

本书获国家自然科学基金的资助

结构可靠度方法

〔丹麦〕O·迪特莱夫森 〔挪威〕H·O·麦德森 著

何军 译

STRUCTURAL RELIABILITY METHODS

同济大学出版社

本书获国家自然科学基金的资助

结构可靠度方法

[丹麦]O. 迪特莱夫森 [挪威]H. O. 麦德森 著

何 军 译

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

结构可靠度方法/(丹麦)迪特莱夫森(Ditlevsen, O),
(挪威)麦德森(Madsen, H O)著;何军译. —上海:同
济大学出版社, 2005. 9

ISBN 7-5608-3142-7

I. 结… II. ①迪…②麦…③何… III. 土木
工程—工程结构—结构可靠性—可靠性理论
IV. TU311. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 098913 号

结构可靠度方法

[丹麦]O. 迪特莱夫森 [挪威]H. O. 麦德森 著 何军 译

责任编辑 曹炽康 责任校对 杨江淮 封面设计 潘向葵

出版 行 同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂印刷

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 21.5

字 数 430000

印 数 1—2100

版 次 2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-3142-7/TU·616

定 价 37.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换

中文版序言

在结构工程中,随机性主要源于对荷载,材料性质及结构建造过程的非完全控制性质。采用概率论的方式对这种性质加以智慧的反映,便形成了结构随机系统分析的基本观念与理论框架。结构可靠度分析,是这一框架中的一个有机组成部分,结构的一部分或整体不满足某些预定功能要求的概率或可靠度指标反映了结构的相对安全水平。结构可靠度分析,已经广泛应用于结构的设计、现役结构的安全性评价和重大工程的决策分析等领域。

近三十年,在各国学者的共同努力下,结构可靠度方法的研究取得了重大的理论和应用成果。其中,特别需要提到迪特莱夫森(O. Ditlevsen)和麦德森(H. O. Madsen)所做出的杰出贡献。在早期研究中,他们提出一般可靠度指标的概念及结构体系可靠度界的方法等,上世纪90年代后,他们开展基于可靠度的工程决策研究,取得许多重要的成果,同时,他们致力于推动在结构设计中直接使用可靠度方法的规范的发展。他们及国外现代学者们的哲学思考、建模观点、分析方法及工程实践,已在他们合著的《结构可靠度方法》(Structural Reliability Methods)中,深刻而全面地进行了阐述。

《结构可靠度方法》由Wiley公司出版于1996年,2004年他们对原书进行了较大的改进和充实,形成了网络版。这本由何军博士翻译的中文版《结构可靠度方法》,保留了Wiley版的组织形式和未经网络版修改的全部内容,同时增添了网络版中修改和充实的部分。

何军博士长期从事结构与系统可靠度的研究,颇有收获,这本译著,他先后进行了十几遍修订,表现出了难能可贵的科学精神。相信《结构可靠度方法》的出版,对促进国内结构可靠度的研究,是一件非常有意义的工作。

李杰

2005年6月于同济园

原作者为中文版所作的序

对上海交通大学土木工程系何军博士将我们 1996 年 Wiley 版著作《结构可靠度方法》翻译成中文的工作,作者表示感谢。作者高度赞扬同济大学李杰教授给予何军博士的鼓励。

Wiley 将版权转让给作者,使更新的网络版能够出版,网络版免费下载网址为:
<http://www.web.mek.dtu.dk/staff/od/books.htm>。建议中国读者参考网络版中改进和新添的内容。

Ove Ditlevsen 和 Henrik O. Madsen

2005 年 6 月

The authors' preface to the Chinese translation

The authors acknowledge the initiative taken by Dr. He Jun at the Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University to translate the 1996 Wiley edition of our book "Structural Reliability Methods" into Chinese. The authors highly appreciate the encouragement given to Dr. He Jun by Professor Li Jie of Tongji University.

The copyright is transferred from Wiley to the authors, making it possible currently to update an English internet edition for free download from: <http://www.web.mek.dtu.dk/staff/od/books.htm>. Readers of the Chinese edition are recommended to look for changes or new material in the Internet edition.

June 2005

Ove Ditlevsen and Henrik O. Madsen

目 录

0 前言	(1)
1 导论	(5)
1.1 概率的和确定性的模型	(5)
1.2 安全性问题	(6)
1.3 判断评估的形式系统	(7)
1.4 容错系统	(7)
1.5 概率概念的解释	(8)
1.6 概率解释的相容性	(9)
1.7 可靠度测量的知识相关性质	(10)
1.8 不定性问题	(10)
1.9 通过优化确定可靠度水平	(11)
1.10 控制规范发展的结果计算准则	(11)
1.11 优化原则	(12)
1.12 后续各章	(13)
1.13 结语	(13)
文献	(13)
2 分项安全系数方法	(15)
2.1 极限状态	(15)
2.2 安全系数概念和不随公式变化(公式化不变性)的要求	(18)
2.3 安全系数的概率解释	(19)
2.4 分项安全系数	(21)
2.5 任意选择分项安全系数值的允许程度	(24)
2.6 作用模型	(26)
2.7 荷载组合*	(27)
2.8 历史和文献注	(30)
文献	(30)

3 概率信息	(33)
3.1 随机性和不确定性	(33)
3.2 统计不确定性	(35)
3.3 模型不确定性	(39)
3.4 模型不确定性的计算及其在可靠度分析中的应用*	(46)
3.5 结构可靠度分析方法的客观性*	(50)
文献	(52)
4 简单可靠度指标	(53)
4.1 有限的概率信息	(53)
4.2 线性安全余量的计算	(53)
4.3 线性回归	(59)
4.4 利用线性回归在线性空间中的几何计算	(64)
4.5 标准多维正态分布	(66)
文献	(68)
5 几何可靠度指标	(69)
5.1 非线性安全余量 线性化问题	(69)
5.2 几何可靠度指标	(71)
5.3 通过线性回归确定局部最中心极限状态点	(73)
5.4 历史和文献注	(77)
文献	(78)
6 一般可靠度指标	(79)
6.1 几何可靠度指标的缺点	(79)
6.2 一般可靠度指标	(81)
6.3 凸多面体安全集的可靠度指标的界限	(85)
6.4 弯曲的极限状态曲面的渐进可靠度指标. “几乎平面”的极限状态曲面的定义(单点 FORM 或 SORM)	(93)
6.5 任意安全集的多面体近似(多点 FORM 或 SORM)	(97)
6.6 极限状态曲面上奇点处的多面体近似(单点多次 FORM 或 SORM)	(98)
6.7 历史和文献注	(99)
文献	(99)
7 变换	(101)
7.1 信息不对称	(101)

7.2	一些重要的变换	(104)
7.3	关于可微的映射和曲面	(115)
7.4	确定局部最中心极限状态点的正态尾部近似原则	(116)
7.5	利用 FORM 或 SORM 进行多维正态分布函数的近似计算*	(124)
7.6	高度复杂极限状态的可靠度分析	(125)
7.7	历史和文献注	(132)
	文献	(133)
8	敏感性分析	(135)
8.1	输入变量重要性的测量	(135)
8.2	元件可靠度关于输入参数的重要性测量	(138)
8.3	并联系统可靠度关于输入参数的重要性测量*	(142)
8.4	串联系统可靠度关于输入参数的重要性测量*	(147)
8.5	历史和文献注	(148)
	文献	(148)
9	蒙特卡洛方法	(149)
9.1	模拟原则	(149)
9.2	定向模拟	(150)
9.3	一类有用的定向模拟分布族*	(154)
9.4	敏感性参数*	(161)
9.5	历史和文献注	(162)
	文献	(163)
10	荷载组合	(165)
10.1	FERRY BORGES-CASTANHETA 荷载模型	(165)
10.2	绝对连续分布函数的 Rackwitz-Fiessler 算法	(167)
10.3	作为荷载脉冲振幅的截尾随机变量	(168)
	文献	(176)
11	统计不确定性和模型不确定性	(177)
11.1	前言	(177)
11.2	相似函数 充分统计	(177)
11.3	正态分布的自然共轭密度	(179)
11.4	数学模型的实验校订*	(190)
11.5	历史和文献注	(197)

文献	(198)
12 基本决策原理	(199)
12.1 决策问题	(199)
12.2 偏爱排序的 VON NEUMANN-MORGENSTERN 定理	(202)
12.3 最优可靠度	(208)
12.4 不确定的赢利和效能函数	(211)
12.5 不定事件概率的不确定性确定的影响	(213)
12.6 关于面对危险现象的效能选择的工程问题	(215)
12.7 规范的局限性	(216)
12.8 多准则决策分析*	(216)
12.9 巨大误差的影响*	(218)
12.10 结构工程中的效能损失研究	(220)
12.11 建立危险性事件模型的例子*	(224)
文献	(227)
13 已建结构的可靠度	(229)
13.1 已建结构的信息类型	(229)
13.2 为利用关系信息的更新的一般系统建模	(233)
13.3 对已建结构的决策原则	(245)
13.4 通过修正极限状态进行的更新	(248)
13.5 历史和文献注	(249)
文献	(249)
14 系统可靠度分析	(251)
14.1 串联系统和并联系统	(251)
14.2 一般系统 割集和紧集*	(251)
14.3 输入变量的时变对极限状态定义的影响	(254)
14.4 安全集的“JURY 定义”	(256)
14.5 理想塑性系统和理想脆性系统*	(258)
14.6 历史和文献注	(262)
文献	(262)
15 过程描述简介	(265)
15.1 过程 高斯过程 泊松过程	(265)
15.2 失效概率的上界	(267)

15.3	期望穿越数	(268)
15.4	通过定向模拟确定期望穿越数*	(272)
15.5	一些泊松类型的简单荷载模型	(273)
15.6	历史和文献注	(277)
文献		(277)
附录 1	规范校订	(279)
附录 2	Nataf 分布 相关系数	(293)
附录 3	对在结构设计中直接使用可靠度方法的规范的建议	(299)
索引		(317)
译后记		(329)

0 前 言

这本书是丹麦建筑研究院 1990 年出版的丹麦文 SBI-报告 211《Bærende Konstruktioners Sikkerhed》的英文翻译,并对原报告进行了校订和扩展。

第一部作为丹麦工业大学结构工程系授课基础的有关结构可靠度的丹麦文教科书是 1979 年由 C. Dyrbye、S. Gravesen、S. Krenk、N. C. Lind 和 H. O. Madsen 合著的《结构安全度》。现在这本书涵盖的领域没有《结构安全度》那么广泛。除了介绍了可靠度方法,《结构安全度》还包含了许多特殊的强度和作用模型,而现在这本书只是基础性地阐述了这些专题。另一方面,现在这本书更广泛地涉及了主要由于高速计算机的发展而在近年来变得具有实用性的那些可靠度方法。

教科书《结构安全度》成为了由 H. O. Madsen、S. Krenk 和 N. C. Lind 合著的影响更深远的英文版著作《结构安全度方法》(Prentice-Hall 公司出版)的基础。该书赢得了广泛的国际赞誉。我们推荐该书作为现在这本书的补充,特别是对详细的强度和作用模型以及对基于随机过程理论的响应分析的补充。

《结构安全度》的影响还可以追溯到作为丹麦-英国合作研究成果的由 P. Thoft-Christensen 和 M. J. Baker 合著的另一部英文教科书《结构可靠度理论及其应用》(1982 年, Springer-Verlag 公司出版)。该书比《结构安全度方法》更加基础并使用了更少的技术性词汇,而且它被公认为该课题初步入门的指南。

现在这部《结构可靠度方法》(Structural Reliability Methods)则更深刻地论述了原理和方法。根据读者具备的知识量,可以分几个步骤来阅读它。图 0.1 表示了阅读起点和阅读路径。图 0.1 并不表明不能对所推荐的阅读路径以外的材料进行横向参考,而是说明了在图示情况下仅需要的有限的阅读内容。

除了这个阅读路径,有些小节被 * 标记,这表明可以跳过这些小节而不会给后面的阅读带来任何困难。这些记号的设置与阅读路径图无关。跳过标记 * 的小节,按顺序地阅读各章,能够使读者掌握关于结构可靠度计算的概率方法的足够的初步知识和建立这些方法的基本原理。这些知识对理解附录 4 和 5 中描述的计算程序 PROBAN 和 STRUREL 是足够的,对阅读附录 3 也是足够的,附录 3 是对在结构设计中直接使用可靠度方法的规范提出建议的始于 1989 年的结构安全联合委员会(JCSS, Joint Committee on Structural Safety)工作报告的校订再版。

这本书按正文、例题和小结来组织。在文字部分结束处的符号“□”表示在此处

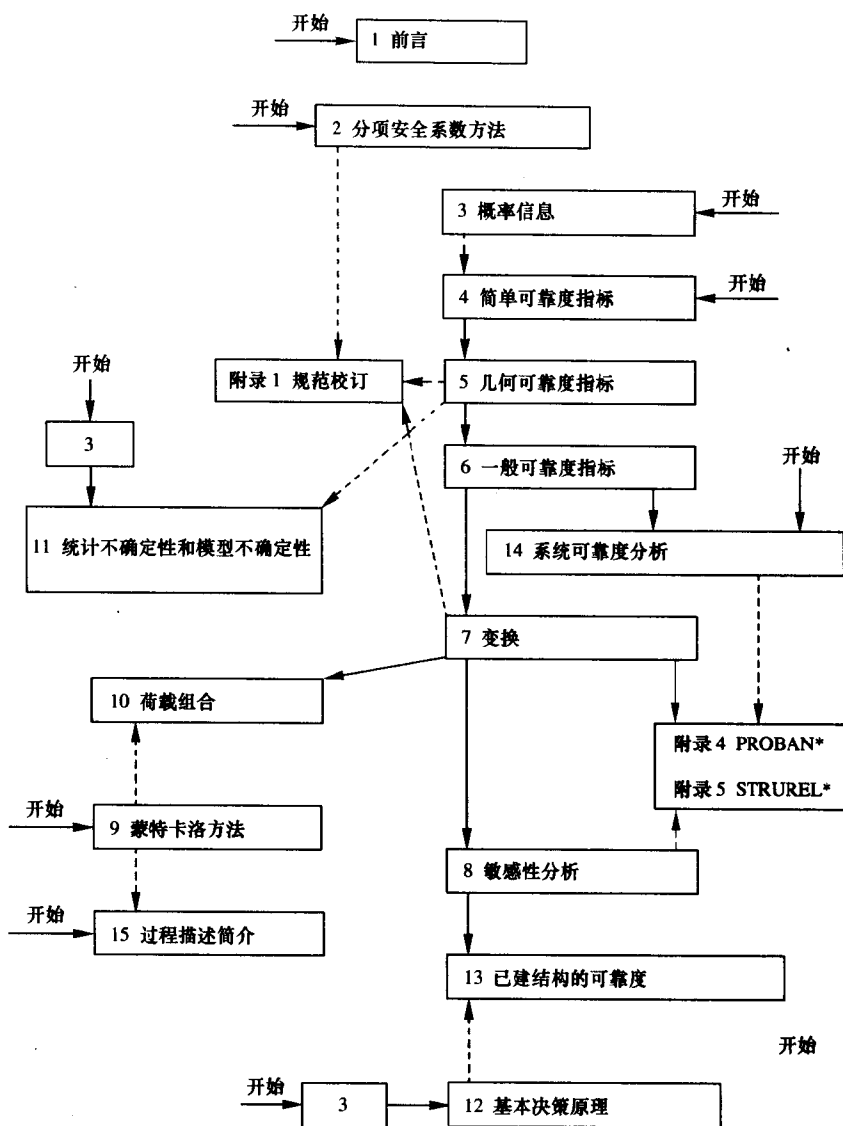


图 0.1 从几个可能的起点的阅读路径图以及读者阅读这部著作的路线。

它表明有些章单独于其他章可以分开或按读者的需要阅读

结束一个例题、练习或小结。某一小节内的公式序码不带本小节号。不属于所在小节的公式由十进位分类给出，例如(2.3.4)指 2.3 小节的公式(4)。每一章中的图、较大的表、例题和小结按顺序编号。

假设读者具有概率计算和统计推理的基本背景知识。因此假定像“随机的”和“确定性的”之类的词不会引起麻烦，而且诸如均值、标准差、变异系数、协方差、相关

系数、分布函数、密度函数、概率和样本等词对于读者来说也是众所周知的。作为提醒,在相关的位置处给出了特别的小结。这些小结概括了所述内容中最重要的定义和理论。被认为是已经超出最基本知识的必要的数学概念则更是谨慎地加以介绍。

类似的小结涉及材料强度和结构分析的必要知识。为了阅读它们,仅要求读者了解平衡原理、应力和应变的概念以及熟悉基础的弹性和塑性理论。

感谢 Annette Barentzen 在文字的计算机输入以及以前和现在的博士生们在绘制计算机图形及润色文字方面所给与的帮助。感谢 Peter Bjerager、DNV Sesam AS 写作关于 PROBAN 的附录 4。感谢慕尼黑工业大学的 Rüdiger Rackwitz 写作关于 STRUREL 的附录 5*。

* 考虑到原著附录 4 和附录 5 的程序说明,可以在相关商业软件中获得,本中译本没有翻译。

1 导 论

1.1 概率的和确定性的模型

概率的结构分析是构造一个数学模型的技术,在此过程中,人们可以提出和回答这样一个问题:“在给定一个或多个材料特性或几何尺寸,并且这些特性具有随机或不完全知道的性质,和(或)在某些方面,结构上的作用具有随机的或不完全知道的特性的情况下,结构按指定方式工作的概率是多少?”

概率的结构分析可以被看作是确定性的结构分析的推广。确定性的结构分析也是构造一个数学模型的技术,从中人们可以提出和回答这样的问题:“当结构的材料特性、几何特性和作用是惟一给定的时候,结构的工作是怎样的?”

概率的分析是确定性分析的推广的原因在于确定性数量可以解释为具有特别微小随机性质的随机变量。它们的密度函数只收缩到大小为 1 的集中概率质量的地方。如果一个确定性模型被处理为概率模型,上面提到的关于概率问题的答案将为 0 或 1。如果答案为 1,预定的行为正是确定性模型中提出的问题的答案。因为,具有零概率的事件是没有意义的,人们寻找的是发生概率为 1 的行为。这等价于确定性分析的问题:“为了模型范畴中的特定行为是由给定的作用引起的,应该使结构具有多大的尺寸?”

概率结构设计是增加了概率的结构分析的决策问题。这个问题能够以下述方式来叙述:“为了在一个给定的完善定义的意义在概率模型的可能性内结构具有最优的特性,应该使结构具有多大的尺寸?”可以用一个等效的叙述给出这个问题:“为了在完善定义的意义使结构是关于一个行为的最优设计,则这个特定行为发生的概率是多少?”

工程判断是一个决定来自结构分析或设计模型的结果是否是足够现实的,以至工程师敢于在这些结果基础上建立他(她)的实际决策的技术。当然,建立一个数学模型是由要得到一个现实描述的愿望来指导的,但是,在模型适合于求解(即它能够传递所提问题的答案)的意义上,模型变得可行也是必需的。因此,模型公式化过程中的一个重要方面是保持真实性与可行性之间的平衡。

1.2 安全性问题

结构安全性的问题构成了一类特殊的问题。为了理解这个问题的本质,作为解释,先在世界是按确定性控制而运行的想象试验中研究这个问题。我们想象一个与给定荷载构造有关的具有能够被预测到承载能力特性的最小细节的结构。这个指定的荷载构造含有一个其值为规定的荷载水平的自由参数(命名为荷载参数)。荷载参数越大,荷载水平越高。而且,我们想象已被规划的结构具有下面的性质:对于荷载参数的任何值,都可以设计一个结构,使得这个结构正好处于结构能够承担荷载与结构在某种意义上失效之间的极限上。如果所考虑的结构将要承受的荷载构造是确定地已知的,而且荷载参数的未来最大值也是确定地已知的,那么,将结构设计为当荷载参数值是最大的时候极限情况正好不发生,当然是足够安全的。

显然,对最大参数值的任何疑问,或对于由极限情况中荷载参数值表示的结构承载能力(极限荷载值)的任何疑问,都引起一个关于安全性的问题。即使在这个假设的确定性世界中,工程师心目中关于他(她)的精确参数值知识的疑问也引起一个安全性的问题:“为了工程师能保证结构在正常使用下不发生失效或至少发生失效的危险性非常小,在承载能力模型中应该选择比最可信估计的最大荷载参数大多少的极限荷载值。”这两个数值之间的差称为安全余量。

这个问题的本质是它不能仅仅通过理论研究来回答。过去,杰出建设人员的工作以及以后来自工程技术应用中的工程累积经验会建立起安全余量值评估的基础。另一方面,显然,结构的变化如此之大而需要建立合理地分析和描述这些经验的信息。

社会对发生失效的反应将在原则上揭示工程界是不是在必需的安全余量水平的评估方面太大胆了。同时,经济能力的要求以及对资源浪费的反对造成了工程界的过于谨慎的趋势。

总之,为了优化决策的目的,必须有一个合理的结构模型工具,这可能不总是针对那些从形式规则中学习的工程师个体,更是为了作为一个整体的工程界。这个模型工具必须包含能对各种不确定性类型进行量化的元素。在我们的想象实验里,不确定性说明了工程师心中对极限荷载值以及最大荷载参数值的怀疑。这些不确定性的量化可以从普通的科学的客观观点来进行哲学的讨论。尽管如此,这是一种超出了所有人类活动赖以建立的科学解释的人类判断能力。结构可靠度理论必须建立在工程师通过经验进行的专业判断以及训练能够在一个形式模型里被反映的假设上。在反映工程师能利用它进行合理判断和评估的可能性的意义上,建立的模型应该具有修正能力。从相反的角度来说,工程师必须调整自己的思考方式以适应模型。同时,模型也逐渐改变它的状态,从一个具有较少客观值评估的或多或少任意的公式化系统到一个很好适用于处理和传递基本工程信息的系统。

1.3 判断评估的形式系统

有许多通常以数学形式出现的可以用来进行判断评估和处理这些评估的形式系统。最简单和最广泛使用的系统是学生分级系统。在假定人类品质范畴具有能被映射为一个同一数字尺度上的等级性质的基础上,对于这个系统,数学模型的公式化以特别简单的形式构成。而且,通常假设可以利用不能以同一标准衡量的品质上的平均代数法则,这个法则具有用一个或几个数来说明整个性质的目的。从科学的观点来看,这种模型很令人怀疑。尽管如此,经验表明,虽然具有明显的缺点和不公正性,分级系统的实际应用至少反映了一个人的一些品质,这使得对许多目的来说,分等级是有用的。原因是该系统是可修改的。在某些方式上,它的作用类似于语言。如果系统包含太僵化而不能修改的规则,那么,就修改该系统使之具有更大的灵活性。尽管具有明显的科学缺点,与不用任何系统相比,利用这个系统会更好地进行信息处理和转换。

看起来容易接受,在不准确的意义上,分级说明对本质上复杂并且远离所谓的“科学精确”的现象是适用的。对自然科学现象进行判断和推测使得这些猜想在涉及技术问题的决策过程中是能用的、甚至是有用的信息,有的时候,被认为是不科学的。从技术科学领域比其他人类思维和活动领域具有较小复杂结构的普遍认识来说,决策制定过程中对不科学行为的感觉非常强烈。因此,技术决策的评估模型应该更为可信。事实上,所有被研究的事情,在理想的科学感觉与实践之间都有很大的差异。对建筑构件几何测量的误差界定的利用是技术领域中的一个简单例子。

1.4 容错系统

当一个建筑构件的几何测量 B 具有一个容错规定 T 时,通常意味着构件的测量值应该在区间 $[B-(T/2), B+(T/2)]$ 内。当然,对于一个给定的建筑构件,是否满足这个要求,可以通过测量而用一个更大程度的置信度来控制。然而,很少对在工厂里给定类型的所有生产构件进行控制检测,来达到避免不满足一个或多个容错规定的构件的目的。这样的整体控制是资源上的要求,而且不是必需的。更进一步,记住这样的观点:精确测量构件的生产应该注意非常少地破坏容错要求。另一方面,生产过程不应该精致到测量达到不必精确的程度,特别是在如果得到这么精确测量的费用很昂贵的情况下。记住这样一个观点:容错要求变成了控制生产过程的一个适当工具。因此,容错规定变成了类似于一个等级划分。它是一个指出对应于一类特定生产方法的质量分类的标签,而不是尺寸测量的精确界限。因为,能够通过测量来检测对要求的满足程度,当然,在需要的情况下,它作为一个精确的概念来工作。然而,只在组装过程中建筑构件造成本质问题的时候才需要这样做。通常,永远不会识别