

控制系统可靠性研究的回顾与展望*

疏松桂

(中国科学院自动化研究所 北京 100080)

摘要 本文是回顾控制系统可靠性开发的过程、基本成就及未来的展望,主要是对我国近十几年来的研究概况作一点评述.由于作者未作普遍调研,只就自己所知道的小范围及个人工作的体会,提出一点看法,希望同行的科技工作者及专家指评指正.

关键词 系统可靠性,控制系统可靠性分析,系统可靠性设计,系统故障检测与诊断.

1 引言

设备质量是反映出产品好坏的标准,通常是以技术指标衡量之,其基本内容包括性能指标和可靠性指标两个方面,性能指标标志着产品技能水平,可靠性指标标志着产品寿命水平.对用户来说,产品可靠性比性能更为重要,因为它直接影响到平均寿命的长短和执行任务的成败.

控制系统的任务是控制某种生产过程或对象,按照预定的工作程序及技术要求进行正常的生产,控制系统可靠性是指“在规定的工作条件下和规定的时间内,控制系统成功地完成规定功能的能力”,它是对控制系统可靠程度的定性评价.可靠性定量的描述则称为可靠度,它是指“在规定的工作条件下和规定的时间内,控制系统成功地完成规定功能的概率”.由于这些年来科学技术发展迅速,对产品质量的要求越来越高,控制系统结构越来越复杂,以致控制系统的可靠性越来越成为问题,据现场统计,控制系统故障占整个系统故障的一半以上.因此,控制系统可靠性的研究有特殊的科学意义和重大的经济效益.

根据上述控制系统可靠性的定义,可见控制系统在执行任务期间,可以容许降低若干性能以致发生局部故障,只要系统能够按规定的计划完成规定的功能,则可以认为控制系统仍是可用的.这样,我们就需要比较全面地理解控制系统可靠性的含义及范围,在研究方法上,应该突破传统成败型故障的老框框,扩大到多状态以致连续变坏的情况(如参数漂移、性能退化、系统稳定性等),实际上,已有少数科学工作者开始探讨这方面的问题.

2 系统可靠性概述

系统可靠性问题本是伴随着工业生产线而来,但其重要性直到第二次世界大战,才受到人们的重视.战后,系统可靠性的研究普遍开展起来.1952年美国国防部成立了电子设

* 《中国控制会议论文集》, 901 ~ 910 页, 1994 年 8 月, 山西太原.

备可靠性顾问团(AGREE),开始有组织地进行可靠性研究工作,并于1957年发表了研究报告,为系统可靠性预计军用手册(MIL-HDBK-217D),现已作了4次修订.日本自1956年引进可靠性技术,于1958年成立可靠性研究委员会,将产品可靠性指标纳入质量管理范围.欧洲各工业发达国家,如苏联、英、法、德等也自60年代起开展了可靠性研究,并普及可靠性教育,而美国马里兰大学已经成立了可靠性工程系.

我国系统可靠性研究起步较晚.自60年代起开展核武器和导弹研究以来,才逐渐重视产品可靠性问题.直到80年代在国防科工委领导下,成立了“中国电子产品可靠性数据交换中心”,并组织起可靠性数据委员会.1986年以国产电子元器件的现场使用数据和试验数据为基础,编制出版了我国第一版“电子设备可靠性预计手册”,作为军用与民用电子设备和系统可靠性预计和评估的工具;同时可靠性教育也逐渐普及,学术交流会和有关刊物已发表了不少可靠性文章,还出版了十余部系统可靠性专著.如文献[1-5]

当前,国内外已公认控制系统可靠性是一门新兴的边缘学科,涉及面广,综合运筹学、概率论、控制理论和可靠性理论于一体,对我国四化建设非常重要,须在理论联系实际方面多下工夫,进行深入研究,其主要目的就在于提高控制系统可靠性,从而尽量满足不断改进产品质量、取得更大经济效益的要求.提高系统可靠性的途径大致可以归纳为5条:1)提高元器件的可靠性;2)简化系统结构;3)采用贮备措施;4)使用容差技术,包括系统重构和解析冗余;5)搞好维护与修理工作.这里简化系统结构和容差技术会导致控制性能下降,而提高器件可靠性和采用贮备措施则提高设备成本,可见维护修理是保证系统可靠性的有效途径.但维护费用又与设备总成本相矛盾,所以设计者需要在二者之间,权衡轻重,找出最优的选择,使得总费用达到最低的限度.

系统可靠性研究的内容丰富,方法很多.从学科上讲,研究内容包括三大部分:1)可靠性数学.这里又有基础数学,如代数学、微积分,概率论、统计学等,和应用数学,如运筹学、数学规则、排队论、信息论.二者总合运用,奠定可靠性研究的基础,发展成为数学中一个分支,它是走在可靠性应用的前面.2)可靠性工程.这是可靠性在工业生产系统中的应用,提高生产效力,按预期的计划完成生产任务,可以认为是系统工程一个分支:具体内容有可靠性预计、可靠性分配、可靠性优化和可靠性试验.其中主要是可靠性设计问题,应与系统设计配合进行.3)可靠性管理.这是产量管理中的主要部分,贯穿到产品设计、制造和使用的全部过程,包括故障检查与安全保险问题,如可靠性数据收集、反馈和分析,改进设计和再试制等.

本文是在文献[7]的基础上,从工程应用着眼,回顾近些年来我国系统可靠性研究的进展及成就,以供科技工作的借鉴,具体内容与方法可分为三个方面:1)系统可靠性建模与分析.其中可分为成败型与渐变型二种方法;2)系统可靠性综合与设计;3)系统故障检测与诊断,最后再对今后科研工作,提出若干不成熟的看法.

3 成败型系统可靠性建模与分析方法

正如前面指出:系统可靠性是一门新兴的边缘科学,它的研究范围仍在发展与完善过程中,系统可靠性分析的目标是要揭示元器件与系统可靠性之间的联系,也就是由元器件

可靠性指标分析计算出系统可靠性指标,一般可靠性分析工作都是要从建模开始,元器件和系统的失效模式都可以分为突变和渐变两种.突变的发生基本是属于随机事件.但渐变的发生则随时间的推移而逐渐增长.传统的可靠性分析方法是以前述事件(成败型)为基础进行的,具体方法可以概括为归纳法和演绎法两大类,下面分述三种有效的精确分析法:

3.1 网络分析法(归纳法)

网络分析法是从系统原理图(线路图)绘出可靠性逻辑框图.然后再从逻辑框图推导出系统可靠性表达式及有关可靠性指标.逻辑框图可以分为以下两种:

1) 串、并联系统:这种系统对独立故障(如开路)而言,串联系统的可靠度为各个串联环节可靠度的乘积;并联系统的不可靠度为各个并联环节不可靠度的乘积.如为相依故障(如短路)则相反.对于混合故障系统,如开路和短路都有可能发生在同一个系统中,则为三态相依故障系统,其串、并联环节各以多少为宜,乃是一个优选问题,具体解法见文献[1].

2) 非、串并联系统(复杂系统),这种网络系统不能直接引用串并联规则求解可靠性,可以使用最小割集法或最小路集法,但计算相当繁杂.比较方便的办法是采用分解法,即利用全概率原理,将总系统按关键元器件逐级分解成若干个串并联系统,再求系统可靠度,分解公式为

$$R_s = R_i R(1_i, R) + (1 - R_i) R(0_i, R) \quad (1)$$

其中 R_i 表示第 i 个元器件的可靠度, $R(1_i, R)$ 表示第 i 个元器件可靠度为 1 时的系统可靠度, $R(0_i, R)$ 表示第 i 个元器件可靠度为 0 时的系统可靠度.如 $(1_i, R)$ 和/或 $R(0_i, R)$ 仍为非串、并联系统,则再作分解,直至全部化为串、并联分系统为止.以上二种网络分析法均适合于不可修系统.

3.2 状态空间分析法^[5](归纳法)

状态空间分析法适用于各种不可修和可修系统,能够推导出系统暂态及稳态可靠性指标以及其它特征量.

最早的状态空间法亦称二项式展开法,即按系统中元器件成败二状态的乘积展开,然后取其可靠项之和,则得系统可靠度的精确解,方法简单,但只适用于元器件较少的情况.

对比较复杂的系统可用下列两种方法求解:

1) 马尔可夫状态转移法:通常假定元部件失效率 λ 和修复率 μ 服从可靠性指标的负指数分布.按马尔可夫过程绘出系统的状态转移图,其次再从此图写出各种状态的微分方程.然后则用全概率原理联解这些方程组,则可得各个状态的暂态解.最后再将各个可用的状态相加,则得系统可用度.如为单部件系统,可得可用度为

$$\left. \begin{aligned} A(t) &= \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda + \mu)t} \\ A &= A(\infty) = \mu / (\mu + \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

稳态可用度

2) 缓冲生产线可靠性分析法^[8-13]

在一个刚性连接串行生产线中,如有一个工作站发生故障,则遭全线停车.因此,通常在工作站之间,设置有限容置的缓冲库,用以提高生产率.这样就带来有关工作站缺料和

阻塞停车问题,使得它们断续工作,系统建模困难,不便求解.国外一般只能求出三级以下生产线的解析解^[14].至于多级系统则采用分解法和聚结法^[15,16],算法繁琐,而且只能得到近似解,我们提出的“等效工作站”方法^[8],能将断续工作系统转化为连续工作系统,突破离散可修系统建模的难关,解决了维数灾的困难,推导出显式解析解,如系统生产率、系统有效度、平均库存水平等指标,都能直接用于系统可靠性及其优化设计,具体公式见[8,12].

本节所列的成果都适用于不可修系统,只须令维修率 $\mu = 0$ 即可,也适用于可靠的系统,只须令失效率 $\lambda = 0$ 代入有关公式即可.

3.3 故障树分析法(演绎法)^[17,18]

早在 50 年代初,人们就提出失效模式及效果分析法(FMEA),但只能解决单因素故障问题.60 年代初,美国贝尔公司沃森(H. A. Watson)首次提出用故障树法(FTA)分析民兵导弹发射控制系统的安全性,效果显著,能够同时处理多因素故障,除元部件失效外,还包括软件差错、人为失误和其它一些外部因素,如外来灾祸、不正常环境等基本事件.方法是利用有关逻辑门将系统故障(顶事件)与其相关的基本事件联成一棵倒立树形图.然后从顶事件出发,顺藤摸瓜,可以准确地抓住故障根源.具体步骤是在建立故障树后,再求最小割集或最小路集,从而计算出系统故障概率及其它可靠性指标,作出定性及定量的评估,且能处理带有反馈的自动控制问题,对可修和不可修系统都有效.

布尔代数可以用来简化故障树并处理其中重复事件.文献[19]提出不交型布尔代数法可以避免寻求割集,直接进行系统可靠性的定性及定量评估.它是在计算之初先进行不交化的运算,如

$$A \cup B \cup C = A + \bar{A}B + \overline{\overline{A + \bar{A}B}} \cdot C \quad (3)$$

除上列三种系统可靠性分析法之外,还有上下限边值法和蒙特卡罗模拟法等^[5].这些方法都只能对系统可靠性作近似分析.

4 渐变型系统可靠性建模及分析方法

系统及元器件的变坏,多数是渐变型失效,即经过连续退化过程,导致性能逐渐衰退,直至越出一定范围,以致失去完成任务的能力,就算失效.当然,在衰退过程中也有可能引起突变失效,称为混合失效.这种失效不宜采用成败型失效的分析方法,因为那样做,一者丢失在成败之间大量的有用信息,再者不便评定以产品性能为可靠性目标函数的问题,特别是带有反馈控制的非单调关联系统,下面就连续退化系统可靠性问题,简单描述三种不同的分析方法(这主要是我国学者近几年来提出的):

4.1 渐变退化系统的广义分析法^[20-24]

这是从性能退化的观点来研究系统(包括元件)的可靠性问题,此法有利于探讨系统(元件)在性能衰变的过程中,逐渐趋近失效的现象,从而便于为预先报警与及时挽救提供依据.系统在工作过程中,其元件要不断地退化,于是系统也不断地退化.这样系统的可靠度就可以用系统性能指标偏离其设计值的程度来定义^[22]:

$$R(t) = P_r \{ [|Z_j(y(t)) - Z_{0j}| / Z_{0j}] \leq r_j, j = 1, 2, \dots, m \} \quad (4)$$

其中 $y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))$ 是元件性能参数矢量.

它的设计值为 $y_0 = (y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0n})$, (n 个元件);

$Z_j(y(t))$ 是系统的性能指标矢量, 它的设计值;

$Z_{0j}, j = 1, 2, \dots, m$ (共有 m 个系统性能指标), r_j 是给定的百分数, 它取决于设计者对系统的要求.

要求(4)式的解析解, 通常是很困难的. 这里需要知道 y 的密度函数, 一般可用计算机模拟求解.

4.2 渐变退化系统的模糊分析法^[25-29]

在系统可靠性工程中, 有些概念是带有模糊性的, 如可靠性定义中“完成规定功能”的概念就是如此, 如把“完成规定功能”看作模糊事件, 用功能指标的隶属函数来描述系统的状态(连续状态), 从而用随机模糊事件的概率来定义系统可靠度, 这样对连续退化系统的分析是很恰当的.

现在把退化看作一定程度的故障. 用 A 表示论域 $y(t)$ 上一个模糊子集(事件), $\mu_A(y(t))$ 表示元件参数 $y(t)$ 对 A 的隶属函数(满足程度), $f(y(t))$ 表示 $y(t)$ 的一维密度函数, 于是可以写出退化元件的可靠度为

$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_A(y(t)) f(y(t)) d(f(y)) \quad (5)$$

类似, 可以写出退化系统的可靠度为

$$R_s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_s[Z(t)] \phi(y(t)) d(y(t)) \quad (6)$$

其中 $\mu_s[Z(t)]$ 表示系统性能指标 $Z(t)$ 对模糊子集 S 的隶属函数, $\phi(y(t))$ 是 $Z(t)$ 的一维密度函数.

上列(6)式可以推广到多性能指标的系统^[35, 26].

4.3 人工神经网络分析法

人工神经网络具有高可靠性与高容错性的特点, 且便于处理非线性系统的问题. 同时可以应付突如其来的部件失效或故障. 这些性能正好适合于分析和综合渐变退化系统的故障. 文献[30]已提出这个问题, 看来这是一条分析渐变退化系统可靠性的新途径, 有待进一步的研究与开发.

5 控制系统可靠性的综合

系统可靠性的综合是属于系统可靠性设计及其优化问题, 要求在给定的条件下, 尽可能提高系统的可靠度, 其途径除简化系统结构及选用高可靠元器件外, 主要有以下三种方法:

5.1 贮备措施^[1, 31-35]

贮备措施, 即冗余贮备, 是提高系统可靠性的常用方法, 系统可靠性设计的目标是要对系统可靠度和总资源在组成系统的各个环节中进行最优分配. 现就优化模型及基本算法分述如下:

1) 系统可靠性优化的三种模型:

(1) 在资源消耗允许的范围内, 使系统可靠度尽可能地提高, 如

$$\left. \begin{aligned} \max \quad R_s = R_s(m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n W_{il}(m_i) \leq W_l \quad l=1, 2, \dots, k \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 R_s 为系统可靠度, m_i 为第 i 环节特定的(并联)元件数, W_l 为第 l 种约束总资源, W_{il} 为第 l 种约束在第 i 环节中的消耗量, n 为环节个数.

(2) 在系统可靠度得到满足的情况下, 使资源消耗尽可能地降低, 如

$$\left. \begin{aligned} \min \quad W = \sum_{i=1}^n W_{il}(m_i) \text{ (只有一种约束量)} \\ \text{s.t.} \quad R_s(m_1, m_2, \dots, m_n) \geq R_r \text{ (给定的最小值)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(3) 多目标函数的优化模型, 如

$$\left. \begin{aligned} \max \quad R_s = R_s(m_1, m_2, \dots, m_n) \\ \min \quad W_l = \sum_{i=1}^n W_{il}(m_i) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n W_{il}(m_i) \leq W_l \quad l=1, 2, \dots, k \\ R \geq R_r \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2) 基本算法的回顾

系统可靠性优化算法很多, 各有适用的范围和优缺点, 这些算法大致可以归纳为三类:

(1) 简易的启发式算法. 这是一种直觉的解法. 现有的启发式算法很多, 其不同之处在选择因子的差异. 文献[1, 32]根据最有效地利用各项资源的概念提出一种通用的算法, 对多目标非线性复杂系统问题都适用, 且能得到较为精确的解. 它的选择因子为

$$C_i(m_i) = \sum_{l=1}^k \frac{\partial \{ [R_{sl}(m_i) / R_s] \}}{\partial \{ [W_{il}(m_i) / W_l] \}}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

其中 K 为结束条件的种类数, i 为环节数.

(2) 快速的近似算法, 这类算法主要包括序列无约束极小化方法(SUMT), 广义约束可靠度法(GRG), 拉格朗日乘法(LMT)等.

这些算法通常是将冗余数作为连续变量处理, 把有约束问题暂时看为无约束问题, 以便求得实数解, 然后再调整为整数答案, 作为次优解(近似解), 这种算法计算简单, 存储量小, 约束条件不受限制, 有实用价值.

(3) 冗长的准确算法. 系统可靠性的准确解法是属于数学规则问题, 包括动态规划, 整数规划, 分枝定界, 代理约束法和参数规划等, 都能有准确的整数解.

准确解法的计算量随问题的维数增加成指数上升, 很难用于求解大规模系统. 但同分枝定界法相接合, 不但可以减少计算量, 还能解决多目标和多约束系统可靠性准确解的问题.

5.2 容差技术^[36-38]

这是采取一些措施使得系统在性能误差允许的范围内能够维持系统的正常运行而不致影响完成其主要任务. 具体措施有以下三种形式:

1) 系统重构:这是指在系统中某一部件发生故障时,其它部件可以部分代替其工作,使整个系统继续运行.

2) 解析冗余:利用测量之间或控制之间的依赖关系.在某一部件发生故障时,其它部件间的参数偶合可以代替失效部件所担负的任务.一般是要通过求解矩阵方程才能获得解析结果.

3) 设计裕量:在设计中对影响系统性能指标的参数留有一定允许偏离设计值的裕量,如降低应力、放宽稳定性裕量等.这样系统在长期运行过程中,由于渐变退化等原因,使得有关参数漂移只要不超过其预期值或范围,则还能维持系统正常运行,不致影响生产.

5.3 维护与修理

对于长时间使用的系统,适当的维护与修理是保持系统生产率的最好办法.定期和预防维修可以保持系统经常工作于完好的状态,及时和快速修理可以大大地提高系统可用度.

6. 系统的故障检测与诊断^[39-43]

一般故障诊断方法可以分为离线诊断和在线诊断两种.离线诊断机构都独立于被控对象和自控系统之外,由操作及维修人员处理;在线诊断机构与被控对象及其自控系统组成一体,基本是由计算执行使命.

6.1 通常故障诊断步骤

1) 故障建模:按照先验信息和输入输出关系,建立故障的数学模型或物理模型,作为故障检测与诊断的依据.

2) 故障检测:系统的特征参数和运行状态都可以通过检查仪表进行测量,用以判断系统是否发生意外变化或故障.

3) 故障分离:根据测量结果偏离正常值的情况,则可确定故障的部位.

4) 故障评价:判断故障发生的原因,程度及其影响的大小.

5) 故障修复:针对故障的情况,提出相应的对策与措施来消除故障,包括软件和硬件补偿.

6.2 具体的故障诊断方法

故障诊断方法可以分为以下三类:

1) 基于数学模型的故障诊断:系统的运动方程是用系统参数向量来表示的,这种参数实际上是代表系统性能的指标,所以根据系统参数的估计值与其正常值之间的偏离数值,则可判断系统的故障状况,此即参数估计法,它对渐变性故障和突变性故障都适用.另一种方法是从系统的状态方程和观测方法的残差序列均值的变化来判断系统的故障状态,这叫状态估计法,它对突变性故障更为合适.

2) 基于物理模型的故障诊断:这是以物理量为手段来实现故障检测与分离.常用的方法有冗余方式和模式识别两种.冗余又有多数测量表达方式和信息冗余方式,后者的优点可以省去一部分检测仪表.模式识别方式是通过功能分析,并借助仿真试验和人的经验建立系统的各种故障模式,于是在系统运行过程中,收集测量值并对照已有的故障模型,即

可检测和分离故障。

3) 专家系统诊断法: 专家系统主要是由知识库和推理机构组成的。知识库中存贮专家的专门知识, 推理机构具有能根据专家知识对某种专题进行推理并得出结论的能力。应用专家系统于故障诊断是一种有效的方法, 它是系统可靠性工程和人工智能知识工程相结合的新产物, 正有待于开发应用的学科。

7 存在问题及今后的研究方向

我国系统可靠性研究起步较晚, 长期以来与国外先进国家差距较大, 但近十多年来有了很大的进步, 从元件到系统以至大型复杂系统, 从二态到多态以至连续退化型, 从分析到设计以至故障诊断, 从可靠性到安全性以至风险度, 从硬件到软件等都有不同程度的进展。

当前存在的主要问题是理论联系实际不够, 作者认为今后研究的主要方向有以下几点:

- 1) 失效数据的获取与搜集问题, 突变失效数据有待完善, 但渐变失效数据几乎仍是空白。同时还应进行失效物理的研究。
- 2) 系统渐变退化的研究。文献[20—30]广义分析模糊数学和人工神经网络三种逼近的方法已作了良好的开端, 今后应加强研究, 特别是神经网络法前途更广。
- 3) 非单调关联系统可靠性的研究, 自动控制系统具有非单调关系特性, 研究成果尚少, 应探讨如何从结构函数求解系统可靠性问题。
- 4) 控制系统容差技术的研究。这是一种提高系统可靠性的有效并经济的方式, 应结合渐变退化系统进行探讨。
- 5) 故障诊断技术。这是系统可靠性中极为重要的问题之一。应密切结合生产实际进行研究。
- 6) 维修策略的研究, 预防维修和事后维修相配合, 在线维修可以不停产应该加强研究。
- 7) 控制系统可靠性优化技术, 系统可靠性设计应与系统性能设计同时进行, 才能收到较好的效果, 对多约束多目标问题要注意研究。
- 8) 大型复杂系统可靠性的研究, 这项课题尚很少有人问津, 文献[8, 34]也只是开始探讨。
- 9) 系统安全保险与风险的评价, 在某些场合如核能、航空航天、煤矿井等方面, 这个问题非常突出, 但研究者很少, 应予注意。
- 10) 软件可靠性的研究, 在使用中软件可靠性与硬件同等重要, 可是研究工作长期跟不上去, 需要紧追上去。
- 11) 可靠性教育问题, 当前我国上下已注意到产品质量问题, 而可靠性是质量的重要指标, 必须赶上, 在这方面建议工科院校普遍开设可靠性工程课。同时对有关工程技术人员要提高可靠性认识或办一些可靠性学习班。

参 考 文 献

- 1 疏松桂 控制系统可靠性分析与综合, 科学出版社, 1992.
- 2 曹晋华, 程侃 可靠性数学引论, 科学出版社, 1986
- 3 梅启智 廖炯生 孙惠中 系统可靠性工程基础, 科学出版社, 1987
- 4 郭余庆 王岩 系统可靠性理论及应用, 煤炭工业出版社, 1991
- 5 江荣汉 工程系统可靠性分析基础 湖南大学出版社, 1987
- 6 [苏]A. И叶皮法诺夫著 张燕林译 控制系统的可靠性 国防工业出版社, 1979年
- 7 疏松桂 控制可靠性分析与综合问题 全国可靠性理论与工程青年学术讨论会论文集, 西安, 1988
- 8 疏松桂 带有缓冲床的综合制造系统分析及其可靠性的研究, 自动化学报, 18卷1期, 1992
- 9 张一刚 CIMS生产线的可靠性建模与分析 中科院自动化所博士论文 1991
- 10 疏松桂 谭民 非串行CIMS生产线可靠性建模、分析与综合, 自动化学报, 20卷3期, 1994.
- 11 疏松桂 谭民 串行离散事件动态系统的建模、分析及设计, 控制与决策, 9卷1期, 1994
- 12 疏松桂 计算机综合制造系统优化设计的研究, 自动化学报, 21卷3期, 1995
- 13 Wai Li, Analysis and Scheduling of Repairable Complex Systems, 中科院应用数学所, 博士论文, 1994
- 14 Wijngaard, J. The effect of Interstage Buffers Storage on the output of Two Unreliable Production Units in series, with different Production Rates, *AIIE Trans.*, 1979, 11, 42 - 47
- 15 Gershwin, S.B., An Efficient Decomposition Method for the Approximate Evaluation of Tandem Queues with finite storage of Tandem Queues with Finite storage space and Blocking, *Oper. Res.* 1987 35(2):291 - 305
- 16 Koster, D., et al., Estimation of Line Efficiency by Aggregation, *Int. J. prod. Res.*, 25(4):615 - 626
- 17 [美] W E. 维齐利等著, 疏松桂 唐信青等译, 故障树手册 原子能出版社, 1987
- 18 史定华 王松瑞 故障树分析技术方法和理论 北京师范大学出版社, 1993
- 19 廖炯生 失效树分析的新途径 中国科学, A辑, 第5期, 1982
- 20 姚增起 系统退化和系统可靠性研究, 中科院自动化所博士论文, 1988
- 21 王岩 连续系统可靠性研究 中国矿业大学博士论文, 1989
- 22 姚增起 一种新的系统可靠性模型 自动化学报, 15卷6期, 1989
- 23 王岩 退化连续系统的可靠度计算 自动化学报, 18卷2期, 1992
- 24 田志宇 与性能相关的可靠性评估方法及ANN可靠性的研究 清华大学博士论文, 1994
- 25 王建营 可靠性工程中的模糊数学方法研究, 中科院自动化所硕士论文, 1988
- 26 王建营 模糊环境下的多指标方案选择, 中国自动化学会 1988年年会论文集
- 27 郭余庆 王岩 模糊数学在假设检验中的应用. 全国可靠性数学第二届学术年会, 1985
- 28 王建营 退化系统可靠性的 Fuzzy 评价法, 中国电工技术学术年会, 1988
- 29 蔡开元 模糊可靠性研究 北京航空航天大学博士论文, 1990
- 30 魏 薇 人工神经网络系统可靠性与容错性设计及其仿真, 中国科学院自动化研究所博士论文, 1994
- 31 疏松桂 最可靠性控制系统的综合 自动化学报 6卷1期, 1980年
- 32 Shu Songgui, Gao Jinling, An Universal Heuristic Method for Solving the Redundancy Optimization Problems, *Proceedings of China-Japan Reliability Symposium (Chinese part)*, 1987
- 33 Shu Songgui, A precision Method for Optimization the Reliability of a Redundant Control System and its Application, *Proceeding of IEEE International Conference on System Engineering*, Dayton, Ohio, U.S.A., Aug. 1989

34. 疏松桂 计算机综合制造系统优化设计的研究 自动化学报
35. 高金陵 可靠性优化设计方法及应用研究,中科院自动化所博士论文,1989
36. 程 一 多变量系统的容错控制研究,中科院自动化所博士论文,1989
37. 叶银忠 关于容错控制技术的研究,华东化工学院博士论文,1989
38. 程 一 朱宗林 高金陵 使闭环系统对执行器失效具有完整性的动态补偿器设计,自动化学报,16卷4期,1990
39. 朱宗林 自动化控制系统智能化故障检测诊断方法及应用研究 中科院自动化所博士论文,1989
40. 谭 民 控制系统故障检测与诊断技术及可靠性问题研究,中科院自动化所博士论文,1990
41. 叶忠银等 动态系统的故障检测与诊断方法,信息与控制,6期,1985
42. 夏国洪 系统故障诊断综述,控制理论及其应用年会论文集,1986
43. Zhu Zonglin, Fault Diagnosis Expert System of Power Plant Automatic Control System, Proceeding of China-Japan Reliability Symposium, 1989.