

文章编号: 1674—8247(2022)05—0001—04

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.05.001

# 基于地质实体的铁路选线优化与决策模型设计

刘琦 谢毅 胡新明 蒲浩 吕希奎

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**铁路选线设计是在三维空间决定线路位置的决策优化过程,特别是山区,河谷深切、构造复杂,不良地质普遍发育。岩溶、顺层、滑坡、断层破碎带和崩塌等主要不良地质现象分布广泛,比选线路方案时对地质因素考虑得最多,更加注重“地质选线”,地质因素往往成为线路方案取舍的决定因素。采用智能选线技术,依据技术标准并考虑约束条件可自动生成经济、节能、环保、合理的线路优化方案,为此,本文就遗传算法的基因编码、线路染色体、终止准则优化模型实施步骤开展设计。研究成果对指导西南山区铁路选线设计具有重要的优化作用。

**关键词:**遗传算法;选线优化;决策模型

**中图分类号:** U212.32      **文献标识码:** A

## Railway Route Optimization and Decision-making Model Design Based on Geological Entities

LIU Qi XIE Yi HU Xinming PU Hao LV Xikui

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

1

**Abstract:** Railway route design is a process of optimizing the decision made for railway location in 3D space. Especially, in mountainous areas, where deep river valleys are deep, structures are complex, unfavorable geological conditions are generally developed, and karst, bedding, landslide, fault fracture zone, collapse, and other unfavorable geological conditions are widely distributed, geological factors are the most important factors to be considered during route selection, and more attention will be paid to "geological consideration-based route selection". Geological factors often become the decisive factors for the route selection of railway. By applying intelligent route selection technology, an economical, energy-saving, eco-friendly and reasonable railway location optimization scheme can be generated automatically according to technical standards and constraints. Therefore, this paper optimizes the model implementation steps and designs the railway location according to the gene coding, route chromosome and termination criterion of genetic algorithm. The research results of this paper can optimize the guidance on the route design of railway in southwest mountainous areas.

**Key words:** genetic algorithm; route optimization; decision-making model

铁路选线设计是在三维空间决定线路位置的决策优化过程,特别是山区,河谷深切、构造复杂,不良地质普遍发育。岩溶、顺层、滑坡、断层破碎带和崩塌等不良地质现象分布广泛,比选线路方案时更加注重

“地质选线”,地质因素往往成为线路方案取舍的决定因素<sup>[1]</sup>。合理的线位不仅能降低铁路施工中的风险,有效减少后期线路维护成本,提高运营安全,更会对沿线及相关地区的政治、经济、文化、环境等产生长久

收稿日期:2022-06-30

作者简介:刘琦(1976-),男,高级工程师。

引文格式:刘琦,谢毅,胡新明,等. 基于地质实体的铁路选线优化与决策模型设计[J]. 高速铁路技术,2022,13(5):1-4.

LIU Qi, XIE Yi, HU Xinming, et al. Railway Route Optimization and Decision-making Model Design Based on Geological Entities[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5):1-4.

深远的影响。采用智能选线技术,依据技术标准并考虑约束条件可自动生成经济、节能、环保、合理的线路方案<sup>[2]</sup>。遗传算法(Genetic Algorithm)是一种模拟生物进化的全局搜索优化算法,对目标函数和约束条件没有可微和连续的限制,搜索可遍及整个解空间,具有找到接近全局最优解的优势,因而更适用于铁路智能选线。

基于遗传算法的线路优化已成为当前研究热点。在考虑不良地质和地质体模型基础上,将三维空间选线优化设计归结为以线路三维几何参数为设计变量,以铁路选线设计规范及其它相关技术条件为约束条件,以综合费用为目标函数的优化问题,做好基因编码、线路染色体、终止准则优化模型实施步骤开展设计<sup>[3]</sup>。在模型构建过程中,须以地质选线、环保选线、规划选线、重大工程优先选址理念为指导,对影响选线的各种约束条件(如不良地质、环境敏感区域等)进行标识、划分和判断,如线路处于禁止穿行区域,则应舍弃该方案。对不良地质区域,线路应避免或垂直大角度穿越,根据区域敏感等级等选线约束条件,按照影响程度及占用面积计算工程费和环境保护等费用,从而体现出智能选线优势。本文研究成果对指导山区铁路选线优化具有重要的作用。

## 1 基因编码

以优化模型中的设计变量  $N$ 、 $E$ 、 $R$ 、 $K$ 、 $H$  作为线路染色体的基因进行编码,在垂直于线路起终点航空线方向上,按一定间距生成一系列分割面,线路控制点位于这些分割面上,以控制点相对于航空线的偏移距为基因编码控制点的坐标,采用该方法进行平面交点坐标的编码,如图1所示。

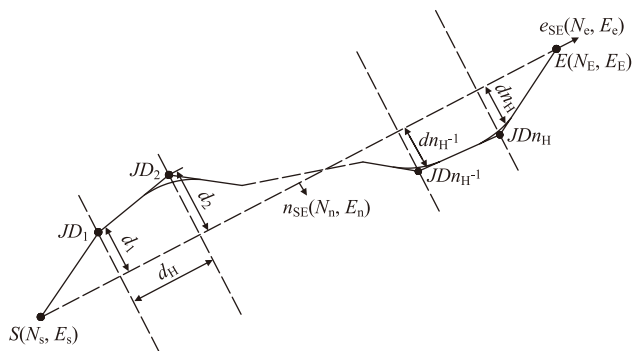


图1 线路平面交点编码图

图1中  $S$  和  $E$  为线路起终点,  $e_{SE}$  为起点指向终点的单位矢量,  $n_{SE}$  为  $e_{SE}$  逆时针旋转  $90^\circ$  后的矢量,虚线为垂直于  $e_{SE}$  的分割面,分割面之间的间距为  $d_H$ ,  $d_i$

为第  $i$  个交点相对于起终点连线的偏移量(右侧为正,左侧为负),交点经纬距坐标  $(N_i, E_i)$  与偏移量  $d_i$  之间存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} N_i \\ E_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_s \\ E_s \end{bmatrix} + id_H \begin{bmatrix} N_e \\ E_e \end{bmatrix} + d_i \begin{bmatrix} N_n \\ E_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

平面切割线的间距  $d_H$  可采用如下经验公式:

$$d_H = 1.5R_{\min} + L_{Z\min} \quad (2)$$

式中:  $L_{Z\min}$ ——最小夹直线长。

对于纵断面设计变量,与平面类似,也可先生成一系列法向量为  $e_{SE}$  的分割面(如图2所示),分割面的间距  $d_v$  可取规范中的最小坡长。设分割面总数为  $n_v$ ,各分割面与线路的交点为  $JD_1, JD_2, \dots, JD_{nV}$ ,以这些交点为变坡点可形成链式坡,对该链式坡进行整饰后,得到线路纵断面设计变量  $K$  和  $H$ ,链式坡变坡点的里程  $k$  可通过平面线位与分割面求交后得到,高程  $h$  作为基因。

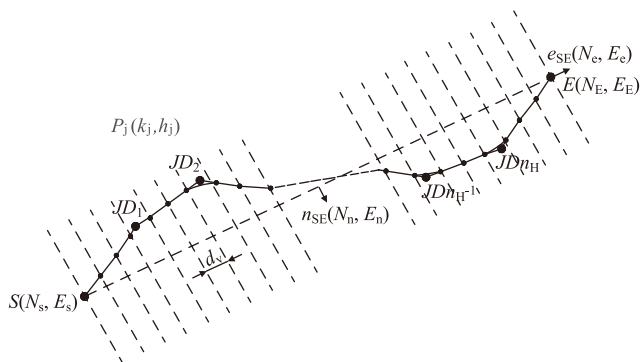


图2 线路纵面分割面图

实数编码具有精度高、便于大空间搜索、运算简单的特点,特别适合于优化问题<sup>[4]</sup>。因此采用十进制浮点数(实数)编码,相比之下,这样做不仅无需转换数制和数据类型便于理解,而且节省遗传操作时间。因此,采用实数编码方式,  $X_a$  为第  $a$  个染色体,  $\lambda_{a,b}$  为第  $a$  个染色体的第  $b$  个基因,  $d_{a,i}$ 、 $R_{a,i}$ 、 $h_{a,j}$  分别为染色体  $a$  第  $i$  个交点的偏移距、半径和第  $j$  个变坡点标高。线路三维空间染色体为:

$$X = [\lambda_{a,1}, \lambda_{a,2}, \dots, \lambda_{a,n}] = [d_{a,1}, d_{a,2}, \dots, d_{a,nH}, R_{a,2}, R_{a,nH}, h_{a,1}, h_{a,2}, h_{a,nV}] \quad (3)$$

其中,  $d_{a,k} = \lambda_{a,k}$ ,  $R_{a,k} = \lambda_{a,nH+k}$ ,  $h_{a,k} = \lambda_{a,2nH+k}$

式(3)中染色体的基因由3部分组成:平面交点基因片段  $(d_{a,1}, d_{a,2}, \dots, d_{a,nH}, \dots)$ 、平曲线半径基因片段  $(R_{a,1}, R_{a,2}, \dots, R_{a,nH})$  和纵断面基因片段  $(h_{a,1}, h_{a,2}, h_{a,nV})$ 。采用分步编码的方式最终生成整体基因序列。

## 2 线路染色体形成

线路染色体基因中的3个基因片段并非完全独立,平面交点坐标影响平曲线半径的选配,纵断面基因的产生必须以平面为基础。基因编码过程中,充分考虑优化模型中平面几何约束、纵断面几何约束、平纵组合约束、环境影响和地质影响约束作用<sup>[5]</sup>。采用逐步编码方式形成线路三维染色体,基本流程如下:

①形成平面交点基因片段。

②依据平面交点坐标和约束条件形成平曲线半径基因片段。

③依据半径选配缓长和平面整饰,形成线路平面。

④计算纵面分割面与线路平面的交点坐标,确定链式坡变坡点里程。

⑤形成纵断面基因片段。

⑥坡段整饰,形成纵断面方案。

现以线路初始种群生成过程为主,染色体中3组基因片段的形成方法为:

(1)形成平面基因片段

平面基因片段包括平面交点偏移距( $d_{i,1}, d_{i,2}, d_{i,n}$ )和平曲线半径( $R_{i,1}, R_{i,2}, R_{i,n}$ )两部分。为了实现全局寻优且不失一般性,平面基因片段采用随机数方式形成。平面交点基因片段中的 $d_i$ 采用正态分布随机数确定,为保证线路尽可能顺直, $d_i$ 的正态分布函数以0为期望值, $d_i$ 在选线地理环境的带状地形宽度范围内 $[-W, W]$ 取值。

$$d_i = SD(0, k^2), k \leq W \quad (4)$$

式中, $k$ 越小,生成的平面方案越顺直,反之,生成的平面方案展线越长,也越能适应复杂地质区域选线。

通过式(4)确定平面交点位置后,可依次计算出各平曲线能选配的最大曲线半径 $R_{\max}$ 。考虑规范最小曲线半径 $R_{\min}$ 的要求,基因片段中 $R_i$ 的取值区间为 $R_{\min} \sim R_{\max}$ ,在该区间内采用均匀随机数便可获得 $R_i$ 。形成平面基因片段后,根据规范选对应应的缓和曲线长度,进而生成线路平面方案。

(2)形成纵面基因片段

以生成的纵断面方案满足线路穿越地质体条件和填挖土方最小为目标,自起点到终点逐步计算各链式坡变坡点的设计标高。设 $P_i(k_i, h_i), P_{i+1}(k_{i+1}, h_{i+1})$ 为链式坡任意坡段的前后两变坡点, $[k_i, k_{i+1}]$ 坡段范围内有 $m$ 个桩号,其中第 $j$ 个桩号处的里程和地面高程分别为 $k_{Ej}$ 和 $h_{Ej}$ 。不考虑约束条件,该坡段的坡度 $i_p'$ 满足:

$$\min \sum_{j=1}^m [i_p'(k_{Ej} - k_i) + h_i - h_{Ej}] \quad (5)$$

求解式(5)得:

$$i_p' = - \sum_{j=1}^m (k_{Ej} - k_i)(h_i - h_{Ej}) / \sum_{j=1}^m (k_{Ej} - k_i)^2 \quad (6)$$

考虑最大限制坡度、坡度代数差、最小净空、地质条件等约束条件,该坡段的坡度容许区间为 $[i_{\min}, i_{\max}]$ 。当 $i_p'$ 属于该区间,则该段坡度 $i_p = i_p'$ ,否则取与 $i_p'$ 最接近的 $i_{\min}$ 或 $i_{\max}$ 。

(3)适应度函数

在遗传算法中使用适应度函数来表达种群中每个个体对其生存环境的适应能力,该函数就是遗传算法中指导搜索的评价函数。遗传算法规定适应度函数必须为非负,并且在任何情况下越大越好。根据线路优化设计目标,采用优化的目标函数作为适应度函数,由于原目标函数为求最小值,所以适应度函数取原目标函数的倒数,将线路优化设计优化问题的适应度函数 $F$ 定义如下:

$$F(i) = 1 - \frac{f(i)}{\sum f(i)} \quad (7)$$

式中: $f(i)$ ——第 $i$ 条线路的总费用值;

$\sum f(i)$ ——所有生成方案的费用值总和;

$F(i)$ ——代表第 $i$ 条线路的遗传适应度。

(4)杂交与改进算法

采用十进制实数编码时,将每个十进制数看做一个基因整体,因为个体本身就是解空间的点,其物理意义很明确。为使杂交前后新旧个体有更大的差异,对算术杂交法进行改进,改进后的算术杂交算子描述如下:

$$\begin{cases} x_1' = b_1 x_1 + b_2 x_2 \\ x_2' = b_2 x_1 + b_1 x_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $b_1 = 0.5 + b$ ,  $b_2 = 0.5 - b$ , ( $b = 0.95\alpha$  或  $b = \alpha$ ),  $\alpha$ 为 $[0, 1]$ 区间随机数。

采用上述改进的算术杂交算子后,为避免不可行个体解的产生,采取在产生子代后逐个判断是否越界,若越界则更换成下面的混合杂交算子来产生新个体,以利于个体的多样性,同时该算子可保证子代不会越界。

$$\begin{cases} x_1' = \beta x_1 + (1 - \beta) x_2 \\ x_2' = \beta x_1 + (1 - \beta) x_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\beta$ —— $[0, 1]$ 区间的随机数。

### 3 终止准则

遗传算法的终止准则一般有两种:

(1)指定代数终止:即达到所指定的代数后,终止运行,其缺点是终止时有可能仍处于高速进化状态,得到解不是最优解;或指定代数过大,已经达到最优解,还在运算,降低优化速度。

(2)指定相临两代进化非常微小时终止,其缺点是有可能是局部最优,而非全局最优。

因此,可将两种终止准则结合来。当达到给定的遗传代数之前就出现进化甚微时则加大变异操作的比例,继续进化,如果再连续5代进化依然较慢时则终止;如果在指定路段代数的最后几代种群处于明显进化阶段,则增加迭代次数,直到进化程度非常微小时停止迭代。遗传操作终止流程如图3所示。

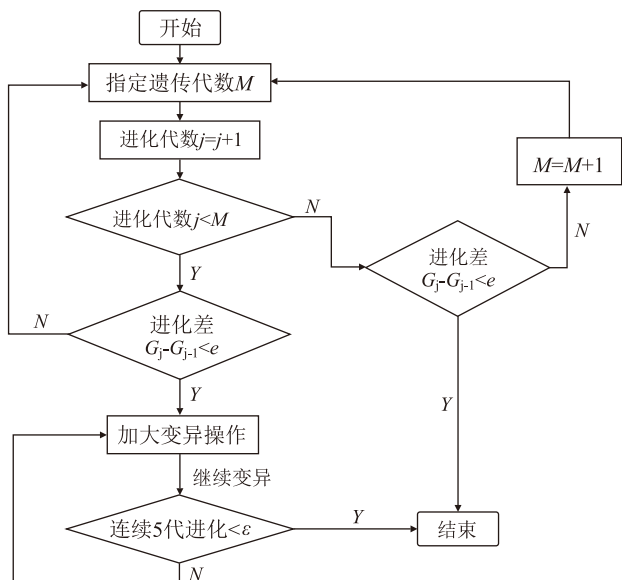


图3 遗传操作终止流程图

### 4 应用与实例

基于上述设计方法,对西南山区某铁路线段进行了线路方案的优化,其中权重 $\alpha = \beta = \lambda = \gamma = 1/4$ ,线路为I级铁路,速度目标值160 km/h,最小曲线半径1 600 m,最小夹直线长110 m,限制坡度12‰,到发线有效长度650 m,最小站间距7.8 km,最大站间距15 km<sup>[6]</sup>。纵断面切割面间距取最小坡段长350 m,平面切割线的间距 $d_H$ 采用经验式(2)确定为2 510 m。

### 5 结论

遗传算法是一种基于生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法<sup>[7]</sup>,它将问题的解表示成“染色体”,在执行遗传算法之前,给出一群“染色体”,就

是假设解。然后,把这些假设解置于问题的“环境”中,并按适者生存的原则,从中选择出较适应环境的“染色体”进行复制,再通过交叉、变异过程产生更适应环境的新一代“染色体”群。一代一代地进化,最后就会收敛到最适应环境的一个“染色体”上,它就是问题的最优解<sup>[8]</sup>,从选线优化与决策模型设计可得:

(1)遗传算法作为一种全局的优化算法,其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换,搜索不以梯度信息为基础,尤其适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂非线性问题。

(2)遗传算法实现中的步骤包括:编码方法、初始种群的生成、遗传算子设计、终止准则。通过遗传算法各步骤来拟合理论变差函数的参数,整个插值过程会更加自动化,同时更容易得到全局最优的插值结果。

(3)铁路三维空间线形优化问题为复杂、困难的多目标优化问题,基于遗传算法在运行过程中不易受外界环境变化的影响,因此利用遗传算法来解决铁路线路方案优化问题是恰当与有效的方法。

(4)基于多目标遗传算法,提出适用于铁路选线的智能优化模型,通过对各类约束条件的检测,可有效地对不满足约束的区段进行调整操作,从而把控优化方向,淘汰劣势方案,最终筛选出技术可行、经济合理的线路方案供设计者参考。

### 参考文献:

- [1] 易思蓉. 铁路数字化选线设计系统的理论与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.  
YI Sirong. Theory and Method of Design System of Railway Digital Route Selection[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011.
- [2] 吕希奎, 陈进杰. 铁路数字化选线三维地质环境建模方法[J]. 铁道学报, 2015, 37(8): 91-97.  
LV Xikui, CHEN Jinjie. Three-Dimensional Geological Environment Modeling Method for Digital Railway Alignment[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(8): 91-97.
- [3] 蒲浩, 赵海峰, 李伟. 基于动态规划的铁路三维空间智能选线方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(2): 55-61.  
PU Hao, ZHAO Haifeng, LI Wei. A 3D Spatial Intelligent Route Selection Approach for Railway Alignments Based on Dynamic Programming[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(2): 55-61.
- [4] 李伟, 蒲浩, 赵海峰, 等. 基于分步编码改进遗传算法的铁路智能选线[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(5): 831-838.  
LI Wei, PU Hao, ZHAO Haifeng, et al. Intelligent Railway Alignment Optimization Based on Stepwise Encoding Genetic

(下转第19页)

- Sealing Gaskets [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1790 – 1796.
- [9] 薛光桥, 郭志明, 李拼, 等. 和燕路隧道盾构防水密封垫极限防水性能试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(9): 1272 – 1278.
- XUE Guangqiao, GUO Zhiming, LI Pin, et al. Experimental Study on Extreme Waterproof Performance of Waterproof Gasket of Heyan Road Shield Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(9): 1272 – 1278.
- [10] 丁杨, 孟伟, 邓文武. 盾构管片橡胶密封垫断面形式设计及耐久性研究[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 45 – 49.
- DING Yang, MENG Wei, DENG Wenwu. Study on Durability and Section Design of Sealing Rubber Pad of Shield Segment [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(4): 45 – 49.
- [11] 朱瑶宏, 王靖禹, 董子博, 等. 盾构法联络通道密封垫设计及防水试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(1): 110 – 118.
- ZHU Yaohong, WANG Jingyu, DONG Zibo, et al. Design of Sealing Gasket of Connection Gallery Bored by Shield and Its Waterproofing Test [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(1): 110 – 118.
- [12] 张稳军, 张高乐, 李宏亮, 等. 盾构隧道管片接缝密封垫防水性能及受施工荷载影响研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 130 – 141.
- ZHANG Wenjun, ZHANG Gaole, LI Hongliang, et al. Waterproof Performance of Sealing Gaskets and Impact of Construction Loads on Segment Joints in Shield Tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 130 – 141.
- [13] 张琦, 时剑文, 索双富, 等. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的橡胶材料有限元分析[J]. 合成橡胶工业, 2020, 43(6): 468 – 471.
- ZHANG Qi, SHI Jianwen, SUO Shuangfu, et al. Finite Element Analysis of Rubber Materials Based on Mooney-Rivlin Models and Yeoh Models [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2020, 43(6): 468 – 471.
- [14] 张良, 李忠华, 马新强. 橡胶 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型的参数特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(S2): 427 – 430.
- ZHANG Liang, LI Zhonghua, MA Xinqiang. Study on Parameter Characteristics of Rubber Mooney-Rivlin Model [J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(S2): 427 – 430.
- [15] 雷震宇. 盾构隧道管片橡胶密封垫的优化设计方法[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 770 – 774.
- LEI Zhenyu. An Optimal Design Approach for the Rubber Sealing Gasket in Shield Tunneling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 770 – 774.

(上接第4页)

- Algorithm [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5): 831 – 838.
- [5] 韩瑞峰, 张永奎, 王逸凝, 等. 基于遗传算法的费托合成反应动力学模型参数优化[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(4): 371 – 374.
- HAN Ruifeng, ZHANG Yongkui, WANG Yining, et al. Optimization of Parameters of Fts Kinetic Model by Genetic Algorithm [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(4): 371 – 374.
- [6] 刘江涛, 何娘者. 基于 Google Earth 和 BIM 的川藏铁路数字选线应用研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(5): 75 – 79.
- LIU Jiangtao, HE Niangzhe. Application Study on Sichuan-Tibet Railway Digitalizing Line Location Based on Google Earth and BIM [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(5): 75 – 79.
- [7] 陈进杰, 吕希奎. 高速铁路区间节能坡设计方法研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(12): 83 – 89.
- CHEN Jinjie, LV Xikui. Research on Method of Energy Saving Gradient Design for High-Speed Railway Sections [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(12): 83 – 89.
- [8] WINKELR. On a Generalization of Bernstein Polynomials and Bézier Curves Based on Umbral Calculus [J]. Computer Aided Geometric Design, 2014, 31(5): 227 – 244.