

基于模拟退火算法的公路隧道内轮廓优化设计

张庆崑

(中交基础设施养护集团有限公司,北京市 100011)

摘要:为了对公路隧道内轮廓进行优化设计,将公路隧道内轮廓的设计在一定条件下看作是一个最优化问题。该文以面积最优为目标,在建立单心圆有仰拱内轮廓计算模型的基础上,引入模拟退火算法进行求解,并编写程序进行验证分析。结果表明,该优化设计方案是可行的,为公路隧道内轮廓设计提供了一种思路。

关键词:公路隧道;内轮廓;模拟退火算法;优化设计

中图分类号:U452.2 **文献标志码:**A

0 引言

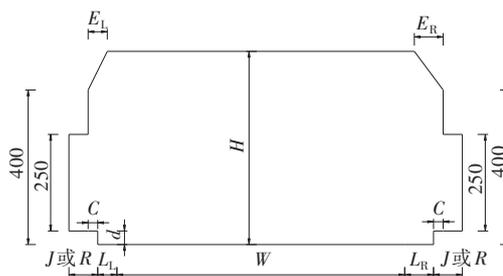
公路隧道内轮廓尺寸的拟定受控因素较多,除了要满足建筑限界的要求,还要为通风、照明、排水、路面、内装等设备设施预留空间,并储备富余量。圆形内轮廓在围岩稳定及结构受力方面具有优势,目前中国公路隧道内轮廓多由组合圆构成。当前工程实践中,内轮廓尺寸的拟定大多采用类比法,由于内轮廓尺寸直接影响了工程规模及投资预算,在满足限定条件的情况下,搜寻内轮廓的最小面积具有探讨价值^[1-4]。

实际上,此问题可归结为最优化问题。工程最优化问题即工程问题中取得的一组参数解,使得由这组设计参数确定的设计方案,既满足各种规范、标准,又达到较好的技术经济指标^[5-7]。最优化问题由来已久,解决此类问题的有效手段是采用智能优化算法^[8-12],如模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法等。模拟退火算法的计算过程简单通用,它能够避免陷入局部最优陷阱,可用于求解复杂的非线性优化问题,因此应用广泛。

本文在工程实践的基础上,以面积最优为目标,建立单心圆有仰拱内轮廓分析模型,探讨采用模拟退火算法确定公路隧道内轮廓最优方案的可行性。

1 公路隧道内轮廓

根据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)^[5],建筑限界基本形式见图1。



注: H 为建筑限界高度; W 为行车道宽度; L_L 为左侧侧向宽度; L_R 为右侧侧向宽度; C 为余宽; J 为检修道宽度; R 为人行道宽度; d 为检修道或人行道高度; E_L 为建筑限界左顶角宽度(包含 C); E_R 为建筑限界右顶角宽度(包含 C)。

图1 公路隧道建筑限界(单位:cm)

在满足建筑限界以及其他必需的空间条件下,结合结构受力以及断面空间利用率等方面的考虑,工程实践中认为拱部为单心圆或三心圆,侧墙为大半径圆弧,仰拱与侧墙间用小半径圆弧连接较好^[14]。设计速度为80 km/h的两车道高速公路隧道多采用单心圆方案,某高速公路隧道项目采用的单心圆有仰拱内轮廓方案如图2所示。

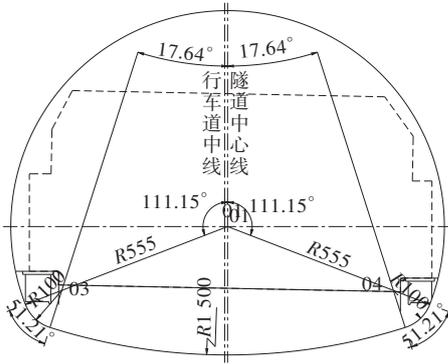


图 2 公路隧道内轮廓示例(单位:cm)

2 模拟退火算法

模拟退火算法的思想来源于物理中固体物质的退火过程与数学中组合优化问题之间的类比。退火过程使得分子最终落入能量最低状态,而优化过程则是不断向目标函数解空间中的最值靠近。选取任意一组解作为初始解,即模拟物理退火过程中的初始粒子状态。设定初温,即模拟溶解过程中达到的最高温度,随后在不同的温度下借助与温度相关的概率参数来判定新解的接受度,不断降温使得这个概率越来越小,直到达到最优解或者达到了终止条件。算法的常见执行步骤如下^[15]:

(1) 设定初值: x_0 以及 $F(x_0)$;配置冷却进度表参数:初始温度 $T(0)$ 、衰减函数、Mapkob链长度 L_k 以及终止条件。

(2) 温度控制参数 $t = T(k)$ 时(k 为降温进程中的某一个状态参数),按照以下步骤作变换:

① 产生新解。用系统随机函数产生偏移量 m ,从而在当前解 x_p 的基础上得到一新解 $x_{p+1} = x_p + m$, p 为等温进程中的某一个状态参数;

② 计算目标函数的增量。 $\Delta f = F(x_{p+1}) - F(x_p)$;

③ 更新准则。产生随机数 $\theta \in (0, 1)$,根据Metropolis准则,当 $p > \theta$ 时接受新解:

$$p = \begin{cases} 1, & \Delta f \leq 0 \\ \exp(-\Delta f/t), & \Delta f > 0 \end{cases}$$

(3) 遵循温度衰减函数,产生新的温度控制参数 $t = T(k + 1)$,转入步骤(2)。直到达到终止条件。

模拟退火算法独特的新解接受准则可以使其避免陷入局部极值。作为一种全局寻优算法,其对初

始值的选取不敏感,但冷却进度表在算法控制中的作用至关重要^[16]。

3 优化过程

现以两车道高速公路(80 km/h)隧道通常采用的单心圆有仰拱内轮廓方案为例,验证模拟退火算法在内轮廓优化设计中的可行性。单心圆有仰拱内轮廓的基本组成如图3所示,解决此问题可分3个阶段进行:第一阶段是最优确定单心圆无仰拱内轮廓,此圆记为 O_1 ;第二阶段是在 O_1 基础上最优确定单心圆有仰拱内轮廓,此圆记为 O_2 ;第三阶段在 O_1 、 O_2 的基础上确定过渡圆,此圆记为 O_3 与 O_4 。

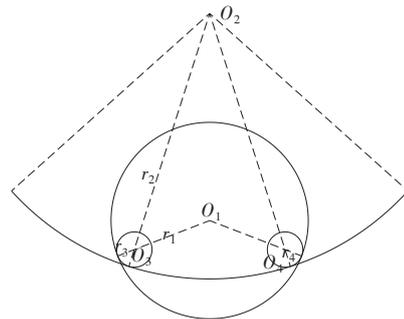


图 3 单心圆有仰拱内轮廓构成

3.1 变量分析

对于第一阶段,变量为 O_1 圆心坐标及半径 r_1 ,第二阶段则是 O_2 圆心坐标及半径 r_2 ,其中 O_1 、 O_2 圆心的横坐标相同。而第三阶段中 O_3 则分别与 O_1 、 O_2 内切,根据几何关系,可以得到 O_3 圆心坐标和半径 r_3 之间的约束关系,另外建筑限界到 O_3 的最小距离则会根据实际需求进行指定,可认为不具备优化余地,在本优化过程中不考虑 O_3 的影响, O_4 同理。至此,该优化问题转换为求解在满足约束条件下使得内轮廓面积最小的 O_1 和 O_2 圆心坐标及半径。

3.2 约束条件及目标函数

隧道内轮廓拟定时通常会提出隧道内轮廓线与建筑限界最小距离要求,这里用余量 δ 来表示。由于路面横坡的存在,建筑限界会按照不同角度进行旋转,余量大小也会受到影响。对于第一阶段,必须满足各路面坡度条件下建筑限界位于 O_1 内部且 O_1 上各点与建筑限界的距离均要大于余量 δ_1 ,也可根据实际需求对限界上的各点独立设定余量,而目标函数

则为 O_1 的面积。对于第二阶段, O_2 与 O_1 圆心横坐标相同, O_2 除了要满足 O_1 的约束条件, 还需保证两圆心距离 $d_{o_1o_2} \in (|r_2 - r_1|, r_2 + r_1)$ 。隧道路面以下需设置路面结构层及中央排水沟等, 要求的余量更大, 故引入余量 δ_2 值, 其为 O_2 上各点到建筑限界最小距离要求。此外为了使仰拱具有一定的曲率以保证受力更合理, 引入变量矢高 γ , 其为 O_1 与 O_2 的交点与仰拱最低点的高差。此时目标函数为 O_1 与 O_2 重叠部分的面积。

3.3 模型求解

以测设点为原点, 建立直角坐标系, 将建筑限界各点位置用坐标表示, 并计算处于正向最大路面坡度、负向最大路面坡度时建筑限界各点所对应的坐标值, 根据工程实际需求指定 δ_1 、 δ_2 及 γ 值。现讨论本问题中模拟退火算法冷却进度表相关参数的设定。

(1) 初始温度 $T(0)$ 。 $T(0)$ 应使得算法一开始的接受率尽可能高, 即 $\exp(-\Delta f/T(0)) \approx 1$, 则可令 $T(0) = \mu \Delta f_{\max}$, μ 为常数, 通常视问题规模而定, 本问题取 $\mu=1$ 。

(2) 温度衰减函数。根据经验法则, 选取模拟退火算法常用的衰减函数 $T_{k+1} = \alpha T_k$, α 取值范围一般为 0.50~0.99, 为适当延缓退火速度, 取 $\alpha=0.98$ 。此形式衰减函数对温度的衰减量随算法进程而减小。

(3) 终止准则。终止准则需要考虑两方面, 第一方面是等温过程中产生扰动的次数, 第二方面是温度下降到能量较低状态的值。本问题中对于等温过程的终止准则定为连续 n 个 Markov 链中新解没有被接受, 或者达到指定的链长。降温过程的终止准则定为相邻温度的温度差 Δt 小于指定值。

(4) Markov 链长度 L_k 、温差 Δt 及 n 。这 3 个参数的确定可以根据问题规模在试算基础上兼顾搜索速度与解的质量采用指定的方式进行。

4 实例验证

根据上述计算模型, 编制程序进行验证分析。程序设置交互界面, 将各细部尺寸及算法控制数据

作为输入量, 以提高普适性, 提供接口将计算结果导入制图软件中生成图件。设计速度为 80 km/h 的某两车道高速公路隧道建筑限界各组成部分的详细尺寸如图 4 所示, 图中尺寸要求适用于路面坡度 +3%~-3% 范围。参考工程实际内轮廓方案, 设定约束条件中的参数 $\delta_1=12$ cm、 $\delta_2=83$ cm、 $\gamma=85$ cm、过渡圆半径 $r_3=r_4=100$ cm。

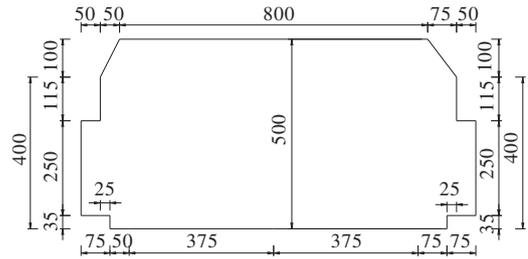


图4 建筑限界尺寸(单位:cm)

对于控制算法进程的参数, $T(0)$ 可根据上述方法确定, 不同次数的随机抽样所确定的目标函数最大值与最小值的差值列于表 1, 令 $T(0) = 1500 \geq \Delta f_{\max}$; 温度衰减函数 $T_{k+1} = 0.98T_k$; 由于问题规模较小, 耗费的计算资源不明显, 可优先保障解的质量, 经过试算令 $L_k=1000$, $\Delta t=0.1$, $n=20$ 可得到较高质量终解。

表1 初始温度的测试数据

次数/次	Δf_{\max}	次数/次	Δf_{\max}
50	1 062	400	1 384
100	1 131	800	1 415
200	1 358	1 600	1 408

相关参数设定好以后, 程序按照上述计算模型计算输出结果。采用模拟退火算法计算后得到的隧道内轮廓参数①(方案①)和工程实际采用的内轮廓参数②(方案②)分别列于表 2。约束条件以方案②为参考设定, 两者均满足工程要求的最小余量, 从结果对比来看: 利用上述计算模型得到的数据与工程实际采用的基本一致, 两种方案的内轮廓面积相差约 216.2 cm², 工程实际方案本即为优选方案, 可以看出该算法模型具有可行性。图 5 为程序利用接口调用软件绘制的建筑限界及内轮廓图。

表 2 计算结果对比

参数 (方案)	O_1/cm			O_2/cm			O_3/cm			O_4/cm			面积 /cm ²
	x_1	y_1	r_1	x_2	y_2	r_2	x_3	y_3	r_3	x_4	y_4	r_4	
①	432.4	150.5	554.6	432.4	1 316.4	1 496.6	8.80	-14.40	100	856.10	-14.40	100	802 653.3
②	432.5	150.0	555.0	432.5	1 320.0	1 500.0	8.14	-14.14	100	856.86	-14.14	100	802 869.5

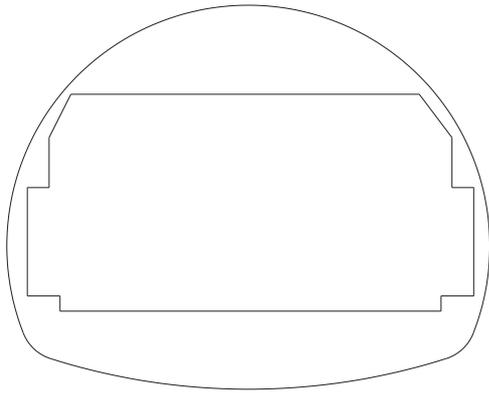


图 5 程序绘制的隧道内轮廓

5 结论

(1) 以面积最优为目标,建立计算模型,编写程序,验证了模拟退火算法可以应用于公路隧道内轮廓的优化设计。

(2) 公路隧道内轮廓根据公路等级、设计速度、围岩情况、路面坡度等条件的不同,拱部有单心圆与三心圆的基本区分。虽然本文针对单心圆有仰拱内轮廓建立了计算模型,但各类型内轮廓的优化思路是通用的,下一步可以继续完善。

参考文献:

- [1] 郭艳华,李志业.公路隧道内轮廓优化确定方法[J].四川建筑,2003,23(3):36-38.
 [2] 余晓琳,彭立敏.双连拱隧道内轮廓优化设计模型及其

应用[J].中南公路工程,2006(1):79-82,87.

- [3] 邓发友,夏才初,许崇帮.基于中智理论的公路隧道健康状态评价方法研究[J].中外公路,2023,43(2):173-177.
 [4] 黄婷,靳如平,倪玉丹,等.基于空间路权的高速公路隧道轮廓带系统评价[J].中外公路,2021,41(5):316-321.
 [5] 李元科.工程最优化设计[M].北京:清华大学出版社,2006.
 [6] 樊兆董.特长隧道特殊交通安全设施评估及优化方法研究[D].北京:北京工业大学,2019.
 [7] 杨磐石,刘畅,罗刚.超长公路隧道斜井及正洞通风方案优化研究[J].中外公路,2022,42(1):187-192.
 [8] 王凌.智能优化算法及其应用[M].北京:清华大学出版社,2001.
 [9] 方超,桂跃,施江旭,等.隧道围岩变形的组合预测研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2019,44(3):113-119.
 [10] 王刚.特大断面分岔隧道结构设计分析[J].西部交通科技,2021(6):100-103.
 [11] 任凯琦.浅埋偏压连拱隧道施工技术 with 变形控制措施研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
 [12] 文竞舟,倪玉丹,武刚等.低等级公路隧道提质升级原则及改善研究[J].中外公路,2021,41(3):212-216.
 [13] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道设计规范 第一册 土建工程:JTG 3370.1—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
 [14] 廖朝华,郭小红.公路隧道设计手册[M].北京:人民交通出版社,2012.
 [15] 康立山,谢云,尤矢勇,等.非数值并行算法(第一册):模拟退火算法[M].北京:科学出版社,1994.
 [16] 陈华根,吴健生,王家林,等.模拟退火算法机理研究[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(6):802-805.