航空发动机振动故障监控智能化

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：军用航空发动机振动问题十分突出，是困扰设计、研制、生产和使用新一代发动机的瓶颈。分析论述了高质量数据采集是发动机振动故障监控的关键、基于振动故障机理和数据驱动的智能诊断、人工自愈原理与振动故障自愈调控系统、航空发动机整机动平衡与自动平衡等原理和技术，并对其团队 40 年从事状态监测诊断的研究成果及工程应用作简要回顾。提出了未来航空发动机振动故障监控智能化的发展目标和建议。

关键词：发动机；诊断；故障监控；智能化

中图分类号：TP277；V23 **文献标识码：**C **文章编号：**1000−8829（2019）01−0001−04

doi：10.19708/j.ckjs.2019.01.001

编者按:2018 年 11 月 7—8 日，由航空工业测控技术发展中心、中国航空学会测试技术分会、状态监测特种传感技术航空科技重点实验室主办，航空工业北京长城航空测控技术研究所、《测控技术》杂志社承办的第十五届中国航空测控技术年会在珠海隆重召开。著名的设备诊断工程专家、中国工程院院士高金吉在会上做了《航空发动机振动故障监控智能化》的精彩演讲。

我国军用航空发动机振动问题十分突出，其故障因果关系错综复杂难以诊断，是困扰设计、研制、生产和使用新一代发动机的瓶颈。

一方面，发动机研制过程振动故障定因、定位困难。据某发动机研究所统计，诊断占排故时间的 80%左右，某型号发动机研制过程中发生 200 多起故障，振动问题制约研制进度，曾因轴承故障导致发动机损毁事故。另一方面，振动故障分析缺乏高质量数据支撑。发动机振动超标原因难以准确判定，如采用瓦吉姆测试轴承故障，误判率达 60%以上，导致大量发动机提前返厂。航空发动机振动故障监控智能化发展是快速诊断、精稳调控的基础。

北京化工大学诊断与自愈工程研究中心于 2001 年创建，并获批发动机健康监控及网络化教育部重点实验室、高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室。自 2011 年开始，连续获得教育部、国防科工局等部委项目资助。北化工团队在编人员 19 人，全部具有博士学位，致力于故障诊断与健康监测研究，针对发动机、燃气轮机、柴油机等研发了系列化健康监测系统，并得到了广泛应用。

1 高质量的数据采集是发动机振动故障监控的关键

1.1 航空发动机数据采集获取与振动故障监控国内外现状

国内缺乏高质量大数据支撑，专家溯源诊断及排故难度大。一是机载监测系统比较落后，如某型号飞机发动机只有一个低频速度传感器，测不到中高频信息，难以预警和故障诊断；二是监测参数不同步，体现在性能、振动、油液多种监测参数分别在不同的平台上单独采集，同步分析难；三是试车台多采用 BK 等国外监测仪器，这些仪器都不是实时在线设计的，存在存储数据回溯检索难、无法开发诊断功能软件等问题；四是发动机故障诊断数据采集分析带宽不够，体现在中高频段故障信号特征丢失的问题。

相比而言，欧美国家早在 20 世纪 70 年代就已经拥有航空发动机机载故障监测诊断系统。上世纪 90 年代起，瑞士 Vibrometer 振动监测系统在欧美发动机上都获得了使用。

1.2 中国相关 SCI 论文数量虽然世界第一，但研究成果远未满足发动机重大需求

欧美航空发动机于 20 世纪七八十年代应用振动健康监控系统，我国工业动力机械也于 80 年代开始应用，但军用发动机振动监测诊断与控制起步较晚。近年来我国航空发动机诊断方面投入了大量的资源，高等院校也在持续研究。根据 2012—2017 年统计数据，在故障与诊断方面中国的 SCI 论文篇数占全世界总数的 49%，美国仅占 10%左右；在航空发动机与故障或诊断方面中国的 SCI 论文篇数占全世界总数的 79%，

如图 1 所示（数据来源：Web of Science 核心数据库）。



图 1　中国 SCI 论文数量占全世界比例

虽然 SCI 论文数量世界第一，但研究成果远未满足发动机监测诊断的重大需求。我们不能仅仅是投入了大量的人力，写了很多文章给外国人看和引用，而更重要的是将理论研究与工程结合，将研究成果实际应用到工程之中。

1.3　航空发动机试车复杂环境复杂工况振动响应数据是宝贵资源

航空发动机结构非常复杂，体现在多元激励（转子不平衡、不对中、气动、热变形、松动等）、复杂工况（高速、高温、变转速、变负荷、起降、爬升、俯冲等）、振动响应复杂（振动幅值、相位、频率、模态、瞬变、多频、宽频、非线性，复杂路径，弱信号等）。另外，在发动机高空试车台上各种工况试验，如包容试验、吞咽试验、陀螺试验等，以及各种限制环境下的振动响应也是非常复杂的。可以说，值得研究和深入探索的内容非常多。

发动机振动随工况环境变化有时大，有时小，有时正常。从积累的历史数据看，70%以上的异常状态及机械故障可通过振动形式表现出来。试车振动响应数据库是发动机异常识别和故障诊断重要依据。试车台建设中高质量数据采集系统至关重要。基于上述判断，北化工团队与企业合作在 2005 年开始自主研发快速宽频带同步数据采集系统，可以用在试车台，也可以用在例行监控中的监测系统。系统得到了工业领域的广泛应用，技术指标包括以下几方面。

① 高频采集，采样频率在 200 kHz 以上，支持分析频率大于 100 kHz。

② 同步采集，各种参数可以同步采集，可以判断先后顺序及因果关系。同步时间于 1 μs，同步采集参数可以为 100 个。

③ 高动态范围，可以 500g 加速度的情况下，同时监测 0.01~5000 m/s^2。

④ 高采集精度，背景噪声非常小，在 100 Hz 下可以测 0.01 m/s^2。

2　基于振动故障机理和数据驱动的智能诊断

1987 年辽阳石化从美国首次引进透平压缩机在线模拟量振动监测系统，1991 年开始自主研发数字量实时监测诊断系统，1995 年通过 FDDI 局域网络监测建立设备状态数据库，并建立了机器结构库和知识库，开发应用监测诊断维修决策信息系统，10 年使 12 台关键透平机组故障停机台次减少 90%以上。

1995 年开始，项目团队在原国家经贸委资金支持下研究旋转机振动故障诊断软件包，可以通过人机对话方式诊断 10 类 56 种透平机械振动故障，在国内 20 多个企业得到应用。

2002 年开始北化工团队进一步开展了故障机理研究，由于振动故障征兆谱和故障原因谱对应关系错综复杂，研究出监测不同测点、时间、故障敏感参数三维度诊断原理和方法，即依据多测点振动趋势变化，振动、工况等多参数进行综合诊断，编制专家系统实现自动诊断。

北化工团队对 700 多台压缩机上的 1 万多个点进行监测。每天的数据是 23 TB，每年数据高达八千多个 TB，项目团队从 2009 年到 2018 年上万 TB 数据的积累中，一共积累了 1231 个实际故障案例。在基于大数据的学习中，对机组群的数据进行分析和研究，这样可以把单机的经验和机群的数据结合起来，不断改进规则、完善专家系统，进而提高监测诊断的准确度。从工程上实际反映出来的故障诊断准确率，透平类是 95%，往复类是 94%，详见表 1。

表 1　故障案例大数据库及诊断准确率

故障案例统计	2009-12年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
离心机组	19	12	40	46	45	48	54
泵	23	15	27	32	55	77	80
往复机组	39	25	107	118	133	146	130
年度总和	81	52	174	196	233	271	264
累计总和	81	133	307	503	736	1007	1231

案例类型	实际故案例总和	准确	不准确	准确率
透平类实际故障	150	143	7	95.3%
往复类实际故障	411	389	22	94.6%

可以看出，工业装备故障数据库对诊断排故和研发设计而言是宝贵的资源，多年来我国军用发动机丢失大量的振动监测和故障数据，有好多数据装在了不同光盘里，难以检索和在一个时间平台上去分析，这种现象再也不能继续下去了！

3　人工自愈原理与振动故障自愈调控系统

3.1　人工自愈原理与振动故障靶向抑制方法

德国 Rolf Isermann 教授提出机电一体化系统组成为“五块论”（如图 2 所示），并受到国际社会的认可。他们认为控制功能是人类的大脑，动力功能是内脏，

传感器功能是五官，操作功能是四肢，结构功能是躯体。人有自愈机制，机器能不能有自愈功能，我们在国际上提出了这个观点，并提出了自愈原理。通常机器振动、温度超标就自动停车，能不能通过自愈调控在运行中防止和抑制振动、温度超标，使机器不停机，这是重大突破。

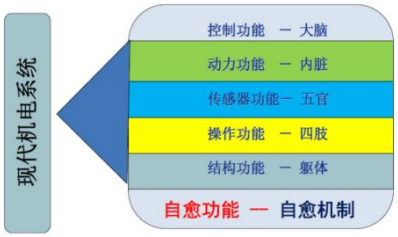


图 2　机电一体化系统组成五块论

仿生机械学对人工智能的研究大大增强了模仿人脑的功能，但忽略了人和动物维持自身健康的重要系统和功能—自愈系统及自愈功能。人工自愈（Artificial Self-recovery，AS）和人工智能一样都是仿生机械学研究的领域。仿生机械学的新领域应研究如何把自愈机制这个人和动物特有的概念赋予机器。

人工自愈是在故障机理和风险分析的基础上，仿生设计并赋予机器自发作用的、维持健康状态的能力，使机器储存、补充和调动自愈力以维持机体的健康状态。这种理论与方法又有别于设备诊断与预知维修技术，是研究如何使装备系统在运行中自行开展“主动控制”，即具备故障自愈功能，在运行中“自行”抑制或消除故障，或对缺陷进行自修复，而不是停机由人来排除故障。

我们所提出的人工自愈原理主要借鉴和移植现代医学“自助调理”的治疗原理，集成状态监测诊断技术、人工智能技术、主动和自适应控制技术、智能结构和自修复材料、嵌入式技术等，研究并应用以故障预防和自消除为目标的装备自主调控和自修复技术，使机械装备系统具备故障自愈功能。自愈调控系统建模仿真框图如图 3 所示。

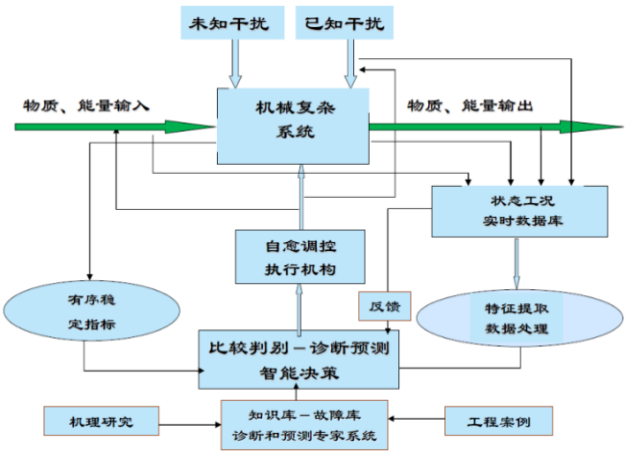


图 3　自愈调控系统建模仿真

由此可以看出，人工智能就是研究使计算机可模拟人的某些思维过程的行为，去完成某一个工作任务，让机器更聪明。人工自愈就是让机器系统像人一样具有自愈功能，确保装备系统的健康状态，实际上让机器更健康。

图 4 所示为超重力机电磁自动平衡系统改变质量分布的案例。转子不平衡振动可造成了轴承密封损伤。自动平衡系统可实时识别不平衡振动故障，通过智能控制器给装在轴上的平衡盘静环指令，静环通过电磁脉冲可使动环改变质量分布产生不平衡力来抵消转子不平衡，可以抑制不平衡振动实现故障自愈。

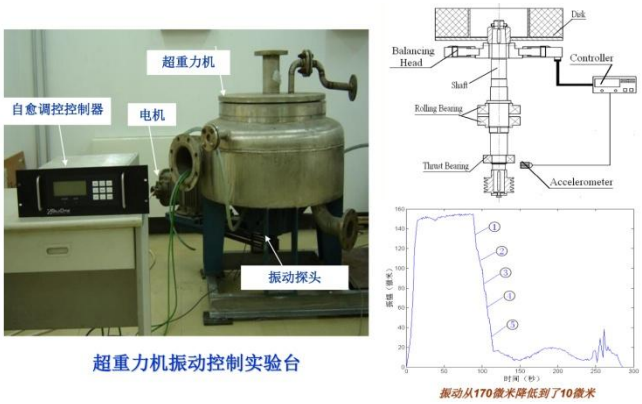


图 4　超重力机电磁自动平衡系统

3.2　赛博物理系统

在过去的几十年里，世界发生了重大转变。以前完全以机械和电子元器件实物形态的形式存在，越来越多地采用嵌入式系统和软件的形式。通过嵌入式系统、软件，把物理系统生产过程，通过互联网建立成一个赛博物理系统，经过对数据系统的分析、诊断、决策，最后来实现控制或者调控。

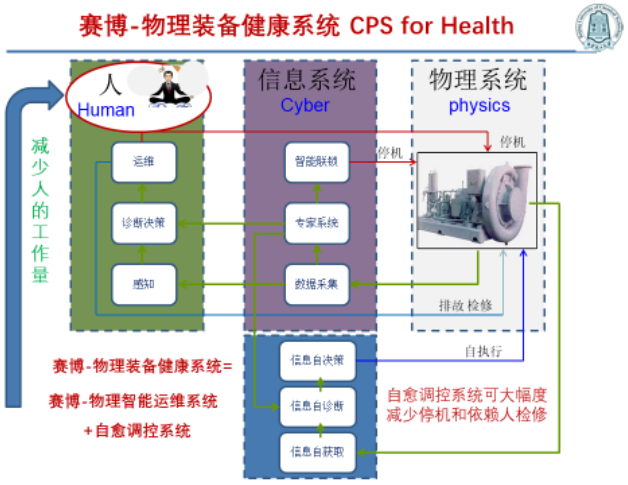


图 5　赛博物理装备健康系统

如图 5 所示，赛博物理装备健康系统是由赛博智能运维系统和自愈调控系统构成。前者可以进行数据采集，再进行分析，主要靠人通过分析诊断结果来进

行排故和维护，也可以由智能联锁控制，这种可称作赛博物理智能运维系统。在此基础上，增加自愈调控系统可以构成赛博物理装备健康系统。

4　航空发动机整机动平衡与自动平衡

4.1　美国自动平衡技术及其应用

自动平衡可在发动机运行过程中通过主动控制改变转子上平衡盘质量分布，实时抑制转子不平衡振动。

美国空军自 2004 年开始研究在飞机螺旋桨上安装 LORD 公司研发的自动平衡系统（IPBS），2014 年，在 C130 运输机上正式列装该自动平衡系统。安装系统后螺旋桨处振动可以降低 90%。

4.2　北化工团队进展情况

1979 年辽阳石化团队开始热风机现场动平衡；1980—1990 年，研究出透平压缩机高速柔性轴系的现场动平衡技术，根治了振动严重超标问题；1990 年至今，应用该技术为辽阳石化、陕鼓、鞍钢等几十台机组排除了不平衡振动故障。

自 2001 年开始，北化工团队跟踪美德自动平衡技术，依托重大基础科研项目，建成了航空发动机螺旋桨自动平衡模拟试验台、发动机整机抽真空电驱试验台，进行了自动平衡诊断识别与整机动平衡原理和方法研究；研究出了适合螺旋桨用轻量型平衡头的结构，优化了设计磁路结构，并减小了平衡头尺寸；同时考虑了各种飞行工况下的自动平衡原理和方法。在电磁式、喷液式、压液式等动平衡技术取得突破，获得和申请国家发明专利 7 项。其中国防专利 1 项授权，美国和欧盟发明专利各 1 项授权。基于多年的研究积累，团队已制定了航发振动故障监测诊断与控制技术发展路线图。基于故障机理大数据分析的专家系统及智能决策系统将对我国航空发动机振动控制发挥一定作用。

5　结论

航空发动机故障监控诊断是一条非常漫长的路。诊断规则是一个知识积累、完善的过程。未来航空发动机振动故障监控智能化的目标应该是：

早期预警——防止事故，治未故障。
溯源诊断——精准排故，改进设计。
安全评估——危险告警，智能联锁。
自愈调控——快准识别，精稳抑制。
故障预测——预知维修，延长周期。

① 高质量数据采集是振动故障监测关键，发动机快速宽频带同步数据采集系统（嵌入式硬件与软件），可获取大量试车、试飞和运维的状态及故障数据宝贵资源，应予以高度重视。

② 发动机故障机理及模拟试验研究，应与试车、试飞和运维状态及故障大数据分析相结合，逐步验证和完善诊断规则，实现故障早期预警和诊断智能化。

③ 地空一体网络化监测，是发动机实时振动监测诊断的必然趋势，应改变理念，尽早决策，逐步实施。

④ 振动故障自愈调控是确保发动机健康监测智能化的核心技术，应加大自动平衡、振动主动控制技术开发力度。

高院士最后以两首七律作为演讲的结束。

《天梦》

军机战鹰卫空天，心脏驱机稳健难。
数据分析精诊断，放矢有的振消源。
神通拓展学研产，军民融合阔海天。
奋起创新追欧美，余生甘奉梦天圆。

《海空梦圆》

物质能量惠人间，数据科学创纪元。
快准识别知世界，稳精调控换新颜。
航机故障能防预，潜艇消声抑振源。
老轨夜航安稳睡，军民融合梦遂圆。

从这两首小诗中，我们深刻感受到了高院士矢志不移的航空报国情怀，感动于老一辈科技工作者对航空发动机事业所做的贡献，也倍感使命责任重大。

□



作者简介

高金吉（1942—），设备诊断工程专家，中国工程院院士，辽宁本溪人。1966 年毕业于北京化工学院，1993 年获清华大学工学博士学位，1999 年当选为中国工程院院士。

1988—2001 年任中国石油辽阳石化公司副总工程师。2001 年至今任北京化工大学教授。2013—2017 年任北京化工大校学术委员会主任。科技部 973 计划首席科学家和某 973 项目首席技术专家，空军建设发展院士专家顾问。现兼任国务院安委会特种设备专委会副主任。2018 年 5 月至今任工信部工业互联网战略咨询专家委员会委员。

在国内率先在工业企业开发应用设备诊断技术，主持研制出机泵群网络化监测诊断系统，对 70 多家企业 2700 余台机组远程实时监测诊断，避免百余起重大事故。发表论文百余篇，出版《机器故障诊治与自愈化》等著作 2 部。2008 年任世界工程资产管理与智能维修大会主席，2016 任国际监测诊断与维修管理（COMADEM）学术会主席。2016 年，国际工程资产管理协会（ISEAM）授予高金吉院士年度唯一的“世界工程资产管理先进领域终身成就奖”荣誉称号。