

· 管理纵横 ·

机械工程学科可靠性领域自然科学基金资助情况分析

赖一楠* 王国彪

(国家自然科学基金委员会, 北京 100085)

[关键词] 国家自然科学基金; 零件与结构的失效与安全服役; 可靠性

可靠性是指产品在规定的条件下, 规定的时间内, 完成规定功能的能力, 是衡量产品质量的核心指标之一。

可靠性理论与方法研究始于 20 世纪 20 年代, 直到 1947 年, Freudenthal 提出了应力—强度干涉模型, 标志着与机械可靠性相关的设计方法的诞生, 该模型成为了机械零部件可靠性设计、分析与评估的基本公式^[1]。1957 年, 美国电子设备可靠性咨询委员会 (AGREE) 发表了电子产品可靠性理论和方法的奠基性文献《军用电子设备可靠性报告》, 提出了在生产、试制过程中对产品可靠性指标进行试验、验证和鉴定的方法, 编制了标准规范, 为可靠性发展成为独立的工程科学奠定了基础^[2]。20 世纪 50 年代起至 60 年代初期, 一些工程技术人员和数学家们开始运用概率论和数理统计理论对产品可靠性问题进行大量的定性和定量的研究^[3]。20 世纪 60 年代, 开展了失效机理研究, 形成了可靠性试验及数据处理方法, 进行了系统可靠性、维修性和保障性综合研究, 建立了可靠性管理机构, 制定了可靠性标准规范^[4]。

可靠性研究可以在给定资源条件的约束下、在产品的全寿命周期内、最大限度地防止或控制各种故障的发生, 以保障和提高产品的质量。随着产品复杂性的不断增加、人们对安全的日益关注, 市场对产品质量要求的提高, 可靠性研究的重要性得到越来越多的体现。在能源、运载、石化、冶金、国防等在国民经济中占据重要地位的行业中, 大量高端机械装备正在服役, 这些装备长期在重载、高温、高速、突变载荷等复杂且恶劣的工况下运行, 装备本身或其核心部件, 由于设计、制作等原因常常出现各种故

障, 甚至造成灾难性的事故。2007 年, 美国的第三代战机 F-15 因结构裂纹而导致战机在空中解体, 致使全球同类战机停飞检查; 2011 年, 钦州电厂一组 600MW 机组转子发生裂纹故障, 造成了巨大的经济损失。据英国安全技术公司 (Safe Tech) 统计, 欧洲每年因机械结构断裂造成的损失高达 800 亿欧元。可见, 对机械装备进行可靠性研究具有极其重要的工程应用价值。

可靠性研究是一个综合交叉性的研究领域, 在国家自然科学基金委员会 (NSFC) 的诸多学科都有资助, 如数学学科 (A01) 的“可靠性理论 (A011204)”、力学学科 (A02) 的“疲劳与可靠性 (A020303)”、管理科学与工程学科 (G01) 的“系统可靠性与管理 (G0111)”以及信息学部 (F) 中三级代码“电路与系统可靠性 (F010509)”、“计算系统可靠性 (F020307)”、“系统可靠性理论 (F030213)”、“集成电路的可靠性与可制造性 (F040604)”等。机械工程学科 (E05) 对可靠性的资助主要集中在“机械结构强度理论与可靠性设计 (E050402)”这一申请代码。作为零件与结构的失效与安全服役科学的核心内容, 可靠性基础理论研究是机械工程学科较为基础和重要的研究领域之一。

1 三类项目资助情况

自 NSFC 成立 (1986 年) 起, 就有可靠性领域的项目获得资助。截至 2015 年度, 累计资助项目 179 项, 其中, 面上项目 103 项、青年科学基金 66 项、地区科学基金 10 项, 累计批准经费超过 6 000 万元, 资助情况如图 1 所示。

收稿日期: 2015-10-11; 修回日期: 2015-11-19

* 通信作者, Email: laiyn@nsfc.gov.cn

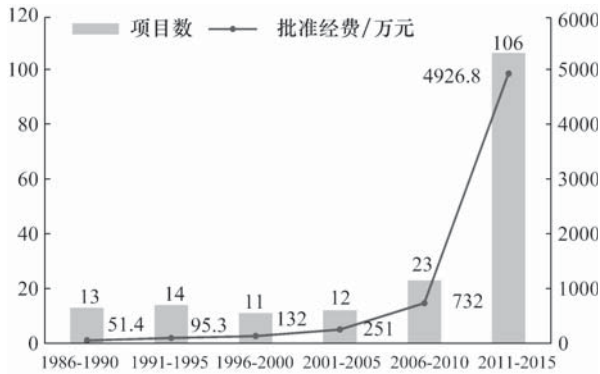


图 1 1986—2015 年可靠性领域资助项目数目及批准经费（三类项目）

图 2 为 1986—2015 年可靠性领域获资助项目按学科代码分布情况。从二级代码分布来看，机械动力学(E0503)共有 20 项，占 11.2%，批准经费为 759.3 万元；机械结构强度学(E0504)共有 79 项，占 44.1%，批准经费为 2 763.5 万元；机械设计学(E0506)共有 30 项，占 16.7%，批准经费为 1 068.7 万元；这三个代码合计占资助项目总数的 72.1%。此外，制造科学与可靠性相关的项目共有 28 项，占 15.6%，说明可靠性研究与制造科学结合日趋紧密，应用范围不断扩大。

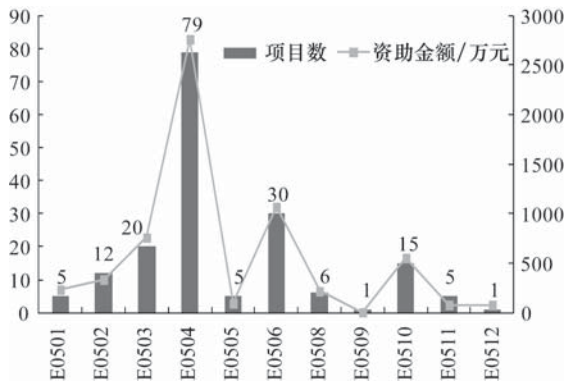


图 2 1986—2015 年可靠性领域按学科代码分布情况

图 3 所示为 1986—2015 年可靠性领域获资助项目按研究内容分布情况。总体看来，可靠性分析/评估与预计、动态可靠性、可靠性分析方法、可靠性测试与试验等方向获资助项目较多。

1986—2015 年，共有 76 个单位获得可靠性领域三类项目基金资助。其中有 3 个单位获三类项目数量在 10 项以上，占项目总数的 25.1%，有 5 家单位的资助经费超过 200 万元，见表 1。

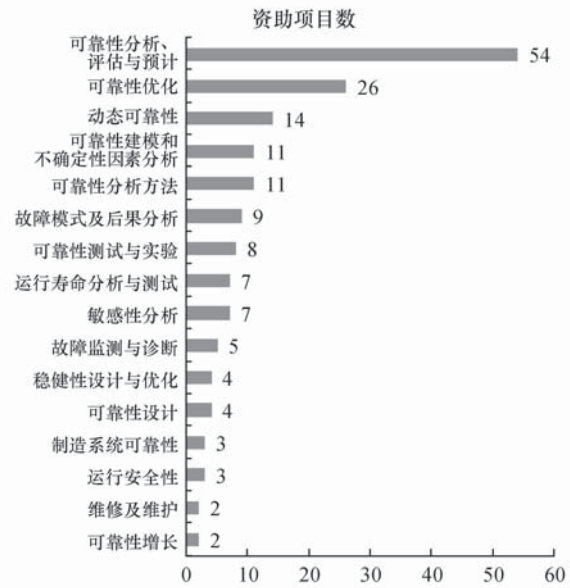


图 3 1986—2015 年可靠性领域按研究内容资助情况

表 1 1986—2015 年可靠性领域获资助项目数位列前 5 位的单位

序号	依托单位	项目数	金额/万元
1	东北大学	21	711
2	北京航空航天大学	14	536.5
3	西北工业大学	10	205.3
4	电子科技大学	8	296
5	浙江理工大学	6	270

排在前三名的研究单位分别为东北大学、北京航空航天大学以及西北工业大学，上述三个研究单位在可靠性研究上各有特色和侧重。东北大学在结构完整性及系统可靠性研究、机械结构可靠性设计、可靠性灵敏度设计、动态可靠性、机械系统概率风险评估、产品全寿命周期的可靠性策略等方面研究成果较丰富；北京航空航天大学在航空航天可靠性工程、航空发动机多学科可靠性优化、稳健性设计、可靠性维修性保障性综合设计、结构疲劳和可靠性方面研究成果较突出；西北工业大学着重关注飞行器可靠性工程、飞行器安全工程、故障诊断与预测以及材料疲劳与断裂等方面的研究工作。

2 可靠性研究进展与代表性成果

2.1 研究进展

(1) 可靠性基础理论研究逐步深入，形成多个新兴交叉方向。

系统可靠性、疲劳可靠性、动态可靠性、可靠性预计与分配等传统可靠性理论与方法得到了进一步

发展和完善;应用模糊数学理论、区间分析理论、贝叶斯理论、静动力随机有限元方法、高维函数展开与降维逼近方法等理论方法,形成了模糊可靠性、主客观不确定性耦合可靠性、多态系统可靠性、可靠性灵敏度、稳健可靠性、随机结构多学科协同优化等新兴研究方向。可靠性研究对象由传统的线性、静态、简单工况下机械零部件的可靠性分析与设计拓展到非线性、动态、复杂工况下机械系统的可靠性建模理论研究,且可靠性算法的计算精度与效率显著提高,逐步形成了以主观与客观不确定性可靠性、概率与非概率可靠性、整数阶矩与分数阶矩可靠性、可靠性灵敏度与稳健性分析综合为代表的系列理论与方法,如图4所示。

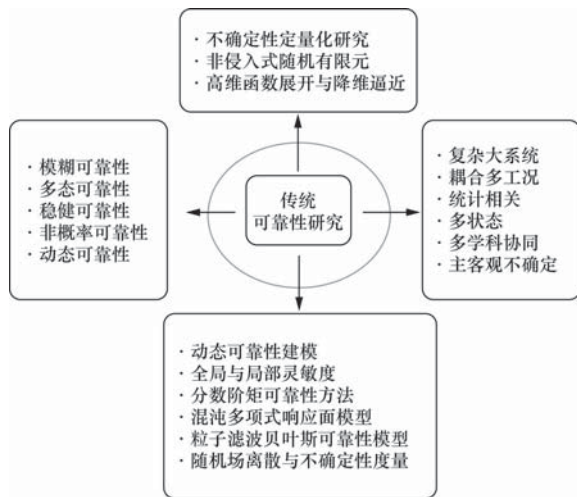


图4 可靠性理论研究的拓展

(2) 可靠性试验技术水平进一步发展,数据处理与信息融合能力不断增强。

可靠性试验技术是验证、保证和提高重大装备和重大工程高可靠、长寿命的关键共性技术。在科学基金持续资助下,可靠性试验技术研究从常规寿命试验到加速寿命试验、从应力筛选到高加速应力筛选试验、从加速寿命试验到加速性能退化试验等,尤其在加速寿命试验的恒定应力试验、步进应力试验,以及多应力加速寿命试验方案的优选与设计等方面进展显著。此外,可靠性数据处理技术也由经典的概率统计分析发展到以贝叶斯技术等为代表的现代可靠性数据处理理论与方法研究,特别是在截尾试验数据建模分析、无故障数据可靠性建模分析、加速寿命/性能退化试验数据的建模分析、系统可靠性区间估计,以及多源故障信息融合等方面取得相应进展,如图5所示。

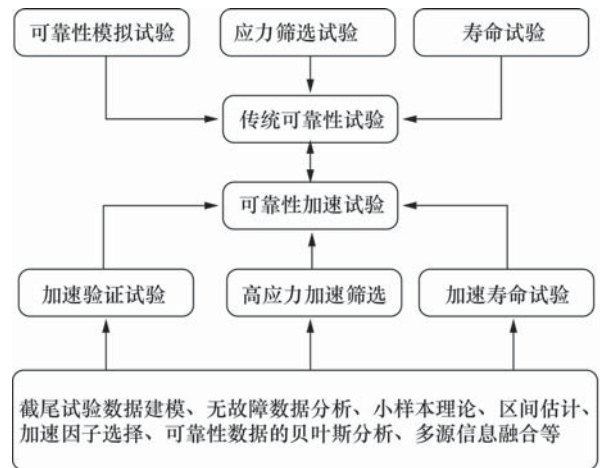


图5 可靠性数据处理与试验技术进展

(3) 可靠性研究与传统机械学深度融合,工程实践问题能力得到提升。

可靠性基础理论与机构运动学、机械振动学、机械设计学、机械制造学等深度融合,通过学科交叉解决了装备动力传动系统可靠性、大型输变电网络可靠性、柔顺机构与工业机器人运动与动力可靠性、压电智能结构可靠性、MEMS可靠性等复杂机电产品与系统的可靠设计、分析、试验与评估问题,形成了以面向大型机械装备、微机电系统、复杂电气网络、工业机器人、高档数控机床、高速列车等复合机电系统的可靠性理论和技术,提升了解决复杂机械系统可靠性设计的能力。

2.2 代表性成果

在科学基金的持续资助下,可靠性基础研究领域取得了一批具有较高学术价值和应用前景的研究成果,得到了国内外同行的广泛关注,培养和造就了一批人才。这里简介部分代表性成果(论述不分先后顺序):

电子科技大学相关研究团队将可靠性、维修和保修相结合,建立了全寿命周期可靠性设计优化策略;提出了集成可靠性和稳健性的不确定优化统一框架;阐明了随机不确定性和认识不确定性在复杂系统的耦合多学科间的传播规律和机制,提出了混合变量多学科设计的序列优化和可靠性评估方法;综合考虑性能退化和内外部冲击失效模式的关系,提出了失效模式相关下的系统竞争失效模型;建立了融合系统不同层次成败型、寿命型和退化型数据的评估框架,实现对复杂系统在复杂信息来源下的可靠性评估;围绕产品在服役阶段的多状态特征,提出了多状态系统的非完好维修模型和预防性维护决策方法^[5-9](项目批准号:59475043、50173006、

50776925、51073218)。

西北工业大学相关研究团队建立了全局和区域可靠性灵敏度指标体系;揭示了全局和区域灵敏度之间的内在联系,为全面了解输入不确定性对输出性能的影响提供了可能性;提出了输入变量相关情况下全局灵敏度分解的高阶模型,建立了反映相关变量各部分贡献的灵敏度分析矩阵,解决了变量相关情况下灵敏度含义不明确、概念不清的问题;建立了不确定性分布参数对输出性能统计特征影响的全局和区域灵敏度指标及其高效求解算法,为是否收集信息以减小分布参数不确定性的决策并进而合理地分配资源提供指导^[10-14](项目批准号:59575040、59775032、50875213、51175425、51475370)。

浙江理工大学相关研究团队发展了可靠性加速试验方案优化设计和评价理论与方法。以达到所规定的使用寿命时可靠性估计值的方差最小为目标,应用极大似然估计理论或考虑多元性能参数退化及其相关性,建立了综合应力加速试验方案优化设计准则和加速退化试验方案优化设计准则;并提出了步进应力加速寿命试验方案模拟评价理论和方法。针对可靠性加速试验数据统计分析中难以构造合理的可靠性特征值的置信区间问题,提出了小样本下机电元件可靠性的 Bootstrap 回归置信区间估计方法^[15,16](项目批准号:59975081、50375142、51275480)。

北京航空航天大学相关研究团队以航空发动机在运转过程中各构件之间动态变形不协调,致使装配关系遭到破坏为背景,开展了机械动态装配可靠性设计方法的研究;建立了多对象、多学科和时变性的机械动态装配可靠性模型;提出了分布式协同响应面方法和分布式协同极值响应面方法,在保证一定计算精度的前提下,显著地提高了具有多对象、多学科和时变性特征的概率分析及优化问题的计算效率,为实现复杂机械动态装配可靠性分析和优化提供了一条合理有效的途径^[17-19](项目批准号:59605009、50275006、51175017)。

西南交通大学相关研究团队揭示了工程材料循环应力—应变关系的随机性,发展了表征随机单轴循环应力—应变关系、循环应变—寿命关系和循环应变“应力—强度”干涉模型及寿命预测与可靠度评估方法。围绕轨道车辆轮对强度失效和可靠性问题,通过车轴钢及实物车轴系列试验研究,分析了表面与材料内部疲劳裂纹萌生与扩展的竞争机制,提出了确定概率疲劳 S-N 曲线的协同概率外推法、确

定结构概率疲劳 S-N 曲线的综合影响系数法,发展了覆盖超长寿命的疲劳可靠性分析方法;建立了光滑表面多级微观组织结构障碍的疲劳短裂纹扩展率模型和覆盖疲劳裂纹起裂、扩展和断裂全过程的扩展率模型;提出了考虑车轮踏面损伤的轮对多学科安全评价方法^[20-23](项目批准号:50075073、50375130、50575189、51175439、U1334204)。

东北大学相关研究团队构建了可靠性设计、可靠性优化设计、可靠性灵敏度设计、可靠性稳健设计等可靠性设计理论、方法体系。针对机械装备运行过程中的动态特性以及机械装备性能、技术参数的渐变特性,研究了机械关键零件与系统的动态与渐变可靠性稳健设计理论研究理论与方法,提出了非线性多自由度振动系统可靠性分析与设计的动力随机有限元法,多渐变失效与多突变失效共存的渐变可靠性设计方法,以及随机机械装备动态与渐变耦合的疲劳设计方法^[24-26](项目批准号:50175043、50875039、51135003)。发展了可靠性建模理论方法体系,包括载荷不确定性的宏观与微观两层面表征方法、系统级可靠性建模思想及方法、可靠性分配中的“失效相关子系统复杂度”和“不确定载荷严酷度”概念、“零部件复杂度”定义和可靠性分配原则等;建立了机械零件和系统的四元可靠性模型和失效率模型,实现了静强度可靠性模型与疲劳强度可靠性模型的统一、系统可靠性模型与零部件可靠性模型形式的统一,能够真实地反映零件之间的失效相关性对系统可靠性的影响,失效率模型完善了可靠性理论方法体系^[27-31](项目批准号:50271495、50777348、51179095、513300113)。

3 问题与建议

3.1 可靠性基础研究水平有待进一步提高

以 NSFC 机械工程学科资助的可靠性项目负责人为基本检索词,通过科学引文索引数据库扩展版 SCI(<http://apps.webofknowledge.com/>)检索可靠性领域项目负责人截至 2015 年 2 月 1 日发表的可靠性相关的英文论文 1 005 篇。

但统计结果也显示,在本学科可靠性领域国际顶尖和知名期刊(如 *IEEE Transactions on Reliability*, *Reliability Engineering & System Safety*, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, *Risk Analysis*, *Structural Safety*, *Quality and Reliability Engineering International* 等)发表论文相对较少,研究成果被国际同行持续关注 and 跟

踪的程度也不高。因此,要进一步提高发表论文的质量,提高我国可靠性领域研究在国际上的影响力。

3.2 机械基础件的可靠性研究尚需深化

与装备制造业发达国家相比较,国产机械产品可靠性仍存在显著差距,其根本原因在于国产机械基础件可靠性水平低,核心零部件发展受制于人。为了突破机械装备可靠性差的瓶颈,要大力加强关键基础件的定量可靠性理论与技术研发,特别是失效机理、可靠性增长的研究;要有充分细致深入的而又符合实际工况的定量可靠性模型作为支撑,将理论与实际相结合,才能实质提升机械基础件的可靠性水平。

3.3 可靠性试验及数据的积累还很缺乏

可靠性试验及可靠性数据的积累是深入研究机械可靠性的重要条件。目前,由于缺乏基础数据,我国可靠性研究大多以理论性假定数据作为分析研究依据。而且,由于产品寿命及失效数据缺乏,可靠性设计仍然主要采用产品可靠性试验单一的检测模式,制约了我国机械产品可靠性研究。随着信息技术和传感技术的发展,可靠性数据已突破传统的故障寿命数据范畴,进一步将环境条件、任务工况、性能退化和状态监测数据等囊括进来,如何有效地收集、分析和处理这些信息并为产品的可靠性设计、分析和评估提供支撑有待深入研究。同时,机械可靠性研究学者应树立可靠性数据积累的长期意识,通过科学试验数据及现场数据的准确采集和长期积累,建立共享的产品可靠性基础数据库。

3.4 复杂服役环境下零件/结构的可靠性研究还不够深入

随着社会的发展,机械、运载、能源、冶金、石化、国防等国民经济中各重要行业的关键机械设备不断朝着精密化、复杂化以及大型化方向发展,并且这些设备都长期处在重载、疲劳、腐蚀、高温、极寒等十分恶劣的工作环境下,而这种复杂和极端的工作环境往往不能在常规试验条件下再现。为了保证机械在复杂服役条件下的安全性,需要对极端工况下复杂装备的故障机理、可靠性建模、可靠性评估以及寿命预测理论等进行完善。通过进一步发展可靠性内涵,为结构完整性理论、破坏力学、可靠性工程、健康监测与控制等应用基础学科的方法与技术提供方法,致力发展复杂装备安全运行保障的新理论和新技术。

3.5 可靠性研究人才的培养仍需加强

深刻掌握机械可靠性理论与方法,以及将其应用于工程实际,并非一日之功,需要长期的基础理论

和工程实际的积累。而且从理论分析和工程实践中做出正确的分析和追溯更加艰难,这不仅需要严谨治学的科学态度和实事求是的科研精神,而且需要坚持“十年铸一剑”的执著作风,才有可能逐步在机械可靠性领域做出一些成果。

3.6 产学研密切结合还很薄弱

基础研究要面向国家重大需求与(潜在)工业应用,目前大多数研究仍缺乏理论与实践的结合,可靠性试验与验证研究较少,最终陷入从理论到理论的研究“怪圈”。如今由于实际环境的复杂性、变化性以及多样性,对于机械系统的可靠性分析也应该采取不同的方式以保证结构的安全性、耐久性以及适应性。对于可靠性理论的研究,首先要做到以实际需求为引导,推动产学研密切结合,为高可靠性、高精度、高稳定性的机电产品新技术提供支撑。

参 考 文 献

- [1] 谢里阳,王正,周金宇,武滢. 机械可靠性基本理论与方法. 北京:科学出版社,2012,1.
- [2] 谢里阳. 可靠性设计. 北京:高等教育出版社,2013,1.
- [3] 刘新建. 电连接器点接触可靠性分析研究. 武汉:华中科技大学,2006,1.
- [4] 方亚. 机械产品可靠性评估方法研究. 西安:西北工业大学,2007,2.
- [5] Huang HZ, Zhang XD. Design Optimization with Discrete and Continuous Variables of Aleatory and Epistemic Uncertainties. *Journal of Mechanical Design*, 2009, 131(3): 031006-1-031006-8.
- [6] Wang Z, Huang HZ, Liu Y. A unified framework for integrated optimization under uncertainty. *Journal of Mechanical Design*, 2010, 132(5): 051008.1-051008.8.
- [7] Liu Y, Huang HZ. Optimal replacement policy for multi-state system under imperfect maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 2010, 59(3): 483-495.
- [8] Wang Z, Huang HZ, Liu Y, Xiao N. An approach to reliability assessment under degradation and shock process. *IEEE Transactions on Reliability*, 2011, 60(4): 852-863.
- [9] Wang Z, Huang HZ, Du X. Optimal design accounting for reliability, maintenance, and warranty. *Journal of Mechanical Design*, 2010, 132(1): 011007.1-011007.8.
- [10] Song S, Lu ZZ, Qiao H. Subset simulation for structure reliability sensitivity analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 2009, 94(2): 658-665.
- [11] Hao WR, Lu ZZ, Tian LF. Importance measure of correlated normal variables and its sensitivity analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 2012, 99(3): 151-160.
- [12] Hao WR, Lu ZZ, Wei PF. Uncertainty importance measure for models with correlated normal variables. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 112(4): 48-58.
- [13] Zhang LG, Lu ZZ, Cheng L, Fan CQ. A new method for evaluating Borgonovo moment-independent importance measure with its application in an aircraft structure. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 132(8): 163-175.

- [14] Wei PF, Lu ZZ, Song JW. Moment-independent sensitivity analysis using copula. *Risk Analysis*, 2014, 34 (2): 210—222.
- [15] Chen WH, Qian P, Cui J. Reliability analysis of data only one failure for exponential distribution. *International Journal of Per formability Engineering*, 2010, 6(3): 289—296 .
- [16] Chen WH, Liu J, Gao L, Pan J, Zhou SJ. Accelerated Degradation Reliability Modeling and Test Data Statistical Analysis of Aerospace Electrical Connector. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(6): 957—962.
- [17] Ren Y, Bai GC. New Neural Network Response Surface Methods for Reliability Analysis. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, 24(1): 25—31.
- [18] Bai GC, Fei CW. Distributed Collaborative Response Surface Method for Mechanical Dynamic Assembly Reliability Design. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2013, 26(6): 1160—1168.
- [19] Fei CW, Bai GC. Distributed collaborative probabilistic design for turbine blade-tip radial running clearance using support vector machine of regression. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 49(1—2): 196—208.
- [20] Zhao YX, Yang B, Zhai ZY. The framework for a strain-based fatigue reliability analysis. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(3): 493—501.
- [21] Zhao YX, Yang B. Probabilistic measurements of the fatigue limit data from a small sampling up-and-down test method. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30 (12): 2094—2103.
- [22] Zhao YX, Yang B, Feng MF, Wang H. Probabilistic fatigue S - N curves including the super-long life regime of a railway axle steel. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31 (10): 1550—1558.
- [23] Zhao YX. A fatigue reliability analysis method including super long life regime. *International Journal of Fatigue*, 2012, 35(1): 79—90.
- [24] Lu CM, Zhang YM, Wang XG, Li H. Frequency Reliability-Based Robust Design of The Suspension Device of A Jarring Machine With Arbitrary Distribution Parameters. *Mechanics Based Design of Structures And Machines*, 2015, 43 (4): 487—500.
- [25] Li CY, Qiao CS, Zhang YM. Reliability Optimization Design Of Connecting Rod of Locomotive Traction Equipment. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015, 229(9): 1623—1629.
- [26] Zhang XF, Pandey MD, Zhang YM. Computationally Efficient Reliability Analysis of Mechanisms Based on A Multiplicative Dimensional Reduction Method. *Journal of Mechanical Design*, 2014, 136(6): 10.1115/1.4026270.
- [27] Chen LJ, Liu YH, Xie LY. Power-exponent function model for low-cycle fatigue life prediction and its applications-Part I: Models and Validations. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(1): 1—9.
- [28] Xie LY, Wang Z. Load-strength dynamic interaction principle and failure rate model. *International Journal of Per formability Engineering*, 2010, 6(3): 205—214.
- [29] Gao P, Yan SZ, Xie LY. Dynamic fuzzy reliability models of degraded hold-down structures for folded solar array. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38 (17—18): 4354—4370.
- [30] Xie LY, Liu JZ, Wu NX, Qian WX. Backwards statistical inference method for P-S-N curve fitting with small-sample experiment data. *International Journal of Fatigue*, 2014, 63 (6): 62—67.
- [31] Qin XF, Sun DL, Xie LY, Wu Q. Hardening mechanism of Cr5 backup roll material induced by rolling contact fatigue. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2014, 600(4): 195—199.

Review on NSFC funding in the reliability research field of mechanical engineering discipline

Lai Yinan* Wang Guobiao

(National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085)

Key words the National Natural Science Fund; failure and service safety of mechanical elements and structures; reliability