

概率断裂力学 在压力容器中的应用

周则恭 雷云琴 曹天捷 林钧富 编著



中国石化出版社

78 8

357

概率断裂力学在压力 容器中的应用

周则恭 雷云琴 曹天捷 林钧富 编著

51.6 25

中国石化出版社

内 容 提 要

本书论述了概率断裂力学的基本问题及研究方法,如概率断裂力学主要参数的统计性质及其检验和估计方法、计算断裂失效概率的几种基本方法、计算模糊断裂失效概率的方法等。其中确定重要性函数的二种方法、级数法求解各次矩的方法、数据不完整情形下分布参数估计与分布假设的检验与模糊断裂概率的计算方法等均为作者的最新研究成果。本书内容新颖丰富,与工程实际密切结合,对概率断裂力学在核容器、管道、压力容器以及近海结构管接头中的应用中给出了大量的实例。

本书可供从事压力容器与管道研究、设计与可靠性分析等方面的工程技术人员参考,亦适用于大专院校化机、力学、安全工程等专业师生。

图书在版编目(CIP)数据

概率断裂力学在压力容器中的应用/周则公等编著. —北京:中国石化出版社, 1996
ISBN 7-80043-606-3

I. 概… II. 周… III. 概率-断裂力学-应用-压力容器 IV. TH49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17363 号

*

中国石化出版社出版发行

(北京朝阳区太阳宫路甲 1 号 邮政编码: 100029)

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 32 开本 12.25 印张 260 千字 印 1—1500

1996 年 8 月北京第 1 版 1996 年 8 月北京第 1 次印刷

定价: 22.00 元

前 言

压力容器的安全可靠性与经济性，始终是人们十分关注的问题。目前人们已认识到无论是材料性能参数、载荷参数、计算方法与测试数据等都具有不确定因素，如果要计算这些不确定因素就需要引进概率方法。如压力容器设计引入的可靠性设计方法、压力容器缺陷评定采用的概率评定方法以及压力容器可靠性分析等促使压力容器概率断裂力学形成独立的学科；核电站概率安全分析的普遍开展、国外设备保险行业的发展等又促使概率断裂力学进一步发展。

近十年来，我国在球罐可靠性评定、炮管疲劳寿命与钻井平台管接头疲劳寿命等的概率断裂力学分析等方面均取得一些可喜的成果。在某些行业的“八五”科研规划中也将概率断裂力学的研究与应用列入重要地位。

为了反映国内外概率断裂力学理论及其在压力容器中的应用成果，并促使其进一步发展，帮助有关工程技术人员更好掌握和应用概率断裂力学，特编著此书。

本书阐述了概率断裂力学基本问题的研究与国内外应用概率断裂力学的实例。主要介绍参数的检验和估算方法、断裂概率计算的几种常用方法，并大量介绍了在核容器、压力容器、管接头疲劳寿命等方面的应用实例。

限于编著者的水平，难免出现缺点和错误，望读者提出批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
§ 1-1 概率断裂力学发展简介	1
§ 1-2 工程应用及前景	4
§ 1-3 有待进一步研究的问题	6
第二章 随机变量分布函数及其检验与参数估计	9
§ 2-1 一些常用的概率分布	9
§ 2-2 常用母体分布检验方法	18
§ 2-3 参数估计	29
§ 2-4 数据不完整情形下分布参数的 估计方法	35
第三章 概率断裂力学主要参数的统计性质	76
§ 3-1 裂纹检出率的分布规律	76
§ 3-2 起始缺陷尺寸分布	80
§ 3-3 断裂韧性的分布规律	83
§ 3-4 Paris 公式中材料常数 C 与 m 的 分布规律	87
§ 3-5 其它参数统计性质简介	89
§ 3-6 主要参量分布函数的形状对断裂概率 的影响	90
附录 应力和强度为任意分布时失效概率的计算 (应力-强度干涉理论)	95

43628

1

第四章 断裂概率的近似计算方法	99
§ 4-1 Monte Carlo 模拟法	100
§ 4-2 一次二阶矩法	130
§ 4-3 矩法	147
§ 4-4 Edgeworth 级数求解法	156
第五章 概率断裂力学在近海结构中的应用	166
§ 5-1 Miner - Palmgren 线性累积损伤 研究方法	167
§ 5-2 概率断裂力学研究途径	176
§ 5-3 影响海洋平台结构疲劳寿命的因素	181
第六章 概率断裂力学在压力容器中的应用	184
§ 6-1 压力容器缺陷评定规范简介	184
§ 6-2 压力容器缺陷评定的概率方法初探	199
§ 6-3 国内压力容器概率评定实例	212
§ 6-4 国外压力容器概率评定实例	227
第七章 概率断裂力学在核容器中的应用	280
§ 7-1 引言	280
§ 7-2 国外概率断裂力学计算程序	282
§ 7-3 PFM 在核电站中的应用	320
第八章 模糊断裂简介	353
§ 8-1 引言	353
§ 8-2 断裂模糊区的上下限	357
§ 8-3 模糊断裂概率的近似计算	369

第一章 绪 论

§ 1-1 概率断裂力学发展简介

现代工程结构的安全性和经济性是至关重要的。考虑到载荷的随机性、材料性能的分散性、工况的复杂性和计算模型与方法等的不确定因素，50 年代末、60 年代初，在航空与土木结构中开始采用概率方法评定结构的安全性。60 年代核电设备与近海结构也采用概率安全分析方法。80 年代已形成体系完整的结构可靠性理论，其基本内容为：

- (1) 结构构件与结构系统的强度作为随机现象处理。
- (2) 将作用在结构上的各种载荷作为随机变量或随机过程处理。
- (3) 以应力—强度干涉理论为基础的结构构件与系统的断裂失效概率评定。
- (4) 基于可靠性的结构系统的设计方法。

若采用断裂力学导出的断裂、疲劳断裂、蠕变断裂、应力腐蚀断裂判据为失效判据，上述结构安全评定的概率方法，结构可靠性评定就构成概率断裂力学学科。

概率断裂力学（PFM，下文简称 PFM）的兴起引起了全世界各国的广泛重视，在 70 年代，国际焊接学会（IIW）第十委员会，美国材料试验学会（ASTM）E24.06、E24.03 工作组，日本高压技术学会，美国机械工程师协会

(ASME) 的压力容器与管道可靠性委员会, 美国电力研究院 (EPRI) 等单位均设立“概率断裂力学”工作小组。西欧则由几个科研单位与大工厂合作, 于 1976 年开始进行这方面的研究, 国外的许多厂家和保险公司将 PFM 分析用于工程设备的风险分析也取得了比较好的成果, 同时也促进了概率断裂力学的发展。文献 [1]、[2] 对概率断裂力学及其应用的各个方面作了较全面综述。

这些科研单位取得的成果主要在于研制了概率断裂力学计算程序。其中较为著名的有:

(1) 美国核能管理委员会的 OCTAVIA (1978)^[3], 它是美国太平洋西北实验室研制的, 是计算压力瞬态导致压水堆核容器断裂概率的程序。

(2) 美国 Lawrence Livermore 实验室 1981 年研制的计算程序^[4], 该程序用于包括地震事件在内的管道可靠性分析。

(3) 美国核能管理委员会研制的 NUREG - 0778 (1981)^[5] 报告中的程序, 该程序主要用于计算在正常工况与若干瞬态工况下压水堆核容器筒节的失效概率。

(4) 美国橡树岭国家实验室研制的 OCA - P 程序 (1984)^[6], 系用于压力容器的确定论断裂力学与概率断裂力学计算程序。

(5) 欧洲共同体研究中心研制的 COVASTOL (1978)^[7] 计算程序。主要采用直方交叉法计算由于紧急工况与事故工况下核容器的断裂概率。

另外, 美国西屋公司也专门研制了概率断裂力学计算程序。

概率断裂力学用于核容器取得的成果在于对核容器安全

的评定分析，其中较著名的报告有：

(1) “核容器安全研究报告” (WASH-1400)^[8] 系由美国核能管理委员会提出，该报告中虽未直接运用概率断裂力学的计算模型，但首先运用概率方法确定了核容器在不同的假想事故工况的出现概率及其风险率。

(2) 联合王国核能管理委员会的英国 Marshall 研究小组于 1973 年组建，1976 年完成评定轻水堆核容器的结构完整性报告^[9]，1980 年完成评定压水堆核容器的结构完整性报告。

概率断裂力学在压力容器中的应用取得成功后，日、英二国的压力容器缺陷评定规范工作组正试图将概率方法引入评定规范。日本焊接学会、焊接缺陷评定规范 WES-2805 的工作委员会正积累试验数据和现场经验，进行概率断裂力学方面的研究，现已将概率断裂力学评定缺陷方法列入 WES-2805 的编制说明中，最后的目标是引进目标断裂概率代替常规的安全系数。英国中央电力管理局 (CEGB) 的 R/H/R6 规范工作委员会正在制订第四次修订本，该版本即将问世，已决定将断裂概率分析列入附录。挪威近海平台推荐标准 1987 年修订本已引入概率断裂力学方法。80 年代初，美国空军部门采用概率断裂力学分析了飞机构件耐久性，并发展了一套概率耐久性分析办法^[10]。最后编写了《美国空军耐久性设计手册》。目前飞机结构疲劳裂纹扩展正试图采用随机过程模型，概率损伤容限分析也是重要研究课题。

§ 1-2 工程应用及前景

概率断裂力学在压力容器中的重要应用如下：

(1) 验证压力容器的安全可靠性的，即验证在不同工况下压力容器的断裂概率是否低于容许断裂概率值。

(2) 通过对不同工况下不同部位的缺陷进行断裂概率计算即可分辨其危险程度，也可通过参数敏感性分析得到须大力研究的薄弱环节。以核容器为例，计算分析表明，正常和异常工况下最严重的瞬态是冷态水压试验，紧急和事故工况中最严重的是大破口失水事故与蒸汽管道小破口破裂事故，对裂纹最敏感的部位则是筒身的环带区，接管拐角部位和孔口。

(3) 经过概率断裂力学分析后，调整设计参数，改变选材标准，改进焊接工艺措施等，从而使断裂概率减小，例如 Marshall 报告认为，核容器材料处于上平台温度下工作，是保证核容器安全可靠性的一个重要条件。又如目前较普遍的看法是，定期进行无损探伤检查是保证压力容器安全可靠性的一个重要条件。显然，做到这些，就可以减少断裂失效概率。目前，概率断裂力学甚至分析到运行规程对断裂概率的影响，计算分析认为，若启动与停车超过压力和温度限制则使断裂概率增大。现在甚至分析到人为可靠性，人机对话等主观不确定性对断裂概率的影响。

(4) 当用确定论的方法对各部分安全裕度取值后，一般不易使诸安全裕度相互协调或平衡，往往某一部分安全裕度过大，另一部分却裕度不足，而概率断裂力学则可通过断裂概率计算特别是通过参数敏感性分析完成。例如对失效概率

贡献大的参数，将安全裕度加大，并对该问题投入大量财力、人力研究。另外概率断裂力学分析对无损检验的研究方向有直接意义，据文献[11]报导，中等尺寸（13~38mm 之间）的缺陷对瞬态超压导致核容器的断裂概率贡献最大，而较小或较大的缺陷的贡献却较小，这是因为小尺寸缺陷数量虽多，但是一旦缺陷出现导致断裂的概率小；大尺寸缺陷一旦出现导致断裂概率虽很大，但大尺寸缺陷出现概率很小。这就说明无损探伤今后努力的重点应放在提高检出中等尺寸缺陷的可靠度而不是过多地追求提高灵敏度。从这个意义上说，概率方法又是对确定论方法的重要补充。

（5）关于压力容器延寿问题。压力容器一般情形下使用寿命为 30 年，但在实际情形中，超期使用情形不少，显然，压力容器，尤其是反应堆容器延寿（即延长使用寿命）的经济效益是很大的。按确定论方法评价是否能延寿主要取决于原制订的安全裕度大小。这种延寿方法有大的局限性，按概率论方法评价是否延寿则依据按设计计算预测运行 N 年后的设计断裂概率与据实测资料计算得到 N 年后的断裂概率之比决定是否还能运行多少年。当然，概率论评定方法中，目前估算材质劣化程度问题，在数据与估算方法方面尚有待进一步研究。

在“七五”期间，我国概率断裂力学在海洋平台焊接管接头疲劳寿命、炮管疲劳寿命、宇航容器可靠性等研究取得成果。“八五”期间，概率断裂力学与失效概率研究已列入机电部攻关计划，目标是希望 1995 年后，概率断裂力学在电站设备与海洋平台等领域中得到较广泛的应用。另外，我国压力容器缺陷评定标准 CVDA-84 也将在断裂韧度、容限缺陷尺寸等的合理取值方面引用概率断裂力学方法。有关

课题已列入国家“八五”科技攻关计划中。航空航天部重点攻关课题“AFFD”即为新型军用与民用飞机研制提供成套的抗疲劳与断裂设计技术。在“八五”期间，着重解决结构疲劳与断裂破坏的概率控制，提出用概率断裂力学原理，满足可靠性设计要求的耐久性与损伤容限的概率评定方法。实现以结构疲劳与断裂破坏的概率控制为核心满足飞机结构完整性要求的可靠性设计，由此可见，概率断裂力学是结构可靠性设计的重要支柱。

§ 1-3 有待进一步研究的问题

一、数据不足问题

数据不足，可用数据缺乏是目前阻碍概率断裂力学在工程界中推广应用的一个主要问题，因此，也是概率断裂力学领域中需要解决的一个主要问题。

需要不断地收集数据，改进分析整理数据的方法，概率断裂力学计算所依据的数据资料必须具有代表性。钢材、制造工艺、运行工况与规范尽可能与实际情形一致。只有数据充足才能改进输入随机变量分布规律的精确性，减少不确定量。因此要逐步建立数据库，有组织地制订基础参量的试验研究计划。在收集整理国内已有数据进行综合归纳和概率统计分析基础上，希望最终能提出工程应用所需要的规范化的数据。

在目前数据不足情况下，应强调如何较好地利用现有数据，例如按主观判断或经验推测对有限数据加以补充或修正；还可利用经典的置信区间评估方法或 Bayes 方法来论证数据的不可避免的误差和不确定因素；也可用特殊试验验

证，专门的统计学实验验证现有数据的合理性。甚至无具体数据情形，也可进行参数敏感性分析研究哪一个参数（包括均值和方差）对断裂概率的影响最大。同一个参数选定了不同分布函数形式与分布参数值，对计算断裂概率结果的影响。

另外，由于关于参数之间相关性研究及试验研究的资料数据很少，因此计算断裂概率时，往往简单地认为这些参数在统计学上是相互独立的。因此，也应在设计实验取得数据方面以及在统计学研究分析数据方面进行有效的研究。

二、关于模型中参量问题

从理论上讲，载荷与材料特性参量需要采用依赖于时间与空间的随机过程来表述。为了简单，目前均采用随机变量模型来表述。其原因是缺乏有效计算依赖于时间的断裂概率问题。因此需要：

(1) 发展依赖于时间与空间的随机过程模型，将它用于载荷，材料性能。例如关于地震、大雪、大风暴的记载证实其发生有不规则性，系随时间变化的随机过程。材质劣化缺乏合理的蜕化模型，采用随时间变化的随机过程更适宜。同时需要研究收集这方面数据与分析这方面数据的有效办法。

(2) 发展在静态、准静态与动载加载下，计算依赖于时间的断裂概率的方法。

(3) 发展已损伤结构的阻力模型，其中损伤源由于疲劳、腐蚀、开裂、表面剥落、分层等。

三、关于判据

关于安全判据，目前主要研究的是构件断裂判据或临界状态，而不是研究系统的判据，因为系统临界状态的确定涉及多判据的研究与多判据或多临界状态 (multi limit state)

的优化问题。

四、计算断裂概率方法

目前计算断裂概率的有效方法 是一次二阶矩法与 Monte Carlo 模拟法, 在这方面的研究是:

(1) 改进目前计算可靠度的方法, 研究多判据情形下一次二阶矩法, 需要研究验证临界失效模型的有效方法。

(2) 研究更适合力学现象的概率失效模型。

(3) 参数敏感性分析研究方面, 要特别针对包括非线性情形下大型复杂结构系统的参数敏感性分析方法, 从而系统有效地处理敏感性指标。

参 考 文 献

- [1] Johnston, G. O. Reliability Engineering, 3 (1982), 432.
- [2] Besuner, P. M et al, Nuclear Engineering & Design Vol. 43 (1977), 99 - 108.
- [3] Veseley W. E. U. S. NRC, NUREG-0258 (1978).
- [4] Harris, D. O et al, NUREG/CR-2189 (1981).
- [5] Gamble, R. M et al, NUREG/0778 (1981).
- [6] Cheverton, R. D et al, NUREG/CR-3618. (1983)
- [7] Lucia. A. C, "COVASTOL User's & Programmer's Manual", Ispra Tech. Notes Iot cl 84. 85 (1984).
- [8] NRC Report WASH-1400, (1975).
- [9] Marshall, W., An Assessment of the Integrity of PWR Pressure Vessels, UKAEA Report (1976).
- [10] Advanced Durability Analysis Report FZP-2233 (1984).
- [11] Lynn, E. K. Nuclear Engineering & Design Vol48 (1978), 149—155.

第二章 随机变量分布函数及其 检验与参数估计

§ 2-1 一些常用的概率分布

一、正态分布 (Gauss 分布)

最著名而应用最广泛的概率分布可能是正态分布。正态分布的概率密度为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty < x < +\infty \quad (2-1)$$

式中 x ——随机变量;

μ ——正态分布函数的均值;

σ ——正态分布函数的标准差。

$f(x)$ 有时简记为 $N(\mu, \sigma)$, 其分布函数则为:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (2-2)$$

正态分布中如果 $\mu = 0$, $\sigma = 1.0$, 则称为标准正态分布, 通常简记为 $X \sim N(0, 1)$, 或用 $\varphi(u)$ 表示。

在应用正态分布时, 为了将 $F(x)$ 表述为标准形式 $\Phi(u)$, 往往采用如下的变量转换, 即:

$$u \equiv (x - \mu) / \sigma \quad (2-3)$$

将 (2-3) 式代入 (2-2) 式, 经整理得到:

$$F(x) = \Phi(u) = \Phi(x - \mu/\sigma) \quad (2-4)$$

标准正态分布函数 $[\Phi(u)]$ 表见附表1。

正态分布图形如图2-1示，图形以均值 μ 为中心呈对称形，而 σ 则表示分布的分散程度。由图可见，当 σ 值不变，若 μ 值增大，则分布图形向右移，若 μ 值减小，则分布图形向左移。当 μ 值不变，若 σ 愈大，曲线在 x 轴上的上、下端点距离扩大，呈矮胖形，但分布的中心不变，若 σ 愈小，则似乎愈向中心“集中”，呈瘦长形。

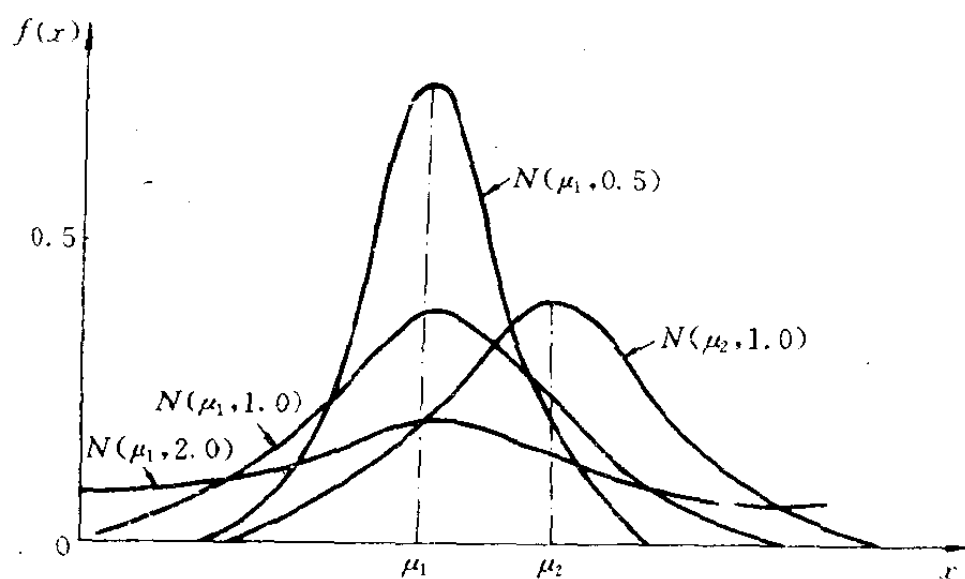


图 2-1

标准正态分布的概率密度 $\varphi(u)$ 为：

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) \quad (2-5)$$

其曲线图如图2-2示。其外形使人们常称之为钟形曲线。标准正态分布在 $\pm\sigma$ ， $\pm 2\sigma$ ， $\pm 3\sigma$ 之间的面积，即为任意在 $\varphi(u)$ 中抽取任一个 u 值落在 $\pm\sigma$ ， $\pm 2\sigma$ ， $\pm 3\sigma$ 区间内的概率，其值分别为 68.3%，95.5% 和 99.7%。

由图2-2可见，标准正态分布的概率密度的图形关于纵轴对称，即 $\varphi(-u) = \varphi(u)$ 不难得到 $\Phi(-u) = 1 - \Phi(u)$

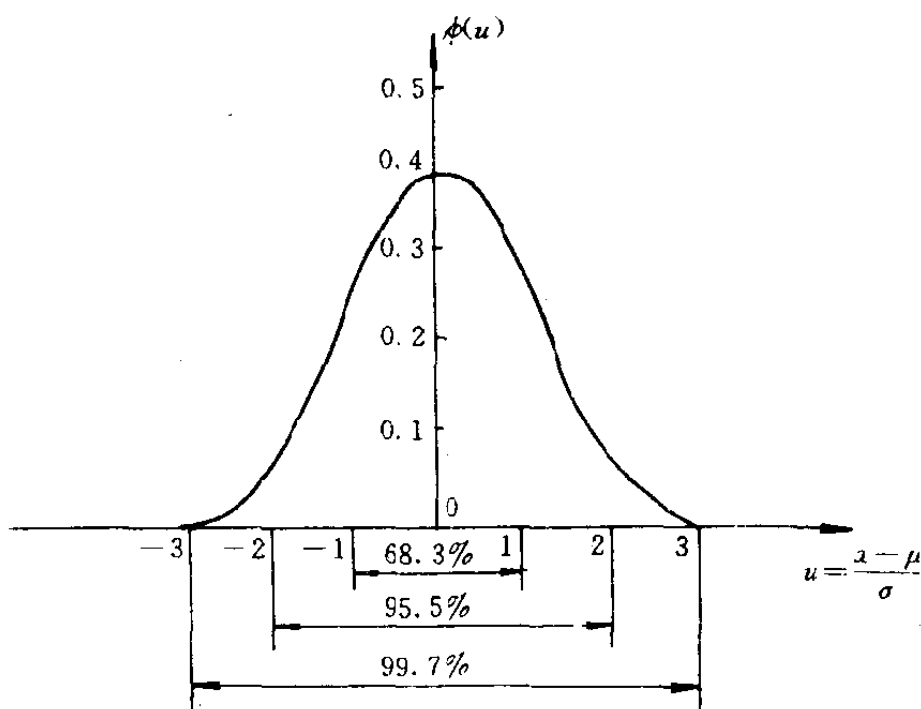


图 2-2

因此，附表 1 中不给出负值。

二、对数正态分布

当 $\ln X$ 服从正态分布时，则称 X 服从对数正态分布。
这时 X 的概率密度为

$$f(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad 0 \leq x < \infty \quad (2-6)$$

式中 $\lambda = E(\ln X)$ ， $\ln X$ 的均值；

ζ —— $\ln X$ 的标准差。

对数正态分布概率密度的图形如图 2-3。

由图可见，当标准差很小，对数正态分布与正态分布的概率密度的形状很相似，并以 $x = 1$ 为对称轴，随着 ζ 增大，向左偏斜不再对称。