

■ 唐德尧 著

广义共振、共振解调 故障诊断与安全工程

——铁路篇

中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

广义共振、共振解调 故障诊断与安全工程

——铁路篇

唐德尧 著

中国铁道出版社

2006年·北京

内 容 简 介

故障诊断科学是一门新近发展起来的边缘科学技术,涉及传感器技术、信号分析与数据处理、系统辨识、人工智能、通信技术、计算机软硬件等众多研究领域的内容。本书从基于共振解调技术的“JK00430 铁路机车走行部车载监测装置”的成功应用范例入手,提出了广义共振理论,广义共振漂移与疲劳、裂纹识别技术,广义共振冲击疲劳—构件冷作疲劳预警等一系列新的方法及故障诊断理念。本书既有翔实的理论分析,又密切联系工程实践,既可用于领导干部进修,又能服务于广大监测、维修工作者和装备设计、制造研究人员,是一本通俗易懂的实用书。

图书在版编目(CIP)数据

广义共振、共振解调故障诊断与安全工程. 铁路篇/

唐德尧著. —北京:中国铁道出版社,2006. 11

ISBN 7—113—06053—6

I. 广… II. 唐… III. ①故障诊断②安全工程
③铁路运输—故障诊断④铁路运输—交通运输安全—安
全工程 IV. ①TB4②X93③U2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 134209 号

书 名: 广义共振、共振解调故障诊断与安全工程——铁路篇
作 者: 唐德尧
出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)
责任编辑: 王明容 薛 淳
封面设计: 刘 佳 崔丽芳
印 刷: 北京精彩雅恒印刷有限公司
开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.75 字数: 493 千
版 本: 2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷
印 数: 1~6000 册
书 号: ISBN 7—113—06053—6/U·1685
定 价: 85.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:010—51873138

发行部电话:010—51873169

序

我国的故障诊断与安全工程经历了漫漫征程——时而波澜壮阔,时而细流涓涓;时而凝神揣度,时而异军突起!

一批立志于此的学者与工程技术人员,在锲而不舍地征战着。

唐德尧教授就是诊断与安全工程领域这样一位孜孜不倦的先行者。

1985年,在上海金山召开了第一届全国设备监测诊断技术推广应用会议之后,中国的诊断与安全工程出现了如火如荼的大好局面。一大批志士仁人在主攻简易诊断技术及其普及的时候,唐德尧教授却另辟蹊径,继续发展他已研究多年的广义共振与共振解调精密诊断和自动诊断技术。

不久,当普及简易诊断的工作告一段落时,国家经济进入了飞速发展的新阶段。在并不健全的经济基础上凸现的这种高速发展形势,要求用新的理念来引导诊断理论与技术的研究和实践。于是,人们纷纷转向探索新的理论、方法、装备的阶段,颇有些青黄不接的势态。

1992年,在黄山召开了全国第二届设备诊断技术交流会。唐德尧教授发表了长篇论著《共振解调技术在我国设备诊断中的应用和发展》,标志着他所研究的共振解调技术已经进入了实现自动诊断的实用阶段。以该论文为基础,他在次年于北京召开的中日维修技术研讨会上的演说,博得了日本保全协会代表的高度赞誉。紧接着,1994年,中国设备管理协会的领军人物——副会长徐滨士将军率领有我和唐教授等加盟的中国代表团赴欧洲出席欧盟第12届维修与诊断会议,恢复了一度中断的中欧诊断技术学术界的联系,考察了欧洲的设备维修诊断工程的进展与技术成就。

结合我国的经济特征,徐滨士院士向我所主持的“中国设备管理协会设备诊断工程委员会”提出了指导意见,成为了在1997年于烟台召开的“97全国设备诊断工程会议”的主题词:学术化、工程化、产业化、社会化,向设备诊断要效益。

近10年的时间过去了。我们一直在关注着,希望有更多的中坚力量在这个高深层次上,在四个现代化的进程中真正实践我们委员会提出的这个具体的“四化”,能够有所发现,有所发明,有所创造,有所前进。

今天,我们高兴地看到,唐德尧教授成为了设备诊断工程开发应用的杰出代表之一。他倾注大半生的精力,为我国的诊断与安全工程孜孜以求,艰苦探索,为实现了“学术化、工程化、产业化、社会化,向设备诊断要效益”的宏伟目标作出了突出贡献。

在天命之年,他与他所带领的团队奋力创建了铁路机车监测诊断高新技术产业公司,把他的研究成果工程化、产业化,推出了被技术鉴定会评定为具有国际领先水平的“JK00430铁路机车走行部车载监测装置”等产品;该产品成为我国铁路第6次提速所采用的一种重要技术装备,其先进的安全诊断技术成为铁路提速成功的必要条件之一。该产品在2005年实现了1.3亿元产值的推广业绩,据用户的使用报告推算,创造了数以十亿计的减灾和社会效益,这是我国诊断与安全工程产业的一个创举!

唐德尧教授的这本著作《广义共振、共振解调故障诊断与安全工程——铁路篇》似乎姗姗来



迟。现在看来,这与他的学术风格密切相关。

唐德尧教授不仅平易近人,他的著作更显朴实。我们的机械故障诊断学,是一门密切结合工程装备实际的、多学科交叉融合的工程科学,而读者却是来自若干不同专业的从事设备维修、故障诊断的工程技术人员和工人。有道是“隔行如隔山”,这可能就是诊断与安全工程的著作难写的原因之一。本书的一大特点就是通俗化。相信它能受到广大基层工程技术人员乃至工人的欢迎。我们诊断学术界历来倡导密切联系企业广大维修工作者,本书作者的艰辛努力取得了这样的成果。

本书不仅传承了前人的学术成就,更注重于具体诊断对象中出现的行业特殊课题的解决。著作提出了若干创新的诊断理论、方法、准则、判据和数学模型。这些问题的解决,没有繁琐的数学推导,而是从工程中现实案例的特征分析切入,进行抽象、升华,然后浅显易懂地悄然托出,使读者易于理解和接受。经过大量的工程验证之后,从数以千计的案例中筛选出的典型案例入手来诠释高深的理论。这就是本书的风格,也就是本书迟迟推出的原因。从这种意义上说,唐德尧教授更像一位诊断技术的科普作家。

解决装备安全工程的监测与诊断问题,是我国这样一个工业基础比较薄弱而经济发展迅猛的国家所特别需要关注的问题。本书在此领域的成就不仅丰富,而且颇有深度。若干在国际领域久攻不克的动态诊断问题,例如车轮、齿轮的裂纹、裂损问题,在本书中都有解决的案例并从方法论的高度进行了深入研究。

为了做好诊断预案,应对、识别可能出现的故障,诊断理论工作者必须防止固步自封。因为现代工业交通装备也是多技术成就的融合、多结构的集成。如果安全监测与故障诊断装置只会其一而不适其二,则不免难于周全服务,诊断产品也就难免淡出市场。因此,在铁道部邀请我们评审该技术产品的时候,我们给作者出了难题:要求产品在原先确定的诊断轴承、齿轮和踏面故障的基础上,拓宽为“走行部监测”。

我们高兴地看到,作者继承了诊断学术界的求索精神,在很短的时间内,拓展了已取得的成果!

例如,本书所论及的火车车轮踏面诊断问题,原先的定义是解决常规的、踏面(车轮表面)剥离、擦伤监测问题。但随着车速的提高,出现了更加危险的车轮浅层、深层、周向、径向等裂纹的问题,而这些问题都在他们的拓展中一一得到解决,并在书中列举了许多的成功案例;监测装置还没有遇到的故障类型,也在书中作了分析探讨。

实现这种“以科技开创市场、以科技引导市场”(作者在90年代初提出的)知识经济理念的重要实践之一,就是作者在本书中提出的“故障机理诊断”。

这一理念或者理论的可贵之处在于,它不仅为研究诊断预案提供了建立基础数学模型的可行途径,从而使得安全监测装置具有某种先见之明,在某些鲜见的故障一旦出现时,能立即捕获它、界定它、发出警报、防止事故,使得凡具此机能的诊断技术与装置能够稳踞市场而立于不败之地;而特别可贵的是,故障机理诊断剖析了机械发生故障的原因,特别是重复发生同类故障的原因,如能引起机械设计师们的关注、吸收、提高,就有可能促进装备制造业的进步,为制造业创新提供科学依据和技术支持。

本书回避了可能使它生涩难懂的理论推导,在字里行间却处处体现着作者自己研究问题和引导读者研究问题的科学方法和哲学思想,使得作者多年潜心研究而提出和发展的广义共振、共振解调理论、基于故障机理的诊断理论,犹如一汪清水,清澈透明地向我们展现了理论的自然性、普遍性和实用性。期望与各位同仁共勉,希望有更多年轻的有志之士循此前进。

我们要努力实现学校、科研院所、诊断产业与工交企业的广大同仁团结协作,自主创新,力争在学术化、工程化、产业化、社会化的康庄大道上,与时俱进,为繁荣具有中国特色的诊断与安全工程科学技术,为祖国现代化建设贡献力量。

中国工程院院士

高金吉

2006年9月12日

序

故障诊断科学是一门新近发展起来的边缘科学,它涉及众多研究领域,如传感器技术、信号分析与数据处理、系统辨识、人工智能、通信技术、计算机软硬件等方面。进入20世纪90年代以后,我国故障诊断技术在理论、方法以及系统的研发等方面都取得了长足的发展,但在生产中广泛应用、取得显著经济效益的却不多见。

日前,我校的兼职教授唐德尧先生将他近20年来在共振解调技术方面的研究成果以及在铁路机车故障诊断工程化方面积累的大量案例,进行了总结与归纳,汇集成一本专著。我有幸先睹为快,受益匪浅。

唐德尧先生是我国早期从事故障诊断领域研究的开拓者之一,20多年来一直在故障诊断理论、方法和实用系统研发上辛勤耕耘,成绩斐然。由于科研成就突出,他荣获了全国优秀科技工作者、“五一”劳动奖章、国家级专家、全国劳动模范等多种荣誉称号。2001年唐德尧先生创建了北京唐智科技发展有限公司,致力于研究成果的产业化,在他的领导下,经过几年的努力已形成了系列的技术和产品,包括共振解调信息提取技术、共振解调信息分析技术、专家诊断系统以及预警决策系统,所研发的各类故障诊断仪器已广泛应用于机车走行部件的状态监测。

共振解调技术主要用于旋转零件,如齿轮、轴承、火车车轮等零部件故障信号的提取,是判断设备状态的一种非常有效的方法。所谓共振解调方法就是利用机械、电子谐振的原理,提取并放大机械传动的零部件由于故障而产生的能量微小、频谱丰富的冲击信号,经过包络解调等方法获取故障信息。唐德尧先生结合大量的工业应用实例,在理论上进一步升华,不仅提出了支持共振解调自动诊断专家系统的若干理论、准则、判据,还提出了广义共振理论,广义共振漂移与疲劳、裂纹识别技术,广义共振冲击疲劳——构件冷作疲劳预警等一系列新的方法和实用技术以及故障机理诊断理念,书中随处洋溢着作者的创新精神。最近,研发成功的JK系列铁路机车车载走行部监测装置集成了多年来的研究成果,解决了一系列技术难题,经受了为我国铁路第5次提速安全保驾护航的考验,而且已纳入了第6次大提速的重点装备和安全标准线建设规范。

本书把广义共振和共振解调基本原理、关键技术与实际应用的案例分析相结合,从几个不同角度作了详细的介绍,既有翔实的理论分析,又密切联系工程实践,是一本理论联系实际、通俗易懂的好书。期望本书的出版能够为推广故障诊断技术、为我国现代化建设发挥重要作用,也相信它能让更多的读者受益。

北京科技大学

徐志桥 谨识

2006年9月于北京科技大学

序

可喜可贺,由唐德尧研究员立著的《广义共振、共振解调故障诊断与安全工程——铁路篇》现在与读者见面了,这将为我国轨道交通装备技术界提供一份很有价值的学术财富。

当我阅读这本书稿时,我深深地被书中理论与实践高度结合、又面向应用现场的内容所打动,让读者身临其境。因为我长期从事轨道交通电力牵引装备的研发工作,随着“高速、重载”的发展,装备诊断与安全保障技术越来越显得需要高新技术的支撑,在这方面航空领域发展很早,我国包括唐德尧研究员在内的一批从事装备诊断与安全工程的学者与工程技术人员,通过广泛研究,取得瞩目的成就。我在致力于“高速、重载”电力牵引装备研发的进程中出现了对于安全检测的强烈的需求,有幸开始了同唐德尧研究员的合作,将实现军转民的技术——铁路机车走行部车载监测装置率先用于轨道交通装备上,实践证明了“广义共振、共振解调故障诊断与安全工程”的理论与工程实践的可行性,并使成果得到推广,实现了工程化和产业化,这要感谢唐德尧研究员和他的同事们。

这本著作的问世让我无比欣慰,它既是一个学术总结,又是一种技术传递,相信正值我国鼓励自主创新、建设创新型国家的征程中,“广义共振、共振解调故障诊断与安全工程”技术定会在新形势下做出新贡献。

中国工程院院士



2006年10月

致 谢

本书之所以能够写成,我首先要感谢谭维克先生和他倡导建立的北京唐智科技发展有限公司,他为我们的技术创新提供了机遇及用武之地。因为我们毕竟不是专职的大学教授,不能太过超前于社会需求去研究“异端邪说”,因为脱离了为现实社会的服务,我们就将失去生存的条件,也就不能异想天开了。

感谢我的同事们——王定晓、张鹏、李辉、宋辛晖、黄贵发、曾承志先生等,因为我的学术观点或“异端邪说”的修订、验证、工程化、产业化、质量保障与技术监督过程,是他们在唐智科技发展有限公司的经理部门领导下共同进行的。

感谢我的同事段中海先生和产品制造部王巍松先生,他们领导的制造部门日以继夜的拼搏,在短短的几个月中,生产了六大干线急需的大批装备。

我要特别感谢我的同事——徐中先生。我的同事们多数是由我的学生成长起来的技术领导,而徐中先生则是我们为实现产业化而聘请的经济师。他卓越的理念和作为,加速了科技成果的推广应用,也使工程化、产业化迈上了一个新的台阶。实践是检验真理的唯一标准,我感谢他带领的团队所从事的科技推广实践给予我的帮助。要把一种基础理论变成服务于社会的工程化产品,所需要的科学知识,所涉猎的技术领域,所面临的经营运作,是那样的广阔、深邃,决非书生的闭门造车所能成就,而是需要一个完整的工程化团队,进行不懈的共同努力!本书之所以有如此丰富的工程资料,就是他们在用这门技术的工程化产品为我国铁路第六次大提速所做的技术准备中,通过大规模的实践所获得的。徐中先生领导的一支近 50 人的技术服务队伍在杨政明、吴拥军先生的具体组织下,奋斗在全国的用户现场,不仅直接为监测装置对列车的保驾护航做好服务,而且为我们的研究发回了源源不断的素材。

细心的读者可以看出,本书的若干章节似乎是一些断续地记述研究工作的提纲而非全部。的确,研究的许多收获和未经验证的论点还没有体现在文中,所以它还需要完善。但在为着工程目标所进行的前期研究中,已经投入了许多同志的共同劳动。

张鹏同志在附录 1 的《关于谐振器机理的研究——串联谐振器的研究》中花费了许多的精力;何群、宋辛晖同志在有关广义共振理论与非转运动机械的随遇激励侦查技术的方法论的软件实现方面做出了重要的贡献;而为了实现基于非转运动机械的随遇激励侦察技术的检测传感器、仪器、计算机等硬件实现方面,王巍松、郭月媛、陈万隆等同志做了许多的工作;在用非转运动机械的随遇激励侦察技术于机车、客车的现场试验过程中,宋辛晖、黄贵发等同志付出了艰辛的努力;整个研究工作的组织,则是由北京唐智科技发展有限公司的经理部门,特别是研发工程中心王定晓、研发部李辉等同志执行的。

我感谢我们的学术化、工程化、产业化队伍,如果没有他们的共同努力,不仅我以往的研究成果将沦为故纸,而且不可能设想有新的发现、发展和创造。

我更希望研发工程中心的同志们和研究生部的学员们继续努力,做好尚待细化的大量研究工作,不断进取,不断攀登,不断升华,不断创新!共同去摘取那灿烂的明珠!

媒体褒奖我们是不向困难(故障)低头的千里马。而我听到这番议论后首先想到的却是应当感谢那些让马儿出来遛遛的伯乐们!



在我即将退休的时候,欣逢中国铁道高速重载战略如火如荼的进程。铁道部在改革开放的深化中,提出了引进高科技、引进成熟科技的指导思想,一批有智识的领导人士在对国内外安全监测技术的广泛调查中,注意到了我们所研究的诊断技术。

铁道部运输局装备部、铁道部科技司的有关领导听取了我们的技术汇报,为我们指出了攻坚的方向;

北京铁路局毅然与我们合作,北京机务段充当了这一高技术工程化的急先锋;

我们不负众望,小范围内的试验实践初战告捷,通过了北京局科委组织的技术鉴定,科技成果评定为国际领先水平;

北京铁路局机务处、计划处做出了扩大试验的决策,在客运机车上推广、扩大试验,在为第5次大提速保安全的考核中赢得了空前的丰收;

铁道部运输局装备部等多个司局紧接着组织了对工程化成果的联合考核、审查和验收,并将项目纳入为我国铁路第6次大提速安全标准线建设,创造了科技成果为生产、安全服务的高速度。

社会的进步、经济的发展、铁道的高速重载战略、领导部门的高瞻远瞩,给与了千里马以尽情驰骋的广阔天地,激励我们跃出必然王国、飞入自由王国,为中国铁道建设的“科技保安全、装备保安全”锦上添花!

当人们获得一种新的认识手段并投入成功应用之后,往往会发现还有新的未知尚待探索,从而提出新的需求。

我们提供了预警故障的监测手段,所揭示的是故障的现象,而不是故障的原因。而针对现象的维修结果未必是十全十美的——如果故障件是受害者而不是始作俑者,则更换故障件为新品仍然达不到保障该部件长期安全的目的,于是提出了“怎样修”的问题。面对用户的需求,我们进行了归纳,认为必须将故障诊断推进到故障机理诊断的新高度,否则就不能完美地实现我们的服务目标。

实现故障机理诊断需要对诊断对象有充分的了解,而对于诊断工作者来说并不容易。

因此,我在与铁道部门的领导和工作者的交往之中,无论是我去拜访他们,还是他们来看我,寒暄后的第一个话题,就是我说:“对不起,请教点问题!”特别令我舒心的是,许多一线工作者了解我的嗜好,当他们发现新的故障现象时,总是热情地招呼我:“唐教授,得空过来一下,我又给你捡了些破烂!”他们及时地给我送来了值得研究的第一手资料。

我从他们那里获得了许多的铁路知识和对诊断对象的鲜为人知的信息,从而为我完成本书的若干研究奠定了重要的基础。

我衷心地感谢机务段的基层领导和检修、检测工作者们,他们的敬业精神、一丝不苟的工作作风、对故障穷追不舍的韧性,使我们的诊断技术在他们的核查工作中不断升华,不断扩展服务功能。如果说我们“有所发现、有所前进”,其中便有他们的功劳!

然而,研究一种理论不易,要对这种理论进行工程验证使之能为工程服务则更不易。

我衷心感谢我们的国家和铁道部门。飞速发展的经济,提高经济质量与效益的新观念,科技兴路、跨越式发展的战略思想,不仅使得我们储备多年的研究成果有了用武之地,而且更加开阔了我们的视野,树立了更高的研究目标,涌现了更多的研究成果。与其说我们在争先创优,还不如说是时势造英雄!铁路六大干线安全标准线建设把我们研究的“JK00430 机车走行部车载监测装置”列为重点安全装备,使我们的诊断技术装备一年之内遍及全国,涉及几乎所有车型,为我们的新理论和技术提供了全面的、严肃的工程验证的条件。

马克思在《资本论》第一卷第二版的跋中说：“研究必须充分地占有材料，分析它的各种发展形式，探寻这些形式的内在联系。只有这项工作完成以后，现实的运动才能适当地叙述出来。”监测装置不负众望，在挖掘安装本装置之前机车、车辆在多年运行中潜藏下来的大量故障隐患的同时，数以千计的成功案例从全国各地向我飞来，如同跃入了错落有致的信息宝库之中，令人兴奋不已，催人奋进不止，我欣喜于它们不仅验证了加载入监测装置的诊断理论和技术，更愉悦于它为我们开展故障机理研究提供了丰富的素材。

我还要感谢学术界、教育界和工程界对本书的关爱和指导。

高金吉先生是我在故障诊断学术界的领导，他在对本书所作的序言中，对我们在学术化、工程化、产业化、社会化方面的工作成绩给与了充分的肯定，并提出了殷切的期望与鼓励；

徐金梧先生是我所兼职的北京科技大学的校长，他在为本书所作的序言中，从教育学的严谨角度，对我们勤于学术创新和理论密切联系实际地传授科学技术知识的风格给与了热情的鼓励，进而对本书可能给与社会和读者的贡献寄予了深情的期待；

刘友梅院士是我国在铁道提速进程中首先发现和关注我们这匹“千里马”的伯乐，是他首先在机车走行部安全监测方面给我们以历练的机会，他更是鞭策我们不断进步的严肃师长。我们在机车转动部件故障监测方面的若干技术进步，就是以他所提出的新的需求作为“发明之母”而诞生的；我们在非转运动机械故障监测技术方面的创新，更得益于他和高金吉院士在主持铁道部关于本技术产品的评审会议时对我们的严格得近乎苛刻的激励和具体帮助，而每当我们取得了新成绩的时候，他又如同呵护新生的幼苗一样给与我们以热情洋溢的鼓励。他为本书所作的序言，表达了工程应用部门对于我们根据工程需求积极开展技术创新、又用创新成果潜心为铁道高速重载服务的坚毅精神之褒奖。

最后，我还要感谢唐智科技企划部的吴文红、刘佳、刘志林三位同志，她们为本书的组织、编汇、审查、校对、出版付出了大量的努力。

草木知春！我衷心感谢社会各方面给与我们的关爱！借助于这份珍贵的力量，我多年的宏愿和思想，得以转化成能为社会服务的科技创新的成果；这份珍贵的力量赋予了我以新的灵感和创新的源泉。

故障诊断的产业化、工程化、社会化工作方兴未艾。诊断不仅与安全息息相关，而且也与社会经济效益密不可分。我为我们的技术和产品能够为我国高速发展的经济保驾护航而欣慰、自豪！我们将沿着“有所发现，有所发明，有所创造，有所前进”的康庄大道，为建设我们的创新型国家而持续奋斗！



2006年10月

引 言

装备安全,是当今社会关注的焦点之一。

在和平年代里,威胁人们生命财产安全的因素,除了局部的自然灾害和恐怖活动之外,装备的安全状况就首当其冲。因为人们的主要日常活动,离不开利用装备进行生产活动和利用装备服务生活,这就决定了装备与人类接触的广泛性,从而也就决定了装备对人身安全、社会安全 and 经济安全的重要性。

疾病已经基本上不能够左右人类的安全了,因为医学科学的进步,人类对疾病建立了较为周全的应对机制,并有相应的指导科学——诊断科学、医疗科学、免疫科学、优生科学等等。

然而,对于近百年来人类所推动的装备制造业和所制造的装备来说,人类对于他们的注意力还主要集中在研究、设计、生产等方面。虽然建设了众多的维修部门,还远远没有达到现代医学相对于人类健康的程度,因为虽然维修装备的故障远比医治人类的疾病简单,但保障装备安全的诊断装置和手段却远远落后于对人类(甚至动物、植物)疾病的诊断装置和手段。以至于出现了这样的现实:

源于装备原因——车祸、空难、矿难、爆炸、污染等等引起的死亡率,占据了人类非自然死亡的绝大比重。更是人类生产活动发生经济损失的主要原因!

装备像是一把双刃剑,一方面造福于人类,一方面却又致祸于人类。

我国一批有志于装备诊断与安全工程的学者和工程技术人员,从 20 世纪 70 年代末就开展了广泛的研究,所取得的技术成就,不仅在国际上有着举足轻重的影响,而且将对我国这样一个经济高速发展的发展中国家的装备制造和运用安全产生深远的影响。他们像医生关爱人类的生命一样,关爱着社会装备的寿命。

众多的学者在研究各种各样装备的诊断技术,所涉猎的物理参数非常广博,所关联的学科也多种多样。甚至有学者惊呼:计算机技术的最新成就,为什么总是被很快应用到了诊断领域?我们近十年来的诊断实践的需求也曾多次迫使计算机技术的进步。

一些学者提出了“自愈(修复)”理论,试图寻找故障自修复的途径或赋予装备以某种人工智能使之能够尽量避免损害和引发事故;

还有学者提出了“再生(制造)”理论,试图对已有的、因为先天不足而发生故障的装备进行“免疫治疗”,使设备获得新生和长寿;

我们则提出了“故障机理诊断”概念,期望在通过故障诊断发现故障的同时,研究发生故障的机理,以便如同提出优生建议一样,为装备的研究、设计、制造创新提供基于结构完整性的合理化建议。

而在此领域,本书将要介绍的“广义共振”理论体系,就包括了用于故障冲击诊断的共振解调技术、识别非转运动机械隐患的广义共振随遇激励侦察技术、通过故障诊断探索故障原因的故障机理诊断技术、通过故障机理研究联合广义共振技术提出的装备优化设计的



观点等。

而在此领域,经过数十年致力于发展、创新共振解调技术,终于推进了诊断技术的工程化应用,产生了丰硕的成果。因此,本书将先从基于共振解调技术的“JK00430 铁路机车走行部车载监测装置”的成功应用范例入手,按照“需求是发明之母”的规律,提出若干工交装备中需要解决的诊断问题及其解决效果,然后再引导到介绍相关诊断技术。

本书的第一章是根据在“中国铁路和城市轨道交通国际研讨会”上的演说稿整理的对于本书的概述性描述。它是铁路机车车辆管理部门感兴趣的,他们可以根据这些成功的诊断实例,了解本技术的功能范围,了解识别故障、处理故障的案例方法,以便指导基层维修部门充分利用这种新装备、新技术,做好“设备保安全、技术保安全”的现代化维修工作。

本书的第二章通俗地介绍广义共振的基础理论,并基于广义共振理论讨论了非转运动机械的若干诊断技术,其中包括非转运动机械随遇激励侦察技术、相对积函数、基于振动相对积的构件断裂识别技术、基于振动与共振解调滑动相对积的局部裂损识别技术等;也从故障诊断角度研讨非转运动机械的优化设计问题。

本章起初是作为给研究生讲授故障诊断基础理论的讲义来编写的,比较强调学习与研究问题的思想方法。面对机械故障诊断的需求,诊断技术工作者需要调查机械的故障现象、机理、信息,研究故障信息的识别技术,提出敏感、识别特定故障的方法论。

这里,特别重要的,就是所选择的信息参数必须是对于机械故障特别敏感的物理量。

本文将根据自然辩证法的原理,着重研究广义共振现象及其应用技术。其中包括提取、分析机械的广义共振信息以识别机械结构状态的劣化,和利用广义共振制作敏感器件提取机械自身发出的微冲击信息以识别机械的早期故障。进而通过若干机械故障诊断方案的设计实例分析,归纳出能够帮助今后进行机械故障诊断和其它故障诊断研究的基本方法。

本书的第三章诠释共振解调技术在提取冲击性故障信息方面的技术途径和优点。

本书的第四章重点介绍有关转动机械故障冲击的共振解调诊断理论、准则、判据等基础技术。

本书的第五章通过大量典型案例的分析,研究故障诊断与故障机理诊断之间的联系,以期为广大维修人员利用故障诊断信息进行故障机理诊断来提高维修水平,为广大设计制造工作者提供基于诊断发现的结构完整性方面的缺陷资料,为他们从事的制造业创新提供参考。但为了达到上述目的,我们必须对自然现象作深入的研究,从而使我们在理论上有了新的发现,例如研究齿轮故障冲击引发广义自由振动、进而诱发强烈自由冲击的频谱特征,提出了旨在描述怪异频谱的“重组频谱干涉公式”;研究齿轮与轴承不匹配而易于引发打滑擦伤故障的问题,提出了旨在识别该类轴承打滑擦伤内因的、齿轮与相关支承轴承匹配设计的“同步系数公式”等。

笔者在此郑重提出“故障机理诊断”的命题之前,此种诊断工作已进行良久了。

进行故障机理诊断之所以必要的原因是多方面的。

开展故障机理诊断研究最早的恐怕还是故障诊断研究工作者。

而进行故障机理诊断的最大受益者,则是装备设计制造者和装备使用者。

故障诊断的使命是挖掘装备的故障和隐患。

装备设计、制造者的使命是制造尽善尽美的装备。他们主观上认为他所制造的装备是完美的,无隐患的,否则,他将改进它!岂能容允自己的“爱子”存在先天不足?

而装备使用者也许尚差一筹,因为他们不如装备制造者那样对装备有那样多的本质的了解,以致在装备维修的过程中甚至尚存知其然而不知其所以然之处,从而难免有不善、不当的

维修。

由于这个缘故,矛盾便发生了:

某部件的故障诊断报警,维修者更换为新部件,结果不久又有报警,于是维修者向诊断装置设计者提出要求——你干脆告诉我怎么修吧!不然你就别报警。设计者则莫明其妙——为什么它故障多发?

诊断工作者似乎被推上了被告席。

现实表明:

维修工作者需要进一步了解、认识:某些故障为什么多发?某些部件为什么换新后仍然损坏、报警?怎样减少无谓的备品备件消耗?怎样减少维修工作量?怎样提高机车车辆的使用效率?

我们还认为,装备设计工作者也需要利用新的技术手段加深对于所设计的装备的认识,克服人类不可避免的、源于认识条件限制而存在的偏见、错觉、误决,以便改进设计,创新设计,推陈出新,不断进步。

故障诊断就是这样一种新的认识手段——它提供了装备损坏的早期信息,从而通过“为什么损坏”的研究提供对于装备加深认识的条件。

故障机理诊断就是研究如何利用故障诊断信息发现装备故障原因的工作。而要做好此项工作还有重要的一面,就是对于装备的充分了解。而这却不是故障诊断研究者的擅长。因此应当说,装备设计、维修者不仅需要故障机理诊断,而且对此有得天独厚的条件。

然而,本章所进行的基于案例的故障机理诊断研究,便很自然地首先落到了故障诊断工作者的肩上。但是,我认为此项工作需有装备设计、制造、维修者来做。而诊断工作者应做的,则是在基于案例的故障机理诊断之后,努力升华,提炼出能够帮助我们认识自然规律的方法,揭示更多的自然规律对于人造装备的制约关系,从而帮助装备设计者树立更加完美的严肃性、科学性和全面性。

本章将采取基于案例的研究方法。完全针对实际,能够使研究结果(如果正确的话)立即服务于实际,(如果不正确的话)或能够立即引起百家争鸣,也许对于装备制造业的进步能够起到立竿见影的作用。

特别是基于案例归纳的自然规律,则更待百家争鸣来完善。因为认识规律是很不容易的,特别是通过失误(故障多发则说明着设计或选型尚存不足)认识正确的规律更不容易,因为“没有任何人想把装备干坏!”,因为我们现在的任务是想着解决“没有人能保障他的设计、工艺是尽善尽美的”问题前进一步。

这里的案例分析和故障机理诊断,也将如同第一章那样,以机车车辆走行部的部件分类进行。

本书的一部分素材原本是取自一册为培训维修干部而编写的讲义,在两年来的数十次培训班上做过演讲并逐步作出改进和丰富。培训领导干部,主要是传授新的理念,以便他们能够站在不断创新、不断疾进的科技潮流的前列,能够知其然而又知其所以然地领导企业的装备维修工作;同时,本书的另一个服务对象,则是应用(根据这些理论研制的)诊断装置进行装备故障诊断和维修的监测工作者和维修工作者,他们颇像医院里的理化检验员和外科医生,他们所关心的是信息和病态之间的对应关系,是诊断的准确性,大量需求的是简单实用的法则,而不是内在的数学物理方程。至于第三部分对象——装备设计人员和制造、维修工艺研究人员,他们感兴趣的则是故障诊断所揭示的机械发生故障的内因和外因,也就是故障机理的诊断。而实现这一



点,则不仅需要了解诊断技术,还更需要了解甚至掌握装备设计技术,否则难以中的。而在这方面,笔者是外行。但为了做好故障机理诊断的倡导工作,不得不先出来鸣锣开道,因此,表现笨拙之处在所难免,盼请专家们斧正。

因为本书的读者对象是忙于日常工作的工程技术人员,为了能够“速成”,我们尽量以浅显的推理、比喻、仿真模型来说明我们所论的原理,而把必要的数理推导、典型问题的分析作为附录。目的是让从事不同工作而又需要了解本诊断技术的工程技术人员能够在读过本书相应的篇章后就能开展工作。

2006年7月

目 录

第 1 章 共振解调技术在机车走行部监测装置中的主要应用收获	1
1.1 车轮、踏面问题	2
1.1.1 车轮踏面浅层裂纹报警,克服超探盲区	3
1.1.2 车轮踏面深层裂纹报警,立即被超探证实	3
1.1.3 车轮踏面隐蔽空洞与径向裂纹报警	4
1.1.4 车轮踏面径向裂纹报警	5
1.1.5 车轮不圆度报警	6
1.1.6 踏面故障冲击危害减振器、六连杆的安全	6
1.1.7 踏面故障引发的冲击危害轴箱轴承的安全	8
1.2 轴承故障监测问题	11
1.2.1 轴箱轴承故障多发的原因	11
1.2.1.1 轴承外环故障多发与轴承选型密切相关	11
1.2.1.2 轴承滚子故障多发与轴承选型密切相关	12
1.2.2 电机轴承故障多发的原因	14
1.2.2.1 直流驱动电机非齿轮端轴承滚子端面故障发生的特征	14
1.2.2.2 直流驱动电机齿轮端轴承故障多发的特征	19
1.2.2.2.1 故障现象之一:爬动的外环发生擦伤故障	20
1.2.2.2.2 故障现象之二:不动的外环发生局部疲劳和组织疏松	20
1.2.2.2.3 故障现象之三(推测):外环疲劳带发生剥离	21
1.2.2.3 驱动电机的齿轮端轴承故障机理诊断	22
1.2.3 悬挂轴承故障监测	23
1.2.3.1 空心轴的齿轮轴承故障监测	23
1.2.3.2 抱轴承的故障监测	26
1.2.3.3 抱轴承的故障监测——保留温度监测功能	27
1.3 齿轮故障监测问题	27
1.3.1 齿轮故障首要监测目标是啮合状态	27
1.3.2 齿轮裂纹故障扩展具有突变性	32
1.3.3 影响齿轮啮合工况者将被报警	33
1.4 检测技术的广义共振理论基础浅说	34
第 2 章 广义共振与机械故障诊断信息检测的敏感性	37
2.1 故障诊断的信息检测必须遵守自然规律和社会规律	37
2.1.1 物体的内因决定的自然规律是不可抗拒的——广义共振是共性特征	39
2.1.2 物体的内因决定了它对于外部作用的敏感性	41



2.1.3 利用敏感性提取物体对于外部作用的响应	42
2.1.4 敏感性是故障诊断信息受感和预处理的关键性环节	42
2.2 机械故障冲击与广义共振的敏感性和统一性	43
2.2.1 机械故障与振动和冲击的关系——故障现象调查	43
2.2.2 冲击信息与广义共振的对应性——自然规律认识	44
2.2.3 广义共振对于机械故障冲击的敏感性	45
2.3 共振解调技术的物理学基础	49
2.3.1 机械与电子谐振系统的等效性——自然规律的统一性	49
2.3.2 不同谐振频率的广义共振变换	50
2.3.2.1 如何选择用于提取冲击的谐振系统的广义共振频率	50
2.3.2.2 不同谐振频率的广义共振变换	51
2.3.2.3 兼顾剔除低频振动信号的电子窄带谐振广义共振变换	52
2.3.2.3.1 窄带电子谐振器对于二阶系统能量的变换特征	54
2.3.2.3.2 广义共振变换的能量关系初探	54
2.3.2.3.3 机械二阶系统及广义共振变换的能量、幅值关系	57
仿真软件数学模型的反演推导	58
考虑结构耦合的仿真研究	61
2.4 广义共振与非转运动机械故障的侦察	65
2.4.1 前人技术:非转运动机械离线试验诊断技术	65
2.4.2 基于广义共振的非转机械随遇激励侦察技术	65
2.4.2.1 连续侦察广义共振,发现机械结构匹配的薄弱环节	66
2.4.2.2 广义共振漂移与疲劳、裂纹识别技术	68
2.4.2.3 广义共振冲击疲劳——构件冷作疲劳预警	69
2.4.2.4 基于振动相对积的大型构件断裂远程识别技术	72
2.4.2.4.1 相对积函数的引出	72
2.4.2.4.2 相对积函数的定义和推论	72
2.4.2.4.3 相对积函数的基本意义	74
2.5 广义共振变换与车辆的二阶系统级联减振	77
2.5.1 用于减振的二阶系统的组织与匹配	77
2.5.2 转向架水平低频广义共振发生的原因	79
2.5.3 意外低频广义共振破坏了串联二阶系统减振的组织关系	79
2.5.4 可能的改进措施	80
2.5.4.1 增加横向刚度的仿真	80
2.5.4.2 增加横向阻尼的仿真	80
第3章 共振解调诊断的技术原理	82
3.1 传统的振动信号分析方法	82
3.2 共振解调技术是提取故障冲击信号的有效途径	84
3.2.1 关于广义共振	84
3.2.2 机械谐振系统对于冲击的广义共振响应	86