doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.05.005

城市轨道交通全自动机械灵活编组模式下行车组织方案

陈　阳，向　红
（中铁二院工程集团有限责任公司，成都 610031）

摘　要：为解决城市轨道交通线路客流时空分布不均衡问题，实现运力与运量的精准匹配，有效降低运营成本，对灵活编组模式进行研究。全面分析灵活编组研究现状、客流适应性及工程实施技术要求，并以青岛地铁 5 号线工程为研究对象，梳理在线解编联挂作业流程及该模式下行车交路设计、列车配属方案、配线设置、能力计算及运营经济效益分析等内容。研究结果表明：灵活编组作业地点宜在交路折返站、出入线接轨站配线区，折返站宜按双折返线布置以提高折返能力；灵活编组技术所额外增加的工程投资，以车辆和信号系统为主，占比约 90%，建议建设期优先预留配线、站台门等技术条件；相较于常规 6 辆固定编组方案，采用 6 辆固定编组和 3+3 灵活编组混跑方案更加经济适用，在牵引能耗、维护费用方面节省明显，但现阶段该技术存在系统能力受制约、设备投资增幅较大、运营管理复杂等问题，还需进一步优化。研究结果可以为类似线路的行车组织方案设计提供参考。

关键词：城市轨道交通；在线解编联挂；行车组织；折返能力；运营效益
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)05-0035-07

Train Operation Organization under a Fully Automated Mechanical Flexible Marshalling Mode for Urban Rail Transit

CHEN Yang, XIANG Hong
(Creec Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031)

Abstract: This study investigates a flexible marshalling mode to address the pronounced temporal-spatial imbalance of passenger flows in urban rail transit, achieve a more precise matching between supply (capacity) and demand (ridership), and thereby reduce operating costs. A comprehensive analysis is conducted on the current state of research on flexible marshalling, its passenger-flow adaptability, and engineering implementation requirements; using Qingdao Metro Line 5 as a case, the study further structures the online coupling/decoupling workflow and examines train operation routing design, fleet allocation strategy, track layout requirements, capacity evaluation, and life-cycle operational economic benefits. Results show that online coupling/decoupling is best located within the track arrangement zones of turnback terminals and junction stations, and that configuring terminals with paired turnback sidings increases turnback capacity. Additional capital expenditures attributable to the flexible mechanical marshalling mode are dominated by rolling stock and signalling systems, which together account for approximately 90%; it is therefore recommended that civil works reserve the necessary interfaces (e.g., for track layout adjustments and platform screen doors) during initial construction. Compared with an all-6-car fixed formation baseline, a mixed operation pattern comprising conventional 6-car fixed formations and 3+3 flexible coupled sets yields superior cost effectiveness through notable reductions in traction energy consumption and maintenance costs; nevertheless, current deployment remains constrained by limited system capacity, higher marginal equipment

收稿日期：2024-12-05　修回日期：2025-07-14
第一作者：陈阳，男，硕士，高级工程师、注册规划师、注册咨询师，主要从事城市交通运输组织优化研究，313810792@qq.com
基金项目：中国中铁股份有限公司(KSWQ257006)
引用格式：陈阳，向红．城市轨道交通全自动机械灵活编组模式下行车组织方案[J]．都市快轨交通，2025，38(5)：35–41.
CHEN Yang, XIANG Hong. Train operation organization under a fully automated mechanical flexible marshalling mode for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(5): 35–41.

investment, and increased operational management complexity, all requiring further optimization. The findings provide a technical and organizational reference for designing train operation schemes on comparable urban rail lines.
Keywords: urban rail transit; online coupling and decoupling; train operation organization; turnback capacity; operational benefits

随着城市轨道交通骨干线的基本建成，轨道交通建设普遍进入市区加密、市域拓展阶段，后续线路的客流效益逐渐减弱，同时客流时空分布不均衡的不利影响也更加凸显。为提高城市轨道交通线路运营经济性，各企业更加重视运能与运量的精准匹配，灵活编组模式也越来越受到关注。

目前，列车灵活编组模式通常分为 3 类：第一类是不同车辆数组成的固定大小编组，如重庆轻轨 2 号线运营初期，常态化采用 4、6 辆两种固定编组混跑，目前是 6、8 两种固定编组混跑；第二类是基于车钩灵活拆解联挂的机械灵活编组模式，如目前已开通的上海地铁 16 号线的 3+3 编组方案；第三类是基于无线通信和信号系统的虚拟灵活编组模式，这类灵活编组突破了车钩联挂的物理约束，但需要更加安全可靠的通信及列控系统来保障列车运行安全，目前尚处于理论研究和实验阶段。

在灵活编组理论研究方面，宋仲仲等[1-5]侧重于分析灵活编组模式下车辆、信号、配线及场段等实现条件，并提出该模式可降低牵引能耗 32.6%等运营效益；段博韬[6]提出灵活编组模式下通过能力分析方法，验证了在线解编联挂模式下折返能力能够满足转换期运营需求。

在灵活编组实践应用方面，德国慕尼黑 S1 线、日本总武快速线、关空快速线等线路均在郊区主支线接轨站采用正线解编连挂方式，解编联挂作业时间约 3～5 min，但因郊区段行车间隔较大(大于 10 min)并不影响正线运能[7]。上海地铁 16 号线是首条实现在线解编联挂方案的线路，列车解编联挂作业点已由场段调整为正线车站[8]，但因设计阶段未系统考虑正线解编联挂需求，且为半自动机械编组，目前处于试行阶段，每日仅平峰开行 3 对列车。青岛地铁 5/9/15 号线正在对全自动运行系统下基于车钩的机械灵活编组技术开展研究和应用探索。

上述研究虽然在灵活编组实施技术、折返能力及效益分析方面已有相关成果，但从行车组织角度系统研究灵活编组模式下行车交路、列车配属、车站配线、经济效益等方面的成果仍较少，有必要开展针对性研究。本文以青岛地铁 5 号线灵活编组调整设计为案例，重点对基于车钩装置的“3+3”灵活编组方案的适应性、实施技术要求及行车组织方案进行全面分析和总结。

1 灵活编组适应性及实施技术要求

1.1 青岛地铁 5 号线灵活编组适应性分析

青岛地铁 5 号线是串联青岛东岸核心城区的“U”型骨干线。规划线路长约 40.0 km，均为地下线，共设车站 31 座，线路走向示意如图 1 所示。其中一期工程长约 34.6 km，设站 28 座，平均站间距 1.23 km。全线于线路中部设置镇平路车辆段 1 座。线路拟采用时速 80 km/h 的地铁 B 型车、DC1 500V 接触轨受流和基于车车通信的全自动运行系统。根据列车灵活编组控制的自动化等级分类[5]，本项目列车重联及拆解功能均由系统控制，无需人工参与，属于全自动机械编组等级。

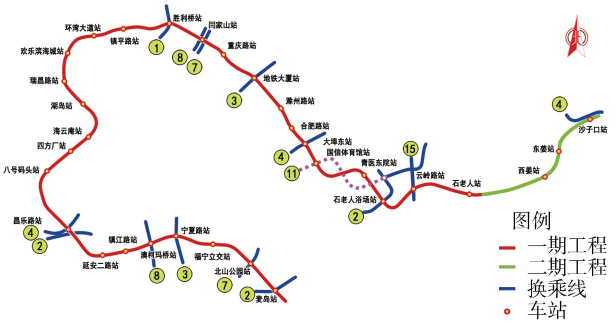


图 1 青岛地铁 5 号线线路走向示意

Figure 1 Alignment of Qingdao Metro Line 5

根据客流预测[9]，5 号线早高峰系数达 19.4%，平峰时段平均系数约 4.3%，高峰时段客流约为平峰时段的 4 倍，如全线各设计年度均采用 6 辆固定编组，则会有运营经济性欠佳的弊端，因此提出采用灵活编组的设计方案，以降低运营成本。

1.2 灵活编组实施的技术要求

相较于 6 辆固定编组列车，基于车钩装置的“3+3”灵活编组方案在车辆、信号及站台门等方面有相应的要求，具体如表 1 所示。

行车组织研究重点是明确在线解编联挂作业时段、作业站点及其配线方案，提出经济合理的行车交路、行车计划及列车配属方案。

2 青岛地铁 5 号线灵活编组行车组织方案

2.1 灵活编组作业时段选择

采用灵活编组方案，旨在解决客流在时段或区段上存在明显差异的问题。一般在高峰时段，宜采用大

表 1　3+3 灵活编组(在线解编联挂模式)实施技术要求

Table 1　Technical requirements for implementing the 3+3 flexible mechanical marshalling (online coupling/decoupling) mode

项目	3+3 灵活编组(在线解编联挂模式)实施技术要求
车辆	头车、中间车采用等长设计，压缩头车长度(比常规减少 0.9 m)，使得 3+3 辆编组列车与 6 辆固定编组列车等长(均为 117.12 m)；车门采用等间距设计(同一辆车 4 460 mm、两辆车之间 6 140 mm)，使得不同编组列车车门可与站台门对应；配置全自动车钩，以具备机械连接、气路连接、电路连接、重联状态联锁等功能
通信信号	3 编组列车配置完整冗余车载设备，相比一列 6 辆固定编组，3+3 辆编组列车增加一套车载信号设备；增加车载路由器和中继器，用于联挂后的列车通信；在联挂解编区域增设应答器等设备；联挂作业时间约 104 s，解编作业时间约 84 s
站台门	按照站台端部停车考虑，3 辆编组、6 辆固定编组及 3+3 辆编组列车车门均可与站台门滑动门对应
作业区域	从在线解编联挂作业一般不载客，且应不影响正线其他列车运营方面考虑，作业站点宜选择交路折返站、出入线接轨站的配线区域
车站配线	专用于在解编联挂的配线需考虑列车长度、信号安全防护距离和联挂作业前的一度停车间距。当联挂作业要求前车为不可撞击时，一度停车间距为 15 m；当前车为可撞击时，一度停车间距为 5 m
供电	岔区接触轨断口长度需满足 3 辆编组列车能惰行通过要求
车辆段	停车列检库股道有效长度满足解编联挂作业要求，场段土建规模无增加，但需增加司机登乘梯、信号定位装置等设备

编组列车以保障运输能力，在平峰时段则尽可能将大编组列车拆解为小编组，开行小辆编组列车在保障服务水平的同时降低运营成本。因此，列车在线解编联挂作业时段一般在高平峰转换期完成。

青岛地铁 5 号线灵活编组转换时段设置在早高峰转平峰期的 9:00～10:00 和晚高峰来临之前的 16:00～17:00，以及晚高峰结束后的 19:00～20:00。

2.2　灵活编组作业站点选择及配线设计要求

2.2.1　灵活编组作业地点选择

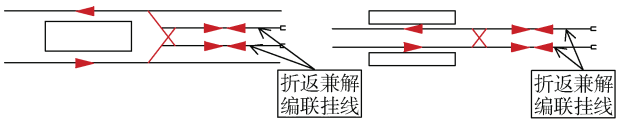
灵活编组作业地点主要分为场段内部和正线范围。在场段内部开展灵活编组作业，需列车频繁出入场段，存在作业效率低、增加空驶里程、管理复杂等问题[1]，故建议在非运营时段采用该方案；而在运营时段则建议在正线范围进行灵活编组作业。

根据列车解编联挂流程，在线作业地点需满足以下要求：①列车联挂解编作业均需满足一度停车间距要求(5 m 或 15 m)；②低速碰撞中被联挂列车可能会产生位移，从安全考虑应不载客作业；③列车联挂作业时间约为 104 s，解编作业时间约为 84 s，远超车站停站时间，故不宜在站台正线侧进行联挂解编作业，以避免长时间干扰正线运营。

综上，灵活编组作业地点建议选择在正线范围的行车交路折返站、出入线接轨站配线区域。

2.2.2　灵活编组作业站点配线设计要求

1) 折返站配线设计。折返站需实现列车连续折返、折返+解编联挂、连续解编联挂作业 3 类场景功能。结合灵活编组模式下折返能力分析，折返站宜按站后双折返线设计，实现咽喉区交替作业，有效提高灵活编组模式下的接发车能力。以连续解编作业为例，相较于单折返线，双折返线下可提升接发车能力约 40%。折返站配线形式如图 2 所示。

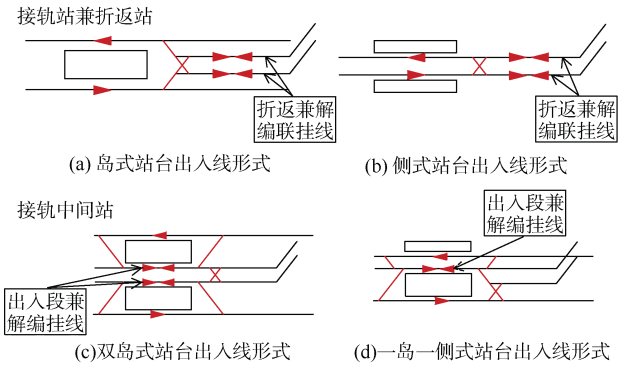


(a) 岛式站台站后双折返线　(b) 侧式站台站后双折返线

图 2　折返站配线形式及作业点示意

Figure 2　Track layout configuration and operation points at turnback stations

2) 出入线接轨站配线设计。当出入线接轨站需实现解编联挂作业时，同样要满足不载客作业、不干扰正线行车需求，当接轨站兼折返站时，其配线作为常态化解挂编地点，宜与折返站配线类似；当接轨站仅为普通中间站时，其配线仅需作为解挂编备用地点，宜设置专用作业线。出入线接轨站的配线形式如图 3 所示。



(a) 岛式站台出入线形式　(b) 侧式站台出入线形式

(c)双岛式站台出入线形式　(d)一岛一侧式站台出入线形式

图 3　不同出入线接轨站的配线形式及作业点示意

Figure 3　Track layouts and operation points at different entry/exit junction stations

综上所述，5 号线推荐在起点麦岛站、终点石老人站(远期在沙子口站)利用站后双停车线实现联挂/解编

作业，同时在线路中部车辆基地接轨站环湾大道站利用清客线作为备用作业点。5 号线解编联挂作业站点及其配线形式如图 4 所示。

3) 灵活编组在线拆解作业流程。5 号线列车初期利用起终点麦岛站+石老人站双折返线完成在线解编联挂作业。为实现 1 h 左右完成解编联挂作业，建议采用连续解编、联挂方式。

列车解编作业流程为：在高峰转平峰期间，为满足连续解编作业的接车间隔要求，需先进行 6 辆固定编组列车回段，再在线解编 3+3 编组列车。如运营初期，需将 18 列(6 固编)完成回段作业，再开展 13 列(3+3 编)经折返线解编为 26 列(3 编)后上线运行。

列车联挂作业流程为：在平峰转高峰期间，也需先将 3 辆编组列车在折返线连续联挂后，再将 6 辆固定编组列车出段上线。如运营初期，需将 26 列(3 编)列车经折返线联挂为 13 列(3+3 编)后，再安排 18 列(6 固编)出段上线。解编连挂作业流程如图 5 所示，其中解编、连挂作业的两列车之间按 5 或 15 m 考虑。

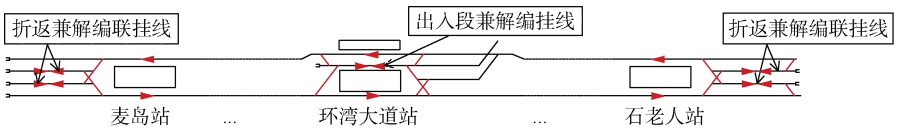


图 4 5 号线联挂、解编作业站点及其配线形式

Figure 4 Coupling/decoupling operation sites and corresponding track layouts on Line 5

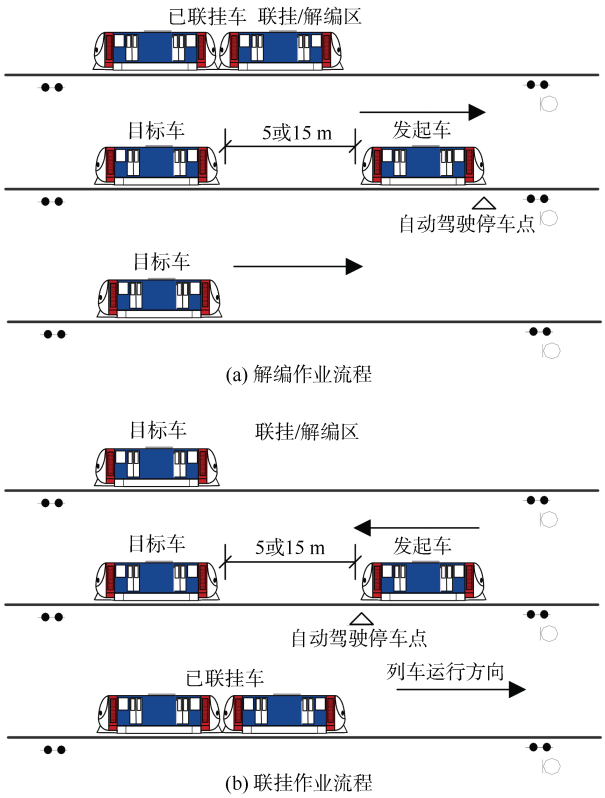


图 5 列车解编、联挂作业流程示意

Figure 5 Workflow of train decoupling and coupling operations

2.3 灵活编组运营交路及配车方案

2.3.1 客流需求及行车对数

1) 高峰时段。根据客流预测，5 号线初、近、远期早高峰时段断面客流量分别为 1.29 万人次/h、2.19 万人次/h、2.7 万人次/h，结合线网换乘匹配要求，各设计年度早高峰时段行车量按 15、21 和 24 对/h 考虑，列车配属需求为 39、60、65 列车。需考虑全部采用 3+3 灵活编组或部分 6 辆固定编组加部分 3+3 辆灵活编组，两种方案做经济比较后决策。

2) 平峰时段。按照全日分时段客流比例(高峰：平峰为 4：1)分析，平峰时段断面客流量约为 0.32 万人次/h、0.55 万人次/h、0.68 万人次/h。若采用部分固定编组加部分灵活编组模式，灵活编组列车需求量由平峰时段确定，平峰时段输送能力如表 2 所示。

表 2 平峰时段设计输送能力

Table 2 Designed transport capacity during off-peak periods

项目	初期(2031 年)	近期(2038 年)	远期(2053 年)	系统规模
运营范围(运营长度/km)	麦岛站-石老人站(33.8)	麦岛站-沙子口站(39.3)	麦岛站-沙子口站(39.3)	麦岛站-沙子口站(39.3)
平峰最高客流断面/(万人次/h)	0.34	0.55	0.68	-
列车编组(定员/(人/列))	3 辆编组(612)	3 辆编组(612)	3 辆编组(612)	3 辆编组(612)
平峰小时列车开行对数/(对/h)	12	12	14	15
设计输送能力富余/%	54	25	19	-
3 辆编组运用车数/列	25	29	33	36

2.3.2 列车配属方案

由表 2 可以看出，平峰时段所需 3 辆编组车辆仅为高峰时段配属车的 43%，因此需要考虑高峰时段的列车配属方案。以运营初期为例，存在以下两种方案：

1) 方案 1：初期全采用 3 辆编组列车，则初期总

投资增加约 3.76 亿元。该方案运营管理便利，统一一种车型，车辆调度及车底运用更加灵活。但每天仅 40% 列车联挂、解编，需采用隔日轮换解编联挂方案平衡走行公里数，存在车辆资源闲置问题。

2) 方案 2：初期采用 3 辆编组和 6 辆固定编组混跑方案，初期总投资增加 1.72 亿元。该方案存在两种类型列车，运营管理及列车调度复杂，每日列车开行计划需固定 3 辆编组列车车底计划，且存在两种类型车辆走行公里数不一致带来的检修周期差异，该差异暂不影响检修修程，后期也可采用周日上线 6 辆固定编组列车平衡走行公里数。

考虑到 5 号线初期全采用 3 辆编组列车投资增幅较大，且 30 年运营期内经济性差，建议采用方案 2，并根据开通年、初期年客流需求制定车辆分批采购程序。

2.3.3 列车运行交路推荐方案

综上，推荐 5 号线高峰时段采用 6 辆固定编组和 3+3 辆编组列车混跑，平峰时段仅运行 3 辆编组列车。各年度所需配置的 3 辆编组列车数由平峰时段运输需求确定。列车运行交路如图 6 所示。

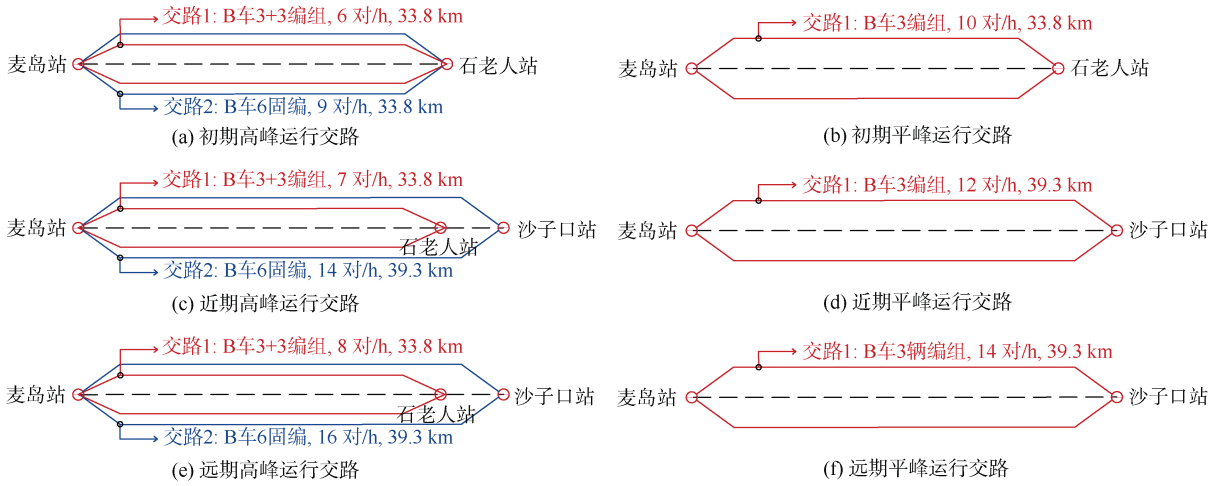


图 6　5 号线高平峰时段列车运行交路示意

Figure 6　Train operation patterns during peak and off-peak periods on Line 5

2.4 灵活编组模式下折返能力分析

麦岛站、石老人站均设置站后双折返线，高峰时段需满足 3+3 编组或 6 辆固定编组列车常规的最小行车间隔 120 s，该场景下连续接车作业间隔约 112 s、发车作业间隔 109 s，均满足要求。而在线解编联挂模式下，需额外增加列车在折返线上解编、联挂作业时间，即解编 84 s、联挂 104 s。配线能力核算重点是高平峰转换期的接车能力、发车能力。

以在线连续解编作业为例，列车交替解编作业横道图如图 7 所示。由图 7 可知：①当站后双折返线交替进行解编作业时，前后两列 3+3 编组列车连续接车间隔约 217 s，前后两列 3 辆编组列车连续发车间隔约 109 s。可以看出，受折返线上解编列车占用影响，接车能力受限，故在进行连续解编作业前，需将 6 辆固定编组列车提前回段，使正线行车间隔降低至 16 对/h 即可满足运营需求。②当采用站后单折返线进行解编作业时，差异在于第二列 3+3 编组列车必须前序两列小编组车均出清折返线后才能办理咽喉作业，此时连续接车间隔约 307 s、发车间隔约 151 s。连续解编作业模式下，相较于单折返线，双折返线方案折返能力提升约 40%。

3 30 年运营期经济性分析

3.1 工程投资分析

相较于 6 辆固定编组列车，每多购置一列 3+3 编组列车，需增加车辆购置成本 584 万元和一套信号车载设备约 347 万元。因此相较于 6 辆固定编组方案，3+3 灵活编组模式下工程投资增幅也明显较大，主要包括车辆、信号、通信、站台门及配线工程方面。从投资增幅来看，车辆占比约 60%，信号占比约 32%，而车站站台门和土建工程仅占比约 3%～7%。设备及土建投资增加内容如表 3 所示。

相较于全 3+3 编组方案，采用 3+3 和 6 辆固定编组混跑方案下，初期工程投资增值可由 3.76 亿元降低至 1.72 亿元，且节省的列车走行公里数相当，是相对经济适用的方案。

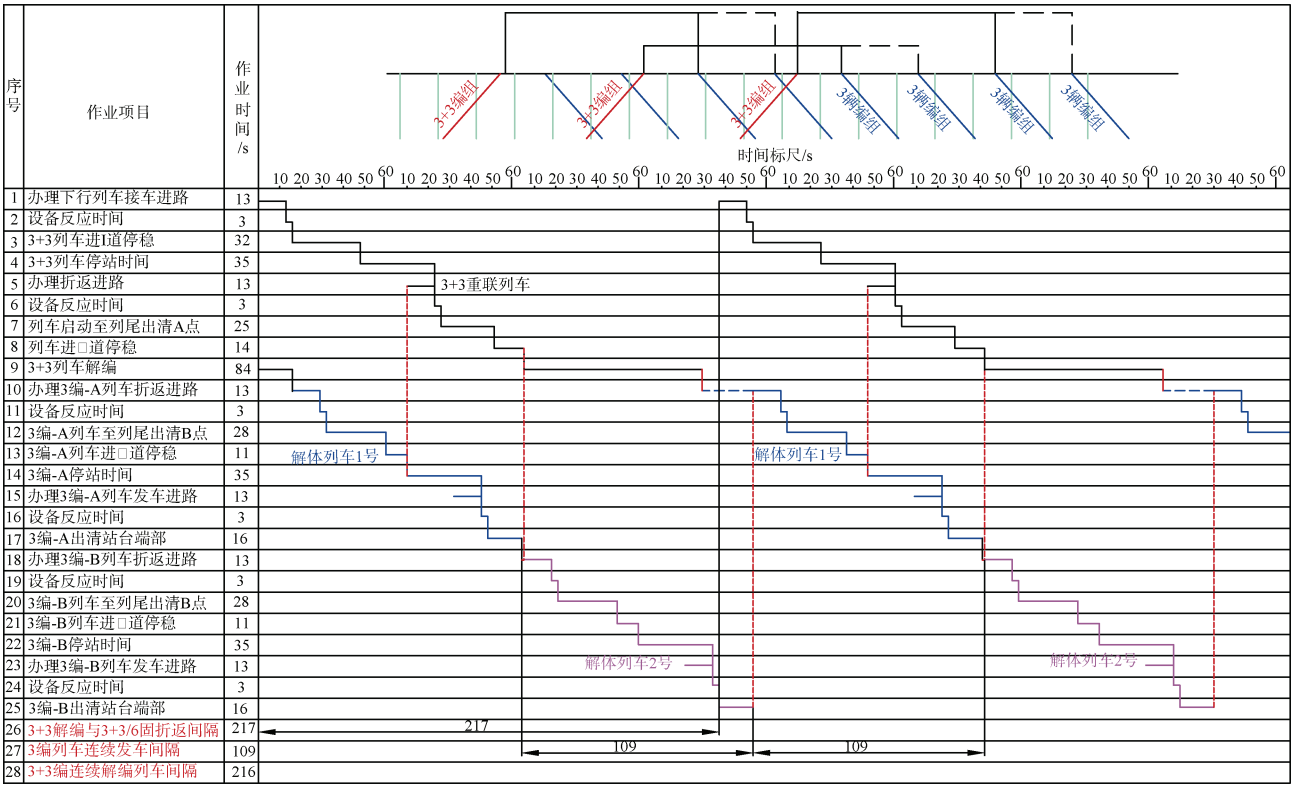


图 7　车站双折返线下交替解编作业横道图

Figure 7　Gantt chart of alternating decoupling operations on paired turnback sidings

表 3　30 年运营期内运营经济性对比分析

Table 3　Comparative analysis of 30-year operational economic performance

编组方案	车辆配属/辆			年走行公里数/(万车·km)			投资增加/万元		成本减少			30 年运营期经济效益/万元
	初期	近期	远期	初期	近期	远期	初期	30 年运营期	走行公里数/(万车·km)	牵引能耗电费/万元	车辆维护成本/万元	
全 6 辆固定编组	234	360	396	3 110	4 367	5 066	比较基数	比较基数	比较基数	比较基数	比较基数	比较基数
全 3+3 编组	234	360	396	2 376	3 253	3 679	+37 581(车辆：22 794；信号：12 336；通信：1 170；站台门：398；车站配线：850)	+62 675(车辆：38 574；信号：20 814；通信：1 980；站台门：423；车站配线：850)	–41 370	–49 053	–8 938	+1 453
3+3 和 6 辆固定编组	102 + 132	120 + 240	132 + 264	2 376	3 253	3 679	+17 156(车辆：9 936；信号：5 428；通信：510；站台门：398；车站配线：850)	+21 823(车辆：12 858；信号：6 998；通信：660；站台门：423；车站配线：850)	–41 370	–49 053	–8 938	–39 091

注：B 型车单位牵引能耗取值 1.7 kWh/(车·km)，电费单价取值 0.71 元/kWh。

3.2　运营经济性分析

相较于 6 辆固定编组方案，3+3 灵活编组模式下 30 年运营期内列车走行公里数能有效降低 27%，其经济性也体现在由此引起的牵引能耗节约和车辆维护成本减少两方面。

另外，采用全 3+3 编组方案，因车辆及信号设备投资增幅明显较大，30 年运营期内增加 1 453 万元，未体现出经济性。而采用 3+3 和 6 辆固定编组混跑方案，30 年运营期内可节省约 3.9 亿元。

4　结论

本文以青岛地铁 5 号线为例，系统分析了基于车钩装置灵活编组模式下的作业时段、作业站点、配线设计、行车交路、能力计算及列车配属等行车组织内容。得出以下结论：

1）基于列车解编联挂流程分析，建议解编联挂作

业地点宜在折返站、出入线接轨站的配线区。且折返站宜按双折返线布置以提高交替折返能力，以连续解编作业为例，相较于单折返线，双折返线下可提升接、发车能力约 40%。

2) 以“全 6 辆编组方案”为比较基数，对“全 3+3 编组方案”和“3+3 与 6 辆编组组合方案”做 30 年运营期经济效益分析，二者所节省的牵引能耗、维护费相当，但后者在车辆和信号投资上减少约 65%，是更为经济适用的方案。其中 3 辆编组列车数需求可由平峰时段运营方案确定。

3) 基于车钩装置的灵活编组技术尚未形成规模化应用，目前车辆和信号系统占投资增额的比重约 90%，建议初期优先预留土建、站台门、配线等技术条件，运营后再根据客流需求制定购车方案。

基于车钩装置的在线解编联挂技术在国内尚处于起步阶段，该方案还存在着系统能力低、稳定性欠佳、设备投资增幅大、运营管理复杂等问题，有待进一步优化。相较于应用广泛的大小编组混跑方案，该方案的大规模应用还需相关技术的进一步发展。

参考文献

[1] 宋仲仲. 城市轨道交通灵活编组优势及实现条件分析[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(5): 10-15.
SONG Zhongzhong. Analysis on advantages and realization conditions of flexible marshalling in urban rail transit[J]. Railway standard design, 2024, 68(5): 10-15.

[2] 刘宏杰, 唐涛, 张艳兵, 等. 城轨虚拟编组关键性能指标及技术探讨[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 28-35.
LIU Hongjie, TANG Tao, ZHANG Yanbing, et al. Discussion on the key performance indicators and technologies of virtual coupling in metros[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 28-35.

[3] 韩宝明, 龙宇轩, 张琦, 等. 基于虚拟编组的市域列车运行组织优化研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 43-50.
HAN Baoming, LONG Yuxuan, ZHANG Qi, et al. Optimization of suburban train operation organization based on virtual coupling[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 43-50.

[4] 韩波, 邢行, 赵文龙. 双碳目标下城市轨道交通灵活编组运营方案技术可行性及经济效益分析[J]. 现代城市轨道交通, 2023(3): 72-78.
HAN Bo, XING Xing, ZHAO Wenlong. Technical feasibility and economic benefit analysis of the flexible marshaling operation of urban rail transit under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Modern urban transit, 2023(3): 72-78.

[5] 轨道交通运行控制系统国家工程研究中心, 北京协同创新轨道交通研究院有限公司. 《北京轨道交通列车灵活编组控制技术》白皮书[R]. 北京, 2023.

[6] 段博韬. 基于灵活编组模式的城市轨道交通列车通过能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 118-124.
DUAN Botao. Analysis of urban rail transit train passing capacity based on flexible formation mode[J]. Urban mass transit, 2023, 26(6): 118-124.

[7] 安轲. 国外重联编组运营组织模式应用案例分析及对我国城市轨道交通运营组织的启示[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 222-227.
AN Ke. Analysis of application cases of foreign re-coupling marshalling operation organization modes and implications for urban rail transit operation organization in China[J]. Urban mass transit, 2025, 28(1): 222-227.

[8] 崔勇. 上海轨道交通 16 号线列车在站解挂编实施方案[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(6): 323-325.
CUI Yong. Train in-station coupling and decoupling scheme for Shanghai metro line 16[J]. Urban mass transit, 2024, 27(6): 323-325.

[9] 青岛市城市规划设计研究院. 青岛市轨道交通 5 号线工程可行性研究客流预测[R]. 青岛, 2021.

[10] WANG P L, GE J H, XIAO X F, et al. Transport capacity analysis for sharing-corridor metro lines under virtual coupling[J]. Computers & industrial engineering, 2024, 192: 110217.

[11] PARK J, LEE B H, EUN Y. Virtual coupling of railway vehicles: gap reference for merge and separation, robust control, and position measurement[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(2): 1085-1096.

（编辑：王艳菊）