

某压气机试验件转子平衡精度分析

纪福森, 翟贤超

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘要:航空发动机及其转动部件运行的平稳性与转动件的平衡品质密切相关。为保证压气机试验件可靠运行,分析了压气机转子静平衡、初始动平衡、最终动平衡允许剩余不平衡量控制方法,以及最终动不平衡量的分配方法,并针对某压气机试验件转子,通过采取零件静平衡、组件初始动平衡、转子最终低速动平衡的分步平衡方法,保证了该试验件转子的平衡品质。试验运行结果表明:采取分步平衡精度控制方法,试验件运行平稳、振动水平低。

关键词:静平衡;动平衡;平衡品质;压气机;半挠性转子

中图分类号:V263.2

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.01.018

Analysis of Balance Precision for a Compressor Test Rig

JI Fu-sen, ZHAI Xian-chao

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Stationarity of aeroengine and its rotor components have relations with the rotor balance quality. For the compressor test article reliable operation, permission unbalance value for static balance, initial dynamic balance and final dynamic balance of compressor rotor were analyzed, and distributing method of final dynamic unbalance was introduced. For a compressor test article rotor, the balance precision was controlled by substep balance method, including static balance of parts, initial dynamic balance of compressor rotor assemble and final low speed dynamic balance of test article rotor. Result shows that substep balance method is effective for compressor test article rotor, the test article worked well, the vibration value is small.

Key words: static balance; dynamic balance; balance quality; compressor; half-flexible rotor

0 引言

振动问题是航空发动机研制中的 1 个难题,发动机及其部件试验件的振动始终伴随并困扰着其研制进程,有时甚至会严重阻碍研制工作。引起振动的因素很多,包括设计、生产、装配、转子不平衡量等。工程实践表明,不论是航空燃气涡轮发动机,还是压气机、涡轮等转动部件试验件,它们的运行平稳性均与转子的平衡品质关系密切。

设计手册^[1]、国家标准^[2-4]、机械行业标准^[5]对转子的平衡方法、平衡品质进行了规范,本文从设计角度出发,进一步分析转子静平衡、初始动平衡、最终动平衡平衡精度控制方法,以及平衡修正面确定的一般方法,并以某压气机试验件转子为例进行工程应用研究。

收稿日期:2015-04-10 基金项目:国家重大基础研究项目资助

作者简介:纪福森(1981),男,高级工程师,从事压气机结构设计工作;E-mail: jifusen@126.com。

1 压气机试验件转子平衡控制

压气机试验件转子多为半挠性转子,其设计转速通常高于第 1 阶临界转速而低于第 2 阶临界转速。试验件转子临界转速计算值见表 1。

表 1 压气机试验件转子临界转速计算值 r/min

代号	转速	n_{c1}	n_{c2}
A	11994	6239(俯仰)	>20000
B	11983	6500(俯仰)	15300(俯仰)
C	11983	7473(俯仰)	>20000
D	12036	4858(俯仰)	14816(俯仰)
E	10346	8043(俯仰)	23368(俯仰)

工程上一般将半挠性转子作为准刚性转子,参照刚性转子进行低速动平衡。多采用分步平衡的方法控

引用格式:纪福森,翟贤超.某压气机试验件转子平衡精度分析[J].航空发动机,2016,42(1):88-91. JI Fusen, ZHAI Xianchao. Analysis of balance precision for a compressor test rig[J]. Aeroengine, 2016, 42(1): 88-91.

制压气机试验件平衡精度,各级轮盘或叶盘零件通过去除实体材料的方法修正静不平衡量,检查并记录其他零件静不平衡量,通过调整叶片装配位置进行盘片组合件静平衡,对压气机转子组合件进行初始动平衡检查,对转子最终作动平衡时,通过在修正面上加装平衡配重的方法来修正残余不平衡量,动平衡精度一般采用 ISO1940 推荐的 G1 级平衡精度要求。

1.1 静不平衡量的控制

静不平衡是中心主惯性轴仅平行偏离于轴线的平衡状态^[5]。静不平衡量一般由重心平面上的 1 个校正量予以校正。对于压气机轮盘、整体叶盘、鼓筒轴、轴颈、叶片和轮盘装配组件等零组件,当其直径与长度的比值 ≥ 5 时,一般采用静平衡方法进行修正。但如何控制静不平衡量一直没有统一标准。

机械工业部关于汽轮机旋转零部件静平衡标准规定:通常汽轮机旋转零部件在工作转速下的剩余静不平衡质量所产生的离心力不超过其质量的 5%^[6],即

$$G_{RA} = \frac{10^3 \times 0.05 W g}{\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 r} \quad (1)$$

工程上也有根据刚性转子允许剩余动不平衡量来控制零件静不平衡量的,即

$$G'_{RA} = \frac{V_e W}{\frac{\pi n}{30}} \times 1000 \quad (2)$$

式中: G_{RA} 为允许剩余静不平衡质量, g; G'_{RA} 为允许剩余静不平衡量, g·mm; W 为质量, kg; g 为重力加速度, m/s²; n 为旋转速度, r/min; V_e 为平衡精度, mm/s, 一般选为 1~2.5; r 为平衡半径, m。

由量纲分析可知,式(1)、(2)的物理本质相同,但式(1)引入了平衡半径。

根据式(1)、(2)的计算结果得出静不平衡量的控制值的基础,同时考虑具体结构的静平衡可修正量、静平衡工艺特点以及经济性等因素确定静不平衡量的控制值。

1.2 初始动不平衡量控制

为了保证转子的最终不平衡品质,对完成初始装配的压气机转子组合件进行不平衡量检查,一般要求初始剩余不平衡量按 G2.5 精度进行控制,若满足要求则进行最终动平衡,若不满足要求可调整零件的角向位置进行再装配。转子组合件初始动不平衡量的控制精度与各零件静不平衡量的控制精度相关。

1.3 最终不平衡量控制

工程上多根据实践经验确定转子允许的剩余不平衡量并分配至各平衡面,但较科学的方法是用轴承的单位承压大小来衡量动平衡品质,并要求在各平衡面上产生的轴承力不能超过剩余不平衡力位于转子重心产生的轴承力。

简支支撑转子如图 1 所示。按 G1 级平衡精度,允许剩余不平衡量为

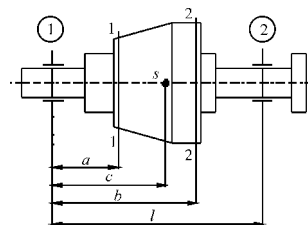


图 1 简支支撑转子

$$U_{PER} = \frac{W}{\pi n / 30} \quad (3)$$

$$U_{P1} = U_{PER} \frac{k}{(1-a) \pm R(1-b)} \quad (4)$$

$$U_{P1} = U_{PER} \frac{c}{(a+Rb)} \quad (5)$$

式中: U_{PER} 为允许剩余动不平衡量; c 为重心位置到前轴承距离; l 为轴承间距; a 为校正面 1 到前轴承的距离; b 为校正面 2 到前轴承的距离; $R = \frac{c-a}{b-c}$, 并规定

$0.4 \leq R \leq 2.5$; $k = l - c$, 若 $\frac{|l-c|}{c} < 0.33$, 取 $k = 0.33c$; U_{P1} 、 U_{P2}

分别为校正面 1、2 许用剩余动不平衡量。

最终,取式(4)、(5)计算的最小值为 U_{P1} , 这样 $U_{P2} = U_{PER} - U_{P1}$ 。

1.4 不平衡修正平面的确定

对于刚性转子,不平衡修正平面数量为 2;对于挠性转子,一般不平衡修正平面数量为工作转速范围内临界转速数 +2。

不平衡修正面应位于转子重心的两侧,并靠近前、后支点轴承位置,以使转子在平衡时所需的校正量小,即配重的效果好。

2 某压气机试验件转子平衡精度控制

该压气机试验件转子为双支点简支支撑结构,前支点为滚珠轴承,后支点为滚棒轴承,各级采用叶盘结构。试验件转子质量为 63.96 kg,设计转速为 11346 r/min,计算第 1、2 阶临界转速分别为 4273~5705 和 12735~13045 r/min,试验件前、后支点间距为 1151 mm,重心距前支点 354.7 mm。

2.1 各级叶盘许用静不平衡量

各级整体叶盘采用不同的静平衡控制方法允许的剩余静不平衡量以及硬件实际剩余静不平衡量见

表 2。考虑静不平衡可修正量,以及工艺性、经济性因素,该试验件各级整体叶盘的静平衡品质参照刚性转子允许剩余动不平衡量控制,平衡精度按 $V_e=2.0$ mm/s。因航空发动机转子类零件质量较轻,按汽轮机旋转零部件静平衡标准(JB3329-83)确定的许用剩余静不平衡量要求高,工艺难度大,所以该方法应用在航空发动机转动件上存在一定限制。

表 2 各级整体叶盘许用剩余静不平衡量 $g \cdot mm$

	整体叶盘				
	第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级	第 5 级
质量 /g	35.2	19.3	21.5	14.7	21.7
JB3329-83	12	7	8	5	8
G1 精度	30	32	18	12	18
G2.5 精度	74	41	45	31	45
设计要求	60	32	36	24	36
实物平衡精度	56	32	35	20	27

2.2 初始动不平衡量精度

考虑到该试验件压气机转子质量、刚度分布均匀,转子不平衡稳定性好,加之转子各零件止口为过盈配合,不宜反复拆装,故该试验件压气机转子未按要求严格控制初始动不平衡剩余量,仅根据工程经验进行要求。

2.3 动不平衡修正平面的确定

根据该试验件的结构及动力学特点,在靠近前、后支点轴承位置各设置 1 个动不平衡修正平面,并在重心后面与第 1 修正平面近似对称位置设置第 3 个不平衡修正平面。

2.4 最终动平衡精度

该试验件转子平衡系统如图 2 所示。根据式(3)~(5)计算允许剩余动不平衡量,并分配至各平衡修正面,最终剩余动不平衡量见表 3。

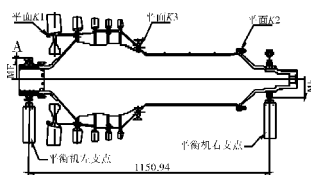


图 2 某压气机试验件转子平衡系统

表 3 各修正平面最终剩余动不平衡量 $g \cdot mm$

	K1 面	K2 面	K3 面
设计要求	50	40	50
实物平衡精度	45	40	42

2.5 振动监测

在试验过程中监测了试验件前、后支点附近垂直与水平振动,结果如图 3 所示。振动监测结果表明,该试验件振动水平低。

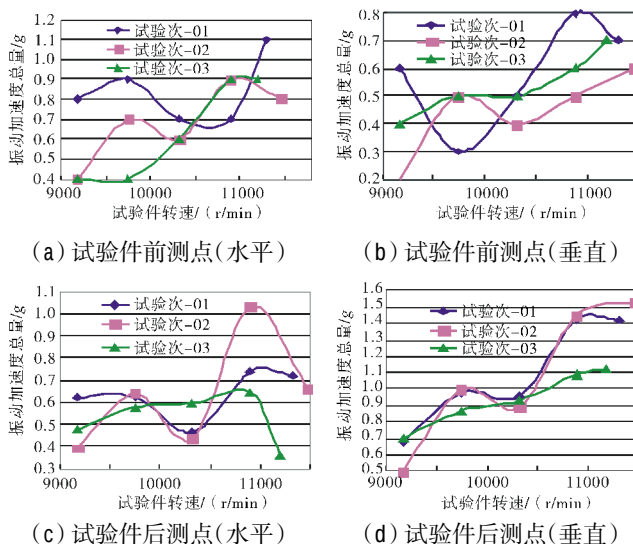


图 3 试验件振动监测结果

3 结论

(1)试验结果表明,采用本文所述的分步平衡及其平衡精度控制方法对压气机试验件准刚性转子进行平衡是可行的,该压气机试验件试验运行平稳,振动小。

(2)对于榫连结构叶片、轮盘,装配前应按叶片质量或静力矩大小合理排布,以保证叶片与轮盘装配组件剩余静不平衡量在许用范围内;对于原始不平衡量难以控制的转轴,应单独测定不平衡量,并视情校正。

(3)动不平衡量修正最好采用增加平衡配重的方法,尽量避免采用去材料方法。设计时还需考虑动平衡品质允许的误差。

参考文献:

- [1] 航空发动机设计手册总编委会.航空发动机设计手册第 8 册:压气机[M]. 北京:航空工业出版社,2000:278-282.
Editorial Board of Design Manual of Aeroengine. Design manual of aeroengine (8th album):compressor [M]. Beijing:Aviation Industry Press,2000:278-282.(in Chinese)
- [2] 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,2009:1-28.
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,2009:1-28.(in

- Chinese)
- [3] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 9239.1-2006 恒态(刚性)转子平衡品质要求(第1部分:规范与平衡允差的检验)[S]. 北京:中国标准化出版社,2006:1-23.
- Standardization Administration of China(SAC).GB/T 9239.1-2006 Mechanical vibration-balance quality requirement of rigid rotor (part1: specification and verification of balance tolerances) [S]. Beijing:China Standardization Press,2006:1-23.(in Chinese)
- [4] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 9239.1-2006 恒态(刚性)转子平衡品质要求(第2部分:平衡误差)[S]. 北京:中国标准化出版社,2006:1-23.
- Standardization Administration of China(SAC).GB/T 9239.1-2006 Mechanical vibration-balance quality requirement of rigid rotor (part2: balance errors)[S]. Beijing:China Standardization Press,2006:1-23.(in Chinese)
- [5] 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,1992:1-101.
- Zhou Renmu.Rotor dynamic balancing theory, method, standardization [M]. Beijing:Chemical Industry Press,1992:1-101.(in Chinese)
- [6] 中华人民共和国机械工业部.JB 3329-83 汽轮机旋转零部件静平衡标准[S]. 北京:中国标准出版社,1983:1-3.
- China Ministry of Machinery Industry.JB 3329-83 Static balance standards of steam turbine rotation parts and components [S]. Beijing:China Standardization Press,1983:1-3.
- [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):105-109.
- CHEN Bingyi.Development of balance technology for aeroengines[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998,19(4):105-109.(in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 燕文斗,刘庆军.用动平衡机进行静平衡的探讨[J]. 航空工艺技术,1996(3):41-42.
- YAN Wendou,LIU Qingjun.Static balance by means of dynamic balance machine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,1996(3):41-42.(in Chinese)
- [10] 林东涛.实现真正动平衡的理论基础和手段[J]. 航空精密制造技术,2002,38(2):33-35.
- LIN Dongtao.To achieve perfect balance theoretically and practically [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology,2002,38(2):33-35. (in Chinese)
- [11] 孙延添,刘成颖,张冰焰.提高刚性转子现场一次动平衡精度研究[J]. 机械设计与制造,2006(3):19-21.
- SUN Yantian,LIU Chengying,ZHANG Bingyan. Study on improving field first dynamic balancing precision of rigid rotors [J]. Machinery Design and Manufacture,2006(3):19-21. (in Chinese)
- [12] 顾峻.动平衡精度浅解[J]. 电机技术,2008(2):47-48.
- GU Jun. Elementary explanation on precision of the dynamic balancer [J]. Electrical Machinery Technology,2008(2):47-48.(in Chinese)
- [13] 杨亚非.动不平衡对离心机精度的影响[J]. 测试技术学报,2008,22(2):95-98.
- YANG Yafei. Influence of dynamic unbalance on centrifuge accuracy [J]. Journal of Test and Measurement Technology,2008,22(2):95-98. (in Chinese)
- [14] 陈炳贻.挠性转子平衡技术——最佳平衡值探索法[J]. 航空工艺技术,1997(4):33-34.
- CHEN Bingyi.Balance technology of flexible rotor—the optimum balance weight search method [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1997(4):33-34.(in Chinese)
- [15] 莫文辉.刚性转子平衡的可靠性[J]. 武汉化工学院学报,2000(1):56-57.
- MO Wenhui.Reliability of rigid rotor balance[J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology,2000(1):56-57.(in Chinese)

(编辑:赵明菁)