

结构工程施工系统 可靠性理论及其应用的研究

邓铁军 著



NLIC 2970700844

湖南大学出版社

结构工程施工系统可靠性理论 及其应用的研究

邓铁军 著



NLIC 2970700844

湖南大学 出版社

内 容 简 介

本书主要研究结构工程施工系统可靠性的基本理论及其应用。首先,分析结构可靠性的基本原理,施工状况及其特点并界定了施工可靠性的基本概念,定义所研究的施工系统的可靠度概念;其次,探讨施工过程系统可靠性关系,并在分析施工过程中系统的可靠度计算原理和方法基础上,构建施工系统可靠度计算的金字塔模型和研究施工过程可靠度的确定方法;再次,综合所研究的可靠性原理构建施工复合系统可靠性协调体系;最后,以某长江公路大桥施工为例,展示施工系统可靠性理论成果研究的应用。

图书在版编目(CIP)数据

结构工程施工系统可靠性理论及其应用的研究/邓铁军著.
—长沙:湖南大学出版社,2011.3

ISBN 978-7-81113-957-0

I. ①结…Ⅱ. ①邓…Ⅲ. ①结构工程—工程施工—结构可靠性—研究
Ⅳ. ①TU74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 042730 号

结构工程施工系统可靠性理论及其应用的研究

Jiegou Gongcheng Shigong Xitong Kekaoxing Lilun Jiqi Yingyong de Yanjiu

作 者: 邓铁军 著

责任编辑: 凌 霄

责任印制: 陈 燕

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山

邮 编: 410082

电 话: 0731-88822559(发行部), 88820005(编辑室), 88821006(出版部)

传 真: 0731-88649312(发行部), 88822264(总编室)

电子邮箱: presslinx@hnu.cn

网 址: <http://hnupress.com>

印 装: 长沙国防科大印刷厂

开本: 880×1230 32 开

印张: 6.5

字数: 188 千

版次: 2011 年 3 月第 1 版

印次: 2011 年 3 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978-7-81113-957-0/TB·9

定价: 30.00 元

版权所有, 盗版必究
湖南大学版图书凡有印装差错, 请与发行部联系

前 言

本书借鉴国内外可靠性理论研究的主要成果,围绕施工生产系统可靠性理论和方法开展较深入的研究,主要探讨了以下 8 个方面的内容:

(1)基于结构施工的状况与特点,根据系统工程原理和系统可靠性工程理论,提出了施工系统的可靠性概念及其可靠度定义。施工系统可靠性是研究施工过程实现目标体系的可靠性。基于工程施工的特性和系统工程原理,结构施工期可靠性的研究,是探索施工期如何保证结构按照设计所确定的结构使用期的可靠性。从行为功能和生产系统的目标看,确保结构可靠性的施工期施工质量的控制,仅是施工系统的质量控制目标。因此,施工可靠性的定义既有结构可靠性的内涵,又有结构可靠性的外延。同时由于设计与施工的性质不同,施工可靠性具有不同于结构可靠性的新的定义。

(2)确定施工过程系统可靠性关系。因为建筑产品可以划分为建设项目、单项工程、单位工程、分部工程、分项工程。其中,组成单项工程施工的单位工程,其系统可靠性主要表现为串联关系;组成单位工程的分部工程,其系统可靠性主要表现为串并联混合关系;组成分部工程施工的分项工程,其系统可靠性主要为串并联混合关系。所以,通过分析施工过程子系统的可靠性计算原理和方法,构建了施工系统可靠度计算的金字塔模型。

(3)提出施工过程可靠度的确定方法。施工过程可靠度确定的基本方法主要包括:由历史资料确定的概率分析法、利用理论概率分布的计算方法、主观概率法、主观概率估计值的改善法、蒙特卡罗法等。为确保选择出比较符合实际的分布函数,建议采用蒙特卡罗法。

(4)提出非概率的可靠性分析方法。根据前人的探索与工程施工

应用的诸多方法,归纳总结出“正常状态”界定法,并依据过程系统理论与灵敏度分析原理,提出了灵敏度分析方法,该方法适用于难以确定可靠性概率和工作上不需确定可靠性概率的状况。

(5)明确施工过程条件子系统的可靠性。将条件子系统分为人为子系统、施工机械设备子系统、材料供应子系统、施工方法子系统和施工环境子系统。建立了人为失误参数的统计分析方法和人为子系统的可靠度、改正度和有效度的计算方法。运用数学解析法分析了施工机械设备系统的可靠性数据结构及参数估计,确立了施工机械设备子系统可靠度的计算矩阵。提出了用马尔可夫方法计算施工材料设备子系统的可靠度。运用应力—强度干涉模型处理施工方法的可靠性计算问题。采用模糊可靠度分析施工环境可靠性。

(6)构建施工目标子系统“质量、工期、安全、成本”的相互关系,建立相应的关系式。针对目标措施之间“互为独立、互为因果、既有互为独立又有互为因果”的三种关系状态,建立施工过程目标可靠度的计算思路及其费用关系,对费用有效性进行分析,构建施工过程组织的成本可靠性控制模型。提出用熵权原理计算目标子系统的可靠度。

(7)根据复杂网络系统可靠性原理,建立施工系统可靠性的算法模型,运用邻接矩阵法求解复杂网络系统的最小路集,根据不变化原理,改进了BDD算法,提出复杂网络系统可靠度的不变化最小路集的实现新方法。建议通过编制计算机程序,有效地计算复杂施工网络系统的可靠度。

(8)建立施工系统可靠度的评价标准。用模糊数学方法将模糊语言“极可靠”、“很可靠”、“可靠”、“比较可靠”、“临界可靠”、“比较不可靠”、“不可靠”、“很不可靠”、“极不可靠”转化为模糊数学的隶属函数模型,从而得到九个模糊评价区间,为施工系统及其各个子系统的可靠度评价提供了相应的方法和参数依据。并基于复合系统协调控制原理,提出了施工系统可靠性的协调控制思路。最后,以某长江公路大桥施工为例,介绍了施工系统可靠性理论和方法的应用。

作者

目 次

第 1 章 绪 论

- 1.1 施工系统可靠性的基本理论 2
- 1.2 国内外对施工可靠性研究的现状及分析 6
- 1.3 研究内容 18

第 2 章 施工系统可靠性分析的基本方法

- 2.1 典型的系统可靠性模型及其可靠度的计算 20
- 2.2 施工过程系统的可靠性关系 28
- 2.3 确定施工过程可靠度的基本方法 37
- 2.4 内容小结 51

第 3 章 施工过程可靠性分析的非概率方法及其应用

- 3.1 引 言 53
- 3.2 “正常状态”界定法在施工系统可靠性分析中的应用 54
- 3.3 灵敏度分析法 65
- 3.4 内容小结 74

第 4 章 施工条件子系统的可靠性分析及其计算

- 4.1 引 言 75
- 4.2 施工人为失误对可靠性影响的分析 76
- 4.3 施工机械设备的可靠性分析 82
- 4.4 施工材料系统的可靠性分析 89
- 4.5 施工方法系统的可靠性分析 95
- 4.6 施工环境系统的可靠性分析 101
- 4.7 内容小结 109

第5章 施工目标子系统的可靠性分析及其计算

5.1 引言	110
5.2 目标子系统关系的探讨	111
5.3 目标子系统的影响因素分析	121
5.4 施工目标子系统的可靠度计算	126
5.5 内容小结	135

第6章 结构施工系统可靠度的计算

6.1 图论基础	137
6.2 最小路集法	139
6.3 根据最小路集求施工可靠度的计算示例	147
6.4 内容小结	151

第7章 施工系统可靠度的评价及其优化协调管理

7.1 施工系统可靠度等级与结构可靠度等级的比较	152
7.2 模糊数学基础知识	153
7.3 模糊可靠度的判别标准	167
7.4 施工系统可靠性的协调管理	172
7.5 内容小结	176

第8章 施工系统可靠性理论的应用示例

8.1 案例背景	177
8.2 混凝土质量控制可靠性分析的目的	178
8.3 混凝土抗压强度的分布	179
8.4 混凝土抗压强度分布概率密度的参数估计	181
8.5 混凝土抗压强度控制的可靠性计算方法	183
8.6 混凝土抗压强度控制可靠性计算示例	184
8.7 内容小结	187

结 论	190
-----------	-----

参考文献	194
------------	-----

致 谢	203
-----------	-----

第1章 绪论

可靠性一词最先出现在生产制造业部门。根据国家标准规定,产品可靠性的确切含义是“产品、系统在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力”。可靠性是指部件、元件、产品或系统在规定的条件下、规定的时间内、规定的条件下无故障地完成其规定功能的概率。^[1]系统可靠性分析是用系统工程的思想观念,从整体性、综合性和实际应用出发,对系统的可靠性设计、试验、管理、系统维修等问题进行分析的技术。

过程系统将系统工程原理的系统概念应用到工程施工(原材料加工成所需的产品)的生产过程。^[2]随着经济建设与科学技术的发展,工程建设规模日益增大,建设的难度与复杂程度,对工程的设计、施工及其管理的可靠性问题,都提出了更高的要求。依据动态优化理论与价值工程原理^[3],设计是工程价值的形成阶段,施工是工程价值的实现阶段。工程价值的评价是一个指标体系,它反映一项工程建造和使用的目的,体现为质量性、经济性和时间性。^[4]在质量方面,包括对建造地点、建筑形式、结构设计、功能效果和使用者满意程度的评价。建造地点的选择应满足对自然、地理、交通、生产、生活和经营条件的要求;建筑形式的构想应从建筑体形及造型、环境及毗邻建筑的和谐、内涵及风格的表达、艺术与装饰的统一、内部与外部关系的协调等方面加以衡量;结构设计应体现先进、新颖、安全、可靠与适用;功能效果应充分反映生产和生活的使用功能、空间的使用安排、建筑物理功能——声、光、热、采暖、通风等的要求;使用上应符合投资建设的意图和维护的方便。在经济方面,包括对支出与收益的综合评价,既要考虑建造的一次性投入,又要考虑使用期的经常性费用,同时要考虑投资的回收。在时间方面,既要评价建造时间(包括前期准备时间、设计时间、施工时间和动用

前准备时间)的合理性,还要评价使用期限的有效性。^[5]因此,对应于土木工程的建设目标而言,有优秀的设计却没有良好的施工,或设计先天不足却有良好的施工过程,都难以实现预定的价值指标。故而,施工技术与施工组织管理是土木工程学科的重要组成,也是结构工程重要的研究对象。

1.1 施工系统可靠性的基本理论

1.1.1 结构设计的可靠性

在工程设计上,结构设计的基本目的是在结构可靠性与经济性之间选择一种最佳平衡。^[6]在工程施工上,施工生产的根本目的是在满足设计要求的前提下追求最佳的效益(包括经济效益与社会效益)。建筑结构可靠性理论认为:结构可靠性是指结构在规定的时间内,规定的条件下,完成预定功能的能力。因此,设计建筑结构时,应使所设计的结构在规定的时间内和规定的条件下满足相应的功能。这些功能是^[7]:

- ①在正常施工和正常使用时能承受可能出现的各种作用;
- ②在正常使用时具有良好的工作性能;
- ③在正常维护下具有足够的耐久性;
- ④在设计规定的偶然事件发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性。

因此,结构的安全性、适用性、耐久性总称为结构的可靠性。^[8]

上述所谓的“规定的时间”,一般是指结构的设计使用年限;所说的“规定的条件”,则是指正常设计、正常施工和正常使用的条件,即不包括设计未规定的偶然事件和人为的过失。结构生命的全过程包括:施工期、正常使用期和超龄期三个阶段。根据系统可靠性原理的“浴盆”曲线失效理论^[9]与现实工程实践表明,结构失效的平均风险最大的是施工期和超龄期。我国现行建筑结构规范要求根据结构在施工和使用中的环境条件和影响,区分三种设计状况进行设计,这三种状况是持久状况、短暂状况和偶然状况。持久状况是指在结构使用过程中一定出

现,其持续期很长的状况;短暂状况是指结构施工和使用过程中出现概率较大,而与设计使用年限相比,持续期短的状况,如施工和维修等;偶然状况是指结构使用过程中出现概率很小,且持续期很短的状况,如火灾、爆炸、撞击等。规范规定对这三种设计状况,均应进行承载能力极限状态设计。对持久状况,尚应进行正常使用极限状态设计;对短暂状况,可根据需要进行正常使用极限状态设计。由此可见,规范对作用力的考虑主要是正常使用状态,对全过程的首尾两个阶段的考虑仅是作出相应规定,对施工期结构可靠性的问题仍在继续研究与探索。^[10]以结构可靠性理论为原理的极限状态设计法的“切入点”是结构工程施工期的“正常施工”,我国目前的混凝土结构规范等技术标准主要是以通过对结构材料性能和几何参数及施工验收的规定来予以保证的“正常施工”。^[7]

1.1.2 结构施工的状况

在结构工程的建造过程中,由于建筑施工生产所具有的特性体现,结构施工期所表现出的状况如下:

(1)时变结构。由于结构的形状和材料性质都是随时间变化的,所以一个结构从开始建造到投入使用的整个施工过程,可以看成是结构随时间增加而逐步“生长”形成的过程。^[10]

(2)施工生产的随机性。由于结构工程体积大,露天生产作业,受自然条件与建设环境制约,建造对象固定,施工人员及施工机械设备流动,工程材料品种多而复杂,所以影响结构工程施工期的因素多,性能波动大。^[11]故工程施工往往并非一帆风顺,即时常不是结构极限状态设计法要求的理想状态——“正常施工”。

(3)施工生产的多目标性。工程建设的活动涉及多个部门和单位,各自有不同的行为目标。对于施工生产者,既有以实现结构设计可靠性要求的质量控制目标,又有以合同要求的施工工期、安全与文明生产的生产控制目标,同时又以降低工程施工成本、追求经济效益为宗旨。^[12]因此,体现结构设计可靠性要求的质量管理与控制目标,是施工生产目标的有机组成部分,但并非唯一。

(4)工程施工生产的基本目的是在施工可靠性与经济性之间选择一种最佳平衡。对于施工方而言,施工方案、方法及措施的可靠性差会导致结构的非“正常施工”,结构可靠性下降,出现工程质量差等一系列施工问题;施工质量的可靠性过度,则会导致施工过程、工程内容与工艺操作的复杂性,造成不必要的工期损失与经济上的浪费,未实现施工与经济的最佳平衡。^[13]

(5)工程施工的风险性。由于工程的建造处于大自然的环境,相对于其他工业产品的生产而言,工期较长,受制于当地建设的政治、经济和社会环境的约束,同时建造过程的人力、材料、机械设备的使用以及相应的施工方法都影响着建造活动的品质,对于以质量、安全、工期、成本等性能与效益指标构成的多目标施工生产系统,始终处于因素不确定的建造环境与条件之中,从而导致施工建造过程处于目标实现的风险状态。^[14]

因此,现行土木工程项目的施工建造,是一个复杂的系统过程。从系统工程原理分析施工项目的每一项任务及工作,都是在内外因素的影响与制约,以及实现多个目标的要求下所完成的。那么,一项施工过程的完成,其方案和方法措施对于实现施工生产系统目标的可行性与可能性为多大,施工过程之间在任务目标的完成上相互间的关系及其对系统目标的影响又如何等施工生产的可靠性问题,在工程施工技术与组织管理的方案选择与评价,以及方案实施过程中的控制,都必然会充分地体现和反映出来。由此,研究工程施工生产系统的可靠性理论及其分析方法,帮助施工生产者科学合理地确定施工技术和组织措施,指导实施中的目标控制,确保工程施工预期目标的实现,是结构工程现代施工技术与管理的重要课题。

1.1.3 施工可靠性的界定

通过综合对结构施工状态的分析,结构工程的建造是以设计所确定的功能为前提,以施工目标体系的实现为目的,通过组织和协调施工项目内外要素,构建建设方合同要求的满意产品。这一建造的产品体系庞大,施工生产历时长,需要在符合经济合理的前提下,完成相应的

行为功能。这种行为功能的体现是：

①完成质量标准所要求的程度；

②达到工期要求的可信性；

③实现安全施工的可能度。

因此,施工生产的可行性、可能性和安全性的总和,即为工程施工的可靠性。也就是说,在一定的条件下,保证工程施工可行、可能、可信及安全就是可靠。

对于一项具体的施工任务,与其相关的各种因素,一般都是随机变量。如果把在一定条件下完成各项工作,达到设计所要求或施工计划任务预定的“正常施工”功能状态或施工目标的概率 P_t 定义为施工的可靠度,则达不到“正常施工”功能状态或施工目标的概率 P_f 为失效度,由于两事件是对立事件,故有:

$$P_t + P_f = 1 \quad (1.1a)$$

即施工的可靠度可表示为:

$$P_t = 1 - P_f \quad (1.1b)$$

式中, $0 \leq P_t \leq 1, 0 \leq P_f \leq 1$ 。

因此,可由施工的失效概率来描述工程施工的可靠性,以失效概率值是否小到工程施工上能够接受的程度作为施工可靠与否的判断标准。^[15]

由此可见,工程施工的可靠性与工程结构的可靠性是两个不同的概念。在本文中,基于工程施工的特性和系统工程原理所定义的施工可靠性,是探索项目施工生产系统的可靠性,是研究施工过程实现目标体系的可靠性。从结构的全寿命原理来看,结构施工期可靠性的研究重点,是探索施工期如何保证结构按照设计所确定的结构使用期的可靠性。因此,无论从行为功能还是从生产系统的目标看待施工生产的可靠性,确保结构施工期可靠性的施工质量控制,仅是施工生产系统的质量管理与控制目标,是整个施工生产系统的目标之一。然而,施工生产系统的目标体系是建立在工程设计功能要求的基础上,故两者之间互有联系。施工期间的施工可靠性定义既有结构可靠性的内涵,又有结构可靠性的外延。即在施工期间,施工可靠性是结构可靠性的扩展,

是对施工生产系统目标可靠性的表述、论证、实施与控制,从而具有施工工期结构可靠性的要求。同时由于结构设计与结构施工所表现出的性质不同,故结构工程施工的可靠性具有不同于结构可靠性的新的定义。

因此,研究结构工程施工的可靠性理论与方法,对于结构工程施工组织与方案的可靠性进行论证、设计、控制与评估,既有学术上的理论意义,又有现实工程运用价值。

1.2 国内外对施工可靠性研究的现状及分析

1.2.1 可靠性研究的发展历史

可靠性在早期的一般定义是产品正常工作的能力,是衡量产品质量好坏的一个指标。事实上,很久以前人们就关心所使用的工具和生活用品的可靠性,只是由于那时生产工具和生活用品都是结构简单的产品,它的损坏和修复易被人们理解。

作为专门课题的可靠性研究始于第二次世界大战。当时出现的雷达、飞机、导弹等比较复杂的兵器的主要部分——电子设备屡出故障,丧失了应有的作战能力。例如美国空军的电子设备到达远东时曾有60%发生故障,海军舰艇70%的电子设备处于故障状态,这促使人们开始了早期的研究。当时主要开展电子管的可靠性研究,虽然研究有了可喜的进展,但对电子设备的可靠性的提高并不大,到20世纪40—50年代,产品的可靠性仍然低劣。如1949年美国无线电通信设备大约14%的时间处于停机状态,水声设备有48%的时间,雷达设备约有84%的时间处于不能工作状态,1950年美国海军电子设备能正常工作的仅占1/3,这些现象引起美国等国家的注意,纷纷成立机构对产品可靠性的问题开展系统的研究。研究中发现电子设备每年的维修费用为设备原价的60%~500%,故希望能通过提高产品的可靠性来减少维修费用。在20世纪50年代可靠性研究的重点主要集中在如何生产出故障少、不易损坏的产品,却仍未解决费用过高的问题,1959年美国国防预算的25%用于维修的开支,两年多中花在设备和机械维护上的费

用与用于采购的经费几乎相等。^[16]为了降低维修费用,20世纪60年代初开始了对维修性设计和评价方法的研究,随着研究的进展,20世纪60年代末的可靠性研究已由狭义可靠性扩展到包括可靠性、维修性、保障性、可用性的广义可靠性的概念。

1950年美国国防部成立了电子装置的可靠性委员会(Ad Hoc Group),开始了系统的可靠性研究。该委员会于1957年对系统可靠性提出了报告,说明了试制、生产时的可靠性测定和考虑可靠性的任务书的制作方法等具体内容,这份报告在很长一段时间内对可靠性工作起到了指导作用,它的基本思想和方法到现在仍在使用。1960年美国在武器系统研制中开始全面贯彻可靠性工作大纲,可靠性保证的要求被美国国防部规定为合同的一部分内容。在研制F-111A、F-15A战斗机、M1坦克、“民兵”导弹、“阿波罗”宇宙飞船等装备中对可靠性提出了严格要求。

日本于1960年左右开始重视可靠性保证技术。1961年开始了飞机的可靠性研究。可靠性保证的具体工作也作为新干线计划的一部分。1965年国际电气标准委员会IEC设立了电子器件与部件的可靠性技术委员会,第一次大会在东京召开,以此为契机,日本开始了以提高电子器件的可靠性为目的的各种调查研究工作。1970年日本科学技术联盟主办了第一届可靠性会议。1970年5月日本宇宙开发事业集团下设可靠性安全管理部,对可靠性和质量管理起到了推动作用。在飞机、人造卫星等开发过程中取得了大量可靠性方面的成果,以后被广泛推广到通信系统、计算机、汽车、化学制品、医疗器械、建筑等领域。随着各国研究的不断深入,可靠性在20世纪70年代步入成熟阶段,到20世纪80年代可靠性进入深入发展阶段。^[17]

我国可靠性工程起步于20世纪60年代,主要在航空、航天、电子、机械、建筑结构等领域开展研究工作。进入20世纪80年代以后,可靠性研究工作得到了迅速发展,特别是武器装备的可靠性管理和研究工作取得了长足的进步。随着我国科学技术的迅速发展,产品的可靠性问题日益突出。海湾战争给人们以深刻启示,未来高技术战争对装备的可靠性提出了更高的要求,国家各级部门的领导对可靠性工作都非

常重视,并从制度、标准、规范上抓起,全面推动了我国的可靠性工作。^[18]

1.2.2 施工可靠性研究现状

施工生产可靠性的工作,是随着施工生产技术问题的处理而为施工人员所关注,主要表现为工艺技术与施工方法的可靠性评判分析,是一种狭义的可靠性研究。基于本文对施工可靠性的认识,分析国内外学者的研究,主要表现为在工程施工技术与组织管理中运用可靠性原理处理施工进度控制、质量控制、成本控制等一些技术与管理的问题上。

自1916年H. L. 甘特发明横道图表(Bra Chart),并应用于流水生产作业后,流水作业被广泛用于工程施工的组织生产。到20世纪80年代初,前苏联学者C. A. 乌沙茨基在其编著的《城市建设组织计划与管理》中综述了这段时间对流水施工的研究成果:在施工流水作业模拟方法中利用统计分析方法,按照正态分布对流水作业的可靠度进行了计算分析。C. A. 乌沙茨基指出,可靠性指标是反映施工流水作业设计质量和功能的主要标志。在设计施工流水作业时,其可靠性根据在一定时间内保持设计参数的程度来确定,由此必须通过提高流水作业的可靠性来达到提高施工均衡性和连续性的水平。实践表明,在流水施工中根据工艺要求和组织技术的可靠性要求进行施工生产组织设计,可以缩短建设工期5%~10%,降低劳动消耗10%~30%,减少机械使用量15%~20%,并提高组织技术决策的可靠性和整个生产过程的效果。^[19]

1957年美国杜邦公司在兰德公司的合作下开发出了CPM(critical path method)方法,并用于工程施工进度计划的编制与控制。1958年美国海军为研制“北极星导弹潜艇”,成立了SPO(特种项目局),开发组织协调有11000多家单位参与的研制工作与进度安排的方法。通过从数学和统计学等方面来研究大规模工程建设的有关计划和管理,提出了PERT(program evaluation and review technique)方法。^[19] CPM和PERT都是以网络图来表示工程项目施工的顺序和时间,

PERT 借助电子计算机在北极星计划中进行运用并取得了成功,使其提前 2 年完成研制任务。

PERT 根据项目施工工作持续时间因多种因素的影响而具有不确定性,提出了三时估计法,依据三时的概率分布情况确定各工作的持续时间为:

$$D_i = \frac{1}{6}(a + 4m + b) \quad (1.2)$$

式中, D_i —— i 项工作的持续时间;

a —— i 项工作时间的乐观值;

m —— i 项工作时间的最大可能值;

b —— i 项工作时间的悲观值。

此时,用方差 $\sigma^2 = [(a+b)/6]^2$ 来判别其工作时间 a 、 b 、 m 的离散性。在 PERT 中关键节点的时差 $SL=0$,这一点与 CPM 网络类似,不同之处在于 PERT 中节点的时差是一个正态分布随机变量,计算所得的 SL 值是一个期望值。因此可以根据 SL 及其方差 $\sigma^2(SL)$ 估计该节点完成时间延误(失控工期)的概率,并根据这一失效概率的大小确定工程施工进度计划的可靠度。^[20]在计划评审技术(PERT)的基础上,1966 年出现了图示评审技术(GERT),1979 年出现了随机网络计划技术(QGERT),1981 年发明了风险型随机网络技术(VERT)。这些方法,都是用来解决工作的逻辑关系不肯定,且各工作的持续时间也不肯定情况下的网络计划问题,方法过程中都运用了概率方法进行可靠性分析。例如 GERT,它是在 1962 年埃斯的广义网络技术上经过埃尔玛格拉比、普得茨克等人不断完善而发展起来的,它用随机型解决不受限制的工作流向,对作为概率型的工作时间用按随机变量的方法来进行分析和判别其可能性与可靠性。^[20~22]

除对施工进度计划的可靠性进行了上述工作之外,学者们在对施工可靠性的研究上还从以下几个方面进行了相应的工作。

1. 施工质量的可靠性的研究及应用

在施工质量控制方面,结构工程研究者从结构可靠性的定义出发研究施工期结构的可靠性,其研究内容主要反映在这样几个方面:

- ①施工期结构分析的方法；
- ②施工现场结构的测试与分析；
- ③施工期荷载调查与测试；
- ④施工期混凝土结构可靠性分析；
- ⑤考虑人为错误的结构可靠性研究；
- ⑥施工期不确定性研究。

具有代表性的是：

1992年李惠明博士以高层钢筋混凝土板柱结构为例，对施工阶段结构的受力性能和反应以及和施工器械之间的相互作用，施工过程的活荷载作了一系列的研究工作。从时变结构概念和结构寿命的时间观点出发，研究了施工阶段结构的内力、位移分析以及安全检验的必要性和复杂性，并在 Grundy 和 Kabaila 于 1963 年提出的简化计算方法的基础上，导出每一施工步骤下的模板支撑、二次支撑以及混凝土楼板分担荷载的计算公式，且编制模拟程序以检验楼板在每一施工步骤是否处于安全状态，还提出了用失效概率度量结构的施工安全和相应的计算机实现的方法。通过计算实例表明，施工过程中的失效概率远大于正常使用阶段的失效概率，即采用其所提出的方法验证已认定可行的施工方案，表明其失效的概率还是相当高的。^[23]

巴松涛博士于 2000 年则从钢筋混凝土结构可靠性理论出发，对施工期可靠性控制进行研究，提出了应用可靠性理论进行钢筋混凝土结构施工期质量控制的途径和方法。^[24]指出基于现行标准方法所验证的标准性能，是一个基本不随时间变化的随机变量，它已渡过了随时间的增加而变化比较明显的施工期。对处于施工期的材料性能的质量控制，则不能按现行标准规定的质量方程式执行。提出施工期结构构件的质量水平可以其施工期目标可行指标 β 来衡量，施工期内 t 时刻材料性能 $f(t)$ 的实际质量水平可用其统计特征值（均值 $u_{f(t)}$ 和标准差 $\sigma_{f(t)}$ ）来表示，为了控制施工期材料性能的质量，须建立 β 与 $u_{f(t)}$ 、 $\sigma_{f(t)}$ 之间的函数关系，以明确提出施工对 t 时刻材料性能 $f(t)$ 的质量要求。从而建立了对施工期结构构件材料性能进行质量控制的“动态质量方程式”的通式：