

混凝土 安全性专家系统

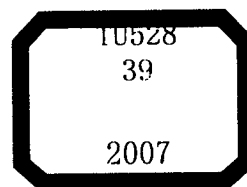
Hunningtu Anquanxing Zhuanjiaxitong

■ 胡曙光 钟 珞 吕林女 著



科学出版社

www.sciencep.com



混凝土安全性专家系统

胡曙光 钟 珞 吕林女 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

混凝土安全性专家系统运用国家重点科技攻关最新成果,并结合广泛收集、整理的大量现有文献和工程资料,利用先进的专家系统开发技术进行科学的分析、归纳、推理,建立起混凝土耐久性的碱集料反应、化学腐蚀、冻融破坏、钢筋锈蚀和混凝土实用先进技术子专家系统,然后将其集成为一个统一、完整、实用的专家系统。该系统能对各种混凝土工程进行科学的研究、评估、诊断、事故预防措施、性能设计和施工指导,从而可以有效地减少混凝土的损害,节省工程维护、维修费用,延长使用寿命,提高工程的安全性。同时,专家系统还能很方便地吸收、补充、完善最新的知识和经验,不断提高本领域的整体理论研究和科学技术水平。

本书内容丰富、体系完整、知识新颖,具有很强的实用性,可供混凝土科学和工程技术领域的广大科研、设计、施工技术人员和大中专院校师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土安全性专家系统/胡曙光,钟珞,吕林女著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-018410-8

I.混… II.①胡…②钟…③吕… III.混凝土-安全性-专家系统 IV.TU528-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第001096号

责任编辑:张颖兵

责任印制:高 嵘/封面设计:天地人设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

湖北北京山德新印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年1月第一次印刷 印张:23 1/2

印数:1—1 500

字数:579 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

我国正处于国民经济快速发展的重要时期，大规模城市基础设施建设，大型水利、地下空间和海洋开发，国家高速铁路和公路网建设等重大工程需要我们提供大量、高质量的混凝土。现代工程混凝土除了必须满足工程设计的力学强度要求外，还应该具有良好的耐久性，以确保工程的安全性和长寿命。但是，越来越多的工程实践表明，随着现代混凝土强度的不断提高和各种外加组分的增加，混凝土的耐久性问题日渐突出，许多混凝土工程尚未达到设计寿命就显现出耐久性不好的病害，甚至发生严重事故而造成巨大损失。如何预防和减轻混凝土的耐久性破坏，提高混凝土工程的安全性，已经成为当今混凝土科学技术工作的最重要内容。

混凝土安全性是指其在使用过程中抵御内部病害、外部侵蚀或破坏的能力和长期安全使用的耐久性能，耐久性是导致混凝土工程过早破坏的最主要最复杂的因素之一。在过去的理论研究和工程实践中，人们已经积累了一些有关混凝土耐久性的知识和经验，但由于影响混凝土耐久性各种因素本身的复杂性以及它们之间关系的不确定性，使得过去对这些知识和经验的获取过程相当困难，所得到的结果也因此缺乏科学性和完整性，很难在实际工程中发挥其应有的指导作用。

本书作者及其团队运用先进的计算机技术，以混凝土安全性设计为核心，研究开发出涵盖混凝土碱集料反应、冻融破坏、钢筋锈蚀、硫酸盐侵蚀这四个最主要的影响因素，结合混凝土实用先进技术而形成的一个从混凝土原材料选择、配比计算、试配调整、施工设计、质量控制、耐久性性能评估与诊断直至混凝土工程修补与修复的全过程智能设计、控制的综合性混凝土安全性专家系统。该系统在功能的完整性、知识的综合性和工程的实用性方面具有国际领先水平 and 独特的创新性，并已成功应用于包括国家重点工程在内的众多混凝土工程，取得了显著的经济和社会效益。

该书广泛吸收、归纳、总结和提炼已有混凝土耐久性知识和经验，特别是大量采用了最新的混凝土耐久性研究成果，同时在专家系统的研制和使用方面也取得了一定成绩。本书的资料来源广泛、信息量大、内容丰富，是一本全面介绍混凝土耐久性和安全性专家系统的专著，具有较高的学术水平和应用价值。我衷心祝贺科学出版社出版这本书，并相信本书的出版将对混凝土耐久性的研究与应用起到积极的推动作用。

中国工程院院士

2006年10月

前 言

混凝土是当今世界上最主要的建筑结构与基础工程材料,我国是目前混凝土用量最大的国家,中国经济的飞速发展仍将使今后相当长的一段时期内我国的混凝土使用量居高不下。国内外众多事例表明,混凝土材料的非正常损害和混凝土工程的安全性问题日益严重。据统计,全世界每年用于混凝土工程修复和重建费用已高达数千亿美元,在发达国家越来越多的混凝土工程进入病害修缮期,甚至需要重建。在我国大量的混凝土工程需要修补、修复,许多工程尚未到达设计年限已提前进入重病阶段,一些工程甚至刚刚建成就出现混凝土的病害症状。

混凝土安全性是指其在使用过程中抵御内部病害、外部侵蚀或破坏的能力和长期安全使用的耐久性能。耐久性是导致混凝土工程过早破坏的最主要最复杂的因素之一,主要涉及混凝土中的碱集料反应,化学腐蚀,冻融破坏,钢筋锈蚀等问题。

现有混凝土材料设计方法采用单一的强度设计标准,也即用强度值来表示混凝土的力学性能和间接推测其他各种性能。但混凝土工程的实际使用情况表明,在许多情况下,非力学作用的耐久性问题往往决定着混凝土建筑工程的使用寿命。由于现行设计方法的缺陷以及对耐久性问题的忽视,导致大量混凝土工程因耐久性问题而丧失使用功能。

长期以来,通过大量的理论研究和工程实践,人们已经积累了一些对混凝土工程耐久性能进行评估、诊断、事故预防以及性能设计等方面的知识和经验。但由于各种影响混凝土安全性因素本身的复杂性以及它们之间关系的复杂性和不确定性,过去使得对这些知识和经验的获取过程相当困难,同时所得到的结果也因此缺乏科学性和可靠性,很难在实际过程中推广和应用。

专家系统的研究开发正是为了解决上述问题。“混凝土安全性专家系统”是以混凝土安全性为设计核心,涵盖混凝土碱集料反应、冻融性、钢筋锈蚀、硫酸盐侵蚀这四个最重要且最复杂的混凝土安全性影响因素及其交互作用,结合混凝土实用先进技术而形成的一个从混凝土原材料选择、配比计算、试配调整、施工设计、质量控制、耐久性性能评估与诊断直至混凝土工程修补与修复的全过程智能设计、控制的综合性混凝土安全性专家系统。它能使混凝土工程从设计阶段就开始考虑防止和克服各种耐久性因素对安全性的影响,也可对已建成的工程安全性进行评估、诊断,发现其潜在的不安定因素,以便及早采取有效对策,指导重点工程建设和已建混凝土工程维护,减少损失,减少混凝土工程的维护、维修费用,延长使用寿命。同时,用专家系统亦能很方便的不断吸收、补充、完善最新的知识和经验,使该领域内的整体理论研究和工程应用处于一个较高的水平。

本书作者及其团队所承担的“混凝土安全性专家系统研究”属国家“九五”重点科技攻关和“十五”科技攻关计划项目,所申报的国家知识产权和发表的大量科技论文,已形成了混凝土专家系统较为完整的和具有自主知识产权的理论与技术体系。这些成果包括国家计算机软件著作权6项,相关科技奖励5项,公开发表学术论文150余篇,其中被SCI、EI收录30余篇。

本专家系统成果已应用于国家重点工程长江三峡水利枢纽工程、武汉长江隧道工程、南

京地下铁道工程、连云港田湾核电站工程、京珠高速公路工程、黑龙江哈同公路工程、武汉白沙洲长江大桥等众多桥梁工程以及大量商品混凝土管理站的技术指导和管理工作的，并已取得显著的经济社会效益。显见，专家系统的研制开发和推广应用，必将会为众多的混凝土工程技术人员和重点工程项目提供专家级高水平的技术决策工具，大大提高我国整体的混凝土科学技术水平。

全书共七章，主要撰写工作由武汉理工大学的胡曙光、钟珞、吕林女完成，参加相关项目研究和撰写工作的还有马保国、夏红霞、丁庆军、宋华珠、邹承明、陈采军、张厚记、覃立香、刘立胜、王发洲、何永佳、潘昊、彭波、管斌君。第三章“混凝土碱集料反应专家系统”的研究和撰写工作由南京工业大学的邓敏、蔡瑞英、兰祥辉等完成；第四章“混凝土抗冻性专家系统”的研究和撰写工作由同济大学的吴学礼、杨全兵、许丽华、朱蓓蓉等完成。胡曙光负责统稿。

在本项目的研究和本书的撰写过程中引用了大量兄弟单位和科技工作者的成果和文献，得到很多同行专家的帮助和支持，在此表示深深谢意。特别感谢唐明述院士对本研究工作的鼓励和指导，感谢原国家建筑材料工业局科技司的王媛俐副司长和中国建筑材料研究院院长姚燕教授对本研究工作的支持。

由于本书作者水平有限，书中的错误和疏漏在所难免，尚祈广大读者不吝赐教。

胡曙光 钟 珞 吕林女

2006年10月

主要作者简介

胡曙光，男，1957 年出生，湖北武汉人，工学博士，教授，博士研究生导师，享受国务院政府特殊津贴，国家新世纪百千万人才工程(第一层次)人选，湖北省有突出贡献中青年专家。在国家建材行业科学技术教育委员会、硅酸盐材料工程教育部重点实验室学术委员会和多家学术团体任职，担任《建筑材料学报》、《武汉理工大学学报》、《华中科技大学学报》等多家学术刊物副主编和编委。已承担国家自然科学基金、“863”、“973”、国家攻关和各类省部级科研课题 20 多项，获国家科技进步二等奖 2 项和省部级奖 10 多项，获得国家发明专利授权 9 项，获国家计算机软件著作权 6 项，公开发表学术论文 200 余篇，出版著作 8 部，培养研究生 80 余名。主要研究领域和方向：先进水泥基复合材料、高性能混凝土、环境与生态建筑材料、信息与计算机技术在水泥混凝土领域的应用。

钟珞，男，1957 年出生，湖南长沙人，工学博士，教授，博士研究生导师，武汉理工大学计算机学科带头人，湖北省优秀研究生导师，湖北省科技精英，中国计算机学会会员，中国电子学会会员，湖北省计算机学会常务理事，武汉软件工程学会副主任。已承担国家自然科学基金、国家攻关和各类省部级科研课题 10 多项，获湖北省科技进步一等奖 2 项，公开发表学术论文 200 余篇，被 SCI、EI 收录 100 多篇，出版著作 20 多部。培养研究生 100 余名。主要研究领域和方向：智能科学与技术、软件工程、计算机可视化技术。

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 混凝土的安全性	1
1.2 专家系统的定义与组成	2
1.3 国内外水泥混凝土专家系统研制现状	2
1.4 混凝土安全性专家系统	3
1.4.1 混凝土安全性专家系统的意义	3
1.4.2 系统的内容与结构设计	4
1.4.3 系统的特点	5
1.5 本书成果的知识产权及应用情况	6
2 混凝土抗钢筋锈蚀专家系统	8
2.1 混凝土抗钢筋锈蚀专家知识的研究	8
2.1.1 概述	8
2.1.2 系统框架及设计思想	9
2.1.3 混凝土中的钢筋锈蚀	11
2.1.4 混凝土抗钢筋锈蚀工程辅助设计	23
2.1.5 混凝土抗钢筋锈蚀评估诊断	39
2.1.6 混凝土钢筋锈蚀预防修补	46
2.2 混凝土抗钢筋锈蚀专家系统的研制	51
2.2.1 概述	51
2.2.2 知识表示	56
2.2.3 知识库设计	62
2.2.4 控制策略及推理机	67
2.2.5 实现技术	70
2.3 混凝土抗钢筋锈蚀专家系统的使用	76
2.3.1 系统使用说明	76
2.3.2 运行实例	80
3 混凝土碱集料反应专家系统	100
3.1 混凝土碱集料反应专家知识的研究	100
3.1.1 概述	100
3.1.2 系统框架设计	101
3.1.3 系统领域知识中的一些基本概念	102
3.1.4 混凝土碱集料反应工程辅助设计	104
3.1.5 混凝土碱集料反应评估诊断	107
3.1.6 混凝土碱集料反应破坏工程修补	117
3.2 混凝土碱集料反应专家系统的研制	118
3.2.1 软件开发环境	118

3.2.2	系统技术特点	118
3.2.3	实现技术	119
3.3	混凝土碱集料反应专家系统的使用	121
3.3.1	系统安装及使用流程	121
3.3.2	各模块的使用说明	122
3.3.3	帮助的使用	128
4	混凝土抗冻性专家系统	132
4.1	混凝土抗冻性专家知识的研究	132
4.1.1	概述	132
4.1.2	系统框架设计	133
4.1.3	抗冻混凝土设计和混凝土抗冻性评估的基本数学模型	134
4.1.4	抗冻混凝土工程辅助设计	139
4.1.5	混凝土抗冻性评估方法	145
4.1.6	混凝土抗冻性工程修补	148
4.2	混凝土抗冻性专家系统的研制	150
4.2.1	概述	150
4.2.2	系统软件设计特点	151
4.2.3	系统软件结构	152
4.2.4	知识与知识库	152
4.2.5	系统的推理机制	155
4.3	混凝土抗冻性专家系统的使用	157
4.3.1	系统简介	157
4.3.2	系统安装及操作说明	157
4.3.3	系统使用说明	158
5	混凝土抗硫酸盐侵蚀专家系统	174
5.1	混凝土抗硫酸盐侵蚀专家知识的研究	174
5.1.1	概述	174
5.1.2	系统框架设计、设计思想及知识表示方法	175
5.1.3	硫酸盐侵蚀影响因素	180
5.1.4	混凝土抗硫酸盐侵蚀工程辅助设计	192
5.1.5	混凝土抗硫酸盐侵蚀工程耐久性预测	197
5.1.6	混凝土抗硫酸盐侵蚀工程修补	199
5.2	混凝土抗硫酸盐侵蚀专家系统的研制	202
5.2.1	BP 神经网络生成系统的功能与结构	202
5.2.2	神经网络的设计与网络训练	208
5.3	混凝土抗硫酸盐侵蚀专家系统的使用	211
5.3.1	使用说明	211
5.3.2	运行实例	213
6	混凝土实用先进技术专家系统	228
6.1	混凝土实用先进技术专家知识的研究	228
6.1.1	概述	228
6.1.2	系统框架设计	231
6.1.3	混凝土的和易性	232
6.1.4	工程配比设计	240

6.1.5 施工技术	274
6.1.6 质量控制	278
6.2 混凝土实用先进技术专家系统的研制	282
6.2.1 系统基本结构及数据流分析	282
6.2.2 知识表示	285
6.2.3 知识库	288
6.2.4 控制策略及推理机设计	290
6.2.5 实现技术	293
6.3 混凝土实用先进技术专家系统的使用	296
6.3.1 系统的使用说明	296
6.3.2 运行实例	299
7 混凝土安全性专家系统的集成	321
7.1 混凝土安全性专家系统集成研究	321
7.1.1 信息集成	321
7.1.2 软件集成框架	326
7.1.3 界面集成	334
7.2 混凝土安全性专家系统的使用	338
7.2.1 系统使用说明	339
7.2.2 运行实例	342
附录 1 国外混凝土中钢筋锈蚀实例及其分析	350
附录 2 国内混凝土中钢筋锈蚀实例及其分析	351
附录 3 粉煤灰混凝土抗钢筋锈蚀实例	352
附录 4 矿渣混凝土抗钢筋锈蚀实例	353
附录 5 硅灰混凝土抗钢筋锈蚀实例	354
附录 6 AiExpert 类成员列表	355
附录 7 人工神经网络用于耐久性预测的部分数据	358
附录 8 修补材料选择规则描述	361

1 绪 论

1.1 混凝土的安全性

水泥混凝土是近代使用最广泛的建筑材料,也是世界上截至目前最大宗的人工制备材料。水泥混凝土诞生自 1824 年波特兰水泥的发明,1850 年出现了钢筋混凝土,弥补了混凝土抗拉强度和抗折强度低的缺陷,1940 年采用了预应力钢筋混凝土技术,达到了在荷载作用下既抗拉又不致形成裂纹的优异性能,至 20 世纪 80 年代末、90 年代初出现了按耐久性进行设计的高性能混凝土。这些突破性技术进展,使得混凝土与人类社会进步和经济发展相适应并使其本身得以发展。与其他常用建筑材料相比,水泥混凝土具有原料来源广泛、制备加工方便、生产成本低,特别是综合能耗低等优点。因此,专家们预言,混凝土仍为 21 世纪最主要和不可替代的建筑材料。

然而,国内外众多事例表明,混凝土材料并不像期望的那样耐久,很多工程未达到设计寿命就显现出耐久性不好的病害,甚至发生严重事故而造成十分巨大的经济、社会损失,威胁了公共安全。据统计,英国建筑和土木工程的维修费用为 150 亿英镑,其中混凝土工程维修费为 5 亿多英镑;美国混凝土基建工程的总价为 6 万亿美元,今后每年用于混凝土工程维修和重建的费用估计将高达 3000 亿美元。1978 年,美国仅用于修复公路桥面板的费用即为 63 亿美元。1980 年,北海 Stavanger 近海钻井平台 Alexander Kjell 号突然破坏,导致 123 人死亡。国内的大规模混凝土工程建设历史虽然不如发达国家长,但仅仅从近些年的工程实际情况来看,其损害也是严重的。一些机场跑道、高速公路、铁路桥梁轨枕、京津地区的立交桥、华东南地区海港码头等混凝土工程在远低于其设计寿命(有的甚至刚刚建成几年内)即遭损坏。可见,混凝土耐久性问题已严峻地摆在我们的面前,应该引起高度的重视,切实采取措施以提高混凝土的耐久性。

耐久性是导致混凝土工程过早破坏的最主要、最复杂的因素之一。混凝土的耐久性是指混凝土抵抗环境介质作用并长期保持其良好的使用性能和外观完整性,从而维持混凝土正常使用的能力和结构的安全性,主要涉及混凝土中的碱集料反应、化学腐蚀、冻融破坏、钢筋锈蚀等问题。有关混凝土的耐久性在国外已得到广泛重视,国内近些年来也逐渐加强了认识和重视。我国正处于经济高速发展的关键时期,作为最主要的建筑材料,水泥和混凝土将面临更大的需求,许多重点工程的筹划和兴建正方兴未艾,如城市基础设施建设、大型水利工程、地下空间和海洋开发工程、国家铁路和高公路网建设、大中型飞机场工程等,这些均是国家投以巨资的项目,社会影响大,如能重视工程的质量和耐久性,将大大延长工程的使用寿命,为国家节约数以万亿元计的修复和重建费用。

长期以来,通过大量的理论研究和工程实践,人们已经积累了一些对混凝土工程耐久性进行评估、诊断、事故预防以及性能设计等方面的知识和经验。但由于各种影响混凝土安全性因素本身的复杂性以及它们之间关系的复杂性和不确定性,过去对这些知识和经验的获取过程相当困难,同时所得到的结果也因此缺乏科学性和可靠性,很难在实际过程中推广和

应用。在科学技术高速发展的今天,如何对这些知识和经验进行科学的归纳、总结,不断更新、补充、完善,并迅速、方便地应用于指导工程实践,提高混凝土工程质量,保证工程的安全性,使混凝土科学技术水平赶上时代进步的步伐,是摆在我们面前急需解决的重大课题。混凝土安全性专家系统的研究与开发正是为解决这个问题而设立的课题。

1.2 专家系统的定义与组成

专家系统是以现有的科学技术为基础,通过建立模型、计算机智能化等手段,将已有的知识和经验进行综合、归纳、演绎和智能化,建立一种普适性的计算机软件,用于指导工程实践。专家系统是一种基于知识的智能程序,它利用人类专家多年来积累的工作经验与专门知识,模拟人类专家的推理过程,解决特定领域中的复杂问题,其基本结构如图 1.1 所示。

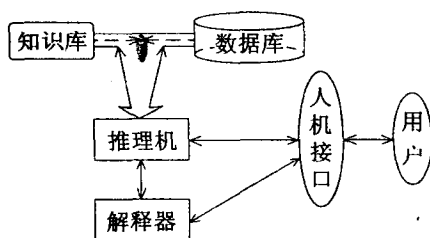


图 1.1 专家系统基本结构

专家系统中各组成部分功能为:①知识库,用于存储某领域专家系统的专门知识,包括事实、规则等;②数据库,用于存放领域信息中的结构化数据;③推理机,推理机能够根据一定的推理方式和控制策略,利用知识推导出结论,而不是简单地搜索现成的答案;④解释器,能够向用户解释专家系统的行为,包括解释推理结论的正确性以及系统输出其他候选解的原因;⑤人机接口,能够使系统与用户进行对话,使用户能够输入必要的数据、了解推理过程及推理结果等,

系统则通过接口,要求用户回答提问,并回答用户提出的问题,进行必要的解释。

研制专家系统有助于找出有关领域研究的薄弱环节,促进该领域技术知识的进一步提高与发展。专家系统作为一种知识利用、保存和传播的现代化工具,可帮助专家总结经验、精练知识、博采众长,避免个别专家的局限性。专家系统使相关知识具有更高的可靠性,所保存的知识具有永久性,不会由于某些原因而消失,其知识的复制与传播更方便、更迅速。

1.3 国内外水泥混凝土专家系统研制现状

专家系统在水泥混凝土领域的应用时间不长。在此方面,最早见诸报道的是 1982 年由丹麦 F.L.Smith 公司研制的水泥窑模糊逻辑控制系统。1985 年,美国的 Clifton 等人建立了关于混凝土耐久性的专家系统——DURCON(Durable Concrete)。该系统由美国国家标准局和美国混凝土耐久性委员会(ACI201)共同组织研制,是专门用于提高混凝土耐久性而进行混凝土设计选择方案决策的标准系统,其主要功能是提供控制混凝土钢筋锈蚀、冰冻和盐冻、抗硫酸盐侵蚀和碱集料反应等方面的混凝土参数。1988 年,美国标准技术研究所与陆军工程师特种部队建筑工程研究室研制了判断混凝土工程开裂原因的专家系统。1987 至 1988 年日本神户大学宫本文穗等人研制了混凝土碱-硅酸反应诊断系统。1989 年 T. Lelik 等人研制了有关混凝土配比和混凝土搅拌质量控制的 ESCON 专家系统,该系统在有限的文献中收集混凝土搅拌方面的知识和有关专家们的知识和经验,用 IF-THEN 逻辑语句组成了知识库,它的应用降低了配料、搅拌过程中出现的误差和故障的几率。1990 年 10 月,上海第六届聚合物混凝土会议上,波兰的 L.Czarnecki 提出了聚合物混凝土专家系统的基本思路,给出了混凝土聚合物复

合材料的详细分类模型和该专家系统的组成图。1990 年报道了芬兰技术研究中心研制的预制混凝土类型选择的专家系统,该系统由用户输入混凝土抗压强度、施工条件、钢筋间距和防腐要求等信息,系统将输出有关混凝土使用的外加剂、最大集料尺寸、合适的混凝土工艺等信息。目前,有关研究工作仍在深入进行之中。

近年来国内在一些工程技术领域中的专家系统建立工作已逐渐展开,部分研究成果在实际工程应用中已发挥了很大的作用。国内对混凝土安全性以及各种影响因素系统的深入研究于 20 世纪 90 年代初才开始,有关混凝土耐久性专家系统的研究和应用起步较晚。“九五”期间,在国家计委、科技部的支持下,由武汉理工大学牵头,组织南京工业大学、同济大学和湖北大学等单位参加,共同承担并系统开展“混凝土安全性专家系统的研究”的专题研究工作。“十五”期间,该项工作继续得到国家科技部的高度重视和支持。

1.4 混凝土安全性专家系统

混凝土安全性专家系统是依据国家“九五”、“十五”攻关项目中对影响混凝土安全性各种特性的研究成果,并结合广泛收集、整理大量现有文献和工程资料、数据,利用当代最先进的计算机技术进行科学的分析、归纳、推理,首先建立起影响混凝土安全性各种性能的各子专家系统,然后在统一规定的技术要求之下将其集成为一个完整的系统,使广大混凝土科技工作者能利用该软件充分运用当代先进的计算机技术,对各种混凝土工程进行科学的评估、诊断,进行事故预防措施、性能设计和施工指导,有效提高混凝土工程的安全性,提高本领域的科学技术水平。

1.4.1 混凝土安全性专家系统的意义

建立混凝土安全性专家系统的重要作用和意义在于:①评估和诊断工程混凝土安全性是一件高智力的工作,要对实际工程进行设计和施工的指导更是困难,而专家系统是一种智能程序,其内部存储有专家水平的领域知识和经验,它能利用人类专家可用的知识和解决问题的方法来解决各种专门的、通常又是困难的专业任务;②所建成的混凝土安全性专家系统知识库中,可存储丰富的由文献资料得到的以及由本攻关项目研究成果组成的混凝土工程安全性的知识和经验,这些知识为混凝土安全性的理论研究,实际工程评估、诊断和设计与施工指导奠定了基础;③从实际情况来看,由于具体工程中各种条件和因素的复杂性,目前对影响混凝土安全性的一些因素,在设计、施工和验收规范中并没有提出明确的、系统化的规定和技术要求,而采用混凝土安全性专家系统,能使这项工作科学化和普及化,从而有效提高混凝土工程的安全性。

本专家系统建立的目的是为了提供一种方便、实用和高水平的现代化工程技术工具。采用该技术,能使混凝土工程避免由于碱集料反应、硫酸盐侵蚀性、冻融性、钢筋腐蚀等耐久性问题而产生的安全性破坏,从而可以有效减少混凝土工程的维护、维修费用,延长使用寿命。在所建立的专家系统中,能使混凝土工程从设计阶段就开始考虑防止和克服各种因素对安全性的影响。另外也可以通过对已建成的工程安全性的评估、诊断,发现其潜在的不安定因素,以便及早采取有效对策,减少损失。同时,用专家系统能很方便地不断吸收、补充、完善最新的知识和经验,使该领域内的整体理论研究和工程应用处于一个较高的水平。可见,

该专家系统的研制开发和推广应用,必将会为众多的混凝土工程技术人员和重点工程项目提供专家级高水平的技术决策工具,大大提高我国整体的混凝土科学技术水平,其巨大作用无可估量。

1.4.2 系统的内容与结构设计

根据目前对混凝土耐久性的研究及认识,并充分体现系统的自动问询性,混凝土安全性专家系统设计为包含混凝土耐久性设计、混凝土抗钢筋锈蚀、混凝土碱集料反应、混凝土抗冻性、混凝土抗硫酸盐侵蚀和混凝土实用

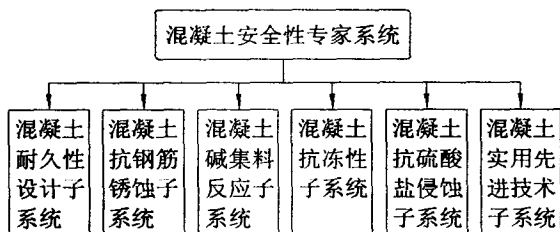


图 1.2 混凝土安全性专家系统总体框架

冻性、混凝土抗硫酸盐侵蚀和混凝土实用先进技术 6 个子系统,其中混凝土实用先进技术专家系统又由泵送混凝土专家系统和高强混凝土专家系统组成。每个子系统可相对独立工作,并由总系统进行集成,如图 1.2 所示。

混凝土耐久性设计子系统的建立,有助于对领域知识不太了解、不能确定该进入哪个子系统的用户方便地进入相应的子

系统进行混凝土耐久性设计。用户只需通过选择工程所在区域(西北地区、华北地区、东北地区、华中地区、沿海地区、华东地区、华南地区、西南地区),工程类型(港口、道路、桥梁、机场、大坝、水工、民用建筑、其他),工程服役环境温度(年最低月平均气温为 -10°C 以下、 $-10\sim-5^{\circ}\text{C}$ 、 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 、 0°C 以上),以及环境 Cl^{-} 浓度(mg/L)、环境 CO_2 浓度($\mu\text{L/L}$)、环境 SO_4^{2-} 浓度(mg/L)、环境 Mg^{2+} 浓度(mg/L)所在范围区间等条件,系统调用相应知识库,判断各项耐久性指标的权重大小,并自动先后进入相应的一个或几个混凝土安全性子系统进行设计。

各子系统根据自身特点,确定系统所含内容。混凝土抗钢筋锈蚀子系统、混凝土碱集料反应子系统、混凝土抗冻性子系统以及混凝土抗硫酸盐侵蚀子系统均能对所涉及的耐久性能进行工程辅助设计,能诊断工程状况,也能对发生了一定程度破坏的混凝土进行修补等,并由以下 5 个模块构成:① 工程辅助设计;② 混凝土评估与诊断;③ 工程修复(补);④ 文献检索;⑤ 帮助功能(含解释、有关知识介绍、领域背景、学习等)。

(1) 工程辅助设计 要从根本上提高混凝土耐久性,必须在混凝土原材料的选择和配合比设计时就考虑耐久性要求,工程辅助设计模块正是基于这种需要而建立的。当用户给出了一定的工程要求和环境条件以后,系统即可根据环境条件的恶劣程度,结合用户对混凝土的耐久性、强度等性能要求,进行混凝土原材料的选择和配合比计算,并确定合适的施工工艺,使混凝土工程在给定环境条件中,在满足强度要求的情况下,能够长期、安全、有效地运行。

(2) 混凝土评估与诊断 混凝土工程的服务年限往往是用户所关切的问题,这一模块的功能就是根据环境条件和混凝土工程状况(包括原始状况和破损状况)来预测和评估即将建设的或正在使用中的混凝土工程的耐久性状况。对于即将建设的混凝土工程,也就是对于一个设计方案,通过耐久性预测,可以使用户了解该方案是否合理,以便及时加以调整使预建工程满足特定环境的耐久性要求,从而减少工程破坏造成的损失和浪费;而对于实际的正在使用的混凝土工程,可以通过该系统来预测其剩余寿命,决定是否需要对其进行修补,从而使用户方便地了解混凝土工程的使用情况,及时采取相应的对策和措施。

(3) **工程修复(补)** 过去很长时间内,由于对耐久性问题的忽视,很多混凝土工程在硫酸盐侵蚀下达不到设计使用年限就发生腐蚀破坏。虽然近些年来,混凝土的耐久性问题越来越受到重视,但也会由于设计上的失误或混凝土使用过程中环境条件的变化及其他因素的影响,使混凝土工程不能达到要求的耐久年限。因此,工程修补是一项十分必要的工作,为此设计了工程修复(补)子模块。借助这一模块,可以根据环境条件、混凝土原始状况和破损状况,结合修补要求,选择合适的修补材料和与之相适应的修补方法,对发生一定程度破坏的混凝土工程进行修补修复,以延长其使用寿命,节省重建投资。

(4) **文献检索** 专家系统在建立过程中查阅收集了大量的文献资料,对其进行整理汇编,建立文献检索子模块,不仅为专家系统的开发和应用提供了方便,更重要的是为用户提供在线帮助、操作向导和在线解释。该系统由数据库语言编制,用于文献的登录与检索,系统设置了智能接口,可以对有限集自然语言进行识别。系统由主控模块、文献登录/修改模块、智能接口、文献检索模块、文献库维护模块和文献库组成。文献系统有背景知识、耐久性能、物化性能、测试方法、环境条件、对结构性能影响、计算机应用、各国标准及规范等内容。系统可根据作者名、国家名、日期、刊物名、标题、关键词和性能类别等进行检索。

(5) **帮助** 设立帮助模块,一方面可以为用户使用该系统提供方便的在线帮助信息和操作向导,而且在帮助模块中存储大量的基本知识,包括系统简介、破坏机理、重要概念、基本测试方法及一些解释说明等,以方便用户学习使用。另一方面正是通过这一模块,系统可以在使用过程中不断进行自我更新、自我提高和自我完善,使专家系统能够适应科学技术的进步和发展。

在混凝土先进实用技术子系统中,设计了泵送混凝土和高强混凝土两个模块,其目的是通过采用先进技术从总体上提高混凝土质量。

1.4.3 系统的特点

混凝土安全性专家系统的研制,使广大混凝土科技工作者能利用该软件充分运用当代先进的计算机技术,对现有各种混凝土工程的耐久性特性进行科学的评估、诊断和性能设计、施工指导,以提高混凝土工程抗破坏的安全性,提高本领域的科学技术水平。系统具有以下一些设计特点:

(1) **内容全面** 如前文所述,该系统含 6 个子系统,内容全面,涉及混凝土耐久性的各个方面。

(2) **内容丰富实用、科学** 混凝土安全性专家系统以用户的需求为出发点进行总体设计,内容丰富实用、科学。各子系统均包含工程辅助设计;混凝土评估与诊断;混凝土修复(补);文献检索和帮助等功能。查阅收集了近 40 年来国内外发表的有关混凝土耐久性的主要文献资料 4000 余篇,并对这些资料进行了全面地分析、归纳、总结和提炼。资料源包括:①有关混凝土耐久性的设计规范、标准;②各种工程、实验报告和实例;③主要专业杂志和有关专业书籍;④各种有关学术会议论文集;⑤有关研究课题的非公开研究报告及总结国内外文献。在文献资料收集、整理中,重点突出了 20 世纪 90 年代中期混凝土学科发展起来的高性能混凝土的设计施工和应用文献、资料和研究成果,从而使混凝土安全性专家系统的数据库、知识库以及推理机具有较高的起点和科学性、全面性。

(3) **考虑用户需求,方便用户使用** 混凝土安全性专家系统以用户的需求为出发点进行

总体设计,方便用户使用。一方面,解释部件使用方便,解释合理、清晰;另一方面,用户界面友好,响应速度快,容错性强,操作便利。用户一旦进入该系统,即可根据屏幕菜单显示,进入自己所需要的模块,在操作使用过程中,系统又为用户提供了相当多的操作提示和帮助信息,使用户操作起来方便自如。

(4) 在综合考虑的基础上突出耐久性 混凝土安全性专家系统在综合考虑了混凝土的强度及其他性能的基础上,突出了耐久性。“工程评估与诊断”和“工程修复(补)”都是这一思想的直接体现,而“工程辅助设计”不同于传统的“按强度设计混凝土”,而是突出了耐久性思想。该设计虽然仍按强度公式进行配合比计算,但系统从设计的开始,就按照耐久性的要求进行原材料的选择,并对设计计算参数的取值加以限制,从而使设计的混凝土工程不仅满足强度要求,更重要的是使其成为在特定环境下能够达到用户所要求的使用年限的耐久混凝土工程。

(5) 系统知识结构层次化 在专家系统总体框架结构中,知识的构成按照其相互间的内在联系建立层次化结构。就工程设计而言,设计的混凝土工程在一定的使用环境中要满足耐久性要求。因此,用户要求和环境条件构成该模块的第一层次,专家系统根据第一层次来选择合适的原材料,而原材料的选定又是配合比计算的基础,故原材料的选择成为工程设计子模块的一个中间层次,整个系统的知识按照这种思想形成一种合理的层次化结构。

知识结构的层次化不仅符合其本身的内在联系,而且使各层次各模块之间调用灵活方便。比如说,环境条件居于第一层次,它可以在工程设计、寿命预测和工程修补各模块中任意调用;又如,工程设计中的检验调整可以调用寿命预测中的寿命结果来进行判断,这样各层次各模块之间相互调用,使资源得以充分利用。

1.5 本书成果的知识产权及应用情况

本书作者及其团队所承担的“混凝土安全性专家系统研究”属国家“九五”、“十五”科技攻关计划项目,所申报的国家知识产权和发表的大量科技论文,已形成了混凝土专家系统较为完整的和具有自主知识产权的理论与技术体系。这些成果包括国家计算机软件著作权 6 项,相关科技奖励 5 项,公开发表学术论文 150 余篇,其中被 SCI、EI 收录 30 余篇。

本专家系统成果已应用于国家重点工程长江三峡水利枢纽工程、武汉长江隧道工程、南京地下铁道工程、连云港田湾核电站工程、京珠高速公路工程、黑龙江哈同公路工程、武汉白沙洲长江大桥等大量工程中,以及武汉市商品混凝土管理站的技术管理工作中。专家系统将能参与指导重点工程混凝土的设计、施工与应用,有利于确保混凝土工程质量,减少以后的重建和维修费用,防止重大工程事故的发生,延长工程使用年限。实际使用结果表明,混凝土安全性专家系统具有良好的经济效益和社会效益。

项目获得知识产权情况如下:

1. 国家计算机软件著作权(6 项)

- (1) 混凝土安全性专家系统,登记号: 2004SR06535
- (2) 混凝土抗硫酸盐侵蚀专家系统,登记号: 2004SR10856
- (3) 混凝土抗钢筋锈蚀专家系统,登记号: 2004SR06454
- (4) 钢管混凝土专家系统,登记号: 2004SR06456

(5) 泵送混凝土专家系统, 登记号: 2004SR10857

(6) 高强混凝土专家系统, 登记号: 2004SR10857

2. 获得科技奖励情况(5项)

(1) 国家科技进步二等奖, 2004年, 混凝土耐久性关键技术研究及其工程应用

(2) 湖北省科技进步一等奖, 2004年, 混凝土安全性专家系统的研究与应用

(3) “九五”国家重点科技攻关计划优秀科技成果, 2001, 混凝土安全性专家系统

(4) “九五”国家重点科技攻关计划优秀科技成果, 2001, 重点工程混凝土安全性的研究

(5) “九五”国家重点科技攻关计划先进个人, 2001, 胡曙光

参 考 文 献

- 冯乃谦. 2003. 日本混凝土耐久性问题的历史发展及其对策. 混凝土 (7): 14-17, 9
- 龚洛书, 柳春圃. 1990. 砼的耐久性及其防护修补. 北京: 中国建筑工业出版社
- 胡曙光. 1998. 绿色水泥混凝土的可持续发展战略. 武汉工业大学学报, 特刊: 6-8
- 黄土元. 1994. 按服务年限设计混凝土的方法. 混凝土 (6): 24-32
- 刘崇熙. 1996. 三峡大坝混凝土耐久寿命 500 年的设计构思. 南京: 第四届全国混凝土耐久性交流会
- 吕林女, 胡曙光, 丁庆军, 等. 2003. 混凝土安全性专家系统的设计. 武汉理工大学学报, 25(11): 15-24
- 马保国, 贺行洋, 胡曙光, 等. 2002. 混凝土耐久性破坏经时模型. 混凝土 (3): 26-28, 34
- 钱春香. 1991. 专家系统在水泥混凝土领域的应用. 硅酸盐通报 (4): 52-58
- 吴科如. 1985. 混凝土破坏机理概论(下). 混凝土与水泥制品 (2): 2-13
- 吴中伟. 1996. 水泥砼科技工作者面临的挑战与机会. 混凝土与水泥制品 (1): 2-3
- 谢斯托朴洛夫. 1966. 砼的耐久性. 郭奇强, 译. 北京: 科学出版社
- 钟珞, 黄飞, 潘昊, 等. 2004. 基于 Active X 控制的混凝土安全性专家系统. 计算机工程与设计 (11): 1886-1889
- 钟珞, 田相辉, 胡曙光, 等. 2005. 混凝土安全性专家系统实现技术. 黄石理工学院学报 (4): 1-5
- 周迪勋. 1992. 人工智能——专家系统设计原理. 武汉: 武汉工业大学出版社: 1-15
- British Transportation Ministry. 1990. Repair and Maintenance of Midlands Link Express. Working Group 1988 Report Quoted from Concrete Journal: 23-27
- Dunker K F. 1992. Why America's Bridges are Crumbling. Scientific American (3): 66-68
- Mehta P K. 1991. Corrosion Durability-Fifty Years Progress. Proc. of 2nd Inter. Conf. On Concrete Durability. ACI SP126-1: 1-31
- NBS—Battelle. 1980. Cost of Corrosion Study, Part1—Introduction(1975). Materials Performance
- Rasheeduzzafar. 1985. Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures in the Middle East. Concrete International (9): 48-55
- Srinivasan S. 1990. Expert System for Material Selection in Corrosive Environments. Material Performance (10): 69-73
- Strecker P P. 1991. 砼腐蚀破坏的评估与修补. 惠云玲, 韩学明, 译. 北京: 冶金工业出版社
- Wilkins A J, Elgy J. 1991. Application of Expert Systems Technology in the Design of Durable Concrete. Magazine of Concrete Research, 43(151): 65-69