

## 双层衬砌输水盾构隧道鲁棒性设计方法

华雨杉<sup>1,2</sup>, 黄宏伟<sup>1,2</sup>, 陈坤<sup>1,2</sup>, 张冬梅<sup>1,2</sup>, 张东明<sup>1,2†</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 双层衬砌输水盾构隧道设计需要考虑其施工过程及受力特性, 同时地层的不确定性也影响结构的安全性能. 为此结合双层衬砌输水隧道的受力特点, 基于极限状态设计原则, 采用两阶段法分别计算外衬单独承担外压及内外衬共同承担内外压两种受力状态, 对截面受力、收敛变形及最大裂缝宽度均加以安全性约束, 建立了双层衬砌输水盾构隧道横断面鲁棒性设计方法及流程, 并结合实际工程案例进行了结构设计参数的优化. 研究表明: 鲁棒性设计方法综合考虑隧道建设成本及结构对外部参数变异的敏感性, 引入约束多目标优化算法可以获取完整三维 Pareto 前沿面. 采用赋权重的方法统一两种极限状态下的鲁棒性指标, 可以实现成本-鲁棒性的二维优化. 通过将隧道分段并提取典型断面优化的方式可有效解决纵向不同区段参数变异性较大的问题, 保证掘进中的参数统一及隧道安全.

**关键词:** 盾构隧道; 双层衬砌; 约束条件; 多目标优化; 鲁棒性

**中图分类号:** U452.2

**文献标志码:** A

## Robust Design Method of Water Conveyance Shield Tunnel with Double Lining

HUA Yushan<sup>1,2</sup>, HUANG Hongwei<sup>1,2</sup>, CHEN Kun<sup>1,2</sup>, ZHANG Dongmei<sup>1,2</sup>, ZHANG Dongming<sup>1,2†</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The construction process and mechanical characteristics of a double-lining water shield tunnel should be considered in the design, and the uncertainty of the stratum also affects the safety performance of the structure. Therefore, combined with the stress characteristics of double lining water conveyance tunnel, based on the limit state design principle, the two-stage method is adopted to calculate the two force states, which include the outer lining bearing the external pressure alone and the inner and outer lining bearing the internal and external pressure together. The section force, convergence deformation and the maximum crack width are all constrained in safety. The cross-section robust design method and the process of double lining water conveyance shield tunnel are established, and the structural design parameters are optimized combined with the actual engineering case. The results show that the robust design process takes into account the sensitivity of the structure to the variation of stratum and the cost of

\* 收稿日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52130805, 52022070), National Natural Science Foundation of China(52130805, 2022070); 上海市科学技术委员会创新项目(20dz1202200), Shanghai Science and Technology Committee Program(20dz1202200)

作者简介: 华雨杉(1998—), 女, 安徽灵璧人, 同济大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: 09zhang@tongji.edu.cn

materials, and introduces the constrained multi-objective optimization algorithm to obtain the complete three-dimensional Pareto front surface. The two-dimension optimization of cost-robustness was realized by unifying the robustness indexes under the two limit states by the weighting method. By dividing the tunnel into sections and extracting typical sections, the problem of parameter variation in different longitudinal sections can be effectively solved to ensure the unification of parameters in tunneling and tunnel safety.

**Key words:** shield tunnel; double lining; constraint; multi-objective optimization; robustness

近些年盾构隧道逐渐被应用于水资源输送中,从技术角度看,输水隧道由于承担内部水体荷载的不同,在结构受力变形等方面都有所不同.针对双层衬砌输水盾构隧道的横断面设计方法,目前应用较多的仍是确定性设计方法<sup>[1]</sup>,难以有效考虑岩土参数不确定性对结构安全性能的影响.鲁棒性设计的概念由 Taguchi<sup>[2]</sup>针对质量控制系统提出,主要解决的问题是通过调整机器的设计参数使生产出来的产品质量更加稳定,此后在包括岩土工程在内的多个领域得到推广和发展.岩土工程鲁棒性设计方法(Robust Geotechnical Design)最早由 Juang<sup>等</sup><sup>[3]</sup>提出,并基于可靠度理论分别对浅基础和砂土地层中的钻孔灌注桩进行了鲁棒性设计,提出了完整的鲁棒性设计流程.黄宏伟<sup>等</sup><sup>[4]</sup>采用基于多目标优化的鲁棒性设计和基于结构失效概率置信水平两种方法对重力式挡土墙进行了鲁棒性设计.Gong<sup>等</sup><sup>[5-6]</sup>采用模糊集理论模拟地层参数的变异性,针对盾构隧道横断面进行了鲁棒性设计,同时提出了采用SNR表征结构鲁棒性的新的评价方法.Juang<sup>等</sup><sup>[7]</sup>采用基于墙体变形的系统响应标准差表征设计鲁棒性,对基坑结构进行鲁棒性设计.Gong<sup>等</sup><sup>[8]</sup>通过一维随机场模拟纵向地层变异性,针对盾构隧道纵向设计提出了改进鲁棒性设计方法.目前,针对特定对象的鲁棒性设计不断被提出,Zhang<sup>等</sup><sup>[9]</sup>针对盾构隧道的钢板加固进行了优化设计,通过对鲁棒性及成本的优化实现了最优钢板厚度及宽度的获取.王瑞川<sup>[10]</sup>针对大直径盾构隧道的横断面进行了鲁棒性设计,实现了截面厚度、接头螺栓直径等参数的优化.

本文依托珠江三角洲水资源配置工程南沙支线段隧道,结合双层衬砌输水盾构隧道修建过程,提出一套针对双层衬砌输水盾构隧道的鲁棒性设计流程,通过引入约束多目标算法<sup>[11]</sup>进行优化求解,获得完整的 Pareto 前沿,实现了满足结构安全性要求下,对隧道建设成本及结构鲁棒性的权衡.

## 1 双层衬砌输水盾构隧道鲁棒性设计

### 1.1 盾构隧道设计方法

盾构隧道确定性设计方法<sup>[12]</sup>多是基于惯用法及修正惯用法、多铰圆环法、梁弹簧法和精细化有限元模型<sup>[13-14]</sup>,根据工程经验确定大致的设计参数取值,通过考虑荷载、材料等参数的离散性和不确定性确定容许应力或安全系数,采用容许应力法或极限状态设计方法进行结构安全性的校核,较少考虑地层变异性对结构力学性能的影响.

为了在设计中能充分考虑地层参数的变异性,基于失效概率的可靠度设计方法被逐渐提出并发展.该方法不采用确定的地层参数,而是采用概率模型表征地层参数不确定性,但地层参数的具体分布形式、均值和方差取值都有很大变异性,难以选择合理的概率模型.

鲁棒性设计方法不仅考虑地层参数的变异性,而且考虑参数估计的准确性问题.结构的设计鲁棒性作为一种对不可控参数敏感性的定量指标,用来衡量不同设计参数间的相对大小.对于结构的鲁棒性,则可做出如下定义:如图1所示,当外部参数的变异性如图中横坐标所示变化时,若结构的响应能具有像实线曲线(系统1)一样的变异性,则相较于虚线曲线(系统2)而言,其变化波动相对较小,即其稳定及抵抗外部变异性的能力较强,也就是鲁棒性能越高.在结构的设计中难以将其像安全系数、结构失效概率一样采用限值约束,因此,在鲁棒性设计方法中,单一寻求鲁棒性能的最优解将较难控制结构的建设成本.若将成本也作为设计优化的目标,从传统的单目标优化问题变成多目标优化问题,则可兼顾设计的经济性和鲁棒性.对于此类问题一般没有确定的最优解,即成本和鲁棒性均最优的设计参数,而是存在最优解集,可根据不同要求选择更为偏好的

设计参数.与确定性设计方法和可靠度设计方法相比,鲁棒性设计方法可以更好地反映岩土工程抵抗外部设计参数变异性的能力,同时能够有效量化设计成本,提出设计成本同鲁棒性指标之间的权衡关系,为设计者提供参考.

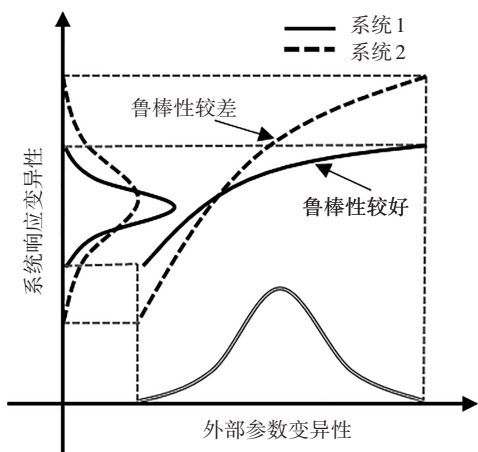


图1 鲁棒性示意图  
Fig.1 Schematic diagram of robustness

### 1.2 鲁棒性设计流程

在鲁棒性设计方法中,要考虑不可控参数的变异性,并依据一定的数学概率模型方法,使可控参数的设计中体现出对不可控参数的抵抗能力,由此,依据工程背景制定一套适用于双层衬砌输水盾构隧道的鲁棒性设计方法,计算流程(图2)如下:

①确定可控设计参数及其取值范围.从盾构隧道力学性能出发,盾构隧道外衬砌的管片拼装结构、内外衬砌连接及内衬砌的刚度强度等共同决定了盾构隧道整体的力学性能.管片衬砌结构运营期容易出现各种病害,而管片的力学性能取决于管片厚度、混凝土级别、配筋率等<sup>[15]</sup>,其中管片尺寸(主要是管片厚度)和配筋率仍有较大的优化空间,同时接头螺栓直径对接头处的刚度及结构整体性产生很大影响.因此将内外衬砌厚度( $h_{in}, h_{out}$ )、内外衬砌配筋率( $\rho_{in}, \rho_{out}$ )及横向接头螺栓直径( $D_b$ )作为待优化的设计参数.

②根据地质勘探报告获取地层参数,并确定其概率分布模型.地层的弹性模量 $E_{soil}$ 、地面超载 $q_0$ 及地下水位 $h_w$ 作为地层的不确定参数,其中,弹性模量考虑为随机场,采用K-L展开方法<sup>[16]</sup>进行随机场的离散,而地面超载及地下水位均视为随机变量,采用蒙特卡洛模拟求解隧道力学响应.

③求解结构力学性能.对于每一个确定的设计参数组合,均通过梁弹簧模型求解结构的内力、变形

等力学性能指标,求解过程采用蒙特卡洛模拟达到收敛.

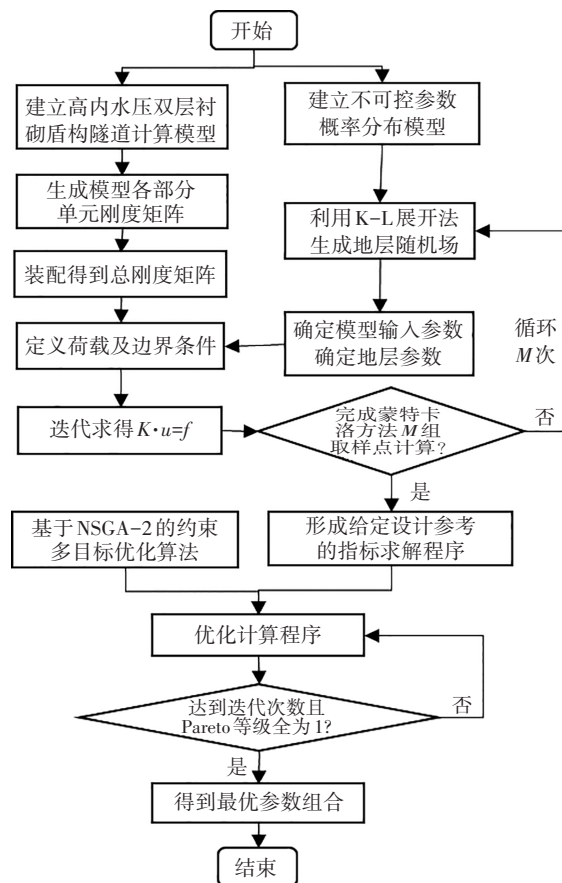


图2 双层衬砌输水盾构隧道鲁棒性设计流程图  
Fig.2 Flow chart of robust design of water conveyance shield tunnel with double lining

④判断结构安全性.基于极限状态设计原则,针对正常使用极限状态及承载力极限状态分别得到其极限承载力,结合实际计算结果得到相应的安全系数.

⑤求解鲁棒性指标及材料成本.鲁棒性指标选用安全系数的COV,材料成本为与所要优化参数相关的所有材料成本,包括内外衬砌管片混凝土、内外管片配筋及横向接头螺栓所需材料费用.

⑥以鲁棒性指标及成本指标为优化目标,结构安全性为约束条件,采用约束多目标优化算法进行优化计算,迭代收敛后得到多目标优化的最优解集,即Pareto前沿.

⑦根据所得Pareto前沿进行决策分析,通过在Pareto前沿上寻找Knee Point获得最优设计参数组合或根据设计偏好选择理想设计参数.

### 1.3 双层衬砌梁弹簧模型

梁弹簧模型本质上为有限元的计算方法,因此

其核心内容在于总刚度矩阵  $K$  及荷载列向量  $f$  的获取,其中荷载列向量包含了结构自重及所有受到的水平及竖向荷载.衬砌单元采用两节点梁单元进行模拟,土体对隧道的抗力作用采用径向和切向的弹簧模拟,对于接头处的不连续性引入三个方向的弹簧单元模拟,接头位置处相邻管片的节点为独立节点,如图3所示,弹簧的刚度系数采用文献建议的取值<sup>[17]</sup>.

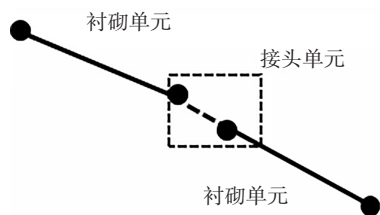
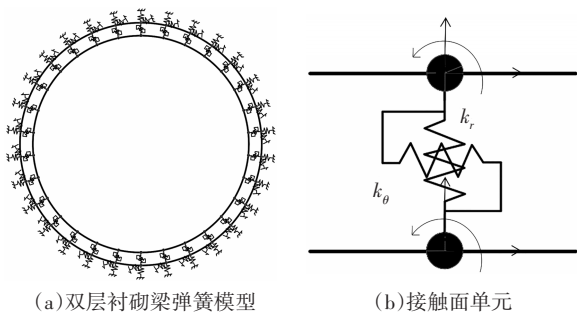


图3 接头单元  
Fig.3 Joint element

双层衬砌结构相较于一般单层衬砌盾构隧道结构形式发生变化,增加了内衬砌承力结构及内部水体.由于内部水体自重相较于内水压力影响很小,因此对于结构内部水体的作用主要考虑内水压力作用.采用双层衬砌梁弹簧模型进行计算,如图4(a)所示.层与层之间的接触并非完全连续<sup>[18]</sup>,内外衬砌之间的相互作用采用法向和切向弹簧模拟,如图4(b)所示,法向弹簧刚度  $k_r$ 、切向弹簧刚度  $k_\theta$  的取值方法可参考相关文献<sup>[19-21]</sup>.



(a) 双层衬砌梁弹簧模型  
(b) 接触面单元  
图4 双层衬砌接触面单元  
Fig.4 Double lining contact element

内水压荷载均匀垂直作用在内衬单元节点上,分解为竖直方向及水平方向的两个均布荷载,如图5所示,当其内水压为  $p_w$  时,其等效节点力可表示为:

$$f_{wv} = p_w \cdot \sin \alpha \cdot l, f_{wh} = p_w \cdot \cos \alpha \cdot l \quad (1)$$

得到外压及内压的荷载矩阵  $F_{out}$  及  $F_{in}$  后,按式(2)将两者叠加即可得到复合衬砌作用下整体单元等效结点荷载向量:

$$F = F_{out} + F_{in} \quad (2)$$

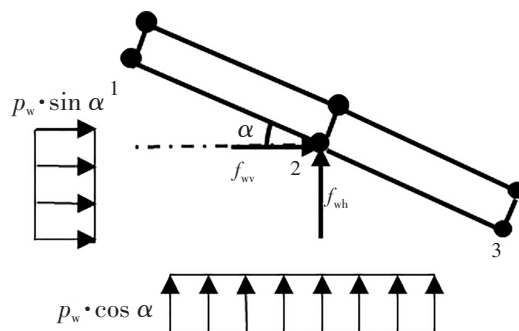


图5 等效内压荷载

Fig.5 Equivalent internal pressure load

### 1.4 极限状态定义

双层衬砌输水盾构隧道与一般的隧道受力有所不同,一方面,双层衬砌的结构形式使结构的建设流程,与普通隧道存在差异;另一方面,由于在使用阶段需要承担内水压力,因此结构的受力状态随修建阶段也会发生变化.总体来看可将输水隧道的修筑及受力分为三个阶段,如图6所示.

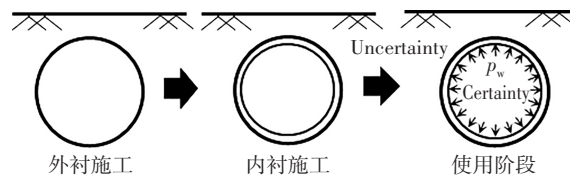


图6 输水盾构隧道修建阶段

Fig.6 Construction stage of water conveyance shield tunnel

第一阶段,处于开挖修筑外衬阶段,此时未修筑内衬,无内水压力作用,由外衬承担外部水土压力;第二阶段,拼装式外衬施工完成,施作内衬,由内外衬共同承担外部水土荷载;第三阶段,隧道投入使用,除了外部水土荷载作用,内水压力加入将影响结构受力形式.其中,第二阶段并未加入新的荷载,并且结构整体的刚度强度均因内衬的加入而有了很大的提高,因此该阶段相较于第一阶段的安全性有较大提升,无须进行重复的安全性检验.综上,对于结构安全性的检验将包含两个阶段,分别为外衬单独承担外部荷载阶段及内外衬共同承担内外压阶段.

两个阶段所需关注的重点存在差异,对于承载力极限状态,在第一阶段与一般的盾构隧道无明显差异,仅需验证外衬砌受力,通过压弯构件的  $N-M$  曲线定义结构的安全系数即可,如式(3)所示;但在第三阶段,在施加内水压力后,此时除了外部水土压力荷载外,还加入了新的内水压荷载,内水压的变化将对结构的受力形式产生很大影响<sup>[22]</sup>.当内水压力

较小时, 无法超过外部荷载的整体压力作用, 衬砌的横截面仍表现为受压弯作用; 当内水压力不断增大时, 会逐渐抵消直到超过外部荷载的整体压力作用, 使得结构在截面上由压弯受力状态变为拉弯作用. 混凝土抗压不抗拉的特性会使得在第三阶段出现较大的安全性问题, 因此在验证内衬及外衬的内力时, 需要对正截面受力状态做出判断, 再依据其受力状态选择对应截面承载力计算方式, 最后判断受力是否安全. 根据偏心受压、受拉状态, 按式(4)定义安全系数.

$$F_{s1} = \frac{M_{tu}}{M} \quad (3)$$

$$F_{s1} = \frac{N_{tu}}{N} \quad (4)$$

式中:  $M$ 、 $N$  分别为截面弯矩和轴力;  $M_{tu}$ 、 $N_{tu}$  分别为截面的极限承载状态下的弯矩和轴力.

对于正常使用极限状态, 在第一阶段, 其使用性能可通过收敛变形判断; 在第三阶段, 由于内衬的加入显著提高了结构的等效截面刚度, 仅依靠收敛变形无法判断结构是否安全, 同时输水隧道的设计参数选择也多由裂缝控制, 因此验算最大裂缝宽度以保证输水隧道的正常使用. 据此定义收敛变形验算和最大裂缝宽度验算的安全系数分别如式(5)和式(6)所示.

$$F_{s2} = \frac{\Delta_u}{\max(\Delta x, \Delta y)} \quad (5)$$

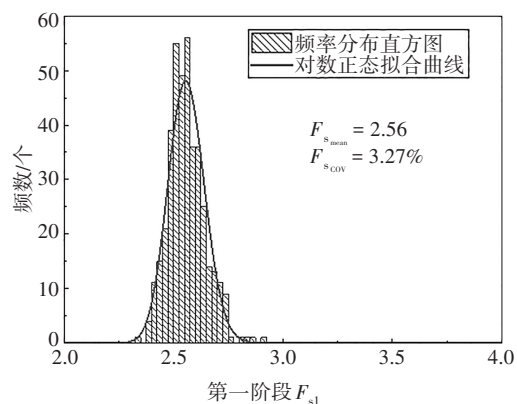
式中:  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别为水平及竖向的收敛变形. 根据相关规范<sup>[12]</sup>, 盾构隧道的最大收敛变形  $\Delta_u$  必须控制在  $0.4\%D \sim 0.6\%D$  ( $D$  为隧洞外径) 范围.

$$F_{s2} = \frac{\omega_{lim}}{\omega_{max}} \quad (6)$$

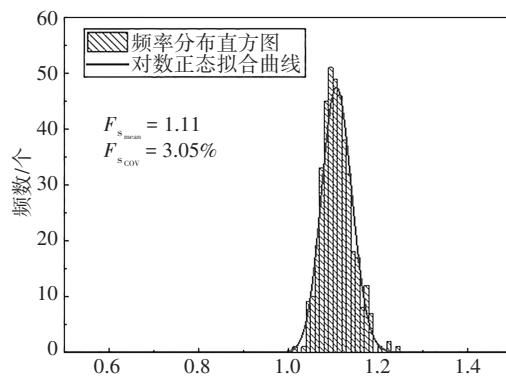
式中:  $\omega_{lim}$  为最大裂缝宽度限值;  $\omega_{max}$  为衬砌结构的最大裂缝宽度. 最大裂缝宽度计算及限值依据相关规范<sup>[23-24]</sup> 获取.

对各设计参数组合, 基于梁弹簧模型, 采用蒙特卡洛模拟得到隧道响应, 可以计算获得  $F_s$  的均值及标准差, 安全系数  $F_s$  一般取对数正态分布, 对第一、第三阶段的安全系数频率分布直方图采用对数正态分布拟合结果较好, 如图 7 所示, 因此可假设  $F_s$  服从对数正态分布. 可靠度指标  $\beta$  与安全系数  $F_s$  的统计参数之间的关系可表示为式(7).

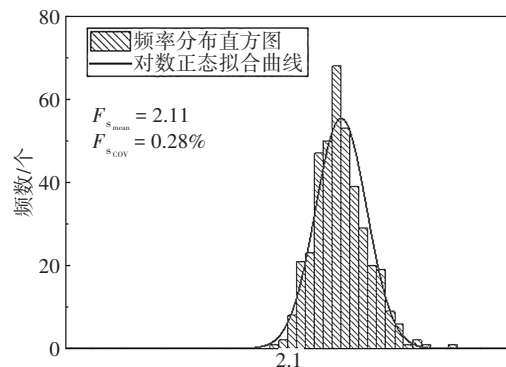
$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{F_{s_{mean}}}{\sqrt{1 + F_{s_{cov}}^2}}\right)}{\sqrt{\ln(1 + F_{s_{cov}}^2)}} \quad (7)$$



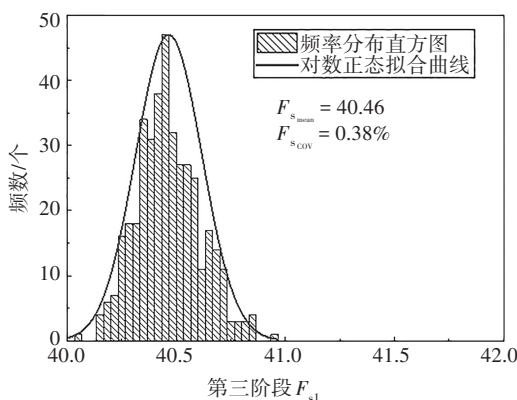
(a) 第一阶段  $F_{s1}$  拟合曲线



(b) 第一阶段  $F_{s2}$  拟合曲线



(c) 第三阶段内衬  $F_{s1}$  拟合曲线



(d) 第三阶段外衬  $F_{s1}$  拟合曲线

图 7 安全系数拟合结果

Fig.7 Fitting results of safety factor

可靠度指标是衡量结构是否满足安全性要求的重要指标,每个设计参数组合均求得一个对应的可靠度指标 $\beta$ ,但当 $\beta$ 过小时无法满足安全性要求.这也是优化最重要的约束条件,因此需要确定目标可靠度指标 $\beta_T$ ,确保结构的安全性满足要求,如式(8)所示.

$$\beta \geq \beta_T \quad (8)$$

## 1.5 优化目标

### 1.5.1 鲁棒性指标

由于设计对象为输水盾构隧道横断面,主要不可控变异来源为外部土体参数,因此选择基于外衬的安全系数COV作为鲁棒性指标,如式(9)所示,当COV越小时,鲁棒性越好.通过代入1.4节中两种极限状态下的安全系数 $F_{s1}$ 、 $F_{s2}$ 可分别求得对应鲁棒性指标 $COV_{F_{s1}}$ 、 $COV_{F_{s2}}$ ,分别记为 $R_1$ 、 $R_2$ .

$$COV = \frac{F_{s_{out}}}{F_{s_{mean}}} \quad (9)$$

### 1.5.2 材料成本

根据所涉及的优化参数,建立成本函数如式(10)所示.

$$C = c_{c1}V_{c1} + c_{c2}V_{c2} + c_{s1}m_{s1} + c_{s2}m_{s2} + c_b m_b \quad (10)$$

式中: $c_{c1}$ 、 $c_{c2}$ 为每立方米的内、外衬混凝土单价; $V_{c1}$ 、 $V_{c2}$ 表示内、外衬混凝土用量; $c_{s1}$ 、 $c_{s2}$ 表示单位质量的内、外衬钢筋单价; $m_{s1}$ 、 $m_{s2}$ 表示内、外衬钢筋用量; $c_b$ 表示单位质量的螺栓单价; $m_b$ 表示螺栓用量.

## 2 工程案例

### 2.1 工程算例

南沙支线盾构隧道外衬砌采用预制钢筋混凝土管片,外径为4.1 m,内径为3.5 m,衬砌管片厚0.3 m,环宽1.2 m,衬砌管片通过螺栓连接.外衬采用钢筋混凝土衬砌结构,厚度0.30 m,混凝土强度等级采用C55;内衬采用钢筋混凝土衬砌,厚0.35 m,混凝土强度等级采用C35,隧洞输水内径为2.8 m.

选取各待优化设计参数的上下界如表1所示.为得到最优设计,各参数均考虑为连续性变量,最终再根据衬砌厚度的模数限制对计算结果进行进一步的修正.

根据相关地质勘察报告,选定相应的不可控参数取值,如表2所示.

结合规范<sup>[25-26]</sup>并参考相关文献<sup>[9]</sup>,选取承载力极

限状态下的可靠度指标 $\beta_{T1}=4.2$ ,正常使用极限状态下的可靠度指标 $\beta_{T2}=2.7$ ,对应的失效概率分别为 $P_{f1}=1.335 \times 10^{-5}$ 和 $P_{f2}=0.35 \times 10^{-3}$ .

表1 设计参数限值

设计参数	上下限值
$h_{in}$ / m	[0.25, 0.45]
$h_{out}$ / m	[0.20, 0.40]
$\rho_{in}$ / %	[0.5, 4.0]
$\rho_{out}$ / %	[0.5, 3.0]
$D_b$ / mm	[20, 50]

表2 不可控参数概率模型

不可控参数	均值	COV	空间变异性
$E_{soil}$ / MPa	10	0.3	$\delta x=18$ m, $\delta y=1.5$ m
$q_0$ / kPa	10	0.3	—
$H_w$ / m	5	0.3	—

根据前述方法确定可控参数、不可控参数、极限状态及约束、鲁棒性指标及成本指标后,所要优化的问题可简述如表3所示.

表3 优化设计简述

求解设计参数: $h_{out}, \rho_{out}, h_{in}, \rho_{in}, D_b$
服从约束条件:
$0.20 \text{ m} \leq h_{out} \leq 0.40 \text{ m}, 0.5\% \leq \rho_{out} \leq 3.0\%$
$0.25 \text{ m} \leq h_{in} \leq 0.45 \text{ m}, 0.5\% \leq \rho_{in} \leq 4.0\%$
$20 \text{ mm} \leq D_b \leq 50 \text{ mm}$
$\beta_1 \geq \beta_{T1} = 4.2, \beta_2 \geq \beta_{T2} = 2.7$
优化设计目标: $\min C, \min COV_{F_{s1}}, \min COV_{F_{s2}}$

### 2.2 敏感度分析

为了探究鲁棒性指标随各设计参数的变化规律,分别绘制 $R_1$ 、 $R_2$ 随外衬厚度及外衬配筋率的变化曲线,如图8所示.

由图8(a)和图8(b)可看出, $R_1$ 及 $R_2$ 随外衬厚度的增大迅速降低,说明厚度对结构的鲁棒性能影响很大,对结构抵抗外部参数变异性的能力有很大的影响;从图8(c)和图8(d)可看出,配筋率的影响相对较小,但相似的是随着配筋率的升高,结构的鲁棒性也在不断提高.

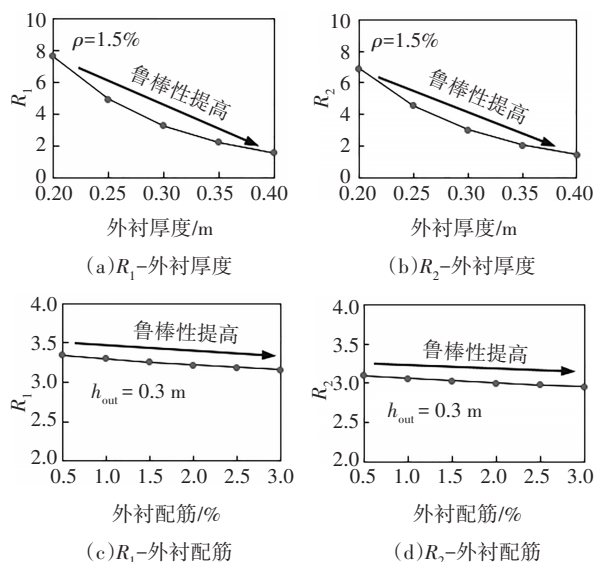


图 8 鲁棒性指标的敏感性分析  
Fig.8 Sensitivity analysis of robustness index

在本文所述的鲁棒性评价中采用了基于外衬的 COV 指标,为了验证是否合理,对内衬安全系数  $F_{s1}$  的变异性随设计参数的变化进行分析. 图 9 显示了随着内衬厚度及配筋率的变化,内衬  $F_{s1}$  的 COV 的变化趋势,可以发现,同图 8 的结论相似,内衬的  $F_{s1}$  变异性同外衬有相似的变化规律,因此考虑计算的复杂性,采用基于外衬的 COV 指标进行鲁棒性设计是合理可行的.

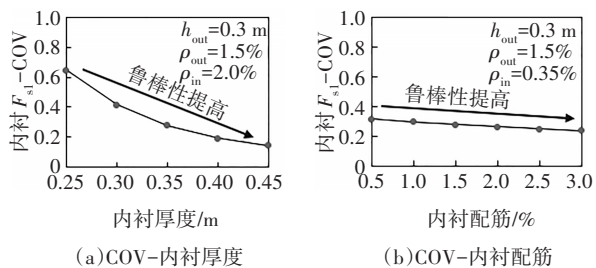


图 9 内衬  $F_{s1}$ -COV 变化规律  
Fig.9 Change law of lining  $F_{s1}$ -COV

### 2.3 优化结果

采用改进的约束多目标算法 NSGA-II 优化算法求解<sup>[10]</sup>,取种群个数 pop=200,迭代次数 gen=200,分别提取第 0 次、第 20 次、第 50 次及最终(第 200 次)的计算结果,如图 10 所示.

获取最终的计算结果,并获得 Knee Point,如图 11 所示.从图 11 中可以看出,成本和两个鲁棒性指标之间总体上是“此消彼长”的关系,这也正反映了多目标优化问题的特点.同时,从图中也可以看出,

两个鲁棒性指标之间并非相互制约,而是呈现一定的正相关关系.

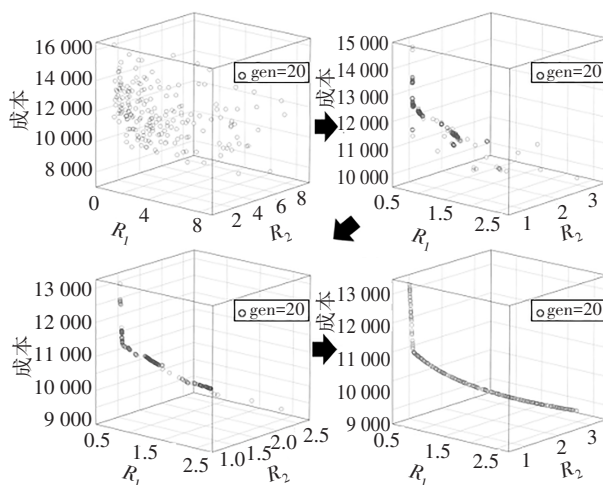


图 10 三维优化图示  
Fig.10 3D optimization diagram

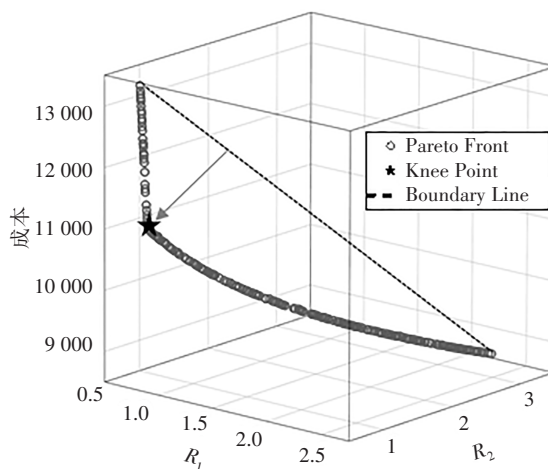


图 11 三维 Pareto 前沿面及 Knee Point  
Fig.11 3D Pareto front surface and Knee Point

三维优化尽管具有均衡三个指标相关关系的优势,但是三维 Pareto 前沿对于设计人员来说选用并不方便,三维空间对于指标之间的关系展现也不够直观简洁.将图 11 的三维 Pareto 前沿向  $f_1$ - $f_2$  面上投影,如图 12(b)所示,可以发现两者结果基本相同.进一步将三维 Pareto 前沿分别向  $f_1$ - $f_3$  面、 $f_2$ - $f_3$  面投影,如图 12(c)和 12(d)所示,可以发现将三维投影结果取最优部分即对应二维问题的解,说明三维问题实际上包含了上述三个特殊二维问题的解.考虑到两个鲁棒性指标  $R_1$  和  $R_2$  之间的一致关系,将问题简化为  $C$ - $R$ (成本-鲁棒性)的二维优化具有更高的工程适用性.

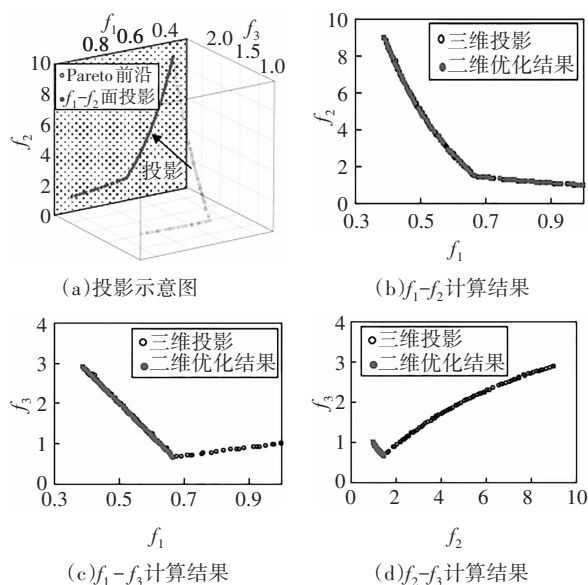


图 12 三维投影与对应二维优化结果对比

Fig.12 Comparison of 3D projection and corresponding 2D optimization results

考虑两种极限状态的敏感性在设计中不存在先后关系,因此取  $R_1$  和  $R_2$  的权重相等. 据此取  $R$  如式(11)所示. 新的鲁棒性指标综合考虑了盾构隧道两种极限状态下的鲁棒性,与成本  $C$  形成二维优化问题,根据前述研究结论,将三维曲线向对应平面投影即可得到优化结果,如图 13 所示.

$$R = 0.5 \cdot (R_1 + R_2) \quad (11)$$

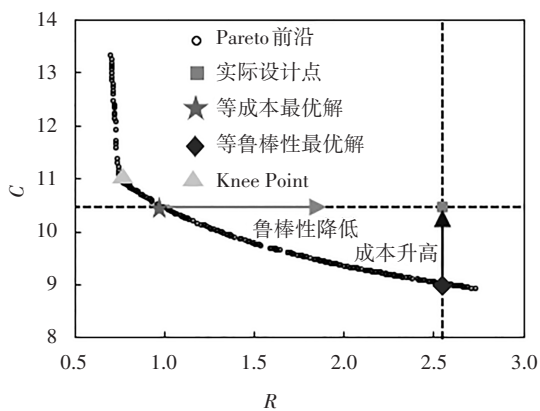


图 13 Pareto 前沿及最优点

Fig.13 Pareto front and optimal design point

在图 13 中标出当前初步设计参数,同时获得 Knee Point,可以发现实际设计点并未落在 Pareto 前沿上,说明实际设计仍有可优化的空间,进一步可获取等成本最优解及等鲁棒性最优解,四个点的设计参数及  $R$ 、 $C$  取值如表 4 所示.

表 4 各设计点比较

Tab.4 Comparison of design points

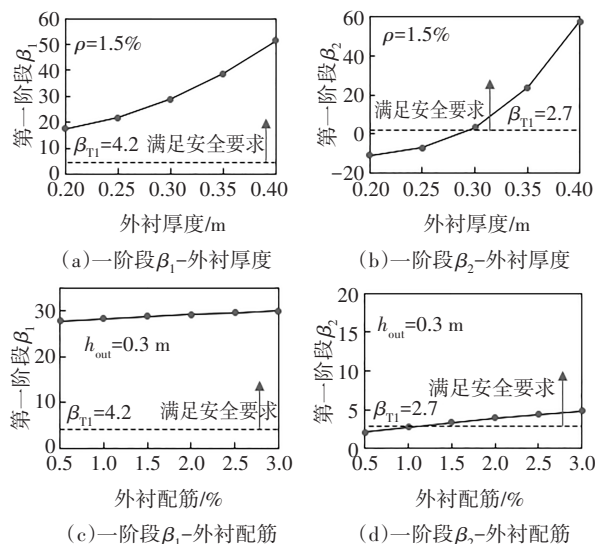
设计点	$h_{out}/m$	$\rho_{out}/\%$	$h_{in}/m$	$\rho_{in}/\%$	$D_i/mm$	$R$	$C$
实际点	0.30	1.50	0.35	2.24	41	2.55	10.46
等成本	0.36	1.50	0.25	2.35	45	1.05	10.46
等鲁棒性	0.24	1.50	0.25	2.55	41	2.55	9.02
Knee point	0.40	1.50	0.25	2.28	49	0.81	10.95

### 2.4 安全性分析

为了解各设计参数在双层衬砌输水隧道第一、第三阶段的结构安全性的影响,选取代表性设计参数组合进行分析.

图 14(a)~(d)展示了第一阶段的  $\beta_1$  及  $\beta_2$  随外衬厚度及外衬配筋率的变化规律. 可以发现,外衬厚度对两个阶段的可靠度指标影响较大,其中在所选参数范围内,  $\beta_1$  始终大于 4.2, 而  $\beta_2$  跨越了限制线 2.7, 因此对结构起到主要安全约束作用的是  $\beta_2$ ; 外衬配筋虽然影响相对较小,但是与外衬厚度相似,  $\beta_2$  起到了主要约束作用,承载力极限状态的  $\beta_1$  始终满足安全性要求.

图 14(e)~(h)展示了第三阶段的内衬  $\beta_1$  及最大裂缝宽度随内衬厚度及内衬配筋率的变化规律. 可以发现,内衬厚度对结构的两个安全性指标影响都很大,同时由于内衬的加入对结构的整体刚度有很大提升,安全性处于很高的水平. 对于最大裂缝宽度,厚度的影响在不同区间内基本呈现相同的规律,但配筋率的影响随着配筋率的升高逐渐降低. 最大裂缝宽度作为第三阶段正常使用状态下的评价指标,在第三阶段的安全性判断中也起到了主要的作用,说明对于输水隧道来说,采用结构抗裂设计的原则,相较于收敛控制是更为合理的.





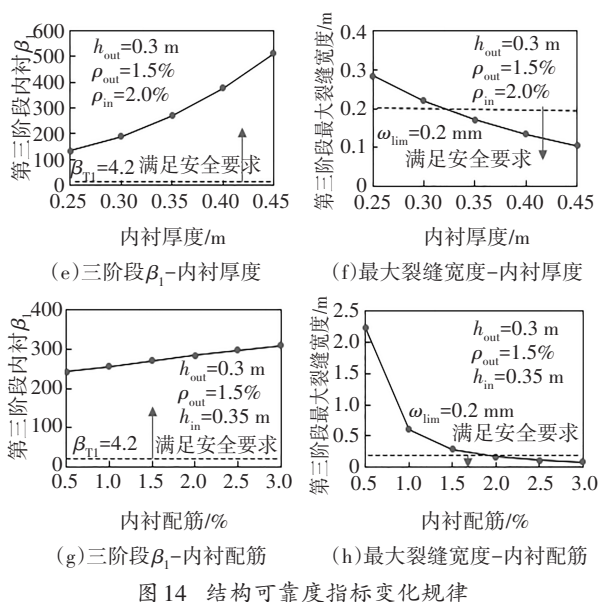


图 14 结构可靠度指标变化规律

Fig.14 Change law of structural reliability index

### 3 纵向优化设计

盾构隧道纵向上是细长结构, 不可避免地会穿越多种复杂多变的地层, 如果仅选取一个断面进行设计计算, 难以保证整体的安全性. 考虑上述鲁棒性设计的复杂性, 为了提高计算效率, 对于纵向考虑简化为选择不同典型断面分别计算, 最后选择最安全参数的计算方法.

依据地质勘察报告所述地质特征, 选取掘进段典型地质参数, 形成 3 种基本工况, 根据开挖面所处地层勘察报告文件及相应规范, 选择覆土厚度、侧压力系数及土体压缩模量作为主要地层参数, 取值如表 5 所示.

表 5 主要地层参数取值

Tab.5 Values of main formation parameters

区段位置	覆土厚度/m	侧压力系数	土体压缩模量均值/MPa	COV
GH0+000~GH1+160	25	0.67	2.65	0.4
GH1+160~GH1+640	30	0.60	4.00	0.6
GH1+640~GH7+386	38	0.50	4.66	0.2

分别对上述三种地层参数下的工况采用优化算法进行求解, 取 pop=200, gen=200, 最终所得二维 Pareto 前沿如图 15 所示. 可以看出, 不同地层参数下的二维优化结果有所差异. 因为结构的鲁棒性评价建立在结构安全性的基础上, 在鲁棒性指标的限制上并无明确的要求, 而成本是结构中十分关注的问题,

因此取各优化结果与初步设计的等鲁棒性指标点进行对比. 对于工况 3, 其最大鲁棒性指标仍小于实际点, 取其最大点作为优化结果. 原因在于工况三 (GH1+640~GH7+386) 的土体压缩模量的 COV 为 0.2, 远小于前两种工况的取值, 因此 Pareto 前沿中的鲁棒性指标要比前两种工况小很多.

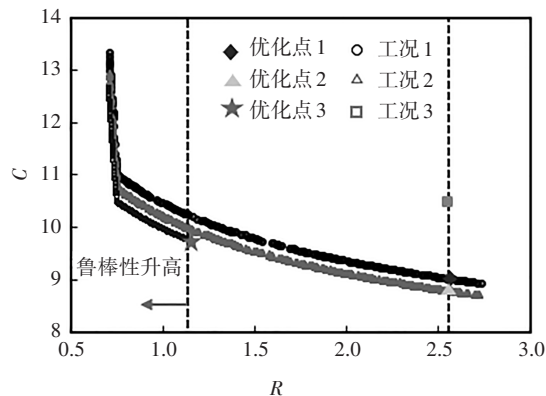


图 15 二维 Pareto 前沿对比

Fig.15 Comparison of two-dimensional Pareto fronts

表 6 列出了三种典型工况的优化结果, 工况 3 与工况 1、工况 2 优化结果对比, 由于覆土厚度增大, 侧压力系数减小, 为提高结构鲁棒性, 优化后衬砌厚度明显增大, 配筋率减小, 这与 2.2 节的敏感度分析结果中衬砌厚度对结构鲁棒性影响很大, 而配筋率影响较小的结论相符. 因此, 为了保证不同地层条件下的安全性, 综合考虑三种工况下的计算结果, 取最为安全的设计参数作为优化结果, 同时考虑衬砌厚度的模数限制、内衬承内压的特性以及混凝土耐久性等因素的影响, 最终的优化结果如表 6 所示. 与实际设计点相比, 最终优化结果内衬配筋率取值减小, 螺栓直径增大, 权衡了结构的鲁棒性和建设成本, 保障隧道掘进安全.

表 6 不同地层下的优化结果

Tab.6 Optimized results in different formations

区段位置	$h_{out}/m$	$\rho_{out}/\%$	$h_{in}/m$	$\rho_{in}/\%$	$D_b/mm$
GH0+000~GH1+160	0.24	1.50	0.25	2.55	41
GH1+160~GH1+640	0.28	1.50	0.25	2.27	43
GH1+640~GH7+386	0.30	1.45	0.32	1.76	42
最终优化结果	0.30	1.50	0.35	1.76	43
实际设计点	0.30	1.50	0.35	2.24	41

### 4 结论

本文结合具体工程案例, 综合考虑双层衬砌输

水盾构隧道建设成本及结构对外部参数变异的敏感性,形成约束多目标优化问题,建立了一套双层衬砌输水隧道的鲁棒性设计框架.得到的主要结论如下:

1)针对双层衬砌输水盾构隧道受力特点加入约束并选择适应性鲁棒性指标,通过引入优化算法,获取了完整的三维及二维 Pareto 前沿,实现了满足结构安全性要求下成本和结构鲁棒性的权衡.

2)双层衬砌输水隧道根据其修建阶段的不同,控制指标不同,在衬砌修筑阶段,收敛变形起主要限制作用,在使用阶段,裂缝宽度起限制作用.

3)基于两种极限状态的鲁棒性指标存在一致性,通过赋权重的方式可以将鲁棒性指标合并为一个,实现求解过程的简化,二维优化相较于高维优化的结果更适用于工程决策及应用.

4)盾构隧道纵向不同区段的参数变异性较大,单一考虑一种工况不够全面,通过将隧道分段并提取典型断面优化的方式可有效解决较大的参数变异性问题,保证掘进中的参数统一及隧道安全.

## 参考文献

- [1] 日本土木学会. 盾构隧道管片设计——从容许应力设计法到极限状态设计法[M]. 官林星,译.北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Japan Civil Society. Segment design of shield tunnel—from allowable stress design method to limit state design method[M]. Translated by GUAN L X. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (In Chinese)
- [2] TAGUCHI G. Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes[R]. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.
- [3] JUANG C H, WANG L, LIU Z F, *et al.* Robust geotechnical design of drilled shafts in sand: new design perspective[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(12):2007–2019.
- [4] 黄宏伟,龚文平,庄长贤,等. 重力式挡土墙鲁棒性设计[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(3):377–385.  
HUANG H W, GONG W P, ZHUANG C X, *et al.* Robust geotechnical design of gravity retaining wall[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(3):377–385. (In Chinese)
- [5] GONG W P, KHOSHNEVISAN S, JUANG C H. Gradient-based design robustness measure for robust geotechnical design[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(11):1331–1342.
- [6] GONG W P, WANG L, JUANG C H, *et al.* Robust geotechnical design of shield-driven tunnels[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 56:191–201.
- [7] JUANG C H, WANG L, HSIEH H S, *et al.* Robust geotechnical design of braced excavations in clays[J]. *Structural Safety*, 2014, 49:37–44.
- [8] GONG W P, HUANG H W, JUANG C H, *et al.* Improved shield tunnel design methodology incorporating design robustness [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(10):1575–1591.
- [9] ZHANG D M, ZHAI W Z, HUANG H W, *et al.* Robust retrofitting design for rehabilitation of segmental tunnel linings: Using the example of steel plates [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83:231–242.
- [10] 王瑞川. 复合地层大直径盾构隧道鲁棒性设计方法[D]. 上海:同济大学, 2019.  
WANG R C. Robust design method for large diameter shield tunnel with composite strata[D]. Shanghai: Tongji University, 2019. (In Chinese)
- [11] 陈坤,黄宏伟,张东明,等. 基于约束多目标优化算法的盾构隧道设计方法[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(S1):81–86.  
CHEN K, HUANG H W, ZHANG D M, *et al.* Constrained multi-objective optimization algorithm based design method of shield tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(S1):81–86. (In Chinese)
- [12] ITA. Guidelines for the design of shield of tunnel lining [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(3):303–331.
- [13] ARNAU O, MOLINS C. Three dimensional structural response of segmental tunnel linings [J]. *Engineering Structures*, 2012, 44:210–221.
- [14] 顾丽江. 考虑拼装误差影响下的软土盾构隧道变形控制标准研究[D]. 上海:同济大学, 2011.  
GU L J. Research on deformation control standard of shield tunnel in soft soil considering the influence of assembling error [D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (In Chinese)
- [15] 薛亚东,高健,李宜城,等. 基于深度学习的地铁隧道衬砌病害检测模型优化[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(7):137–146.  
XUE Y D, GAO J, LI Y C, *et al.* Optimization of shield tunnel lining defect detection model based on deep learning [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(7):137–146. (In Chinese)
- [16] PHOON K K, HUANG S P, QUEK S T. Implementation of Karhunen-Loeve expansion for simulation using a wavelet-Galerkin scheme[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2002, 17(3):293–303.

- [17] 朱合华, 陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 26-32.  
ZHU H H, TAO L B. Study on Two Beam-spring Models for the Numerical Analysts of Segments in Shield Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(2): 26-32. (In Chinese)
- [18] 颜可珍, 满建宏, 石挺魏, 等. 考虑层间接触状态的横观各向同性结构动力响应解析解[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 97-105.  
YAN K Z, MAN J H, SHI T W, *et al.* Analytical solution for dynamic response of transversely isotropic structures considering the state of interlayer contact state [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 97-105. (In Chinese)
- [19] 张厚美, 过迟, 吕国梁. 盾构压力隧洞双层衬砌的力学模型研究[J]. 水利学报, 2001(4): 28-33.  
ZHANG H M, GUO C, LÜ G L. Mechanical model study on double lining of shield tunnel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001 (4): 28-33. (In Chinese)
- [20] 晏启祥, 程曦, 何川, 等. 水压条件下盾构隧道双层衬砌力学特性分析[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(9): 55-59.  
YAN Q X, CHENG X, HE C, *et al.* Analysis of mechanical properties of double lining of shield tunnel under water pressure [J]. Journal of Railway Engineering, 2010, 27(9): 55-59. (In Chinese)
- [21] 姚超凡, 晏启祥, 何川, 等. 一种改进的盾构隧道双层衬砌分析模型及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 80-89.  
YAO C F, YAN Q X, HE C, *et al.* An improved analysis model for double lining of shield tunnel and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 80-89. (In Chinese)
- [22] 方勇, 汪辉武, 郭建宁, 等. 下穿黄河盾构隧道管片衬砌结构受力特征模型试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 132-142.  
FANG Y, WANG H W, GUO J N, *et al.* Model test study on the mechanical characteristics of segment linings for the shield tunnel undercrossing the Yellow River [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(5): 132-142. (In Chinese)
- [23] 地铁设计规范(附条文说明): GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Code for subway design (with provisions): GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (In Chinese)
- [24] 水工隧洞设计规范: SL 279—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.  
Code for design of hydraulic tunnel: SL 279—2016 [S]. Beijing: China Water and Power Press, 2016. (In Chinese)
- [25] 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (In Chinese)
- [26] 工程结构可靠性设计统一标准: GB 50153—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Unified standard for reliability design of engineering structures: GB 50153—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (In Chinese)