

# 论第三代结构设计理论<sup>\*</sup>

李 杰

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 工程结构的第三代设计理论已经初具雏形、呼之欲出。从对结构设计理论的两个基本维度的分析入手, 概略论述了第一代、第二代结构设计理论的发展历程。在此基础上, 指出了第二代结构设计理论的局限性与基本矛盾, 分析了第三代结构设计理论应该具有的基本特征, 论述了其理论基础和基本构架。对为完整建立第三代结构设计理论尚需展开的研究做出了主题描述。

**关键词:** 工程结构; 设计理论; 力学分析; 可靠性

**中图分类号:** TU318<sup>+</sup>.1

**文献标志码:** A

## On the Third Generation of Structural Design Theory

LI Jie

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** With the developments of past 30 years, people working in the civil engineering area have stand on an very important historical node; to establish the third generation design theory of structures. This paper briefly addresses the historic clues of the first and second generations of structural design theory and discusses the basic contradictions associated with the second generation of structural design theory. The characteristics typically featured by the third generation of structural design theory is then illustrated and basic framework are proposed as well. It is point out that the theory of solid mechanics, the modern numerical computational methods and probability density evolution theory consist of the three milestones of the third generation design theory of structures. The primary objective of the third generation of structural design theory is to achieve the global reliability design of structures in its life cycle such that a scientific quantification description can be drawn upon the global safety and service reliability of engineering structures. On-going work towards completely building up the third generation of structural design theory is outlined.

**Key words:** engineering structure; design theory; mechanic analysis; reliability

## 1 认识结构设计理论的两个基本维度

土木工程是人类文明起源和文明发展的重要标志之一。自上古时代至今, 保证土木工程结构的安全性, 一直是结构建造者和使用者关心的重点。迄于近代, 工程结构的安全性开始有了定量的度量标准与设计方法。以力学理论定量分析结构在自身和外部作用下的响应、以结构可靠性定量描述结构的安全性, 是近代土木工程学科具有划时代意义的进步。

认识、梳理工程结构设计理论的发展历史与发展状况, 需要从两个基本维度加以考察:

(1) 对结构受力学行为的科学反映方式。

(2) 对工程中客观存在的不确定性的科学度量方式。

尽管在很长一个历史时期内, 由于认识发展过程的历史局限性, 人们对这两个方面的研究与拓展是在相对独立的两个领域中进行的<sup>[1]</sup>, 但时至今日, 我们应该可以比较自觉地从这两个基本维度认识工程结构设计理论的发展历史了。事实上, 从这两个基本维度及其结合点分析、梳理结构设计理论的发展历史, 不仅可以判明不同时代结构设计理论的基本特点, 也有助于判断新一代结构设计理论的基本特征和学术指向。

## 2 第一代结构设计理论

始自伽利略的实验力学与始自牛顿的理性力学, 可以视为土木工程设计从经验走向理性的近代

<sup>\*</sup> 校庆专稿

收稿日期: 2017-01-10

作者: 李 杰(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程可靠性理论、随机力学与混凝土损伤力学。

E-mail: lijie@tongji.edu.cn

起点<sup>[2]</sup>. 迄至 19 世纪初叶,柯西、泊松等人关于弹性力学的奠基性研究<sup>[3]</sup>,使土木工程结构设计第一次开始有了坚实的理论基础.

正如力的概念是人类认识史上的划时代进步一样,应力、应变观念的提出,同样具有革命性的价值.通过应力观念,关于物体受力平衡的观念在细观意义上得以体现;通过应变观念,宏观变形与细观变形有了定量的转化关系.由此,人们在宏观世界的经验感受开始在细观层次有了科学的刻划标准,由宏观经验经由理性推测而给出的广义胡克定律(式(1)),成为弹性力学赖以建立的三大基石之一.

$$\sigma = C:\varepsilon \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为应力张量; $\varepsilon$  为应变张量; $C$  为弹性刚度张量.

尽管后来关于弹性刚度张量的表述因对材料各向异性特点的认识而日趋丰富与复杂,但应力-应变观念及其联系——本构方程的建立,成为人类分析、描述工程结构在自身与外部作用下的变形与运动的基础.

弹性力学的建立,也使人们在宏观世界所感受到的关于结构承载能力的经验开始有了细观意义上的刻划.由允许应力表述的强度理论,形成了结构设计理论的重要基础.1825 年,Navier 首次提出允许应力设计法.19 世纪末,以应力分析-强度设计为基本特征的第一代结构设计理论初具雏形.至 20 世纪 30 年代,允许应力设计理论(其基本表述如式(2)所示)已经成为当时世界发达国家设计规范的基础和标准表达方式<sup>[4-5]</sup>.

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (2)$$

式中: $[\sigma]$  为允许应力或容许应力强度.

由于弹性力学基本方程属于高维偏微分方程,其解析求解成为理论发展的基本课题,也构成了相当长时期内这一领域发展的重要障碍.但是,人类的智慧,即在于不仅要不懈地追求理性的完满,也善于结合现实可能、寻求解决当前问题的可行路径.由一般三维问题到简化的二维问题,进而简化到最简形式——梁、柱的内力-应力分析,线性材料力学的发展,为式(2)应用于实际工程找到了合适的切入点与发展空间.事实上,通过结构力学分析建立结构荷载与结构内力的联系、通过材料力学分析建立内力-应力的联系<sup>①</sup>,成为第一代结构设计理论中结构分析的标准范式,也构成了直至今日的土木工程师的重要

知识基础.

对于工程中客观存在的不确定性的度量,形成了考量结构设计理论发展的第二个基本维度.然而,直至 20 世纪初,虽然人们对工程中客观存在的不确定性感受日深,但处理方式却不得不采用以经验为基础的方式<sup>②</sup>.为了保证结构的安全性,在第一代结构设计理论中,是以结构安全系数的概念来规避现实中的不确定性影响的.即取

$$[\sigma] = \frac{R}{K} \quad (3)$$

式中: $R$  为材料强度; $K$  为结构安全系数.

出于对结构分析理论不准确性的担忧和对现实工程中不确定性风险几乎无知的担忧,在 19 世纪末允许应力设计理论的奠基时期,对结构安全系数的规范规定一度高达 10 以上<sup>[5]</sup>.直至 20 世纪 30 年代,西方主要国家的工程设计规范的结构安全系数普遍规定在 5 左右.在这里,虽然有经验的积累,但也带有很明显的主观决策痕迹.由于经验估计的特征,这一时期的设计理论又被称为基于经验安全系数(对于不确定性的度量)的允许应力(对于结构受力学行为的反映)设计理论.这一背景,潜移默化地形成了工程设计理论中的线性世界观与确定性设计传统<sup>[6]</sup>.

### 3 第二代结构设计理论的发展

早在 1914 年,德国人 Kazinczy 就在钢梁的极限承载力试验中发现:按照允许应力设计结构,会显著低估梁的极限承载力.1930 年,德国科学家 Fritsche 提出了钢梁的极限强度分析理论,由此也引发了西方世界关于塑性铰观念是否合理的长期争论.与此同时,20 世纪 30 年代前苏联大规模工程建设的背景,促进了在工程结构设计中强调经济性的考量.20 世纪 30 年代末至 40 年代初,以格涅兹捷夫为代表的一批前苏联科学家的杰出工作,催生了第二代结构设计理论.

事实上,第二代结构设计理论的发展经历了两个阶段:前期(20 世纪 30~60 年代)和后期(20 世纪 70~90 年代).前期的结构设计理论,以构件极限强度分析与基于经验统计的概率性结构安全系数度量为基本特征.

在科学反映结构受力学行为这一维度,非线性

① 从这一意义上考察,弹性板壳力学本质上属于材料力学范畴.

② 这一方式直至今日还以校准法的形式在设计规范中存在.

性材料力学的发展形成了这一时期的时代特征. 混凝土结构、钢结构的构件承载极限强度分析, 构成了非线性材料力学的奠基性研究, 也形成了现代工程结构基于构件强度进行设计的基本格局<sup>①</sup>. 承袭人们在 20 世纪 30 年代之前关于线性材料力学的研究经验, 这一时期人们关心的重点是结构构件的极限强度分析. 梁-柱理论、板壳极限强度分析理论构成了这一时期研究的重要进展.

20 世纪 20 年代, 德国科学家 Mayer 第一次提出了采用概率理论度量工程中的不确定性(其主体是客观随机性)的观念<sup>[7]</sup>. 迨至 20 世纪 50 年代, 通过大量的荷载统计与结构实验, 人们对结构荷载和结构抗力的统计特征开始有了初步的认识. 基于这一认识, 建立了荷载与抗力统计参数与结构安全系数的联系. 由于沿袭了历史上确定性安全系数的观念, 这一表达式的基本形式被确定为:

$$K = \frac{m_R}{m_S} \quad (4)$$

式中:  $m_R$  为结构抗力平均值;  $m_S$  为结构荷载效应平均值.

结合前述构件极限强度的研究, 结构安全系数被定义在结构构件层次, 以工程中最为普遍存在的梁式构件为例, 结构设计的基本表达式是:

$$M \leqslant \frac{M_u}{K} \quad (5)$$

式中:  $M$  为梁正截面弯矩;  $M_u$  为梁正截面抗弯强度(承载力).

至 20 世纪 60 年代, 世界发达国家的设计规范大都采用了上述设计理论作为规范编制依据.

按照构件极限强度设计结构, 至少在结构构件层次打破了线性世界观的束缚, 初步实现了对结构受力学行为非线性性质的反映. 然而, 经过约 20 年的应用, 人们不无遗憾地发现: 按照这一理论设计的结构, 虽然经济性大为改观, 但结构使用性能却开始下降. 在结构使用阶段混凝土结构的开裂、钢结构变形过大等问题引起了人们的严重关切. 这一现实背景, 驱动了对于结构设计中多种极限状态的研究. 其成果, 则主要表现为对结构构件开裂宽度的限制和对结构构件最大变形的限制. 虽然从理论意义上, 这些研究并没有推动非线性力学的实质性进展, 但多种极限状态观念的提出, 却是工程设计理论中一个具有重要意义的进步. 事实上, 对多种极限状态的研究, 直接催生了 20 世纪 70~80 年代对结构受力

全过程行为的分析与研究热潮, 从而开创了非线性力学发展的新纪元.

始于 Mayer 等早期科学家的原创性设想, 对结构可靠性的研究工作在 20 世纪 60 年代得到了突飞猛进式的发展. 事实上, 早在 20 世纪 40 年代, 波兰科学家 Freudenthal 就提出了采用结构可靠性指标度量结构可靠度的基本理论框架<sup>[8]</sup>. 40 年代后期, Freudenthal 迁居美国, 从而使结构可靠性研究之花开遍美洲大陆. 由于 Cornell、Ang、Lind 等人的杰出工作<sup>[9-11]</sup>, 基于低阶统计矩的一次二阶矩理论开始完善, 并被十分精彩地表达为分项系数设计公式(以结构恒载与活载组合为例):

$$\gamma_R R_K \leqslant \gamma_G G_K + \gamma_Q Q_K \quad (6)$$

式中:  $\gamma_R$  为结构抗力分项系数;  $R_K$  为抗力标准值;  $\gamma_G$  为恒载分项系数;  $G_K$  为结构恒荷载标准值;  $\gamma_Q$  为活荷载分项系数;  $Q_K$  为结构活荷载标准值.

由于低阶矩仅能反映荷载与结构抗力分布的主要特征, 作为设计衡量标准的可靠度指标  $\beta$  与失效概率之间的关系又基于正态分布假定, 因此, 人们将这一设计理论称为考虑多种极限状态的近似概率设计法<sup>[4-5]</sup>. 它构成了第二代结构设计理论的核心.

至 20 世纪 80 年代, 包括中国在内的世界主要国家, 均开始在土木工程结构设计规范中采用考虑多种极限状态的近似概率设计准则. 这一发展趋势, 时至今日仍在继续之中.

第二代结构设计理论, 已然蔚为大观.

## 4 第二代结构设计理论的局限性与基本矛盾

尽管取得了巨大的成功, 但从第 1 节所述的两个基本维度考察, 第二代结构设计理论对于结构受力学行为的反映和对工程中客观存在的随机性的度量是局部的、近似的、不彻底的. 这构成了第二代结构设计理论中的基本矛盾.

缘于结构力学的滥觞, 结构设计中分解的方法论开始占据研究者与工程师的头脑. 以结构力学分析确立结构构件的力学效应, 以逐个的、单一构件的强度设计与校核实现工程结构的设计安全性保障, 成为第二代结构设计理论用之于工程的标准范式. 然而, 在人们的设计观念逐步开始固化的同时, 科学家们不无惊诧地发现, 在结构分析与构件设计两个

① 在这一意义上, 现代混凝土结构、钢结构、乃至砌体结构与木结构等大学标准教材的主体, 均可视为非线性材料力学.

层次,存在对结构受力学行为本质认识不一致的矛盾;在结构分析中采用线弹性力学、忽略非线性的影响,而在构件设计中则考虑了非线性受力学行为的影响。人们不禁要问:具有非线性的构件“回到”结构中工作、会发生什么样的事情?

对于上述矛盾的认识与担忧催生了结构塑性极限分析理论的研究<sup>[12]</sup>,尽管在20世纪50~60年代,人们付出了艰苦的、大量的努力,但弥合上述矛盾的努力却以失败而告终。究其原因,不仅在于这一研究关注点在极限状态、而忽略了结构受力全过程,也在于在其中多数研究中沿袭了力学研究中的现象学传统、而忽略了个中的物理要素。

事实上,从对工程中客观存在的随机性的反映这一维度考察,第二代结构设计理论还存在第二个基本矛盾:在构件设计中,承认随机性的客观存在性、并至少从近似概率的角度加以反映,而在结构分析中,则完全不承认随机性。这样,就完全割裂了结构分析与结构设计的完整链条。人们不禁要问:随机性对结构层次的行为真的没有影响吗?

第二代结构设计理论的两个基本矛盾:在构件设计层次考虑非线性、而在结构分析层次忽略非线性,在构件设计层次考虑随机性、而在结构分析层次不承认随机性影响,形成了这一代设计理论的基本局限性和理论的内在张力<sup>[13]</sup>,也为研究、发展第三代结构设计理论吹响了进军号。

## 5 第三代结构设计理论的基本特征与发展目标

仔细考察不难发现,虽然第一代结构设计理论对工程不确定性的处理是相当粗糙的,但其对结构受力学行为的反映在理论上却是一以贯之、不存在上述矛盾的。由于线弹性系统的可叠加性,细观意义上的强度设计可以等效转化为整体结构意义上的承载力设计。因此,采用结构安全系数,既可以保证结构各个局部不受破坏、也可以保证整体结构的安全性。这一优势,到了第二代结构设计理论开始大打折扣。由于分解的方法论,导致在结构设计理论的两个基本维度上均出现严重矛盾。

因为在结构层次忽略非线性受力学行为的分析,在结构受力过程中真实存在的非线性内力重分布就不能得到科学反映,从而造成构件层次据之以

进行强度设计的荷载效应与真实结构的荷载效应基本脱节。事实上,线弹性的结构内力分布不能反映真实的非线性结构内力分布规律!而在第二个基本维度,由于是在构件层次计算并校核可靠性指标,对整体结构的安全与否就寄托在“构件安全、整体结构自然安全”这一十分可疑的推断上。细加分析不难发现:这一推断本身来自于结构设计中长期以来潜在的确定性设计观念。而在实际上,由于构件安全与否是一个概率性事件,从“构件安全”并不能推断出“整体结构自然安全”这一结论,除非所有结构构件的可靠概率均为1。而按照近似概率的设计理论推演,这几乎是不可能实现的<sup>①</sup>。

如果说在第一代结构设计理论中,由于分析理论的内在一致性,结构工程师可以通过结构安全系数相当自信地判断结构的整体安全程度,那么到了第二代结构设计理论,由于引入了分项安全系数,结构工程师基本上失去了对结构整体安全性的判别能力。对一个自觉的结构工程师而言,他将发现自己所设计的结构,尽管经过细致的结构分析,但所得到的结构内力并不能反映真实的结构内力,且由于结构整体可靠性未知,结构的整体安全性可疑!这是十分令人担忧的。

起步于20世纪70年代的结构受力全过程分析研究热潮和20世纪80年代的结构整体可靠性研究,可以视为新一代结构设计理论开始萌芽的象征。虽然研究进展维艰、其中一些研究(如结构整体可靠度研究<sup>[14-15]</sup>)也因不断遭受挫折而陷入低潮,但在黑暗中摸索的人们却在不断锤炼着自己的学术自觉性、不断地发现推动研究进展的新曙光。到21世纪的第一个10年,由于静、动力非线性数值分析方法的趋于完备、弹塑性力学和损伤力学的趋于成熟、概率密度演化理论的出现,形成了新一代结构设计理论得以奠基的三大基石。在这一背景下,不失时机地提出第三代结构设计理论的观点,是历史发展的必然。

按照前述两个基本维度加以考察,并注意到结构工程研究近30年的发展,第三代结构设计理论的基本特征与学术指向是:

(1) 以固体力学为基础的、考虑结构受力全过程、生命周期全过程的结构整体受力学行为分析。

(2) 以随机性在工程系统中的传播理论(矩演化与概率密度演化)为基础、以精确概率(全概率)为度量的结构整体可靠性设计。

① 可靠指标 $\beta$ 对应的结构安全概率 $P_s = \Phi(\beta)$ ,由于正态分布尾部不等于零,故无论 $\beta$ 多大、 $P_s$ 都不会是1。

第三代结构设计理论的基本发展目标是:解决第二代结构设计理论中存在的两个基本矛盾,实现结构生命周期中的整体可靠性设计。

## 6 第三代结构设计的理论基础

### 6.1 固体力学

本应起步于弹性力学的工程结构设计理论,虽然因为科学进步的整体背景局限性,于20世纪初转入到以材料力学为基础的发展轨道,但人类从未放弃从固体材料的细观物理性质入手认识并设计结构整体受力力学行为的理想。20世纪50年代趋于成熟的弹塑性力学,为这一理想的实现筑就了继弹性力学之后的第二个台阶;而20世纪70年代出现、至90年代开始趋于形成完整科学体系的损伤力学,则为上述理想的实现提供了第三个支撑。21世纪以来,人们越来越清晰地看到:多尺度物理力学的发展,形成了固体力学持续发展的新的地平线。

在这里,笔者试图从固体力学的发展的角度,阐述固体力学为何成为第三代结构设计理论的基础之一。

屹立于平衡方程、几何方程和本构关系这三个基石上的弹性力学,是人类从材料细观物理认识结构整体力学行为的第一个理论结晶。20世纪初,缘于对金属材料的深入研究,人们逐步发现了材料在外力作用下所产生的不可恢复变形——塑性变形所带来的种种复杂而有趣的现象和问题:材料在到达极限强度后的流动性质和再强化特征、材料对加载路径的记忆特性、材料屈服后周边弹性约束对结构受力力学行为的决定性影响。所有这些问题,构成了丰富多彩的塑性力学研究基本格局,而其要旨,则是如何认识并确立塑性变形。今天,人们已可以十分清晰、简洁地表达塑性力学基本方程<sup>[16]</sup>:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{C} : (\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p) \quad (7)$$

式中: $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ 为应力率张量; $\mathbf{C}$ 为切线刚度张量; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为总应变率张量; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p$ 为塑性应变率张量。

然而,在塑性力学得以诞生的探索期,德国科学家 Von Mises 从提出材料屈服的 Mises 准则到发现屈服流动的塑性流动法则(事实上应称之为 Mises 法则)却经历了 15 年的漫长探索过程<sup>[17]</sup>!此后,又经历近 30 年,直到 20 世纪 60 年代末,由于固体力学的现代基础——不可逆热力学的引入,才使得由经验而经由猜测、假设、构造途径给出的塑性流动法则有了接近于完满的科学解释。

塑性力学在科学反映金属材料受力力学行为方面的巨大成功,吸引了一大批科学家奋不顾身地投入到将塑性力学引入到准脆性材料(如岩石、混凝土)的研究之中<sup>[18]</sup>。然而,经由 20 世纪 60 年代的探索、70 年代至 80 年代的研究高潮、80 年代中期以来的研究余波,人们不无遗憾地发现:由材料细观缺陷及其发展所导致的材料软化性质,是经典塑性力学无力加以完美表达的。

20 世纪 80 年代中期,法国科学家将损伤力学引入准脆性材料受力力学行为研究的努力<sup>[19]</sup>,为打破上述僵局带来了新的转机。经过近 30 年的努力,今天人们已经可以十分欣慰地看到:建立在经典弹塑性力学基础之上的损伤力学,已经可以比较完整地反映包括材料软化性质的准脆性材料受力力学行为,从而为实现经过细观分析、认识与把握结构整体受力力学行为的理想奠定了现实基础。损伤力学的基本方程是<sup>[20]</sup>

$$\boldsymbol{\sigma} = (\mathbf{I} - \mathbf{D}) : \mathbf{C} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_p) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位张量; $\mathbf{D}$ 为损伤张量; $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ 为塑性应变张量。

在这一基本方程中,对于损伤张量的唯象学描述,形成了固体力学天空中一朵乌云。事实上,正如塑性力学的核心问题是如何确立塑性变形一样,损伤力学的核心问题是如何确立损伤演化规律。固体力学的唯象学研究思想,使得细观塑性变形的微观物理、细观损伤演化的微观物理研究一直被经验地或通过理性假设的方式加以替代。内变量概念的引入,则使这种替代披上了理性的外衣。然而,人类对理性的渴望是无止境的,这种渴望不容许固体力学天空中的最后几朵乌云。21 世纪初逐步展开的多尺度物理力学研究,可视为固体力学可持续发展的新一代努力。

尽管多尺度物理力学的研究方兴未艾,但从科学反映结构受力力学行为的角度考察,现代固体力学的基本理论,已足以构成第三代结构设计理论的基础。而在固体力学发展过程中,自 20 世纪 70 年代以来逐步形成的计算力学数值方法<sup>[21-22]</sup>,则为分析复杂结构的材料损伤、结构破坏乃至倒塌全过程提供了现实的技术实现手段。现代固体力学的基本理论与数值方法,已经为第三代结构设计奠定了理论基石。

### 6.2 概率密度演化理论

与之相应,在工程不确定性的合理度量方面,也已形成了第三代结构设计理论得以实现的第二块理

论基石. 在这里, 对于随机系统物理本质的认识, 是这一方向研究得以上升到新高度的重要科学发现.

长期以来, 对于随机性的认识一直局限在现象学的统计阶段. 这样的一种研究方法很难从根本上解释为何存在概率统计规律. 大多数人认为, 虽然只有一个客观世界, 但人们却需要用两套截然不同的规律去反映它: 确定性的物理规律和概率的统计规律<sup>[23]</sup>. 而对概率统计规律, 不少人认为是不可捉摸的, 甚至带有宿命性地、无奈地接受它的存在. 概率统计规律, 几近于无所不能的上帝之手的任意创作. 正是这种接近于宿命论的观念, 使得关于概率统计规律的研究迈进了理论禁区. 这种一般科学背景, 是造成结构设计理论的两条基本发展线索长期互相独立、没有本质接合点的根本原因. 虽然若干随机系统的研究在有意无意之间触碰到了物理规律的影响(如随机动力系统的均方演化理论<sup>[24]</sup>), 但由于上述研究观念的束缚, 使得这些研究从来没有在本质上揭示物理规律在概率统计规律形成中的决定性作用.

近10余年来, 概率密度演化理论的研究进展为打破上述桎梏做出了决定性的贡献<sup>[25]</sup>. 注意到在一般意义上物理规律总是可以用某类微分方程加以表述. 不失一般性, 存在

$$L(y, \Theta, x, t, \tau) = 0 \quad (9)$$

式中:  $L(\ast)$  为一般意义上的微分算子;  $y$  为基本物理量;  $\Theta$  为基本随机变量族;  $x$  为空间变量;  $t$  为时间变量;  $\tau$  为描述系统状态发生变化的广义时间参数.

概率密度演化理论的核心研究进展表明, 对于上述一般物理系统, 存在如下广义概率密度演化方程<sup>[26]</sup>:

$$\frac{\partial p(y, \Theta, \tau)}{\partial \tau} = -\dot{Y}(\theta, \tau) \frac{\partial p(y, \Theta, \tau)}{\partial y} \quad (10)$$

式中:  $p(y, \Theta, \tau)$  是关于状态量  $y$  和随机源变量  $\Theta$  的联合概率分布.

注意到  $\dot{Y}$  刻划了系统物理状态的变化, 因此, 上述方程表明: 随机系统物理状态的变化, 决定了系统概率密度分布的演化. 换句话说, 是系统物理状态的变化推动了系统概率密度的演化.

这一重要的科学发现, 在很大程度上揭示了何以存在概率统计规律的秘密: 概率统计规律及其演化, 取决于系统物理规律. 这就在本质上揭示了概率统计规律赖以存在的物理基础. 联系到前述多尺度物理力学和概率论中的大数定律, 不难猜测: 是物理

规律塑造、改变了在本源随机性发生处的无规分布, 使之成为了人们在宏观世界所观察到的概率统计规律.

式(10)的意义还不仅仅在此. 事实上, 联系到式(9)的一般算子性质、以及工程系统的数理描述最终总可以在理论上归结为一组算子表述, 式(10)还在本质上揭示了本源随机性在工程系统中的传递规律. 由此, 长期在结构设计理论发展过程中的两条基本线索——结构力学分析与结构可靠概率分析——有了关键的本质结合点.

通过联立求解力学分析基本方程和广义概率密度演化方程, 可以十分自然地找到结构反应的精确概率描述方式, 也自然可以方便地给出结构可靠性的合理度量: 精确的结构安全概率或结构失效概率. 而一般工程随机系统等价极值事件的严格证明<sup>[27]</sup>, 则为定量评价结构整体可靠度打开了方便之门.

基于上述论述, 第三代结构设计理论的基本架构可以用图1加以概略表述.

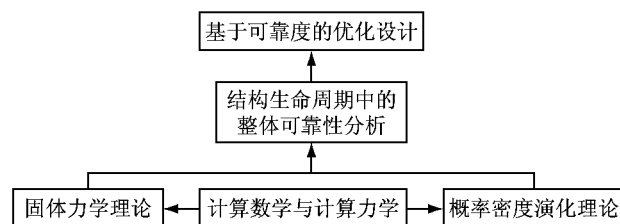


图1 第三代结构设计理论基本架构

Fig.1 The framework of the third generation of structural design theory

顺便指出: 从随机性在工程系统中的传播这一观点, 反观经典的基于统计矩的各类随机系统分析方法, 不难发现矩传递与矩演化在各类经典方法中的核心价值. 事实上, 无论是可靠性分析的一次二阶矩理论、随机振动分析的谱分析理论、还是随机结构分析中的摄动理论与正交多项式展开理论, 无一不可以看作是随机性在工程系统中的传递关系或传播过程, 只不过这种传递与传播是在统计矩意义上实现的罢了. 如果考虑力学系统的非线性性质与本源随机性的时间过程性质, 这种矩传递关系就自然转化为矩演化关系.

固体力学的发展与概率密度演化理论的建立, 奠定了第三代结构设计理论赖以形成的两大基石. 而计算数学与计算力学的现代发展, 则构成了第三代设计理论得以实现的第三块基石. 由于本文主旨与这一方向的研究主线关联不多, 故不赘述.

## 7 第三代结构设计理论的研究发展方向

尽管第三代结构设计理论基础趋于完善,总体框架初具雏形,但真正形成完备的第三代结构设计理论,还需要大量深入细致、在若干领域期待着实质性创新的研究工作。总其要旨,可以概述于下:

(1) 结构荷载的统计与建模。结构荷载的统计建模是结构受力力学分析的基础,也是结构可靠度分析的基础。在这一关键环节,尽管此前在世界范围内已经进行了大量的工作,但做总体考察,其结果尚不尽如人意。事实上,在荷载统计、结构力学分析与结构抗力分析三个结构可靠度分析的基础方面,荷载统计依然是最为薄弱的支点。近年来大数据技术的发展,为结构荷载统计建模的发展带来了新的希望之光。可以设想:通过人流大数据、交通大数据、各类结构检测大数据,有望建立新型的、具有丰富数据资源的、可以动态调整的荷载统计模型,从而为第三代结构设计理论的建立提供更为坚实的基础。

(2) 灾害性动力作用与环境作用的危险性分析。考虑灾害性动力作用对结构安全性的影响,是近代结构设计理论发展的重要标志。地震、台风等灾害性动力作用,其典型特征是发生地点、时间与强度均具有显著随机性。进行灾害性动力作用危险性分析,并建立相应的危险性分析模型,是实现结构生命周期内的整体可靠性设计的基本前提之一。在这一研究中,将统计数学与物理机制相结合,建立基于一定物理机制的危险性分析模型,是值得重点加以探索的研究课题。事实上,对于结构生命周期中的各类环境作用(如大气腐蚀作用、海洋环境作用等),也存在类似的危险性分析问题。只有在概率意义上的危险性分析科学基础上,才能够给出合理的地震动区划、风速区划、环境作用区划乃至多种灾害的综合区划。显然,这些区划图应该摒弃传统的定数法思路,采用以危险性分析为基础的概率性、多指标、多层次区划思想加以编制。

(3) 多尺度物理力学的发展。尽管第三代结构设计理论的建立并不必然要求以多尺度物理力学为科学基础,但这一充满生机的研究方向必然可以为第三代结构设计理论的完善带来新的科学支撑点。多尺度物理力学的发展,不仅在于置换现代固体力学的唯象学基础,更为重要的是,它可以导致研究观念的变更:现实工程中的宏观多场耦合分析,在多尺度的细、微观分析中,将可能找到统一的科学基础;

在多尺度物理分析中的随机性本源识别与随机性传播,则不仅可望发现随机性在本源处的无规性质,也为分析随机性的多尺度涨落性质、发现复杂系统之所以产生平衡、分叉、自组织等性质的科学奥秘提供了可能。显然,这将为土木工程领域里的科学家为一般科学的发展做出贡献提供用武之地。

(4) 环境作用的整体结构效应。结构耐久性研究是实现结构生命周期中的整体可靠性设计的重要组成部分。然而,尽管过去30年的研究形成了结构工程研究进展的重要标志,结构耐久性的现有研究成果还很难满足服务于第三代结构设计理论的要求。究其原因,在于既有结构耐久性研究还主要集中于结构材料与构件层次,而对于环境作用下的整体结构效应研究,则极为罕见。解决这一问题的关键,在于开拓复杂环境作用下的材料多维本构关系研究领域。深入分析多场耦合作用下工程材料因物理、化学甚至生物作用所导致的材料损伤与恢复过程规律,建立可以用于整体结构力学效应分析的细观、多维本构模型,发展考虑复杂环境作用的整体结构力学分析数值方法与实验技术,将构成这一领域研究中亟待发展的重要研究方向。

(5) 结构非线性荷载效应组合。第三代结构设计理论的建立,必然要解决结构生命周期中的荷载效应组合问题。这就必须打破线性分析的藩篱、进入非线性分析的领域。在第一代与第二代设计理论中,由于在结构层次一直采用线性分析的思想,因此荷载与作用遇合问题可以转换为荷载效应组合问题。然而,在结构生命周期中,由于灾害动力作用与各类环境作用影响,很难规避结构受力进入非线性阶段。因此,线性叠加原理不再成立,必须发展结构生命周期中的非线性荷载效应组合理论与方法。将作用危险性分析、结构非线性分析与概率密度演化理论相结合,可望建立基于物理分析的结构非线性荷载效应组合理论与方法。显然,这里需要耐心、细致的深入研究和迎接挑战的极大勇气。

(6) 基于可靠性的结构优化设计理论。实现结构的最优化设计,一直是结构工程师的基本追求。但真正从科学角度加以系统探索的研究,直到20世纪50年代中期才真正开始。从力学准则法到数学规划法<sup>[28]</sup>,人们的认识在不断的深入。拓扑优化理论的发展与现代组合优化理论的运用,则为人们将理论探索色彩十足的研究逐步发展到在某些特殊类型结构中系统应用的阶段。20世纪90年代以来,研究者逐步清晰地认识到:基于直觉的应力约束、变形约束乃

至能量约束条件、都不能真正解决结构力学性能与结构功能优化均衡的问题,只有引入结构可靠性的约束条件,才可望达到结构力学性能最优与功能最优的均衡。从发展的角度看,将目前研究中主要是构件层次、统计矩约束的线性结构系统优化,推进到考虑结构非线性性能、以精确概率衡量的整体可靠性为约束条件的结构拓扑优化,显然是形成完整的第三代结构设计理论的一个重要研究方向。

从前一节论述可见,建立第三代结构设计理论的基本理论基础已经具备,这一理论体系的基本轮廓业已形成。然而,为了建立完整的第三代结构设计理论,仅仅上述6个方向的研究仍然是远远不够的。事实上,发展结构的多尺度综合模拟技术,引入并发展与图形相结合从而可以实现人机交互、主动干预的并行计算技术,实现结构性能监测与性能控制的一体化设计并将其融入到结构全生命周期的整体可靠性设计之中、研究并发展对主观不确定性的科学反映途径与量化理论,发展工程系统的可靠性分配与优化理论…,都是值得发展的重要研究方向。限于篇幅所限,这里就不一一深入了。

## 8 结语

力图以理性而不仅仅是经验的方式设计、评价、控制工程结构的安全性与可靠性,已经经历了近200年的发展历史。在这一历史进程中,对于结构受力学行为的科学反映和对工程中客观存在的不确定性的合理度量,构成了结构设计理论的基本发展线索,也是考察不同时代结构设计理论本质特征的两个基本维度。历经近200年的发展,已经形成了继承与发展互现的第一代和第二代结构设计理论。第二代结构设计理论存在的两大基本矛盾,形成了结构设计理论持续发展的内在动力,也呼唤着新一代结构设计理论的诞生。现代数值计算方法、固体力学理论与概率密度演化理论成果,业已形成第三代结构设计理论的三大基石。第三代结构设计理论的基本框架已经形成。这一理论体系的基本目标,是实现结构生命周期中的整体可靠性设计,从而对工程结构的整体安全性与服役功能可靠性给出科学的定量描述。可以相信:这一基于人类工程实践经验和理性概括总结的新一代设计理论,必将在不远的未来服务于工程实践,从而真正建立起结构工程师关于结构设计的理性自信与实践自律。因此,我们有足够的理由,呼唤一个新时代的到来!

谨以此文纪念同济大学建校110周年。

## 参考文献:

- [1] FREUDENTHAL A M. The safety of structures[J]. ASCE Transactions, 1947, 112:125.
- [2] KUPPER Karl-Eugen. The history of the theory of structures[M]. Berlin: Ernst & Sohn, 2008.
- [3] TIMOSHENKO S P, GOOGLER J N. Theory of elasticity[M]. New York: McGraw-Hill, 1951.
- [4] DITLEVSEN O, MADSEN H O. Structural reliability methods[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [5] 赵国藩, 曹居易, 张宽权. 工程可靠度[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] ZHAO Guofan, CAO Juyi, ZHANG Kuanquan. Engineering reliability[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [7] 李杰. 结构工程研究中的关键科学问题[R]. 上海: 同济大学, 2006.
- [8] LI Jie. The elemental problems in the study of structural engineering[R]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [9] NOWAK A S, COLLINS K R. Reliability of structures[M]. London: CRC Press, 2013.
- [10] LIEBOWITZ Harold. Alfred Martin Freudenthal[M]//National Academy of Engineering. Memorial tributes: National Academy of Engineering, Volume 1. Washington D C: The National Academies Press, 1979: 63-65.
- [11] CORNELL C A. A probability-based structural code[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1969, 66(12): 974.
- [12] ANG A H-S, TANG W H. Probability concepts in engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [13] LIND N C. Consistent practical safety factors[J]. ASCE Structural Transactions, 1971, No. ST6.
- [14] 成文山. 钢筋混凝土框架结构极限分析[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1984.
- [15] CHENG Wenshan. Limit analysis of reinforced concrete frame structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1984.
- [16] 李杰. 生命线工程研究中的关键力学问题[J]. 工程力学, 2003, 20(增刊): 45.
- [17] LI Jie. The key problems of mechanics in the study of lifeline engineering [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20 (supplement): 45.
- [18] THOFT-CHRISTENSEN P, MUROTSU Y. Application of structural systems reliability theory[M]. London: Springer, 1986.
- [19] RACKWITZ R. Reliability analysis—A review and some perspectives[J]. Structural Safety, 2001, 23: 365.
- [20] SIMO J C, HUGHES T J R. Computational inelasticity[M]. London: Springer, 1998.
- [21] 卓家寿, 黄丹. 工程材料的本构演绎[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] ZHUO Jiashou, HUANG Dan. Constitutive interpretation of engineering materials[M]. Beijing: Science Press, 2009.

(下转第632页)