

大涵道比涡扇发动机风扇平衡工艺分析



孙贵青,丁一明,龙洋,赵哲

中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015

摘要:转子不平衡是大涵道比涡扇发动机振动的主要激振源,为厘清整机装配后的风扇不平衡量主要来源,本文选取CFM56-5B发动机为研究对象,分析风扇转子结构和低速平衡工艺,并采用SAE ARP4163标准中定位接口对转子不平衡量影响公式,计算得出结构设计容差带来的极限附加不平衡量数值。结果表明,即使转子实现完全理想平衡,受制于单元体设计、风扇叶片等航线可更换组件的维修性设计需要,风扇转子装配到整机上的安装误差在极限状态下,不平衡量也会达到 $21025\text{g}\cdot\text{mm}$ 以上,只有进行本机平衡,方可满足整机振动幅值要求,整机平衡工艺是保证发动机最终平衡品质的高效方法。

关键词:航空发动机; 振动; 风扇; 平衡; 安装误差

中国分类号:V235.1

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.10.003

大涵道比涡扇发动机一般用于大型商用民航飞机,追求安全性、可靠性和经济性^[1]。转子平衡工艺是减小发动机振动、保障发动机正常工作的重要手段,对满足大涵道比涡扇发动机长寿命、高可靠性、低噪声等技术指标具有重大意义。

为减小发动机振动,CFM56、V2500、PW4000、GE90等国际先进大涵道比涡扇发动机通常具有本机平衡功能^[2],即发动机在台架上或装在飞机上对转子进行平衡。除外场更换叶片等情况外,新的或经过修理的发动机,在试车中(如整机振动超过规定值)可在台架上进行本机平衡,将振动降到允许范围内,具有简便、省时、能延长发动机寿命等优点^[3]。目前,国外先进飞机都已实现利用机载设备进行振动配平计算,如波音737飞机的振动监控系统(AVM)设备、A330飞机的发动机接口振动及监控组件(EIVMU)设备等^[4-6]。国内学者基于结构设计、本机平衡方法进行了较多研究。尚洋^[6-7]设计了利用发动机振动监控装置(EVMU)进行发动机振动配平计算的功能,并对获取振动因子计算数据的试验试飞方法进行了研究,给出了振动因子数据处理方法。王凤、张德志等^[8]详细阐述了某

型民用大涵道比涡扇发动机的试验设计思路和实现方案;罗立、唐庆如^[9]研究了三圆本机平衡方法;夏存江^[10]提出了基于多组振动数据的涡扇发动机风扇配平方法,解决了早期的机载振动设备不具备提供发动机风扇配平解决方案的实际困难。姜广义^[11]自行设计以发动机叶片监测系统所测磁钢信号为基准,利用一次试加配重法降低了发动机整机振动。陈曦、廖明夫等^[12-13]建立基于最小二乘影响系数的低压转子现场动平衡方法,并通过真实发动机台架试验验证其正确性与可靠性。上述研究中,均未对本机平衡的不平衡量来源进行分析。仝崇楼、龚小平等^[14]建立压气机转子模型,评估了整机不平衡量相对转子不平衡量的变化值,然而,该模型做了较多假设,评估计算采用以往经验值,难以指导实际工程应用。

因此,本文以配装空中客车A321系列飞机的CFM56-5B发动机为对象,对典型大涵道比涡扇发动机风扇转子结构及平衡工艺性进行详细分析,并采用SAE ARP 4163标准中结构容差对转子不平衡量影响公式,揭示风扇不平衡模式下的整机振动超限产生机理,为国内大涵道比涡扇发动机研发提供技术参考。

收稿日期: 2022-03-08; 退修日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-05-24

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2018213A001)

引用格式: Sun Guiqing, Ding Yiming, Long Yang, et al. Fan balance analysis on high bypass ratio turbofan aeroengine [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(10): 24-30. 孙贵青, 丁一明, 龙洋, 等. 大涵道比涡扇发动机风扇平衡工艺分析[J]. 航空科学技术, 2022, 33(10): 24-30.

1 风扇结构及分析

1.1 整机组成及支承方案

CFM56-5B 发动机按单元体设计, 全机分为风扇、核心

机、低压涡轮和附件传动 4 个主单元体, 结构如图 1 所示。其中风扇主单元体包含风扇/增压级, 1、2 支点支承组件, 中央传动机匣和 3 号支点组件、风扇机匣 4 个维修单元体^[15]。

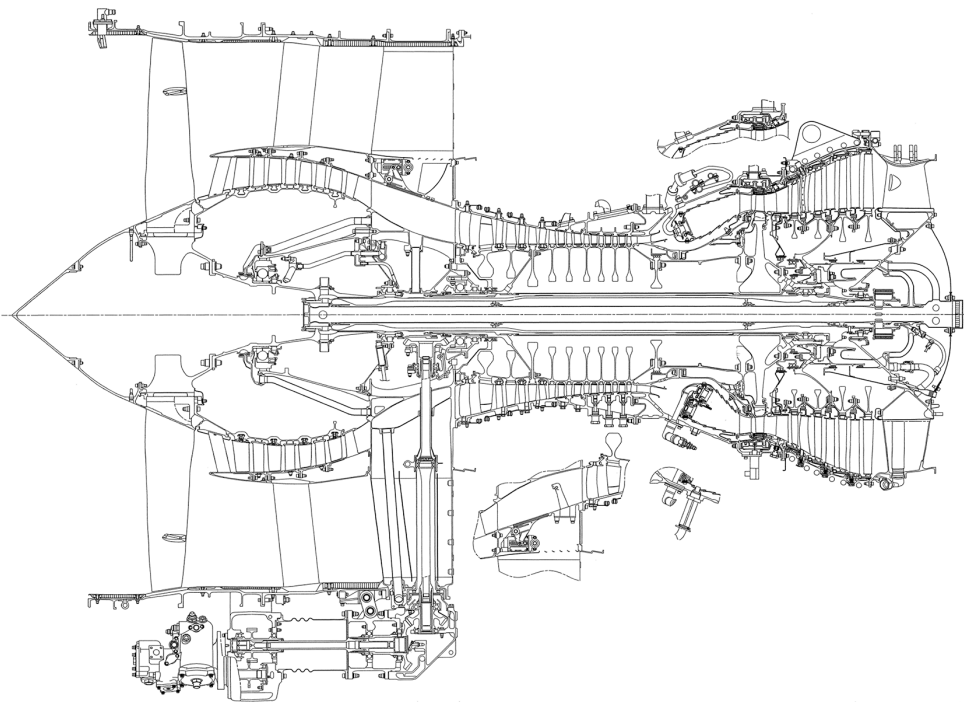


图1 CFM56-5B 单元体结构组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of the composition of CFM56-5B modular structure

低压转子支承形式为 0-2-1, 这种支承布局较简支形式减少风扇前静子支承机匣, 简化了整机结构。1 号支点(滚珠轴承)和 2 号支点(滚棒轴承)将风扇转子支承于中介机匣, 后端通过 5 号支点(滚棒轴承)将低压涡轮转子支承于涡轮后机匣, 如图 2 所示。风扇转子与低压涡轮转子两轴段采用双柱面定心的套齿式刚性联轴器组成低压转子系统, 共同以 N_1 转速转动, 当风扇部位存在较大的不平衡量时, 通常会引起低涡部位振动幅值增加, 也可利用单独风扇配平解决低涡部位振动问题。

风扇转子为悬臂结构, 1、2 号轴承位于转子内腔一侧,

具有风扇转子装拆方便、转子同轴度容易保证、精度高等优点, 但不利于转子横向刚性控制。

1.2 风扇转子组成

风扇/增压级主要由 1 级风扇和 4 级增压级组成。36 片风扇转子叶片为钛合金大尺寸带凸肩叶片, 利用轴向燕尾榫头, 装入风扇盘。增压级转子由鼓筒和 4 级转子叶片组成, 鼓筒采用钛合金整体结构形式, 同轴度易于精确保证。风扇盘与增压级间为无止口、螺栓连接, 与风扇轴由过盈止口定心、螺栓连接。风扇盘前装有帽罩前段和帽罩后段, 其中, 帽罩后段作为本机低压转子平衡的前修正面, 共有 36 个本机平衡螺钉孔, 如图 3 所示, 通过安装不同重量平衡螺钉方法进行平衡调整工作, 极限状态下可修正不平衡量数值不小于 $40000\text{g}\cdot\text{mm}$ ^[8]。

在发动机进行本机平衡时, 转子不平衡量相位角的确定是通过安装在风扇轴上 30 齿测速齿轮上一个特殊的厚齿发出的信号提供的。该齿半径较其他齿大, 其安装方向与风扇基准叶片(1 号叶片)方向相一致。为保证相位一致,

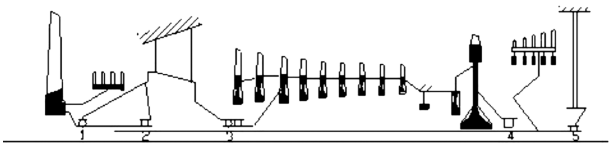


图2 CFM56-5B 整机支承方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of CFM56-5B whole engine support scheme

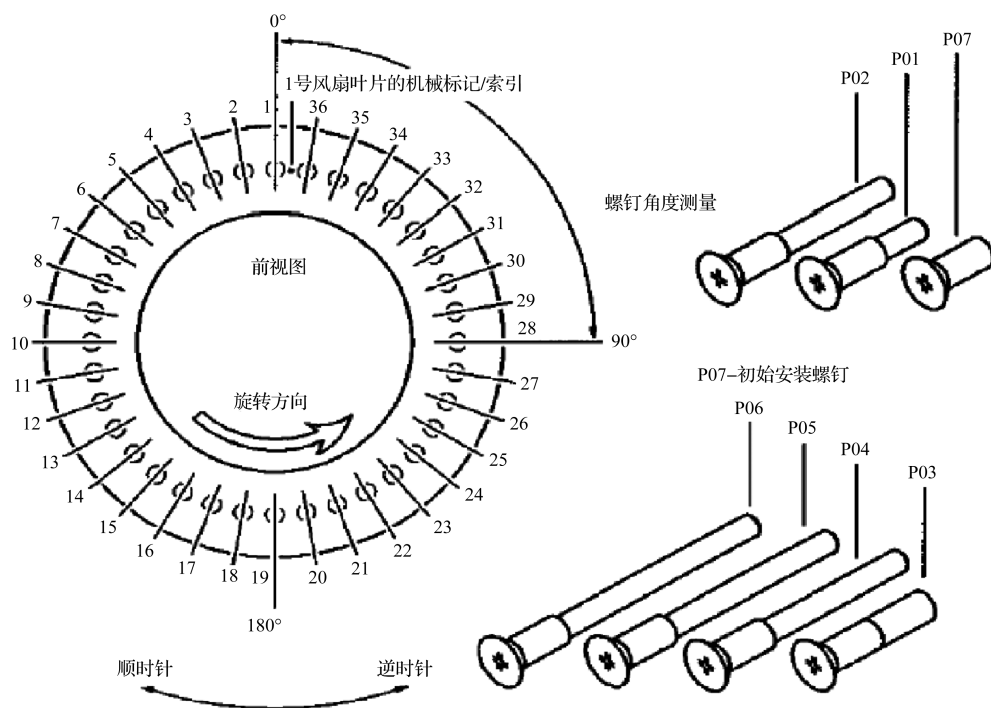


图3 平衡螺钉孔位及规格

Fig.3 Balance screw holes and specifications

帽罩后段、风扇盘、风扇轴与测速齿轮为唯一位置装配。

2 转子平衡工艺方法分析

2.1 转子平衡准则

低压转子及其支撑系统在工作转速内存在二阶低压激励临界转速,分别为涡轮转子俯仰振型和风扇转子俯仰振型^[13]。

通常,航空发动机转子不采用高速平衡方法,而是视为准刚性转子进行低速动平衡,主要原因有:(1)不同于其他所有转子系统,航空发动机需要进行定期、精确的维修和平衡,高速动平衡工艺需要制造商和所有维修厂必须配备高速动平衡设备,而配备这些设备成本非常高、运行经济性较差。(2)用户通常要求转子部件具有互换性或者在不显著增加不平衡量水平的前提下完成组件装配,在整个航空发动机及各部、组件的制造和组装中只有采用多级平衡工艺才能满足这个要求,这也需要低速平衡才能实现。

按照“挠性转子的平衡”(GB/T 6557),风扇转子采用低速平衡时,应遵循如下要求^[16]:(1)组装前,将每个单部件视为刚性转子分别单独做低速平衡,平衡校正到指定的不平衡量要求之内。同时,各单部件在轴上安装处的不同轴度或其他定位配合面相对于旋转轴线的允差应该小。(2)当一

个转子包括各独立部件,并成套同心安装时,如叶片、连接螺栓等,应进行分拣后装配,以保证剩余不平衡量在允许公差内。(3)在转子上装配的每个零件均要平衡校正,在装配好后或在某一装配阶段,统一再进行校正。

2.2 风扇转子平衡工艺分析

该型发动机风扇转子采用单元体设计,风扇增压级组件与风扇轴组件分属不同的维修单元体。

风扇轴组件为高精密加工件,1号轴承、2号轴承安装上面,可有效保证1、2支点同轴度,制造中即进行了动平衡。因此,在1、2支点维修单元体组装中不需再进行动平衡。

风扇增压级组件主要包含风扇叶片、风扇盘及增压级组件等。按照多级平衡工艺进行低速平衡时,有“风扇盘片组件平衡+增压级组件平衡”的分别平衡工艺或者“带风扇盘的增压级平衡+风扇叶片排序”工艺两种可供选择的方法。由于增压级组件中只设有一处不平衡量校正位置(4级配重块修正),无法进行动平衡,且风扇盘片组件、增压级组件配合为间隙,缺少可靠的止口定心结构,无法保证组装后的同轴度。另外,风扇叶片是航线可换组件或外场可换组件,采用风扇盘片组件平衡工艺无法满足维修性要求,因此,在实践中需采用“带风扇盘的增压级平衡+风扇叶片排序”工艺。

按照2.1节低速平衡要求,平衡流程如图4所示。其中平衡工艺要点如下:

(1) 增压级转子叶片约有272片,数量较多,由于叶片重量(质量)小、形状规则、非空心结构,可用称重法代替称重矩法,并按照4分法排序,兼顾工作效率与平衡精度。

(2) 带风扇盘的增压级转子在组装时进行了同轴度控制及叶片优化排序,但装到整机后为悬臂结构,偶不平衡量相对静不平衡量较大,仍需以风扇盘前为前修正面铆接不同组别配重块、4级增压级为后修正面叶片下安置重块方式进行双面平衡。

(3) 增压级组件为4级转子、5级静子结构,转子上增压级叶片数目较多,静子机匣为整环,为避免平衡组件重复拆装产生新的不平衡量,应采用带静子平衡方式^[2]。

(4) 带风扇盘的增压级组件在整机上为悬臂支承结构,其平衡工装设计应尽量与整机支承形式一致,采用悬臂支承结构;由于无支点轴承,应设计芯轴与转子连接,平衡实施中应采用转位法消除夹具误差影响^[17],提高平衡精度。

(5) 帽罩前、后段为航线可更换组件,本身质量相对较小且进行静平衡,因此,在带风扇盘的增压级组件平衡中可不含帽罩前、后段。

(6) 风扇叶片尺寸大(长度约590mm)、转动惯量大,需进行重量矩称量,但叶片为非宽弦设计,轴向、切向不平衡量可忽略不计,只需采用单轴重量矩称量风扇叶片径向重量矩即可。

(7) 对于风扇叶片称量安装,当无优化排序软件时,手工排布要求采用4分法,原则上要求相对180°位置的风扇叶片重量矩要求不超过2000g·mm,剩余不平衡量不超过5000g·mm。

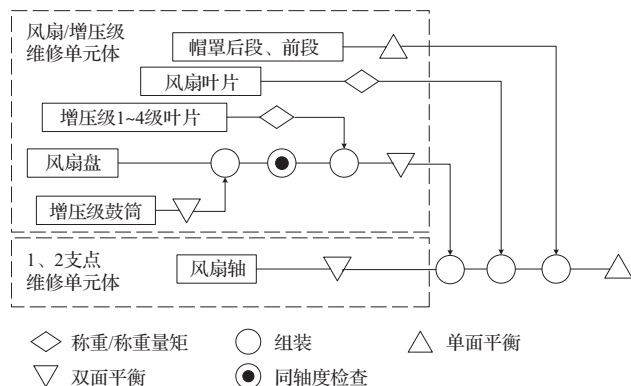


图4 CFM56-5B风扇部位装配平衡流程图

Fig.4 Schematic diagram of the assembly balance process of CFM56-5B fan modular

3 风扇转子结构误差影响计算

对于单元体设计,除保证性能互换外,还要求更换维修单元体时,不需另外再进行平衡。虽然单元体转子单独平衡保证了互换性,但也由于安装界面形位误差的存在,因此产生诱生的残余不平衡,这类残余不平衡被称为平衡安装误差。对于风扇增压级平衡来说,主要安装误差源有三处:(1) 风扇增压级转子的安装基准(风扇轴前止口);(2) 风扇叶片的安装基准(风扇榫槽);(3) 帽罩的安装基准(风扇盘前止口)。由于帽罩质量较轻,它的安装误差相比另两个可以忽略不计。下面主要对风扇轴形位误差、风扇叶片榫槽安装误差影响进行分析。

3.1 风扇轴定位止口误差引起的附加不平衡量

在一般情况下,转子不平衡由两类基本不平衡混合而成,即静不平衡与偶不平衡。静不平衡是指中心主惯性轴仅平行偏离于(转子)轴线的的不平衡状态;偶不平衡是指中心主惯性轴与(转子)轴线在质心相交的不平衡状态^[18]。

按照SAE ARP4163标准^[19],定位接口对转子不平衡量的影响分为:(1)定位接口柱面跳动引起的静不平衡;(2)定位接口端面跳动引起的静不平衡(见图5);(3)定位接口端面跳动引起的偶不平衡(见图6)。计算公式分别包括以下几个。

(1) 定位接口柱面跳动引起的转子组件静不平衡量

$$U_{RS} = M \times \frac{a_R}{2} \quad (1)$$

式中, U_{RS} 为柱面跳动引起的转子组件静不平衡量; M 为转子组件质量; a_R 为定位接口柱面跳动。

(2) 端面跳动引起的转子组件静不平衡量

$$U_{AS} = M \times \frac{a_A}{2} \times \left(\frac{L}{R_D} \right) \quad (2)$$

式中, U_{AS} 为端面跳动引起的转子组件静不平衡量; a_A 为定位接口端面跳动; L 为定位接口端面至转子组件重心的轴向距离; R_D 为定位接口定位半径。

(3) 定位接口端面跳动引起的转子组件偶不平衡量

$$U_{AC} = M \times R_C \times \frac{a_A}{2} \times \left(\frac{R_C}{R_D} \right) \quad (3)$$

式中, U_{AC} 为端面跳动引起的转子组件偶不平衡量; R_C 为转子组件修正面修正块分布半径。

整理风扇结构参数见表1,并对风扇轴定位止口带来的最不利影响进行分析计算。根据式(1),代入数据计算可得风扇轴定位接口柱面跳动引起的盘片转子组件静不平衡最大值 $U_{RS} = M_1 \times a_R / 2 = 4050 \text{g} \cdot \text{mm}$ 。根据式(2),风扇轴定位接口端面跳动引起的转子组件静不平衡最大值 $U_{AS} = M_1 \times$

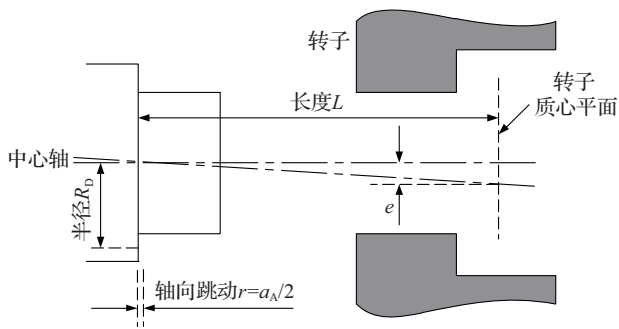


图5 端面跳动倾斜引起的静不平衡影响

Fig.5 Influence of static unbalance caused by end face runout and tilt

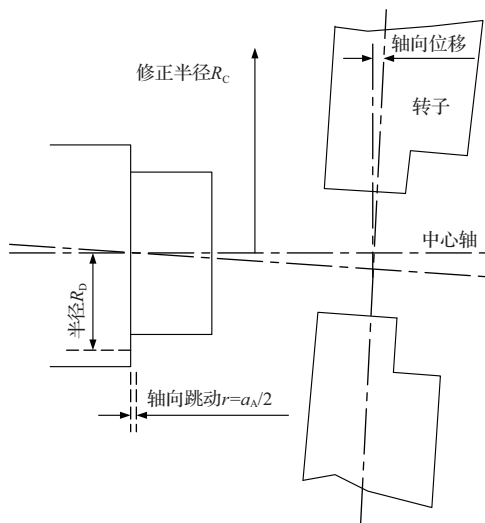


图6 端面跳动倾斜引起的偶不平衡影响

Fig.6 Influence of couple unbalance caused by end face runout and tilt

表1 风扇结构参数表

Table 1 Fan structure parameter table

符号	名称	数值
M	风扇/增压级转子质量/kg	270
a_R	风扇轴定位接口柱面跳动/mm	≤ 0.03
a_A	风扇轴定位接口端面跳动/mm	≤ 0.03
R_D	盘轴定位接口定位半径/mm	130
R_C	本机平衡所在修正面平衡钉平均分布半径/mm	250
L_G	风扇轴定位接口端面至风扇/增压级转子重心的轴向距离/mm	65
L_C	风扇轴定位接口端面至本机平衡所在修正面的轴向距离/mm	230

$a_A/2 \times (L_G / R_D) = 2025 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 。根据式(3), 风扇轴定位接口端面跳动引起的转子组件偶不平衡量最大值 $U_{AC} = M_1 \times R_C \times a_A/2 \times (R_C / R_D) = 1947000 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$, 在本机平衡修正面上产生不平衡量为 $U_{AC}/(L_C - L_G) = 11800 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 。

根据上述计算, 可得风扇/增压级转子在本机平衡所在

修正面的极限附加不平衡量最大值为 $4050 + 2025 + 11800 = 17875 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 。

3.2 风扇叶片安装基准误差带来的附加不平衡

由于不带风扇叶片的风扇增压级平衡工艺是建立在风扇叶片测量、排序、安装理想化的基础上的, 没有考虑叶片安装环节的误差。但风扇盘榫槽的设计公差和加工误差是客观存在的, 会使叶片相对风扇盘安装基准形成的轴线产生径向偏移效应。

按照单片风扇叶片 3.5 kg 计算, 极限状态下, 当风扇盘上的榫槽定位基准整体偏移 0.025 mm 时, 36 片叶片产生的静不平衡量按照式(1)计算为 $3500 \times 36 \times 0.025 = 3150 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 。

根据上述计算可知, 即使各零组件都平衡到剩余不平衡量为零, 带风扇盘的增压级转子、风扇叶片装配到整机上的安装误差极限状态下不平衡量也会至少达到 $21025 \text{ g} \cdot \text{mm}$, 远超过各部件剩余不平衡要求值, 但处于本机平衡能力之内。

4 结论

根据以上分析, 可得出如下结论:

(1) 受制于单元体设计、风扇叶片等航线可更换组件的维修性设计需要, 满足平衡精度要求的风扇转子装配到整机后, 由于装配位置唯一, 无法优化转子间装配相位, 当风扇转子处于不利组合导致同轴度较差时, 就会产生较大的平衡安装误差, 在生产或修理后的新发动机上即会出现整机振动超限或振动较大现象。

(2) 为弥补上述功能及结构设计带来的不平衡量较大产生的振动问题, 在高转速、高负荷、高温度的发动机工作状态下进行最终本机平衡, 将发动机振动值降低优化到最佳, 不仅简便、省时, 还可以延长发动机寿命。

(3) 当整机振动值太大, 无法达到本机平衡条件时, 说明超出设计容差范围, 按照低速平衡原则, 应测量安装到整机上的风扇盘同轴度是否异常, 以排查是否存在装配不到位或机件超差等装配问题。

AST

参考文献

- [1] 周烁, 汪俊熙, 刘宜胜, 等. 大型商用航空发动机整机装配工艺浅析[J]. 航空制造技术, 2014(5): 92-96.
Zhou Shuo, Wang Junxi, Liu Yisheng, et al. Brief review on assembly process of large commercial aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(5): 92-96. (in Chinese)
- [2] 孙贵青, 王文宇. 高涵道比涡扇发动机低压涡轮平衡工艺浅

- 析[J]. 航空维修与工程, 2019(1):42-45.
- Sun Guiqing, Wang Wenyu. Analysis on low-pressure turbine balance process of high bypass ratio turbofan engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019(1): 42-45. (in Chinese)
- [3] 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 field balancing technology of engines in field[J]. International Aviation, 1989(3):32-34. (in Chinese)
- [4] 黄蓝, 王景霖, 林泽力, 等. 综合系统健康管理关键技术与研究途径[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7):12-17.
- Huang Lan, Wang Jinglin, Lin Zeli, et al. Key technologies and research of integrated system health management[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7):12-17. (in Chinese)
- [5] 吕镇邦, 孙倩, 王娟. 民用客机健康管理系统的工程技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7):27-34.
- Lyu Zhenbang, Sun Qian, Wang Juan. Research on engineering techniques of civil aircraft health management system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7):27-34. (in Chinese)
- [6] 尚洋. 民用涡扇发动机振动因子试验试飞方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(1):29-32.
- Shang Yang. The test procedure study of the civil turbofan engine balance coefficients[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(1):29-32. (in Chinese)
- [7] 尚洋. 民用航空发动机振动配平计算功能设计[J]. 航空发动机, 2017, 43(4):56-60.
- Shang Yang. Engine balancing function design of civil aircraft[J]. Aeroengine, 2017, 43(4):56-60. (in Chinese)
- [8] 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]. 北京: 第2届民用飞机制造技术及装备高层论坛, 2010.
- Wang Feng, Zhang Dezhi, Liu Hongbo. Study on balancing method of civil bypass with turbofan engine[C]. Beijing: The 2nd High-level Forum on Civil Aircraft Manufacturing Technology and Equipment, 2010. (in Chinese)
- [9] 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 aeroengine[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2014, 25(2):57-60. (in Chinese)
- [10] 夏存江. 涡扇发动机风扇配平方法的优化[J]. 中国民航飞行学院学报, 2016, 27(4):32-36.
- Xia Cunjiang. Optimization of the fan balancing method for turbofan engines[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2016, 27(4):32-36. (in Chinese)
- [11] 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]. 航空科学技术, 2008, 34(1):6-22.
- Jiang Guangyi, Wang Deyou, Jiao Yequ. Experimentd investigation of local balanced technique for large aeroengine rotor[J]. Aeronautical Science & Technology, 2008, 34(1):6-22. (in Chinese)
- [12] Chen Yi, Hu Er' ming, Huang Xizhi, et al. Exploring wing-mounted engine vibration transmission for new generation airplanes with turbofan engines of high bypass ratio[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(3):384-389.
- [13] 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.
- Chen Xi, Liao Mingfu, Zhang Xiamei, et al. Field balancing technology for low pressure rotors of high bypass ratio turbofan engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(4):808-819. (in Chinese)
- [14] 全崇楼, 龚小平, 刘万俊, 等. 飞机发动机整机平衡研究[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(2):179-181.
- Tong Chonglou, Gong Xiaoping, Liu Wanjun, et al. A study of the overall unit balance of aircraft engine[J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(2):179-181. (in Chinese)
- [15] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册: 第3册: 可靠性和维修性[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- Editorial Board of Design Manual of Aeroengine. Design manual of aeroengine (3th album): Reliability and availability [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [16] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 6557—2009: 挠性转子机械平衡的方法和准则[S]. 北京: 中国标准化出版社, 2009.
- Standardization Administration of China (SAC). GB/T 6557—2009: Mechanical vibration-methods and criteria for the mechanical balancing of flexible rotor[S]. Beijing: China Standardization Press, 2009. (in Chinese)

- [17] 王蕴琦,史新宇,王军.影响平衡质量的工艺要素分析[J].航空发动机,2001(3):29-31.
Wang Yunqi, Shi Xinyu, Wang Jun. Analysis of technological elements affecting balanced quality[J]. Aeroengine,2001(3):29-31. (in Chinese)
- [18] 周仁睦.转子动平衡:原理、方法和标准[M].北京:化学工业出版社,1992.
Zhou Renmu. Rotor dynamic balancing theory, method, standardization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [19] ARP4163—2003: Balancing machines: Tooling design criteria [S]. SAE International, 2003.

Fan Balance Analysis on High Bypass Ratio Turbofan Aeroengine

Sun Guiqing, Ding Yiming, Long Yang, Zhao Zhe

AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China

Abstract: Rotor unbalance is the main excitation source of high bypass ratio aeroengine vibration. In order to clarify the source of fan unbalance of engine vibration, CFM56-5B aeroengine is selected as research object to analyze the fan rotor structure and the low-speed balance process. By SAE ARP4163 standard judgment method, the value of additional unbalance caused by structural design tolerance is calculated. The results show that even if the rotors are perfectly balanced, subject to the requirements of modular design and maintainability design of line replaceable units, the unbalance of fan and booster rotor assembled on the whole engine will reach more than 21025g•mm under the limit state of misalignment error. Only by adopting trim balance design can it meet the requirements of balance criteria and the vibration amplitude of the whole engine can be effectively reduced. The whole balancing process is an efficient method to ensure the final balance quality of the engine.

Key Words: aeroengine; vibration; fan; balance; misalignment error

Received: 2022-03-08; **Revised:** 2022-04-12; **Accepted:** 2022-05-24

Foundation item: Basic National Defense Research Program Funding(JCKY2018213A001)