

新机研制中整机振动及其限制值 ——实践与思考

李文明

(中国航空工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘要: 讨论了为排除发动机整机振动要进行的工作, 并列出了两个示例; 同时讨论了整机振动限制值问题。

关键词: 整机振动 结构设计 振动标准

Engine Vibration and its limit in Development of New Engine ——Practice and Consideration

Li Wenming

(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015)

Abstract: Two instances of eliminating engine vibration are provided and the vibration limit are discussed in this paper.

Key words: engine; vibration; limit

1 整机振动——新机研制中的一个难题

航空燃气涡轮发动机结构复杂, 工作条件苛刻, 在研制过程中某一环节上出现问题都可能引起较大的振动, 因此, 新机种在研制中往往会碰到整机振动问题。对于新机的设计者, 特别是对缺乏研制经验的设计者而言, 降低发动机振动值或排除发动机振动故障是一个较大的难题。

导致发动机振动的因素很多, 而且往往是多种因素的交织, 因此要对发动机整机振动现象进行全面细致的观察研究, 要对影响发动机振动的诸多因素全面、深入地分析与复查。其工作量很大, 而且很复杂, 甚至很困难。其困难表现于:

(1) 排除振动可能要修改结构设计、变动硬件。小的局部结构修改, 影响小些。若是结构方案性变化, 小则延误型号研制周期, 大则可能对型号带来灾难性后果。

(2) 分析振动原因时, 认识上可能存在误区, 引起振动的明显现象、症状长期被忽视。

(3) 对新机应该规定多大的振动限制值才合理? 这也是不易说清的难题。

基于上述原因, 要排除整机振动故障所需的时间往往较长, 而且, 不得不带着振动大的问题、冒一定的风险, 坚持发动机的调试。

2 排除振动——有益的磨难

研制中的发动机一旦出现振动大的问题, 设计者首先是寻找引起振动的原因, 然后才能采取措施去排除振动。

过去, 在振动监测和振动诊断分析技术不完善的情况下, 很难判断到底是哪个或哪些因素引起发动机振动, 因此, 不得不从很多方面同时进行“普查”。近年来, 振动监测和诊断技术发展很快, 并已积累了一定的应用经验, 可以从振动信号的分析中诊断出振动的主要原因和次要原因, 这样就可以大大减少“普查”工作量, 有方向地做工作。但是, 要确切地认定在哪个部位、哪个环节、哪个结构细节上出了毛病, 仍然需要结构设计者做深入、细致的工作。

图 1 列出了排除整机振动时要做的工作项目。对某一具体振动故障到底要做哪些工作, 要视分析结果和设计者的经验而定。通过排除振动实践, 会加深每一个相关技术问题的理解, 得到比书本知识

收稿日期: 2001-08-06

作者简介: 李文明, 研究员, 1938 年出生, 1961 年毕业于西北工业大学, 从事航空发动机结构设计。

更深刻的认识,取得亲身经验,从而,真正锻炼了设计队伍,提高了自行设计的能力。

20世纪60~70年代,在某型涡扇发动机研制时,发动机整机振动问题一度成为一大障碍。该发动机的低压涡轮轴中间有一段加粗的鼓轴,两端采用内翻边的安装边,用螺栓与前、后轴颈相接,如图2所示。采用加粗的鼓轴,目的是增加低压轴的临界转速。为了使该低压转子装在高压转子内,不得不又将高压转子分段,也采用了内翻的安装边,用螺栓与后轴颈连接。另外,高、低压涡轮转子采用了所谓“双锥面”结构。在发动机调试中,长期存在着振动大的问题,转子和静子间、高压和低压转子间曾多次发生摩擦,有一次曾将涡轮后机匣的承力支板振断。经过反复研究,认真复查,并从实践中逐步提高了认识,最后将发动机振动大的原因归结为以下两点:

(1) 在低压涡轮轴上有2处、高压涡轮轴上有1处采用了易变形(“dog-leg”)安装边连接结构。RR公司等的实践证明,这种连接结构刚性差,不宜在重要部位采用。然而,我们将其应用到了关键部位。采用鼓轴,看起来会提高刚性,但实际上由于轴分成了两段,连接刚性变差,反而降低了整轴的刚性和结构可靠性。

(2) 高、低压涡轮转子采用了双锥面结构。这种结构在苏制P11Φ发动机和P29发动机的高压压气机转子上被采用,但应用到温度较高的涡轮部件中,则缺乏设计和实践经验。

要解决这两个问题很难,但振动大的问题又久攻不克,最后不得不对高、低压涡轮转子结构和支承做了重大的修改,取消了易变形安装边。修改后的结构(如图3所示)有效地降低了发动机的振动。

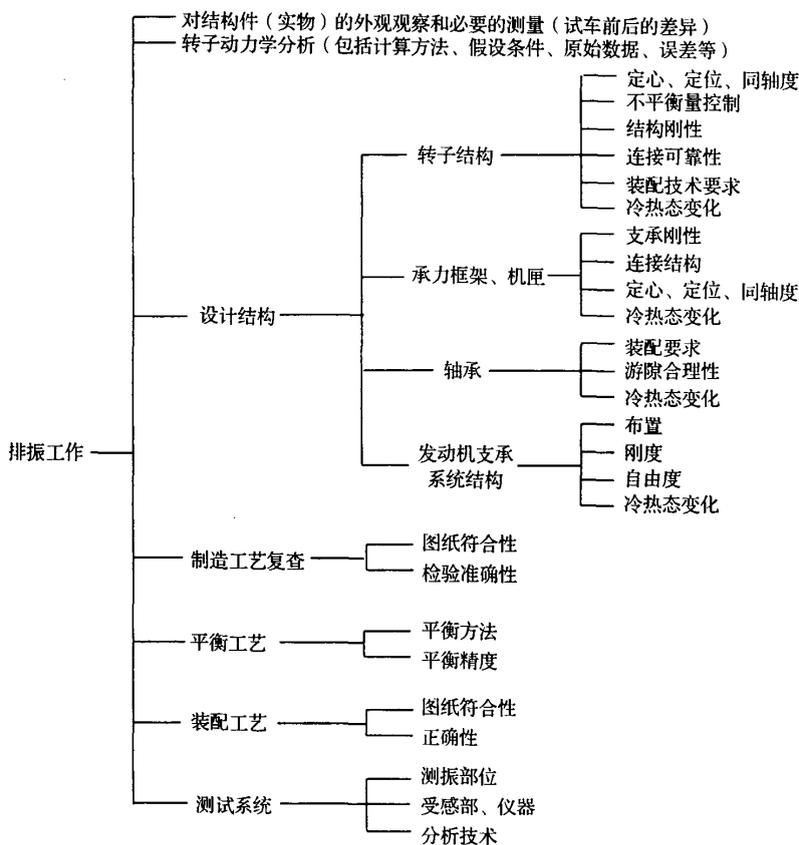


图1 排振工作内容

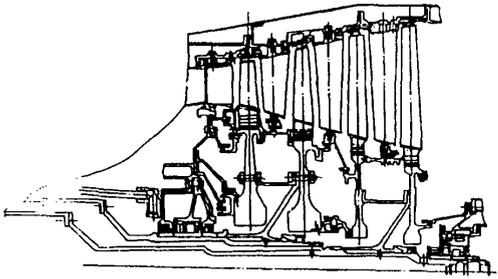


图2 修改前的某型涡扇发动机高、低压涡轮转子结构

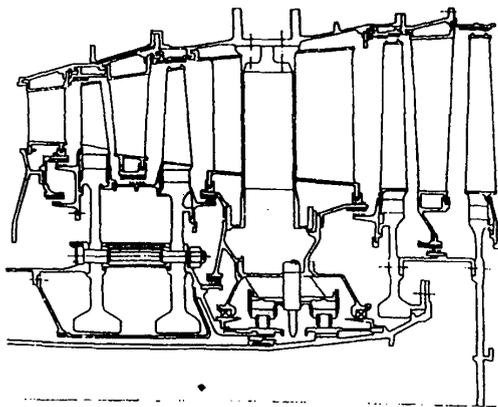


图3 修改后的某型涡扇发动机高、低压涡轮转子结构

又如在某型涡喷发动机研制中,整机振动大的问题困扰多年。在振动攻关中,查遍了所有的环节,但未发现明显问题。为了排除振动,做过一些小的修改,采取了降低转子不平衡量和提高转子、静子结构刚性的措施,先后上台试车十余次,均未见明显成效。最后才发现该发动机振动大的问题是由几处不大严重的转/静子间(高压涡轮叶尖和篦齿)碰磨引起的。适当放大间隙,振动明显下降。那么,为什么长时间不被认识?原因就在于:认为那些部位的轻微磨损不至于引起大的振动,造成了认识上的误区。

以上两个例子说明,经受振动大的“磨难”,使我们经过实践获得了更深刻的认识,取得了一些来之不易的经验。

3 整机振动限制值问题

振动大小是相对振动限制值(标准)而言的。在没有振动标准加之缺乏经验的情况下,为新机制定振动限制值是很难的。一般作法是,参考一个机种,先选定一个限制值(如某涡扇发动机选用了P11Φ涡喷

发动机的限制值),然后在研制中摸索、验证。虽然这样做是可行的,但同时说明我们在技术上缺乏理性的了解。振动限制值选得不恰当就会冒风险。

设计出什么样的结构(从结构方案到结构设计细节)才具有可接受的振动水平?是结构设计问题,同时也涉及到振动限制值(标准)问题。

由于转子-机匣-支承系统的动力学特性对振动有重大影响,所以在设计一开始就必须进行动力学计算分析,使发动机结构动力特性满足设计准则的要求。但是它不能算出整机振动的大小,不能定量地给出振动振幅、振动速度或振动加速度数值来。工作时的振动大小是由发动机实际的结构系统决定的。

旋转机械的振动问题一直是工业界和学者们关心的问题。从有固定式旋转机械开始,就存在如何确定振动限制值问题。起初,根据实践经验小心翼翼来摸索和限制,这时,出现了个别机组的标准和企业的标准。随着各种类型固定式旋转机械的出现,实践经验愈来愈多,并积累了大量的数据,加之理论上的进步,逐步产生了共识,形成各种不同类型旋转机械的“行业标准”、“国家标准”及“国际组织标准”。一些文献回顾了旋转机械振动标准的形成过程,并研究分析了航空发动机与固定式旋转机械振动的差异。这些运行经验和标准,为探索建立航空涡轮发动机振动标准提供了很有价值的参考。^[1,2]

关于振动限制参数——位移、速度、加速度,每个参数都有明确的物理概念,限制位移是控制振动的振幅,限制振动速度是控制振动能量,限制振动加速度是控制振动质量惯性力。但是,到底采用哪个量较合适?早期,通常用位移或加速度作为振动限制值。到了20世纪50~70年代,不少学者如德国Federn、前苏联Вильнер等,从杆、梁、板、壳等构件的试验和理论上阐明了振动应力与振动速度成正比,与频率无关。因此,他们建议用振动速度作为振动限制参数。^[1]但考虑到机件间的间隙和作用力以及对固定连接处和附件的影响,在工业界和学术界逐渐取得了共识,“低速”机械采用振动位移作为振动限制值,而“中速”机械采用振动速度作为限制值,“高速”机械采用振动加速度作为振动限制值。

关于振动限制值标准问题,有关文献^[1]指出,由于航空发动机的结构特点,静/转子质量比为1~3,大大偏离其他固定式旋转机械的静/转子质量比,这样,机匣对转子的振动响应要比固定式旋转机械

大得多,因此不能采用地面固定式旋转机械的振动限制标准,而应放宽限制值。文献^[1,3]也统计分析了大量旋转机械的资料,并研究了航空发动机的结构特点,在总结了航空发动机大量制造经验后进行了理论解释,于1970年提出了航空发动机的振动限制,在转速频率10~750Hz范围内,采用振动速度限制振动,振动速度范围为30~60mm/s。^[2]图4示出了该作者提出的航空发动机的振动限制值范围。从图中看出航空发动机振动要高于固定式旋转机械的振动。

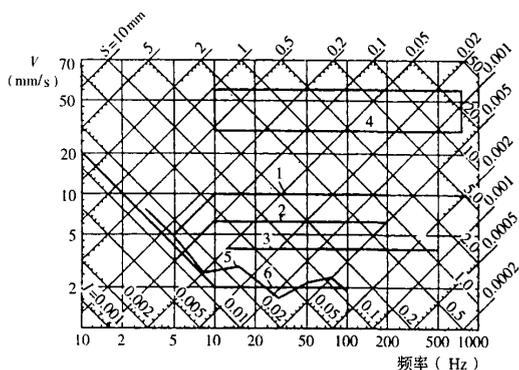


图4 以振动速度为基础的振动标准

- 1—安装在减振基础上的涡轮机及附件;
- 2—安装在刚性基础上的大功率机器;3—不大的机器;
- 4—航空燃气涡轮发动机;5,6—卫生标准

另外,根据固定式旋转机械的经验,振动限制值是为了保证长寿命(1000~10000h)可靠工作。在没有振动特性故障的情况下,对较短寿命($\leq 1000h$)的发动机则可放宽振动限制值(可放大2.5倍)。^[1]

ГОСТ26382—84 是前苏联国家标准——民用航空燃气涡轮发动机振动允许水平和振动检查一般要求。图5为该标准的振动限制图解。曲线表示:①单转子发动机或多转子发动机中每一个转子的一次谐振频率的振动限制值——检验试车稳态;②单转子发动机的瞬态、多转子发动机稳态时每一转子分量的平方和根值的限制值;③多转子发动机长期试车稳态限制值;④④和⑤④飞机和直升机发动机附件固定部位的振动限制值;②'螺旋桨和风扇发动机转子非一阶谐振限制值。该标准内容丰富,值得深入研究。应该指出,民用航空发动机按照长寿命和舒适性的要求,对振动的限制要比军用发动机更严格。

表1列出了某些型别发动机的振动限制值。

从表中可以看到:(1)在早期,前苏联制造的发动机都采用振动加速度值限制振动,美、英则采用位移值限制振动;近期,则都采用速度值来限制振动。(2)振动水平稳态值约为30~60mm/s,瞬态或短时间工作可达70~127mm/s甚至140mm/s,约为稳态值的2.5倍。

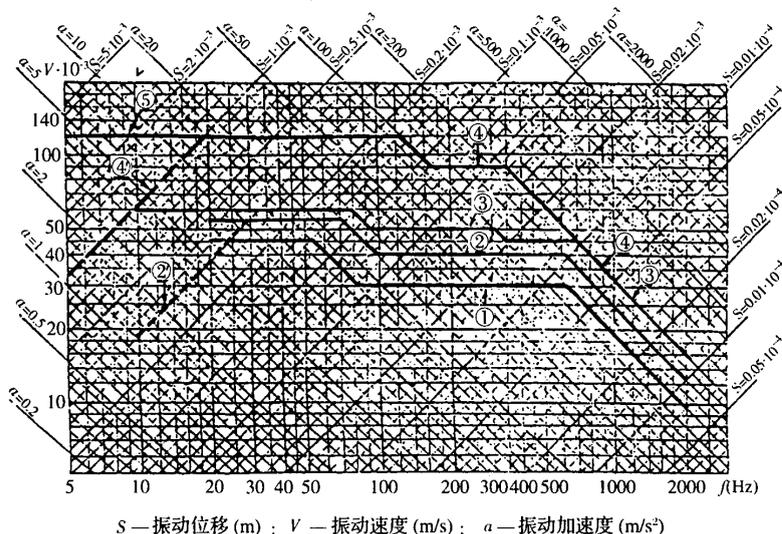


图5 ГОСТ26382—84 整机振动限制曲线

综上所述,由于我们实践非常有限,不可能根据自己的经验来制定“振动限制值(标准)”。但是,一些发达国家的“振动标准”及其发展过程和专家学者们所做的研究工作,为我们确定新机整机振动限制

值和处理研制阶段振动超限问题提供了非常有益的帮助。应该说,虽有振动限制值标准可参考,但是,对于某个型号的具体振动限制值,仍是通过该型号的研制实践、摸索、统计、总结后才能确定下来。

表1 某些型别的发动机振动限制值

国 别	发动机型别	转速(r/min)	振动限制值		
			A(mm)	V(mm/s)	K(g)
俄 罗 斯	РД9Б	11500			3
	Р11Ф-300	11150/11425			4(6)/6(8)
	Д20П	11700/8550			4
	Аи24	15100			3.5
	НК8	7400/5600		60	
	НК8-4	9700		90	
	АЛ31Ф	10200/13300		55/40/70	
英	РД33			30	
	SPEY		0.051		
美	J79	7450	0.11		
	CFM56		0.01	40.6	
	F404	14070/17190		38.5/50.8 127~140	

参考文献

1 Сидореко М К. Виброметрия Газотурбинных Двигателей. Машиностроение1973.

2 Ludwig G A , Erdmann O D. Gas Turbine Vibration Limits—A Fundamental View. ASME pub 1973.

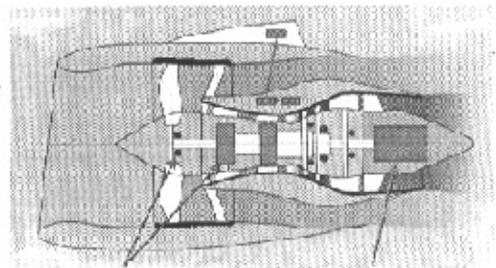
3 Вилигер П Д, Сидореко М К, Контроль Вибраций Авиационных Двигателей По Виброскорости—《Труды КуАИ》Куйбышев 1970, ВЬП 45.

4 ГОСТ 26382-84 《Двигатели Газотурбинные Гражданской Авиации - Допустимые Уровни Вибрации и Общие Требования и Контролю Вибрации》.

RR 公司的多电发动机

RR 公司正在以较少级数的压气机和涡轮的 TRENT 改进型发动机为基础进行多电发动机的方案研究。多电发动机具有省掉飞机气动系统,简化飞机/发动机接口,不需发动机滑油系统以及多电发动机一体化可降低费用、提高效率的优点。虽然该方案还处于初步研究阶段,但预计在 10 年后可能投入实际应用。

(刘红霞)



磁悬浮轴承和
启动/发电机

发电机为所有发动机
附件提供动力