

V23
09

3 2 5 6 6 0 0 1

航空发动机典型故障分析

宋兆泓

陈 光

吴大观

付君清

张景武 洪其麟

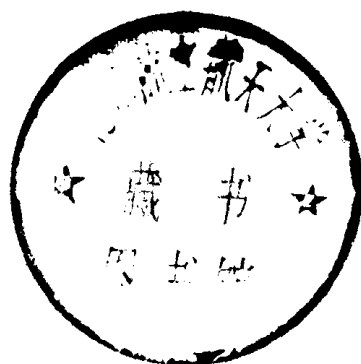
钟培道

主 编

副主编

主 审

副主审



C0294556

北京航空航天大学出版社

325660-2

本书编委



吴大观



卜柏华



王广德



王洪铭



毛可久



付君清



丘应豪



刘子尚



刘敦惠



朱行健



许锡龙



陈光



陈书林



陈顺守



杨丰祥



李世凯



李聚丰



宋兆泓



严言孝



张景武



林景正



赵长占



洪其麟



钟培道



陶光孟



徐伦侠



徐家民



蔡运金



熊昌炳



陶金福

前不忘，后之师。

林雪

1993/1/29

认真总结经验

努力改进产品提高可靠性

程華明

一九九三·一·十七。

认真吸取航空发动机研制、生产和
使用中的经验和教训，积极学习、
引进、消化吸收国外的先进技术，努力
增强发动机的可靠性，为祖国的航空
事业现代化立新功。

陈晋

1993年2月12日书于北京。

11-13/20

序 言

继《航空机械失效案例选编》出版四年以后,《航空发动机典型故障分析》同读者见面了。这是继前书之后,在航空发动机行业,将我国曾经付出巨大代价换来的经验教训变为宝贵财富的又一本好教材。

根据国防科工委的要求,为了总结和分析航空发动机重点机种的典型故障,进一步提高发动机的质量和可靠性,在航空航天部质量司的大力支持下,在航空发动机总公司的领导下,请北京航空航天大学在航空发动机结构强度、可靠性研究等领域具有丰富经验的教授们和发动机设计研究所、材料研究所、发动机制造工厂和空军使用单位具有丰富经验的工程师们,共 200 余人整理案例,提供资料;并组成 29 人的编审委员会进行编写工作。本书得到各厂、所领导的重视与支持,使 60 余万字的书能在两年多点时间内问世。本书应认为是发动机行业集体智慧的高效工作的结果。

本书收集了航空发动机工业近 30 年来发动机所发生的“典型故障”百余例,其中有较严重的,也有造成等级事故的故障。它是从航空发动机发展进程中血的教训里和从另一个侧面提供的宝贵的经验,体现了全行业的智慧。因此,本书的出版也是一本非常有价值的“发动机历史文献”,尤其是有些故障文本,仍留在某些即将退休人员的手中和“脑中”,如不集中起来,将被流失。

本书与以往故障分析书籍不同之处,在于有较强的技术性。它不单是故障现象的记载,而是体现在排故全部过程中,有方法、理论研究成果、措施和使用效果,有新技术的应用和分析,是全行业的大协作和集体智慧与力量的结晶。对当前从事航空发动机设计和维修人员,尤其是对后来的新生力量,它是一本有实用价值和理论水平的很好的参考文献和借鉴资料。“前事不忘,后事之师”,本书的出版对航空发动机的设计与发展,将有一定的深远意义。

本书编写体现了三重:重点机种、重点(典型)故障和重在分析。尤其是在分析方面,对故障的理论研究、计算分析、实验研究、故障结论、排故方法与使用效果等方面,都列为重点,具有较丰富的内容,构成本书主要特色。

本书根据典型故障的大量资料,表明要提高发动机的可靠性,必须降低故障率,可见降低故障率在发动机可靠性中起着何等关键性作用。书中指出航空发动机故障类别与故障模式是繁多和复杂的。从我国发动机故障的统计中,发动机性能故障,约占发动机总故障的 10~20%,发动机的结构强度故障,约占发动机总故障的 60~70%,比率相当的高,是构成发动机安全的主要威胁。在结构强度故障中,又以疲劳损伤故障为主,据统计它占结构强度故障的 70~80%,约占发动机总故障的 50~60%,可见结构强度故障类型中以疲劳损伤最为危害和严重。

上述故障模式所占故障的百分比,还表明研究分析故障不能仅限于复查材质、工艺和一般图纸资料几方面来寻找原因,也不能仅为出现一次偶然性故障,存在侥幸心理。大量事实教育我们,从故障发生之初,就应足够重视,严肃对待;要从设计角度,从故障件所处的工作条件和环境影响,即从内因去研究分析。本书在编写过程中,还突出指明,为了减少故障

率和提高产品质量，对苏联早期设计的发动机及我们自己仿制和改进改型的发动机，要特别重视做重要零组件强度核算验证和试验工作以及高低周疲劳寿命的确定工作；对新研制的发动机要采用断裂力学和损伤容限设计等；还应该在发动机使用中采用性能监控与故障诊断技术，建立信息网和信息反馈等工作。本书从已出现的发动机典型故障中，提出降低故障的有效措施和提高发动机可靠性方法，因此，它确实是一本有理论、有科学分析和实用价值的好书。

我们希望本书的出版，对今后航空发动机开展可靠性和结构完整性研究，贯彻军机通用规范、民航适航条例，对提高发动机产品质量将会起到促进作用。将把发动机的质量管理与发动机的研制工作推向一个更高的台阶。

吴 大 观

1992年4月10日于北京

前 言

航空发动机典型故障分析一书，经过两年多的工作已经出版了。这本书是在中国航空发动机总公司的领导和石川副总经理的建议下筹划和进行编写的。它收集我国航空发动机工业三十余年来在研制、生产和使用中所发生的典型故障事例，进行整理、分析和编写而成。它反映了我国航空发动机发展过程中的一个侧面，故障产生的结果是带来了巨大损失和血的教训。故障的排除，促进了发动机产品质量和可靠性的提高，则从中积累了丰富的经验，体现了科技的应用，人员的智慧，为今后航空发动机事业的进展提供了良好的借鉴和科学依据。

编写本书的目的还在于，从典型故障中吸取经验与教训，学习排故的方法，以利于指导新机设计、老机使用和培养新生技术力量。在收集故障的过程中，确实发现有不少排故的工作和经验，还未成文；有的虽已成文却流散在个别人员手中，不能起到交流和推广的作用；更有甚者，有些资料还将随时间的推移和人员的转变而陷于流失。由此可见，编写此书的重要性和其社会价值。

在写本书时，我们提出“三重”的原则，即编写重点机种、重点（典型）故障和重在分析。

(1) 重点机种：以现役机为主，即涡喷六、涡喷七系列、涡喷十三、涡喷八、涡桨六、涡桨五和涡轴六发动机等。这些机种都有二、三十年的生产和使用经历，有较多的故障实例。

(2) 典型故障：凡是故障对发动机产生的影响后果较为严重和造成等级事故者，都列为典型故障。但也有些故障，后果并非很严重，而其故障现象、排故方法或其效果都具有典型性，也列为典型故障，例如发动机的转速摆动故障等。

(3) 重在分析：对编入的故障的发生过程、现象和金相材质分析等，我们仅作一般性介绍，达到情况明确为止。而对故障的理论研究、计算分析、实验研究、工艺问题、故障结论、排故方法与使用效果等方面，则列为重点分析内容。个别故障现象，还增加了一些近期的研究结果，在故障结论无更动的原则上，使内容更为充实。重在分析是本书的主要特色。

编写过程中，对故障还严格遵循“原判”不变的原则，不论分析如何深入与充实，对故障事件当时所作的结论性意见，基本保持不变，使其不失真，维持历史的原貌。对那些虽属重大故障事件，但因种种原因并没有明确结论或存在重大争议的问题，我们都不列入。同时对那些重大故障事例，还处于研究和排故过程之中，我们也不列入，例如涡喷七压气机四级盘均压孔裂纹故障等。

本书收集的故障事例，限于 50 年代中期到 90 年代为止，共收集成文与不成文的技术文件原稿、资料 and 手稿等近一百四十余件；经过筛选，整理合并，最后写成了故障分析共 102 例。本书来稿的特点是涉及面广、分散性大和“零”“整”不一。因此为便于编写，我们在每章中都设有一到二人为主笔。由主笔负责对本章节的故障原件，进行筛选整理、统一格式、汇集和编写成文。因此在本书各章节中大部分故障事例，都有不同程度的改动，有些事例是由几篇来稿汇集改写而成。为尊重原作者劳动和明确责任制，每件故障事例，都有原文作者和主要合作者的署名。对于同类故障，由几篇来稿合并为一篇者，其署名为供稿单位的第一作

者。但是不论何种情况，每篇事例署名的作者皆不多于三人。

“故障分析”一书，以零部件为单元，按章节划分，每章为同一零件或部件，每节成为独立单元，为一个故障事例。全书共十二章，第一章绪论，第二章性能，第三章总体结构，第四章叶片，第五章轮盘，第六章转子与轴，第七章燃烧系统，第八章传动与齿轮，第九章轴承与润滑，第十章燃调，第十一章螺旋桨，第十二章外国发动机典型故障事例。螺旋桨故障本应为一个独立系统，但为便于编排，只得作为一章处理。

为本书提供资料和直接参加本书编写的单位有：120厂、331厂、370厂、410厂、420厂、430厂、460厂、503厂、550厂、113厂、143厂、001第二设计所、608所和北航动力系等单位。提供文稿的原作者，接近二百余人，组成本书的编委人员共计29人。

本书由北航宋兆泓任主编（兼主笔），北航陈光、发动机总公司张景武和北航洪其麟三人任副主编（兼主笔），由吴大观教授任主审，部质量司付君清和621所钟培道任副主审。各章主笔人员还有北航朱行健、空一所许锡龙（特邀）、410厂杨丰祥、410厂蔡运金、空军19厂卜柏华（特邀）、北航熊昌炳、420厂刘敦惠、北航王洪铭、460厂李世凯、北航赵长占、430厂刘子尚、北航毛可久、113厂林景正、550厂陈书林和120厂严言孝等。本书的编委除上述主笔人员外还有143厂徐伦侠、331厂陶光孟、370厂丘应豪、503厂王广德、011第二设计所李聚丰、608所徐家民和北航陈顺守（特邀）等。

本书在编写过程中，得到航空航天工业部和中国航空发动机总公司各级领导、上述各厂所和北京航空航天大学各级领导的关怀与支持，在此表示感谢。同时还应感谢，北京航空航天大学学会动力专业委员会和北航动力系与405教研室给予的支持。感谢550厂李朝阳同志和北航王延荣同志在全书编排工作中所给予的技术指导与付出的辛勤劳动。

本书是集体智慧的结晶，但由于时间紧迫和限于编者水平，定有许多不足和错误之处，望读者给予批评指正。

宋兆泓

1992年3月10日于北京

目 录

第一章 绪论

1-1 可靠性与故障	1
1-2 故障模式与故障率	1
1-3 排故措施与提高可靠性	4

第二章 发动机性能故障分析

2-1 概述	8
2-2 发动机排气温度高、推力小及耗油率高故障概述	8
2-3 涡喷六发动机推力小、排气温度高故障	12
2-4 涡喷七发动机推力小、排气温度高故障	16
2-5 涡喷六发动机高空接通加力过程中自动停车故障	19
2-6 涡喷七发动机(歼七用)空中停车故障	21
2-7 涡喷七发动机(歼八用)空中停车故障	24
2-8 涡喷七发动机高压转子转速下降值超过技术规定的故障	27
2-9 涡喷六发动机转速摆动故障	29

第三章 结构系统故障分析

3-1 涡喷六发动机后机匣主体裂纹故障	32
3-2 涡喷六发动机放气带断裂故障	35
3-3 涡喷六发动机后机匣隔热腔鼓包故障	38
3-4 涡喷六发动机 803 回油管裂纹与断裂故障	42
3-5 涡喷七发动机低压涡轮转子偏摆过大故障	45
3-6 涡喷七发动机通漏油箱的空气导管断裂故障	50
3-7 涡喷六发动机涡轮叶片锁片裂纹故障	51
3-8 涡轴八发动机燃气发生器转子卡滞故障	54

第四章 叶片故障分析

4-1 概述	59
4-2 涡喷六发动机压气机三级铝叶片疲劳损伤故障	61
4-3 涡喷六甲发动机压气机一级叶片气动疲劳损伤故障	69
4-4 涡喷七发动机压气机一级叶片断裂故障综述	74
4-5 涡喷七发动机压气机一级叶片气弹失稳断裂故障	78
4-6 涡喷七发动机压气机二级叶片叶尖掉块故障	90
4-7 涡喷八发动机压气机铝叶片折断故障	101
4-8 涡喷六发动机一级涡轮叶片断裂故障	105
4-9 涡喷七甲发动机一级涡轮叶片断裂故障	108
4-10 涡喷七发动机压气机二级整流叶片裂纹故障	112
4-11 涡喷七乙发动机二级涡轮导向器叶片变形故障	118
4-12 涡喷七发动机一级涡轮导向器叶片使用故障综述	121

4-13 涡桨五甲 I 发动机一级涡轮导向叶片损伤故障	124
第五章 轮盘故障分析	
5-1 概述	128
5-2 涡喷六发动机一级涡轮盘榫槽槽底裂纹故障	130
5-3 涡喷七发动机一级涡轮盘伸长故障	143
5-4 涡喷八 III 批发动机一级涡轮盘封严圈裂纹故障	151
5-5 涡喷八 III 批发动机二级涡轮盘榫槽槽底裂纹故障	158
5-6 涡喷八发动机二级涡轮盘断裂故障	166
5-7 涡喷六发动机二级涡轮盘榫齿裂纹故障	175
5-8 涡喷六发动机一级涡轮盘传动销钉孔边裂纹故障	182
5-9 涡喷六发动机压气机九级盘断裂与爆破故障	186
第六章 主轴与转子系统的故障分析	
6-1 概述	193
6-2 涡喷六发动机涡轮轴后锥段断裂故障	195
6-3 涡喷七甲发动机整机振动故障	207
第七章 主燃烧室和加力燃烧室故障分析	
7-1 概述	216
7-2 涡喷六发动机火焰筒故障	217
7-3 涡喷七系列发动机火焰筒故障	223
7-4 涡喷六、涡喷七、涡喷八发动机主燃油喷嘴故障	228
7-5 涡喷六发动机加力筒体裂纹故障	237
7-6 涡喷七乙 B 加力燃烧室故障	243
第八章 齿轮及传动系统故障分析	
8-1 概述	248
8-2 涡喷六发动机附件传动从动齿轮破裂故障	249
8-3 涡喷六发动机液压泵正齿轮压陷与磨损剥落故障	252
8-4 涡喷七系列发动机中央传动伞齿轮断裂故障	257
8-5 涡喷七 B 发动机 130629 传动杆花键磨损故障	264
8-6 涡喷八发动机起动机液压离合器大齿圈断裂故障	267
8-7 涡喷八发动机下传动杆断裂故障	270
8-8 涡喷八发动机滑油泵传动轴折断故障	273
8-9 涡桨五甲 I 发动机离心通风器传动齿轮故障	275
第九章 轴承及润滑系统故障分析	
9-1 涡桨六发动机减速器一级齿轮轮毂和轴承卡圈断裂故障	280
9-2 涡喷六及六甲发动机液压泵斜传动轴承保持架磨损故障	287
9-3 涡喷七系列发动机滑油消耗量过大故障	292
9-4 涡喷十三 A III 发动机附件传动主动螺旋圆锥齿轮组件和轴承故障	294
9-5 涡喷八发动机停放串漏滑油故障	299
9-6 涡喷八发动机滑油消耗量过大故障	302

9-7	涡桨六发动机压气机前轴承故障	305
9-8	涡轴八(A)发动机燃气发生器后轴承严重磨损故障	309
9-9	涡轴八(A)发动机自由涡轮前轴承磨损故障	313
9-10	涡喷六甲(03)发动机滑油压力脉动过大故障	317
第十章 燃油及控制系统故障分析		
10-1	概述	318
10-2	涡喷六发动机主燃油泵最低压力活门衬套脱出故障	320
10-3	涡喷六发动机主燃油泵分油活门套筒轴承圈脱出故障	324
10-4	涡喷六发动机防喘振装置中离心活门抱轴故障	326
10-5	涡喷六发动机离心活门进油接头磨损故障	332
10-6	涡喷七发动机转速摆动故障	334
10-7	涡喷七发动机排油活门卡滞故障	336
10-8	涡喷七发动机接通加力时降转故障	339
10-9	涡喷七甲发动机加力推力脉动故障	341
10-10	涡喷七发动机上其它加力故障	342
10-11	涡喷八发动机放气机构故障	344
10-12	涡喷八发动机操纵不当引起停车故障	346
10-13	涡轴八发动机燃油流量不稳定故障	347
10-14	涡轴八发动机燃油控制器达不到最大转速故障	350
10-15	涡喷八发动机燃油系统其它故障	352
10-16	涡喷十三主燃油控制系统中分油活门卡死故障	354
第十一章 螺旋桨与其系统故障分析		
11-1	直五机旋翼毂轴向铰轴颈断裂故障	359
11-2	G1 螺旋桨油缸凸边断裂故障	364
11-3	G1 螺旋桨配重卡箍断裂故障	366
11-4	TS-14 调速器油滤中出现金属屑故障	369
11-5	TS-14 螺旋桨调速器稳定性故障	370
11-6	J16-G10A 螺旋桨桨叶电加温防冰装置故障	375
第十二章 国外发动机典型故障示例		
12-1	F404 发动机钛机匣着火故障	380
12-2	F404 发动机加力燃烧室隔热衬筒失稳变形故障	381
12-3	CFM56-3B1 发动机高原起飞超温故障	382
12-4	JT8D 发动机 4、5 号轴承滑油腔着火造成涡轮轴或连轴器折断故障	385
12-5	斯贝发动机滑油消耗量大故障	388
12-6	斯贝 MK202 发动机高压压气机 1 级工作叶片叶尖排气边缘掉块	390
12-7	Д30KY-154 发动机低压涡轮转子非包容破裂故障	394
12-8	伊尔十八空难事故 АИ-20М 发动机故障	398
12-9	Аи-24Д 发动机压气机 3 级工作叶片疲劳损伤故障	403
12-10	Аи-24Д 发动机涡轮叶片热腐蚀故障	407

第一章 绪 论

主 笔 宋兆泓

1-1 可靠性与故障

早期的航空发动机强调以保证性能为主，而现代的航空发动机则提出要满足“三性”的要求，即适应性、可靠性和维修性。这不仅要保证发动机设计中的性能要求，更主要的是要保证发动机在使用中的安全与可靠。现代发动机在“三性”指标的要求下，采取了多种措施，而其中的重要环节之一就是减小发动机的故障率。

发动机的可靠与故障是矛盾的两个方面，故障多则可靠性自然下降，而要提高可靠性势必减少故障和降低故障率。因此研究发动机的故障问题，就是确保发动机的可靠工作。

航空发动机是属于高速旋转机械，处于高转速、高负荷（高应力）和高温的环境下工作，发动机又是由许多个零组件所构成，其本身工作情况以及外场使用环境（尤其军机）都十分复杂，使发动机在使用期间容易出现故障，因此航空发动机又属于多发性故障的机械。

国内外航空发动机产生故障的事例，年年都有，屡见不鲜。故障不仅影响发动机的正常使用，造成经济损失，严重的故障，还造成飞行事故，带来血的教训，形成重大的社会影响。因此现代航空发动机工业，都在为减少和排除故障而不懈的奋斗。随着现代科学技术的发展和可靠性的不断提高，发动机的故障、故障率和故障严重程度都在逐年下降。

1-2 故障模式与故障率

航空发动机故障类别与故障模式是十分的繁多与复杂的，从总体上看故障类别有，性能型故障、结构强度型故障和附件系统故障等。

从我国发动机故障的统计中，发动机性能型故障，约占发动机总故障的 10~20%，其比率不算高。性能故障多表现在发动机推力下降、推力不稳、耗油率过高、排气过热、空中灭火和放炮、转速摆动等现象。对性能型故障的排除，相对说比较容易。

发动机结构强度型故障反映的方面广、类型多、后果又比较严重。大体上有强度不足破裂与损伤、高周疲劳损伤、低周疲劳损伤、热疲劳损伤、蠕变与疲劳交互作用损伤等现象。这些故障构成发动机的主要故障事件，约占发动机总故障的 60~70%，其故障比率相当高，对发动机的安全构成主要威胁。

结构强度型故障，因强度不足产生的断裂事例，并不算多，它主要是由于外来物的冲击而导致损伤现象。如压气机一级叶片或风扇叶片受环境影响，鸟冲击、冰雹或风沙冲击等而

导致的破裂。结构强度型故障中，又以疲劳损伤故障为主，据统计它占结构强度型故障的 70~80%，约占发动机总故障的 50~60%，可见结构强度型故障的危害性与严重性。发动机中有许多重大故障和严重飞行事故，都是由于结构强度型故障所造成，如轮盘爆裂、断轴和叶片断裂故障等。结构强度型故障，多为零组件原设计不合理，又因使用工况不当，造成零组件的故障。列入本故障书中有关结构强度型故障，就占有 70% 左右的事例，足见其严重程度。

从故障分析的浴盆曲线（如图 1-1-1 所示）看出，可分为早期型、偶发型和耗损型故障。从发动机在全寿命期间故障发作的表现形式看，三种类型的故障中，以偶发型故障最为严重。我国航空发动机的大多数严重故障多为使用寿命期间的偶发型故障，偶发型故障事件所带来的损失往往是难以估量的。我国出现的几起重大故障事件，都属此类性质。这些故障现象说明，有些零组件在设计、工艺和使用上存在着不合理之处，也说明人们对这些重要的零组件的固有性能还了解得不够清楚，即使是发动机通过厂内长期试车和飞行考核，并没有暴露出来，但随着使用时间的增长，使用环境的改变，这些潜在的故障就会相继爆发的。

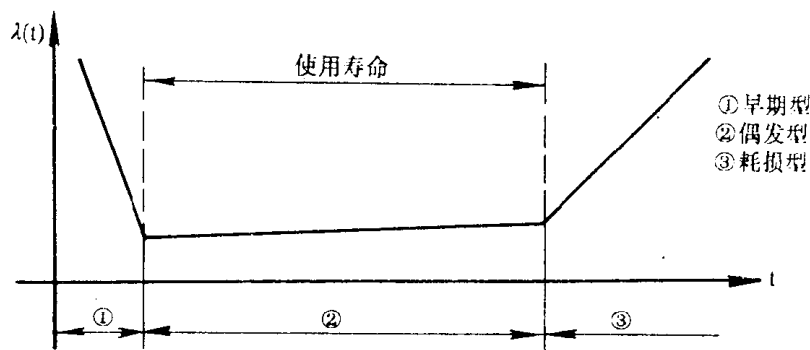


图 1-1-1 故障浴盆曲线图

发动机中的早期型故障为磨合型故障，属于设计、使用不合理的早期暴露，故障的存在和发生是合乎情理的，比较容易解决。只要对故障现象判断准确，就可从根本上加以解除。早期型故障，属于结构设计上存在的缺陷，一般发生在使用寿命的前期，可以通过长期试车来发现与改进。对于许多性能型故障，调节系统的故障，则多属于此种类型。

耗损型故障，又称老化故障，发生在使用寿命后期，或在发动机延寿阶段出现。耗损型故障为零组件到寿的一种表现，故障的发作多是渐变型的，故障发作之前，有时存有前期征兆，在采用故障监测与诊断技术时，往往能发现，可以事先进行预估和防御，可以进行视情维修以减少故障。

航空发动机的故障率很难有一个标准的统计数量，这主要是由于发动机中零组件数量繁多，其形式与功能不等，故障模式又不一样，故很难统一计量。对我国现役发动机，从本书所收集到的资料和统计数字看来，对于一般性较重要的故障，大约是每年 3 起，其故障率是 $\lambda(t) = 3$ 起/年。表明故障是比较频繁的，说明发动机质量不够稳定，还有许多保证质量的工作可做。对于形成一、二级等级事故的故障，据统计是大约每相隔三年发生一次。其故障率是 $\lambda(t) = 0.3$ 起/年或 $\lambda(t) = 1$ 起/3 年。回顾我国航空发动机发生的十大故障，见表 1-1-1，确实如此。其特点还有，每起故障多为集中发作，短的三个月，长者年许，而且同

类型故障经常是连续的出现数次。这种现象极为符合故障发生的定义与一般规律，即凡是发动机具有同样模式的故障，在较短时期内，相继出现两次（至少）便为故障。这类故障便是零件在设计上存在固有缺陷的反映，必须从结构设计上、工艺上或工况环境上认真对待。

表 1-1-1 十大故障基本情况

序号	发动机	故障名称	年限	频数，次	性质	结论
1	WP-6	转速摆动超温振动	1960	多	性能型	排除
2	WP-6	压气机三级叶片断裂		> 3	高周疲劳	调频排故
3	WP-7	压气机一级叶片颤振	1976	3	低周疲劳	改型排故
4	WP-6	压气机九级盘断裂与爆破	1974 1977.3	2 1	镉脆+疲劳	排除
5	WP-6	涡轮轴断裂	1971.4~1978	> 14	超应力	改型
6	WP-7	主燃烧室喷嘴断裂	1983.3	1		
7	WP-6 等	涡轮盘槽底裂纹		多	低周疲劳	给出判废标准
8	WP-7	中央传动齿轮断裂	1984.6~1986.3	5	高周疲劳	更换
9	WP-7	涡轮二级整流叶片变形	1980	多	热变形	
10	WP-7	压气机四级盘裂纹	1989	3	工艺+疲劳	正在研究中

这十大故障分别是：

- 1 60 年代初期，WP-6 发动机性能故障，推力不足，转速摆动和振动过大；
- 2 60 年代，WP-6 发动机三级铝叶片高周疲劳断裂损伤故障；
- 3 70 年代初期，WP-7 发动机（原型）压气机一级叶片气弹失稳颤振断裂故障；
- 4 70 年代，WP-6 发动机九级盘断裂故障；
- 5 70 年代，WP-6 发动机涡轮轴断裂故障；
- 6 70 年代，歼八用 WP-7 发动机燃烧室主喷嘴断裂故障；
- 7 70 年代，WP-6，WP-7 等发动机涡轮盘槽底裂纹故障（未形成等级事故）；
- 8 80 年代初期，WP-7 发动机中央传动齿轮断裂故障；
- 9 80 年代，WP-7 发动机二级涡轮整流叶片变形和断裂故障（未形成等级事故）；
- 10 80 年代末期，WP-7 发动机压气机四级盘裂纹故障等。

在 WP-7 四级盘裂纹事故后，相隔三年，又发生了涡桨五甲 1 一级涡轮叶片伸根腹板处相继断裂故障。这些大故障三年一次虽不能认为是机率的巧合，但从这些规律中，可以看到发动机质量存在着严重的问题。故障发作的特点还体现在较短时间内连续发作。这表明在此阶段可能是发动机的工艺质量不够稳定，或者是发动机使用到一定寿命阶段时，在结构设计上潜在的缺陷，突然发作的结果。这种发作是具有一定的规律性，绝非偶然。国外发动机故障史上，也曾多次出现过具有同样规律的故障现象。

在几件重大故障的分析中，属于零件工艺不良，材质缺陷和物理性能数据不合规定的原因为数不多。绝大多数故障，是由于零件本身设计不合理，或者处于特定工况条件下所产生。例如涡喷六发动机九级盘断裂，其原因是因镉脆所导致；但以后却又发生了无镉处理的盘，也产生了爆裂事故，经查明是轮盘受交变载荷作用下的应力疲劳破损现象。

涡喷六断轴事件，原因之一是因涡轮轴台阶面圆角 R 减少，但也有圆角尺寸保持不变的轴断裂，查其原因，主要是飞行螺旋科目，导致轴负荷超载，局部应力过大的应力损伤。这是螺旋飞行已超出原轴的设计水平。又如涡喷七压气机四级盘的断裂，如果仅从孔边加工啃刀过大去寻求原因，而忽略工况影响和盘设计中的潜在缺陷和设计不合理等因素，将得不到彻底排故的效果。查看苏联近期对此故障改进措施，他们在四级盘的设计上作了较大改进，估计在苏联也曾发生此类故障，而是从改进盘的设计，故障才得以排除。

故障的发生与排除是要经过一个阶段时间和认识过程的，但不能仅局限于在材质、工艺和操作几方面去寻求原因，也不能认为出现一次就是偶然性故障，存以侥幸心理。大量的事实与血的教训告诉我们，对待故障，出现的一开始便应引起足够重视，要从故障产生的根源上找原因，要严肃对待故障件的设计问题、所处的工作条件和环境影响等，要从内因去分析问题和排除故障。虽然这样做增加了工作的难度，但这才是行之有效的。

目前随同发动机生产批量的增加和使用期限的增长，发动机的故障现象，有朝向如下方面的变化。

(1) 耗消型故障现象增多。

(2) 故障由冷端部件向热端部件转化，即热端部件故障现象与故障率增多。如近年来发生的涡轮叶片断裂、涡轮盘端面封严齿裂纹和导向器叶片变形等。

(3) 出现热疲劳、蠕变(叶片伸长)和疲劳、蠕变交互作用的疲劳现象。

(4) 出现转子系统故障，如涡喷六发动机在使用到四到六个翻修期间，发生压气机转子变形、串动、不平衡加大与轴承严重磨损等故障。

1-3 排故措施与提高可靠性

对故障研究和进行排故工作是一项综合技术工程，不仅是研究故障现象和确定故障性质，更主要的是研究故障发生的原因，产生的环境以及排除的方法。从我国发动机的故障事例中，看出每解决一个故障问题，都是要花费很大的气力和很多的投资，协同攻关，解决一个故障，少则一、二年，多则三、五年，故障的发生带来的损失与影响，又远不止如此。如断轴事件与中间传动齿轮故障事件，仅就更换故障零件一项，发动机的返厂检修与更换费，每项都要花去几千万元；而造成飞机停飞，影响使用与战备，其经济与政治上的影响，又远非用金钱数字所能算清的。

防止故障的发生，要从发动机设计和加工质量等根本方面采取措施，对新机来说，就是要严格贯彻可靠性设计规范，保证产品的质量，保证产品在寿命期间内的可靠性。对现役机来说，所要进行的工作，则十分繁多，尤其是我国现行生产的发动机，多为苏联 50~60 年代设计的机种，经仿制和改型设计，其问题更为复杂。为此我们认为，为减少故障和提高产品可靠性应从以下几方面着手。

1. 关键零组件的强度核实工作

对早期苏联发动机，由于缺乏其零组件的原始强度设计资料，航空发动机又限于当时的技术水平，发动机中有许多重要零组件，仅仅是进行过一定水平的强度核算性计算，主要为

静强度裕度设计, 这种设计仅限于满足静力强度的安全。对大多数的零件没有进行过振动特性的计算与试验, 也很少进行疲劳和疲劳寿命的计算与试验。这样就形成了简单满足强度要求的无限寿命设计的零件, 而实际上零件因疲劳损伤出现有限寿命断裂事故数不胜数。对于热端部件的零组件, 更是缺乏热应力和热疲劳以及蠕变疲劳交互作用等等方面的计算与试验工作。这些现象都使得发动中关键零组件的强度水平与储备不清。故障一旦发作, 则陷于茫然, 无从查源, 给排故带来困难。

为此, 要对发动机中的关键零组件, 利用现代的科学技术与计算水平, 进行必要的强度核实, 其中应包括必要的强度试验工作。发动机中绝大多数零组件都处于循环动载荷下工作, 形成高低周疲劳损伤较为严重, 因此强度核实的重点, 应放在零组件的动强度和疲劳强度核实方面。

2. 关键零组件的寿命确定工作

航空发动机整机寿命是建筑在单元体寿命的基础上, 而单元体寿命又是建筑在关键零组件寿命的基础上。当关键零组件的寿命确定以后, 才能确定发动机的寿命和总寿命。

零组件的寿命将随不同的零件而有所不同, 对于现役的仿制機種, 在原始设计资料缺乏的情况下, 零组件的固有寿命是不知道的, 所以零组件的寿命工作主要是确定其使用寿命。它可以通过对零组件故障的统计规律进行寿命评估, 通过专门寿命试验工作确定其使用寿命, 或者通过一定计算方法进行寿命预估计算等。对于零组件的排故过程, 则是一次极好的寿命评估或寿命再确定的机会。

对于短寿命的发动机, 往往是整机到寿, 则零组件随之不再使用。这时单独确定零组件的寿命则意义不大, 只要确保零组件在发动机全寿命期间不出现故障即可。零组件主要应保证其静、动强度足够。

对于长寿命的发动机, 零组件寿命与发动机寿命或总寿命, 往往是相关的, 即相等或不相等寿命。相等寿命为等价寿命设计, 不相等寿命中可分为倍频寿命设计或不等倍频寿命设计。发动机的翻修寿命, 取决于发动机中那些寿命最短的零组件。发动机在总寿命期间, 零组件可以更换数次或数个。从今后的发展看, 发动机只有按单元体寿命更换的翻修期, 视情维修的检修期, 而没有发动机的总寿命。因此, 确定零组件的寿命, 或单元体的寿命就十分必要。

零组件的寿命与发动机整机寿命同样可以用工作小时计量或用低循环次数计量, 或者是两者并用。低循环次数是指飞机每一个起降为一个循环。在一个循环中, 发动机可有许多种工况, 形成一个变化的载荷谱和应力谱, 零组件便在这样的载荷谱或应力谱下, 来确定其使用寿命。载荷谱将随不同的机型和不同的飞行任务而有所不同。以小时计量的使用寿命与低循环次数寿命之间, 一般没有严格的比例。国内对支线飞机用的民用发动机, 取时间与循环之比为 1:1.2; 对于歼击机的发动机则此比值将加大为 1:2~5。

有些零组件, 我国曾进行过低周疲劳寿命试验, 已确定出其使用寿命, 并配合有一定的理论研究和寿命预估计算, 如涡轮轴; 但有些零组件仅限于寿命试验, 应更进一步配合以理论研究与计算分析, 使这一项工程更为完备, 以积累经验。可是在现役机中, 绝大部分零组件是缺乏这项寿命研究工作的。

对于那些受振动载荷而导致损坏的零组件和重要连接件、传力件, 还应进行高周疲劳寿