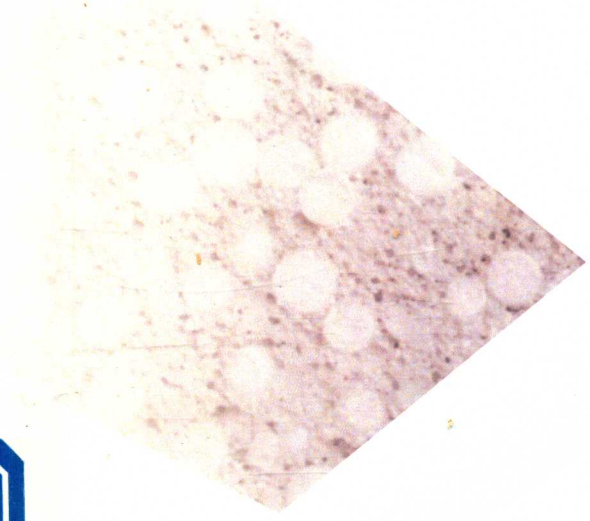
混凝土结构耐久性学术丛书

多重环境时间相似理论及其应用

金伟良　金立兵　李志远　著

Multiple Environmental Time Similarity Theory and Its Applications



科学出版社

混凝土结构耐久性学术丛书

多重环境时间相似理论及其应用

Multiple Environmental Time Similarity Theory and Its Applications

金伟良　金立兵　李志远　著

安徽理工大学 藏書 图書馆

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共 12 章，涉及混凝土结构耐久性的相似理论与方法，包括相似理论、相对信息理论、结构可靠度基本理论的概念，提出了混凝土结构耐久性的相似问题，构建了多重环境时间相似理论，并加以工程应用；在此基础上，构建了广义多重环境时间的相似理论，并在一般大气环境、冻融环境和海洋氯化物环境中给予理论表述与工程应用；最后将此理论应用于其他工程领域。

本书可供从事土木工程，尤其是混凝土结构耐久性方面的教学、科研和工程应用的教师、科研工作者、研究生、工程技术人员阅读和参考，对类似问题的科学研究具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

多重环境时间相似理论及其应用 = Multiple Environmental Time Similarity Theory and Its Applications / 金伟良，金立兵，李志远著. —北京：科学出版社，2020.1

(混凝土结构耐久性学术丛书)

ISBN 978-7-03-063076-6

Ⅰ. ①多… Ⅱ. ①金… ②金… ③李… Ⅲ. ①混凝土结构–耐用性–研究 Ⅳ. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 244602 号

责任编辑：吴凡洁 王楠楠 / 责任校对：王萌萌

责任印制：吴兆东 / 封面设计：蓝正设计

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

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 1 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2020 年 1 月第一次印刷 印张：24

字数：519 000

定价：198.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

事物既具有相对性，又具有绝对性。相对性与绝对性在哲学意义上是一对范畴，在一定的条件下是可以相互转换的。相对性就是有条件的、受制约的、可以改变的意思。在混凝土结构耐久性研究中，如何确定结构的使用寿命是关键问题。通常的做法是通过室内的试块或试件试验，采用一定的科学方法来确定混凝土的耐久性极限状态，进而获得该试块或试件在此状态下的使用寿命。然而，实际的结构在自然环境作用下的使用寿命却都是漫长的，只有通过施加不同的环境条件或材料的种类，才能在试验环境下获得相应的耐久性状况，这就是相对性。而绝对性就是保持与相对性的统一，在“相对”的条件下实现“绝对”的一致性，这在混凝土结构耐久性研究中更是如此。因此，只有正确处理好相对与绝对的统一，才能使得混凝土结构耐久性的评估与寿命预测的研究具有理论价值和实际意义。

2002 年前后，举世瞩目的杭州湾跨海大桥正在设计与建造当中，而这一世界级的巨大工程的设计使用年限要求达到 100 年，这在当时国内的土建工程中是首次提出。尽管混凝土的主体结构(如桥墩、承台、立柱)都已经过试块的耐久性试验验证，表明混凝土的耐久性将大于 100 年的设计年限，但缺乏类似工程的验证，这使得该工程项目指挥部对该工程的设计使用年限为 100 年一直持有谨慎的态度。为了更加科学地把握混凝土结构的耐久性，大桥工程项目指挥部就把 100 年的桥梁设计使用年限作为该工程的重大科研项目来对待，并委托浙江大学来完成。面对这一重大科研项目，我们进行了认真的思考，分析了各种可行的方法，经过苦思冥想，提出了“杭州湾跨海大桥-室内试验-乍浦港”的试验方案，来验证杭州湾跨海大桥的混凝土结构耐久性问题。在该科研方案中，我们试图构造两个环境条件相似，即将与杭州湾跨海大桥同环境条件相似的乍浦港作为真实的环境条件相似，而将乍浦港码头结构采用的混凝土材料与杭州湾跨海大桥所采用的混凝土材料在室内人工环境试验箱中进行同环境条件相似的试验，从而通过类比，可以“真实”地确定杭州湾跨海大桥混凝土构件的使用年限。这就是混凝土结构耐久性的多重环境时间相似理论产生的基本思想和工程意义。

目前，这一创新性的理论已得到了工程的验证，其研究成果作为“强潮海域跨海大桥建设关键技术”之一，获得了 2011 年度国家科学技术进步奖二等奖，并在国内类似的重大桥梁工程中得到推广和应用。

若要将对于给定的工程进行的多重环境时间相似理论推广到具有多个工程对象、多个参照物和多种室内试验环境条件的更为一般的情况，就需要引入相似理论、相对信息理论和可靠度理论的知识。所幸的是，作者曾于 1991 年获得德国洪堡基金资助，专题研究过工程结构可靠性中的不确定性问题，将相对论引入信息理论，建立了基于相对信息的可靠度不确定性分析方法。因此，将相对信息理论、相似理论与结构可靠度理论相结合，构造更为广泛的、一般意义上的多重环境时间相似理论显得更具有学术价值。应当

说，多重环境时间相似理论不仅起源于混凝土结构耐久性的验证性试验和评估，还适用于土木工程中地震作用响应、动力分析和疲劳分析等工程试验与评估，具有重要的理论意义和工程应用价值。

本书是在金立兵博士的学位论文“多重环境时间相似理论及其在沿海混凝土结构耐久性中的应用”和李志远博士的学位论文“基于相对信息多重环境时间相似理论及混凝土耐久性应用”的基础上进行整合形成的，非常感谢博士研究生张凯的认真整合和誊写。感谢浙江大学结构工程研究所的老师和研究生对此理论与应用所做出的贡献。感谢时任杭州湾跨海大桥总指挥王勇同志、副总指挥兼总工程师吕忠达同志的大力支持，他们的支持使得这一理论得以产生和应用。同时，感谢国家自然科学基金委员会重点项目“氯盐侵蚀环境的混凝土结构耐久性设计与评估基础理论研究”(50538070)的大力支持，使得该理论得以完善和发展。

书中不当之处在所难免，谨请指正。

金伟良

2019 年 2 月于求是园

符 号 清 单

1. 英文字符

v	速度
m	质量
f	力
t	时间
$\mathrm{d}l$	质点微元运动长度
$\mathrm{d}t$	质点微元运动时间
C_l	长度的相似常数
C_t	时间的相似常数
C_v	速度的相似常数
$\overline{C}$	相似指标
[L]	长度量纲
[F]	力量纲
[M]	质量量纲
[T]	时间量纲
[Q]	热量量纲
[x]	x 坐标轴方向量纲
[y]	y 坐标轴方向量纲
[z]	z 坐标轴方向量纲
$G_{e''}$	现场环境下的目标参数
$G_{e'}$	室内环境下的目标参数
C_G	目标参数的相似常数或者相似系数
C_i	目标参数第 i 个影响因素的相似常数
U_i	复杂工程现象中的统计资料的多样性所产生的影响系数
U_e	复杂工程现象中的环境因素的复杂性所产生的影响系数
U_t	复杂工程现象中的时变性所产生的影响系数
X	随机变量
$H(X)$	随机变量 X 的信息熵
$I(X;Y)$	平均互信息量
P	输入平均功率
T'	输入限制时间上限
U	离散无记忆信源输入

C^m	信道容量
V	接收端的接收信息
$\bar{D}$	信源平均失真度
D_r	允许失真度
$R(D_r)$	信息率失真函数
R_1	1 号观察者
R_2	2 号观察者
S	系统
S/R_1	观察者 R_1 观测过程
S/R_2	观察者 R_2 观测过程
$H(S/S)$	系统 S 自身的信息熵
$H(S/R_1)$	观察者 R_1 通过观测过程 S/R_1 的相对信息熵
$H(S/R_2)$	观察者 R_2 通过观测过程 S/R_2 的相对信息熵
$\mathbb{R}$	实数空间
X_e	欧氏空间
$\mathrm{d}S_e$	欧氏空间距离
X_m	闵氏空间
$\mathrm{d}S_m$	闵氏空间距离
k	与对数函数底相关的参数
$H_i(S/S)$	在不考虑观察者的情况下，系统 S 的语法信息熵
$H_o(S/S)$	在不考虑观察者的情况下，系统 S 的语义信息熵
$H_i(S/R)$	观察者 R 观测系统 S 的语法信息熵
$H_o(S/R)$	观察者 R 观测系统 S 的语义信息熵
Z	功能函数
P_s	结构的可靠概率
P_f	结构的失效概率
P_{fQ}	P_f 的渐近值
T	结构设计基准期
N	抽样数目
$\boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{U}$ 空间和 $\boldsymbol{V}$ 空间的转换矩阵
$\lvert\boldsymbol{J}\rvert$	雅可比行列式
$\tilde{A}$	模糊集合
$G(\tilde{A})$	模糊集合 $\tilde{A}$ 的模糊熵
K	模糊熵的对数底参数
R_s	结构工程师
S_{ns}	工程结构系统
$P_s(S_{ns,0})$	工程结构系统 S_{ns} 建成时的可靠概率

$P_s(S_{ns,i\tau})$	工程结构系统 S_{ns} 在$(i\tau-\tau, i\tau]$区间内的可靠概率
$P_s(S_{ns};T)$	工程结构系统 S_{ns} 在设计使用年限 T 内的可靠概率
$P_f(S_{ns,0})$	工程结构系统 S_{ns} 建成时的失效概率
$P_f(S_{ns,i\tau})$	工程结构系统 S_{ns} 在$(i\tau-\tau, i\tau]$区间内的失效概率
$P_f(S_{ns};T)$	工程结构系统 S_{ns} 在设计使用年限 T 内的失效概率
$p[Z(S_{ns,i\tau})]$	功能函数 $Z(S_{ns,i\tau})$ 的概率密度函数
$P_{\tilde{A}}(S_{ns,i\tau})$	工程结构系统 S_{ns} 在$(i\tau-\tau, i\tau]$区间内“可靠”的可能性
$P_{\tilde{B}}(S_{ns,i\tau})$	工程结构系统 S_{ns} 在$(i\tau-\tau, i\tau]$区间内“失效”的可能性
$P_{\tilde{A}}(S_{ns};T)$	工程结构系统 S_{ns} 在设计使用年限 T 内“可靠”的可能性
$P_{\tilde{B}}(S_{ns};T)$	工程结构系统 S_{ns} 在设计使用年限 T 内“失效”的可能性
$H_i(S_{ns};T)$	工程结构系统 S_{ns} 在设计使用年限 T 内的语法信息熵
$H_o(S_{ns};T)$	工程结构系统 S_{ns} 在设计使用年限 T 内的语义信息熵
x_c	碳化深度
k_c	碳化速度系数
t_c	碳化时间
Z^{I}	一般大气环境下混凝土碳化过程的耐久性极限状态功能函数
d_{cover}	混凝土构件保护层厚度
D_{cr}	临界冻融疲劳损伤
D_E	冻融疲劳损伤
Z^{II}	冻融环境下混凝土冻融过程的耐久性极限状态功能函数
$C(d_{cover}, t)$	t 时刻钢筋表面氯离子浓度
C_{cr}	临界氯离子浓度(氯离子阈值)
Z^{III}	海洋氯化物环境下氯离子输运过程的耐久性极限状态功能函数
t_n	现场环境参照物的服役时间
y_{int_n}	现场环境参照物第 i 劣化参数在现场服役时间 t_n 的取值
$y_{int_{n0}}$	现场环境下参照物第 i 劣化参数在初始时刻 t_{n0} 的取值
$f_{in}(\cdot)$	现场条件下参照物第 i 劣化参数的时变关系
t_a	加速劣化条件下的试验时间
y_{iat_a}	加速条件下参照物(与研究对象)第 i 劣化参数在现场服役时间 t_a 的取值
$y_{iat_{a0}}$	加速条件下参照物(与研究对象)第 i 劣化参数在初始时刻 t_{a0} 的取值
$f_{ia}(\cdot)$	现场条件下参照物第 i 劣化参数的时变关系
t_{nr}	参照物在现场实际环境中的劣化时间
t_{ar}	参照物模型在实验室加速环境的劣化时间
y'_{int_n}	现场条件下参照物第 i 劣化参数在现场服役 t_n 时的取值
$g_{ian}(\cdot)$	参照物第 i 劣化参数在实验室与现场自然条件下时变关系的相似转换关系

D	氯离子扩散系数
x	距混凝土表面的深度
C_s	表面氯离子浓度
D_{app}	表观扩散系数
J	离子对流通量
Q	溶液在时间 t 内进入试样的体积
P_c	界面张力
J_i	i 离子的通量
$D_{eff,i}$	i 离子的扩散系数
$C_i(x)$	i 离子在 x 处的浓度
Z_i	i 离子化合价
F	法拉第常量
$C(x,t)$	距混凝土表面距离 x(m)，暴露时间为 t 时刻(s)的氯离子含量
C_0	混凝土中的初始氯离子含量
C_{sa}	扩散区表面的氯离子含量
t_{cr}	混凝土内钢筋周围氯离子达到引起初锈的氯离子临界值 C_{cr} 的时间
c	混凝土的保护层厚度
D_{eff}	有效扩散系数
$D_{RCM,0}$	在 t_0 时刻采用 RCM 方法测定的氯离子迁移系数
k_T	温度影响系数
k_w	混凝土水饱和度 w 的影响系数
n_1	不同暴露环境表观扩散系数随时间的衰减指数
t_0	参考时刻
q	活化常数
b_T	拟合系数
T_{ref}	参考温度
RH	混凝土中的相对湿度值
RH_c	临界相对湿度
n	时间衰减系数
%FA	粉煤灰在胶凝材料中占的百分比
%SG	矿渣在胶凝材料中占的百分比
d	离海岸的距离
A_c	拟合回归系数
n_{dw}	混凝土在干湿交替区域的时间衰减系数
a、b	拟合常数
T_u	氯离子扩散系数衰减的时间限值

$t_{un,a}$	水下区构件室内加速试验的时间
$t_{un,f}$	水下区构件在现场暴露环境中的时间
$t_{ti,a}$	潮差区区构件室内加速试验的时间
$t_{ti,f}$	潮差区构件在现场暴露环境中的时间
$t_{sp,a}$	浪溅区构件室内加速试验的时间
$t_{sp,f}$	浪溅区构件在现场暴露环境中的时间
S_{es}	既有结构系统
S_{ex}	试验系统
E	系统环境
E_n	自然环境
E_a	人工模拟环境
Amount[ ]	计数函数
METS(1; 1)	通过 1 个既有结构系统 1 种人工模拟环境的 METS 路径
METS(i;1)	通过 i 个(i>1)既有结构系统 1 种人工模拟环境的 METS 路径
METS(1; j)	通过 1 个既有结构系统 j 种(j>1)人工模拟环境的 METS 路径
METS(i; j)	通过 i 个既有结构系统 j 种人工模拟环境的 METS 路径
METS($S_{es,i}$; $E_{a,j}$)	通过既有结构系统 $S_{es,i}$ 与人工模拟环境 $E_{a,j}$ 的 METS 路径
METS($S_{es,1\sim i}$; $E_{a,1}$)	通过既有结构系统 $S_{es,1\sim i}$ 与人工模拟环境 $E_{a,j}$ 的 METS 路径
METS($S_{es,1}$; $E_{a,1\sim j}$)	通过既有结构系统 $S_{es,1}$ 与人工模拟环境 $E_{a,1\sim j}$ 的 METS 路径
METS($S_{es,1\sim i}$; $E_{a,1\sim j}$)	通过既有结构系统 $S_{es,1\sim i}$ 与人工模拟环境 $E_{a,1\sim j}$ 的 METS 路径
l_{METS}	METS 路径总数
S_{ns}	拟建结构系统
S_{es}	既有结构系统
S_{ex}	试验系统
R_g	政府官员
R_o	业主
R_c	建造师
R_m	材料工程师
R_e	环境工程师
A_i	试验系统的第 i 个输入参数
B_j	试验系统的第 j 个输出参数
$t_{n,i}$	自然环境下第 i 个劣化阶段的时间终点
$t_{a,i}$	人工模拟环境下第 i 个劣化阶段的时间终点
$I_i(S; R)$	观察者 R 观测系统 S 语法相对信息
$I_o(S; R)$	观察者 R 观测系统 S 语义相对信息
$u(S/R)$	观察者效应系数
$S_{es,\,i}$	第 i 个既有结构系统
$E_{a,\,j}$	第 j 种人工模拟环境

$H_{\mathrm{i}}[S_{\mathrm{ns}}/\mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},i};\ E_{\mathrm{a},j})]\mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},i};\ E_{\mathrm{a},j})$ 路径观察拟建结构系统 S_{ns} 的语法信息熵

$H_{\mathrm{o}}[S_{\mathrm{ns}}/\mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},i};\ E_{\mathrm{a},j})]\mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},i};\ E_{\mathrm{a},j})$ 路径观察拟建结构系统 S_{ns} 的语义信息熵

$I_{\mathrm{i}}[S_{\mathrm{ns}};\ \mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},i};\ E_{\mathrm{a},j})]\mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},i};\ E_{\mathrm{a},j})$ 路径观察拟建结构系统 S_{ns} 的语法相对信息

$I_{\mathrm{o}}[S_{\mathrm{ns}};\ \mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},i};\ E_{\mathrm{a},j})]\mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},i};\ E_{\mathrm{a},j})$ 路径观察拟建结构系统 S_{ns} 的语义相对信息

$Q(\mathrm{METS}_l)$　第 l 条 METS_l 路径的效用度

L_{METS}　观察者选择 l 条 METS 路径来决策的总数

S_{dc}　设计规范系统

S_{sd}　结构设计系统

$P_{\mathrm{s}}(T)$　在设计使用年限 T 内，结构的可靠概率

$P_{\mathrm{f}}(T)$　在设计使用年限 T 内，结构的失效概率

P_{f}^{*}　目标失效概率

$E_{\mathrm{n}}^{\mathrm{I}}$　一般大气环境下，工程结构系统的自然环境

$E_{\mathrm{a}}^{\mathrm{I}}$　实验室人工模拟一般大气环境

A_i^{I}　实验室人工模拟一般大气环境试验系统的第 i 个输入参数

B_j^{I}　实验室人工模拟一般大气环境试验系统的第 j 个输出参数

$x_{\mathrm{c,n}}$　自然环境下碳化深度

$k_{\mathrm{c,n}}$　自然环境下碳化速度系数

$t_{\mathrm{c,n}}$　自然环境下碳化时间

$x_{\mathrm{c,a}}$　实验室人工模拟环境下碳化深度

$k_{\mathrm{c,a}}$　实验室人工模拟环境下碳化速度系数

$t_{\mathrm{c,a}}$　实验室人工模拟环境下碳化时间

x_{hc}　部分碳化区长度

$\mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},i};\ E_{\mathrm{a},j}^{\mathrm{I}})$　通过既有结构系统 $S_{\mathrm{es},i}$ 与人工模拟环境 $E_{\mathrm{a},j}^{\mathrm{I}}$ 的 METS 路径

$E_{\mathrm{n}}^{\mathrm{II}}$　冻融环境下，工程结构系统的自然环境

$E_{\mathrm{a}}^{\mathrm{II}}$　实验室人工模拟冻融环境

A_i^{II}　实验室人工模拟冻融环境试验系统的第 i 个输入参数

B_j^{II}　实验室人工模拟冻融环境试验系统的第 j 个输出参数

N_{f}　遭受冻融循环次数

$N_{\mathrm{f,n}}$　自然环境下遭受冻融循环次数

$N_{\mathrm{f,a}}$　实验室人工模拟环境下遭受冻融循环次数

$n_{\mathrm{f,n}}$　自然环境下年均冻融循环次数

$\mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},1\sim i};\ E_{\mathrm{a},j}^{\mathrm{II}})$　通过既有结构系统 $S_{\mathrm{es},1\sim i}$ 与人工模拟环境 $E_{\mathrm{a},j}^{\mathrm{II}}$ 的 METS 路径

$E_{\mathrm{n}}^{\mathrm{III}}$　海洋氯化物环境下，工程结构系统的自然环境

$E_{\mathrm{a}}^{\mathrm{III}}$　实验室人工模拟海洋氯化物环境

A_i^{III}　实验室人工模拟海洋氯化物环境试验系统的第 i 个输入参数

B_j^{III}	实验室人工模拟海洋氯化物环境试验系统的第 j 个输出参数
$C_{\mathrm{s,n}}$	自然环境下表面氯离子浓度
$C_{\mathrm{s,a}}$	实验室人工模拟环境下表面氯离子浓度
D_{n}	自然环境下氯离子扩散系数
D_{a}	实验室人工模拟环境下氯离子扩散系数
x_{n}	自然环境下与混凝土表面的距离
x_{a}	实验室人工模拟环境下与混凝土表面的距离
t_{a}	实验室人工模拟环境下氯离子输运时间
$\mathrm{METS}(S_{\mathrm{es},1\sim i};\ E_{\mathrm{a},j}^{\mathrm{III}})$	通过既有结构系统 $S_{\mathrm{es},1\sim i}$ 与人工模拟环境 $E_{\mathrm{a},j}^{\mathrm{III}}$ 的 METS 路径

2. 希腊字符

π	相似准数
$[\Theta]$	温度量纲
ω	洛伦兹变换下观察者闵氏观察角
θ	伽利略变换下观察者欧氏观察角
Ω	信源空间
β	可靠指标
$\mu_{\tilde{A}}$	模糊集合 $\tilde{A}$ 的隶属函数
Ψ	语法空间
Ψ'	语义空间
α_i	劣化参数的影响因素
Δx	对流区深度
λ_d	参照物在实验室和现场环境劣化时间的相似率
$\phi_i(t_{\mathrm{a}},t_{\mathrm{n0}},t_{\mathrm{a0}})$	参照物第 i 劣化参数在实验室与现场自然条件的时间转换系数
σ	液体的表面张力
α	管壁与液体表面的接触角
$\lambda_{D_{\mathrm{app}}}^{\mathrm{R}}(t)$	第三方参照物的氯离子扩散系数相似率
$\lambda_{C_{\mathrm{s}}}^{\mathrm{R}}(t)$	第三方参照物的表面氯离子浓度相似率
$\lambda^{\mathrm{O}}(t)$	扩散系数与表面氯离子浓度的相似率
λ_D	氯离子扩散系数的相似率
λ_C	表面氯离子浓度的相似率
$\lambda_{t,\mathrm{un}}$	水下区室内加速试验相对于实际环境的相似率
$\lambda_{t,\mathrm{ti}}$	潮差区室内加速试验相对于实际环境的相似率
$\lambda_{t,\mathrm{sp}}$	浪溅区室内加速试验相对于实际环境的相似率
δ_{ts}	时间换算系数
ξ	结构抗力
η	作用效应

ξ_o	受结构尺寸误差和材料力学性能随机性等因素影响的初始抗力
$\lambda(t_i)$	第 i 个时间段的加速耐久性试验时间加速系数
$\mu_{\tilde{A}}(Z)$	功能函数 Z 隶属于模糊集 $\tilde{A}=$｛“可靠”｝的隶属函数
$\mu_{\tilde{B}}(Z)$	功能函数 Z 隶属于模糊集 $\tilde{B}=$｛“失效”｝的隶属函数
β^*	目标可靠指标
$\lambda(k_c)$	碳化速度相似率
$\lambda(x_c)$	碳化深度相似率
$\lambda(t_c)$	碳化时间相似率
π^{I}	混凝土碳化过程的相似准数
$\mu_{\tilde{A}}(Z^{\mathrm{I}})$	功能函数 Z^{I} 隶属于模糊集 $\tilde{A}=$｛“可靠”｝的隶属函数
$\mu_{\tilde{B}}(Z^{\mathrm{I}})$	功能函数 Z^{I} 隶属于模糊集 $\tilde{B}=$｛“失效”｝的隶属函数
ψ	衰变常数
φ_{E}	无量纲冻融损伤变量
ψ_{n}	自然环境下衰变常数
$\varphi_{\mathrm{E,n}}$	自然环境下无量纲冻融损伤变量
ψ_{a}	实验室人工模拟环境下衰变常数
$\varphi_{\mathrm{E,a}}$	实验室人工模拟环境下无量纲冻融损伤变量
$\lambda(\psi)$	衰变常数相似率
$\lambda(\varphi_{\mathrm{E}})$	无量纲冻融损伤变量相似率
$\lambda(N_{\mathrm{f}})$	冻融循环次数相似率
π^{II}	混凝土冻融过程的相似准数
$\mu_{\tilde{A}}(Z^{\mathrm{II}})$	功能函数 Z^{II} 隶属于模糊集 $\tilde{A}=$｛“可靠”｝的隶属函数
$\mu_{\tilde{B}}(Z^{\mathrm{II}})$	功能函数 Z^{II} 隶属于模糊集 $\tilde{B}=$｛“失效”｝的隶属函数
τ	扩散时空变量
ζ	无量纲浓度变量
κ	反余补误差无量纲浓度变量
κ_{cr}	临界余补误差无量纲浓度
κ_{n}	自然环境下反余补误差无量纲浓度变量
κ_{a}	实验室人工模拟环境下反余补误差无量纲浓度变量
$\lambda(\kappa)$	余补误差无量纲浓度相似率
$\lambda(x)$	与混凝土表面距离相似率
$\lambda(t)$	氯离子输运时间相似率
π^{III}	氯离子输运过程的相似准数
$\mu_{\tilde{A}}(Z^{\mathrm{III}})$	功能函数 Z^{III} 隶属于模糊集 $\tilde{A}=$｛“可靠”｝的隶属函数
$\mu_{\tilde{B}}(Z^{\mathrm{III}})$	功能函数 Z^{III} 隶属于模糊集 $\tilde{B}=$｛“失效”｝的隶属函数

目　录

前言
第 1 章　绪论……1
1.1　问题的提出……3
1.1.1　混凝土结构耐久性的严重性……3
1.1.2　提高混凝土结构耐久性的重要性……9
1.2　研究现状……11
1.2.1　相似理论……11
1.2.2　信息科学……12
1.2.3　混凝土结构耐久性试验方法……12
1.2.4　耐久性设计规范……18
1.3　混凝土结构耐久性相似理论与方法的发展……18
参考文献……19
第 2 章　相似理论……25
2.1　第一相似定理……27
2.2　第二相似定理……28
2.3　第三相似定理……29
2.4　复合相似理论……30
参考文献……31
第 3 章　相对信息理论基础……33
3.1　Shannon 信息理论……35
3.1.1　理论提出……35
3.1.2　理论应用及发展……36
3.2　相对信息理论……36
3.2.1　理论提出……36
3.2.2　理论应用及发展……37
3.3　相对信息的表示……37
3.3.1　Jumarie 洛伦兹变换……37
3.3.2　相对信息熵……38
参考文献……39
第 4 章　结构可靠度基本理论……41
4.1　结构可靠度的一般形式……43
4.1.1　基本概念……43
4.1.2　时变可靠度……46
4.2　可靠度的计算……47
4.2.1　验算点法……47

4.2.2　二次二阶矩法……49
4.2.3　响应面法……51
4.2.4　蒙特卡罗法……52
4.2.5　时变可靠度计算……55
4.3　不确定性的表现形式……57
4.3.1　事物的随机性……57
4.3.2　事物的模糊性……57
4.3.3　事物知识的不完善性……57
4.4　基于相对信息的可靠度计算方法……58
4.4.1　基本概念……58
4.4.2　计算思路……60
参考文献……61
第 5 章　结构耐久性的相似问题……65
5.1　结构耐久性的基本问题……67
5.1.1　碳化侵蚀……67
5.1.2　冻融破坏……68
5.1.3　氯盐侵蚀……68
5.1.4　硫酸盐侵蚀……69
5.2　耐久性的相对性……70
5.2.1　环境的相似性……70
5.2.2　信息的相对性……70
5.2.3　时间的相似性……71
5.3　常规耐久性问题的求解……71
5.3.1　一般大气环境……71
5.3.2　冻融环境……72
5.3.3　海洋氯化物环境……73
5.4　沿海结构耐久性问题……73
5.4.1　沿海混凝土结构耐久性的特点……73
5.4.2　氯离子在混凝土中的传输机理……74
5.4.3　主要影响因素……77
参考文献……87
第 6 章　多重环境时间相似理论……93
6.1　一般问题……95
6.1.1　METS……95
6.1.2　METS 理论的参数选取……97
6.1.3　基于 METS 方法的沿海混凝土结构寿命预测……99
6.2　METS 试验方法与设计……101
6.2.1　METS 试验方法研究……101
6.2.2　沿海混凝土结构耐久性 METS 试验设计……108
6.3　沿海混凝土结构耐久性 METS 试验的结果与分析……112
6.3.1　第三方参照物的现场检测试验结果与分析……112
6.3.2　现场暴露试验设计……126

6.3.3 现场暴露试验的耐久性检测结果与分析……131
6.3.4 室内加速试验结果与分析……134
6.4 沿海混凝土结构耐久性 METS 相关参数的研究……146
6.4.1 METS 试验的氯离子扩散系数研究……147
6.4.2 氯离子扩散系数随暴露时间变化规律研究……155
6.4.3 不同环境氯离子表观扩散系数的相似性研究……160
6.4.4 混凝土表层对流区深度的试验研究……163
6.4.5 METS 试验混凝土的表面氯离子浓度研究……168
6.4.6 不同环境氯离子对普通混凝土侵蚀的相似性分析……174
参考文献……181
第 7 章 多重环境时间相似理论的工程应用……185
7.1 METS 的应用流程……187
7.2 工程概况……190
7.3 海工混凝土相似系数的修正……193
7.4 跨海大桥耐久性 METS 方法的寿命预测……196
7.4.1 COMSOL Multiphysics 数值分析软件介绍……196
7.4.2 大桥主要结构部位混凝土结构耐久性寿命预测……198
7.4.3 与其他寿命预测结果的比较……208
参考文献……211
第 8 章 广义多重环境时间相似理论……213
8.1 RI-METS 理论……215
8.1.1 理论引入……215
8.1.2 METS 路径……216
8.1.3 工程结构系统……221
8.1.4 试验系统……232
8.1.5 相对信息……234
8.2 混凝土结构耐久性设计规范系统……236
8.2.1 设计规范系统……236
8.2.2 指定设计法……237
8.2.3 避免劣化法……250
8.2.4 基于性能和可靠度的设计方法……250
8.3 求解思路……253
参考文献……254
第 9 章 RI-METS 理论与应用：一般大气环境……257
9.1 劣化机理与过程……259
9.2 工程结构系统……259
9.2.1 宏观尺度……259
9.2.2 细观尺度……260
9.2.3 微观尺度……261
9.3 耐久性极限状态……262
9.4 环境试验系统……263

9.5 RI-METS 理论……265
9.5.1 METS 理论……265
9.5.2 METS 路径……266
9.5.3 相对信息熵……266
9.5.4 相对信息……268
9.6 RI-METS 理论的应用……268
9.6.1 工程概况……268
9.6.2 工程结构系统……268
9.6.3 试验系统……269
9.6.4 METS 路径……269
9.6.5 相对信息熵……271
9.6.6 相对信息……273
9.6.7 控制决策……275
参考文献……276
第 10 章 RI-METS 理论与应用：冻融环境……279
10.1 劣化机理与过程……281
10.2 工程结构系统……281
10.2.1 宏观尺度……281
10.2.2 细观尺度……282
10.2.3 微观尺度……283
10.3 耐久性极限状态……284
10.4 环境试验系统……284
10.5 RI-METS 理论……286
10.5.1 METS 理论……286
10.5.2 METS 路径……287
10.5.3 相对信息熵……288
10.5.4 相对信息……290
10.6 RI-METS 理论的应用……290
10.6.1 工程概况……290
10.6.2 工程结构系统……290
10.6.3 试验系统……291
10.6.4 METS 路径……291
10.6.5 相对信息熵……294
10.6.6 相对信息……297
10.6.7 控制决策……301
参考文献……302
第 11 章 RI-METS 理论与应用：海洋氯化物环境……303
11.1 劣化机理与过程……305
11.2 工程结构系统……305
11.2.1 宏观尺度……305
11.2.2 细观尺度……306