

# 单轴式单轨转向架空气悬架参数优化

杜子学 崔钰敏 唐 飞

(重庆交通大学轨道交通研究院, 400074, 重庆//第一作者, 教授)

**摘 要** 对单轴转向架的结构以及空气悬架进行分析, 建立了单轴式单轨车辆系统的动力学拓扑结构, 并运用动力学软件 SIMPACK 建立动力学仿真模型。通过 ModeFRONTIER 软件的灵敏度分析功能, 对单轴转向架空气悬架参数进行筛选, 得到对导向力矩和走行轮侧偏合力这 2 个优化目标影响显著的空气悬架参数, 分别为空气弹簧的纵向刚度、纵向阻尼和垂向阻尼。利用改进型遗传算法对这 3 个参数进行多目标优化。优化后的导向力矩较优化前减小了 4.76%, 走行轮侧偏合力较优化前减小了 7.57%, 改善了车辆的曲线通过性能。

**关键词** 单轨; 车辆; 单轴转向架; 空气悬架

**中图分类号** U270.331:U232

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.06.011

## Optimization of Air Suspension Parameters for the Single-axle Monorail Bogie

DU Zixue, CUI Yumin, TANG Fei

**Abstract** With an analysis of the single-axle bogie structure and air suspension, the dynamic topological structure of monorail vehicle system is established, and the dynamic software SIMPACK is used to build a dynamic simulation model. Then, with the sensitivity analysis of ModeFRONTIER software, the parameters of the single-axle bogie air suspension are screened. Thus, the parameters that have significant influence on the oriented torque and the cornering force of running wheel are obtained, they are the longitudinal stiffness, longitudinal damping and vertical damping of the air suspension respectively. An improved genetic algorithm is used to implement multiple-target optimization for the above three parameters. The oriented torque after improvement is reduced by 4.76% and the cornering force of running wheel by 7.57%, resulting in better vehicle curve passing performance.

**Key words** monorail; vehicle; single-axle bogie; air suspension

**Author's address** Research Institute of Rail Transit, Chongqing Jiaotong University, 400074, Chongqing, China

在转向架、轨道梁、道岔等方面有很大差别,以致于在动力学性能评价方式及走行机理上有很大不同。单轴转向架是只有一个轮对的非传统转向架<sup>[1]</sup>,在降低车辆自重、缓和轮轨系统作用力和改善曲线通过性能等方面有先天优势,因而具有广阔的应用前景。其悬挂系统选择空气弹簧也有别于以往带沙漏式弹簧的单轴车辆,车辆的运行平稳性较高,且具有非线性特性,能降低轮轨作用力和磨耗,减少噪声。当车辆行驶通过曲线轨道时,由于轮胎以及各悬挂系统的非线性特性,车辆与轨道相互作用产生复杂且动态变化的作用力<sup>[2]</sup>,会对车辆的导向性能产生影响,并引起车辆行驶安全性和轮轨磨耗等问题,最终对曲线通过性能造成影响。所以,在单轴式单轨车辆动力学的研究中对导向力矩与走行轮侧偏力进行研究和优化具有重要意义。

## 1 单轴式单轨车辆模型的建立

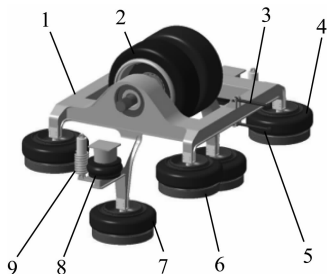
### 1.1 单轴转向架结构

转向架是单轨车辆的关键部件,传递车体与轨道之间的各种荷载<sup>[3]</sup>,保证单轨车辆沿既定轨道安全、稳定运行。单轴转向架由构架、走行轮、水平轮、空气弹簧、垂直和斜向液压减震器以及平衡装置等组成。转向架中部只设置一对走行轮,结构上并不稳定,在驱动或制动工况下,构架受到反转力矩的作用会出现俯仰而失去平衡,所以在构架和车体之间需要设置平衡装置。由于走行轮轮对设置在转向架中部,中央牵引销不再适用,所以采用单拉杆牵引装置来传递车体与转向架之间的牵引力。单轴式单轨车辆转向架的具体结构如图 1 所示,走行轮轮对中置,空气弹簧、横向止挡、垂直和斜向液压减震器布置在转向架中部稳定轮支腿的两侧,液压减震器一前一后布置在空气弹簧旁,且在转向架左右两侧斜对称布置。

### 1.2 空气弹簧理论

空气弹簧装置一般由能够伸缩的胶囊以及附

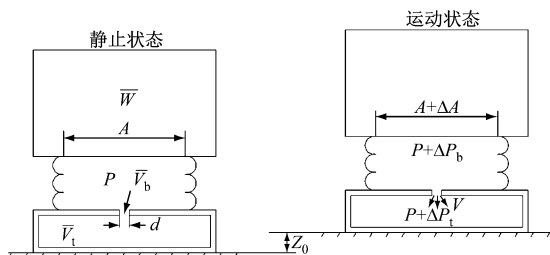
单轴式单轨车辆与传统的轨道交通车辆相比,



注:1——构架;2——走行轮;3——平衡杆;4——导向轮;5——牵引杆;6——安全轮;7——稳定轮;8——空气弹簧;9——液压减振器

图1 单轴式单轨车辆转向架结构

加空气室、高度自动调整阀组成。胶囊和附加空气室通过小孔相连,在静止状态时,空气弹簧内部表面压力  $P$  与胶囊有效受压面积  $A$  的乘积,等于空气弹簧上部的质量  $\bar{W}$ ,即  $\bar{W} = PA$ 。图2为空气弹簧在静止状态、运动状态示意图。



注: $\bar{V}_b$ ——静止状态时胶囊内部容积; $\bar{V}_t$ ——附加空气室内部容积; $d$ ——节流孔的直径; $\Delta A$ ——胶囊有效受压面积增加量; $\Delta P_b$ ——胶囊内部的压力增加量; $V$ ——空气从胶囊流入到附加空气室的体积换算成静止状态时的值; $\Delta P_t$ ——附加空气室内压力的增加量; $Z_0$ ——空气弹簧基础产生的位移

图2 空气弹簧系统的静止与运动状态

如图2所示,如果空气弹簧的基础突然发生位移,胶囊便产生伸缩,导致胶囊内部的容积和有效受压面积发生变化,胶囊上部的质量因受力而运动,这个力的大小等于胶囊内部表面压力与有效受压面积乘积的变化量。另一方面,在胶囊和附加空气室之间的压力差导致一部分空气通过节流孔向压力低的方向流动,此时一部份能量转换成热量,使运动衰减。在分析这样的空气弹簧系统之前,要作如下的假设:

- 1) 胶囊的伸缩量很小,应在高度调整阀的无感带之内;
- 2) 胶囊有效受压面积及内部容积的变化与接近于静止状态时胶囊的微伸缩量成线性变化;
- 3) 胶囊和附加空气室内空气状态的变化是在

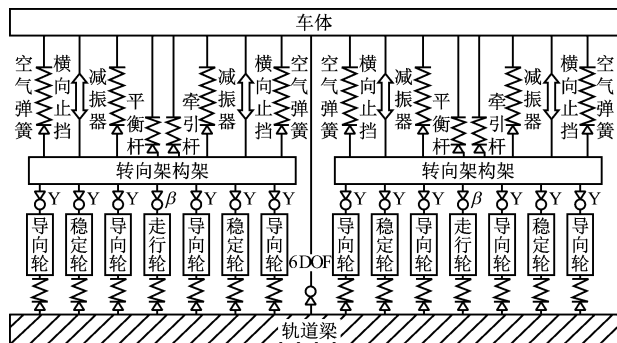
接近于绝热的状态下进行的,这种变化称为体积压缩变化(Polytrope变化);

4) 单位时间之内通过节流孔的空气量与节流孔前后压力差的平方根成正比。

### 1.3 用 SIMPACK 软件建立车辆模型

单轴式单轨车辆系统的结构复杂,不仅在各部件之间存在相互作用力和相对运动,而且在车轮与轨道梁之间也存在着复杂的轮轨耦合关系。

为了方便创建车辆的动力学模型,会对实际车辆系统进行适当假设和简化。在建立动力学模型前,首先建立单轨车辆的拓扑结构<sup>[5]</sup>,如图3所示。



注: $\beta$ 表示走行轮与构架之间的铰接; $r$ 表示水平轮与构架之间的铰接

图3 单轴式单轨车辆系统动力学拓扑图

从拓扑图可以看出,车体与前后转向架构架具有5个自由度,分别为横摆、浮沉、侧滚、点头和摇头;走行轮只有绕  $y$  轴旋转的1个自由度<sup>[6]</sup>;在 SIMPACK 软件模型中无法模拟水平轮的摇头自由度。故单节车辆模型的自由度为19个<sup>[7]</sup>。

为了较好地反映车辆的导向性能和轮胎偏磨,本研究以 36 km/h 速度通过最小曲线半径 100 m 线路时的单轨车辆作为研究对象,进行灵敏度分析和多目标优化。

## 2 设计参数的灵敏度分析

灵敏度分析是一种系统参数对系统状态或输入变化输出变化敏感程度的分析方法,实际上是通过改变相关变量的数值来解释关键指标受这些变量变化所产生的影响规律<sup>[8]</sup>。通过对影响输出的输入参数进行分析,筛选出模型中重要的输入参数,以此对参数的修改进行指导,以减少工作量、提高效率。

### 2.1 灵敏度分析模型

利用 ModeFRONTIER 软件建立灵敏度计算模

型。通过对单轴式单轨车辆的空气悬架参数进行敏感性分析试验,选取了空气弹簧横向、垂向、纵向 3 个方向上的刚度和阻尼等 6 个参数,并对其不同端点位置的设置了相应的取值,如表 1 所示。

表 1 空气弹簧敏感试验的参数取值

序号	参数	端点位置	参数取值/(N/m)
1	纵向刚度 $K_1$	上端点	58 800
		下端点	39 200
2	横向刚度 $K_2$	上端点	58 800
		下端点	39200
3	垂向刚度 $K_3$	上端点	96 000
		下端点	64 000
4	纵向阻尼 $C_1$	上端点	3 000
		下端点	2 000
5	横向阻尼 $C_2$	上端点	3 000
		下端点	2 000
6	垂向阻尼 $C_3$	上端点	6 000
		下端点	4 000

2.2 灵敏度计算结果分析

通过空气弹簧的 6 个性能参数对车辆的导向力矩和走行轮侧偏合力进行优化,按表 1 所示的序号依次改变车辆的悬架参数,对参数的敏感度进行分析。

通过灵敏度分析得出空气弹簧纵向刚度、纵向阻尼以及垂向阻尼对导向力矩的影响显著,其比例分别为 34.1%、23.6% 和 22.8%;空气弹簧纵向刚度、纵向阻尼以及垂向阻尼对走行轮侧偏合力影响显著,其比例分别为 29.6%、24.8% 和 23.2%。

3 多目标优化

通过对空气悬架参数进行的灵敏度分析,选择空气弹簧纵向刚度、纵向阻尼以及垂向阻尼这 3 个影响显著的参数作为设计变量。

如图 4 所示,车辆通过曲线线路时,轨道梁与导向轮相互作用产生促使走行轮径向调节的导向力矩,迫使车辆沿既定的轨道运行。车辆最大导向力矩  $M_{\text{导}}$  为:

M\_{\text{导}} = \frac{(F\_{d2} + F\_{d3} - F\_{d1} - F\_{d4}) \cdot L\_1}{2} \tag{1}

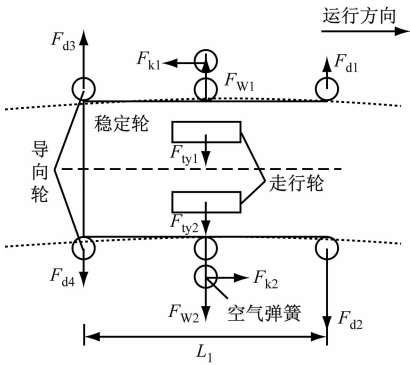
式中:

$F_{d1}$ 、 $F_{d2}$ 、 $F_{d3}$  和  $F_{d4}$ ——分别为 4 个导向轮的横向力;

$L_1$ ——导向轮的纵向间距。

车辆通过曲线时转向架导向力矩越小,说明曲

线通过性越好。另外,车辆走行轮严重偏磨损会造成轮胎附着能力大幅降低、车辆驱动效率低以及制动距离长等问题,严重影响车辆的运行安全和运行节能,所以本文将导向力矩和走行轮侧偏力作为优化的目标<sup>[9]</sup>。



注: $F_d$ ——导向轮横向力; $F_k$ ——空气弹簧纵向力;  
 $F_w$ ——稳定轮横向力; $F_{ty}$ ——走行轮侧偏力

图 4 车辆通过弯道时转向架受力图

为了在保证曲线通过性能的同时不降低车辆的稳定性、舒适性等其他动力学性能,设置的约束条件应包括车辆倾覆系数、轮胎减载率等,并满足抗脱轨稳定性要求。

采用 ModeFRONTIER 软件与 SIMPACK 软件联合建立优化模型,如图 5 所示。

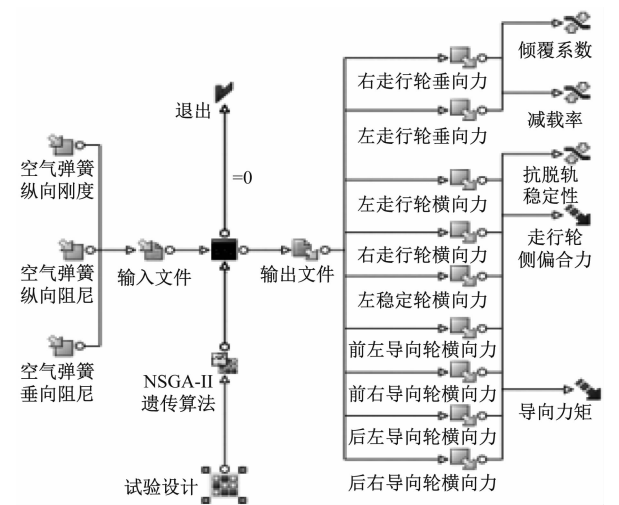


图 5 车辆联合优化模型

本文采用非支配排序遗传算法的第二代算法 (NSGA-II)<sup>[10]</sup> 对车辆动力学模型进行 1 000 次迭代,最后目标函数值随着优化均收敛到一点,如图 6、图 7 所示。

如图 8 ~ 10 所示,导向力矩随着空气弹簧纵向

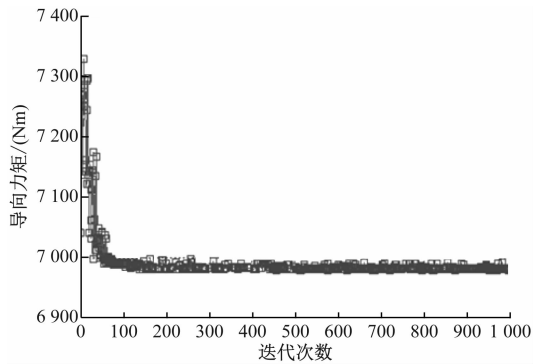


图6 导向力矩迭代过程

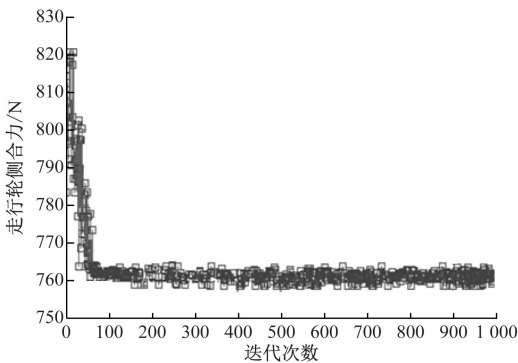


图7 走行轮侧偏合力迭代过程

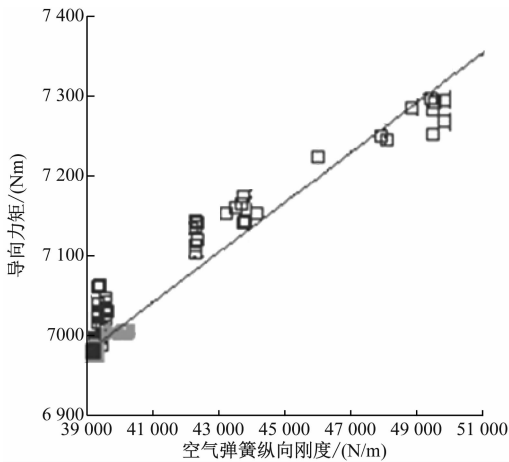


图8 导向力矩与空气弹簧纵向刚度的线性关系

刚度、纵向阻尼的增大而增大,随着垂向阻尼的增大而减小,故应适当减小空气弹簧纵向刚度、纵向阻尼,并增大垂向阻尼,从而有利于减小转向架导向力矩,使单轨车辆具有更好的导向性能。

如图11~13所示,车辆走行轮侧偏合力随着空气弹簧纵向刚度、纵向阻尼的增大而增大,随着垂向阻尼的增大而减小,故应适当减小空气弹簧纵向刚度和纵向阻尼,以及适当增大垂向阻尼,从而有利于减小走行轮侧偏合力,减小轮胎偏磨。

经分析对比,车辆的初始导向力矩值为7329

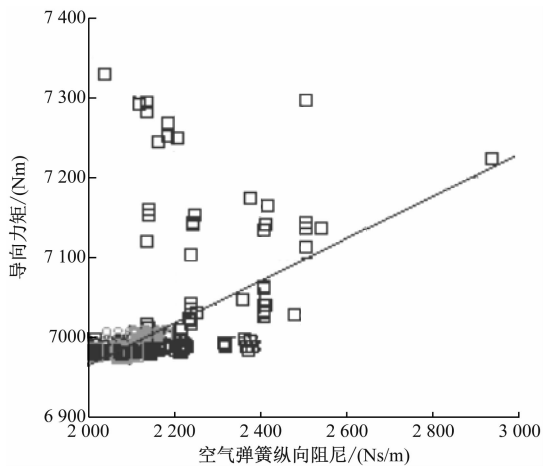


图9 导向力矩与空气弹簧纵向阻尼的线性关系

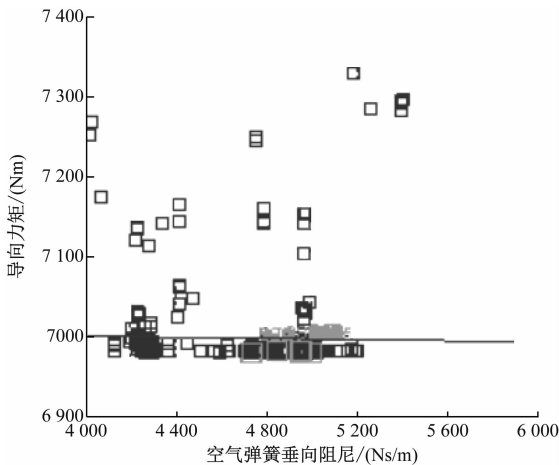


图10 导向力矩与空气弹簧垂向阻尼的线性关系

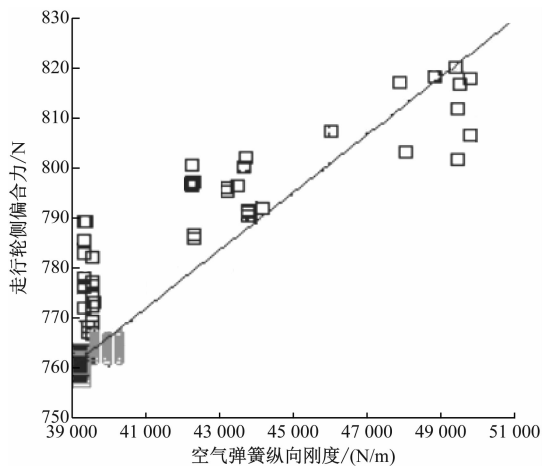


图11 走行轮侧偏合力与空气弹簧纵向刚度的线性关系

Nm,优化后的导向力矩为6979.96 Nm,较优化前减小了4.76%;走行轮侧偏合力初始值为820.73 N,优化后值为758.62 N,较优化前减小了7.57%,达到了优化目的,在一定程度上改善了单轴转向架单轨车辆的曲线通过性能。

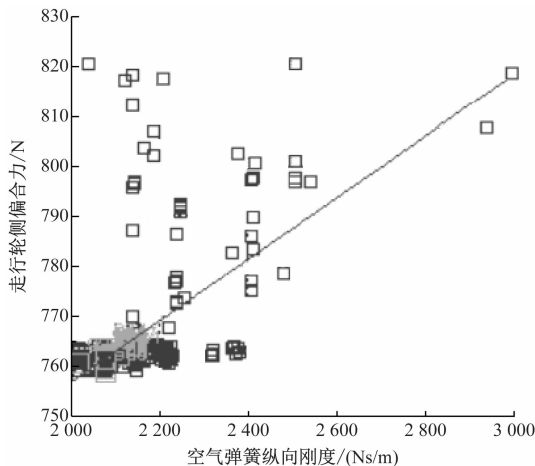


图 12 走行轮侧偏合力与空气弹簧纵向阻尼的线性关系

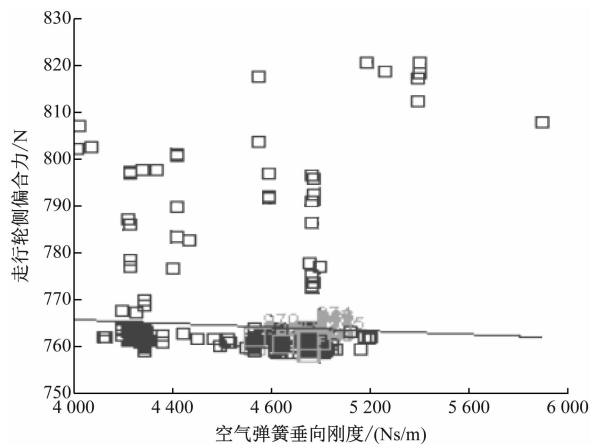


图 13 走行轮侧偏合力与空气弹簧垂向阻尼的线性关系

## 4 结语

本文通过对单轴式单轨转向架结构及空气弹簧工作原理进行分析,建立了单轴式单轨车辆动力学仿真模型。通过对空气悬架参数进行灵敏度分析,以导向力矩和走行轮侧偏合力作为优化目标,

筛选出影响显著的参数,分别为空气弹簧的纵向刚度、纵向阻尼和重向阻尼。对影响显著的空气悬架参数进行多目标优化,在保证车辆稳定性、舒适性的前提下,使得导向力矩较优化前减小了 4.76%,走行轮侧偏合力较优化前减小了 7.57%,达到了优化目的。

## 参考文献

- [1] 孙天助,付茂海,卜继玲.单轴转向架在城轨车辆中的应用前景分析[J].电力机车与城轨车辆,2007,30(3):4.
- [2] 杜子学,梁志华,文孝霞.跨坐式单轨车辆导向力矩研究[J].机车电传动,2014(3):74.
- [3] 黄运华,赵晓莉,卜继玲.城轨车辆单轴转向架关键技术综述[J].电力机车与城轨车辆,2007(4):1.
- [4] 李芾,戚壮.轨道车辆空气弹簧悬挂系统应用与研究[J].中国铁路,2014(4):42.
- [5] 周维江.单轮对动力转向架的设计研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [6] 付伟.单轴转向架动力学性能研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [7] YOHIIHIRO S, KAZUHIKO S, AKIRA M, et al. Dynamic characteristics of a single-axle truck for compatibility between stability and curving performance[J]. Vehicle System Dynamics Supplement, 2002(37):616.
- [8] 韩林山,李向阳,严大考.浅析灵敏度分析的几种数学方法[J].中国水运,2008,8(4):177.
- [9] 文孝霞,杜子学,左长永.曲线工况下跨座式单轨走行轮侧偏刚度对轮胎偏磨损的影响[J].交通运输工程学报,2014,14(2):41.
- [10] KALYANMOY D, AMRIT P, SAMEER A, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(4):182.

(收稿日期:2018-06-07)

(上接第 43 页)

- [6] 王廷.强渗透地层泥水盾构绿色泥浆配制及其适应性研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [7] 崔晋征.拼装机液压系统仿真与拼装轨迹的能耗分析[D].上海:上海交通大学,2014.
- [8] 皮膺海.盾构隧道施工碳排放测评研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [9] 李岳,陈超.泥水盾构越江隧道段绿色施工的模糊综合评价[J].施工技术,2015,44(增刊1):280.
- [10] 李乔松,白云,李林.盾构隧道建造阶段低碳化影响因素与措施研究[J].现代隧道技术,2015,52(3):1.

(收稿日期:2018-05-24)