

JIDIANLEI TEZHONG SHEBEI
JIEGOU XITONG KEKAOXING YU
SHOUMING PINGGU FANGFA YANJIU

杨瑞刚 著

机电类特种设备

结构系统可靠性与寿命评估方法研究



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

机电类特种设备结构系统 可靠性与寿命评估 方法研究

杨瑞刚 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2011

内 容 简 介

本书对机电类特种设备钢结构系统可靠性进行了研究,其中包括运用随机可靠性理论对具有高冗余特点的立体车库钢结构进行了系统研究和深入探讨,成功地找到一种适合于工程实例的动态搜索失效单元路径的方法;运用能度可靠性理论对国家“十一五”科技支撑计划资助的急需安全可靠性理论评估的起重钢结构系统进行了探讨,根据其具体受载特点,从强度、刚度、稳定性三个方面进行了可靠性分析。

本书可供从事机械产品设计、制造、试验、使用的工程技术人员研究参考,同时也可作为相关专业本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机电类特种设备结构系统可靠性与寿命评估方法研究/
褚瑞刚著. —北京:冶金工业出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-5024-5807-2

I. ①机… II. ①褚… III. ①机电设备—钢结构—
可靠性—研究 ②机电设备—钢结构—寿命—评估
IV. ①TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 274638 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 李培禄 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5807-2

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销

2011 年 11 月第 1 版, 2011 年 11 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5.375 印张; 141 千字; 161 页

25.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



结构系统在国防、航空航天、机械工业、农业、水利等各个国民经济发展领域无处不在，它作为一个系统的最主要的承载受力系统起着骨架的作用，是系统的重要组成部分。近年来，世界许多国家和地区，相继发生了一些机电类特种设备结构和系统突然性断裂和失效事件，各国政府和科研机构意识到，对机电类特种设备结构系统的失效模式、可靠性状况、安全评定与寿命估算的状况分析刻不容缓。机电类特种设备结构系统可靠性与剩余寿命安全评估研究作为一门新学科为适应现代结构设计和分析要求应运而生。一方面，对于现役设备，对结构系统的当前安全水平做出合理的评断才能下结论、定方案；另一方面，对于计划投资建设的设备，其安全性要求极高，而且耗资较大。因此在设计过程中需对其安全性和经济性做出合理的评判。

现役机电类特种设备钢结构可靠性安全评定和寿命评估技术，在工业发达国家针对不同的设备、不同的工况、不同的失效模式等方面进行了一定的研究工作。我国在机电类特种设备结构和系统的失效模式的识别、可靠性的评估、寿命估算方面的状况尤为严峻。到目前为止，机电类特种设备结构系统（如起重机钢结构系统和立体车库钢结构系统）的可靠性以及剩余寿命评估方面尚未形成一套完整有效可供实用的理论体系。因此，书中讨论的课题，是一项具有重大实际意义和社会经济效

目 录

第1章 绪论	1
第2章 基于随机理论的立体车库钢结构可靠性分析	4
2.1 可靠性基本概念	4
2.2 模式可靠度计算理论	6
2.2.1 模式失效概率计算的一次二阶矩阵	6
2.2.2 模式失效概率计算的改进的一次二阶矩法	7
2.2.3 非正态随机变量矢量的正态化和当量 正态化方法	10
2.2.4 相关随机矢量条件下可靠度指数的计算方法	10
2.3 系统可靠性计算理论	14
2.3.1 结构系统主要失效模式的确定	14
2.3.2 结构系统主要失效模式安全余量方程的确定	22
2.3.3 结构系统的综合概率	24
2.4 立体车库钢结构系统随机可靠性算例分析	29
2.4.1 立体车库介绍	29
2.4.2 立体停车系统力学模型的建立	32
2.4.3 立体车库钢结构系统失效模式的确定	39
第3章 基于能度理论的桥式起重机钢结构系统 可靠性分析	58
3.1 起重机安全概况	58
3.2 能度可靠性理论	60
3.2.1 概述	60

3.2.2 数学模型	61
3.2.3 结构的模糊能度可靠性模型	67
3.3 模糊结构体系的能度可靠性分析	70
3.3.1 模糊结构失效模式的枚举	70
3.3.2 结构体系的模糊可靠性计算	71
3.4 基于能度理论的桥式起重机结构可靠性分析	72
3.4.1 桥式起重机的结构分析	73
3.4.2 起重机结构系统能度可靠性分析方法算例	86
第4章 机电类特种设备钢结构系统的失效准则	100
4.1 概述	100
4.2 结构系统失效的几个概念	101
4.2.1 失效模式的模拟必要性和基本假设	101
4.2.2 结构元件的模拟	102
4.2.3 结构系统失效级别的定义	105
4.2.4 失效路径及失效路径的长度	105
4.3 机电类特种设备钢结构系统的失效准则与剩余 寿命评估准则的统一	106
4.3.1 从结构可靠性的角度出发确定失效判据的 选取原则	106
4.3.2 机电类特种设备结构剩余寿命评估准则	108
4.4 具体算例及影响机电类特种设备钢结构系统失效 准则的因素分析	109
4.4.1 立体车库算例	110
4.4.2 桥式起重机钢结构系统算例	113
第5章 未确知理论的应用	118
5.1 概述	118
5.2 未确知信息	121

5.2.1 未确知信息的基本定义	121
5.2.2 未确知信息与其他不确定性信息的关系	121
5.3 未确知数学基础	123
5.3.1 概述	123
5.3.2 未确知有理数的表达	124
5.3.3 未确知有理数的数学期望	125
5.3.4 未确知有理数的方差	126
5.4 未确知理论在机械钢结构可靠性分析中的应用	126
5.4.1 基于未确知理论的求数学期望的方法	127
5.4.2 领域半径 λ 的选取原则	128
5.4.3 立体车库钢结构系统载荷的实例分析	132
5.4.4 桥式起重机钢结构系统载荷的数据特征模拟	133
5.5 本章小结	134
第 6 章 基于可靠性分析的桥式起重机结构疲劳剩余	
寿命分析	136
6.1 疲劳失效概述	136
6.1.1 疲劳失效是最常见的失效形式	136
6.1.2 线弹性断裂力学相关理论	137
6.1.3 Miner 法则	140
6.1.4 疲劳裂纹的扩展速率	141
6.1.5 变幅载荷的均方根等效法	144
6.2 雨流计数法	145
6.3 起重机疲劳剩余寿命估算软件开发及工程应用	149
6.3.1 软件流程图及主要界面	149
6.3.2 工程应用实例	154
参考文献	159

第 1 章

绪 论

结构系统在国防、航空航天、机械工业、农业、水利等国民经济发展领域无处不在，它作为一个系统的最主要的承载受力系统起着骨架的作用，是系统的重要组成部分。近年来，北美、欧洲和亚洲的许多国家或地区，相继发生了一些重大机械结构和系统突然性断裂和失效事件，各国政府和科研机构意识到，对机械结构和系统的失效模式、可靠性状况、安全评定与寿命估算的状况分析刻不容缓。特别是对于机电类特种设备，更是如此。特种设备主要包括承压类和机电类两种。承压类特种设备包括锅炉、压力容器（含气瓶）、压力管道等。机电类特种设备包括电梯、起重机械、客运索道和大型游乐设施等。机械式立体车库是停车设备的一种，目前我国已将机械式立体车库纳入机电类特种设备。结构系统作为特种设备的主要承载系统，其安全可靠非常重要。本书将重点针对起重机结构和机械式立体车库结构系统进行探讨。

随着重载、高速、长周期设备的满载率加大，工作繁忙程度加重，有些机电类特种设备大部分工作时间已在高应力水平下运行，这类设备安全事故时有发生。随着使用时间的延长，机电类特种设备必然存在安全隐患，由此可能引发严重的安全事故。因此这些还在服役的老旧设备能否继续安全服役以及还能安全可靠服役多长时间，已成为国内外十分关注的焦点。如果把还能继续安全使用的设备强制报废，不仅会给企业造成巨大的经济损失，

而且会给国家造成严重的资源浪费,但是让不能继续安全服役的设备继续工作,就会给企业职工的人身安全带来严重的隐患,甚至造成机毁人亡的惨剧。金属结构系统是机电类特种设备的基本构成及主要承载系统。金属结构安全是整个机械设备安全的前提和基础,其安全性是至关重要的。当前,机电类特种设备迫切需要可靠性与剩余寿命安全评估新思路。

机械结构系统可靠性与剩余寿命安全评估研究作为一门新学科为适应现代结构设计和分析要求应运而生。一方面,对于现役机械装备,对结构系统的当前安全水平做出合理的评断才能下结论、定方案;另一方面,对于计划投资建设的大型工程项目的机械结构以及一些重要的项目,其安全性要求极高,而且耗资巨大。因此在设计过程中需对其安全性和经济性做出合理的评判。

现役机电类特种设备钢结构可靠性安全评定和寿命预测技术在工业发达国家针对不同的设备、不同的工况、不同的失效模式等已经系统性地开展了一定的有意义的研究工作。但是,我国在机电类特种设备结构和系统的失效模式的识别、可靠性的评估、安全检测监测技术与寿命估算方面的状况尤为严峻。我国在这方面的投入和研究应用工作起步较晚,显得相当薄弱。特别是立体车库钢结构系统与起重机械钢结构等承载的关键组成部件,急需对现役结构进行寿命评估与可靠性研究。到目前为止,有关机电类特种设备结构(如起重机钢结构系统以及立体车库钢结构系统)的可靠性以及剩余寿命评估方面尚未形成一套完整有效可供实用的理论体系。机电类特种设备结构和系统在系统可靠性、安全评定、寿命估算与风险评估技术方面存在迫在眉睫、亟待填补的空白。

虽然对机电类特种设备结构进行可靠性与疲劳剩余寿命估算的重要性和紧迫性已不容置疑,但目前很多方法大都停留在理论层面,并未和实际应用相结合;一些方法仅仅是针对某些特殊情

况适用，具有很大的局限性。因此，对机电类特种设备的可靠性与剩余寿命相关理论进行深入研究，同时开发出科学有效的估算方法，以期最大限度地发挥出该设备的经济效益，同时又能确保其在工作过程中的安全可靠，是一个具有现实和深远意义的课题。

机械结构系统可靠性理论是 20 世纪 80 年代前后发展起来的一门新兴边缘学科，主要数学基础是概率论、数理统计和随机过程理论、决策论、组合数学和近代数理统计方法，主要计算手段是有限元法、边界元法和随机网络分析技术。机电类特种设备结构疲劳剩余寿命评估开始的比较晚，虽然对机电类特种设备进行有效疲劳剩余寿命估算的重要性和紧迫性已不容置疑，但是到目前为止，我国有关机电类特种设备疲劳剩余寿命估算方面还没有形成一套完整有效可供实用的理论体系。国内外对于起重机疲劳剩余寿命估算有不少的理论研究，提出了一些疲劳损伤和疲劳剩余寿命估算的新方法。但这些方法大都停留在理论层面，并未和实际应用相结合；一些方法仅仅是针对具体某台起重机适用，不适用于其他不同起重机的疲劳剩余寿命估算，具有很大的局限性。

因此，机电类特种设备钢结构系统可靠性与剩余寿命评估分析急需钢结构系统可靠性安全评估与剩余使用寿命预测方法。

第 2 章

基于随机理论的立体车库 钢结构可靠性分析

2.1 可靠性基本概念

结构系统是指若干元件组成的承受外部作用力并有特定功能的整体，在它的各个元件之间存在相互作用和相互依存的关系。

机构系统的可靠性是指在规定的时间内，在规定的条件下完成规定功能的能力。如果结构系统达到极限状态的概率超过了允许值，结构系统就失效。这里失效的含义是系统变成机构，或超过规定的变形，或不能进一步承受外载荷。结构系统的失效概率越小，其可靠性就越高。

度量结构系统可靠性的数量指标称为结构系统可靠度。其定义是：结构系统在规定的时间内、在规定条件下完成规定功能的概率。这是基于统计数学观点下的比较科学的定义。

在工程结构的可靠性分析和设计中，结构的可靠度是一个十分重要的概念。定义 R 为结构的广义抗力， S 为结构的广义载荷，则结构的安全余量方程（系统功能函数）可表示为：

$$M = R - S \quad (2-1)$$

先研究最简单的情况。假定 R 和 S 均为 1 维随机变量，且互

相之间独立。设 R 和 S 的定义域分别为 $[r_L, r_U]$ 和 $[s_L, s_U]$ ，概率密度函数分别为 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$ ，则结构的失效概率 P_f 为：

$$\begin{aligned} P_f &= P(M < 0) \\ &= \int_{s_L}^{s_U} \int_{r_L}^{r_U} f_R(r) dr f_S(s) ds \\ &= \int_{s_L}^{s_U} F_R(s) f_S(s) ds \end{aligned} \quad (2-2)$$

由式 (2-2) 可以发现， P_f 通常不存在显式，需要通过数值模拟或数值计算的方式求得。

定义 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 表示 X 服从均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布。进一步假设 $R \sim N(\mu_R, \sigma_R^2)$ 、 $S \sim N(\mu_S, \sigma_S^2)$ 进行坐标变换：

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \\ Z_2 = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \end{cases} \quad (2-3)$$

可以证明， $Z_1 \sim N(0, 1)$ ， $Z_2 \sim N(0, 1)$ ，且 Z_1 和 Z_2 相互独立。

将式 (2-3) 代入式 (2-1) 得：

$$M = R - S = (\mu_R - \mu_S) + (\sigma_R Z_1 - \sigma_S Z_2) \quad (2-4)$$

因此：

$$\begin{cases} \mu_M = \mu_R - \mu_S \\ \sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \end{cases} \quad (2-5)$$

由正态分布的可加性原理可以推知：

$$M = (R - S) \sim N(\mu_M, \sigma_M^2) \quad (2-6)$$

因此：

$$P_f = (M < 0) = \Phi\left(-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi(-\beta) \quad (2-7)$$

式中 Φ ——标准正态分布的累积分布函数；

β ——结构的可靠度指标， $\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M}$ 。

失效概率与可靠性指标为一一对应关系，当 R 和 S 相关并采用式 (2-7) 时， σ_M 由下式给出：

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2\rho\sigma_R\sigma_S \quad (2-8)$$

式中 ρ ——相关系数，其定义为：

$$\rho = \frac{Cov[R, S]}{\sigma_R\sigma_S} \quad (2-9)$$

式中 $Cov[R, S]$ —— R 和 S 的协方差。

可以看出， β 与 P_f 之间存在一一对应关系： β 越小，失效概率 P_f 越大；反之亦然。因此，这两者指标可以作为衡量结构可靠度的一个标准。表 2-1 给出了可靠度指标 β 与失效概率 P_f 的对应关系。

表 2-1 可靠度指标 β 与失效概率 P_f 的对应关系

β	P_f	β	P_f	β	P_f
2.5	6.21×10^{-3}	4.0	3.17×10^{-5}	5.5	1.90×10^{-8}
3.0	1.35×10^{-3}	4.5	3.40×10^{-6}	6.0	9.87×10^{-10}
3.5	2.33×10^{-4}	5.0	2.90×10^{-7}	6.5	4.02×10^{-11}

2.2 模式可靠度计算理论

2.2.1 模式失效概率计算的一次二阶矩阵

若结构的安全余量方程 M 可表示成 n 维标准随机变量 Z_i 的线性组合，即 $M = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i Z_i$ ，则按 $\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M}$ 计算得到的结构

失效概率 $P_f = \Phi(-\beta)$ 是准确的。其中, $\mu_M = a_0, \sigma_M =$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \rho_{ij} a_i a_j}, \rho_{ij} \text{ 为随机变量 } Z_i \text{ 和 } Z_j \text{ 间的相关系数。}$$

Cornell 将结构的可靠度指数 β 定义为 $\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M}$, 后来这种定义方式也被扩展到了非线性安全余量方程的场合。

设失效模式 k 的安全余量方程为:

$$M = g(\bar{X}) \quad (2-10)$$

式中 $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ ——随机变量矢量。

将 $g(\bar{X})$ 在特定点 $\bar{x}^*$ 处按 Taylor 级数展开, 仅保留 1 阶项, 得:

$$g(\bar{X}) = g(\bar{x}^*) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_i^*) \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_* \quad (2-11)$$

式中, $g(\bar{x}^*)$ 表示在特定点 $\bar{x}^*$ 处取值。

当 $\bar{x}^*$ 为均值点 $\bar{\mu}^*$ 时, 有:

$$\begin{cases} \mu_g = g(\bar{\mu}^*) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_i^*) \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_* \\ \sigma_g = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \frac{\partial g}{\partial X_j} \right)_* \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \rho_{ij} \end{cases} \quad (2-12)$$

式中 σ_{X_i} ——随机变量 X_i 的标准差;

ρ_{ij} ——随机变量 X_i 和 X_j 之间的相关系数。

由于标准的 Cornell 方法是安全余量方程在均值点 $\bar{\mu}^*$ 处作线性展开, 并且仅利用了随机变量 $\bar{X}$ 的一阶和二阶矩信息, 因此被称为一次二阶矩法 (First Order Second Moment, FOSM)。

2.2.2 模式失效概率计算的改进的一次二阶矩法

假定 $\bar{X}$ 的各分量统计无关, 从式 (2-11) 和式 (2-12) 可以

看出, Concell 的可靠度指数 $\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M}$ 的取值依赖于特定展开点 $\bar{x}^*$ 的选择。鉴于此, Hasofer 和 Lind 建议根据临界破坏面而不是安全余量方程定义失效模式的可靠度指数 β 。对于同一物理问题, 根据 H-L 算法计算得到的可靠度指数 β , 不会由于形式的等价安全余量方程而发生变化。H-L 方法的计算程序为:

将随机变量 X_i 进行正则化处理:

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (2-13)$$

在 n 维正则化空间 $\bar{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ 中, 失效模式 k 的安全余量方程为 $g(\bar{Z}) = 0$, 相应的可靠度指数 β 定义为:

$$\begin{cases} \beta = \min \sqrt{\sum_{i=1}^n z_i^2} \\ g(\bar{z}) = 0 \end{cases} \quad (2-14)$$

从几何上看, β 是 n 维正则化空间中坐标原点到临界破坏面 $g(\bar{Z}) = 0$ 的最短距离。满足式 (2-14) 的正则化矢量 $\bar{z}^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*)$ 定义为设计点。在原始坐标中, 设计点为 $\bar{x}^*$ 。

从式 (2-14) 可以看出, 对于同一物理问题, 根据 H-L 算法得到的可靠度指数 β 不会由于选择不同形式的等价安全余量方程而发生变化的原因是, 等价安全余量方程在临界破坏面 $g(\bar{Z}) = 0$ 上是完全等价的。

从几何上看, 设计点 $\bar{z}^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*)$ 是半径为 $\beta = \sqrt{\sum_{i=1}^n z_i^2}$ 的球面和临界破坏面 $g(\bar{Z}) = 0$ 的切点。定义 $g^*(\bar{Z}^*) = 0$ 为过设计点 $\bar{z}^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*)$ 的临界破坏面 $g(\bar{Z}) = 0$ 的切平面, 则 $g^*(\bar{Z}^*) = 0$ 是半径为 $\beta = \sqrt{\sum_{i=1}^n z_i^2}$ 的球面临界破坏面

$g(\bar{Z}) = 0$ 的公共切平面, β 等于坐标原点到切平面的距离。当临界破坏面 $g(\bar{Z}) = 0$ 为线性破坏面时, 切平面 $g^*(\bar{Z}^*) = 0$ 和临界破坏面 $g(\bar{Z}) = 0$ 合二为一。以两变量的情况为例, 在正则化坐标系 (Z_1, Z_2) 中, 根据式 (2-6) 可计算坐标原点到临界破坏面的切平面 $g^*(\bar{Z}^*) = (\mu_R - \mu_S) + (\sigma_R Z_1 - \sigma_S Z_2) = 0$ 的距离 OZ^* (图 2-1) 为:

$$OZ^* = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2-15)$$

对比式 (2-6)、式 (2-9) 和式 (2-10) 不难看出, $\beta = OZ^*$ 。 $\beta = OZ^*$ 的结论可以推广到任意有限维的场合, 具体内容可表述为: 若结构的功能函数 M 可表示为 n 维独立标准正态随机变量 Z_i 的线性组合 $M = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i Z_i$, 则结构的可靠度指数 β 在数值上等于由 n 维独立标准随机变量 Z_i 组成的 n 维坐标系中坐标原点到切平面 $g^*(\bar{Z}^*) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i Z_i$ 的距离, 即:

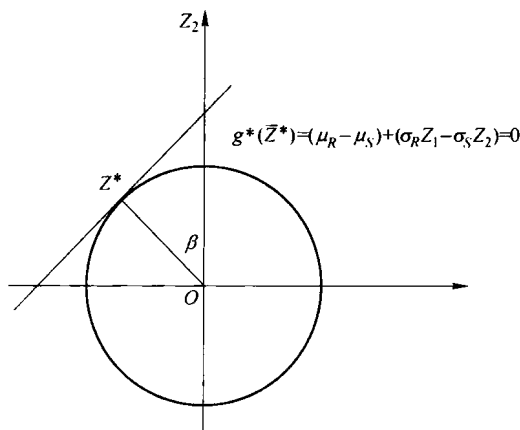


图 2-1 可靠度指数 β 的几何意义

$$OZ^* = \frac{a_0}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2}} \quad (2-16)$$

2.2.3 非正态随机变量矢量的正态化和当量正态化方法

若定义随机变量矢量 $\bar{X}$ 的联合概率密度函数为 $f_{\bar{x}}(\bar{x})$, 则系统失效概率 P_f 为:

$$P_f = \int_{\Omega_f} f_{\bar{x}}(\bar{x}) d\bar{x} \quad (2-17)$$

式中 Ω_f ——失效域。

对于复杂的概率问题, 式 (2-17) 中的 P_f 通常不存在解析描述。本节在假定 $\bar{X}$ 为正态随机矢量的前提下, 提供了 P_f 的近似计算方法。下面讨论解决 $\bar{X}$ 为非正态随机变量时, P_f 的近似计算问题。

Rosenblatt 证明: 任意非正态随机矢量 $\bar{X}$, 理论上都可以通过 Rosenblatt 变换, 转化为线性无关的标准正态随机矢量。显然, 经过变量转换之后, P_f 可采用 H-L 算法进行近似计算。

2.2.4 相关随机矢量条件下可靠度指数的计算方法

当随机矢量 $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 的各分量为相关正态随机变量时, 需进行以下操作:

(1) 采用线性变换将 $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 转换为线性无关的正态随机矢量 $\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$;

(2) 对正态随机变量 $\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$ 进行正则化变换, 变成线性无关的标准正态随机矢量 $\bar{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)^T$;

(3) 采用 H-L 算法计算失效模式的可靠度指数 β 。

扩展后的 H-L 算法可描述为: 设原始随机矢量 $\bar{X} = (X_1,$