

# 结构工程中的参数化设计与优化

张学杰

中城投集团第八工程局有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i1.7561

**[摘要]** 参数化设计与优化在结构工程领域中扮演着日益重要的角色。本文探讨了参数化设计的基础, 包括其定义、特点以及在结构工程中的优势。进一步, 文章详细阐述了参数化设计在桥梁设计、高层建筑优化、复杂空间结构设计以及历史建筑修复中的应用。此外, 还介绍了结构优化技术的关键要素, 如优化目标与约束条件、常用优化算法、参数化设计与结构优化的结合, 以及优化结果的评估与验证。通过这些内容, 本文展示了参数化设计与优化如何协同工作, 以提高结构工程的设计效率、创新性和可持续性。

**[关键词]** 结构工程; 参数化设计; 优化

## Parametric Design and Optimization in Structural Engineering

Zhang Xuejie

Zhongcheng Investment Group Eighth Engineering Bureau Co., Ltd

**[Abstract]** Parametric design and optimization play an increasingly important role in the field of structural engineering. This article explores the basics of parametric design, including its definition, characteristics, and advantages in structural engineering. Furthermore, the application of parametric design in bridge design, high-rise building optimization, complex spatial structure design and historic building restoration is elaborated in this paper. In addition, the key elements of structural optimization techniques are introduced, such as optimization objectives and constraints, common optimization algorithms, the combination of parametric design and structural optimization, and the evaluation and verification of optimization results. Through these contents, this article shows how parametric design and optimization can work together to improve the design efficiency, innovation, and sustainability of structural engineering.

**[Key words]** structural engineering; parametric design; optimize

### 引言

随着参数化平台的完善和编程技术的普及, 近些年结构参数化技术快速发展, 工程设计人员从不同维度将参数化技术应用用于工程设计中, 根据应用程度由浅入深分为参数化建模、参数化计算、参数化优化, 其主要目的是提高建模和计算效率。

#### 1. 参数化设计的概念

参数化设计是一种基于算法和规则的设计方法, 它将设计中的各种元素(如几何形状、尺寸、材料特性等)用参数来表示, 并通过定义这些参数之间的关系来构建设计模型。在结构工程领域, 这意味着设计师不再是直接绘制固定的结构形式, 而是通过设定一系列参数来控制结构的生成过程。例如, 对于一个简单的梁结构, 可以将梁的长度、截面高度、宽度以及材料的弹性模量等设定为参数。这些参数之间存在着相互关联的数学关系, 例如梁的承载能力与截面尺寸和材料特性相关, 这种关系可以通过力学公式来表达。通过改变参数的值, 就可以

快速得到不同形式和性能的梁结构设计方案。这种方法使得设计过程更加灵活、高效, 并且能够方便地对设计进行修改和优化。同时, 参数化设计还具有很强的逻辑性和系统性, 它能够将设计过程中的各种约束条件(如力学性能要求、建筑空间限制等)以参数和规则的形式融入到设计模型中, 从而确保最终的设计方案既满足功能需求又符合各种规范标准。

#### 2. 参数化设计的基础

##### 2.1 参数化模型的定义与特点

参数化模型是一种基于参数驱动的设计方法, 它通过定义一系列可调整的参数来控制模型的几何形状和结构行为。这些参数可以是尺寸、形状、材料属性或结构响应等, 它们之间的关系通过数学公式或逻辑规则来表达。参数化模型的特点在于其灵活性和可变性, 设计者可以通过调整参数值来快速生成多种设计方案, 而无需重新构建整个模型。此外, 参数化模型还支持复杂几何形状的生成和非线性结构行为的模拟, 为结构工

程师提供了强大的设计工具。

## 2.2 参数化设计在结构工程中的优势

参数化设计在结构工程中展现出显著的优势。首先，它极大地提高了设计效率，通过参数的调整和模型的自动更新，设计者可以迅速探索多种设计可能性，加快了设计迭代过程。其次，参数化设计增强了设计的精确性和一致性，减少了人为错误，确保了设计结果的可靠性。再者，参数化设计支持复杂结构的设计和分析，能够处理传统设计方法难以解决的问题，如自由曲面结构、大跨度桥梁等。最后，参数化设计促进了设计与分析的集成，使得在设计初期就可以进行结构性能的评估和优化，从而提高了结构的整体性能和安全性。

## 3. 参数化设计在结构工程中的应用

### 3.1 桥梁设计中的参数化模型

在桥梁设计领域，参数化模型被广泛应用于创建复杂的几何形状和结构系统。通过定义桥梁的跨度、截面形状、材料属性等参数，设计者可以生成多种桥梁设计方案，并进行快速的结构分析和优化。参数化模型使得桥梁设计师能够探索更多的创新设计，如斜拉桥、悬索桥等，这些设计往往具有独特的形态和高效的性能。此外，参数化设计还支持桥梁在不同荷载条件下的行为模拟，有助于确保桥梁的安全性和耐久性。通过参数化模型，桥梁设计可以更加灵活地适应地形、环境和技术要求，实现美学与功能的完美结合。

### 3.2 高层建筑的结构优化

高层建筑的结构优化是参数化设计的一个重要应用领域。众多设计经验表明，对于超高层或体型复杂的项目，方案设计阶段和初步设计阶段中结构体系的比选，对于提高结构整体性能和节省建造成本至关重要。由于超高层或体型复杂项目的设计特点，中前期的方案研究对于土建成本的优化往往产生重大影响。通过参数化模型，设计者可以调整建筑的高度、楼层布局、支撑系统等关键参数，以实现结构效率和成本效益的最大化。参数化设计使得高层建筑的结构系统能够在满足强度、刚度和稳定性要求的同时，优化其重量和材料使用。

### 3.3 复杂空间结构的参数化设计

复杂空间结构，如体育馆、展览中心和机场航站楼等，往往具有不规则的几何形状和复杂的结构系统。参数化设计为这些结构的设计提供了强大的工具，通过定义空间网格、曲面形态、节点连接等参数，设计者可以生成多样化的空间结构方案。参数化模型支持复杂曲面的生成和分析，使得设计师能够创造出具有高度美学价值和结构创新的空间结构。此外，参数化设计还能够优化结构的力学性能，如提高结构的刚度、减少应力集中等，从而确保结构的安全性和功能性。

### 3.4 历史建筑修复与保护中的应用

在历史建筑的修复与保护工作中，参数化设计提供了一种精确和可控的方法来恢复和维护建筑的原貌。通过参数化模型，设计者可以精确地捕捉历史建筑的几何细节和结构特征，

如立面装饰、屋顶形态、结构构件等。参数化设计支持对历史建筑的数字化建模和分析，有助于评估修复工作的可行性和效果。此外，参数化设计还能够考虑到修复材料的兼容性和施工技术的限制，确保修复工作既尊重历史价值，又满足现代功能需求。

## 4. 结构工程中的设计变量与约束条件

### 4.1 设计变量的确定

#### 4.1.1 结构几何形状参数

在结构工程中，几何形状参数是重要的设计变量。对于梁结构而言，梁的长度、截面的高度和宽度是关键几何形状参数。梁的长度直接影响结构的跨度以及整体布局，而截面高度和宽度则对梁的承载能力和抗弯刚度有着显著影响。例如，在建筑框架结构中，增加梁的截面高度可以有效提高梁的抗弯能力，从而满足更大的荷载要求。对于柱结构，其截面形状（如圆形、方形、矩形等）、柱的高度以及截面尺寸（边长或直径）是重要的设计变量。不同的截面形状在承受轴向力和弯矩时表现出不同的力学性能，而柱的高度则与结构的整体层数和空间高度相关。

#### 4.1.2 材料性能参数

材料性能参数也是不可或缺的设计变量。材料的强度是一个关键因素，包括材料的屈服强度和极限强度。在混凝土结构中，混凝土的抗压强度等级决定了柱、梁等构件能够承受的最大压力。例如，使用高强度等级的混凝土可以减小构件的截面尺寸，从而减轻结构自重并节省空间。材料的弹性模量同样重要，它反映了材料在受力时的弹性变形特性。钢材的弹性模量较大，使得钢材在承受荷载时的变形相对较小，适用于对变形要求严格的结构，如桥梁的主梁。对于复合材料，其弹性模量在不同方向上可能存在差异，这种各向异性的特性也需要作为设计变量加以考虑。

#### 4.1.3 荷载参数

荷载参数是结构设计变量中的重要组成部分。恒载是结构自身重量以及固定设备重量等长期作用的荷载，它与结构的材料密度、构件尺寸等密切相关。例如，在高层建筑中，墙体、楼板等结构构件的自重形成了较大的恒载，不同的建筑材料和构件尺寸会导致恒载的差异。活载则是在结构使用过程中可能出现的可变荷载，如人员活动、家具摆放、车辆行驶等产生的荷载。对于不同类型的建筑物，活载取值有不同的标准。例如，住宅建筑的活载取值相对较小，而商业建筑、工业厂房等由于人员密集或设备较重，活载取值较大。

### 4.2 约束条件的分类

#### 4.2.1 力学性能约束

力学性能约束是确保结构安全可靠的基本要求。强度约束要求结构构件在各种荷载组合作用下，其内部应力不得超过材料的强度极限。例如，在梁的设计中，根据弯矩和剪力的计算结果，梁的截面应力应满足混凝土和钢筋的强度要求，否则梁

将发生破坏。刚度约束规定了结构在荷载作用下的变形不能超过一定的限值。对于一些对变形敏感的结构,如精密仪器厂房、桥梁等,过大的变形会影响结构的正常使用。例如,桥梁的主梁在车辆荷载作用下的挠度不能过大,否则会影响行车的舒适性和安全性。稳定性约束也是力学性能约束的重要方面。对于细长柱、薄壁结构等,稳定性问题尤为突出。例如,在钢结构的压杆设计中,需要考虑压杆的长细比,以确保压杆在轴向压力作用下不会发生失稳破坏。

#### 4.2.2 功能约束

功能约束与结构的使用功能密切相关。空间使用要求是一种常见的功能约束。在建筑设计中,建筑物内部的房间布局、空间高度等需要满足使用者的需求。例如,在住宅设计中,客厅、卧室等房间需要有合适的空间尺寸,这就对结构构件的布置和尺寸提出了限制。建筑外观要求也是功能约束的一部分。一些标志性建筑往往需要独特的建筑外观,这可能会对结构的形式和构件的形状产生约束。例如,一些造型奇特的博物馆或艺术中心,其弯曲的外立面或不规则的形状需要结构工程师在保证结构安全的前提下,采用特殊的结构形式来实现建筑外观的要求。

#### 4.2.3 规范与标准约束

规范与标准约束是结构工程设计必须遵循的准则。结构设计规范规定了各类结构在不同荷载组合下的设计方法、安全系数的取值等。例如,我国的《混凝土结构设计规范》详细规定了混凝土构件的设计计算方法、配筋要求等,结构工程师在设计混凝土结构时必须严格按照规范执行。

### 5. 结构优化技术

#### 5.1 优化目标与约束条件

结构优化技术的第一步是明确优化目标和约束条件。优化目标通常涉及最小化结构重量、成本、能耗或最大化结构刚度、承载能力等。这些目标可能相互冲突,因此需要权衡和选择。约束条件则包括结构的强度、稳定性、位移限制、频率要求等,它们确保优化设计在实际应用中的可行性和安全性。在参数化设计中,这些目标和约束条件可以通过参数的形式直接融入模型,使得优化过程更加直观和高效。通过定义清晰的优化目标和约束条件,结构优化技术能够指导设计向着更优化的方向发展,实现结构性能和经济效益的双重提升。

#### 5.2 常用的结构优化算法

结构优化算法是实现优化目标的关键工具。常用的算法包括遗传算法、粒子群优化、模拟退火、拓扑优化等。遗传算法通过模拟自然选择和遗传机制来搜索最优解,适用于复杂的非线性问题。粒子群优化则模拟鸟群觅食行为,通过群体智能来寻找最优解。模拟退火算法受到物理退火过程的启发,通过概率性的搜索策略来避免陷入局部最优。拓扑优化则通过材料分布的优化来实现结构形态的最优设计。这些算法各有特点,适

用于不同类型的结构优化问题。在参数化设计中,这些优化算法可以与参数化模型无缝结合,实现自动化的设计优化过程。

#### 5.3 参数化设计与结构优化的结合

参数化设计与结构优化的结合是现代结构工程设计的重要趋势。参数化模型为结构优化提供了灵活的设计空间和高效的分析平台。通过参数化设计,结构工程师可以在设计初期就引入优化算法,实现设计与优化的同步进行。这种结合不仅提高了设计的创新性和效率,还确保了结构在满足功能和美学要求的同时,达到最佳的性能和经济指标。参数化设计与结构优化的结合还促进了跨学科的合作,如与材料科学、计算机科学等领域的融合,为结构工程带来了新的发展机遇。

#### 5.4 优化结果的评估与验证

优化结果的评估与验证是确保优化设计可靠性和实用性的关键步骤。评估过程涉及对优化结果的结构性能、经济效益、施工可行性等方面进行综合分析。验证则通过物理实验、数值模拟等手段来检验优化设计的实际效果。在参数化设计中,优化结果的评估与验证可以通过模型的参数调整和分析工具的迭代使用来实现。通过这一过程,结构工程师可以确保优化设计不仅在理论上是最优的,而且在实际应用中也是可行的和有效的。优化结果的评估与验证是结构优化技术闭环的重要组成部分,为结构工程的可持续发展提供了坚实的基础。

### 结束语

综上所述,参数化设计与优化在结构工程中的应用展示了其在提高设计效率、创新性和可持续性方面的巨大潜力。通过灵活的参数化模型和先进的优化算法,结构工程师能够探索更广泛的设计空间,实现结构性能和经济效益的最优化。

### [参考文献]

- [1] 黄会圣. 结构工程中的参数化设计与优化[J]. 居业, 2024, (04): 114-116.
- [2] 彭少棠, 沈杰, 梁勇, 等. 异形钢结构屋面参数化设计方法研究[J]. 广州建筑, 2024, 52(01): 9-12.
- [3] 陈思, 钟炜. BIM在大型钢结构工程中的智能建造应用研究[C]//中国图学学会土木工程图学分会,《土木建筑工程信息技术》编辑部.《第十届BIM技术国际交流会——BIM赋能建筑业高质量发展》论文集.天津理工大学管理学院; , 2023: 5.
- [4] 张贝. 高速滑坡碎屑流冲击机制及拦挡结构设计研究[D]. 同济大学, 2022. DOI: 10.27372/d.cnki.gtjsu.2022.000227.
- [5] 张紫千. 方钢管-T形钢组合截面柱受压稳定性及设计方法研究[D]. 清华大学, 2022. DOI: 10.27266/d.cnki.gqhau.2022.000041.
- [6] 王益鹤. 2DOF双足模型参数分析及其在人与结构相互作用中应用研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- [7] 滕飞. 基于点云数据的结构BIM模型研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2016.