

# 基于 LSM-GM 预测的高速公路工程 施工进度动态控制

丁 瑶, 张 喆, 安亚强

(陕西工业职业技术学院 土木工程学院, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:**高速公路在促进区域经济发展中发挥着重要的作用。传统的施工进度管理方法不能满足高速公路等线性工程施工建设工期管理的需要,常常导致施工进度管理失控。研究发现,线性计划法有利于提高线状工程施工进度计划和控制的科学性和有效性。通过将 GM 预测模型与线性计划法优势互补,联合使用,以达到施工进度动态控制的目标,确保施工工期内顺利完成施工任务,从而提高施工单位的市场竞争力。

**关键词:**高速公路;施工进度;线性计划法(LSM);GM 模型;动态控制

**中图分类号:**TU722 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)07-0364-06

随着科学技术水平不断提高,经济建设发展迅速,国内高速公路等基础设施建设也快速发展。高速公路建设工程作为一种典型的线性工程,具有工程线性分布、施工作业面狭长、施工连续性强等特点,且具有一定的重复性,施工周期长。高速公路工程项目自身的复杂性及外部环境的特殊性,增加了其施工建设精准工期计算和控制管理的不确定性。

传统的高速公路施工建设进度管理主要采用甘特图、网络计划技术等方法,存在工期计划信息不全面、工期管理不精确、缺失进度仿真预测等不足,常常导致施工进度管理失控。与传统的施工进度计划控制方法相比,线性计划方法在线状工程中具有能够有效地展现局部和整体项目施工进度,便于管理人员从宏观把控施工进度相关信息,能够图形化地展示施工过程,全面准确地描述施工速率和施工活动之间的各种约束,给进度控制及调整优化工作提供可靠直观信息等优点<sup>[1-2]</sup>。GM 预测模型能利用已知原始数据求解模型参数,从而预测数列期望值与变化趋势。利用 GM 模型预测施工进度,能够有效预判关键节点施工进度值及工期变化趋势,为调整进度计划或增减施工资源确保原进度计划顺利实施提供科学的参考依据。通过将 LSM-GM 预测结合来科学地编制高速公路线性施工进度计划和动态控制施工进度,在工期得到有效

控制的同时,为成本和质量管控争取有利条件奠定基础。

## 1 线性计划法

线性计划法(linear scheduling method, LSM)是一种利用图标工具从时间和空间两个维度来表示工程施工进度的方法,是编制线状工程进度计划的有效工具<sup>[3]</sup>。线性计划法根据线状工程施工活动的特点,在同一个时间-空间(time-location)二维直角坐标系中描述线状工程施工进度计划及实施施工过程中进度相关信息。通常用水平轴表示线状工程的里程或高度等空间进度信息,用垂直坐标表示线状工程的时间进度信息,施工活动则根据其施工时间、空间位置和速率用特定的图标在坐标系中表示出来<sup>[4]</sup>。线性计划法能够有效地展示局部和整体施工过程进度计划、施工资源配置、工程量等信息,在施工进度管理中具有独特的优势,被广泛应用于公路工程、铁路工程、管道工程等线状工程施工进度管理。

线性计划法起源于国外,国内开展相关研究的时间相对较晚。1981 年,Johnston<sup>[5]</sup>第一次提出线性计划方法的理论,并将该方法引入线性工程建设领域,同时定义了相关变量。Chrzanowski 等<sup>[6]</sup>通过研究发现线性计划法是线性工程施工进度管理的最佳方法。Vorester 等<sup>[7]</sup>较为系统地介绍了线性

收稿日期:2022-03-03

**作者简介:**丁瑶(1993—),女,陕西咸阳人,陕西工业职业技术学院土木工程学院,助教,硕士,研究方向为工程质量管理、工程施工进度管理。

计划法在线状工程项目中的应用,提出了较为完整系统的 LSM 方法。1998 年,Harmelink 等<sup>[8]</sup>首次提出了控制性活动路径(controlling activity path,CAP)的概念,解决了线性计划法中计算和确定关键路径的问题。刘津明<sup>[9]</sup>是国内首批将 LSM 方法与实际线性工程相结合的实践者,但由于 LSM 方法还未发展成熟,使用效果还不是特别明显。2011 年,Duffy 等<sup>[10]</sup>定义了影响线状工程的 4 种变量,提出工序性能指标(activity performance index,API)和基于变生产率的线性计划模型。

根据活动施工的时间和空间关系,可以将 LSM 方法中的活动大概分为线状活动、条状活动和块状活动三大类型。在此基础上,根据每类活动的施工时间和空间的连续性、贯穿性和分段情况,可以将 LSM 方法中的活动进一步细分为 13 种活动类型,如图 1 所示<sup>[8]</sup>。

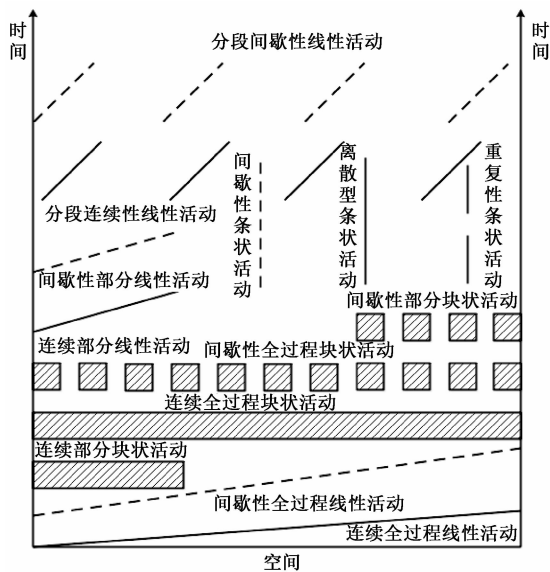


图 1 线性计划法活动表示示意图

在线性计划图中,线性活动的斜率即为施工速率,反映了该活动所属的资源量,斜率随着活动所属资源量的增减而变小或变大。在编制线性施工进度计划过程中通过资源配置确定单位时间的施工速率,由施工速率和施工工程量计算施工时间参数,而在进度计划优化和调整工期的过程中,可以通过施工时间参数反推计算需要的施工速率,从而确定施工资源优化配置。考虑到施工技术、施工工艺、施工场地、工作环境、管理等方面的因素,在利用线性计划法编制或者调整的施工进度计划过程中,相邻两个活动之间需要预留出一定的合理距离(或时间)间隔(buffer)。在线性计划图中,两个施

工活动之间在水平方向上所对应的间隔被称作距离间隔(distance buffer),包括最小距离间隔(minimum distance buffer)和最大距离间隔(maximum distance buffer),垂直方向上所对应的间隔被称作时间间隔(time buffer),包括最小时间间隔(minimum time buffer)和最大时间间隔(maximum time buffer),如图 2 所示。在线性进度计划中,时间间隔和空间间隔的存在能够缓解资源限制,避免施工资源过度集中和施工活动之间相互影响而导致施工速率降低,有利于提高施工资源的利用率<sup>[11-12]</sup>。

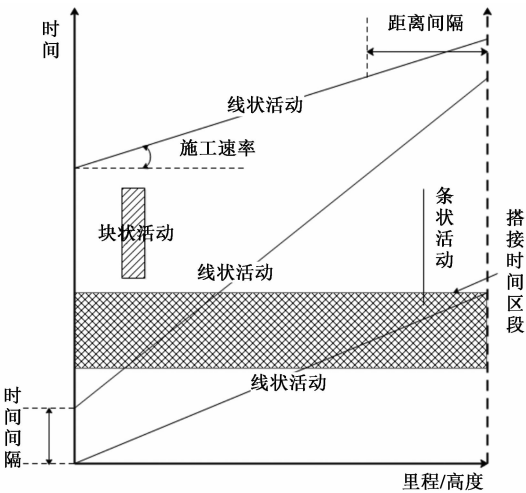


图 2 线性计划法示意图

2 GM 预测模型

高速公路工程施工进度控制过程中采用定性的方法预测施工进度存在的误差相对较大,需要采用新的定量预测模型与线性计划方法相结合,才能提高动态控制施工进度的有效性。高速公路工程施工过程中影响工期的因素相对较多,这些因素对施工进度的影响程度都是规律性较弱的序列,同时由于工程项目在施工过程中,实际施工进度数据是随着工程的进展而增加,刚开始只有部分原始数据等特点,而 GM(1,1)预测模型可用于预测对象的可选择样本相对较小且规律性较弱的序列,因此适合高速公路工程施工进度动态控制研究。通过 GM(1,1)预测模型对施工过程中离散的施工进度数据序列进行挖掘,实现根据这些离散数据序列应用灰色理论短期定量预测施工进度的目的<sup>[13]</sup>。

利用 GM(1,1)预测模型对预测对象进行预测的基本步骤如下<sup>[14-15]</sup>:

步骤 1:设置原始数列为

$$X^0 = [x^0(1), x^0(2), x^0(3), \dots, x^0(n)] \quad (1)$$

步骤 2:数据序列适用条件检验。通过对数据

序列平滑检验,计算级比,如果级比  $\epsilon(0.135\ 2, 7.389)$ ,则数列序列可以使用 GM(1,1)模型进行预测。

步骤 3:做累加生产数列,即

$$X^1 = [x^1(1), x^1(2), x^1(3), \cdots, x^1(n)] = [x^1(1), x^1(1) + x^0(2), \cdots, x^1(n-1) + x^0(n)]$$

(2)

式中,  $x^1(k) = \sum_{i=1}^k x^0(i), k = 1, 2, \cdots, n.$

步骤 4:定义均值生成数为

$$z^1(k) = ax^0(k) + (1-a)x^0(k-1)$$

(3)

式中,生成系数  $a$  取值在  $0\sim1$  之间,一般取  $a = 0.5$ ,则生成均值生成数列为

$$z^1 = [z^1(2), z^1(3), \cdots, z^1(n)]$$

(4)

步骤 5:以数据序列  $X^1$  为基础,建立灰微分方程为

$$x^0(k) + az^1(k) = b, k = 2, 3, \cdots, n$$

(5)

其白化微分方程为

$$\frac{dx^1}{dt} + ax^1(t) = b$$

(6)

式中: $a$  为发展系数; $b$  为灰作用量。

步骤 6:求解白化微分方程得

$$x^1(k+1) = \left[x^0(1) - \frac{b}{a}\right]e^{-ak} + \frac{b}{a},$$
$$k = 1, 2, \cdots, n-1$$

(7)

式中, $a, b$  的值由最小二乘法得到。则预测值为

$$x^0(k+1) = x^1(k+1) - x^1(k)$$

(8)

式中: $x^0(k+1)$  为某预测点的值; $x^1(k)$  为累加预测值。

步骤 7:利用残差检验和后验差检验对 GM(1, 1)预测模型进行检验。

步骤 8:通过检验则模型构建成功,可以利用构建的 GM(1,1)模型对施工进度进行预测。

3 LSM-GM 预测在高速公路施工进度动态控制中的应用

3.1 构建工作分解结构,划分施工活动类别

工作分解结构(work breakdown structure, WBS)定义了工程项目的范围和结构,是进度安排、预算编制、责任分配、项目控制、信息管理后续工作的基础<sup>[16]</sup>。在工作分解结构中较低级别的任务被关联并集成到较高级别的任务中,组织内的不同人员均可以使用它来获取自己所需要的信息<sup>[17-18]</sup>。这能够使得项目每个环节的人员各司其职,减少项目延期问题的产生,有效地帮助工程项目的进度管

理<sup>[19-20]</sup>。以 YDGM 高速公路工程项目为例,构建高速公路工程施工任务工作分解结构(图 3)。根据高速公路工作分解结构中施工活动的时间和空间位置变化等特点,将施工活动划分为不同的类型。高速公路工程施工过程中,可以简单地将路基工程、排水工程、路面工程、绿化工程、交通安全设施划分为线性活动,桥梁工程、隧道工程划分为块状活动,也可以根据施工进度管理的需要,将施工任务进一步细分,同时将细分的施工任务划分为更加具体详细的施工活动类型。

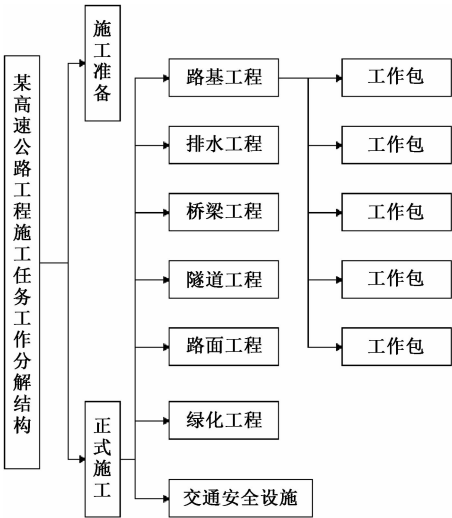


图 3 某高速公路工程施工任务工作分解结构示意图

3.2 选择合适的施工组织方案,合理配置施工资源

通过对项目所处地质、气候、降水、交通等情况勘察了解后,选择合适的施工组织方案和施工方案,明确施工流程及工艺。在了解项目工程概况、施工方案的基础上,根据各分项工程施工任务的工程量、施工场地现状、施工技术水平、项目管理能力、施工工期要求等方面的情况,综合考虑配置按时完成施工任务所需的主要人员、材料、机械等资源。

3.3 计算施工活动的时空参数,编制线性施工进度计划

根据施工任务工作分解结构、工程量、施工资源投入数量等情况,结合施工组织方案和施工方案、施工单位自身技术水平和管理能力,施工气候等影响施工效率的因素及公司内部施工定额,采用式(9)综合计算确定每项施工活动的施工工作时间,同时根据各项工作活动的空间位置和工艺技术要求,合理安排各项施工活动和施工活动之间的间歇时间。为了方便施工进度管理,可以根据划分

的工作分解结构为依据计算每项施工活动的施工工期,这样有利于在施工建设工程中对施工进度进行动态控制。

$$T_i = \frac{Q_i}{N_i S_i R_i} \times \alpha_i$$

(9)

式中:  $T_i$  表示  $i$  施工活动的施工时间;  $Q_i$  表示  $i$  施工活动的工作量;  $S_i$  表示  $i$  施工活动中一个工作队或施工机械每天的工作定额;  $R_i$  表示  $i$  施工活动中工作队或施工机械的数量;  $N_i$  表示  $i$  施工活动中每天的工作班次;  $\alpha_i$  表示  $i$  施工活动投入资源的有效利用率。

为了实现工程项目施工工期精细化管理,根据每项施工活动的先后顺序、施工时间和空间位置等参数,按天编制施工进度计划,如图 4 所示。

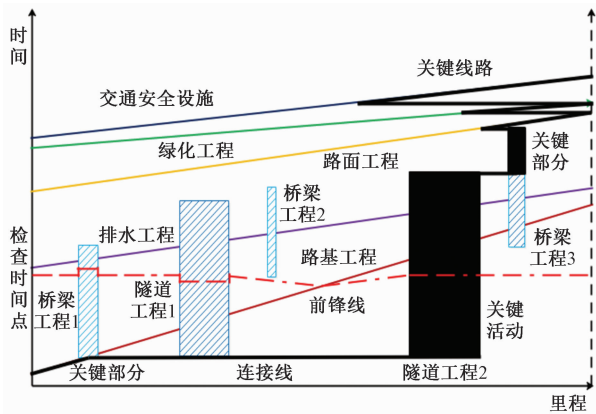


图 4 高速公路工程线性施工进度示意图

3.4 确定关键线路,计算关键活动(区段)预算费用

在工程项目施工进度管理过程中,关键活动(区段)和关键线路的确定是施工进度计划管理和实际进度控制的重要工作<sup>[21]</sup>。根据时间间隔最小原则,在编制线性施工进度计划中找出关键线路,识别出关键活动(区段),方便施工进度管理过程中加强控制。确定关键线路首先需要在根据施工方案编制的线性施工进度计划图中按施工活动的开始时间,正向顺序找出各施工活动之间的最小距离

间隔和最小时间间隔,然后按照确定关键线路的原则,找出可能的关键活动或关键区段,随后从结束施工活动的终点开始,反向追踪推算,把关键活动或关键区段用直线连接起来(连接线),从而确定关键路线,最后计算各施工活动之间的时间参数<sup>[22]</sup>。为了实现施工进度精细化预测管理,可以根据挣值管理原理,借鉴其中的计划工作预算费用(budgeted cost of work scheduled, BCWS)、已完工作预算费用(budgeted cost for work performed, BCWP)等参数,在确定关键线路的基础上,若有多条关键线路,则选择其中工作量最大或工作预算费用最高的一条关键线路,施工开始前按照施工活动的先后顺序计算该关键线路上每个关键活动(区段)的BCWS\*,并把相关数据记录利用表 1 进行记录,施工开始后计算该关键线路上每个关键活动(区段)BCWP\*,方便分析施工进度偏差,预测施工进度。

表 1 高速公路工程施工进度计划工作表

| 序号 | 工作单元 | 总工程量 | 关键活动(区段)工程量 | 预算单价 | 关键活动(区段)的 BCWS* | 关键活动(区段)工期(天) |
|----|------|------|-------------|------|-----------------|---------------|
| 1  |      |      |             |      |                 |               |
| 2  |      |      |             |      |                 |               |
| ⋮  |      |      |             |      |                 |               |

3.5 施工进度数据收集、记录与整理

施工进度数据收集、记录和整理是工程项目的工期有效控制的基础,及时真实可靠的施工进度数据是施工进度控制的关键。施工进度数据收集、记录的过程中不仅需要记录施工时间或空间上的施工进度,而且还需要按照工作分解结构和线性进度计划单独记录关键路线上已完成的施工活动进度,方便统计计算工程项目的实际施工进度。在高速公路工程施工进度管理中,可以通过表的形式来记录各项施工任务完成的工作量和已经花费的时间,记录表见表 2。

表 2 高速公路工程施工进度记录表

| 序号 | 工作单元 | 总工程量 | 已完成工程量 | 已完成关键活动(区段)工程量 | 关键活动(区段)已施工时间 | 预算单价 | 关键活动(区段)的 BCWP* | 时间 | 记录员 | 负责人 |
|----|------|------|--------|----------------|---------------|------|-----------------|----|-----|-----|
| 1  |      |      |        |                |               |      |                 |    |     |     |
| 2  |      |      |        |                |               |      |                 |    |     |     |
| ⋮  |      |      |        |                |               |      |                 |    |     |     |

3.6 设置控制点,检查并绘制实际施工进度前锋线

在项目施工实施过程中,可以随时进行全面检

查施工进度,但这必然会增加工作人员的工作量,造成施工时间和成本的增加。为了达到动态控制

施工进度目的,可以结合线性施工进度计划,按照每月(周)施工进度要求,设置施工进度检测点。通常需要将施工进度控制点设置在线性活动(段)的端点处、关键活动(区段)与非关键活动的分界点处、施工活动施工速率变化处、与其他活动有空间约束的位置处等重要关键节点位置<sup>[2]</sup>。具体在确定检测点的时候,可以通过综合考虑整个项目施工过程,咨询具有丰富高速公路施工经验的项目经理或现场管理人员,将检测点放在施工进度容易发生变化的关键点上,从而提高施工进度动态控制的效率。在施工进度检查过程中通过对检测点的进度检测,根据检测结果在线性计划图上绘制施工进行前锋线,如图 4 所示,同时根据收集、记录的施工进度数据绘制选择的关键线路挣值曲线,如图 5 所示。

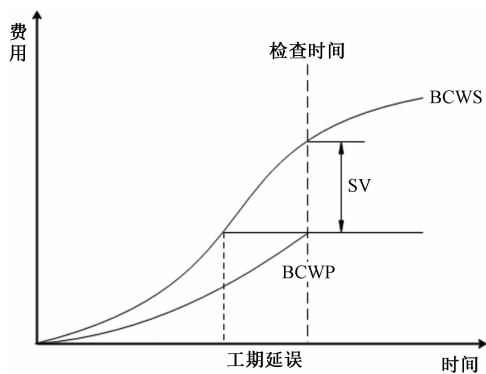


图 5 关键线路施工活动(区段)挣值曲线

3.7 施工进度实时比较,工期偏差分析

通过在线性施工进度计划图中查看对比实际施工进度与期望计划施工进度以及关键线路挣值曲线,从中了解项目是否按照施工进度预期顺利完成。为了减少施工进度偏差分析给项目管理人员带来的额外工作量,可以根据工程项目自身实际情况,设置合理的偏差范围,分关键路线上的施工活动与非关键路线上的施工活动区别对待,如果非关键路线上的施工活动没有超过最早完成时间或最晚完成时间,则该项不给予处理,但需要做警示提醒,避免非关键活动(区段)转化为关键活动,若关键线路上的关键活动(区段)的施工进度偏差超过了预期值的合理偏差时间,则需要对施工进度偏差的原因进行分析。通过对工作分解结构、施工进度统计表和最近一次施工进度检测结果等,快速定位到具体影响施工进度的工作单元,对这些工作单元进行进一步的检测,分析造成施工进度偏的具体原因。

3.8 施工进度动态预测,预判工期变化趋势

根据施工进度检查记录数据,对施工进度进行

预测,预判工期变化趋势。首先根据线性施工进度计划和施工进度记录表分析施工进度偏差造成的原因,初步采取措施来纠正施工进度偏差,促使施工进度偏回可允许的范围或将施工进度偏差降到最低值,避免非关键线路上施工活动转化为关键线路施工活动。在此基础上,将工程项目施工过程中关键线路上已知检测点中的 BCWP 值作为原始数列  $x^0$  值,代入 GM(1,1) 预测模型中求出发展系数  $a$  和灰作用量  $b$ , 计算得到的  $x^0(k+1)$  为下一个检测点的预测值,  $x^1(k)$  为累加预测值。此时,一方面可以将  $x^0(k+1)$  和  $x^1(k)$  与下一个施工进度检测点的 BCWS 值进行比较,另一方面也可以根据预测值和预算单价反推计算到下一个检测点时可能完成的工程量,在线性计划图相应的上做出标识,这样更有助于分析进度是否存在偏差情况,达到预测当前施工速率下施工进度变化趋势的目的。

3.9 调配施工资源,动态控制施工进度

当施工进度偏差较大时,经初步采取措施处理后并未得到有效解决的情况下,项目经理或其他主要管理人员可以根据预测的施工进度变化趋势,利用 GM 预测模型定量得到的下一检测点预测值作为制定最新进度管理计划的参考因素,通过组织措施、技术措施、经济措施和合同措施,动态调配施工资源,提高施工效率,从而减少施工进度偏差,保障施工进度顺利进行,同时确保工程质量和施工成本符合要求。

4 结语

高速公路施工进度控制的关键在于制定精准的工期计划和精确控制。传统的事后工期控制方法已经不能满足高速公路施工进度控制的需求,只有利用科学合理的施工进度计划管理与控制方法,才能提高施工进度管控的有效性。将线性计划法与 GM(1,1) 模型结合使用,使其优势互补,才能在高速公路工程施工管理中更好地实现施工进度动态控制。在预测施工进度时,利用关键线路上最新的施工进度数据进行预测,能够提高施工进度预测的可靠性。根据施工进度偏差,结合施工现场实际情况,合理调配施工资源,完善施工进度计划,才能实现施工工期动态控制。由于采用不同的施工方案,施工工序可能存在不同,本文未能将施工活动划分到具体的施工工序,希望后续的研究能够以施工工序为工作单位开展施工进度精细化管理研究。

参考文献

[1] 蒋根谋. 线状工程项目进度计划及资源分配问题优化研

究[D]. 南昌:南昌大学,2008.

[2] 李擎. 基于 LSM 的中国铁路集中修进度计划编制模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.

[3] 蒋根谋. 线性计划方法及其应用研究[J]. 华东交通大学学报,2008(5):8-11.

[4] 宋朝祥,李艳,关通. 基于改进 LSM 的多工作面线性工程施工进度优化[J]. 土木工程与管理学报,2017,34(6):169-174,179.

[5] JOHNSTON D W. Linear scheduling method for highway construction[J]. Journal of Construction Division,1981,107(2):247-261.

[6] CHRZANOWSKI E N,JOHNSTON D W. Application of linear scheduling[J]. Journal of Construction Engineering and Management,1986,112:476-491.

[7] VORESTER M C,BELIVEAU Y J,BAFIA T. Linear scheduling and visualizations[J]. Transportation Research Record,1992,1351:32-39.

[8] HARMELINK D J,ROWLINGS J E. Linear scheduling model:development of controlling activity path[J]. Journal of Construction Engineering and Management,1998,124:263-268.

[9] 刘津明. 线状工程项目进度计划方法的研究[J]. 市政技术,1998(4):25-26.

[10] DUFFY G A,OVERLENDER G D,JEONG D H S. Linear scheduling model with varying production rates[J]. Journal of Construction Engineering and Management,2011,137(8):574-582.

[11] 唐源洁. 交通运输线性工程施工进度计划编制及优化方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.

[12] 刘利强. 基于 LSM 的铁路工程施工进度计划优化方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.

[13] 石锦峰,覃虹. GM 模型法在工程项目实施状态预测中的应用[J]. 四川建筑,2003(6):96-97.

[14] 张杰,周广腾,胡成,等. 灰色 GM 模型在桥梁施工监控中的应用及分析[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2013 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2013:543-547.

[15] 李东文,陈永鸿,高雄,等. 基于 EVM-GM 预测的 PC 建筑项目动态成本控制研究[J]. 建筑节能,2019,47(7):138-142.

[16] SIAMI-IRDEMOOSA E,DINDARLOO S R,SHARIFZADEH M,et al. Work breakdown structure (WBS) development for underground construction[J]. Automation in Construction,2015,58:85-94.

[17] 张宏国,徐晓飞,战德臣. 基于工作分解结构的跨企业项目多级网络计划[J]. 计算机集成制造系统,2007(3):513-519,540.

[18] 杨建国. 树计划技术:工作分解结构进度计划模拟分析与优化[J]. 系统工程理论与实践,1994,14(5):14-19.

[19] KAR D. Implementating construction projects on schedule-challenge in a developing economy[J]. Journal of Economics and International Finance,2009,1(4):88-92.

[20] JUNG Y. Flexible work breakdown structure for integrated cost and schedule control[J]. Journal of Construction Engineering and Management,2004,130(5):616-625.

[21] 蒋根谋. 一种新的线性工程项目进度计划的编制方法[J]. 铁道建筑,2005(11):87-89.

[22] 陈红杰. 线状工程三种进度计划与优化方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2013.

Dynamic Control of Expressway Construction Progress Based on LSM-GM Prediction

DING Yao, ZHANG Zhe, AN Yaqiang

(School of Civil Engineering,Shaanxi Polytechnic Institute,Xianyang Shaanxi 712000,China)

**Abstract:** Expressways play an important role in promoting regional economic development. Traditional construction schedule management methods cannot meet the needs of construction period management for linear projects such as expressways, and often lead to out of control construction schedule management. The research is found that the linear planning method is beneficial to improve the scientificity and effectiveness of the planning and control of the construction schedule of the linear engineering. The GM prediction model and the linear planning method are used in combination to achieve the goal of dynamic control of the construction progress, ensure the smooth completion of the construction tasks during the construction period, and improve the market competitiveness of the construction unit.

**Keywords:** expressway; construction progress; linear scheduling method(LSM); GM model; dynamic control