

航空发动机自动平衡技术发展综述

陈立芳, 王维民, 高金吉
(北京化工大学 发动机健康监控及网络化教育部重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 针对航空发动机在运行过程中不平衡振动过大的问题,采用自动平衡技术进行在线质量补偿,可有效降低其振动水平。目前自动平衡技术主要运用于航空发动机结构、控制算法、工程应用 3 个方面。基于影响系数法的电磁驱动型自动平衡在美国空军 C-130H 运输机上得到工程应用,飞行测试 4 个发动机螺旋处的振动均低于 1.27 mm/s,降低了 94%,因螺旋桨振动导致的压气机处振动降低了 75%。研究结果表明:航空发动机自动平衡技术可实现在线持续动平衡,能有效降低发动机及其组件的振动疲劳损伤,降低发动机维护费用,延长维修周期。自动平衡技术在航空发动机领域得到工程应用是一个循序渐进的过程,还需要进一步开展结构设计、控制策略、系统集成等方面的研究工作,并在航空发动机设计阶段就考虑纳入自动平衡结构。

关 键 词: 航空发动机振动抑制; 自动平衡技术; 影响系数法; 幅相轮换寻优; BP+APO 算法

中图分类号: V221 **文献标志码:** A

Summary on the development of auto-balancing technology of aero-engine

CHEN Lifang, WANG Weimin, GAO Jinji

(Key Lab of Engine Health Monitoring-Control and Networking of Ministry of Education, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: For the problem of unbalanced vibration of aero-engine during operation, the auto-balancing technology was used to provide online compensation quality and reduce the vibration effectively. At present, the auto-balancing technology on aero-engines had problems and challenges in three aspects: structure, control algorithm and engineering application. The electromagnetically driven auto-balancer based on the influence coefficient algorithm was applied in the US C-130H transport aircraft. The test results from the four aero-engines in the flight showed that with auto-balancer, the propeller was balanced to below 1.27 mm/s, 94% reduction. Meanwhile 75% reduction in propeller-induced vibration was measured at the compressor. Research indicates that aero-engine auto-balancing technology can achieve continuous online dynamic balancing, which will greatly reduce the vibration fatigue damage of the aero-engine and its components, reduce the maintenance cost and prolong the maintenance cycle. Auto-balancing technology requires a gradual process for the aero-engine applications. In order to achieve this goal, it is necessary to carry out the research work of structure design, control strategy, system integration and so on. At the same time, it is necessary to take the auto-balancing structure into account at the very beginning of the aero-engines design.

收稿日期:2018-11-15
基金项目:国家自然科学基金(51775030)
作者简介:陈立芳(1973—),女,副教授,博士,主要研究方向为旋转机械主动平衡技术。

引用格式: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. CHEN Lifang, WANG Weimin, GAO Jinji. Summary on the development of auto-balancing technology of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(7): 1530-1541.

Key words: aero-engine vibration suppression; auto-balancing technology; influence coefficient method; amplitude and phase rotation optimization; BP+APO algorithm

航空发动机是飞机的“心脏”,长期以来,一直是工程科技界亟待突破的关键设备。发动机在高速、高温、高载荷作用下,转子系统会发生变形、磨损及同心度的变化,会使转子由于质心偏离旋转中心引起振动,进而导致整机振动大。不平衡是发动机振动产生的主要原因,其中质量不平衡引起的振动故障是常见且危害很大的故障之一,容易造成发动机性能降低,缩短在役时间,严重地造成轴承、叶片损坏、动静碰摩等故障,导致发动机提前返厂。无论是我国拟开发的大型商用飞机,还是正在测试试飞的歼 20、歼 31、运 20 等先进军用飞机,都因为发动机问题,严重影响研制进展。据某发动机维修厂统计,每年因不平衡振动故障而造成的提前返厂量占返厂发动机总数的 60% 以上,严重影响飞机出勤率。因此,及时有效地对发动机转子系统进行动平衡至关重要。国内外研究机构尤其是发动机制造维修单位,均在发动机动平衡技术方向进行着不懈努力。在发动机逐步向智能化方向发展的今天^[1],发动机自动平衡技术可为高性能发动机的研发提供技术支撑。

目前较先进的动平衡方式是在外场进行局部拆装配平,即飞机在飞行过程中用发动机振动监测系统监测记录振动状况,待飞机落地后计算不平衡矢量,通过在发动机指定位置安装一定质量的配重块,直接在外场实现发动机的动平衡,该方法在国外被称为发动机在翼动平衡^[2-5]。若振动超标通过在翼动平衡无法解决时,则需将发动机返厂拆解。国内维修厂普遍采用返厂拆解方式,并在动平衡机上进行发动机部件级低速动平衡^[6-10]。但事实表明,即使单个部件振动水平全部达标,组装后也不能确保整机处于平衡状态^[11-16]。1989 年,晏砺堂等人提出了发动机用简易本机平衡法^[17]研究发动机在飞机上或者在台架上的动平衡,但受限于无有效的加重位置,通过机匣测振无法获取有效的转子振动,难以实施。2013 年,刘永泉等人通过整机振动测试及多年来发动机试验和试车中总结的振动故障特征经验,较全面地分析了目前整机振动控制技术存在的问题,总结出多个振动故障特征,为整机动平衡提供了非常有价值的经验参考^[18]。

20 世纪以来,国内外对在线自动平衡技术进

行了长期的研究,并在高精度磨床、机床主轴等领域得到广泛应用。到 21 世纪初,开始出现航空发动机自动平衡的应用研究报道^[19]。自动平衡技术按照软硬件分为自动平衡装置和自动平衡控制算法两部分。这两部分相辅相成,不同的使用环境要求不同结构的自动平衡装置,不同的自动平衡装置需要与之相适应的自动平衡控制算法。以实现更好的动平衡效果为目标,算法依托装置,装置依赖算法。发动机用自动平衡技术需充分考虑飞行工况的特殊性,以轻量化结构、快速稳定的控制效果为目标,选择适合的装置和控制算法。

2004 年,资料显示美国空军开始进行涡桨在线自动平衡系统(in-flight propeller balancing system,IPBS)的研究,并于 2014 年实现了 C-130H 涡桨军用运输机的正式列装^[20-25]。这是一种全新的发动机整机动平衡技术,不需要停机就能进行动平衡。IPBS 可使发动机振动保持在较低范围,防止振动故障恶化加剧,可延长发动机寿命及维修周期。目前,国内尚无在线自动平衡在发动机上的研究报道。

1 航空发动机自动平衡技术的发展

1.1 自动平衡概述

自动平衡装置按照控制原理和控制方式可分为被动式和主动式自动平衡装置,见图 1。被动式自动平衡用于超过 1 阶临界的工作环境,依靠系统过临界后的自动定心特性来驱动平衡质量,在航空发动机上不适用。主动式自动平衡装置分三类:第一类是作用力式自动平衡技术,通过施加外力进行直接平衡的主动控制技术,如电磁轴承^[26-27]。其优点是通过对旋转主轴施加可变的径向力,能迅速抑制整机振动,包括同频及倍频振动。该类方式的局限性是一旦断电,平衡能力即丧失,重新上电需要再次执行平衡过程。此外,电磁轴承的不平衡激励力通过轴承支架传递到底座上,不能消除不平衡产生的根本原因,不适用于以薄壁结构为主的发动机。第二类是通过喷涂、注/排液等方式来改变转子质量抑制不平衡振动,其配套装置结构复杂且庞大,不适用发动机的飞行环境。第三类是通过预装的配重块实时调整转子系统质心位置,使之重回旋转中心来消除不平衡

振动。该类方法中以变质量分布式自动平衡的研究最为普遍,即不改变整体转子质量而是通过在线移动内部的质量块或者液体所在位置来实现对转子质量再分布,从根本上抑制了不平衡振动的源头。

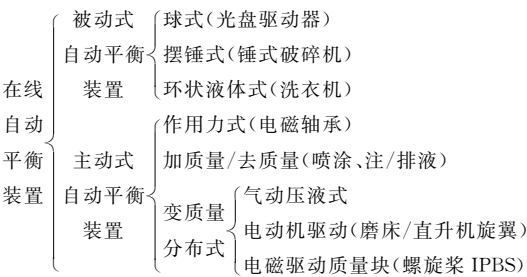


图 1 在线自动平衡装置分类

Fig. 1 Classification of on-line auto-balancer

目前据公开报道,电动机驱动配重块式^[28]和电磁驱动配重块式^[29]两种结构在航空发动机上均有应用。这两类平衡装置多采用双配重质量,其基本原理如图 2 所示。一套自动平衡装置由平衡执行器、信号采集和处理系统、主控制器三个部分组成。平衡执行器通常由两个平衡盘上的配重块 1 和配重块 2 合成补偿质量。假设单个配重盘的平衡能力 U 用配重块质量 m 与其质心半径 R 的乘积表示为 $U=mR$ 。对于单平面平衡的情况,该自动平衡装置可提供的平衡能力为 $0\sim 2U$ 。当采用两套自动平衡装置进行双平面平衡时,可提供的平衡能力为 $0\sim 4U$,距离 L 时可平衡力偶为 $0\sim 2UL$ 。

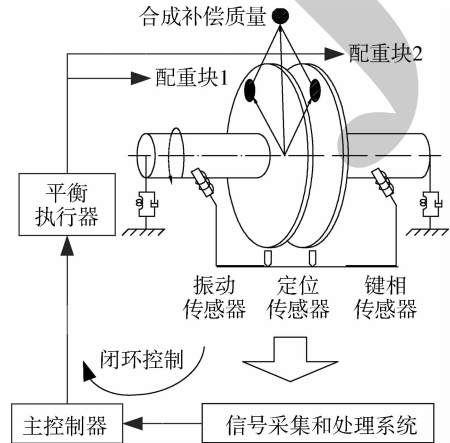


图 2 双配重质量平衡装置原理图

Fig. 2 Schematic of bi-weight balancer

1.2 电磁驱动式自动平衡

电磁驱动式自动平衡装置利用电磁驱动和永磁自锁两种方式实现自动平衡。具体方法是:通

过电磁线圈产生非接触驱动力,驱动载有永久磁铁的配重盘旋转到任意指定位置,产生相应的补偿质量。每个配重盘对应一套电磁线圈及检测装置,含有配重块的配重盘安装在轴承上,可相对主轴旋转。在一个旋转周期内,可以控制任意方向的移动,也可以精确定位配重块的位置。配重块位置的固定依靠永久磁铁的自锁结构,以保持每一次的配平状态。配重盘上镶嵌有正反交替的永久磁铁,无外加磁场时,与两侧的带孔铁磁材料按照磁路最短原则形成稳定自锁结构^[30-32],如图 3 所示。该类平衡装置具有结构简单、执行力强、控制精度高的特点。

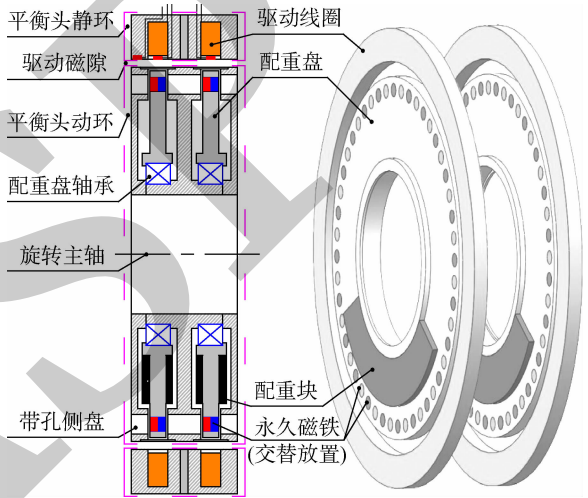


图 3 电磁驱动型双配重平衡头基本结构

Fig. 3 Basic structure of the bi-weight electromagnetic driven balancing system

1998 年,美国 Balance Dynamics 公司的 Dyre 等人首次介绍了电磁驱动式平衡装置的基本结构和工作原理,公布了发明专利(美国专利:US5757662)^[30]。2004 年,美国 Lord 公司公开报道研发用于军用涡桨螺旋桨的 IPBS^[33],在 Dyre 等发明的基础上,通过增加静环支架、滑环等方式实现了平衡头在涡桨螺旋桨上的安装和动力传输,并于 2008 年、2009 年公布了该自动平衡的专利^[21-22],如图 4 所示。2007 年,在美国空军支持下,IPBS 在 C-130H 运输机、E-2C“鹰眼”预警机和 C-2A 舰载运输机上均进行了测试,结果表明安装了 IPBS 的螺旋桨全程运行平稳,可以降低 30% 的人工维护时间,大大降低维修成本^[34]。2013 年该公司又提出一种新型的内励磁式自动平衡装置,更适合安装在涡桨螺旋桨上^[35]。2014 年 Lord 公司宣布 IPBS 研发成功,并在军用运输

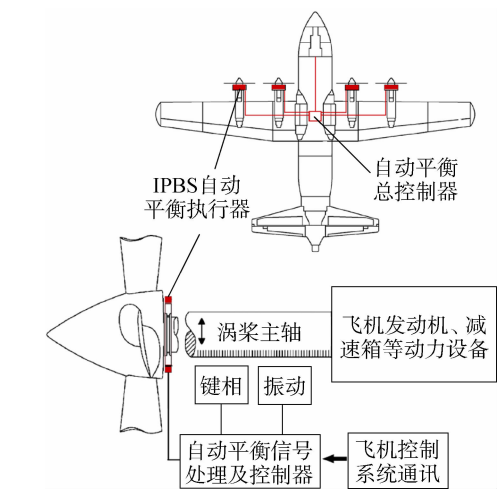


图 4 美国 Lord 公司用于航空发动机的 IPBS
Fig. 4 USA Lord's IPBS applied in aero-engine

机 C-130H 上正式列装^[36]。

国内研究机构如北京化工大学、西安交通大学等自 2005 年左右开始研究电磁型在线主动平衡技术,在结构设计、控制算法等方面均进行了基础研究^[37-38],但尚未形成工业应用。在发动机自动平衡方面,北京化工大学陈立芳、高金吉等以普惠 PT6A 涡桨发动机为研究对象,搭建了电动机驱动涡桨自动平衡模拟试验台,开展自动平衡试验研究,如图 5 所示,并设计适用于发动机的自动平衡轻量化结构^[39]及进行了无错调控制算法^[40]研究,见图 6,图中 d 为永磁体直径。

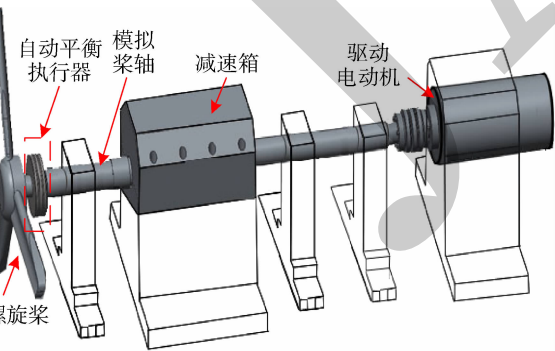
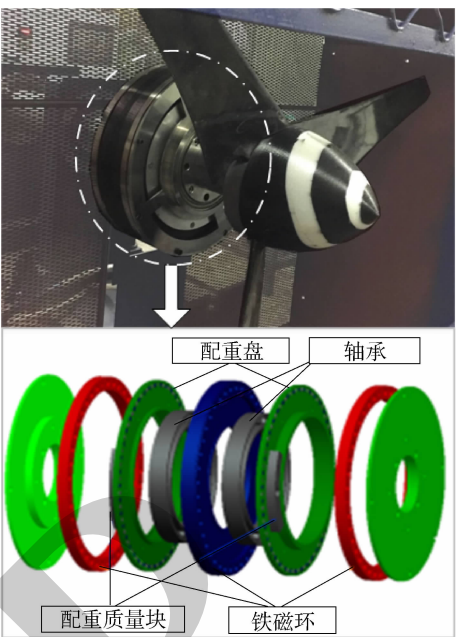


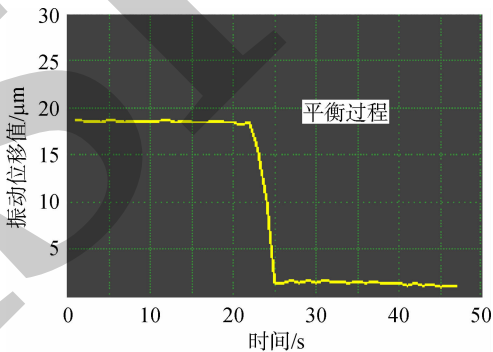
图 5 涡桨自动平衡模拟试验台
Fig. 5 Turboprop auto-balancing simulation test bench

1.3 电动机驱动式自动平衡

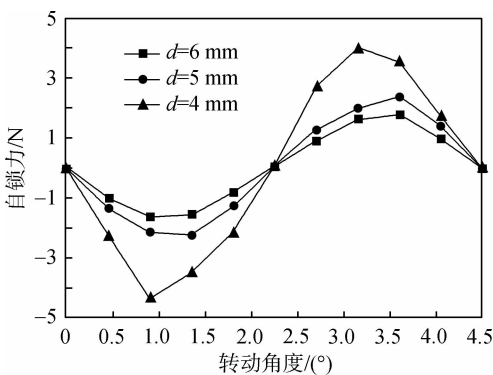
电动机驱动式自动平衡通常也采用双配重质量结构,用电动机驱动配重质量移动,实现合成补偿质量,其结构往往根据应用对象有不同的设计。电动机驱动式自动平衡在高速磨床上已经取得工业应用,尚未见在航空发动机上的应用报道。



(a) 自动平衡试验台及平衡头结构



(b) 自动平衡试验



(c) 不同永磁体直径的自锁力仿真

图 6 涡桨自动平衡结构及试验研究
Fig. 6 Turboprop auto-balancer structure and test study

国外一些飞机制造公司有相关专利报道。如 Sikorsky 飞机公司分别于 2009 年和 2013 年公布了直升机旋转翼桨毂的自动平衡专利^[41-42]。该技术利用两套电动机分别驱动两个配重质量实现振动的实时抑制,完成自动平衡功能,结构示意图见

图 7。2015 年,空中客车公司于公布了一种电动机驱动式自动平衡技术,用于桨扇发动机的同轴反转双螺旋桨自动平衡^[43]。其基本原理如图 8 所示,但尚未见应用报道。

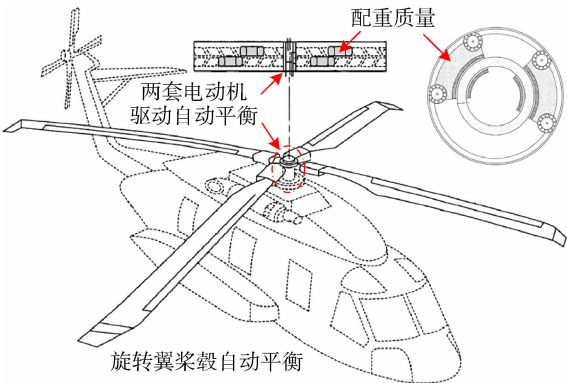


图 7 直升机用自动平衡示意图

Fig. 7 Auto-balancing diagram for helicopters

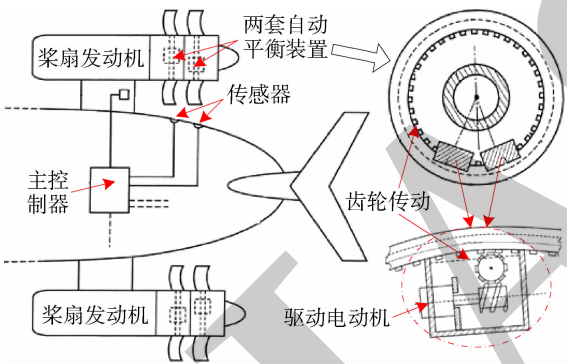


图 8 桨扇发动机双自动平衡

Fig. 8 Double auto-balancer in propfan engine

2 自动平衡控制算法

众所周知,动平衡的效果很大程度上取决于控制算法。如图 9 所示,常用的动平衡算法有振型分离法、影响系数法和寻优平衡法,以及影响系数法的各种衍生方法如三圆法、最小二乘法、全矢/全息法等。但考虑计算的复杂程度和实时性,

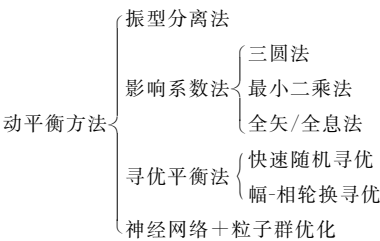


图 9 动平衡方法分类

Fig. 9 Classification of dynamic balance method

目前自动平衡系统中普遍应用影响系数法。近年来随着神经网络及智能算法的不断发展和普及,人工智能技术逐渐在动平衡研究中得到应用^[44-45]。自动平衡系统作为不停机施加配重的装置,从原理上来说,所有的动平衡方法都可应用。本文将详细介绍这几种动平衡方法及其在发动机自动平衡上应用的可行性。

2.1 影响系数法

目前,自动平衡系统的控制算法多采用影响系数法,其核心是确定影响系数,进而得到平衡配重方案。稳定转速下单位配重产生的振动响应称为影响系数。从控制角度而言,影响系数是包含振动响应、加重矢量和传感器位置三者之间的传递函数。根据配平平面个数,影响系数法有单平面和双平面两种情况。单平面平衡在悬臂转子动平衡中比较常见,它只需要一个检测平面和一个平衡平面即可完成动平衡,涡桨螺旋桨自动平衡就采用该方法。

基于影响系数的自适应主动闭环控制系统基本原理见图 10。在预装了自动平衡执行器的转子系统中,通过实时监测的振动信号、自动平衡配重质量位置、估算的影响系数,在自动平衡控制器中迭代计算出下一个配重质量位置,在执行器中驱动配重块到合适位置获得该合成质量,完成一次自动平衡。在转子系统参数未知的情况下,可以通过初值估算、或一次试动、或记录的前一周期振动数据等方法获得该系统初始影响系数和滞后角,同时在以后的测量中对影响系数和滞后角进行修正。结合电磁型双配重盘自动平衡装置原理,采用影响系数法进行自动平衡的计算机控制流程图编制如图 11。

实际应用中影响系数不但是变化的,而且难以测量,只能用影响系数矩阵的在线估计值代替

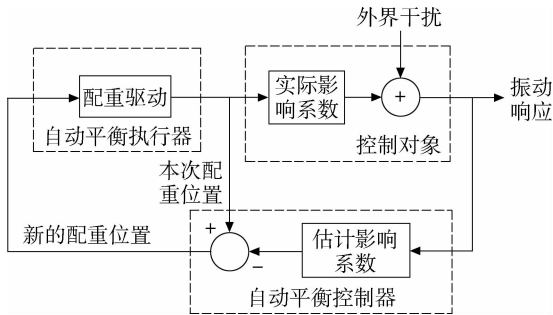


图 10 基于影响系数的自动平衡闭环控制系统

Fig. 10 Auto-balancing closed-loop control system based on influence coefficient

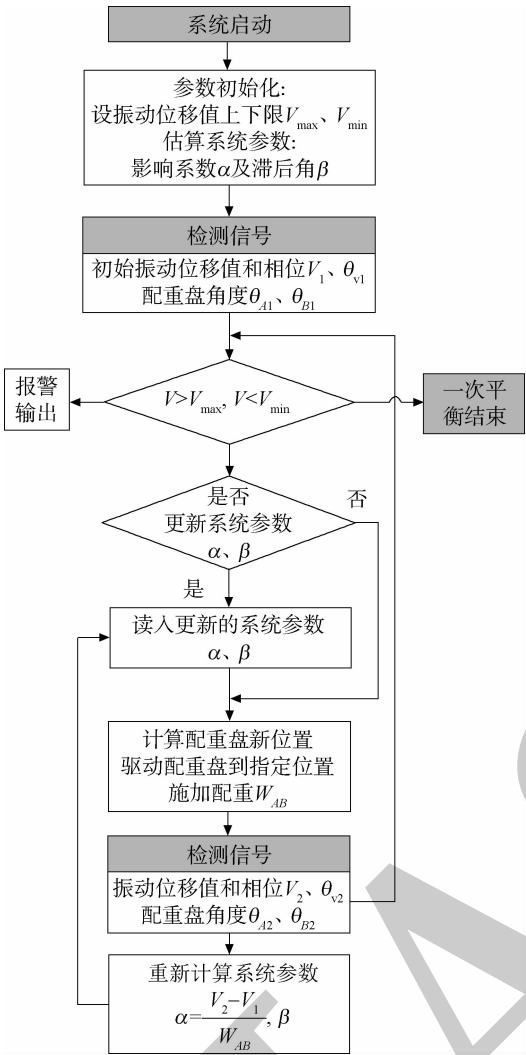


图 11 电磁型双配重自动平衡控制算法流程图
Fig. 11 Flow chart of electromagnetic bi-weight auto-balancing control algorithm

影响系数矩阵的真实值,如果估计值不准确将会导致振动控制偏差增大。Dyre 等人提出一种基于影响系数法的自校正自适应主动闭环控制算法,通过引入一个稳定因子 $\zeta(0 < \zeta \leq 1)$ 来提高影响系数估算值的误差收敛速度^[46]。2006 年,沈伟对该算法进行了仿真和试验,结果表明该控制算法可以取得快速收敛的自动平衡结果^[47]。然而,当转子升速和过临界时,影响系数不再满足线性假设前提。2004 年,密歇根大学 Zhou 等人利用电磁驱动式自动平衡进行了转子加速过程中的瞬态跟踪自适应控制算法的理论及试验研究^[48]。通过建立不同转速下的影响系数库,实现转子加速过程的自动平衡,试验表明变速下的影响系数控制方法取得了很好的振动抑制效果。Lord 公司 2009 年发布了基于瞬态辨识的发动机 IPBS 专利,详细阐述了发动机自动平衡控制中采用瞬态跟踪自适应

控制算法的原理^[49]。

2.2 幅-相轮换寻优法

在以美国 Schmitt、德国 Dittel、意大利 Marposs 等自动平衡装置为代表的双配重自动平衡技术中,幅-相轮换寻优法的应用非常普遍,且已经在高端磨床等行业得到广泛应用。单平面幅-相轮换寻优法通过相位和幅值分别平衡来完成寻优,其平衡过程见图 12(a)~图 12(c)。首先是相位平衡,同方向顺时针或逆时针等量探索性试移动两个配重块,如果振动增大,则改为相反方向。按振动减小的方向移动下去,直到振动值低于设定值或不再减小(从图 12(a)~图 12(b))。相位平衡的移动结果是将两个配重块等距离定位到穿过转子中心和不平衡中心直线的左右两方(图 12(b)所示状态)。其次是幅值平衡,通过同时、反向等量探索性移动两个配重块的位置找出配重块间的最合适夹角(从图 12(b)~图 12(c))。如果振动值增大,则尝试减小(或增大)两个配重块夹角。按此方式继续,直到振动值低于设定值或不再减小(图 12(c)所示状态)。

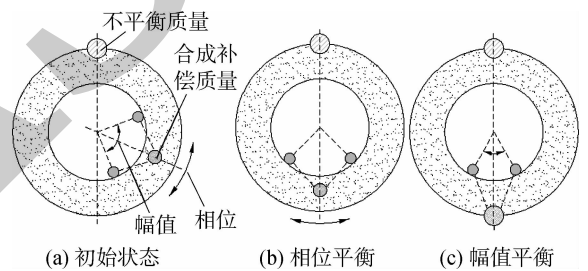


图 12 幅-相轮换寻优法控制原理

Fig. 12 Control principle of amplitude-phase rotation optimization

基于幅-相轮换寻优原理,可编制计算机控制流程如图 13 所示。分析该方法的控制精度,主要受三方面因素影响:①受步长角度 δ 影响, δ 越小误差越小,设计时应尽可能选择较小步长,以减小误差;②两步平衡过程的误差会累积,当相位平衡不准确时,会导致幅值平衡的误差加大;③受平衡头加工工艺、系统振动测量误差等因素的影响。

由上可见,幅-相轮换寻优法具有操作简单、容易实现计算机控制的特点,且不需要测量振动相位,也不需要检测平衡块位置。文献[38]中对比了幅-相轮换寻优和无错调时动平衡两种情况下的仿真和试验结果。结果表明每一次寻优“试探步”都有可能造成一次振动值波动,幅-相寻优时间相对较长。幅-相轮换寻优法的优缺点表明,

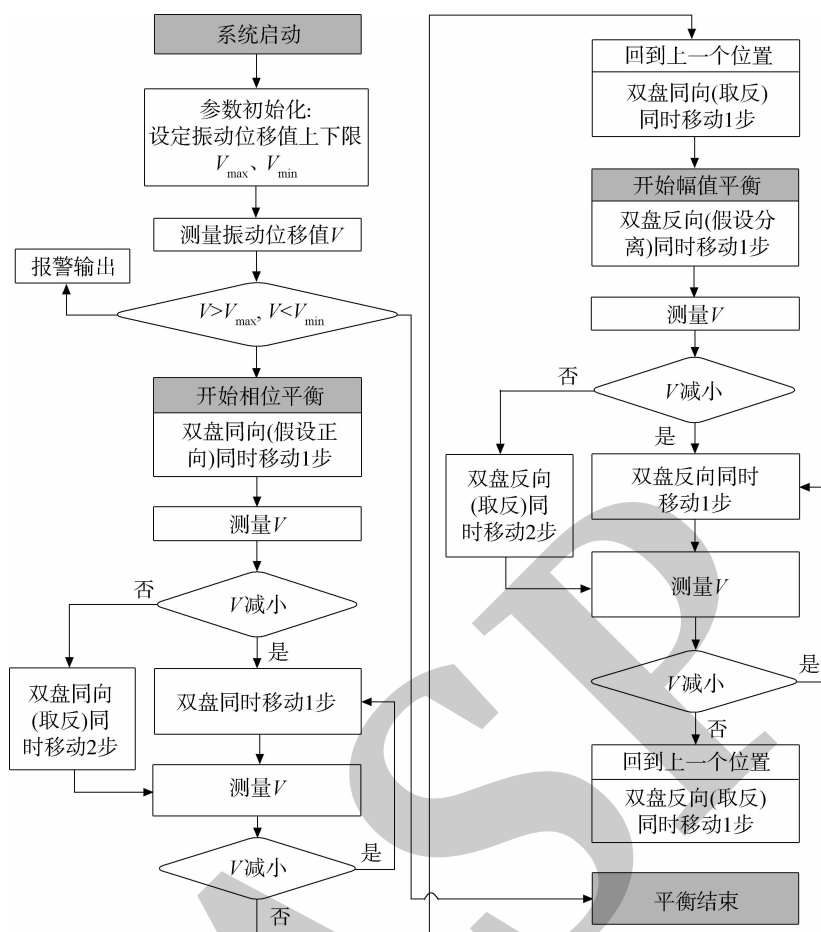


图 13 幅-相轮换寻优法控制流程图

Fig. 13 Control flow chart of amplitude-phase rotation optimization

该方法比较适合简单控制且对试探步造成的超调和错调不敏感的情况。目前尚未见该方法用于发动机动平衡的报道。

2.3 神经网络和粒子群优化法

随着神经网络及智能算法的不断发展,人工智能技术逐渐在动平衡研究中得到应用。其中,BP(back propagation)神经网络在动平衡中的应用开始最早。1998年王晓升等人利用神经网络的非线性处理方式解决转子动平衡中影响系数病态矩阵问题^[50]。2001年邱海等人提出采用人工神经网络的方法进行转子动平衡,通过建立转子系统的动力学模型,采用仿真样本与试验样本相结合的方法进行样本训练,利用神经网络拟合出振动矢量与不平衡质量的逆向映射关系^[51]。2011年,刘红梅等人利用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)对直升机旋翼动平衡的调整参数进行了寻优设计,可以实现在较少的调整次数下完成整机动平衡^[52]。2016年,陈立芳等人基于自适应粒子群优化(adaptive PSO, APSO)进行了非稳态下自动平衡的控制算法试验^[53]。

BP 神经网络是一种基于误差逆传播算法训练的多层前馈网络,通过反向传播持续调整网络的权值和阈值,根据输入参数得到网络输出值,使其极为接近实际输出值,实现误差平方和最小。该方法适用于复杂机械设备进行故障诊断的非线性预测,能逼近任意非线性映射关系。粒子群优化法是一种基于群体智能理论的启发式全局优化方法,收敛速度快、调整参数少,通过增加自适应调整方法,使得算法具备较好的全局快速搜索能力。针对自动平衡的调整参数和发动机振动信号之间的非线性函数映射关系,仅由函数输入输出数据寻找极值难度较大,效率太低。北京化工大学陈哲超等提出一种以 BP 神经网络为主,自适应粒子群优化算法为辅求最优解的动平衡方法,以电磁驱动双配重平衡系统为例,完成了自动平衡的仿真和试验研究,其平衡原理见图 14。

通过刚性转子动力学仿真模型获得非线性自动平衡调整参数与测量振动位移值参数,对 BP 神经网络进行培训拟合,得到最终的神经网络结构。利用 BP 神经网络的非线性拟合能力构建目

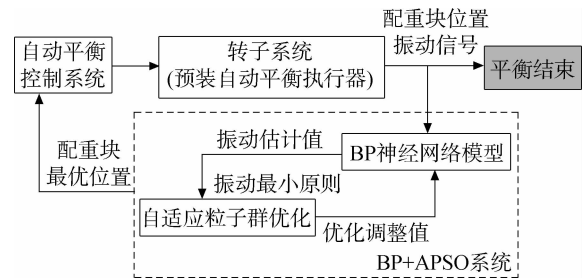


图 14 BP 神经网络和自适应粒子群优化自动平衡原理图
Fig. 14 Auto-balancing principle schematic of BP neural network and adaptive particle swarm optimization

标函数,以振动位移值最小为原则,预测出在不同输入(两个配重块位置和振动信号)下的输出值(两个配重块的最优位置)。该方法结合粒子群优化算法的非线性寻优能力寻找函数极值,获得全局最优解,即获得最小振动位移值和配重块的最优位置。根据该算法原理编制相应的计算机控制流程图,见图 15。

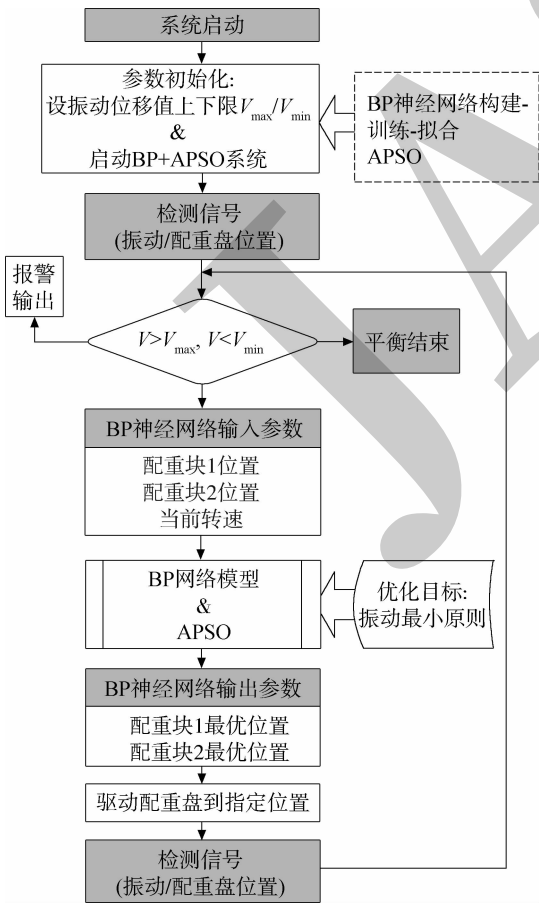


图 15 BP 神经网络和自适应粒子群优化动平衡控制流程图
Fig. 15 Dynamic balance control flow chart of BP neural network and adaptive particle swarm optimization

发动机结构复杂、运行工况多变,造成振动信号干扰大且衰减明显,动平衡调整参数与振动信号之间存在明显的非线性映射关系,因此针对复杂系统仅采用传统影响系数法往往很难获得准确的振动位移值和相位信息,影响自动平衡的效率及准确性,应结合实际工况开发适合发动机的自动平衡控制算法。

3 美军涡桨自动平衡的工程应用

自动平衡在航空发动机上应用的典型代表为美国空军的 IPBS。下面从工程需求、技术研发、阶段进展、工程应用等方面出发详细介绍该技术的发展历程,从中获得经验教训,为我国自动平衡技术的应用发展提供借鉴。

桨叶处的不平衡振动一直是涡桨发动机面临的严峻问题。传统的定期维修方式比如 C-130H 运输机桨叶动平衡方法是停机手动安装配重块,检修周期为 2~3 天,需要 3~5 个技术人员完成,且只能满足短期的、特定运行条件下的平衡。一旦恢复飞行状态,很快又处于不平衡状态。因此,手动平衡不但效率低、耗费劳动力、费用高,而且减少了飞机的在役时间。为了减少桨叶不平衡产生的诸多危害,IPBS 诞生了。IPBS 在飞行过程中持续主动地进行桨叶质量平衡,降低了结构疲劳,提高了发动机效率,增加备件使用寿命以及提高了安全等级。

在 IPBS 的研发过程中,以 Baladyne 和 Lord 公司为代表的研究机构针对适用发动机的电磁驱动式自动平衡技术已申请了十多个专利^[21-25,30,35,39]。所研究内容涉及自动平衡结构、控制策略、自动平衡在不同环境下的应用等方面。据公开报道显示, Lord 公司的自动平衡技术已经成功应用于气垫登陆艇的螺旋桨、C-130H 军用运输机的涡桨螺旋桨上^[33,36]。C-130H 螺旋桨配备自动平衡的结构见图 16,在 4 个螺旋桨处均预装有 IPBS,同时 4 套 IPBS 的振动信号和控制信号统一受控到一个中央控制器。针对每个飞行状态,中央控制器通过输入的振动信号自动进行平衡,来降低整个系统的不平衡。IPBS 的平衡部分是环装结构,每套配重盘中包含相应的配重块,配重盘受控于中央控制器。除实时抑制螺旋桨不平衡振动以外,IPBS 还可以作为维修检测工作使用。比如,当 IPBS 持续对某个螺旋桨进行自动平衡,表明该螺旋桨系统出现了问题,地面维修人员通过读取 IPBS 的诊断信息迅速定位故障。

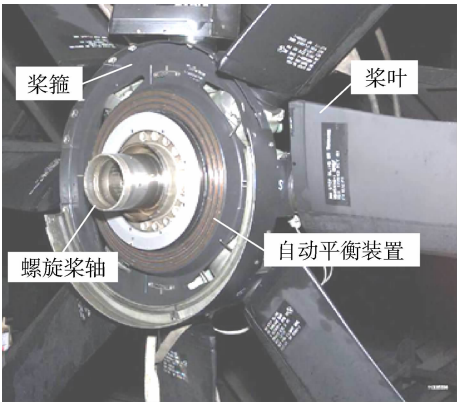


图 16 配备自动平衡的美国 C-130H 涡桨螺旋桨
Fig. 16 USA C-130H turboprop with auto-balancers

美国空军自 2004 年就开始了相关试验,在 Robins 军事基地 C-130H 系统计划办公室 330thASG 支持下,在美国空军 Mobility Battelab 实验室发起和监督下进行了 4 h 的飞行测试。在 54H60-91 Hamilton Sundstrand 涡桨系统上安装了 IPBS,IPBS 可以保持振动水平在全部状况下均低 $1/20 \sim 1/10$ 。2009 年,IPBS 在 Kirtland 空军基地进行了飞行试验。整个飞行过程,系统完成预计的自动平衡控制,4 个发动机上的振动速度值低于 1.27 mm/s (见图 17(a)和图 17(b))。总的来说,螺旋桨处振动速度值降低了 94%,因螺旋桨振动导致的压气机处振动速度值降低了 75%。

目前,IPBS 已经被采纳用于所有的美国空军 C-130H 舰队中所有配备 54H60 螺旋桨的飞机。并与 2013 年 2 月完成了运行和评估测试。在飞行测试中,记录了超过 9 000 次的自动平衡,相当于螺旋桨每 1.3 min 平衡一次。美国空军传统地面

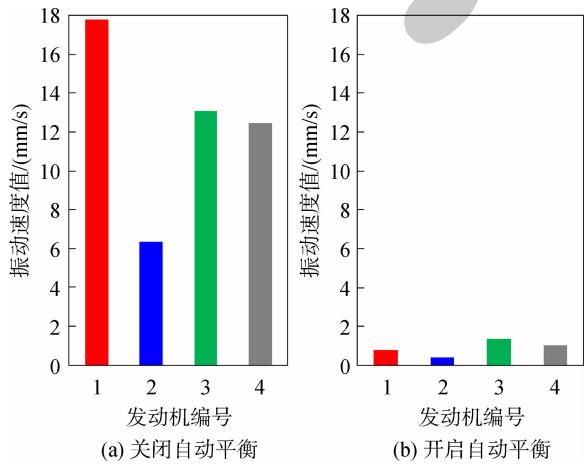


图 17 自动平衡减振效果

Fig. 17 Vibration suppression effect with auto-balancer

手动平衡的要求是每 135 天进行一次平衡。美国空军要求,螺旋桨的振动速度上限为 5.05 mm/s ,超过该上限必须进行平衡。通过 IPBS,在整个飞行过程中,螺旋桨的振动速度均保持在 1.27 mm/s 以下。因此,采用 IPBS 不但可以持续平衡,而且平衡效果远高于空军的常规手动平衡。

通过大量的测试表明 IPBS 可以大大降低涡桨发动机维护费用,实现飞机延长维修周期的目的。同时,大幅度降低涡桨振动能大大减少发动机、齿轮箱、其他附件的维修费用。当前,美国空军正在 C-130H 上测试 6 000 h 的平均故障间隔时间,这几乎接近于飞机的使用寿命。目前,各种类型的 IPBS 正在海军驱逐舰上进行测试。海军计划在 E-2 早期预警机上安装 IPBS,以降低操作和维修费用,降低飞机停飞时间和维修工作量,提高发动机及其部件的可靠性。IPBS 可以使军用和商用涡桨飞机的效能提高,更好地完成飞行任务。

4 结论与展望

综上所述,航空发动机自动平衡技术可以实时抑制不平衡振动,降低疲劳损伤,减少维修次数,增加飞机在役率和在役时间,以美国 IPBS 为例,已经实现了工程应用。美国 IPBS 从 1994 年开始基础研究,到 2014 年得到装机应用,美国空军用 10 年时间完成了自动平衡在航空发动机上的应用。值得借鉴的是,在发动机上应用自动平衡装置,需要从型号设计之初开始,在发动机的结构设计上纳入自动平衡系统,才有可能得到最终装机应用。为适应智能化发动机的发展,发动机自动平衡的研究还需要进一步开展如下工作:

1) 结构设计

自动平衡系统作为发动机减振降噪的功能部件,在结构设计上其自身应该以轻量化、高稳定为目标,减少结构质量和零件数量,符合发动机系统整体的结构要求。

2) 控制策略

研发符合发动机多变复杂工况下的自动平衡控制策略,需充分结合智能检测和控制方法,进行振动信号的不平衡辨识,以保证自动平衡系统有效运行。

3) 系统集成

发动机自动平衡系统需进一步提高自身结构和控制系统的集成度,开发集成的脉冲供电模块和振动信号采集和处理模块,简化配置,提高稳定性。同时,也应该高度重视与发动机整体结构设

计的切合度。

我国自 20 世纪 90 年代开始出现自动平衡研究,从结构设计、控制算法方面开展了一些基础性理论及试验研究,但至今未有工程应用。鉴于发动机是个非常复杂的系统工程,展望我国发动机自动平衡技术的发展前景,科研机构还需重视应用研究,逐渐积累自动平衡研究成果,与发动机设计单位紧密配合,争取在发动机设计研制初期同步考虑自动平衡配置,为早日实现发动机自动平衡做好准备。

参考文献:

- [1] CULLEY D, GARG S, HILLER S J, et al. More intelligent gas turbine engines[R]. Research and Technology Organisation, RTO-TR-AVT-128, 2009.
- [2] WHITE J L, HEIDARI M A, TRAVIS M H. Experience in rotor balancing of large commercial jet engines[C] // Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference. Seattle, US: Society for Experimental Mechanics, 1995: 1338-1344.
- [3] DOUSIS D A. Design and implementation of the V-22 tiltrotor aircraft vibration monitoring and diagnostic system [C] // Proceedings of 2000 IEEE Aerospace Conference. Bigsky, MT, US: IEEE, 2000: 245-261.
- [4] GÖGE D, BÖSWALD M, LUBRINAP, et al. Ground vibration testing of large aircraft-state-of-the-art and future perspectives[R]. Stockholm: International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, 2007.
- [5] PEETERS B, CLIMENT H, DE R, et al. Modern solutions for ground vibration testing of large aircraft[J]. Sound and Vibration, 2009, 43(1): 8-15.
- [6] WILSON E, HALE K, STROHMEYER M. V-22 rotor track and balance on-board and ground station functionality and field experience[C] // Proceedings of 2011 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, US: IEEE, 2011: 1-8.
- [7] 陈炳贻. 航空发动机平衡工艺技术的发展[J]. 推进技术, 1998, 19(4): 7-10.
CHEN Bingyi. Development of aero engine balancing technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(4): 7-10. (in Chinese)
- [8] 邓旺群, 唐广, 高德平. 转子动力特性及动平衡研究综述[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008, 21(2): 57-62.
DENG Wangqun, TANG Guang, GAO Deping. Research summary of rotor dynamic characteristics and dynamic balance[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(2): 57-62. (in Chinese)
- [9] 王凤, 张德志, 刘洪波. 民用大涵道比涡扇发动机本机平衡方法研究[C] // 第二届民用飞机制造技术及装备高层论坛论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2010: 141-143.
- [10] 金艳. 某型航空发动机整机振动故障诊断技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
- JIN Yan. Vibration fault diagnosis for whole-body aero-engine[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012. (in Chinese)
- [11] 姜广义, 王娟, 姜睿. 航空发动机风扇机匣振动故障分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 38-40, 44.
JIANG Guangyi, WANG Juan, JIANG Rui. Aeroengine fan casing vibration fault analysis[J]. Aeroengine, 2011, 37(5): 38-40, 44. (in Chinese)
- [12] 刘曦泽, 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, 80.
LIU Xize, DUAN Zihua, LI Duomin. Research status and development of rotor dynamic balance technology[J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology, 2012, 22(3): 69-72, 80. (in Chinese)
- [13] 尚洋. 民用航空发动机振动配平功能设计[J]. 航空发动机, 2017, 43(4): 56-60.
SHANG Yang. Civil aviation engine vibration trimming function design[J]. Aeroengine, 2017, 43(4): 56-60. (in Chinese)
- [14] 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.
LUO Li, TANG Qingru. Research on vibration and balance of aero-engine[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2014, 25(2): 57-60. (in Chinese)
- [15] 陈果, 李兴阳. 航空发动机整机振动中的不平衡-不对中-碰摩耦合故障研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2277-2284.
CHEN Guo, LI Xingyang. Study on imbalance-misalignment-rubbing coupling faults in aero-engine vibration[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2277-2284. (in Chinese)
- [16] 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, 34(1): 19-22.
JIANG Guangyi, WANG Deyou, JIAO Yequi. Experimental study on the balance technology of large engine rotor[J]. Aeroengine, 2008, 34(1): 19-22. (in Chinese)
- [17] 晏砺堂, 晓光. CFM56-3 发动机本机平衡技术[J]. 国际航空, 1989(3): 32-34.
YAN Litang, XIAO Guang. CFM56-3 engine local balancing technology[J]. International Aviation, 1989(3): 32-34. (in Chinese)
- [18] 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.
LIU Yongquan, WANG Deyou, HONG Jie, et al. Analysis of vibration control technology for aircraft engine[J]. Aeroengine, 2013, 39(5): 1-8. (in Chinese)
- [19] WINZENZ A, ALTIERI R. Real-time, on-line balancing and vibration control for power plant rotating machinery[R]. Atlanta, US: International Joint Power Generation Conference Collocated with Turboexpo, 2003.
- [20] BRIAN R, PAUL R M, BRENDAN J. Church Lord Corporation awarded contract for in-flight propeller balancing system[J]. Noise and Vibration Worldwide, 2007, 38(10): 5-6.

- [21] HILDEBRAND S F, ALTIERI R E, WINZENZ W. Aircraft with transient-discriminating propeller balancing system; USWO2008127362A3[P]. 2008-10-23.
- [22] HILDEBRAND S F, ALTIERI R E, WINZENZ W. Aircraft with transient-discriminating propeller balancing system; US20090306829A1[P]. 2009-10-10.
- [23] WAYNE W, DAVID B, ASKARI B A. Aircraft propeller balancing system; USWO2011046620A2[P]. 2011-04-21.
- [24] WINZENZ W. Aircraft propeller balancing system; USWO2012051475A1[P]. 2012-04-19.
- [25] ASKARI B A, DAVID B, DONALD M. Aircraft propeller balancing system; US8961140B2[P]. 2015-02-24.
- [26] 伍昌. 主动电磁轴承—刚性转子系统的不平衡振动控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- WU Chang. Unbalance vibration control for an active magnetic bearing-rigid rotor system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [27] 于坤. 磁悬浮电主轴的控制策略及工业应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- YU Kun. Research on control strategy and industrial application of motorized spindle supported by active magnetic bearing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [28] PERKINSON R H, DANIELSON D R. Simplified propeller balancing system and method; US9512728B2[P]. 2016-12-06.
- [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.
- CAO Xi, CHEN Lifang, GAO Jinji. Study of bi-disc electromagnetic balancer movement control for rotor auto-balancing[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2010, 37(4): 121-125. (in Chinese)
- [30] DYERS W, KERLIN J, HACKETT B K. Electromagnetically actuated rotating machine unbalance compensator; US5757662[P]. 1998-05-26.
- [31] 陈立芳. 电磁驱动双配重平衡头与自动平衡优化控制方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- CHEN Lifang. Research on electromagnetic driven bi-disc balancer and auto-balancing optimal control method[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012. (in Chinese)
- [32] 樊红卫, 景敏卿, 刘恒, 等. 电磁环形自动平衡装置的结构设计与计算[J]. 机床与液压, 2012, 40(13): 1-4.
- FAN Hongwei, JING Mingqing, LIU Heng. Structural design and calculation of electromagnetic ring automatic balancer[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2012, 40(13): 1-4. (in Chinese)
- [33] REBBECCHI B, MARSDEN P R, VAUGHAN K W. C-130HJ-30 in-flight propeller balancing[C]// International Conference on Health and Usage Monitoring. Melbourne: Australian International Aerospace Congress, 2005: 1-15.
- [34] ESCOBAR J. Active balancing: coming soon to an aircraft near you? (turbine technology)[J]. Aircraft Maintenance Technology, 2005, 16(11): 1-3.
- [35] WINZENZ W, BOSWELL D, BADRE-ALAM A, et al. Aircraft propeller balancing system; USEP2647567[P]. 2013-10-09.
- [36] MANNA J. Overcoming propeller imbalance[J]. Aircraft Maintenance Technology, 2014, 25(2): 6-10.
- [37] 沈伟, 何立东, 高金吉. 应用电磁式主动平衡装置解决烟气轮机转子振动问题的研究[J]. 炼油技术与工程, 2005, 35(11): 25-30.
- SHEN Wei, HE Lidong, GAO Jinji. Reducing vibration of flue gas expander rotor with electromagnetic active balancing device[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2005, 35(11): 25-30. (in Chinese)
- [38] CHEN L F, CAO X, GAO J J. Research on maladjustment free control algorithm of bi-weight balancer[J]. Advanced Materials Research, 2012, 487: 333-342.
- [39] 陈立芳, 陈哲超. 一种实现旋转机械在线自动平衡的剖分式自动平衡装置; CN106768642A[P]. 2017-05-31.
- [40] 陈立芳, 吴海琦, 王维民, 等. 双配重平衡头无错调控制算法研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2012, 39(2): 89-94.
- CHEN Lifang, WU Haiqi, WANG Weimin, et al. A study on error-free movement control algorithm for bi-disc balancer[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2012, 39(2): 89-94. (in Chinese)
- [41] WELSH W A. Dual frequency hub mounted vibration suppressor system; US2009/0236468A1[P]. 2009-09-24.
- [42] WELSH W A. Dual frequency hub mounted vibration suppressor system; US8403643B2[P]. 2013-03-26.
- [43] HERNANDEZ E. Method for balancing a propulsive system having non-hull contra-rotating propellers; US8998580B2[P]. 2015-04-07.
- [44] 万莉莉, 张自强, 李传江. 基于遗传算法的动平衡最小二乘影响系数法的优化[J]. 机械与电子, 2010(4): 21-24.
- WAN Lili, ZHANG Ziqiang, LI Chuanjiang. Optimization of least square influence coefficient method based on genetic algorithm of rotor dynamic balance[J]. Machinery and Electronics, 2010(4): 21-24. (in Chinese)
- [45] FARSHIDIANFAR A, SAGHAFI A, SAGHAFI I. Active vibration isolation of machinery and sensitive equipment using control criterion and particle swarm optimization method[J]. Mechanica, 2012, 47(2): 437-453.
- [46] DYER S W, ZHUANG Zhenhu, NI Jun, et al. Auto-tuning adaptive supervisory control of single-plane active balancing systems[R]. Dearborn, MI, US: Society of Manufacturing Engineers SME Technical Paper MS 00-230, 2000.
- [47] 沈伟. 旋转机械主动平衡技术及工程应用的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
- SHEN Wei. Study on the on-line active balancing technology and its application on the large rotating machinery[D].

Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2006.
(in Chinese)

[48] ZHOU S,DYER S W,SHIN K K,et al. Extended influence coefficient method for rotor active balancing during acceleration[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control,2004,126(1):219-223.

[49] HILDEBRAND S F,ALTIERI R E,WINZENZ W. Aircraft with transient-discriminating propeller balancing system;USEP2074025A2[P]. 2009-07-01.

[50] 王晓升,张冰焰,张大力. 人工神经网络在转子动平衡技术中的应用[J]. 中国电机工程学报,1998,18(4):262-266.
WANG Xiaosheng,ZHANG Bingyan,ZHANG Dali. Application of artificial neural networks in rotor balancing[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(4):262-266. (in Chinese)

[51] 邱海,屈梁生,张海军,等. 神经网络在转子动平衡中应用的几个关键问题[J]. 机械工程学报,2001,37(1):88-91.
QIU Hai,QU Liangsheng,ZHANG Haijun,et al. Some key problems of the neural network applied in rotor balancing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2001,37(1):88-91. (in Chinese)

[52] 刘红梅,吕琛,欧阳平超,等. 粒子群优化在直升机旋翼动平衡调整中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(3):283-288.
LIU Hongmei,LÜ Chen,OUYANG Pingchao,et al. Helicopter rotor tuning based on neural network and particle swarm optimization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2011,37(3):283-288. (in Chinese)

[53] 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.
CHEN Lifang,CHEN Zhechao,WANG Weimin,et al. Research on nonstationary autobalancing control based on adaptive particle swarm optimization[J]. Journal of Vibration and Shock,2018,37(24):131-136. (in Chinese)

(编辑:陈 越)