

场地平土和雨水管网的综合优化设计

杨秋侠¹, 杜 娟², 杜 珊³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国煤炭科工集团武汉设计研究院, 湖北 武汉 430064;
3. 中冶南方工程技术有限公司, 湖北 武汉 430064)

摘 要:通过寻求最小土石填挖量的场地标高和坡度设计,在满足土石填挖平衡的基础上,分析了场地平土的优化设计. 同时在给定场地坡度的前提下,分析了雨水管网的布置,得出最优的管线布置. 其次,将场地平土和雨水管网布置结合起来,在统一考虑场地平土坡度对平土费用和雨水管网布置费用影响的基础上,得出了二者总体费用最小的综合优化模型. 最后,通过实例与分步设计方案费用的比较,证实了该综合优化模型的有效性.

关键词:场地平土;雨水管网布置;综合优化;分步优化

中图分类号: TU 992.24

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)02-0238-06

工业场地的自然地形往往是起伏不平的,很难满足工厂总平面设计中各种建筑物、构筑物、交通运输线路和场地排雨水的设计标高要求. 因此,工业场地的自然地形就必须根据总平面设计的技术要求进行改造整平,使改造后的场地能适应建、构筑物的布置,满足工艺和交通运输技术条件,有利于场地雨水迅速排除.

在场地整平中,选择一个合理的场地标高,就可以减少大量的土石方工程量,确保工厂安全,如果场地整平标高确定的不合适,都将增加土石方工程量,影响建设进度,增加基建投资. 因此,通过场地平土标高的优化设计,寻求在最小的土石方填挖量情况下的场地标高和设计坡度,来实现对土方的优化^[1].

通常情况下,雨水管网的设计,是在场地平土之后进行. 而在雨水管网布置时,应尽力让雨水管的坡度与场地坡度平行,以减少土石量,节约成本^[2]. 经常人们将场地平土和雨水管网布置这两个过程分步实施,各自追求费用最小. 但实际上,场地的平土坡度除了直接影响土石填挖费用之外,也间接地影响雨水管网的铺设费用. 不同的场地坡度会导致不同的管网铺设坡度(因为覆土深度的约束);在极端的情况下,不同的场地坡度会影响雨水管管径的选择,比如在雨水管设计流量给定的情况下,场地坡度比较大时可以采用小的雨水管管径,场地坡度比较小时则需要采用大一些的雨水管管径. 充分利用场地平土坡度对土石填挖费用和管网铺设费用的影响,是本文进行综合优化设计的理论基础.

1 问题描述

在做场地的竖向设计时,要确定场地平土标高^[1]、场地内建筑物的设计标高和雨水管网的布置方式. 其中场地平土的设计需要在尽力满足总体土石填挖量最小的条件下,尽力满足土石填挖平衡;雨水管网的布置是依据场地的平土坡度,在寻找合理的雨水管的管径、铺设坡度和埋深,使得管网的铺设费用最小. 场地的平土坡度同时影响土石填挖费用和管网铺设费用,所以采用综合的优化设计能够保证两个阶段的总体费用最小.

1.1 场地平土优化

取自然地面标高如下:

收稿日期:2011-06-23 修改稿日期:2012-03-29

基金项目:陕西省教育厅资助项目(11JK0892)

作者简介:杨秋侠(1970-),女,陕西人,副教授,博士,从事交通运输规划与管理的教学和科研工作.

$$Z = f(x, y) \quad (1)$$

其中 x, y 为地面上任意点在水平方向上的纵、横坐标, f 为地面的平面映射, 通常为非线性函数. 采用平坡式竖向平土之后, 场地的设计标高为:

$$H = H_0 + ax + by \quad (2)$$

H_0 为坐标原点的设计标高; a, b 为场地在 x 轴方向和 y 轴方向上的坡度系数.

场地的填挖方量之差可以描述如下:

$$V_c = \iint_S (Z - H) dx dy \quad (3)$$

其中 S 为场地的水平面积, 通常为 $[x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}]$, 通常情况下, 需要满足条件 $V_c = 0$.

同时, 场地的总体填挖方量为

$$V_s = \iint_S |Z - H| dx dy \quad (4)$$

场地的填挖费用为 $F_1 = kV_s$ (k 为单位土石填挖费用), 单位: 万元 / m^3 .

现在将场地平土设计的优化问题描述如下:

在满足填挖方量平衡的条件下, 通过设计场地坐标原点的设计标高 H_0 和场地在 x 轴方向和 y 轴方向上的坡度 a, b , 使得总体填挖费用最小, 即

$$F_1 = \min_{H_0, a, b} \iint_S k |Z - H| dx dy, \quad s. t. \quad V_c = 0 \quad (5)$$

工程中填挖方量的计算通常采用离散化的方法, 将场地在水平方向上划分为适当大小的方格, 假设方格内自然地面坡度和设计场地坡度均为常量, 进而求取场地的填挖方量, 也称为方格网法.

1.2 雨水管网优化

在给定汇水面积和场地平土的情况下, 雨水管网的优化设计的目标是在满足排水要求的前提下, 通过选择合适的雨水管管径组合、铺设坡度以及埋深, 使得管网的总体投资费用最小.

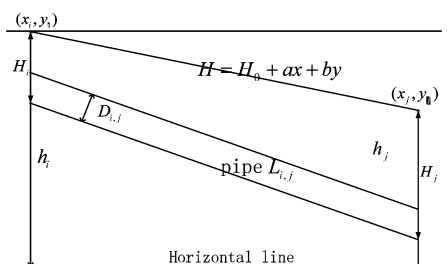


图1 管道 $i \rightarrow j$ 的侧面图

Fig. 1 Side view of pipe $i \rightarrow j$

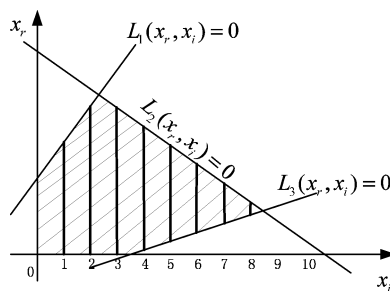


图2 混合整数规划解空间

Fig. 2 The solution space for mixed integer programming

图1所示, 在给定排水面积划分和场地平土坡度 (a, b) 的情况^[3]下, 寻找最优的管径 $D_{i,j}$ 、埋深 H_i , 使得管网的总体投资 F_2 最小, 即.

$$F_2 = \min_{D_{i,j}, H_i} \sum_{i=1}^{m-1} C_{i,j} L_{i,j} \quad (6)$$

其中, $C_{i,j} = f(D_{i,j}, H_i, H_j)$ 为管段 $i \rightarrow j$ 单位长度管段的费用; $L_{i,j}$ 为管段 $i \rightarrow j$ 的长度, m 为设计管段数目.

该优化问题的约束条件^[4-5]为:

(1) 管道设计充满度按满流考虑, 即 $h/D = 1$, h 为管道中水深, D 为管径;

(2) 设计雨水管网时必须满足流速的约束条件, 根据《室外给排水设计规范》雨水管道满流时道内最小设计流速为 0.75 m/s. 雨水管道满流时管道内的最大设计流速为: 金属管 10 m/s, 非金属管 5 m/s;

(3) 最小管径和最小设计坡度: 雨水管道最小允许管径为 300 mm, 相应的最小坡度为 0.003. 雨水

口连接管的最小管径为 200 mm,最小坡度为 0.01;

(4) 雨水管埋深:管道最小覆土深度,应根据管材强度、外部荷载、土壤冰冻深度和土壤性质等条件,结合当地管网铺设经验确定.管顶最小覆土深度宜为:人行道下 0.6 m,车行道下 0.7 m;

(5) 管道最大覆土深度: $h < 7$ m.

在给定管线平面布置的情况下,如图 1 所示,管段 $i \rightarrow j$ 长度为

$$L_{i,j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (H_j - H_i)^2} \quad (7)$$

通常情况下,单根管段的单位长度费用 $C_{i,j} = f(D_{i,j}, H_i)$ 可以采用经验公式给出,如文献[3]中给出的函数形式费用如下:

$$C_{i,j} = (5\,207 + 7\,649.12D_{i,j}^{2.3489}) + (33.58 + 3\,687D_{i,j})H_{i,j}^{3.0157} \quad (8)$$

式中: $H_{i,j}$ 为管段 $i \rightarrow j$ 的平均埋深,取 $0.5 \times (H_i + H_j)$.

1.3 综合优化

因为管线的铺设深度需要满足最小埋深和最大埋深的约束,所以场地平土优化以后获得的坡度将会进一步影响雨水管网的优化设计.在场地平土优化的基础上,再进行雨水管网优化设计,分阶段优化得到的最优解的成本总和并不一定是最小.甚至会存在这样的一种情况,即这两个阶段的次优解设计方案,其总体成本却是最小.因此,综合考虑场地平土和管线布置的费用,给出如下优化问题描述:

在给定汇水面积划分,管线平面布置的情况下,寻找最优的场地平土设计(H_0, a, b)和雨水管网设计($D_{i,j}, H_i$),使得工程的总体投入成本最小.

$$\min F = \min(F_1 + F_2) = \min_{H_0, a, b, D_{i,j}, H_i} \left(\iint_S k |Z - H| dx dy + \sum_{i=1}^{m-1} C_{i,j} L_{i,j} \right) \quad (9)$$

2 算法设计

因为管径数值大小的离散性,使得其目标函数以及约束函数在其可行集内既不连续也不可微,连续变量优化中的许多解析方法都不再适用.通常情况下,混合整数规划可以很好的解决此类问题.本文采用混合整数规划中的分支定界算法(BB: Branch and Bound)求取最优的管径和埋深,如图 2 所示.

分支定界算法的原始思想为:隐式地枚举所有可行的解.具体分为两个步骤:定界和分支.所谓分支,就是逐次对解空间(可行域)进行划分;而所谓定界,是指对于每个分支(或称子域),要计算原问题的最优解的下界(对极小化问题).这些下界用来在求解过程中判定是否需要目前的分支进一步划分,也就是尽可能去掉一些明显的非最优点,避免完全枚举.该算法在具体执行时,把全部可行的解空间不断分割为越来越小的子集(称为分支),并为每个子集内的解的值计算一个下界或上界(称为定界).在每次分支后,对凡是界限超出已知可行解值那些子集不再做进一步分支.这样,解的许多子集(即搜索树上的许多结点)就可以不予考虑了,从而缩小了搜索范围.这一过程一直进行到找出可行解为止,该可行解的值不大于任何子集的界限.具体步骤如下:

第 1 步 求解松弛问题.若松弛问题没有最优解(包括无可行解和无有限最优解),则原始问题也没有最优解;若松弛问题有最优解 x^0 ,且 x^0 是整数向量,则 x^0 是原始问题的最优解,输出 x^0 ;否则,令 $\Omega := \{x^0\}$, $U := +\infty$, $\hat{x} := \Phi$,转第 2 步.

第 2 步 若 $\Omega = \Phi$,则转第 7 步,否则,选择一个分枝点 $x^k \in \Omega$, $\Omega := \Omega \setminus \{x^k\}$;

第 3 步 解 x^k 对应的松弛问题,若此问题无解,转第 2 步;

第 4 步 若 x^k 对应的松弛问题的最优值 $z_k \geq U$,则点 x^k 被剪枝,转第 2 步;

第 5 步 若 x^k 对应的松弛问题的最优解 x^0 为整数,则 $U := c^T x^0$, $\hat{x} := x^0$,转第 2 步;

第 6 步 若 x^k 对应的松弛问题的最优解 x^0 不是整数,按 x^0 某个非整数分量生成 x^0 的两个分枝点 x^{0_1} 和 x^{0_2} ,令 $\Omega := \Omega \cup \{x^{0_1}\} \cup \{x^{0_2}\}$,转第 2 步;

第 7 步 若 $\hat{x} := \Phi$, $U := +\infty$,则原始问题无解;否则,为原始问题的最优解, U 是最优值,计算停

止.

如图 3 所示分支定界算法求解最优管径和埋深流程.

3 实 例

考虑一块 300 m×300 m 的场地,原始地貌采用空间曲面 2 * peaks 描述,如图 4 所示.经场平土后,所得场地地形情况如图 5 所示;场平土后,场地内汇水区域划分及雨水管线的敷设情况如图 6 所示.

3.1 分步优化设计

场地平土坡度约束: $0.003 \leq slope \leq 0.02$
如果取土石填挖费用为 $k = 18$ 元 / m^3 ,则场地最终平土如下:

$H = -0.832 + 0.003X + 0.003Y$

土石填挖量为: $V_s = 3.336\ 1 \times 10^4\ m^3$

填挖差值: $V_c = -1.438\ 8 \times 10^{-13}\ m^3$

总体费用为: $F_1 = k \times V_s = 6.005 \times 10^4$ 元

在给定平土场地横向坡度 $a = 0.003$,纵向坡度 $b = 0.003$,划分汇水区域如下:

设计采用重现期 $T = 1a$ 的暴雨强度设计

$$q = \frac{167A_1(1 + ClgT)}{(t_1 + mt_2)^c}$$
$$= \frac{16.7}{(10t + 2t_2)^{0.784}}L/(s \cdot 10^4\ m^{24})$$

径流系数 $C = 0.6$

设计流量如表 1:

表 1 汇水区流量						
Tab.1 The partitions of catching area						
汇水区域 / hm^2	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
设计流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	0.363 3	0.620 8	0.816 9	0.363 3	0.620 8	0.363 3

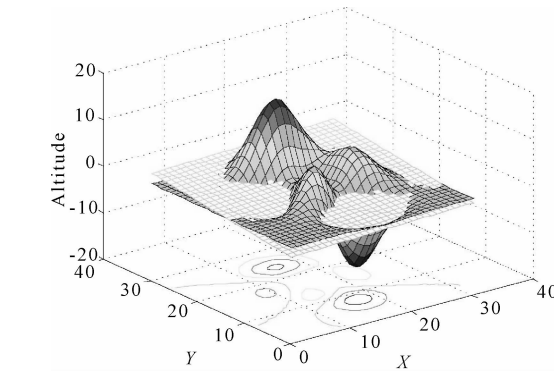


图 5 平土地

Fig.5 The leveling ground

可行管径集合如下(单位 mm)

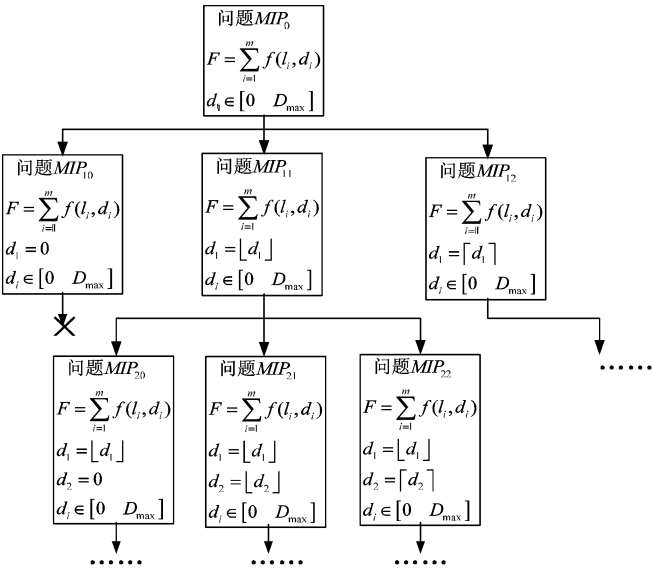


图 3 分支定界算法求解管网最优布置

Fig.3 The algorithm flow for optimization of rainwater pipe layout

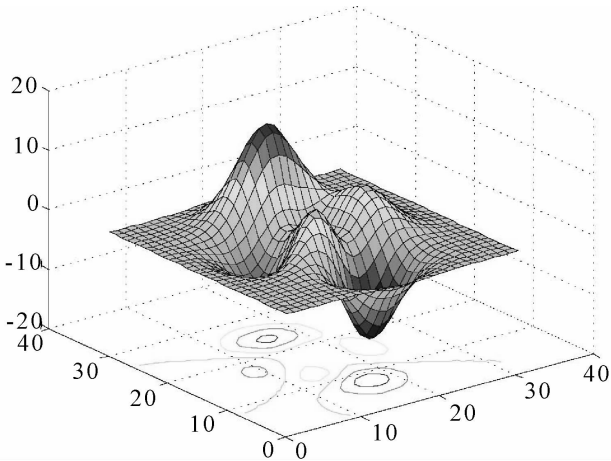


图 4 原始地貌

Fig.4 The original landform

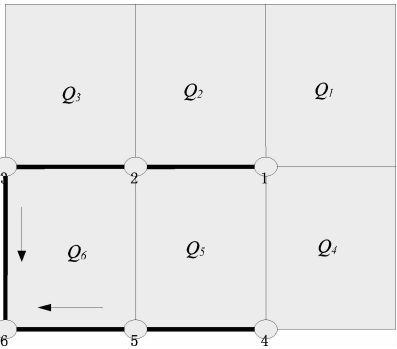


图 6 汇水区域划分(300 m×300 m)

Fig.6 Partitions of the catching area (300 m×300 m)

{300,350,400,500,600,700,800,900,1000,1100,1200,1350,1500,1650,1800,2000}mm

管道选取钢筋混凝土管满流设计

流速约束: $0.75 \text{ m/s} \leq v \leq 5 \text{ m/s}$

埋深约束: $0.7 \text{ m} \leq h \leq 7 \text{ m}$

最小坡度: 3‰

采用分支定界算法,计算在给定场地横向坡度 $a = 0.003$,纵向坡度 $b = 0.003$ 的情况下,管网最优设计如下:

表2 分步设计结果

Tab. 2 The stepwise design results

管段编号	管长 /m	管径 /mm	坡度 /‰	流速 /m · s ⁻¹	管底标高 /m		平均埋深 /m
					起点	终点	
1—2	100	600	3.5	1.284 9	1.300 0	2.050 1	1.675 1
2—3	100	700	4.5	1.613 2	2.050 1	2.899 4	2.474 8
3—6	150	700	7.8	2.122 8	2.899 4	4.316 4	3.607 9
4—5	100	600	3.5	1.284 9	1.300 0	1.950 1	1.625 1
5—6	100	600	10.2	2.195 8	1.950 1	3.272 5	2.611 3
成本	$F_2 = 3.302\ 6 \times 10^5$ (元)						

总体费用为: $F = F_1 + F_2 = 3.903\ 1 \times 10^5$ 元.

3.2 综合优化设计

采用上文中给出的分支定界算法,计算场地的平土平面如下:

$$H = -2.578\ 9 + 0.010\ 9X + 0.006\ 7Y$$

土石填挖量为: $V_s = 8.586\ 7 \times 10^4 \text{ m}^3$

填挖平衡差值: $V_c = 1.989\ 5 \times 10^{-13} \text{ m}^3$

平土费用为元: $F_1 = k \times |V| = 1.545\ 6 \times 10^5$

表3 整体设计结果

Tab. 3 The integrated design results

管段编号	管长 /m	管径 /mm	坡度 /‰	流速 /m · s ⁻¹	管底标高 /m		平均埋深 /m
					起点	终点	
1—2	100	600	3.5	1.284 9	1.300 0	1.259 1	1.279 6
2—3	100	700	4.5	1.613 2	1.259 1	1.417 5	1.338 3
3—6	150	800	3.8	1.625 3	1.417 5	1.779 5	1.598 5
4—5	100	600	3.5	1.284 9	1.300 0	1.159 1	1.229 6
5—6	100	600	10.2	2.195 8	1.159 1	1.690 5	1.424 8
成本	$F_2 = 8.791\ 1 \times 10^4$ (元)						

该方案总体费用为: $F = F_1 + F_2 = 2.424\ 7 \times 10^5$ 元,小于分步设计的总体费用 $F = 3.903\ 1 \times 10^5$. 相对于分布优化的设计,整体设计的场地平土坡度有所增加,其费用也较分布设计的高一些. 因为场地坡度的增加,使得整体设计方案中的管网铺设坡度有所减少,其平均埋深也变小,进而使得管网的铺设费用明显减少,综合之前的平土费用,整体设计方案的费用比分布设计费用更小.

4 结 论

场地的平土坡度同时影响土石填挖费用和管网铺设费用,所以采用综合的优化设计能够保证两个阶段的总体费用最小. 分析设计实例的结果可以发现,分步的设计方案,能够保证最小的土石填挖费用. 但是依照土石填挖费用最小确定的场地平土坡度,并不一定能够得到最小的管网铺设费用. 在综合的设计方案中,土石填挖量并不是最小,但是因为合适的场地平土坡度,使得管网的铺设费用较分步的设计的费用更小,并且其节省费用大于土石填挖增加的费用. 所以,在一定情况下,适当地放宽土石平衡的条

件或者增加土石填挖的费用可以节省更多的管网布置费用,从而使得总体的设计费用更小.

参考文献 References

- [1] 杨秋侠、张彦青. 场地平土标高的优化[J]. 工程勘察, 2009(8): 72-75.
YANG Qiu-xia, ZHANG Yan-qin. The optimization of site leveling [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(8): 72-75.
- [2] 杨秋侠. 场地管线综合设计[M]. 北京: 北京建材工业出版社, 2005.
YANG Qiu-xia. Design of Complex Pipeline for Site[M]. China Building Material Industry Publishing House, 2005.
- [3] 周王文, 赵洪宾. 排水管网理论与计算 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
ZHOU Wang-wen, ZHAO Hong-bin. Theories and Calculations of Urban Drainage Network [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [4] 朱家松, 龚健雅, 郑皓. 遗传算法在管网优化设计中的应用[J]. 武汉大学学报, 2003(3): 363-367.
ZHU Jia-song, GONG Jian-ya, ZHEN Hao. Application of Genetic Algorithm to Water Distribution System Design Optimization [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003(3): 363-367.
- [5] 薛福连. 厂区雨水管道系统的设计[J]. 化工设计, 2005, 15(2): 24-25.
XUE Fu-lian. Design of Rain Water Pipeline in Plant Area[J]. Chemical Engineering Design, 2005, 15(2): 24-25.
- [6] 王磊, 张宗国, 吕谋. 蚁群算法在雨水管道系统优化设计中的新尝试[J]. 青岛理工大学学报, 2007(1): 61-64.
WANG Lei, ZHANG Zong-guo, Lv Mou. Application of ant colony algorithm on optimized design for drainage systems[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2007(1): 61-64.
- [7] 江伟民. 市政管线综合设计与研究[J]. 市政技术, 2008(4): 273-276.
JIANG Wei-min. Comprehensive Design and Research of Municipal Pipeline [J]. Municipal Engineering Technology, 2008(4): 273-276.
- [8] 于世艳, 马洪滨, 何群. 综合管线节点竖向分析系统的研究与实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2007(2): 131-134.
YU Shi-yan, MA Hong-bin, HE Qun. Research and Realization of Vertical Analysis System of the Synthesis Pipelines Node[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2007(2): 131-134.

The integrated optimal design for ground leveling and layout of rainwater pipe

YANG Qiu-xia¹, DU Xian², DU Shan³

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Wuhan Design & Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Wuhan 430064, China;

3. WISDRI Engineering & Research Incorporation Limited, Wuhan 430064, China)

Abstract: This paper firstly investigates the elevation and slope for ground leveling with minimal volume of filling-digging rock-soil. Considering the balance between filling and digging, the optimal design of ground level is proposed. Given the slope of ground, the layout of rainwater pipe is to calculate the optimal pipe diameter, pipe slope and buried depth to make the investment cost minimal. Typically, the design procedures above are stepwise implemented with individual cost minimal. In this paper, the ground leveling and rainwater pipe layout are simultaneously considered to get a minimal total cost, and an integrated model is presented for the vertical layout of rainwater pipe network. Finally, the illustrated example verifies the efficiency of the proposed integrated model.

Key words: ground leveling; layout of rainwater pipe; integrated design; stepwise design