

重载铁路双向运输效益的评估研究

张永恒^{1,2}, 张剑铠¹, 秦进²

(1. 中国神华能源股份有限公司, 北京 100011; 2. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:中国重载铁路存在重去空回的运营实际,造成一定的运力浪费,部分线路采用双向重载运输模式来缓解此情况。为使得铁路运营部门明确该模式带来的效益,研究了重载铁路线路双向运输效益评估方法,通过“双向运输综合效益”指标,反映经济、环境效益双方面效益情况,进而以反向运输环节为重点,设置算例来研究反向运量规模、货物品类对双向运输综合效益的影响。研究表明,在算例条件下,反、正向的运量比值从2%提升至20%,双向运输综合效益增长幅度为5.25%。反向运量占正向运量比重分别为2%、20%时,当反向运输中高附加值货物占比从5%提升至30%,双向运输综合效益相应地上涨0.43%、4.18%。综合来看,重载铁路运营部门可拓展双向重载运输业务覆盖范围,并通过与途经地区有货运需求的企业合作等策略,保证稳定的反向货源,以提升双向综合效益,利于双向均衡运输,促进综合效益最大化。

关键词:铁路运输;重载铁路;效益评估;双向重载运输模式;环境效益

中图分类号: U296 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)04-0069-06

0 引言

重载铁路运输在大宗货物运输业务中发挥着不可替代的作用,且服务的货运需求规模持续扩大。相较于普通铁路货运,重载铁路运输具有轴重大、牵引质量大、运量大的特点^[1]。目前中国重载铁路线路主要完成西煤东运的任务,呈现“重去空回”的运输特征^[2],在全球能源绿色转型发展趋势的推动下,煤炭需求量缩减,由此将导致重载铁路煤炭运输业务量下降,重载铁路线路运力有所富余。

国家部署的“公转铁”战略中明确提出了鼓励港口大宗货物进出港采用铁路方式运输的措施,重载铁路因一端衔接港口、一端深入内陆地区,具备承担大宗散货疏港运输业务的能力。正向多重车、反向多空车的运营现状因此有所改变,朔黄铁路、大秦铁路、瓦日铁路等重载线路已开展反方向的非煤货物运输业务,开始探索双向运输模式。

具体来看,国家能源集团自营铁路朔黄铁路是中国西煤东运的大通道之一。近年来,朔黄铁路在天津港和黄骅港利用返程车皮运输铁矿石,根据文献[3]整理得到2017—2019年朔黄铁路双向运量水平,如表1所示。正向煤炭运输量均在3亿t左右,反向铁矿石运量与正向运量之比在1%~3%之间。

表1 朔黄铁路双向货运量

年份	正向运量/亿 t	反向运量/万 t			反向运量占正向运量的比重/%
		黄骅港	天津港	合计	
2017	2.93	150	568	718	2.45
2018	3.11	137	344	481	1.55
2019	3.05	137	639	776	2.55

大秦铁路是中国重要的煤运专线铁路,在1992年正式通车后,随着运输装备和管理水平的不断提高,运输能力得到大幅提升,2018年运量已突破4.50亿t。2019年,大秦铁路完成货物总运量为4.31亿

收稿日期:2023-05-31 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20230143

基金项目:中国神华能源股份有限公司科研项目(2022-051)

作者简介:张永恒(1980—),男,高级工程师,研究方向为重载铁路运输。E-mail:10000370@chnenergy.com.cn

张永恒,张剑铠,秦进.重载铁路双向运输效益的评估研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(4):69-73,81.

t,其中反向运量为 1 095 万 t,反向与正向运量之比约为 2.61%^[4]。

瓦日铁路是世界第一条按照 30 t 重载铁路标准建设的铁路。瓦日铁路通过实施“港内矿石装车+铁路发运至园区+卸车+汽运配送+返程煤焦套货入园+煤焦铁路集港+装船”的物流新模式,拓展反向运输业务。2018 年,瓦日铁路正向运输煤炭等货物 3 410 万 t,反向运输铁矿石等非煤货物 364 万 t^[5],反向与正向运量之比为 10.67%。

中国重载铁路双向运输的新模式目前正处于探索阶段,线路的双向运量均衡程度较低,多数线路反向运量占正向运量比重不足 15%,反向有较大的运力余量,并且正向运量规模越大的线路,往往双向运输不均衡性越明显。

1 重载铁路双向运输既有研究综述

针对重载铁路重空车双向运输组织优化、运输效率提升等领域,目前已有学者开展相关研究。JING et al^[6]将空车分配计划与重车车流组织优化相结合,以空重车流在装车段停留时间最小为目标,建立基于车站和线路能力的综合优化模型;ZHANG et al^[7]以车辆空驶时间最小为目标,建立了重载铁路空车调整优化模型;XIANG et al^[8]综合考虑重载列车运输需求、设备容量等制约因素,建立了重载铁路车流组织优化模型,最大限度地减少货车循环时间,提升运输组织效率;耿放等^[9]建立了考虑 5 000 t 单元列车和 1 万 t 组合列车的重载铁路列车开行方案模型,得到了不同方案的成本函数。以上研究从重载铁路运输组织入手,提出了车辆周转时间最短、运输组织效率最高的运输组织方案,为重载铁路实际的运输组织方案制定提供理论支撑。

在重载铁路运输效益方面,目前缺乏综合考虑正、反向运输效益的双向评估体系。现有研究成果中,在交通运输效益评估体系方面,毛保华等^[10]以多式联运服务为对象,提出了考虑各方式运输效率及碳排放的收益测算方法,明确了联运涉及的各方式的收益情况。此外,在运输效益评估方法及应用领域,MATUTE et al^[11]以经济效益与碳排放成本为具体指标,采用成本-效益分析法,评估了加利福尼亚高铁和城市交通的总效益;SUN et al^[12]通过构建耦合协调度模型,评估了城市公共交通系统的经济效益、社会效益和环境效益的协调发展水平,并得出经济效益的提高有助于促进社会、环境效益的提高,使 3 项效益更加协调发展;SICILIANO et al^[13]提出了改进的成本效益分析法,从社会成本和效益的角度评估了创新型铁路货运服务。既有文献多从宏观层面评估铁路、道路及城市交通系统的综合运输效益,关于重载铁路线路层面的双向运输效益评估研究相对不足,使重载铁路运营部门无法准确衡量双向均开行重车情况下的经济、社会效益水平。

中国多条重载线路直接延伸至港口,充分具备由港口借助返程车辆回运金属矿石等非煤货物的运输条件,且为落实国家“公转铁”战略、助推货运可持续发展^[14],考虑探索双向重车的运输模式。在此前提下,建立完善的重载铁路双向运输效益评估体系,研究重载铁路双向重载运输模式的发展策略,对运营部门充分利用线路衔接港口的优势条件和反向的富余运力、提升重载铁路运营效益具有重要指导意义。

2 重载铁路双向运输效益评估方法

为讨论重载铁路发展反向运输业务后的双方向效益情况,研究了重载铁路双向运输效益评估方法。从工作流程来看,重载铁路的运输效益涉及多个环节,主要讨论运输环节,不考虑线路的建设及养护维修环节。

重载铁路双向运输效益通过双向综合效益 S 来反馈

$$S = S_e + S_h \quad (1)$$

式中, S_e 为经济效益; S_h 为社会效益。

双向运输的经济效益为正向运输利润与反向运输利润之和

$$S_e = \sum_{i=1}^2 (I_i - X_i) \quad (2)$$

式中, i 为货物运输方向, $i=1, 2$ 分别对应正向、反向; I_i 为某一方向上的收入; X_i 为某一方向上的成本。

正向运输收入 I_1 为托运人支付的运费

$$I_1 = p_1 l_1 q_1 \quad (3)$$

式中, p_1 为正向运输单位周转量运价; l_1 为正向平均运距; q_1 为完成的正向货运总量。

相同地, 反向运输收入 I_2 为该方向上托运人支付的运费

$$I_2 = p_{2.1} l_2 (1-\alpha) q_2 + p_{2.2} l_2 \alpha q_2 \quad (4)$$

式中, $p_{2.1}$ 、 $p_{2.2}$ 分别为一般货物、高附加值货物在反向运输中的单位运价率; l_2 为反向平均运距; q_2 为完成的反向货运总量; α 为高附加值货物占反向货运量的比值。

正向运输成本 X_1 主要包括货物装卸成本、运输过程中的固定成本以及与能耗有关的运输环节变动成本

$$X_1 = a_1 q_1 + b_1 q_1 + c \max\{q_1, q_2\} + d_1 q_1 l_1 \quad (5)$$

式中, a_1 、 b_1 分别为正向运输单位运量的装、卸成本; c 为运输环节单位运量的固定成本; d_1 为与能耗有关的单位变动成本。特别地, 重载铁路运输模式具有往复周期性, 固定成本由双向运输中运量较大的方向决定。

反向运输成本 X_2 同样包括了货物装卸成本、固定成本及变动成本, 与正向运输不同的是, 除了考虑不同附加值货物的装卸成本外, 还考虑了部分货物在中间站卸车的成本

$$X_2 = [a_{2.1}(1-\alpha) + a_{2.2}\alpha]q_2 + [b_{2.1}(1-\alpha) + b_{2.2}\alpha](1-\omega)q_2 + [e_{2.1}(1-\alpha) + e_{2.2}\alpha]\omega q_2 + c \max\{q_1, q_2\} + d_2 q_2 l_2 \quad (6)$$

式中, $a_{2.1}$ 、 $b_{2.1}$ 分别为一般货物单位运量的装、卸成本; $a_{2.2}$ 、 $b_{2.2}$ 分别为高附加值货物单位运量的装、卸成本; ω 为中间站卸载货运量占反向运输货运量的比值; $e_{2.1}$ 、 $e_{2.2}$ 分别为中间站卸载一般、高附加值货物的单位运量的成本; d_2 为反向运输过程中的单位变动成本。

双方向的社会效益主要考虑了环境效益, 具体为重载铁路大力发展反向运输后, 吸引该方向上部分原本通过公路运输的货物, 从而降低的二氧化碳排放成本。由于碳排放量与双向运输利润的量纲并不一致, 故考虑通过碳税值 γ (元·(g CO₂)⁻¹) 将碳排放成本转化为货币成本

$$S_h = \gamma(R_{\text{road}} - R_{\text{rail}})l_2 q_2 \quad (7)$$

式中, R_{road} 、 R_{rail} 分别为公路、铁路的货运碳排放因子。

3 重载铁路反向运输环节对双向运输效益的影响分析

为使得铁路运营部门能够权衡发展重载铁路反向运输业务带来的效益, 应用双向运输效益评估方法, 讨论反向运量占正向运量比重、反向吸引的货物对双向综合效益的影响, 进而为运营部门提供决策依据。

3.1 参数选取

在重载铁路线路双向运输效益评估方法的基础上, 设置双向单位运价率、双向各环节单位成本值不变的条件。表2参考相关文献给出了评估方法中所涉及部分参数的取值。

表2 部分参数取值

参数	$p_1 /$ (元·(t km) ⁻¹)	$p_{2.1} /$ (元·(t km) ⁻¹)	$p_{2.2} /$ (元·(t km) ⁻¹)	$c /$ (元·t ⁻¹)	$\gamma /$ (元·(g CO ₂) ⁻¹)	$l_1 /$ km	$\alpha /$ %
取值	0.20 ^[15]	0.10 ^[16]	0.30 ^[16]	1.25 ^[17]	6×10^{-4} ^[18]	595.0	20
参数	$a_1, a_{2.1} /$ (元·t ⁻¹)	$a_{2.2} /$ (元·t ⁻¹)	$b_1, b_{2.1} /$ (元·t ⁻¹)	$b_{2.2} /$ (元·t ⁻¹)	$R_{\text{road}} /$ (g CO ₂ ·(t km) ⁻¹)	$l_2 /$ km	$\omega /$ %
取值	15 ^[19]	30	15 ^[19]	30	47.1 ^[20]	446.3	50
参数	$d_1 /$ (元·(t km) ⁻¹)	$d_2 /$ (元·(t km) ⁻¹)	$e_{2.1} /$ (元·t ⁻¹)	$e_{2.2} /$ (元·t ⁻¹)	$R_{\text{rail}} /$ (g CO ₂ ·(t km) ⁻¹)	$Q_1 /$ t	
取值	0.03 ^[21]	0.03 ^[21]	20	35	11.4 ^[20]	2.5×10^7	

3.2 反向运量占比对双向运输效益的影响

中国多条重载铁路线路双向运量情况各异,2017—2019 年朔黄铁路反向占正向运量比重不足 5%,2018 年瓦日铁路反向占正向运量比重略高于 10%。随着反向运量与正向运量比值的提升,双向运输经济、环境及综合效益的变化情况如图 1 所示。

由图 1 可以看出,各效益值均与反向运量呈显著的正相关,反向运量占正向运量比重从 2% 变化至 20%,双向运输经济效益从 17.21 亿元增长至 17.69 亿元,双向运输环境效益从 0.05 亿元增长至 0.48 亿元,故双向运输综合效益从 17.26 亿元增长至 18.17 亿元。结合图 1,双向综合效益涨幅为 5.25%,高于经济效益的涨幅 2.77%,主要原因为,重载铁路开始承担通道反向上的货运任务后,铁路运输方式的环保优势得以体现,大大改善了公路分担率过高导致的环境污染问题。因此,重载铁路线路可考虑发展双向运输模式,通过下浮运价等策略提升对反方向上有运输需求的货物的吸引力,挖掘适运的货物品类,以促进重载铁路运输的综合效益。

3.3 反向运输货物价值对双向运输效益的影响

重载铁路正向运输的货物品类主要为煤炭、焦炭等,反方向上主要吸引从港口上水的进口金属矿石等品类,反向运输货物品类对应的价值与反向运量将影响双向运输效益,双向运输综合效益变化情况具体如图 2 所示。

根据图 2,反向运量增加、反向运输中高附加值货物占比的增加,都利于双向运输综合效益的提升。若反向运输中高附加值货物占比从 5% 提升至 30%,在反向占正向运量比重为 2% 时,双向运输综合效益涨幅为 0.43%;反向占比扩大为 20% 时,双向运输综合效益涨幅为 4.18%。故在推进重载铁路双向运输模式发展时,若能吸引高于铁矿石等大宗货物价值的品类,可进一步促进双向运输综合效益提升。

4 结论与对策

综上所述,可以得到如下研究结论:

(1) 当前中国重载铁路双向运输模式处于发展初期,由于有关重载铁路双向运输综合效益评估的研究较少,因此运营部门未能准确衡量开展反向运输带来的效益。本文着重分析了反向运输环节中运量变化对双向运输综合效益的影响。在设置的算例中,当反向运量占正向运量比重从 2% 变化至 20%,双向运输综合效益提升 5.25%。反向运输业务的开展,除了利于经济效益稳步增长,还彰显了铁路运输方式低碳排放的优势,缓解了原先通道上公路分担率过高导致的环境污染问题。

(2) 进一步研究了反向运输的货物品类对双向运输综合效益的影响。结合算例结果看出,反向占正向运量比重为 20%,反向运输中高附加值货物占比从 5% 提升至 30%,双向运输综合效益增长 4.18%。高附加值货物占比提高可改善双向运输效益,且反向运量规模越大,改善效果越显著。

综合来看,一端衔接内陆地区、一端衔接港口的重载铁路线路可考虑发展双向重载运输模式,铁路

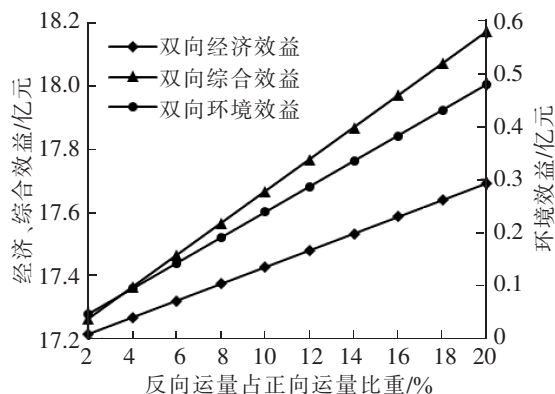


图 1 反向运量占比与双向运输效益的关系

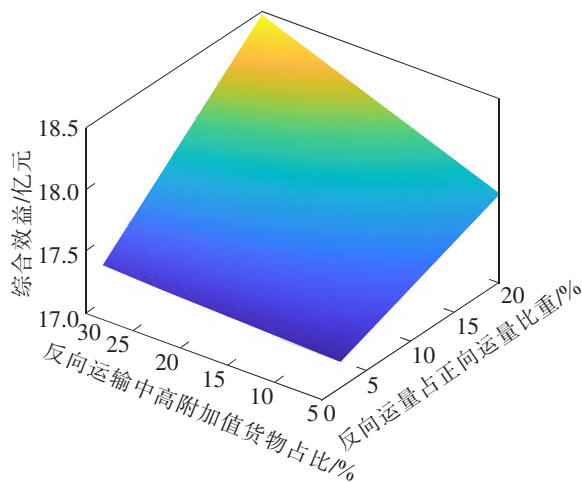


图 2 反向运输中高附加值货物占比及反向占正向运量比重与双向运输综合效益的关系

运营部门可考虑拓展双向重载运输业务覆盖范围,挖掘潜力货物品类,与沿线地区相关企业建立长期合作关系,保证稳定的反向货源,以提升双向综合效益,利于双向均衡运输,推进运输通道上多产业互利共赢。

参 考 文 献

- [1] WANG D, ZHAO J, PENG Q Y. Optimizing the loaded train combination problem at a heavy-haul marshalling station [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 162: 1-31.
- [2] 代斌. 神池南站通过能力分析 with 优化对策研究[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2021, 34(3): 113-118.
- [3] 许小兵. 黄骅港煤炭港区朔黄铁路铁矿石返程运输分析[J]. *港工技术*, 2021, 58(2): 72-75.
- [4] 大秦铁路股份有限公司. 大秦铁路股份有限公司 2019 年度社会责任报告[R]. 太原: 大秦铁路股份有限公司, 2020.
- [5] 杜宝辰. 瓦日铁路煤炭集装箱多式联运转换节点选址研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [6] JING Y, ZHANG Z H. A study on car flow organization in the loading end of heavy haul railway based on immune clonal selection algorithm[J]. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(5): 1455-1465.
- [7] ZHANG J C, YANG H, WEI Y G, et al. The empty wagons adjustment algorithm of chinese heavy-haul railway[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2016, 89: 91-99.
- [8] XIANG X, ZHU X M. An optimization strategy for improving the economic performance of heavy-haul railway networks [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2016, 142(3): 1-13.
- [9] 耿放, 罗玉屏. 重载铁路通道万 t 组合列车开行范围研究[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2016, 29(3): 53-58.
- [10] 毛保华, 曾玮, 李佳杰. 一种基于联运产品服务效率的运输收益清算方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(3): 34-40.
- [11] MATUTE J M, CHESTER M V. Cost-effectiveness of reductions in greenhouse gas emissions from high-speed rail and urban transportation projects in california[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 40: 104-113.
- [12] SUN Y, CUI Y. Evaluating the coordinated development of economic, social and environmental benefits of urban public transportation infrastructure; Case study of four chinese autonomous municipalities[J]. *Transport Policy*, 2018, 66: 116-126.
- [13] SICILIANO G, BARONTINI F, ISLAM D M Z, et al. Adapted cost-benefit analysis methodology for innovative railway services[J]. *European Transport Research Review*, 2016, 8(4): 1-14.
- [14] 毛保华, 周琪, 李宁海, 等. “双碳”目标下中国货物运输体系可持续发展策略[J]. *科技导报*, 2022, 40(14): 65-72.
- [15] WANG D Z, ZHOU L Y, ZHANG H M, et al. A bi-level model for green freight transportation pricing strategy considering enterprise profit and carbon emissions[J]. *Sustainability*, 2021, 13(12): 1-20.
- [16] 刘晓娟. 市场竞争条件下铁路货运高端产品的定价模型[J]. *综合运输*, 2017, 39(4): 34-39.
- [17] 周康, 何世伟, 宋瑞, 等. 基于单元化物流的铁路快运组织优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(6): 100-107.
- [18] LI L, ZHANG X Q. Integrated optimization of railway freight operation planning and pricing based on carbon emission reduction policies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 1-13.
- [19] 李世琦, 郎茂祥, 于雪峤, 等. 中国商品车铁路运输竞争力分析——以京津冀地区为例[J]. *北京交通大学学报*, 2020, 44(1): 49-56.
- [20] LIN B L, WANG Z M, JI L J, et al. Optimizing the freight train connection service network of a large-scale rail system [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2012, 46(5): 649-667.
- [21] 夏阳, 魏玉光, 赖艺欢, 等. 基于运输成本的铁路集装箱旅客化运输系统开行方案研究[J]. *铁道学报*, 2019, 41(4): 10-15.

(下转第 81 页)

2. Hebei Key Laboratory of Power and Transmission Control of

Construction Machinery, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the nonlinear vibration behavior of the improved suspension frame system of high temperature superconducting flux-pinned suspension train and explore the influence of system parameters and operating parameters on its chaotic motion, a method of equivalent treatment of high temperature superconductor was proposed based on the frozen image model. The correctness of the method was verified by way of the experimental data, thus the suspension force data of the improved suspension frame system was obtained with this method. The mathematical model of the suspension force empirical formula was constructed using the cubic polynomial function fitting data. Based on this model, the differential equation of motion of the system was established. The Melnikov method was used to solve the chaotic threshold of the system, and the influence of system parameters and operating parameters on the chaotic threshold was studied. The feasible region and method of parameters for the system to avoid chaotic motion were given, and the relationship between the two excitation frequencies when the joint resonance did not occur under dual frequency excitation was provided.

Key words: improved suspension frame; nonlinear vibration; chaos; Melnikov method; parameter feasible region

(上接第73页)

Evaluation of Two-Way Transportation Benefits of Heavy-Haul Railway

Zhang Yongheng^{1,2}, Zhang Jiankai¹, Qin Jin²

(1. China Shenhua Energy Company Limited, Beijing 100011, China;

2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Most of China's heavy-haul railways face the issue of unbalanced volumes, resulting in a certain amount of wasted transportation capacity. The mode of two-way transportation of heavy-haul railway is carried out. An evaluation method of heavy-haul railway's two-way transportation benefits was proposed so that the railway operation department can clarify this mode's benefits. The index of "comprehensive benefits of two-way transportation" including economic and environmental benefits, was used to determine the transportation benefits. The numerical example was designed to examine the effects of reverse transportation volumes and cargo type on two-way transportation benefits. The results show that, when the proportion of reverse and forward transportation volumes increases from 2% to 20%, the comprehensive benefits of two-way transportation increase by 5.25%. When the proportion of reverse and forward transportation volumes is from 2% to 20%, the proportion of high-value-added goods in reverse transportation increases from 5% to 30%, and the total benefits of two-way transportation reach 0.43% and 4.18%, respectively. On the whole, heavy-haul railway lines in China can develop two-way transportation mode, and ensure a stable reverse supply of goods through strategies such as cooperating with enterprises that have freight needs in the transit area, so as to promote comprehensive benefits and realization of two-way transportation.

Key words: railway transportation; heavy-haul railway; benefits evaluation; two-way transportation mode of heavy-haul railway; environmental benefits