苏联第11个五年计划期间结构计算理论和方法的主要科学研究方向

А. Ф. Смирнов[1)]

在1981—1985的第11个五年计划期间，苏联建筑力学和结构计算理论将在下述9个方向予以发展。

1．按照静荷载、动荷载（其中包括地震荷载）和气候等作用下的综合图，研究房屋和工程结构的计算方法，这里假定结构物为统一的空间系统，并考虑所有结构部件的工作。

目前，建筑物设计主要是根据有不同理由的简化计算模型进行计算。在多数计算模型中，结构物各个结合部件的变形可看成彼此互不相关，极个别的情况可采用房屋综合结构图的模型。这是因为，采用完全反映各个结构部件相互作用的计算模型，将会使结构的分析和数值计算遇到很大困难。

建筑力学和计算技术已达到的现代水平，原则上使结构同基础及地基一起看作统一空间系统的计算问题可能解决。在此情况下，研究计算图是关键性阶段。通常，应用有限元法作为计算图的基础。在此情况下可把结构图分成与结构某些部分相对应的超级元。对相当复杂的结构图，计算时考虑结构物施工的分段性很重要。这种处理法能够可靠地确定结构中的内力和变形，进而能够保证降低造价、材料消耗和劳动强度，能够提高结构物的安全性和寿命。

把结构物当作统一空间系统来进行计算的方法的另一个重要问题，是确定有效的数学工具及实现数值计算的方法。采用有限元法并不排除别的可能的计算图，例如，用杆件近似法可把结构物表示成组合体系。因此，发展复杂结构系统的变形理论和相应的计算模型，乃是科学研究必须的重要任务。

把结构物当作统一空间系统计算时，节约材料和降低造价的极大潜力在于考虑塑性和蠕变的不可逆变形。

根据初步资料来看，在考虑结构材料的实际性质时，进行复杂空间系统的计算可以保证节约承重构件材料8％，降低结构物造价3—6％。

计算钢筋混凝土和石砌体结构时，还必须考虑裂纹的出现。考虑不可逆变形和裂纹的形成，以及考虑结构的不完善性，都不会引起原则性的困难。然而，求得问题数值解的困难却大大增长。这也就是要寻求和研究复杂空间系统新变形理论的原因。

1）苏联科学院通讯院士，苏联中央建筑结构研究所（ЦНИИСК）所长。

在结构物设计的计算中考虑结构的几何非线性，也能得到降低材料和资金消耗的效果。

把结构物当作空间统一系统计算时提出的问题，不论对静荷载，还是对各种性质的动荷载，都是迫切需要加以解决的。高强冲击荷载(爆炸波和激波的作用、地震作用)时在结构计算中忽略塑性变形是不允许的，在经济上也是不可取的，因此在计算时建立和使用材料和结构的相应计算模型，有着特殊的重要性。

选择荷载的计算组合是结构计算中很复杂的事情。

结构物结构形式和材料性质的特点，对当作空间系统的结构物的问题提法和计算能起相当大的影响。钢筋混凝土和石砌体结构的变形状况，可能取决于钢筋混凝土的非弹性性质和裂纹的形成，可能取决于高温和侵蚀介质的作用。计算石结构时应特别注意局部作用。

建筑结构强度计算时应考虑工艺因素引起的内应力，应考虑可能多次发生的温度湿度作用，还应考虑侵蚀介质的作用。对风力作用的结构进行计算时，考虑橡胶织物材料的实际性能很重要。

火对各种材料组成的结构的作用，是侵蚀作用的特殊类型。结构计算时考虑火的作用是重要的问题之一。

当前，许多单位正致力于各种自动设计系统的研究。第10个五年计划期间研究出来的头一批自动设计系统，有可能在第11个五年计划中得到相当大的经济效果：预计设计单位的劳动生产率将提高15—20%，并将大大节约建筑资金。

自动设计系统的研制者曾遇到过许多困难。其中主要的困难是现有的规范要求往往不允许研制出唯一的算法语言，因为这些要求常常互相矛盾。为了消除这个缺点，在第11个五年计划中必须着手研制出可以实现建筑标准和规范中各个原则的算法语言和程序。同时也必须着手创制出从所设计结构物的使用范围和参数范围来看，具有较大通用性的成套应用程序和系统。

2．在考虑损伤累积、低温作用、几何和物理不完善、不可逆变形的基础上，查明现代建筑材料和结构承载能力的潜力，并创立结构部件和各种材料的强度理论和塑性理论。

实验表明，由材料强度特性决定的结构承载能力，很大地依赖于不可逆变形和损伤累积的存在。温度是决定材料性能的重要因素；实际上损伤累积是从结构物几何和物理不完善引起的缺陷处开始的。固体变形和断裂的统计理论，有可能在考虑上述那些因素的基础上来描述材料和结构的性能。这种理论似乎从统一的观点表示了塑性变形、蠕变和松弛、脆性断裂、损伤累积、温度影响等过程的相互关系。然而，在当前要建立这种理论，由于其复杂性和缺少必要的实际数据而引起不少的困难。为了最快地把科学研究成果在建筑界推广，应当说把上述这些现象分开加以研究的途径是最合理的。

首先，最重要的问题是创立实际上可行的材料和系统的非弹性性能的一般理论，这个系统包括任意复杂的加载过程；对于发展在各种加载方案的荷载作用下，考虑几何非线性的塑性变形系统的计算方法，这样的理论是必要的。看来，在现有的观点中，最有前途的是基于塑性变形增量理论的观点，虽然在特定类型的加载情况下塑性变形理论可能显得比较方便。在固体非弹性性能的一般理论基础上，必须建立各种建筑材料的非弹性

性能的理论(已经有了适用于混凝土和石棉水泥的这类理论的例子)。

很显然，在建筑力学中必须发展固体和系统非弹性性能的简化理论，现有的理想塑性体理论就是这种简化理论的范例。应当把非弹性系统和非弹性结构计算理论和计算方法的研究，有效近似计算方法的研究，理论的进一步精确化，多次反复加载下（即考虑适应性情况下）弹塑性系统问题的求解等看作对实际来说是重要的事情。考虑固体性能随应力符号而改变的差异来建立各种建筑材料的塑性准则，也是重要的。

研究和表述现代建筑材料的强度理论，并应用这些理论去确定结构和工程的承载能力，是一个独立的问题。强度准则或断裂准则同物体中某一点危险状态的来到条件等价，并且实际上描写了裂纹萌生的时刻。强度理论不仅要求表述材料的断裂条件，而且要求表述考虑复杂应力状态下断裂的物理图案时材料的随后的变形。

同样应当认为，在外力作用和残余应力影响下，由弹性、弹塑性、粘弹性和粘塑性材料构成的建筑结构中，裂纹扩展问题求解方法的研究对实际来说是重要的。

由于在低温地区使用各种建筑材料的范围逐渐扩大，所以低温下结构脆性断裂和塑性问题的研究具有特殊的意义。

目前，考虑瞬时塑形变形和蠕变变形的相互影响对各种材料在复杂应力状态下的蠕变和长期强度的实验研究，线性理论适用界限的确定，聚合物非线性理论的建立，结构及其构件长期强度和蠕变计算方法的研究，蠕变遗传理论问题解法的发展，以及各种建筑结构加载问题的解法，都有重大的意义。

损伤累积问题在建筑结构的计算中具有巨大意义。

3．进一步发展建筑结构可靠性的应用理论，包括计算图的分析、荷载的组合、优化原则和寿命的确立。收集和分析气候和工艺作用的统计资料，收集和分析材料性质和结构不完善的统计资料。

在可靠性应用理论方面，必须用概率经济法来研究房屋和结构物计算的基本原理。应当把最大节约原则作为这个方法的基础，此原则规定结构物设计时，应使与结构物有关的费用在其计算使用期内达到最小。这些费用包括建筑造价和修理费用，也包括由于违反正常生产过程所造成的损失。建筑结构的最大节约，可用未知结构参数的概率优化法达到，这是因为费用中的各项因素是互相矛盾的量。可是在目前，这种方法仅在结构断裂时损坏不太大的情况才完全适用。关于用概率经济法进行结构计算的基本原理方面的工作，应当根据所研究出来的具体概率计算方法能够在最近期间得到使用来安排。

由于要在考虑外界作用的随机性、材料的性质、结构的公差等的情况下来研究可靠性的应用理论和解决完善额定值方法的问题，所以必须收集和分析关于荷载和其他作用的统计资料，必须收集和分析关于建筑材料力学性质的统计资料。

荷载额定值的问题，有科学根据的荷载计算值的确定问题，都十分明显地影响到设计方案的经济性。

必须研究静不定系统的概率计算方法，建立整个结构不退出工作的区域界限。考虑材料性质和外界作用易变性时建筑结构的优化问题很重要。

4．研究各种优化准则下大量使用的房屋和结构物的优化设计方法。

工程师和设计师的活动同给定条件下选择最有利的设计方案有密切关系。这种方案

由许多因素来决定：造价，材料用量，劳动强度，工艺可能性，美学考虑，等等。目前，设计实践中最好的设计方案，一般是在考虑对最终设计的各种要求的基础上，用比较各种方案的办法得到的。这种方法是基本的方法，实质上也是唯一的方法，这是因为，从对设计最初要求的定型，到把优化方案的寻求完全转换为数学语言，并按照这种设想用一种数学手段来求得优化设计，暂时还是不可能的。

然而，在建筑力学问题的范围内，可能有相反的提法：根据给定的荷载、强度和结构限制，确定结构物的尺寸、形状和材料。在此情况下，工程师可以大大简化选择优化方案的问题。但是在解决“反”问题时应当克服重大的数学困难，应当搞清楚优化方案的存在性和唯一性问题。

对于这个问题，表述一般情况下包括造价、材料用量、劳动强度等的新的优化准则，是非常重要的。

为了得到科学研究成果，必须研究复杂结构形式的优化设计方法，研究具有大量变量问题的数值解法，必须把现有的解法转换成电子计算机适用的标准程序。

甚至在不很一般的提法中，结构优化也能给出重大的效果。各个不同单位得到的优化方案都能够减少结构的材料用量约10%。把类似的方法应用到更广泛的结构类型上是极其迫切的问题。也必须发展一切可能有的优化方法类型。

5．研究考虑材料实际性质、物理和几何非线性以及流变因素时变形系统稳定性的计算理论和方法。

各种力学系统和结构的稳定性问题已得到重大发展。在杆件系统、薄壁系统和结构的静态稳定性方面，在动态稳定性方面，弹性非保守系统的稳定性方面，稳定性定性理论及其应用方面，都取得了巨大的成就。

然而，不论在提法上，还是在研究稳定性问题的有效解法上，都存在着一系列重大的困难。直到现在，求解非弹性系统和结构的稳定性问题还是非常困难的。问题的复杂性在于，为了求解这些问题，必须表述相应的弹塑性体理论，但这在目前暂时还处于寻求有道理的概念和假说阶段。

尽管已作了相当大的努力针对蠕变情况下的稳定性理论进行了研究，仔细分析了各种稳定性准则，研究了各种提法下丧失承载能力前的时间确定方法，并且也解决了某些问题，然而问题还是远远没有完结。蠕变情况下板和壳的稳定性研究主要在线性提法方面。今后必须求解壳和各种复合系统的非线性稳定性问题，看来，这只有使用电子计算机才是现实的。

必须创立非线性弹塑性系统平衡状态的有效研究方法，这些方法与在静态和动态荷载下建立平衡状态曲线有关。

在具有原则性意义的其他稳定性问题中，必须指出其中的两个问题：研究可以用来确定局部临界荷载和平衡形式的理论，这在以后可转换成所有系统的一般的稳定性指标；研究由具有弹塑性性质的各向异性材料组成的现代结构的计算理论和方法。

6．完善结构的动态计算方法和研究有效的防振措施。

现代工业建筑的最重要特点之一，是在生产厂房中安装着大型机器和机械，这些设备的工作与引起建筑结构振动的剧烈动态作用有关。生产性振动已成为多数工业部门设

计和使用工业厂房的重要因素，也是设计和使用建筑在工业场地、露天采掘区、地上和地下交通线等附近的民用房屋和结构物的重要因素。机器制造工业、电子工业、无线电工程和其他工业部门的许多生产工艺，以及精密量测和实验工作的方法，都在限制建筑结构振动水平方面提出了愈来愈高的要求。

风，海浪，灰尘、气体和蒸汽空气混合物在生产车间的爆炸，某些试验设备和卫生工程设备，均能给予结构物相当大的动力作用。

在第11个五年计划期间将进行完善结构动态计算的工程方法工作，将进行新型工业设备的动荷载研究工作。在防振方面，由保护各个结构部件过渡到整个结构物（住宅、原子能电站的管路系统等）的隔振以及大型结构物（高塔、烟囱、大楼）的消振，将成为新研究工作的最重要特点。

预防、降低、预报建筑结构的振动水平，是重大的科学技术问题。这个问题的解决，将在全苏范围内给出巨大的经济效果，这是由于使用了更经济和更先进的承重结构，由于提高了工人的劳动生产率，由于减少了生产废品，由于预防了事故以及降低了工程修理和维护费用所致。

7．根据工程地震学的现代成就研究地震作用下房屋和其他结构物的计算方法。

关于新的有效抗震结构方案，研究它们的新的计算方法并应用到建筑实际中去，是一个重要的方向。在这个方向打算研究：

根据结构物使用期限和使用功能，研究在估计地震危险性时考虑地震重复出现的原则；

考虑地区的具体地震条件和地质条件，研究用于结构计算的土壤地震振动的振谱-时间新模型；

考虑材料和结构直至破坏时的实际性质，研究多层空间房屋和复杂工程结构物在电子计算机上的工程计算方法、算法语言和程序；

根据现代实验研究方法，包括利用振动台和利用强爆炸模拟地震作用，研究估计工业和民用房屋和结构物抗震能力的方法；

研究承受各种类型地震作用的房屋和结构物的动态防震系统；

研究地震作用下估计工业和民用房屋和结构物的可靠性的方法。

由于上述这些工作的结果，将提高结构物的抗震能力，降低材料用量，包括结构的金属用量。

8．考虑构造不均匀性、各向异性、温度、变形率和损伤累积，发展轻型结构的计算方法。

轻型结构的外壳面板一般用石棉水泥板、铝板、钢板或胶合板作成，面板中间的胶结夹层使用聚合物。在轻型结构中，用作夹层的聚合物，以及用作屋盖和保护结构的结构材料的聚合物，占结构用料的主要体积。

聚合物材料具有特殊的力学性质：各向异性，其力学性能同温度和加载方式有显著的依赖关系。它们本身构造的不均匀性和构造成分，对这些材料的性质也有影响。

必须研究由聚合物材料组成的结构的承载能力和应力应变状态的模拟准则，研究聚合物材料和由聚合物材料组成的结构的力学性质，必须搞清楚考虑变形率和温度的影响

时材料的强度性质和实际的变形膜。

聚合物材料和由聚合物材料组成的结构抵抗粘弹性变形和断裂的强度，取决于应力状态类型和变形条件，这种强度的实验研究和理论研究，蠕变和松弛特性的分析，考虑材料构造不均匀性和材料的各向异性对抗变形和抗断裂强度的温度-时间特性的分析，对于建筑实践来说都是很感兴趣的。必须研究结构由于在制造和使用过程中形状的改变而引起的残余应力。

研究在非线性提法下强度、刚度和稳定性的计算方法对于聚合物材料结构是特别重要的。为此必须发展粘弹性材料有相应实验根据的线性和非线性理论。考虑损伤累积也有巨大的意义。

9．研究和完善建筑结构计算的基本原理。

在苏联，建筑结构的计算是根据极限状态法进行的。把极限状态法引进建筑标准和规范是相当大的进步，因为这个方法使我们能够考虑各种结构的工作特点、荷载的实际多变情况和建筑材料的力学性质。

极限状态计算方法是建立在材料力学性质和荷载值的静态研究基础上的。在这样的处理方法下，必要的可靠性水平可由额定的荷载值和材料的强度值保证。在极限状态法中包含着评定放弃结构的可能性的意图。这里引进所谓计算值可靠性的概念，即对于荷载，它的概率小于计算值，而对于强度，它的概率将大于计算值。当引进极限状态法时，多数初始量的统计资料还没有，因此计算值是凭经验这样给定的，即要使它不引起比用以前的方法得到的结构重量大。假定将来能收集到统计资料，那就可以成功地论证计算值的可靠性。也假定这种可靠性将非常大，荷载的计算值可以视为极大，而强度特性的计算值实际上可看作是极小。在这种情况下就可以将它们当作已确定的量引进计算中，而根据这些值设计的结构的极限状态出现的概率就可以认为小到可以忽略不计。

建筑结构基本计算原理的进一步完善，正沿着发展可靠性应用理论的途径进行。

以结构使用过程的概率描述为基础的建筑结构优化设计，在于寻求满足如下要求的结构计算参数：具有足够的可靠性，经济上合理，能保证结构在整个使用期限内的正常使用条件。这个要求，可以用花在结构施工和使用上的平均预期费用在整个使用期限内为最小的办法来达到。可以应用建筑结构概率优化的方法设计出既具有足够的可靠性程度，且在经济上又合理的结构。

对由各种材料组成的结构，在统一设计标准的计算原理方面应给予特别的注意。也必须注意，利用电子计算机使计算自动化，要求标准文件有相应的表达形式。

还应当指出，对标准的建议既应当依靠理论研究，又要依靠使用和设计房屋和结构物的各种各样的大量经验。建设的实践经验，特别是苏联工业与民用建筑的大规模建设经验，给了我们检验和修正理论结论的丰富材料。在建筑结构可靠性理论方面所得的结果同设计、施工和使用经验相结合，使我们能够在完善标准文件方面提出有根据的建议。

译自：Смирнов,А.Ф.(1981),Об основных направлениях научных исследований в области теории и методов расчета сооружений на одиннадцатую пятилетку,《Строительная механика и расчет сооружений》.

（张德富译　董务民校）