文章编号：2097-5899(2026)05-0061-08　**中图分类号**：U2-9　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.20251205004
引用格式：冯芬玲，卫诗豪，韩英. 铁路企业主导下可变轨距车辆基于多维成本的经济性分析[J]. 铁路物流，2026，44(5)：61-68.
FENG Fenling，WEI Shihao，HAN Ying. Economic Analysis of Variable-Gauge Vehicles Based on Multi-Dimensional Costs under Leadership of Railway Enterprises[J]. Railway Logistics，2026，44(5)：61-68.

铁路企业主导下可变轨距车辆基于多维成本的经济性分析

冯芬玲[1]，卫诗豪[1]，韩　英[2]

(1. 中南大学 交通运输工程学院，湖南 长沙　410075；2. 中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司 科信部，新疆 乌鲁木齐　830001)

摘　要：为评估可变轨距车辆的应用价值，构建了涵盖货主、铁路企业及社会的多主体经济性分析框架。重点建立了铁路企业视角下融合车辆购置、车站建设与日常运营成本的总成本差异测算模型，并选取霍尔果斯(既有站改造)与马克马尔(新建站)2个典型案例进行实证计算。研究结果表明：对于新建车站，采用可变轨距车辆具有显著成本优势；对于既有车站，则需年过境班列数量超过特定阈值方能节约成本，若综合考虑货主因运输时间缩短而节省的资金占用成本后，该阈值可进一步降低。研究为不同场景下是否采纳该技术提供了量化决策依据。

关键词：经济性分析；可变轨距转向架；车辆；铁路企业；货主

0　引言

在“一带一路”倡议推动下，中欧(亚)班列快速发展，但共建“一带一路”国家铁路轨距不一，需在口岸进行换装或换轮作业，严重制约运输效率[1]。换装和换轮运输方式耗时长、成本高且易造成节点拥堵[2]，亟需更高效的解决方案。

变轨距运输模式是指使用装备有可变轨距转向架的列车进行运输以应对不同轨距差异的一种运输模式。该模式的核心特点在于列车转向架上装有特殊的解锁—锁紧装置，转向架与轨道对中后将解锁轮对，随后轮对内侧距进行转换，转换完成后轮对锁紧，可变轨距转向架轨距转换流程如表1所示。相较于换装运输模式和换轮运输模式，变轨距运输模式可以实现不停车过轨，设备可无人化自动运行，运输效率高，运营成本低。因此，分析变轨距运输模式的经济可行性及其对货主、铁路企业和社会的成本收益，对提升中欧(亚)班列等国际铁路联运水平具有重要意义。

表1　可变轨距转向架轨距转换流程

Tab.1　Gauge change process of variable-gauge bogies

阶段	核心操作
准备阶段	列车进入变轨区段，转向架与地面变轨区域轨道对中，车轮承重改为轴箱承重
解锁阶段	地面解锁轨触发转向架解锁机构，解除轮对与车轴间锁定，轮对变为可横向移动状态
变轨阶段	在特殊设计的过渡轨道引导下，轮对沿径向滑动至目标轨距位置
锁紧阶段	地面锁紧轨触发转向架锁紧机构，将轮对重新固定在新轨距位置上，轴箱承重改回车轮承重
结束阶段	列车完成轨距自变换，驶离变轨区段，恢复正常运行

收稿日期：2025-12-05
基金项目：中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司科研项目(RD2024X014)；国家自然科学基金项目(52272326)

在国际联运经济性研究方面，国内学者集中于研究通道经济性、考虑品类差异化定价、动态补贴等方面。刘畅等[3]分析了中欧班列北、中、南3条通道的运营特征，分析得出南通道的发展定位与潜力；祁明明等[4]从中欧班列的贸易品类、货物流向、货物规模出发，测算符合铁路运输经济性的货物特征及总量规模；付新平等[5-6]建立了价值量比较分析模型，评价各线路成本，研究降低集结路径运输费用以优化班列通道的经济性；冯芬玲等[7-8]根据货物价值、时间敏感度，提出差异化补贴建议，并探讨补贴退出背景下的市场主体的演变博弈；王菲等[9]对可变轨距车辆应用的经济可行性进行分析并提出推广策略；曾玮等[10-11]提出关于中欧班列运行的时间和财务成本的测算方法，并考虑适运货物品类、政府补贴、铁路运输费率等因素构建了相对竞争力模型，张桐等[12]对国际集装箱班列竞争力、公铁联运定价博弈进行了分析。

我国对可变轨距转向架的研究起步较晚，李芾等[13]研究国外可变轨距转向架技术并进行动力学分析；黄运华等[14-15]系统研究了变轨距转向架的技术机理及结构，并提出我国首个变轨距转向架的设计方案。此后众多学者针对可变轨距转向架技术设计方案优化开展研究[16-17]，但关于其应用方式及是否经济可行的研究较少。

针对可变轨距车辆在国际铁路联运中经济性评估相对薄弱的现状，聚焦典型跨境通道，构建基于实际运营参数的成本测算框架。突破传统单一铁路企业视角，引入货主与社会主体，从运输时效损失、资金占用及外部性等维度，初步建立“企业－货主－社会”三方多视角经济性分析结构。通过测算三类主体的成本收益及其与现行换装模式的差异，揭示技术创新带来的跨主体外部性，探索合理的成本分担与收益补偿机制，为可变轨距技术落地与政策设计提供理论支撑。

1　多主体视角下变轨距运输模式成本收益分析

铁路运输过程中涉及众多主体，最主要的主体是货主(托运人)与铁路企业(承运人)。除此之外，铁路运输实现了不同地区间旅客、货物的互联互通，带动区域经济发展，对于社会整体具有积极意义。铁路运输涉及各类不同的主体及其利益，有效地管理和协调这些主体之间的互动，对于提高运输效率、降低成本、提升服务质量至关重要。

国际铁路联运的运输时间包括境外段运输时间、境内段运输时间和口岸站运输时间，国际联运相较于国内铁路运输最大的差异是由于需要换装、换轮而产生的口岸站运输时间。变轨距运输模式的应用可以大大缩短口岸站的通关时间，从而缩短全程运输时间。对于货主而言，缩短运输时间将极大提升运输便利性，提高运到时效使得货物周转加快，减少资金占用，降低货主的存货成本；对于铁路企业，虽然采用变轨距运输模式需要投资购买可变轨距车辆及地面变轨装置，但运输时间缩短可以提高车辆的使用效率，变轨距运输不停车通过可以减少换装、换轮作业所需的机械与人力，节约日常运营成本。

然而，铁路企业面临“高投入、慢回报”的困境。铁路企业需独自承担基础设施与设备的初始投资，若仅以企业自身盈亏为决策标准，即使社会总福利增加，该技术仍可能被搁置。技术的经济可行性不仅取决于总成本是否下降，更取决于成本与收益在不同主体间的分配是否可接受。货主是效率提升的直接受益者，运输时间缩短直接转化为存货成本下降，对高价值、时间敏感型货物尤为重要。然而，货主通常不参与基础设施投资，其支付的运费未必能反映这一隐性收益，导致需求信号无法有效传导至供给端。另外，变轨距运输模式应用对于社会整体而言产生正外部性，缩短运输时间有利于发展跨国贸易，特别是在“一带一路”倡议下，可以更好地发挥铁路运输作为国际物流的纽带作用。同时，变轨距运输模式应用将吸引公路运输转向铁路运输，公转铁也有助于应对气候变化，助力低碳发展。

综上所述，变轨距运输模式的推广不仅是技术问题，更是涉及多方利益权衡的经济问题。由于成本主要由铁路企业承担，而收益则分散于货主与社会，若缺乏对各主体成本与收益的综合考量，将难以判断该模式的真实经济价值。因此，有必要从货主、铁路企业及社会三大主体出发，构建经济性分析框架，从而测算不同运输模式下的成本结构与效益分配，为技术应用决策提供科学依据。本研究构建的成本评估框架中涉及以下3类成本：一是货主成本，指货主因运输时间、服务可靠性变化而减少的成本；二是铁路企业总成本，指铁路运营主体在采用可变轨距运输模式过程中直接承担的全部支出，包括车辆购置成本、车站适应性改造或新建投资等固定成本，以及日常运营中的能耗、人工等可变成本；三是全社会总成本，指在社会层面因运输效率提升或环境影响改变而产生的外部性成本或收益。

为构建可比、可操作的经济性分析框架，避免强行引入未经充分验证的假设参数削弱模型的稳健性，模型基于以下核心假设。

假设1：对比分析期间，跨境运输总需求保持稳定，不考虑因服务改善(如时效提升)可能激发的新增运量与新增运费收入。

假设2：不考虑货主的离散选择与博弈响应，未纳入货主基于价格、服务、风险的主动选择行为，货主仅作为被动受益方，其收益体现为资金占用成本降低。

假设3：可变轨距车辆与传统固定轨距车辆在运行速度、牵引能力及载重水平等关键技术参数上基本相当，差异主要体现在换装环节。

假设4：换装作业成本与作业量呈线性关系，即单位换装成本恒定；变轨作业因自动化程度较高，作业成本与作业量不呈线性关系。

假设5：关键参数如车辆价格、线路建设成本、运营成本基于既有文献及实地调研综合确定，并假设其在分析期内保持稳定。

假设6：社会层面的外部性影响(如碳排放减少等)虽被识别为潜在收益，但因缺乏权威统一的货币化参数，暂未纳入量化计算。环境外部性、区域经济影响等社会维度仅作定性识别，不参与量化比较。

假设7：所有成本流均采用统一贴现率进行折现，未区分铁路企业、政府等主体的融资成本差异。

上述假设界定了本模型的适用边界，也为后续研究的拓展方向提供了基础。

1.1　货主视角下变轨距运输成本收益分析

货主在运输过程中需要支付运费，获取的收益是货物从一地转移至另一地带来的效用。假设铁路企业的运费维持现状不变，采用变轨距运输模式可以缩短运输时间，提高货物的周转速度，在单次货物运输中，减少资金占用的利息成本，如下式所示。

$$C_i=\sum_n v_1\cdot\frac{r}{365}\cdot(t_1-t_2) \tag{1}$$

$$C_I=\sum_N C_i \tag{2}$$

式中：C_i为某一货主节省资金占用的利息费用成本，元；v_1为该货主一辆铁路货物运输车辆装载的货物平均价值，万元/辆；t_1为换装运输需要的单程运输时间，d；t_2为变轨距运输需要的单程运输时间，d；r为货主企业融资的年利率；n为该货主总运输车辆数，辆；C_I为所有货主共节省的利息费用，元；N为货主数量，个。

注意到所有货主通过铁路运输的货物构成了国际铁路联运列车，因此无需考虑具体货物与货主的归属情况，货主视角下节约的总资金占用等于列车运输的货物的总价值，如下式所示。

$$\sum_N\sum_n v_1=\sum_m v_2 \tag{3}$$

式中：v_2为所有国际联运车辆装载的货物平均价值，万元/辆；m为列车平均编组车辆数，辆。

结合式(1)，可将货主总节省利息费用C_I表达如下式所示。

$$C_I=\sum_N C_i=\sum_N\sum_n v_1\cdot\frac{r}{365}\cdot(t_1-t_2)=\sum_m v_2\cdot\frac{r}{365}\cdot(t_1-t_2) \tag{4}$$

1.2　铁路企业视角下变轨距运输成本收益分析

对于铁路企业而言，无论采用何种运输模式均是完成承运任务，因此在研究中假设运费收入保持不变，仅分析成本方面的变化即可得出关于企业总收益情况的变化。铁路企业的运输成本可分为固定成本和可变成本，换装运输模式的固定成本包括换装场站建设成本、车辆购置成本、装卸设备购置成本，可变成本包括境内段运输成本、境外段运输成本、换装作业成本、仓储物流成本等[18]。考虑到传统的换装运输模式与变轨距运输模式的成本在干线铁路建设成本、基础场站作业成本等方面相同或相近，因此重点分析2种运输模式间的成本差异，即车辆购置成本、换装场站建设成本、日常运营成本，可以得到铁路企业视角下的变轨距运输成本，如下式所示。

$$C_{总}=C_l+C_z+C_y \tag{5}$$

式中：$C_{总}$为铁路企业采用变轨距运输的总成本，万元；C_l为车辆购置成本，万元；C_z为车站的建设成本，万元；C_y为运营成本，万元。

为探究改用变轨距运输后对企业总成本的影响，成本差异用传统换装运输模式成本减去采用变轨距模式后的成本表示。由于车站建设成本和车辆购置成本为固定成本，运营成本为可变成本，因此考虑s年内的总成本以实现固定成本与可变成本间可比性，结果如下式所示。

$$\Delta C_{总}=\Delta C_l+\Delta C_z+s\cdot\Delta C_y \tag{6}$$

式中：$\Delta C_{总}$为铁路企业采用变轨距运输的总成本差异，万元；ΔC_l为车辆购置成本差异，万元；ΔC_z为车站的建设成本差异，万元；ΔC_y为运营成本差异，万元；s为车辆预计使用寿命，a。

总成本差异若为正则代表采用变轨距运输模式将减少铁路企业的成本，有利于企业发展，总成本差异为负则代表采用变轨距运输模式后成本增加，不利于企业发展。

在车辆购置成本方面，由于变轨距运输模式的运输时间短，车辆周转效率高，因此采用变轨距运输模式所需配备的车辆数较少。车辆购置成本差异C_l可用下式表示。

$$\Delta C_l = C_h \cdot \frac{A}{\frac{365}{t_1}} \cdot m - C_b \cdot \frac{A}{\frac{365}{t_2}} \cdot m \tag{7}$$

式中：ΔC_h为换装车辆购置成本，万元/辆；A为每年过境列车列数，列；C_b为可变轨距车辆购置成本，万元/辆；m为列车平均编组车辆数，辆/列。

在车站建设方面，传统的换装运输模式需要建设多条不同轨距的换装线路，并配备相应的装卸设备；在采用变轨距运输模式后，需要配备地面变轨装置，由于过轨效率的提高，需要的线路数量将大大减少，车站的建设成本差异可用下式表示。

$$\Delta C_z = Q_h \cdot X_h - Q_b \cdot X_b \tag{8}$$

式中：Q_h为换装运输模式下换装线数量，条；X_h为换装线线路及装卸设备成本，万元；Q_b为变轨距运输模式下线路数量，条；X_b为变轨距线路及变轨装置成本，万元。

在运营方面，换装运输的运营成本主要是换装成本，换装作业需要装卸工人操作机械，装卸设备需要燃料或电力，换装过程需要一定空间场地；变轨距运输在变轨时设备可自动运行，仅需少量技术人员监控设备运行状态，因此不再存在换装成本，二者之差用下式表示。

$$\Delta C_y = Y_h \tag{9}$$

式中：Y_h为换装运输模式下每年换装作业的平均运营成本，万元。

综上所述，铁路企业在购买车辆使用寿命s年内的总成本可表示为

$$\Delta C_{总} = C_h \cdot \frac{A}{\frac{365}{t_1}} \cdot m - C_b \cdot \frac{A}{\frac{365}{t_2}} \cdot m + Q_h \cdot X_h - Q_b \cdot X_b + s \cdot Y_h \tag{10}$$

1.3　社会视角下变轨距运输成本收益分析

除货主与铁路企业外，可变轨距车辆的应用亦对社会整体产生一系列外部性影响，主要表现在因运输效率提升、能源消耗变化及环境影响所引发的各类外部性成本或收益。①该技术通过取消跨境换装环节，省去了装卸、转运等作业流程，从根本上减少了机械设备、车辆及人力等作业流程所产生的额外能源消耗，降低了全链条运输过程中的能源消耗水平与温室气体排放量，尤其在“双碳”战略背景下，其减碳潜力具有重要政策价值。②运输时效的提升与服务可靠性的增强，使铁路在中长距离国际货运市场中重新获得相对于公路运输的竞争力，有助于推动中长距离货运由公路向铁路转移，加速“公转铁”进程。这一结构性优化不仅有助于缓解干线公路网络的通行压力，减少由此衍生的交通拥堵、事故风险与道路维护负担，也降低了全社会物流体系的运行成本与环境负外部性，实现运输效率提升与生态效益改善的协同推进。③跨境铁路通道效率的改善可强化区域供应链韧性，减少因通关延误、作业中断等不确定性带来的库存积压与生产停滞风险，有助于构建更加稳定、可预期的国际物流环境，间接提升产业链协同效率与宏观经济稳定性。在区域发展层面，高效联通的跨境铁路网络通过缩短时空距离，降低了交易成本，为边境地区创造了更具吸引力的开放型经济平台，能够有效促进加工制造、仓储分拨、贸易服务等相关产业沿通道集聚发展，进一步带动当地就业机会的增加与基础设施配套的完善，公共服务水平逐步提升。

从社会成本层面看，可变轨距车辆及相关检修设施的初期投入需占用公共财政资源，在有限的财政约束下存在机会成本；换装作业自动化程度的提升虽提高效率，但也可能对传统装卸岗位带来结构性冲击，需配合劳动力转型政策以缓解社会调整压力。鉴于上述影响具有长期性、间接性及跨区域特征，且缺乏统一的核算参数与权威数据支撑，暂未对其进行量化建模，仅进行理论分析，以期为后续研究提供参考。

1.4　其他收益分析

除上述分析外，变轨距运输还带来了一些不易测算的收益，此类收益测算涉及复杂的核算或缺乏权威统一的假设参数等，在主体分析中未纳入量化计算，可作为未来拓展方向之一，具体内容如下。

一是对于货主而言采用变轨距运输的运输时间确定性更强。目前换装作业受天气、人员因素制约，以阿拉山口站为例，阿拉山口因地形因素及气候特征常年受6～7级以上大风影响，近年大风天数为130 d/a，目前铁路规定大风天气需停止室外装卸作业，为此阿拉山口站投资建设了室内换装库以保障集装箱换装量持续增长的作业需求。另外，换装作业需要装卸工人操作装卸设备(门吊、桥吊、正面吊等)，作业人员无法避免地受疫情等突发事件影响，不能保障不间断作业。相比之下，采用可变轨距运输，仅需调机司机操纵机车，受天气及人员因素制约的影响程度将大大降低。

二是对铁路企业而言采用变轨距运输可以避免空

车调运带来的线路能力浪费。以阿拉山口站为例，在进行换装作业时，出口货物以工业半成品、制成品为主，大多采用集装箱运输，需要使用平车进行运输，因此经过哈方换装后将排出大量平车空车；而进口货物以粮食、矿石、金属、木材、集装箱为主，除回空平车外还需要调运敞车空车进行装载，导致需要大量空车来回调度，浪费线路运输能力。

三是对铁路企业而言采用变轨距运输能够吸引潜在货运需求。提高运输时效对于客户而言意味着运营成本的降低和供应链灵活性的提升，这种优势将吸引更多潜在货源，从而增加铁路部门的运费收入。

四是对社会而言采用变轨距运输能够推动运输结构调整。随着铁路运输时效的提高，原先部分采用公路运输的货物转向铁路运输，公转铁可以优化物流结构，降低物流成本，降低社会整体物流碳排放水平，符合当前低碳经济的发展目标。

2　可变轨距车辆应用案例分析

变轨距运输模式的应用场景可分为2种，一是既有口岸站改造，二是新建线路的新建口岸站应用变轨距运输。根据前文所述测算模型，以霍尔果斯口岸为例，选取霍尔果斯—阿腾科里—莫斯科运输场景对既有口岸站改造的经济性进行测算；以新建中吉乌铁路换装站马克马尔站为例，选取喀什—马克马尔—安集延运输场景对新建车站的变轨距运输经济性进行测算。

2.1　既有口岸站改造分析

通过对新疆既有口岸站、铁路局集团公司、中国中车集团有限公司等调研情况及相关文献资料，设定换装运输车辆的购置费为35万元/辆，可变轨距车辆的购置费为40万元/辆，所需配套使用的地面变轨装置为800万元/套。1组换装线包括1条宽轨换装线和1条准轨换装线，换装线路根据换装用途不同配备门吊、桥吊、正面吊、抓料机、叉车等不同的装卸设备，每组换装线配备的装卸设备平均成本约为300万元，单条宽轨或准轨的换装线线路建设成本约为1 000万元，1组换装线的建设总成本为2 300万元；日常运营中，换装作业的运营成本每天每条线约需0.3万元。

霍尔果斯站在2024年累计通过8 730列中欧(亚)班列，列车平均编组车辆数30辆，车站共有5组换装线，若采用变轨距运输则需大约2套变轨距设备。目前从中国主要发送城市途经霍尔果斯发送至莫斯科的平均单程运输时间约为15 d，一次循环的周转时间约为30 d；采用变轨距运输模式后，单程运输时间将缩短至13 d左右，一次循环的周转时间约为26 d。

以无风险利率可用短期国债利率作为衡量指标，在中国债券信息网查询国债利率，得到市场无风险年利率$r=1.6\%$；根据公开数据，截至2025年6月，中欧班列开行突破11万列、货值超32 265亿元，可以计算得到一列班列的平均货值大约在2 940万元。因此，若改用变轨距运输，一列中欧(亚)班列的所有货主可以节省的资金占用成本为0.256万元。

考虑到霍尔果斯站为现有口岸站，换装线等均已建设完毕，因此在测算采用变轨距运输模式的成本计算时，不应考虑过去建设的沉没成本。因此，铁路企业总成本可用下式表示。

$$\Delta C_{总}^{霍}=C_h\cdot\frac{A}{\frac{365}{t_1}}\cdot m-C_b\cdot\frac{A}{\frac{365}{t_2}}\cdot m-Q_b\cdot X_b+s\cdot Y_h \tag{11}$$

式中：$\Delta C_{总}^{霍}$为霍尔果斯站采用变轨距运输的总成本差异，万元。

将上述参数代入式(11)，计算得到既有车站改造的总成本差异。在不考虑货主收益的情况下，仅从铁路企业视角来看，改用变轨距运输可以减少铁路企业成本，既有车站总成本差异与过境列车数量关系示意图如图1所示。当过境列车数量达到k列时，成本差异达到平衡点，2种运输模式的总成本相同，k是决定是否改用变轨距运输的阈值。在本节案例分析中，k的值约为5 010列，即每年通过的班列数量大于5 010列时，改用变轨距运输模式将是有利的，根据2024年霍尔果斯站共通行8 730列中欧(亚)班列的数据来看，使用变轨距运输模式是更具经济性的。这是由于一方面采用变轨距运输模式可以减少车底配置数量，在相同运输任务情况下，由于变轨距运输模式运输时间缩短，周转率高，因此需要使用的车辆数将减少，车辆方面的投入成本将降低；另一方面，不再进行换装作业将有效降低运营成本。

综合考虑货主视角的收益，由于运输时间缩短而节省资金占用成本，每列班列将为货主节省约0.256万元，降低了货主选择铁路运输的物流成本，有利于铁路企业吸引更多运输业务。在这种情况下，当每年通过的班列数量达到3 994列时，改用变轨距运输模式是有利的。

为检验研究结论对关键参数变动的稳健性，针对运输循环时间节省量与可变轨距车辆购置成本2个核心变量开展敏感性分析。结果表明，可变轨距运输模式

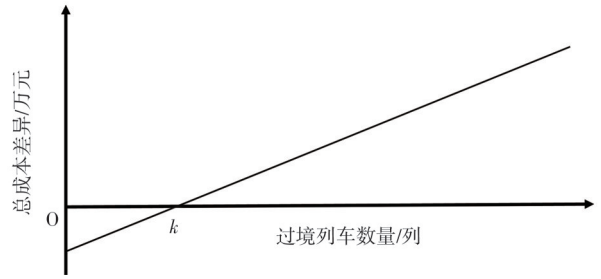


图1　既有车站总成本差异与过境列车数量关系示意图

Fig.1　Schematic diagram of relationship between total cost differences and number of cross-border trains at existing stations

的经济优势对上述参数具有显著依赖性，满足经济性的年过境列数随时间节省量或购置成本的变化存在较大变化。在当前预设条件下，若单次循环时间的节省量低于3.5 d或可变轨距车辆购置成本高于普通车辆价格6.2万元/辆，则其成本优势将消失，该技术的经济适用性存在明确的临界条件。尽管分析结果显示结论对关键参数较为敏感，但这一现象在一定程度上源于本研究在参数设定时参考了实际调研与文献公开信息。文中所用的车辆购置成本、循环时间节省量等数据，主要基于对霍尔果斯口岸及相关单位的走访了解，并结合中欧班列近年运行情况加以估算，部分参数在现实中存在一定波动性和信息获取限制，其取值虽力求合理，但仍存在不确定性。因此，模型对这些参数的敏感反应，体现了可变轨距技术应用的经济性本身高度依赖于具体应用场景。而在车辆购置成本难以大幅降低的现实约束下，单次循环时间节省量即运营效率的提升幅度成为决定经济可行性的关键变量。在换装作业易受气候、人力等因素干扰的高延误风险口岸，可变轨距技术的时间节省潜力更大，其经济价值亦更为突出。

2.2　新建口岸站分析

中吉乌铁路计划在中吉、吉乌口岸站采用不换装的直通运输模式，在吉尔吉斯斯坦境内马克马尔设换装站，实现口岸查验与换装分离。这一特点使得跨不同轨距运输时无需考虑海关查验的影响，能够更好地发挥变轨距运输的不停车通过优势，同时中吉乌铁路为新建线路及车站，不涉及既有车站布置的局限，因此展开对新建马克马尔站采用变轨距运输的经济性分析。

依据调研情况结合有关文献研究，设定如下。马克马尔站计划建设7组宽、准轨换装线，若采用变轨距运输则需大约2套变轨距设备，建设成本等参数同前文所述。中吉乌铁路2035年预计开行班列数为3 800列，2040年为4 500列。预计从国内主要城市途经喀什、马克马尔发送至中吉乌铁路乌兹别克斯坦方的终点安集延的平均单程运输时间约为9 d，一次循环的周转时间约为18 d；采用变轨距运输模式后，单程运输时间将缩短至7 d左右，一次循环的周转时间约为14 d。

铁路企业总成本可用下式表示。

$$\Delta C_{\text{总}}^{\text{马}} = C_h \cdot \frac{A}{\frac{365}{t_1}} \cdot m - C_b \cdot \frac{A}{\frac{365}{t_2}} \cdot m + Q_h \cdot X_h - Q_b \cdot X_b + s \cdot Y_h \tag{12}$$

式中：$\Delta C_{\text{总}}^{\text{马}}$为马克马尔站采用变轨距运输的总成本差异，万元。

从铁路企业视角来看，采用变轨距运输模式的成本是较低的，新建车站总成本差异与过境列车数量关系示意图如图2所示。一方面，提高运输效率减少了车底配置数量，降低车辆购置成本，随着每年通过列车数量的增加，变轨距运输的低成本优势更加明显；另一方面，换装作业需要修建较多的换装线路，变轨距运输有效降低车站线路建设成本，车站在前期固定投资方面的成本更低。

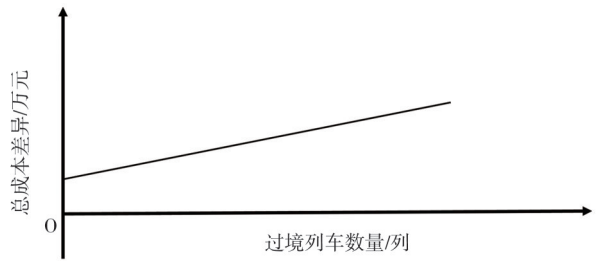


图2　新建车站总成本差异与过境列车数量关系示意图

Fig.2　Schematic diagram of relationship between total cost differences and number of cross-border trains at newly built stations

2.3　结果分析

对案例结果的深入分析表明，对于既有口岸站(如霍尔果斯)，其改造决策高度依赖于规模效应。当运量庞大时，变轨距模式不仅能覆盖其较高的初始投入，还能通过减少车底配置和日常运营产生持续的成本优势。对于新建口岸站(如马克马尔)，变轨距模式展现出先天的成本优势。由于规避了大规模换装场的建设，其固定投资显著低于传统模式。这意味着在未来的国际铁路运输通道建设规划中，应将可变轨距技术作为标准配置纳入顶层设计，从而避免路径依赖和未来高昂的改造成本。

因此，既有车站在决策是否改用变轨距运输模式时应保持谨慎，需详细分析目前及未来的运量能否达到阈值。对于新建车站，变轨距运输模式在固定成本与可变成本两方面均较换装运输模式更低，具有成本优势，可以优先考虑采用变轨距运输。

本研究采用多主体视角进行经济性分析，其核心意义在于超越了传统仅关注承运方(铁路企业)成本效益的局限，揭示了技术创新带来的系统性价值与潜在协同效应。综合前述分析结果可以发现，对于既有车站，由于改用变轨距运输模式需要新增加固定成本投入，应满足一定的列车通行数量，达到某一阈值后，实现规模效应才能降低铁路企业成本。若仅从铁路企业单一视角出发，对于运量未达阈值的既有口岸站，采用可变轨距技术可能未能达到规模经济。然而，一旦纳入货主因运输时效提升而获得的存货成本节约，以及社会层面因“公转铁”带来的环境正外部性，该技术的整体社会净效益便可能转正。这凸显了在重大基础设施投资决策中，建立跨主体成本—收益分析机制的重要性。

基于上述发现，为充分释放可变轨距运输模式的经济与社会效益，建议从以下3方面完善政策支持。一是对高运量既有口岸，可设立技术升级专项引导资金，对车辆购置与检修设施改造给予阶段性财政补贴，降低铁路企业投资门槛；二是在前期对采用可变轨距运输的货主给予运费优惠或专项补贴，直接降低其物流成本，可在试点线路实行“高效班列运价下浮”政策，或由地方政府对使用该模式的外贸企业给予物流成本补助，通过强化货主采用新技术的经济激励，加速市场培育，形成“用得多—成本降—用得更多”的正向循环；三是将该技术在减少换装能耗、推动“公转铁”等方面的环境正外部性纳入绿色交通政策评估体系，未来条件成熟时，可将其量化效益作为申请绿色金融或碳减排激励的依据。总之，通过多主体协同的制度设计，推动可变轨距运输模式实现规模化、可持续应用。

综上所述，可变轨距运输模式不仅是技术革新，更是优化国际物流供应链、促进区域协同发展的重要抓手。政府、铁路企业与货主应形成合力，通过合理的运价机制、财政补贴或碳交易等方式，内部化其产生的正外部性，共同推动这一高效、绿色运输模式的规模化应用。

3　结束语

随着与“一带一路”沿线国家的贸易规模不断增加，我国各主要铁路口岸均出现过境能力难以满足需要的问题。目前我国可变轨距转向架技术得到长足进步，研究如何应用变得尤为紧迫。通过对变轨距运输模式展开经济性研究，从车辆购置、线路建设、日常运营3个方面深入分析，探讨采用变轨距运输模式的条件及应用后的潜在影响，为现有换装站或中远期规划新建车站提供实用的参考价值，为我国铁路国际化、高质量发展提供技术支持。

参考文献：

[1] 王姣娥，焦敬娟，景　悦，等．“中欧班列”陆路运输腹地范围测算与枢纽识别[J]. 地理科学进展，2017，36(11)：1332-1339.
WANG Jiaoe，JIAO Jingjuan，JING Yue，et al. Transport Hinterlands of Border Ports by China-Europe Express Trains and Hub Identification[J]. Progress in Geography，2017，36(11)：1332-1339.

[2] 王清斌，董　悦．基于节点换装时间不确定的多任务集装箱运输方案优化[J]. 铁道运输与经济，2019，41(9)：93-99.
WANG Qingbin，DONG Yue. A Research on Optimization of Multi-Task Container Transportation Scheme Based on Uncertain Node Replacement Time[J]. Railway Transport and Economy，2019，41(9)：93-99.

[3] 刘　畅，张　巍，秦欢欢，等．中欧班列南通道发展定位及策略研究[J]. 铁道货运，2024，42(10)：7-12，22.
LIU Chang，ZHANG Wei，QIN Huanhuan，et al. Research on Development Positioning and Strategies of South Corridor of China Railway Express[J]. Railway Freight Transport，2024，42(10)：7-12，22.

[4] 祁明明，李　斐，胡严艺，等．基于贸易货流特征的中欧班列货运经济性研究[J]. 物流技术，2020，39(3)：34-39.
QI Mingming，LI Fei，HU Yanyi，et al. Analysis of Transportation Economics of China-Europe Railway Express Based on Goods Flow Characteristics[J]. Logistics Technology，2020，39(3)：34-39.

[5] 付新平，张　雪，邹　敏，等．基于价值量模型的中欧班列经济性比较分析[J]. 铁道运输与经济，2016，38(11)：1-5，11.
FU Xinping，ZHANG Xue，ZOU Min，et al. Analysis on Economics of China-Europe Block Trains Based on the Value Model[J]. Railway Transport and Economy，2016，38(11)：1-5，11.

[6] 付新平，张逸轩，万鸿鹄．我国中西部地区中欧班列通道经济性优化研究[J]. 铁道运输与经济，2017，39(4)：26-30.
FU Xinping，ZHANG Yixuan，WAN Honghu. Study on Economy Optimization of China-Europe Block Train Corridor in Central West of China[J]. Railway Transport and Economy，2017，39(4)：26-30.

[7] 冯芬玲，刘　洋．考虑货物时间价值的中欧班列差异化补贴经济性分析[J]. 铁道运输与经济，2022，44(6)：1-7.
FENG Fenling，LIU Yang. Economic Analysis of Differentiated Subsidy for China-Europe Railway Express Considering Freight Time Value[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(6)：1-7.

[8] 冯芬玲，张　泽，蔡明旭．考虑补贴退出的中欧班列多主体策略演化博弈[J]. 铁道学报，2023，45(12)：47-57.
FENG Fenling，ZHANG Ze，CAI Mingxu. Evolutionary Game of Multi-Subject Strategies for China Railway Express Considering Subsidy

Withdrawal[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(12): 47-57.

[9] 王　菲，张　巍，吴云云，等. 国际联运可变轨距车辆运用经济可行性分析[J]. 铁道运输与经济，2023，45(6)：93-98.
WANG Fei, ZHANG Wei, WU Yunyun, et al. Economic Feasibility Analysis of Variable Gauge Vehicles in International Intermodal Transport[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(6): 93-98.

[10] 曾　玮，贾晋中. 新形势下中欧班列的市场空间及其改善策略[J]. 交通运输系统工程与信息，2022，22(6)：60-67.
ZENG Wei, JIA Jinzhong. Market Space and Improvement Policies for China-Europe Railway Express Operations under New Situations[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 60-67.

[11] 曾　玮，毛保华. 基于货物价值特性的国际集装箱班列竞争力分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2019，19(2)：37-45.
ZENG Wei, MAO Baohua. A Competitiveness Analysis of International Container Transport Based on Value of Goods[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(2): 37-45.

[12] 张　桐，毛保华，曾　玮，等. 集装箱公铁联运定价策略的博弈分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2018，18(6)：209-214，256.
ZHANG Tong, MAO Baohua, ZENG Wei, et al. Pricing Strategy of Container Rail-Road Intermodal Transport Based on Game Theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(6): 209-214, 256.

[13] 李　芾，邵亚堂，黄运华，等. 国外变轨距列车及其转向架的发展与研究[J]. 机车电传动，2018(3)：1-13，22.
LI Fu, SHAO Yatang, HUANG Yunhua, et al. Development and Research of Foreign Gauge-Changeable Train and Bogie[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(3): 1-13, 22.

[14] 黄运华，李　芾，傅茂海. 一种新型轨距可变转向架及其动力学分析[J]. 中国铁道科学，2003，24(6)：1-5.
HUANG Yunhua, LI Fu, FU Maohai. A New Type of Variable-Gauge Bogie and Its Dynamics Analysis[J]. China Railway Science, 2003, 24(6): 1-5.

[15] 黄运华. 基于独立旋转车轮的变轨距转向架研究[D]. 成都：西南交通大学，2003.

[16] 李　涛. 高速变轨距转向架设计及动力学性能研究[D]. 成都：西南交通大学，2018.

[17] LIU Y M, HU T, WANG H R, et al. Dynamic Implementation and Verification of the Gauge Changing Function of High Speed Variable Gauge Bogies[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(24): 11366-11378.

[18] 邹美凤，于富生. 公益性业务成本核算：以铁路运输企业为例[J]. 财会通讯，2015(8)：66-68.

（责任编辑：金　晶）

Economic Analysis of Variable-Gauge Vehicles Based on Multi-Dimensional Costs under Leadership of Railway Enterprises

FENG Fenling[1], WEI Shihao[1], HAN Ying[2]

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 2. Science and Information Department, China Railway Urumqi Group Co., Ltd., Urumqi 830001, Xinjiang, China)

Abstract: To evaluate the application value of variable-gauge vehicles, a multi-stakeholder economic analysis framework covering shippers, railway enterprises, and society was established. A total cost difference estimation model from the railway enterprise perspective was developed, integrating vehicle procurement, station construction, and daily operation costs. Two representative cases were selected for empirical calculation: Khorgos (existing station retrofitting) and Makmal (new station construction). The results show that the adoption of variable-gauge vehicles has significant cost advantages for new stations. For existing stations, cost savings are achievable only when the annual number of cross-border freight trains exceeds a specific threshold; however, this threshold decreases further when the reduced capital occupancy costs of shippers due to a shorter transit time are considered. This paper provides a quantitative basis for decision-making on whether to adopt this technology under different scenarios.

Keywords: Economic Analysis; Variable-Gauge Bogie; Vehicle; Railway Enterprise; Shipper