.

Key words: off-line dynamic balancing techniques; online dynamic balancing techniques; high-speed mechanical spindle; mechanical vibration; dynamic balancing devices

0 引 言

随着高速主轴的不断应用和发展,对主轴各项指标的要求越来越高^[1-2]。高速机械主轴动不平衡和振

动成为影响加工精度的重要因素。资料显示,由于振动原因导致设备失效占比为60%~70%,即使是精度极高、经过良好静平衡的机床主轴,也会存在设计、制造、工件装夹、磨损、负载冲击等多种原因破坏原有平

收稿日期:2016-11-09

基金项目:辽宁省自然科学基金资助项目(201602638);辽宁省教育厅科学研究项目(LJZ2016013)沈阳市科技计划项目(F16-096-1-00);沈阳建筑大学重点实验室开放基金项目(SJSC-2015-14)

作者简介:王展(1984-),男,辽宁鞍山人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事机械主轴动平衡方面的研究. E-mail: juven1126@163.com

衡状态^[3]。通用的离线动平衡方法对于高速主轴平衡调试过程中需要数次开关机才能将设备进行精准的调试。对于刚性转子和柔性转子在必要时需要将其拆下,放到特定平衡机上进行平衡调试,复杂繁琐平衡过程导致平衡效率低,调试精度不能达到要求,这些平衡方法已不能满足现代企业生产要求,必须要实现更加高效、精确平衡技术和平衡装置的发展和创新^[4]。

高速主轴在线动平衡可在主轴正常运行过程中,实时监测转子的振动情况,并消除出现的不平衡,无需停机就可以快速、高效实现高精度的平衡,排除动平衡过程出现的错误、提高平衡精度和效率、减少停机损失^[5]。目前仍然有无数国内外研究学者针对在线动平衡方法、策略、装置等各个方面展开研究^[6]。目前,现存的多种消除机械主轴不平衡的技术和方法已经在实践中得到广泛应用。随着对高速主轴技术的研究、发展与创新,将会出现更加高效、精准的在线动平衡技术和平衡装置。

本研究对离线动平衡技术、在线动平衡技术及其在线动平衡装置的发展情况进行研究与总结。

1 通用动平衡技术

1.1 挠性转子动平衡技术

K. Federn^[7]在 1956 年提出,当转子系统高于第一临界转速时,必须考虑挠度对动平衡的影响。挠性转子动平衡方法有单面影响系数法、模态平衡法、无试重平衡法等。

1.1.1 单面影响系数法

影响系数是指转子待平衡面上的单位不平衡量在某一个振动检测点所产生的振动响应^[8]。

上海交通大学机械与动力工程学院在 2002 年基于单面影响系数法进行动平衡测量研究^[9],以高性能 DSPF2808 芯片作为测控单元。实验结果表明:该方法能准确得到动平衡值的大小与相位,对有旋转部件构成的机械设备生产应用和维修具有实际应用价值。

西安交通大学机械工程学院应用影响系数法实现砂轮轴的现场动平衡。基于 LabVIEW 开发专门用于砂轮盘类转子现场单面平衡的虚拟仪器系统,试验表明:平衡校正系统能够有效抑制不平衡引起的基频振动,进而达到减振目的^[10]。

在大多数发电厂进行汽轮机转子平衡时,影响系数法的应用在缩短平衡时间、提高平衡精度等方面比两点法、三点法、试加质量周移法等会更加广泛和高效^[11]。

1.1.2 模态平衡法

模态平衡法利用了转子振动不平衡响应的性质,每一模态用一组确定的质量进行平衡在该模态下的平衡还不能影响已经平衡的低阶模态。

西北工业大学教授验证了该方法的正确性^[12],在一高速模拟转子试验器上进行无试重动平衡试验,一次平衡后,转子过临界时振幅平均降低 70%。实验表明,无试重模态动平衡方法能够有效、快速、精准获取挠性转子的振动幅值和相位。

西北工业大学振动工程研究所提出利用升速响应振幅进行柔性转子模态平衡方法^[13],针对稳态平衡方法所面临问题,利用起动过程中瞬态幅度信息进行柔性转子双面平衡,结果表明,不需要相位信息的平衡方法,有效降低转子的瞬态残余振动,提高平衡效率。

1.1.3 无试重平衡法

无试重平衡方法利用数值模拟在平衡面上试加虚拟质量块,确定转子在检测面处振动相位相对于平衡面处原始不平衡力所在相位之后的角度。

中航工业航空动力机械研究所和西北大学动力与能源学院探索一种跨二阶柔性转子无试重模态平衡方法是目前无试重模态平衡方法中创新和先进的一项技术^[14]。其解决了传统柔性转子动平衡方法需要添加试重、多次启动问题,发展了一种基于无试重模态动平衡方法的柔性转子二阶动平衡方法。运用该方法平衡后一阶振幅下降 59.44%,二阶振幅下降 97.56%。试验结果表明:该方法可有效降低转子不平衡振动,减少平衡开车次数,大大提高了转子的平衡效率。

西安电子科技大学机电工程学院和西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室提出柔性主轴转子低速无试重动平衡方法^[15],实验中工作转速为 7 200 r/min,结果表明:对不平衡量校正后,一阶临界转速下主轴振动幅值下降了 74.7%,临界转速前后振动降幅明显,有效抑制高速振型不平衡。

1.2 刚性转子动平衡技术

由于转子材质不均匀、制造、装配误差等原因,产生的不平衡量是产生振动、噪声重要根源。目前刚性转子动平衡方法应用较广的是双面影响系数法^[16]。

由于重新设计现有机床或者机械主轴系统的难度很大,而对于动平衡装置的结构设计较为容易,目前很多学者在双面动平衡技术和动平衡装置结合的研究方面取得很大发展。

近些年来重庆大学机械传动国家重点实验室研究学者提出基于影响系数法的不卸试重现场动平衡算

法^[17]。该方法利用配重平衡转子原始不平衡量和未卸下试重。现场试验表明:该算法有较高平衡精度,简化了现场动平衡试验操作步骤,减少了现场动平衡操作时间。

北京工业大学机械工程与应用电子技术学院的研究学者基于盘式在线动平衡装置原理,提出液压驱动平衡盘与主轴分离^[18],基于双平面影响系数法的原理,该方法提高机床主轴关键部位的平衡效果,具有现实意义。

哈尔滨工业大学学者李勇^[19]研究磁力平衡方法在线动平衡机技术,提出一种采用无接触同步旋转电磁力作为平衡矢量在线动平衡机设想,分析和计算定子绕组方波供电时电磁力幅值与相位的波动误差,计算结果证明了方案的可行性。

2 在线动平衡技术

对高速主轴在线动平衡区分方法有刘曦泽、段滋华等人^[20]的直接法和平衡头法,哈尔滨工业大学赵学森等人^[21]将高速主轴在线动平衡技术细分为:直接法、间接法、混合法。

2.1 直接在线动平衡方法

喷涂式在线动平衡方法^[22]将高粘度物质喷射到转子上,改变转子重心位置实现动平衡。高速旋转下对转子喷射高粘度物质附着在转子上产生很大动量,对转子在短时间内产生巨大的冲击,从而产生了新的不平衡量。

喷液式在线动平衡装置^[23]改变平衡头重心位置实现在线动平衡。喷液式装置已经应用于磨床,但在使用过程中也存在因容腔容量有限导致平衡能力受限的问题,而容腔中液体的挥发也会影响平衡精度。

去重式在线动平衡装置采取激光法^[24],这种方法平衡精度高、易于控制,但是由于激光束会使转子表面产生伤痕,降低疲劳极限、影响表面质量、缩短使用寿命。由于激光是在短时间内将微量金属气化,平衡能力受限。

2.2 间接在线动平衡方法

间接在线动平衡方法通过作动器或轴承等方法间接调整主轴动平衡的方法。这种装置是在平衡头或者平衡盘上加与不平衡力大小相等,方向相反的力来消除不平衡量从而达到转子系统动平衡^[25]。该类装置主要有电磁轴承型在线动平衡装置和电磁圆盘型在线动平衡装置。这两类装置通过在电磁轴承处或者在平衡圆盘处安放变频器,使其为转子系统提供与转子旋

转角速度相同频率的电磁力,使转子系统达到平衡状态。由于转子在运转过程中,要时刻受到电磁力作用,对于整个系统耗费能量、不环保,装置结构复杂、体积大、成本高,其用于不长期运行的旋转机械。

2.3 混合在线动平衡方法

国内学者们进行深入的平衡头主要集中在混合式,由于混合式平衡头法的相对优越性,目前,有3种常见平衡头:电机驱动式机械平衡头、液体喷射式平衡头和电磁式平衡头^[26]。

2012年,北京工业大学张仕海等人基于盘式在线动平衡装置,提出了液压驱动平衡盘与主轴分离,摩擦力矩实现差速并稳定的内置式双面在线动平衡装置设计方案,通过实例证明了该方法的有效性^[27]。2013年,西安交通大学机械工程学院章云、梅雪松等学者^[28]提出主轴注液式在线动平衡装置,平衡终端结构特性,实现喷液量精密控制,通过分析平衡终端内、外圈径向位移与转速关系,验证该装置在高速旋转下安全性,实现喷液量与平衡配重间线性关联,满足该装置用于高速平衡时的特殊需求。结果表明,在20 700 r/min时,主轴不平衡振动幅值下降78.8%,验证了平衡装置、平衡控制策略的有效性。2016年北京化工大学高金吉、陈立芳等人^[29]研究电磁式自动平衡装置,探究电磁式自动平衡装置自锁力影响因素及优化方法,通过电磁平衡头永磁自锁磁路分析得到影响自锁力的主要结构参数,为驱动电流设计提供了理论依据。

国外的主轴在线动平衡研究较为领先,电机驱动式、喷液式和电磁驱动式3种主流平衡头在世界各发达国家都有广泛应用^[30]。德国、美国和意大利是相关技术最为成熟的国家。

美国SCHMITT公司SBS内置平衡头用于磨削主轴,其平衡能力在 $100\text{ g}\cdot\text{cm}\sim 7\,000\text{ g}\cdot\text{cm}$,适合转速在 $300\text{ r/min}\sim 13\,000\text{ r/min}$ ^[31],振动控制在20 nm以下,平衡只需几秒钟。Kennametal公司推出整体自动平衡系统TABS,通过电磁力调节平衡环的相对位置,不到2 s就能够使得主轴回转精度在50 nm以下。LORD公司电磁驱动实时平衡系统安装在主轴上配重盘位置,由电磁力调节来实现高速主轴在线平衡的目的,发现不平衡量时,系统只需要经过1.5 s自动调节就可以使得主轴达到平衡,该系统可用于40 000 r/min及以上主轴,平衡后可使平衡等级达到G1或更高。

德国Hofmann公司推出电磁滑环式平衡头AB9000,适合转速 $200\text{ r/min}\sim 120\,000\text{ r/min}$,平衡能力 $100\text{ g}\cdot\text{mm}\sim 3.2\text{ kg}\cdot\text{m}$ ^[32]。申克公司研制的HM及HS系列动平衡机可平衡最大轴径为3 600 mm,不

平衡减少率达 95% 以上。

意大利 MARPOSS 公司研制的主轴型 (ST) 平衡头,使得机床主轴系统不论是在工作状态下还是非工作状态下,传送动力的碳刷滑环都能够分别处于接触与分离状态,主轴型 (ST) 平衡头需要安装在磨床主轴内,工作转速在 $1\,100\text{ r/min} \sim 6\,500\text{ r/min}$,平衡能力为 $400\text{ g} \cdot \text{cm} \sim 13\,000\text{ g} \cdot \text{cm}^{[33]}$ 。

3 在线动平衡技术研究展望

目前,高速主轴与在线动平衡技术之间联系十分紧密,高速主轴在线动平衡技术已成为机械加工等制造业方向着重开发与研究重点。目前对各类传感器、计算机技术、数字通信技术、信号处理技术、精密加工与制造等已有十分深入研究,随着这些技术发展,主轴在线动平衡测试技术和动平衡装置发展方向主要体现在以下几个方面:

(1) 结构设计更加标准化。有些动平衡装置在结构上设计不合理,体积较大,导致安装过程十分不便,应该针对不同型号主轴,设计一套与主轴相适应标准,使动平衡装置能够与主轴尺寸相适应,使得安装、操作过程更加简便容易。

(2) 平衡效率高、操控更简便。由于动平衡技术应用不当或者平衡装置本身不足,在线主轴动平衡过程在特定工况下,原本应该可以快速将不平衡量抵消,却花费较长平衡时间,导致平衡效率十分低下。针对不同工况、实验环境下高速主轴,在线动平衡技术和装置都应该拥有更加高效、而且操作简便的方法和途径。

(3) 更长使用寿命长、成本低廉。一方面要求在线动平衡装置拥有较长的使用寿命,另一方面价格还要低廉,这样高性价比的平衡装置在未来的市场中才会拥有一席之地。

(4) 更先进的测试系统。动平衡测试过程更多采用非接触间接测试,这就要求平衡测试系统拥有如先进传感器技术、数字通信技术、信号处理技术等,某些在线动平衡系统已实现自动检测、自动跟踪补偿等能力,这些大大提高在线动平衡测试精度。

(5) 研制新型材料、创新算法。材料对于平衡装置作用明显,有些平衡装置与主轴接触部分在高转速下发生热膨胀,影响内部动平衡块的移动与调试。很多国内外动平衡算法的不断研究、发展和创新,推动在线平衡技术向更加积极、尖端的方向发展,不断提高动平衡精度与平衡效率。

(6) 网络化、智能化精密加工与制造。目前,先进在线自动平衡系统最佳平衡精度已经达到 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ (振

动峰值),网络化、智能化技术也正在改变着加工生产方式,未来需要利用好网络自动控制技术、在线动平衡系统网络通讯和远程控制功能。

4 结束语

在线动平衡技术目前应用广泛。离线动平衡需要频繁开关机,对平衡效率和精度有影响,对机器损坏严重,在线动平衡不需要频繁启动主轴转子,避免了平衡过程中出现这一问题。

多种类型动平衡装置的研究、生产。在线动平衡装置应用到磨床、车床等各类小型加工设备上和越来越多的汽轮机、风机、离心机、压缩机等大型设备上。多种类型动平衡装置已经在实践应用中取得良好特性。

从离线、在线动平衡方法和各类动平衡装置两方面来看,每种平衡技术都有各自的应用范围,每种动平衡装置也都有其各自的优势与局限性,所以每种动平衡技术、装置都仍然有创新、发展的空间。不同的平衡方法、装置在高速机械主轴方面的应用都应该得到广泛的重视。

在未来研究过程中,在学者已经完成的研究成果基础上,继续对高速主轴调控策略、动平衡算法在线动平衡技术等各方面进行创新,开发研究高可靠性、高精度的动平衡装置,为各种类型机械设备加工水平和效率提升方面提供技术支持。利用好网络化技术,将动平衡技术和网络通讯、远程控制结合在一起,为用户提供个性化、安全服务。总体而言,保证高精度、高效率、快速响应、智能化的安全加工生产将是未来动平衡技术及其装置的发展方向和研究重点。

参考文献 (References):

- [1] 周晓华,王 敏. 某新型剃齿机主轴转速分析与研究[J]. 兵工自动化,2015,34(6):88-99.
- [2] 赵学森,陈 龙,李增强. 超精密机床主轴在线动平衡装置研究现状[J]. 航空精密制造技术,2014,50(5):6-9.
- [3] 章 云,梅雪松. 高速主轴动平衡及其在线控制技术[J]. 中国工程科学. 2013,15(1):87-92.
- [4] 晁慧泉. 高速主轴在线动平衡系统的研究应用[D]. 北京:北京工业大学机械工程与应用电子技术学院,2011.
- [5] 周大师,伍良生. 机床主轴在线动平衡技术综述[J]. 现代制造工程,2008(7):121-124.
- [6] 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**,2006,46(9):978-987.

- [7] CANEPA E, CATTANEI A, ZECCHIN F M. Analysis of tonal noise generating mechanisms in low-speed axial-flow fans[J]. **Journal of Thermal Science**, 2016, 25(4): 302-311.
- [8] 刘占辉, 罗剑斌, 卢一兵. 影响系数法在引风机现场动平衡中的应用[J]. 风机技术, 2011(3): 79-82.
- [9] 徐 凯, 程 念, 苗玉彬. 基于单面影响系数法的动平衡测量研究[J]. 机械与电子, 2015(7): 7-10.
- [10] 孙志超, 陶 涛, 黄晓勇, 等. 车床主轴与进给轴耦合热误差建模及补偿研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 105-112.
- [11] 何立东, 沈 伟, 刘锦南, 等. 双平面和单平面主动平衡控制转子振动的对比实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 106-109.
- [12] 李晓丰, 郑龙席, 刘振侠. 柔性转子无试重模态动平衡方法与试验[J]. 振动测试与诊断, 2013, 33(4): 565-570.
- [13] 刘钢旗, 郑龙席, 梅 庆, 等. 一种跨二阶柔性转子无试重模态平衡方法[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 1019-1025.
- [14] 章 云, 梅雪松, 胡振邦, 等. 注液式高速切削主轴动平衡装置设计及其性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(3): 18-22.
- [15] 谢志江, 唐一科, 李远友. 转子双面现场动平衡的不卸试重平衡法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 25(9): 101-103.
- [16] 孙延添. 刚性转子现场动平衡理论分析及实验研究[D]. 北京: 清华大学机械工程学院, 2005.
- [17] 王俊元, 蒋红琰, 杜文华. 复合式高速电主轴在线动平衡装置的开发[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(6): 491-495.
- [18] 沈永新, 孙 伟. 双面影响系数法在汽轮发电机转子动平衡中的应用[J]. 科技创新与应用, 2013(11): 21-22.
- [19] 李 勇, 陆永平. 永磁差频电动平衡头的振动控制实验研究[J]. 振动工程学报, 2000, 13(2): 302-306.
- [20] 刘泽曦, 段滋华, 李多民. 转子动平衡技术的研究现状和进展[J]. 广东石油化工学院学报, 2012, 22(3): 69-72.
- [21] 赵学森, 陈 龙, 李增强. 超精密机床主轴在线动平衡装置研究现状[J]. 航空精密制造技术, 2014, 50(5): 6-9.
- [22] GUSAROV A A, SSCCOL C, SHATALOV L N. Automatic balancing of rotor[C]. 2nd Intl. Conference on Vibration in Rotating Machinery, London: Institution of Mechanical Engineers, 1980.
- [23] RODRIGUES D J, CHAMPNEYS A R, FRISWELL M I. Experimental investigation of a single-plane automatic balancing mechanism for a rigid rotor[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2011, 330(3): 385-403.
- [24] 周继明, 欧阳光耀. 动不平衡质量不停机自动切除初探[J]. 传感器技术, 1998, 17(4): 13-16.
- [25] 李红伟, 徐 旸, 谷会东, 等. 电磁轴承-挠性转子系统的本机动平衡方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12): 1419-1422.
- [26] 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.
- [27] MOON J K, 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 & Manufacture**, 2006, 46(9): 978-987.
- [28] 章 云, 梅雪松, 胡振邦, 等. 注液式高速切削主轴动平衡装置设计及其性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(3): 13-17.
- [29] 曹 晰, 陈立芳, 高金吉. 用于转子自动平衡的双盘电磁型平衡头移动控制方法研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(4): 121-125.
- [30] KHULIEF Y A, MOHIUDDIN M A, EL-GEBEILY M, et al. A new method for field-balancing of high-speed flexible rotors without trial weights[J]. **International Journal of Rotating Machinery**, 2014(12): 163-173.
- [31] SCHMITT. SBS balancers[EB/OL]. [2016-4-25]. <http://www.grindingcontrol.com/products/>
- [32] Hofmann. Ring Balancer AB 9000[EB/OL]. [2016-4-25]. <http://www.hofmann-balancing.co.uk/products/active-balancing-systems/ring-balancer-ab-9000.html>
- [33] MARPOSS. Balancing heads[EB/OL]. [2016-4-25]. http://www.marposs.com/product.php/eng/grinding_wheel_balancer.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

王 展, 朱峰龙, 涂 伟. 高速主轴动平衡技术研究现状[J]. 机电工程, 2017, 34(5): 455-459.

WANG Zhan, ZHU Feng-long, TU Wei. Summary of high speed spindle dynamic balancing techniques[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(5): 455-459.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>