文章编号：1001-4632（2025）06-0223-10
引用格式：钟林环，徐光明，秦进，等. 基于滚动时域的铁路候补购票订单动态兑现方法[J]. 中国铁道科学，2025，46(6)：223-232.
Citation：ZHONG Linhuan，XU Guangming，QIN Jin，et al. Dynamic Fulfillment Method for Railway Waitlist Order Based on Rolling Horizon [J]. China Railway Science，2025，46 (6)：223-232.

基于滚动时域的铁路候补购票订单动态兑现方法

钟林环，徐光明，秦 进，胡心磊

（中南大学 交通运输工程学院，湖南 长沙 410075）

摘 要：在12306系统候补购票功能已得到广泛应用的背景下，基于滚动时域思想，利用历史候补订单样本数据刻画未来候补订单需求的不确定性，以候补订单兑现收益最大化和旅客候补时长最小化为优化目标，构建随机规划模型；在采用商用求解器求解模型的前提下，基于滚动时域框架提出铁路候补购票订单动态兑现方法；依托宁杭高铁实际数据验证所提方法。结果表明：随着前视时间窗和历史候补订单样本数据的增加，需求不确定性得到更为准确的刻画，候补订单兑现收益有所提高，且求解时间始终控制在5 s以内，能够满足动态兑现的实时性要求；与不考虑滚动时域优化的静态兑现方法相比，动态兑现方法在单位候补时长惩罚权重分别取1和3元时，兑现收益分别提升3.88%和5.74%，兑现订单数量分别增加52和55单，同时显著缩短了候补时长。该方法不仅能提升兑现收益及服务质量，而且能更好地适应实际候补订单需求的不确定性。

关键词：铁路运输；铁路客票；候补购票；滚动时域；随机规划
中图分类号：U293.22 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2025.06.22

随着我国高速铁路网络的快速扩展，截至2024年底，我国高铁营业里程已达到4.8万km[1]，高铁成为居民长途出行的主要交通方式之一[2]。然而，我国幅员辽阔，且高铁客流在时间和空间上呈现出显著的不均衡性[3]，常会出现部分区间的车票在预售期内迅速售罄，而部分区间仍存在较多余票的情况。为此，铁路部门通常研究采用合理的售票组织策略，在实现运能与客流需求精准匹配的同时，提升铁路运营收益。

既有的售票组织策略主要包括票额预分、短途套用、票额共用、席位复用、限售和通售等，相关研究已围绕这些策略展开了大量探讨[4−12]。例如，在票额预分方面，文献［7］结合历史客流数据和专家经验，提出了先长途后短途、先有座后无座、先按数量再按比例预分的票额预分原则，构建了铁路旅客列车票额智能预分系统。当票额预分方案确定后，则可采用短途套用、票额共用等策略，依据实时售票情况动态调整票额分配方案，以更灵活地适应实际客流需求。例如，文献［11］针对现行高铁售票组织方式中存在的不足，通过列车分级等方式，实现了预售期外一日一方案以及预售期内票额动态自动调整的目标。

尽管上述研究为铁路售票组织提供了重要的理论支撑，但受到乘客需求随机性及售票过程动态性的影响，票额分配方案仍可能难以完全匹配实际的旅客购票需求，导致部分区间票额未被充分利用，进而影响整体运力效率。为进一步提升运力供给与旅客需求的精准匹配程度，原中国铁路总公司于2018年12月27日正式推出候补购票功能。该功能主要针对运输资源紧张的区段，当旅客在所需车次和席别无票时，可提交购票需求（包括日期、车次、席别）并预付票款；若该线路出现退票或余

收稿日期：2024-07-10；修订日期：2025-09-03
基金项目：国家自然科学基金资助项目（72171236，52302396）；湖南省自然科学基金资助项目（2025JJ50435，2022JJ30767，2023JJ40784）；湖南省研究生科研创新资助项目（QL20230025）
第一作者：钟林环（1997—），男，江西瑞金人，博士研究生。E-mail：huanlinzhong@csu.edu.cn
通讯作者：徐光明（1986—），男，湖南岳阳人，副教授，博士。E-mail：xuguangming@csu.edu.cn

票，12306系统将自动为旅客购票。候补购票功能的推出，不仅有助于更准确地掌握客流需求信息，优化运力配置，还能够有效抑制抢票软件的不良影响，提升铁路售票系统的公平性和效率[13]。

然而，当前候补购票功能仍处于探索阶段，相关研究较为有限。在实际运营中，候补购票订单的兑现主要依赖人为经验设定的“兑现策略”进行实时决策，且决策时往往面临两大挑战。其一，为了满足旅客的候补购票需求，需要利用当前剩余票额进行兑现，但由于旅客候补订单涉及的乘车区间长短不一，订单兑现面临两难抉择，若过早兑现大量短途候补订单，可能导致“长票短卖”，降低列车运输资源的整体利用效率；若未能及时兑现，则可能造成余票闲置，影响整体收益。其二，候补订单需求在整个候补购票阶段具有较强的随机性，且当前时刻的兑现决策会直接影响后续时段的兑现方案，因此在动态兑现过程中，需要充分考虑未来候补订单需求的不确定性，以增强兑现策略的前瞻性，从而提高整体收益及候补订单兑现的及时性。

基于上述考虑，本文构建了基于滚动时域框架的铁路候补购票订单动态兑现方法，包括模型、算法及具体兑现流程。该方法通过动态构建前视时间窗，并利用历史候补订单样本数据估计未来候补订单信息的形式，建立随机规划模型对当前候补订单兑现进行决策，提升动态兑现策略的实时适应能力，为优化候补购票兑现策略提供了1种新的探索，能够进一步丰富我国铁路候补购票的理论基础。

1 问题描述

1.1 铁路候补购票订单兑现示例

铁路候补购票是指旅客意向的车次、席别无余票时，可自愿按日期、车次和席别向售票系统预付票款下单多个备选车次，进行排队购票[14]。旅客提交候补订单后，售票系统依据候补订单需求和余票情况进行订单实时兑现，未能兑现的候补订单则按照规定流程退款。在实际运营过程中，兑现候补订单的席位主要源于既有的未售票额及已购票旅客退票后释放的空闲席位，剩余未售席位的可售区间长短不一。

一个典型的铁路旅客候补订单兑现示例如图1和表1所示。具体地，图1以4个车站的线路为例，假设该线路上运行的列车1在候补购票开始时仅有车站1—车站4（区间1—4）上的席位1C及车站1—车站2（区间1—2）上的席位2B未售出；在此基础上，表1展示了对应的候补订单需求及兑现方案，假设在该线路进行候补订单兑现时，共有2个兑现点（即决定兑现哪些候补订单的时间点），铁路部门需在每个候补订单兑现点，依据当前候补订单需求及余票情况，实时决策最优的兑现方案。由图1和表1可知该线路上的未售出席位可以有2种不同的兑现策略：在兑现方案1中，铁路部门于兑现点1裂解区间1—4的余票直接兑现所有候补订单，但兑现后仍会有OD对（2，3）的1张余票，且在兑现点2并无对应的候补订单需求，导致“长票短卖”，最终兑现总收益为15元；在兑现方案2中，铁路部门先不对区间1—4的余票进行裂解，仅兑现OD对（1，2）的一个候补订单，而在兑现点2恰好有OD对（1，4）的候补订单并进行成功兑现，最终兑现总收益为20元。该示例表明，不同的兑现策略对最终收益具有重要影响，合理的兑现策略既能优化资源配置，又能有效提升收益水平。

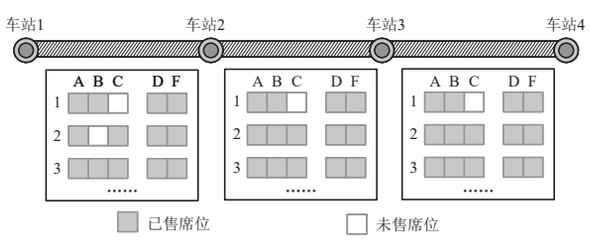


图1 列车1剩余票额示意图

表1 同一需求下不同候补订单兑现方案

最大连续未售区间	余票数量/张	OD对	票价/元	候补订单需求		兑现方案1		兑现方案2	
				兑现点1	兑现点2	兑现点1	兑现点2	兑现点1	兑现点2
1—2	1	(1, 2)	5	2	0	2	0	1	0
1—3	0	(1, 3)	10	0	0	0	0	0	0
1—4	1	(1, 4)	15	0	1	0	0	0	1
2—3	0	(2, 3)	5	0	0	0	0	0	0
2—4	0	(2, 4)	10	0	0	0	0	0	0
3—4	0	(3, 4)	5	1	0	1	0	0	0
总兑现收益/元						15		20	

实际的铁路候补订单兑现过程更为复杂。一方面，旅客在候补购票时可自主选择多个备选车次，并可设置不同的截止兑现时间，导致各候补订单在备选车次及截止时间上可能有所不同，从而显著增加了兑现决策的复杂性；另一方面，候补订单需求的随机性又十分显著，因此在动态兑现候补订单时，必须充分考虑需求不确定性对兑现策略的影响，在确保收益最大化时考虑候补订单兑现的及时性，以实现运力资源的科学有效配置。

1.2　问题定义

为简化问题，以1条单向高铁线路为研究对象，探讨铁路候补购票订单的动态兑现问题（因本问题不涉及次方计算，上标不表示幂运算）。S为该线路的车站集合，$S=\{1,2,\cdots,|S|\}$；K为该线路上运行的列车集合，$K=\{1,2,\cdots,|K|\}$；k为运行列车，$k\in K$；不同列车的停站方案可能不同，S_k为列车k的停站集合，$S_k\subseteq S$；T为兑现点集合，$T=\{1,2,\cdots,|T|\}$；t为当前兑现点，此时的列车剩余运输能力可根据上一个兑现点（$t-1$）的候补订单兑现结果及列车剩余运输能力更新得到，$t\in T$。

为方便描述席位裂解过程，$i-j$为列车$k\in K$的最大连续未售区间，$i<j$，i，$j\in S_k$；$N^t_{k,i,j}$为列车$k\in K$在兑现点$t\in T$时未售席位中最大连续未售区间$i-j$的余票数量；$L_{k,i,j}$为列车$k\in K$最大连续未售区间$i-j$的裂解方案集合；$a^l_{k,i',j'}$为列车$k\in K$的最大连续未售区间$i-j$的裂解方案$l\in L_{k,i,j}$是否可裂解为OD对(i',j')票额的指示系数，若是则取值为1，否则取值为0，因此可对未售席位采用不同裂解方案并得到不同票额方案；Q_t为兑现点$t\in T$时售票系统中的候补订单集合，既包括自上一个兑现点（$t-1$）以来的新增订单，又包括上一兑现点的未兑现订单；q为候补订单，$q\in Q_t$；t'_q，i_q，j_q和κ_q分别为候补订单的下单时间、出发车站、目的地车站和所选择的候选车次列车集合，$t'_q\leqslant t$，$i_q\in S$，$j_q\in S$，$\kappa_q\subseteq K$。

为描述兑现过程中需要满足的余票能力约束，整数变量$z^t_{k,i,j,l}$为列车k运行过程中最大连续未售区间$i-j$采用裂解方案$l\in L_{k,i,j}$进行裂解的区间数量；整数变量$b^t_{k,i,j}$为裂解后列车k中可用来兑现OD对(i,j)的候补订单的票额，其与所选择的裂解方案相关；$P_{q,k}$为候补订单q于列车k成功兑现所产生的收益，即该订单的票价，其数值取决于候补订单q所对应的OD对及兑现列车车次。

在我国铁路候补购票的实际场景中，旅客可选择的截止兑现时间一般为开车前24 h至开车前20 min；而在当前铁路售票规则下，列车开车前24 h所有未售席位一般进入通售阶段，此时票额可随意拆分以满足不同区间旅客的出行需求，候补购票兑现不再具有实际意义[13]。基于此，将所研究的候补订单兑现阶段设定为候补购票开启至列车开车前24 h，并假设所有候补订单的截止兑现时间均为研究范围内的最后1个兑现点$|T|$。

在上述背景下，铁路候补购票订单动态兑现问题的核心目标是：在每个兑现点t，基于当前余票数量$N^t_{k,i,j}$及候补订单需求Q_t，实时决策需要兑现的具体订单范围；在兑现过程中，既需满足余票的运力约束，又需确保每个候补订单最多仅在1列候选车次上兑现的规则，在实现候补订单兑现收益的最大化的同时尽可能提高候补订单兑现的及时性，以提高候补订单兑现的服务质量。

结合中国铁路实际运营情况及文献［10］，进一步抽象和简化问题，作出以下假设。

（1）仅以二等座为研究对象，不考虑其他席别。

（2）不考虑退票、改签等因素。

（3）优先兑现候补订单。

2　基于滚动时域的随机规划方法

在铁路候补购票启动后，每个候补订单的兑现点可视为1个决策阶段，因此，铁路候补订单的动态兑现问题本质上是1个多阶段随机优化问题。由于候补购票期间，未来候补订单的到达情况具有高度随机性，状态转移函数难以通过数学表达式精确刻画。为此，参考文献［15－16］，基于滚动时域优化（rolling horizon optimization）的思想，动态构建前视时间窗，并利用样本平均近似法[17－21]，运用历史候补订单样本数据对未来候补订单信息进行估计，从而建立随机规划模型，辅助当前候补订单兑现点的决策。

假设前视时间窗的长度为h，则兑现点t的时间窗H_t可定义为$H_t=[t+1,t+h]$。为刻画未来候补订单需求的不确定性，依据历史候补订单需求数据生成候补订单样本数据集Ω，每个候补订单样本（简称样本）$\omega\in\Omega$提供未来时刻$t'\in H_t$的候补订单信息集合$Q^\omega_{t'}$。在滚动时域优化框架下，售票

系统在候补订单兑现点t需对整个时间窗$[t,\ t+h]$内的候补订单兑现方案进行优化。

对于时刻$t'\in[t,\ t+h]$，$x_{q,k,t'}$为表示当前兑现点t的候补订单$q\in Q_t$是否由列车$k\in\kappa_q$兑现的0-1变量，若是则取值为1，否则取值为0。$y^{\omega}_{q,k,t''}$为表示样本ω下，未来兑现点$t'\in H_t$的候补订单$q\in Q_{t'}$是否在时刻$t''\geqslant t'$由列车$k\in\kappa_q$进行兑现的0-1变量，若是则取值为1，否则取值为0。在当前兑现点t，售票系统仅执行决策变量$x_{q,k,t}$所对应的候补订单兑现方案，而$y^{\omega}_{q,k,t''}$的决策结果仅用于辅助当前决策，不直接影响当下执行的兑现方案。

考虑到尽可能提高候补订单兑现及时性的优化目标，定义ρ为单位候补时长下的惩罚权重，用于平衡兑现收益与旅客候补时长之间的关系；$W_{q,t}$为候补时长，可由候补下单时间t_q与兑现点t间的时间差值计算得到，即$W_{q,t}=t-t_q$；Z为优化目标函数，由候补订单兑现收益及候补时长惩罚两部分组成。

由此，基于滚动时域框架，在兑现时刻t的随机规划模型可构建为

$$Z=\max\Bigg[\sum_{q\in Q_t}\sum_{t\in[t,t+h]}\sum_{k\in\kappa_q}(P_{q,k}-\rho W_{q,t})x_{q,k,t}+\frac{1}{|\Omega|}\sum_{\omega\in\Omega}\sum_{t'\in H_t}\sum_{q\in Q^{\omega}_{t'}}\sum_{k\in\kappa_q}\sum_{t''\in[t',t+h]}\left(P_{q,k}-\rho W_{q,t''}\right)y^{\omega}_{q,k,t''}\Bigg] \tag{1}$$

s.t.

$$\sum_{k\in\kappa_q}\sum_{t'\in[t,t+h]}x_{q,k,t'}\leqslant 1\qquad\forall q\in Q_t \tag{2}$$

$$\sum_{k\in\kappa_q}\sum_{t''\in[t',t+h]}y^{\omega}_{q,k,t''}\leqslant 1\qquad\forall q\in Q^{\omega}_{t'},\omega\in\Omega,t'\in H_t \tag{3}$$

$$\sum_{l\in L_{k,i,j}}z^{t}_{k,i,j,l}=N^{t}_{k,i,j}\qquad\forall k\in K,i<j\in S_k \tag{4}$$

$$b^{t}_{k,i,j}=\sum_{i'\leqslant i\leqslant j\leqslant j'}\sum_{l\in L_{k,i',j'}}a^{l}_{k,i,j}z^{t}_{k,i',j',l}\qquad\forall i<j\in S_k,k\in K \tag{5}$$

$$\sum_{q\in Q_t}\sum_{t'\in[t,t+h]}x_{q,k,t'}+\sum_{t'\in H_t}\sum_{q\in Q^{\omega}_{t'}}\sum_{t''\in[t',t+h]}y^{\omega}_{q,k,t''}\leqslant b^{t}_{k,i,j}\qquad\forall i<j\in S_k,k\in K,\omega\in\Omega \tag{6}$$

在式（1）—式（6）构成的模型中，式（1）为目标函数，旨在兼顾候补订单兑现收益的最大化与旅客候补时长的最小化，且该式不仅考虑当前时刻的兑现收益，还包含各样本下未来时段内可能实现的平均兑现收益，以提高决策的前瞻性；式（2）表示对于当前兑现时刻的每个候补订单q，最多只能将其在1个兑现时刻及1列列车上进行兑现；式（3）保证在任意候补订单需求样本$\omega\in\Omega$下的前视时间窗$t\in H_t$内，每个候补订单q最多也仅能于1个兑现时刻由1列列车进行兑现；式（4）表示各列列车未售席位选择对应裂解方案的数量；式（5）计算各列列车未售席位中，裂解并用于兑现OD对$(i,\ j)$的票额数量；式（6）表示当前时刻以及前视时间窗内，兑现的候补订单数不能超过对应裂解出的票额数。

上述随机规划模型属于整数线性规划问题，可直接利用商业求解器（如CPLEX和Gurobi等）进行求解。基于滚动时域框架，具体的动态兑现流程如图2所示，主要步骤如下。（1）在每个兑现点t，获取各列列车及其各最大连续未售区间的余票数$N^{t}_{k,i,j}$及候补订单需求Q_t。（2）利用所建随机规划模型求解得到当前兑现点的最优兑现方案。（3）更新下一兑现点（$t+1$）的余票数$N^{t+1}_{k,i,j}$并收集新产生的候补订单需求信息，得到下一兑现点的候补订单需求信息Q_{t+1}。（4）再次利用所建随机规划模型得到下一兑现点的最优兑现方案。（5）依次迭代，直至兑现点$t=|T|$，即候补购票阶段结束，流程终止。

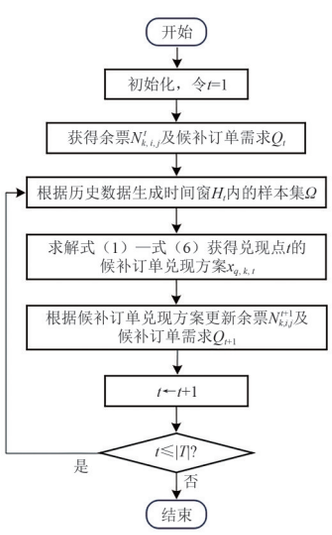


图2 基于滚动时域的候补订单动态兑现流程

3 数值实验及分析

3.1 算例构造

以宁杭高铁南京南—杭州东方向某日6:00—12:00的时刻表构造算例。具体运行图如图3所示，线路上共设车站11座，该时段内共开行列车24列。

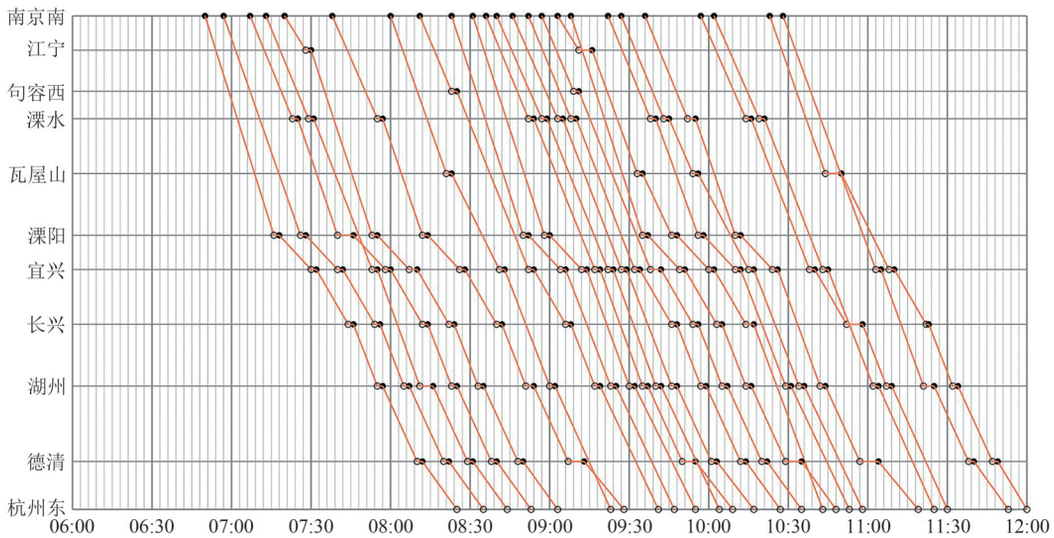


图 3　宁杭高铁 6:00—12:00 运行图

考虑到铁路售票系统在凌晨时段停止售票，此时具备充足的计算资源进行候补订单兑现计算，参考文献［13］，假定候补购票兑现过程于开车前 5 天的每日 0 时启动，将其设定为兑现点，并将兑现点集合表示为 $T=\{1, 2, 3, 4, 5\}$。在开始候补票兑现时，首先将列车未售席位进行接续拼接，得到所有列车各 OD 对的余票数量（为便于直观展示，采用颜色深浅表示余票数量的多少，数值越大对应颜色越深，后同）如图 4 所示。参考当前该线路的实际票价水平，得到各 OD 对的票价见表 2。

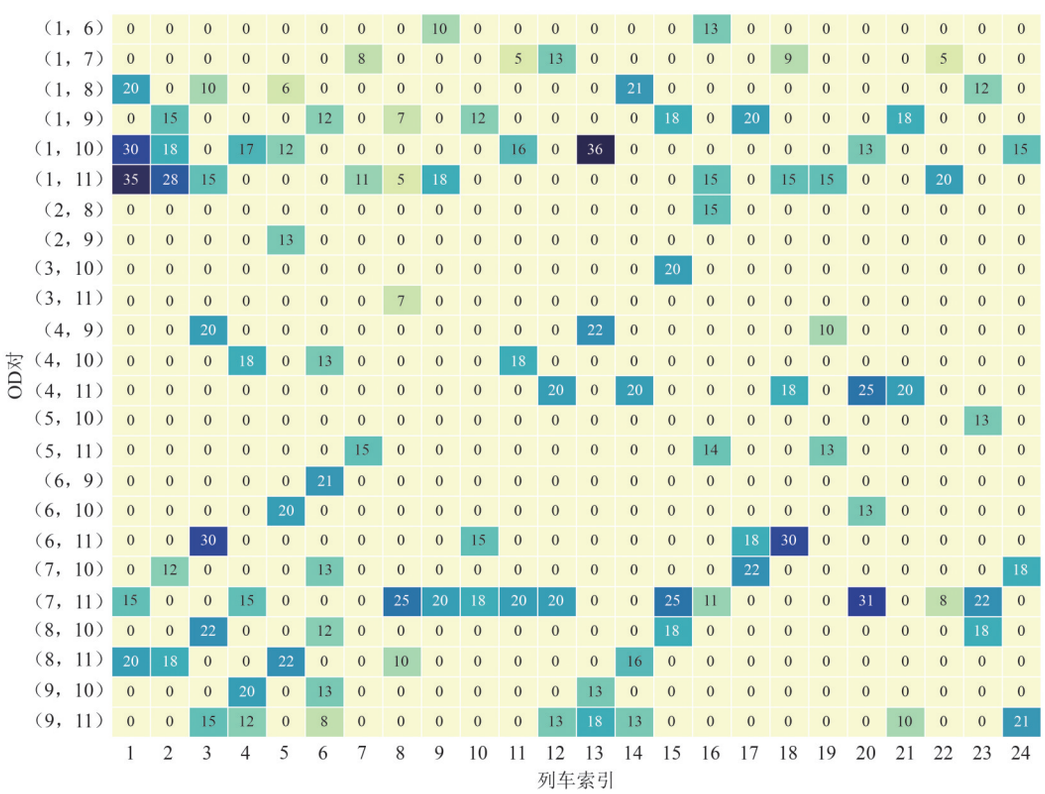


图 4　各列列车剩余未售席位

采用蒙特卡罗模拟方法生成候补订单样本数据，但在实际应用时，则可依据该线路的历史候补订单数据提取相关数据得到。具体而言，考虑到高铁旅客对出发时间较为敏感，通常倾向于选择期望出发时段内的列车进行候补，因此将研究时段划分为 6 个子时段，即 6:00—7:00，7:00—8:00，8:00—

表 2 各 OD 对票价 元

出发站	到达站										
	南京南	江宁	句容西	溧水	瓦屋山	溧阳	宜兴	长兴	湖州	德清	杭州东
南京南		11	21	23	31	45	65	76	94	112	128
江宁			11	19	21	43	53	84	87	97	113
句容西				9	19	37	47	76	80	90	106
溧水					12	24	35	54	70	81	104
瓦屋山						14	26	44	64	77	86
溧阳							13	24	40	51	72
宜兴								15	26	38	53
长兴									10	20	38
湖州										11	27
德清											16
杭州东											

9:00，9:00—10:00，10:00—11:00和11:00—12:00。假设期望在各子时段内出发的旅客仅会选择该时段内的列车作为候补列车，且各OD对在候补购票期内的总候补订单需求服从正态分布，其均值如图5所示，方差设定为均值的1/3。在此基础上，利用蒙特卡罗方法模拟生成各OD对的候补订单总量，并按照概率σ_t在兑现点t进行候补，以获得各OD对在不同兑现时间点的候补订单样本数据。结合现有历史数据中各兑现时间点的候补订单分布特征，设σ_t为{0.2.0.3，0.2，0.2，0.1}；为减少候补时长提高旅客服务质量，设单位候补时长下的惩罚权重ρ为3元。

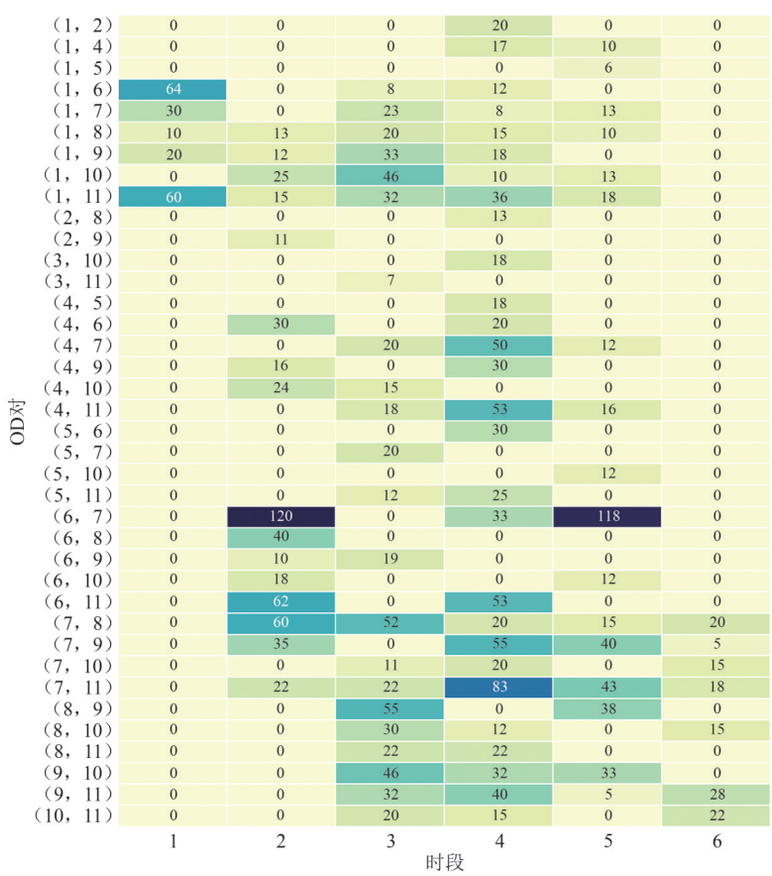


图 5 各时段候补订单需求均值

3.2 候补订单动态兑现方法测试

为验证所提基于滚动时域的铁路候补购票订单动态兑现方法的有效性，需要对比分析在有无滚动时域优化、不同前视窗时间长度的情况下，候补订

单兑现收益的差异。

滚动时域优化方法中，前视时间窗长度和历史样本数据规模是影响候补订单动态兑现性能的关键因素，为此，无滚动时域优化时，设置前视时间窗长度为0，即不考虑未来候补订单需求信息，仅基于当前候补订单信息进行兑现决策；有滚动时域优化时，设置4种不同的前视时间窗长度（1，2，3，4）。在5种不同滚动时域设置的动态兑现方法下，设置5种不同的候补订单需求样本规模（1，5，10，20，50），各运行20次进行对比分析，具体结果如图6所示。

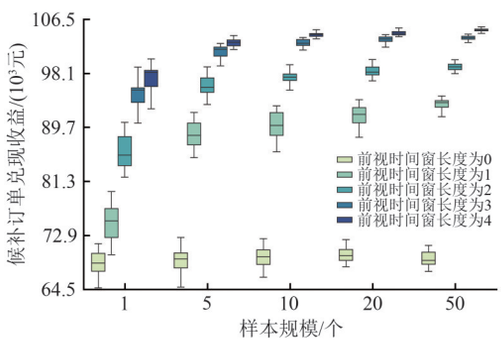


图6　候补订单兑现收益

由图6可见：在不同样本规模下，采用滚动时域优化方法进行动态候补订单兑现时，候补订单的兑现收益均高于未采用该方法时的；在给定样本规模的前提下，前视时间窗越长，候补订单兑现收益也越高，但随着时间窗长度的增加，候补订单兑现收益的增长幅度逐渐减小，如当前视时间窗长度从1增至2、从2增至3时，候补订单兑现收益均有显著提升，但从3增至4时，收益增幅相对较小；随着样本规模的增加，在不同前视时间窗长度下，候补订单兑现收益均有所提升；前视时间窗和样本规模的增加也会导致求解规模扩大，但在所有测试情况下，求解时间均控制在5 s以内。因此，在实际应用中，可在满足实时兑现的前提下，通过适当延长前视时间窗和增加样本规模的方式，进一步提升滚动时域优化框架下的候补订单动态兑现方法的性能。

3.3　候补订单兑现结果及分析

为进一步验证所提基于滚动时域的动态候补订单兑现方法的有效性，选取前视时间窗长度为4、样本规模为50的滚动时域设置，将其兑现结果与静态兑现方法的进行对比分析。其中，静态兑现方法假设未来候补订单的需求等于历史候补订单样本数据的均值，在此基础上估计各兑现时间点的OD对候补订单兑现数量，且在兑现过程中候补订单兑现方案不再调整。

为分析不同延迟兑换惩罚权重ρ的影响，设置ρ分别取1和3元2种取值，得到2种兑现方法的兑现结果相关指标见表3。表中：候补订单兑现收益为成功兑现的候补订单的票价收入总额；延迟兑换订单数为旅客下单时间与实际兑现时间相差超过1个兑现时间点的订单数；余票总价值为候补订单兑现期结束后，各OD对剩余余票数量乘以对应票价的总和。由表3可以得到以下结论。

表3　不同惩罚权重和不同兑现方式下的候补订单兑现结果

惩罚权重/元	兑现方式	兑现收益/元	候补订单兑现数/单	候补订单延迟兑换数/单	余票总价值/元
$\rho=1$	静态兑现	101 766	2 005	125	13 458
	动态兑现	105 716	2 057	8	9 920
$\rho=3$	静态兑现	99 104	1 994	67	15 910
	动态兑现	104 797	2 049	4	10 618

（1）相较于静态兑现方法，所提的基于滚动时域的动态兑现方法在兑现收益方面始终占优，在ρ取1和3元时，收益分别提高了3.88%和5.74%，兑现候补订单数量分别增加52和55单；动态兑现方法显著减少了候补订单延迟兑换数以及余票总价值，表明该方法不仅提高了整体兑现收益，还提升了候补订单兑现及时性。

（2）当延迟兑换惩罚权重从1元提高至3元时，2种方法均兑现收益有所降低且延迟兑换订单数显著减少，同时候补时长显著缩短。这主要是由于更高的延迟兑换惩罚促使系统尽早兑现候补订单，从而减少了订单延迟，但这也可能导致部分低收益订单被优先兑现，从而降低整体收益。

（3）相较于静态兑现方法，动态兑现方法的候补订单延迟兑换数明显更少，这主要是由于静态兑现方法基于平均需求进行兑现决策，当实际需求偏离平均值时，可能导致部分订单未被及时兑现，而累积至最后一个兑现时间点进行兑现。

（4）相较于静态兑现方法，动态兑现方法能够更有效地适应候补订单需求的随机性，从而提升兑现收益，并优化兑现效率。

为进一步探究需求不确定性对2种方法的影响，调整3.1节中各OD对候补订单需求分布的方差，分别设为平均需求的1/2，1/3，1/4和1/5，对应极高、高、中和低4种需求不确定性水平。在此基础上，运行静态兑现和动态兑现方法各20次，得到候补订单兑现收益的分布如图7所示。由图7可知：对于静态兑现方法，需求不确定性水平从低增加至中、高和极高水平时，兑现收益的均值分别为98 026.4，97 444.8，97 116.8和97 016.0元，兑现收益的范围分别在96 227～99 769，92 915～101 916，91 716～101 090和92 242～101 025元，表明随着需求不确定性水平的增加，其兑现收益均值有所降低并且兑现收益分布更加不稳定；对于动态兑现方法，在4种需求不确定性水平下，其兑现收益均值分别为104 747.1，105 087.9，104 953.5和105 143.1元，均高于同等水平下静态兑现方法的，2种方法兑现收益差值也呈增大趋势，但此时兑现收益的取值范围相差不大且分布较为稳定，说明所提动态兑现方法能够更好地适应实际候补订单需求的不确定性。

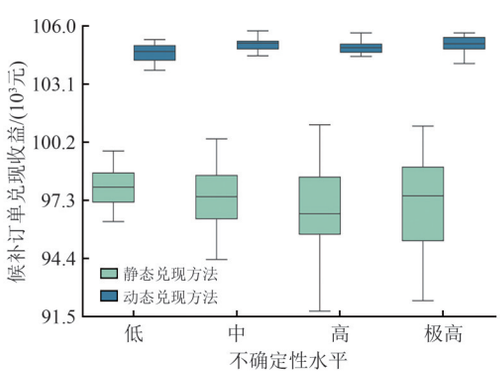


图7 兑现收益分布

4 结 语

本文对铁路候补购票订单动态兑现问题进行了研究。首先，结合实际运营情况对该问题进行描述与定义。其次，基于滚动时域框架，动态构建前视时间窗，利用历史样本数据刻画未来候补订单需求的不确定性，在此基础上以候补订单兑现收益最大化和旅客候补时长最小化为优化目标构建随机规划模型，并在模型中综合考虑了余票能力、兑现规则等约束条件；由于该模型属于整数线性规划问题，在商业求解器求解的基础上，提出了基于滚动时域的候补订单动态兑现流程。最后，依托宁杭高铁实际数据构建算例并进行分析。对引入的滚动时域框架进行测试发现，适度增加前视时间窗与样本规模有助于更准确地刻画需求不确定性，从而提升模型性能，但这也会相应增加求解时间，在实际中可基于兑现实时性要求设置合理的前视时间窗与样本规模；与静态兑现方法相比，所提动态兑现方法在单位候补时长惩罚权重分别取1和3元时，兑现收益分别提高了3.88%和5.74%，兑现候补订单数量分别增加了52单和55单，候补时长效有效缩短；在需求不确定性增强的情况下，动、静态2种兑现方法的收益差距进一步扩大，表明所提方法能够更好地适应实际候补订单需求的不确定性，实现兑现收益与服务质量的双重提升。

本文的研究未考虑退票、改签等因素。未来深化研究时可从这一角度进一步拓展模型，例如，引入旅客退票行为、购票决策等因素，设计目标、约束更合理的数学模型并优化算法，分析这些因素对最优兑现方案的影响，以更真实地贴合铁路候补购票场景，协助制定更契合铁路部门运营目标与旅客权益的候补购票兑现策略。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国中央人民政府.4.8万公里！我国高铁运营里程再创新纪录[EB/OL].(2025-01-02)[2025-02-28]. https://www.gov.cn/zhengce/jiedu/tujie/202501/content_6995932.htm.
(The State Council, the People's Republic of China. 48,000 kilometers! China's High-Speed Rail Operation Mileage Reaches a New Record [EB/OL]. (2025-01-02) [2025-02-28]. https://www.gov.cn/zhengce/jiedu/tujie/202501/content_6995932.htm. in Chinese)

[2] 曹炜威,冯项楠,李宜威,等.基于客票数据的城际铁路出行方式选择行为研究[J].系统工程理论与实践,2020,40(4):989-1000.
(CAO Weiwei, FENG Xiangnan, LI Yiwei, et al. Investigating Passengers' Choice Behavior of Intercity Rails with Large-

Scale Ticketing Data [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020, 40 (4): 989-1000. in Chinese)

[3] 张玉利,梁熙栋,周超越,等.考虑旅客换乘的高铁列车停站方案-票额分配鲁棒优化[J].系统工程理论与实践,2022,42(8):2196-2209.
(ZHANG Yuli, LIANG Xidong, ZHOU Chaoyue, et al. Robust Optimization of High-Speed Railway Train Stop Plan and Ticket Allocation Considering Passenger Transfer [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2022, 42 (8): 2196-2209. in Chinese)

[4] 赵翔,单杏花,卫铮铮,等.考虑中转换乘旅客需求的高速铁路票额分配模型[J].综合运输,2023,45(7):72-78.
(ZHAO Xiang, SHAN Xinghua, WEI Zhengzheng, et al. High-Speed Railway Seat Allocation Model Considering Transfer Passenger Demand [J]. China Transportation Review, 2023, 45 (7): 72-78. in Chinese)

[5] YAN Z Y, LI X J, ZHANG Q, et al. Seat Allocation Model for High-Speed Railway Passenger Transportation Based on Flexible Train Composition [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106383.

[6] WANG X C, WANG H, ZHANG X N. Stochastic Seat Allocation Models for Passenger Rail Transportation under Customer Choice [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 96: 95-112.

[7] 单杏花,周亮瑾,吕晓艳,等.铁路旅客列车票额智能预分研究[J].中国铁道科学,2011,32(6):125-128.
(SHAN Xinghua, ZHOU Liangjin, LÜ Xiaoyan, et al. Research on Intelligent Pre-Assignment of Ticket Allotment for Railway Passenger Train [J]. China Railway Science, 2011, 32 (6): 125-128. in Chinese)

[8] 单杏花,刘彦麟,王凌燕,等.基于模态识别的高速铁路列车票额预分优化研究[J].铁道运输与经济,2021,43(2):27-32.
(SHAN Xinghua, LIU Yanlin, WANG Lingyan, et al. Research on Optimization of High-Speed Train Ticket Pre-Assignment Based on Modal Identification [J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43 (2): 27-32. in Chinese)

[9] 强丽霞.旅客列车票额智能预分方法研究[J].铁道学报,2018,40(9):7-11.
(QIANG Lixia. Research on Intelligent Ticket Pre-Assignment Method for Passenger Trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40 (9): 7-11. in Chinese)

[10] 张琦,王玉,李华.多列车限售策略和铁路票额预分方案的优化设计[J].中国铁道科学,2019,40(2):138-144.
(ZHANG Qi, WANG Yu, LI Hua. Optimal Design for Section-Control Strategy and Railway Ticket Pre-Assignment Scheme of Multiple Trains [J]. China Railway Science, 2019, 40 (2): 138-144. in Chinese)

[11] 王凌燕.高铁车票销售投放策略改进研究[J].铁道经济研究,2020(5):12-17.
(WANG Lingyan. Research on the Improvement of the Ticket Sales Distribution Strategy of High-Speed Railway [J]. Railway Economics Research, 2020 (5): 12-17. in Chinese)

[12] 骆泳吉,刘军,赖晴鹰.考虑通售席位的旅客列车票额优化方法[J].铁道学报,2016,38(5):11-15.
(LUO Yongji, LIU Jun, LAI Qingying. Optimization of Seat Inventory Allocation for Passenger Trains with First-Come-First-Serve Seats [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38 (5): 11-15. in Chinese)

[13] 王煜,徐彦,安仲文,等.铁路候补购票兑现问题优化模型研究[J].铁道学报,2023,45(1):1-8.
(WANG Yu, XU Yan, AN Zhongwen, et al. Research on Optimization Model for Cashing Railway Alternate Ticket Purchase [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45 (1): 1-8. in Chinese)

[14] 谭思伦,卫铮铮,张晗,等.基于候补购票的铁路旅客出行需求挖掘方法研究[J].铁路计算机应用,2024,33(8):19-25.
(TAN Silun, WEI Zhengzheng, ZHANG Han, et al. Railway Passenger Travel Demand Mining Method Based on Candidate Ticket Purchase [J]. Railway Computer Application, 2024, 33 (8): 19-25. in Chinese)

[15] 陈垚,柏赟,张安英,等.基于滚动时域优化的共享自动驾驶汽车动态调度方法[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(3):45-52,73.
(CHEN Yao, BAI Yun, ZHANG Anying, et al. Dynamic Fleet Management of Shared Autonomous Vehicles with Rolling Horizon Optimization [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22 (3): 45-52, 73. in Chinese)

[16] 柏赟,袁博,李佳杰,等.基于滚动优化的地铁列车节能运行协同控制方法[J].中国铁道科学,2020,41(3):163-170.
(BAI Yun, YUAN Bo, LI Jiajie, et al. Cooperative Control Strategy for Energy Saving Operation of Metro Train Based on Rolling Optimization [J]. China Railway Science, 2020, 41 (3): 163-170. in Chinese)

[17] MAK W K, MORTON D P, WOOD R K. Monte Carlo Bounding Techniques for Determining Solution Quality in Stochastic Programs [J]. Operations Research Letters, 1999, 24 (1/2): 47-56.

[18] 徐光明,郭婧,周培澜,等.考虑随机需求的高铁快递运输计划优化方法[J].铁道科学与工程学报,2024,21(2):444-455.

(XU Guangming, GUO Jing, ZHOU Peilan, et al. Optimization Method for the High-Speed Railway Express Delivery Considering Stochastic Demand [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21 (2): 444-455. in Chinese)

[19] 乔岩,冉伦,李金林,等.基于两阶段随机规划的远程会诊预约调度问题研究[J].中国管理科学,2024,32(1):86-93. (QIAO Yan, RAN Lun, LI Jinlin, et al. Research on Teleconsultation Appointment Scheduling Problem Based on Two-Stage Stochastic Programming [J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32 (1): 86-93. in Chinese)

[20] CHEN Y, LIU Y. Integrated Optimization of Planning and Operations for Shared Autonomous Electric Vehicle Systems [J]. Transportation Science, 2023, 57 (1): 106-134.

[21] KLEYWEGT A J, SHAPIRO A, HOMEM-DE-MELLO T. The Sample Average Approximation Method for Stochastic Discrete Optimization [J]. SIAM Journal on Optimization, 2002, 12 (2): 479-502.

Dynamic Fulfillment Method for Railway Waitlist Order Based on Rolling Horizon

ZHONG Linhuan, XU Guangming, QIN Jin, HU Xinlei

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China)

Abstract: With the waitlist function of 12306 system being widely adopted, the uncertainty of future waitlist order demand is characterized using historical sample data of waitlist order based on the rolling horizon method. Then, a stochastic programming model is formulated to maximize fulfillment revenue while minimizing passenger waiting time. On the premise of using the commercial solver to solve the model, a dynamic fulfillment method of railway waitlist order is proposed based on the rolling horizon framework. The proposed approach is validated by the field data from the Nanjing-Hangzhou High-Speed Railway. The results show that with the increase of forward-looking time window and historical sample data of waitlist order, the demand uncertainty is characterized more accurately, the fulfillment revenue of wailtlist order is improved, and the computation time is always controlled within 5 s, meeting the real-time requirement of dynamic fulfillment. Compared with the static fulfillment method without considering the rolling horizon optimization, when penalty weights of unit waitlist duration is taken as 1 and 3 CNY, respectively, the proposed dynamic method improves fulfillment revenue by 3.88% and 5.74%, and increases the number of fulfilled orders by 52 and 55, respectively. Moreover, passenger waiting time is significantly reduced. The method not only enhances fulfillment revenue and service quality, but also adapts better to the uncertainty of actual demand for waitlist orders.

Key words: Railway transportation; Railway passenger ticketing; Waitlist; Rolling horizon; Stochastic programming

(责任编辑 耿枢馨)