

# 城市地下综合管廊结构设计优化方法探讨

文 / 高 瑜 西安市政设计研究院有限公司；西安科源市政工程咨询有限公司

李亮亮 西安市政设计研究院有限公司

**摘要：**随着城市化进程的加快，地下综合管廊作为重要基础设施，设计优化成为提升其安全性、经济性和可持续性的关键。通过分析不同优化策略，结合地质条件、材料选择和功能需求，优化设计方案能够有效提高管廊的稳定性和耐久性，降低成本，并满足未来城市发展的需求，推动城市基础设施的高效与可持续运行。

**关键词：**城市；地下综合管廊；结构设计；优化方法

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.088

## 引言

随着城市化进程的不断推进，地下综合管廊作为解决城市基础设施集中布置的重要手段，逐渐受到重视。然而，管廊结构的设计面临多种挑战，尤其是在如何在保证安全、功能与经济性的前提下，优化设计方案，提升整体效能。合理的设计优化不仅能有效节约资源，还能提升管廊的耐久性和安全性。

### 一、城市地下综合管廊结构设计综述

#### （一）结构形式

城市地下综合管廊的结构设计，是现代城市基础设施建设中的重要组成部分，涉及多个方面的考量。在结构形式上，主要有明挖现浇混凝土结构、预制装配式结构和盾构法施工结构等三种常见形式。明挖现浇混凝土结构因其施工工艺成熟、结构稳定性强，广泛应用于地下空间开发中，尤其适合于浅埋和小范围的地下管廊<sup>[1]</sup>。预制装配式结构则具有施工周期短、施工效率高的优点，逐渐被应用于需要快速建设的区域。盾构法施工结构以其适应深埋和复杂地质条件的特点，成了城市复杂地下环境中管廊建设的首选。

#### （二）设计标准和规范

在设计标准与规范方面，国内外有着严格的要求。以《城市地下综合管廊设计规范》(GB 50838-2015)为例，对结构设计的强度、刚度、稳定性等方面提出了明确规定。结构强度要求能够承受常规荷载及突发灾害条件下的额外荷载，刚度则需满足在使用期间不产生过大变形以保证结构安全和稳定。此外，国际上如欧洲规范 EN 1992-1-1，也提出了类似的设计要求，强调了对混凝土结构耐久性和抗震性能的考虑，确保在不同环境和使用条件下的长期稳定性。设计中对材料的选用、构造的细节，以及施工工艺的要求，都有助于提高管廊结构的整体性能，减少日后维护成本。

### 二、影响城市地下综合管廊结构设计的因素

城市地下综合管廊结构设计受到多种因素的影响，其中地质条件、荷载取值、耐久性要求和施工工艺是关键因素。

#### （一）地质条件

地质条件是影响管廊设计的首要因素。软土地层和

岩石地层对结构的影响不同，软土地层的地基承载能力较低，需采取加固措施，如加深桩基或使用复合地基技术。在岩石地层中，地震荷载和土体侧压力较大，设计时应充分考虑岩土条件的变化<sup>[2]</sup>。例如，上海的地下管廊项目就采用了在软土层区域使用深基坑支护技术，有效防止了沉降和地基失稳的风险。

#### （二）荷载取值

荷载取值方面，地下综合管廊需承受静荷载和动荷载。静荷载主要包括管廊自重和内部设施重量，动荷载则涉及车辆荷载和地震荷载。根据《城市地下综合管廊设计规范》，荷载的计算原则是依据地质、环境、设施特性等综合因素确定。不同荷载组合对管廊结构内力与变形的影响需要通过计算分析，保证管廊在各种条件下的安全性。

#### （三）耐久性要求

地下环境中的地下水腐蚀、土壤化学侵蚀等因素，对结构材料的耐久性构成了严重威胁。地下水中的有害物质如硫酸盐、氯离子等，能与混凝土中的成分发生反应，导致材料的劣化。此外，土壤的酸性或碱性成分亦可能加速结构的腐蚀过程。因此，在结构设计中，必须采取有效的防护措施，如提高混凝土的抗渗等级、使用防腐涂层、加强材料的选择等，以提升结构的耐久性，延长其使用寿命。

#### （四）施工工艺影响

施工工艺对结构设计的影响至关重要。不同的施工方法，如明挖法、盾构法、顶管法等，要求结构设计根据施工方式的特点进行相应调整。明挖法需要考虑地面开挖面积和支护结构的稳定性；盾构法则要求设计能够承受盾构机的压力并确保顺利推进；而顶管法则对管道的承载能力和连接方式提出了高要求。例如，北京的地下管廊项目采用盾构法施工，在复杂的地质条件下，设计团队通过精细化的结构调整，确保了结构的稳定性和施工过程的顺利进行，保障了项目的顺利完成。

### 三、现阶段，城市地下综合管廊结构设计中的问题

现阶段，城市地下综合管廊结构设计中存在若干亟待解决的问题，其中空间利用不合理、结构安全性冗余与不足、经济合理性欠缺是影响管廊设计优化的关键因素。

**(一) 空间利用不合理**

随着城市化进程的推进,管廊承载的功能日益增加,然而,部分管廊内部空间布局仍存在容纳各类管线时的空间浪费或拥挤现象。例如,在一些管廊设计中,预留的管道通道过于宽敞或过于狭窄,导致管道布置不紧凑,空间使用率低下。空间浪费不仅增加了建设成本,还可能影响后期维护的效率。为了提高空间利用率,设计中可以通过优化管廊内部结构布局,合理规划管线通道尺寸,增加模块化设计,减少多余空间的占用。此外,使用可调整的管道支架和走线系统,也能有效提升管廊的空间适应性和灵活性,避免局部区域过度拥挤<sup>[3]</sup>。

**(二) 结构安全性冗余与不足**

在一些管廊设计中,为了追求过高的安全系数,设计人员往往在结构尺寸、配筋等方面过度保守,导致结构的资源浪费。例如,在地质条件较为稳定的区域,一些管廊项目采用了过厚的混凝土墙体和过多的钢筋配置,造成不必要的材料浪费。另一方面,部分设计因安全性考虑不足,存在局部区域的承载力不足或结构抗震性较差的问题。通过案例分析可以发现,部分城市管廊因设计时未充分考虑周边环境的动态变化,导致了管廊结构在突发荷载下发生局部裂缝或变形。理论计算与工程实例表明,优化设计参数,合理设置结构安全系数,可以在不降低结构安全性的前提下,减少资源浪费并提升设计经济性。

**(三) 经济合理性欠缺**

经济合理性欠缺问题主要体现在管廊建设成本的过高上。管廊结构设计中的材料选用、结构形式和施工工艺直接影响项目的造价。例如,部分管廊项目为了提升耐久性 or 适应特殊地质条件,过分看重所选施工材料的

质量,而尽管这些材料在一定条件下能提高结构的长期稳定性和抗腐蚀性,但过度使用也会使项目成本大幅上升。此外,复杂的结构形式,如多重支撑系统或过于复杂的管道布置方式,亦可能导致建造成本和维护成本的增加。为了解决这一问题,管廊结构设计应在保证安全性和功能性的前提下,合理选择经济材料,简化结构形式。例如,采用预制装配式结构和钢筋混凝土组合结构,不仅能降低成本,还能缩短施工周期,并有效提高施工精度。

| 设计方案    | 结构材料        | 施工工艺 | 总造价(万元) |
|---------|-------------|------|---------|
| 传统设计方案  | 高强钢筋、自防水混凝土 | 明挖法  | 1500    |
| 优化设计方案  | 常规钢筋、抗渗混凝土  | 盾构法  | 1200    |
| 预制装配式设计 | 轻质钢材、预应力混凝土 | 盾构法  | 1100    |

通过表格数据可见,优化设计方案有效降低了成本,同时保证了结构的性能与安全性。因此,设计人员需在管廊设计中充分考虑这些因素,通过合理优化,达到成本与性能的最佳平衡。

**四、城市地下综合管廊结构设计优化方法**

**(一) 基于拓扑优化理论的结构选型优化**

拓扑优化理论作为结构优化的一种重要方法,其基本原理是通过改变结构的材料分布和拓扑形状,优化结构性能。在管廊设计中,拓扑优化可用于分析不同结构形式对管廊整体力学性能的影响。通过建立数学模型,考虑材料强度、刚度和稳定性等因素,优化出最佳结构布局。例如,在某些城市地下管廊项目中,采用拓扑优化方法对结构进行了模拟,发现通过优化设计,管廊的抗弯能力和抗剪能力得到了显著提升,减少了材料的使用量并提高了经济性。

| 优化因素   | 优化前               | 优化后               | 效果                    |
|--------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 抗弯能力   | 较低的抗弯能力,容易发生弯曲失效。 | 通过优化,增强了管廊的抗弯能力。  | 显著提高了管廊的抗弯性能,增强结构稳定性。 |
| 抗剪能力   | 抗剪能力不足,可能出现剪切破坏。  | 优化后增强了抗剪能力。       | 提升了结构的抗剪性能,减少了剪切破坏风险。 |
| 材料使用   | 设计未经过优化,材料使用量较大。  | 通过拓扑优化,减少了材料的使用。  | 降低了建设成本,提升了经济性。       |
| 刚度和稳定性 | 刚度和稳定性较差,易出现变形。   | 通过优化,刚度和稳定性得到了改善。 | 提高了管廊的稳定性和刚度,减少了变形风险。 |
| 经济性    | 高材料消耗,成本较高。       | 优化设计后,减少材料消耗。     | 显著降低了材料成本,提高了经济性。     |

**(二) 结构尺寸与配筋优化**

结构尺寸与配筋优化主要依赖于有限元分析等数值模拟手段,通过精确计算结构内力和变形,合理确定结构尺寸和配筋量。通过对具体工程项目的分析,结合施工中遇到的实际情况,可以制定出最合适的设计方案。以某地下管廊为例,在通过有限元分析进行优化设计后,

管廊钢筋配置量减少了15%,有效降低了建造成本,同时结构的安全性得到了进一步保证。这一优化设计不仅提升了结构的整体性能,也带来了显著的经济效益<sup>[4]</sup>。

**(三) 新材料与新技术应用优化**

新材料与新技术的应用为管廊设计提供了新的思路。高性能混凝土和纤维增强复合材料具有优异的耐腐蚀性

和抗压强度，非常适合用于地下综合管廊结构中。这些材料能够提高结构的耐久性，减少维修成本。与此同时，BIM（建筑信息建模）技术和智能化监测系统的应用，能够在设计阶段实现精准建模，优化施工方案，并通过实时监控反馈调整设计，确保结构的最佳运行状态。例如，上海某地下管廊项目采用BIM技术辅助设计，通过提前模拟施工过程，有效规避了施工中的潜在问题，缩短了工期，并在后期运营中通过监测系统优化了维护管理。

#### （四）考虑全寿命周期成本的优化设计

全寿命周期成本优化设计则考虑了建设、运营维护

和拆除等各个阶段的成本。通过建立全寿命周期成本分析模型，设计人员能够综合评估不同设计方案的经济性，从而选出最具性价比的设计方案。在具体应用中，某城市管廊项目通过全寿命周期成本分析，发现采用预制装配式结构的管廊在建设成本较高的情况下，由于后期维护成本较低，整体的生命周期成本更为经济。此类优化设计不仅提高了项目的可持续性，也为长期运营提供了保障。

图表2展示了不同管廊设计方案的全寿命周期成本比较，帮助设计人员直观了解不同方案的经济效益。

| 方案      | 建设成本<br>(万元) | 运营维护成本<br>(万元/年) | 拆除成本<br>(万元) | 总生命周期成本<br>(万元) |
|---------|--------------|------------------|--------------|-----------------|
| 传统设计方案  | 1000         | 50               | 100          | 1300            |
| 优化设计方案  | 1200         | 30               | 50           | 1400            |
| 预制装配式设计 | 1300         | 20               | 30           | 1350            |

从表格数据可以看出，预制装配式设计方案在初期建设成本较高，但由于运营维护成本低，最终的全寿命周期成本低于传统设计方案。该分析方法为项目的经济性优化提供了科学依据。

### 五、城市地下综合管廊结构设计优化可能遭遇的挑战和应对策略

在城市地下综合管廊结构设计优化过程中，可能会面临包括技术难题、成本控制、环境适应性等多个方面的挑战。对此，采取有效的应对策略至关重要。

#### （一）技术难题与设计复杂性

地下综合管廊的设计涉及多学科的综合应用，结构设计优化需要兼顾力学、材料、环境等多个因素。尤其在复杂地质条件下，优化设计的难度较大。例如，软土地层和岩石地层的过渡区域往往需要采取特殊的设计措施，而过度优化可能导致结构安全性不足。为了应对这一挑战，设计人员应依托先进的数值模拟技术，如有限元分析和拓扑优化，来精确计算结构内力、变形等数据，从而确保结构的安全性与经济性。例如，北京的某地下管廊项目，在软土区域采用了复合地基技术，并通过拓扑优化有效提升了结构的抗压能力，避免了由于设计不合理导致的安全隐患。

#### （二）成本控制与经济性挑战

管廊设计的优化往往涉及材料选择、施工工艺及结构形式等多个方面，这些因素直接影响到工程的总造价。在某些情况下，过度优化可能导致结构材料不必要的浪费或施工工艺的复杂化，进而增加项目成本。例如，一些采用高强钢筋和抗渗混凝土的设计，虽然提高了结构的耐久性，但也显著提高了建设成本。为了降低成本，设计团队可以采用合理的材料替代方案，如使用纤维增强复合材料代替传统钢筋混凝土，或通过预制装配式结构减少现场施工复杂性，这些措施有助于在不牺牲结构性能的前提下，降低项目整体成本<sup>[5]</sup>。

#### （三）环境适应性问题

地下管廊的设计必须考虑到不同地下环境条件的影响，如地下水、土壤腐蚀等因素对结构耐久性的影响。环境的变化会导致材料老化、腐蚀等问题，进而影响结构的长期稳定性和安全性。在应对这一挑战时，设计人员应综合考虑地下环境的特点，选择合适的耐腐蚀材料并加强防水防渗设计。例如，上海某地下管廊项目中，通过使用高性能混凝土和外部防腐涂层，有效提高了管廊结构的耐久性，减少了因腐蚀引发的维修需求。

#### 结语

综上所述，城市地下综合管廊的结构设计优化，不仅关乎城市基础设施的高效运行，还涉及资源节约、环境保护与可持续发展的多重目标。通过合理的设计调整与创新，能够有效提升管廊的功能性与安全性，降低建设和运营成本。此外，随着城市功能需求的不断变化，优化设计方案将为管廊系统的长期稳定与适应性提供坚实保障，为未来城市的发展奠定坚实基础。

#### 参考文献

- [1] 王建, 冯建明. 城市综合管廊设计优化思路探讨[J] 特种结构. 2023(01): 94-98.
- [2] 肖云. 城市地下综合管廊断面设计及优化研究[J] 城镇建设. 2020(01): 22-23.
- [3] 李远, 马娟. 综合管廊结构设计优化常见问题解析[J] 工程建设与设计. 2020(07): 107-109.
- [4] 唐兰. 新时期城市地下综合管廊建设规划编制技术优化研究——基于《城市地下综合管廊建设规划技术导则》修订的思考[J] 城乡建设. 2023(14): 72-77.
- [5] 刘英平. 城市地下综合管廊横断面设计及其优化研究[J] 智能城市. 2020(02): 62-63.