

应用统计过程控制图监控项目的工期和成本

赵梦园, 訾雪旻

天津职业技术师范大学理学院, 天津

收稿日期: 2022年1月14日; 录用日期: 2022年1月24日; 发布日期: 2022年2月14日

摘要

挣值管理(Earned Value Management, EVM)和挣得工期管理(Earned Duration Management, EDM)是监控和分析项目成本和工期的强有力工具。EDM是Khamooshi和Golafshani (2014)引入仅利用时间指标来计算工期的方法, 目前对于EVM和EDM与累积和(CUSUM)控制图相结合的方法还没有被研究。本文分别利用来自EVM的成本表现指标(Cost Performance Index, CPI)和来自EDM的工期表现指标(Duration Performance Index, DPI)来构造CUSUM统计量, 考虑到传统的CUSUM控制图一般是监控在假定漂移大小的前提下的过程, 通常取漂移量 $\delta = |u_1 - u_0|/2$ 。在大多数实际的工艺设计中, 预先确定漂移的确切大小是一件困难的事情。因而本文选用Sparks (2000)提出的自启动累积和(Adaptive CUSUM, ACUSUM)控制图和EDM与EVM来分别监控实际工程项目的工期和成本变化, 以使得项目管理者及时采取纠正措施来确保项目在预算和计划工期内完成。实验结果表明ACUSUM控制图对于项目成本和工期的监控是很有潜力的。

关键词

EVM, EDM, ACUSUM控制图, 成本, 工期

Application of Statistical Progress Control Chart to Monitor Project Duration and Cost

Mengyuan Zhao, Xuemin Zi

School of Science, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

Received: Jan. 14th, 2022; accepted: Jan. 24th, 2022; published: Feb. 14th, 2022

Abstract

Earned Value Management (EVM) and Earned Duration Management (EDM) are powerful tools for monitoring and analyzing project cost and duration. EDM is a method that uses only time indica-

tors to calculate duration introduced by Khamooshi & Golafshani (2014). At present, the method of combining EVM and EDM with CUSUM control chart has not been studied. This paper uses Cost Performance Index (CPI) from EVM and Duration Performance Index (DPI) from EDM to construct CUSUM statistics, respectively. Considering that the traditional CUSUM control chart generally monitors the process on the premise of assuming the magnitude of drift, the drift is usually taken $\delta = |u_1 - u_0|/2$. In most practical process design, it is difficult to determine the exact size of drift in advance. Therefore, this paper selects the Adaptive CUSUM control chart proposed by Sparks (2000). EDM and EVM are used to monitor the duration and cost shifts of the actual project, respectively. So that the project manager can take corrective measures in time to ensure that the project is completed within the budget and planned duration. The experimental results show that ACUSUM control chart is promising for monitoring of project cost and duration.

Keywords

EVM, EDM, ACUSUM Control Chart, Cost, Duration

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 介绍

在成本和工期的限制内生产高质量的软件是软件项目理想的目标。但是, 很多项目的成本和工期都无法控制。如何有效地管理成本和工期是大多数项目软件组织关注的最重要的问题之一。

EVM 和 EDM 是分别广泛应用于项目成本和工期的技术方法。通常采用来自 EVM 的 CPI 值大小表达项目的花费多少, 以及来自 EDM 的 DPI 反映项目的工期。

统计过程控制(Statistical Process Control, SPC)是一种质量控制方法。在过去的几十年中, 报道了许多在项目过程中应用 SPC 的实际例子[1] [2]。在这些实际应用的例子中大多使用的是 EVM 的 CPI 指标和挣得进度管理(Earned Schedule Management, ESM)的(Schedule Performance Index) SPI 指标来分别监控项目的成本和工期。但 SPI 指标是在满足累积挣值和计划值相等时的时间来计算的, 其值不是完全独立于成本而建立的工期指标。因此利用 SPI 和 SPC 结合的控制图对于工期的监控往往没有很好的效果。Votto 在 2020 年《Applying and Assessing Performance of Earned Duration Management Control Charts for EPC Project Duration Monitoring》[3]和《Multivariate Control Charts Using Earned Value and Earned Duration Management Observations to Monitor Project Performance》[4]中将 EDM 的 DPI 与 SPC 相结合, 并展示了其优势。在构造 DPI 时, 先找到与实际时间的累积挣得工期相等的累积计划工期所对应时间, 再将该时间与实际时间求比值, 是完全独立于成本只基于工期构造的一个表现指标, 由其构成的统计量控制图将会有很好的表现及较低的错误报警率。

对于项目整个周期, 每个报告期的 DPI 和 CPI 与均值的差异并不相同, 但每个活动的微小变化都应引起项目经理的关注, 因此, 本文将这些表现指标与适用于监控小漂移的 ACUSUM 控制图相结合来分别构造其 CUSUM 统计量以此来监控整个项目周期工期和成本的均值漂移。

为此, 文章的安排如下, 首先给出了 EVM 和 EDM 的相关介绍及 ACUSUM 控制图的理论知识。第三节将本文构造的模型应用于实际例子, 并给出了相应的控制线数据与对应控制图, 对其结果进行了分析研究。在最后一节给出结论。

2. 理论知识

2.1. EVM 和 EDM

EVM 把范围、成本和进度整合到统一框架中, 并提供性能指标, 使管理人员能够检测成本和工期是否超支和延迟[5]。EDM 方法中将工期表现测量与成本完全分离开来, 进而引入挣得工期(Earned Duration, ED)来表示项目实际工期。关于 EVM 方法和 EDM 方法更多的细节可以分别参照 Anbari (2003) [6] 和 Khamooshi & Golafshani (2014) [7]。

假设项目共有 n 个活动, 每个活动 i 对应着不同的成本和工期, 考虑项目每隔 Δ 天进行评估一次, 其中 Δ 根据实际需求进行选取, 通常会取天、周、月、季度、年等, 则第 k 次评估报告的时间为第 $t_k = k \times \Delta$ 天。令 PV_{i_k} 、 EV_{i_k} 和 AC_{i_k} 分别为在时间 t_k 时项目活动 i 的计划价值(成本)、挣值以及实际成本, 同理 PD_{i_k} 、 ED_{i_k} 和 AD_{i_k} 为活动 i 在时间 t_k 时的计划工期、挣得工期和实际工期, 则成本表现指标(CPI)和工期表现指标(DPI)分别可以表示为

$$CPI = \frac{\sum_{i=1}^n EV_{i_k}}{\sum_{i=1}^n AC_{i_k}} = \frac{EV_{t_k}}{AC_{t_k}} \quad (2.1)$$

$$DPI = \frac{\sum_{i=1}^n ED_{i_k}}{\sum_{i=1}^n AD_{i_k}} = \frac{ED_{t_k}}{t} \quad (2.2)$$

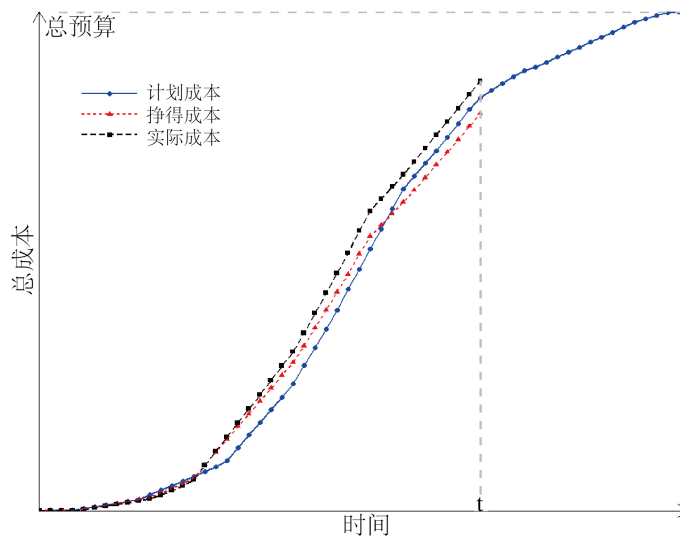


Figure 1. Conceptual chart of earned value management
图 1. EVM 方法概念图

其中 PV_{t_k} 表示项目的计划值, 是以一种累积和形式计算的, 即在项目开始之前的预算, PV 累积曲线的最后一点表示项目完成时的总预算, 关于 EVM 的概念如图 1 所示。 AC_{t_k} 表示项目的实际成本。 EV_{t_k} 指的是截止到时间 t_k 累积的挣值, 其曲线表示了在某给定的一时间点根据计划值完成的工作的累积花费, 一个最简单的计算方式是将项目计划值与完成项目百分比相乘, 即 $EV = PC \times PV$, 其中 PC 表示其已经完成的的比例。例如一个项目计划 1000 元 10 天可以完成, 当实际工作 5 天时, 当前消耗成本 600 元, 其中 1000 元指的 PV , AC 是 600 元, 而 EV 的值等于 $5/10 * 1000$ 为 500 元。

ED 是在某一时刻 t 满足累积挣得工期等于累积计划工期的时间, 关于 EDM 的概念图如图 2 所示。

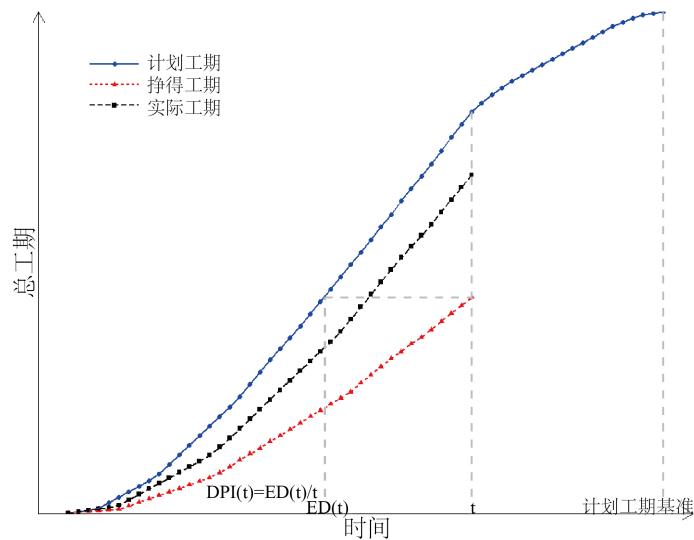


Figure 2. Conceptual chart of earned duration management

图 2. EDM 方法概念图

2.2. ACUSUM 控制图

对于 CUSUM 控制图, 我们通常研究的是针对与漂移大小是一个固定的值, 不失一般性, 当 $k = |\mu_0 - \mu_1|/2$ (其中 μ_0 为受控的均值, μ_1 是失控均值), 就可以得到一个最优的 CUSUM 控制图[8]。当实际漂移大小不是我们设计参数 k 所考虑的情况时, 控制图会有一个糟糕的表现。然而在现实生产过程中, 很难准确地知道漂移大小。为此, Sparks (2000)提出了变门限值的 ACUSUM 控制图[9], 控制图参数的大小是由当前及过去过程观测值来确定的, 在整个监控周期不是一个确定的值。当过程漂移大小 δ 未知时, 先利用一步最优预测去估计漂移的大小。本文使用简单的指数加权移动平均值来进行一步预测。之后再利用估计后的漂移自适应地选取门限值 k , 其主要设计思想是通过样本观测值来确定参数值的设置, 这样即使过程均值漂移大小未知, 控制图仍有非常好的表现。

对于检测向上漂移, Sparks 采用的检测统计量为

$$S_t^+ = \max \left\{ 0, S_{t-1}^+ + (X_t - Q_t^+ / 2) / h(Q_t^+) \right\} \quad (2.3)$$

其中 $Q_t^+ = \max \left\{ \delta_{\min}^+, (1-\lambda)Q_{t-1}^+ + \lambda X_{t-1} \right\}$, 通常取 $Q_0^+ = \delta_{\text{mean}}^+$, 当然也可以取 $(\delta_{\text{mean}}^+, h)$ 中的其他任何值, 来达到一个快速最初反应(fast initial response, FIR)的效果。 $h(k)$ 为 k 的一个已知函数, 其目的在于使控制限接近 1。对于检测向下漂移, 类似采用的检验统计量为

$$S_t^- = \min \left\{ 0, S_{t-1}^- + (X_t + Q_t^- / 2) / h(Q_t^-) \right\} \quad (2.4)$$

其中 $Q_t^- = \min \left\{ \delta_{\max}^-, (1-\lambda)Q_{t-1}^- + \lambda X_{t-1} \right\}$, $S_0^+ = S_0^- = 0$, 取 $Q_0^- = \delta_{\text{mean}}^-$ 。0 被用作两个统计数据的反射边界。 $Q_t^- / 2$ 的值决定这些统计数据何时重置为 0。

3. 实际例子

本文将 EDM 和 EVM 与 SPC 相结合应用于一个由 32 个仿真活动网络项目中, 该数据是属于南美一家工业工厂的实际资本设备项目, 是一种 EPC (Engineering-Procurement-Construction)项目。该项目活动

具有活动的高度依赖性、工作分散、各个活动结构复杂以及对预期结果的准确预测的不确定性的特点(Yeo and Ning (2002); Yeo and Ning (2006)) [10] [11]。此类项目的活动之间存在着某种网络结构, 在某一时间点可能由一个或多个活动同时进行且同时期的活动可能接在不同活动之后。一个 EPC 过程模型如图 3 所示:

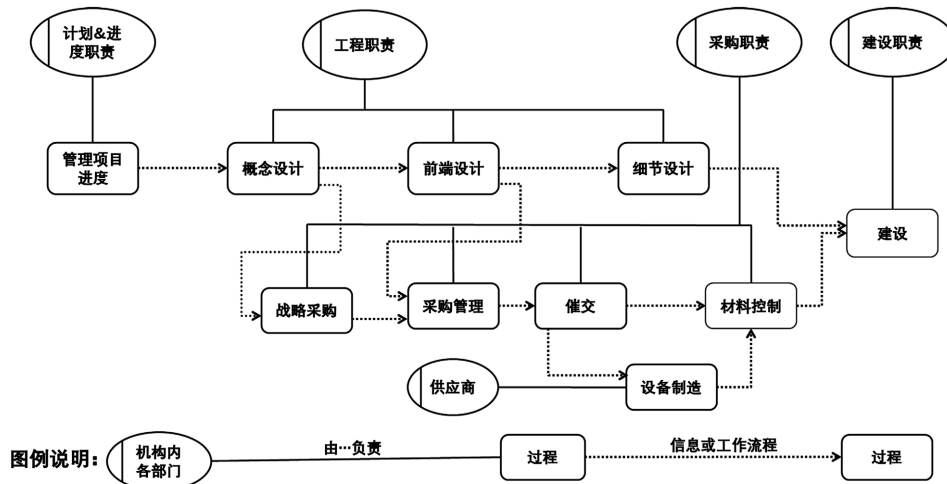


Figure 3. An EPC process model
图 3. 一个 EPC 工程模型

假设每个活动*i*的受控工期 d_{i0} 服从三角分布, 即 $d_{i0} \sim Tri(a_{i0}, c_{i0}, b_{i0})$, 其中 a_{i0}, b_{i0} 和 c_{i0} 分别代表受控工期的最小值, 最大值及最可能的值。活动 10、11、12、13 和 14 的成本是服从 $[0.8 * \beta_{i0}, 1.2 * \beta_{i0}]$ 均匀分布, 活动 1、9、19 和活动 36 是没有模拟的工期和成本的, 仅用于组织基线进度。其余活动成本与工期是线性关系, 其中 β_{i0} 为已知工期系数。由于项目的保密政策, 本文的数据均进行了调整但不失精确性 Votto (2020)。该实际例子项目网络图如图 4 所示, 其累积的受控工期柱状图如图 5 所示。

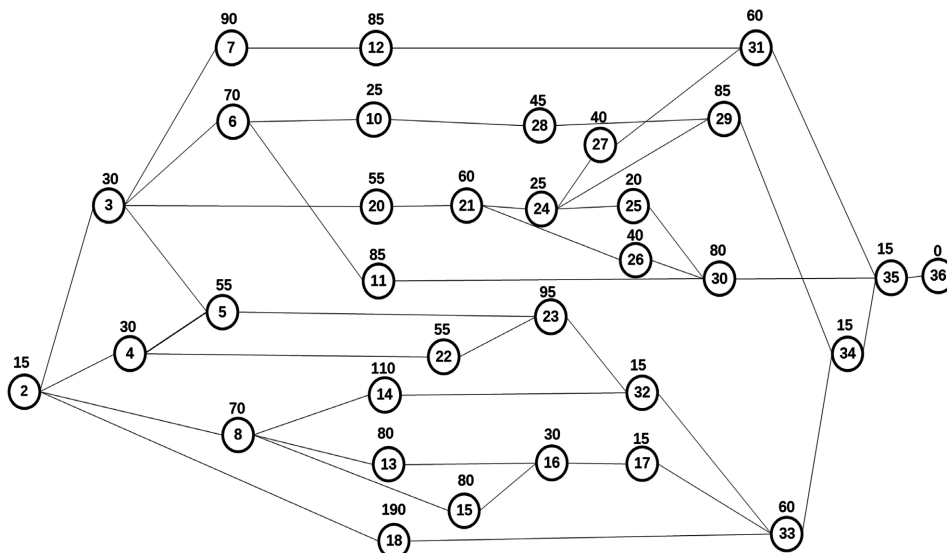


Figure 4. Real-life example of project network
图 4. 项目网络图的实际例子

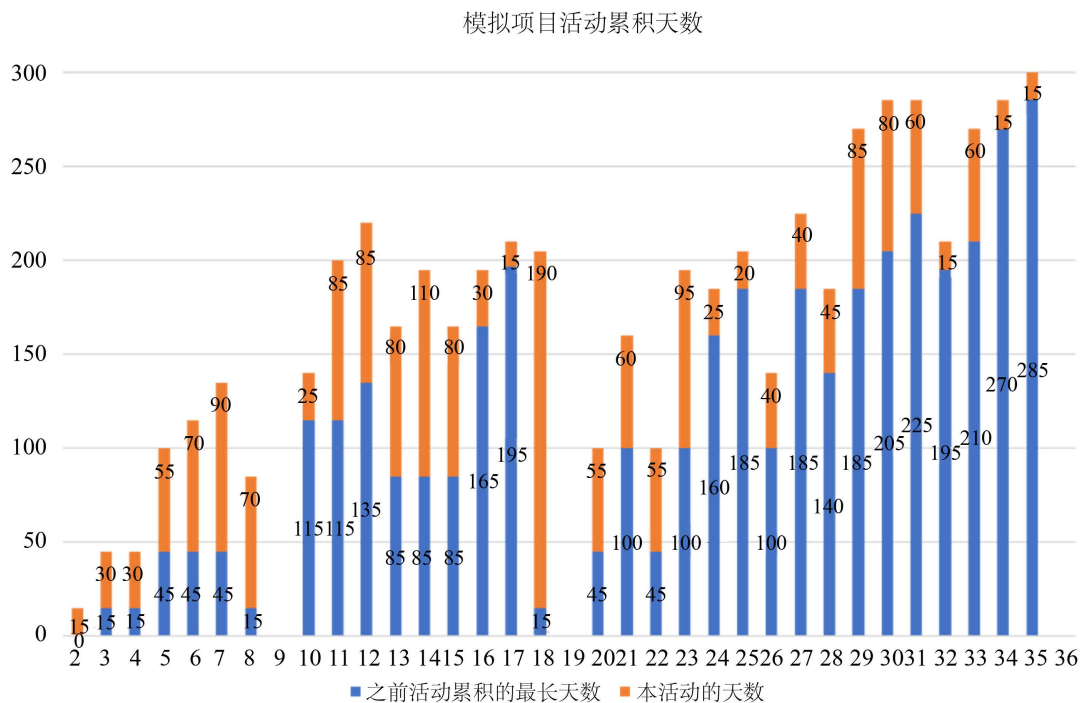


Figure 5. Cumulative days of simulated project activities

图 5. 模拟项目活动的累积天数

进行 10000 次模拟实验生成受控的工期, 来说明该方法在实际工程中的应用。分别将 CPI 和 DPI 与 ACUSUM 控制图相结合, 构造监测 CPI 向下漂移的 ACUSUM 统计量为

$$ZCPI_t = \min\left(ZCPI_{t-1} + (CPI_t - \delta_t^- / 2) / -h(|\delta_t^-|)\right) \quad (2.5)$$

其中 $\delta_t^- = \min(\lambda * CPI_t + (1-\lambda) * \delta_{t-1}^-, \delta_{\max}^-)$, $h(x)$ 选取了 Sparks 2000 年文章中 $ARL = 200$ 的函数解析式, $\lambda = 0.1$ 。提前一步预测采用的是大多数质量从业者熟悉的工具 EWMA 统计量(Lucas and Succucci(1990)) [12]。根据 CPI 的监控统计量可同理得到

$$ZDPI_t = \min\left(ZDPI_{t-1} + (DPI_t - \delta_t^- / 2) / -h(|\delta_t^-|)\right) \quad (2.6)$$

其中 $\delta_t^- = \min(\lambda * DPI_t + (1-\lambda) * \delta_{t-1}^-, \delta_{\max}^-)$ 。

将模拟数据代入建立的模型中, $ZCPI_t$ 在任意的时间 t 都可以被监测出来, 对于受控的项目, CPI 均值 $\mu_{CPI} = \mu_{0CPI}$ 是我们想要的, 在本文中我们感兴趣的是监测过程均值 $\mu_{1CPI} < \mu_{0CPI}$, 此时意味着项目发生了延期。在审评期 t 时刻, 采用第一类错误概率 α 来确定控制线, 该控制线满足

$$P(ZCPI_t < L_{CPI_t}) = \alpha \quad (2.7)$$

同样的方法将 DPI 与 ACUSUM 控制图相结合, CPI 与 DPI 单变量控制图的下控制线结果分别如表 1 所示。

假设对于整个项目周期采取每 20 天进行一次报告, 项目的 DPI 表现指标在第 8 次报告时发生了大小为 0.9936 的均值漂移, 由其构成的 ACUSUM 控制图如图 6(a)所示, 假设 CPI 表现指标在第 8 次报告时发生了大小为 1.0001 的均值漂移, 由其构成的 ACUSUM 控制图如图 6(b)所示, 其中黑色的线表示为表现指标的控制线, 而红色的三角标记点表在之后的检测点项目均失控。由这些数据和图易知, 当在项目

活动均值发生漂移后, 自适应控制图在可以相对很快的监测出来。

Table 1. The lower control limits ($\alpha = 0.05$) of *CPI* and *DPI* indexes of the simulate project

表 1. 模拟项目 *CPI* 和 *DPI* 指标的下控制线($\alpha = 0.05$)

时间(天)	20	40	60	80	100
<i>CPI</i> 控制线	-0.1687	-0.2059	-0.2648	-0.3075	-0.3314
<i>DPI</i> 控制线	-0.3186	-0.4169	-0.4779	-0.5237	-0.5564
时间(天)	120	140	160	180	200
<i>CPI</i> 控制线	-0.3552	-0.3855	-0.4248	-0.4644	-0.5043
<i>DPI</i> 控制线	-0.5919	-0.6237	-0.6488	-0.6699	-0.6895
时间(天)	220	240	260	280	300
<i>CPI</i> 控制线	-0.5461	-0.5896	-0.6273	-0.6652	-0.7066
<i>DPI</i> 控制线	-0.7078	-0.7242	-0.7375	-0.7501	-0.7613

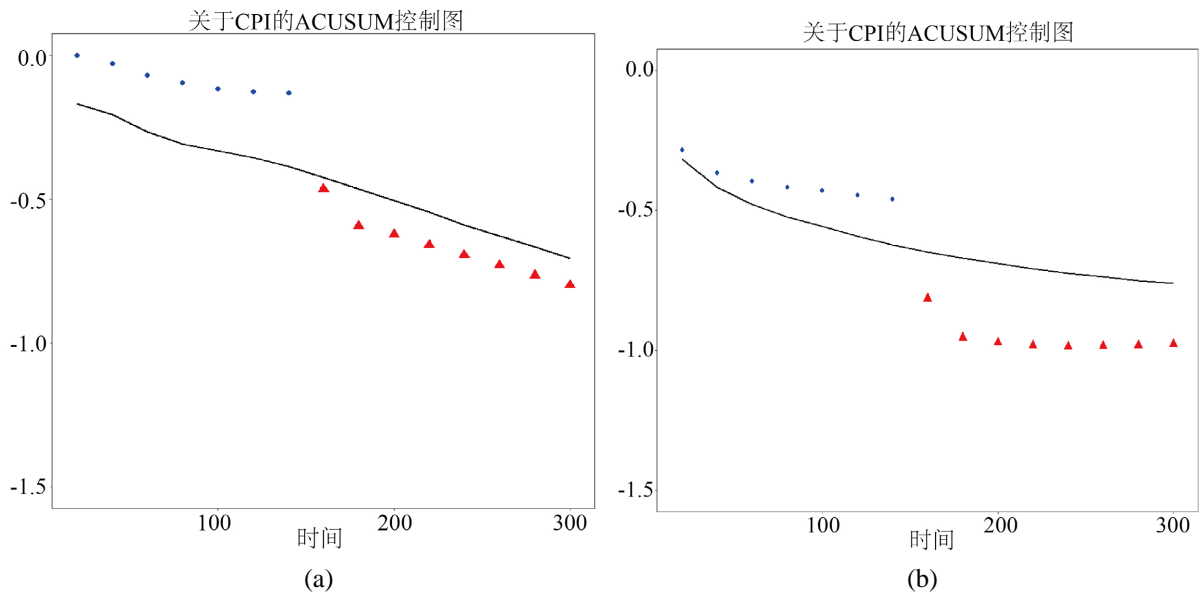


Figure 6. (a) ACUSUM control chart for monitoring *CPI* index; (b) ACUSUM control chart for monitoring *DPI* index

图 6. (a) 关于 *CPI* 的 ACUSUM 控制图, (b)关于 *DPI* 的 ACUSUM 控制图

4. 结论

本文主要是为工程项目过程中均值漂移大小未知而设计的, 基于传统的工程管理方法 EVM 和 EDM 分别建立 ACUSUM 统计量以监控实际项目的成本和工期。在构造控制图的控制线时, 采用了根据模拟实验数据的经验分布函数, 而不是利用静态的、根据历史数据或经验。控制图用于监测在实际的小型 EPC 项目执行过程中的小漂移, 以识别代表项目延迟可能原因的特殊变化来源。在项目整个周期的不同评审时期来反映实际进行的过程。此外, 将描述的方法用于实际例子中, 通过模拟实验结果来评估提出的控制图表现。

在实际的工程项目中, 过程均值的漂移大小通常是未知的, 因此当我们使用固定的参考值来构建统计模型时, 控制图对于所要监控的统计量表现不理想。因此本文采用 ACUSUM 控制图与工程项目表现

指标来监控项目的工期和成本。在模拟实际项目过程中, 假设在某个活动点发生了均值漂移, 我们通过失控统计量与控制线的比较可以看出提出的控制图具有良好的性能。考虑到实际项目不仅要在计划的工期内完成项目, 项目的花费也要在预算内, 因此, 在后续的研究中可以利用不同多元统计量来同时监控项目的工期和成本。

参考文献

- [1] Aliverdi, R., Naeni, L.M. and Salehipour, A. (2013) Monitoring Project Duration and Cost in a Construction Project by Applying Statistical Quality Control Charts. *International Journal of Project Management*, **31**, 411-423. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.08.005>
- [2] Bancescu, M. (2016) Controlling Project Schedule Progress, Using Control Charts. *Cybernetics and Systems*, **47**, 602-615. <https://doi.org/10.1080/01969722.2016.1211883>
- [3] Votto, R., Ho, L.L. and Berssaneti, F. (2020) Applying and Assessing Performance of Earned Duration Management Control Charts for EPC Project Duration Monitoring. *Journal of Construction Engineering and Management*, **146**, No. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001765](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001765)
- [4] Votto, R., Ho, L.L. and Berssaneti, F. (2020) Multivariate Control Charts Using Earned Value and Earned Duration Management Observations to Monitor Project Performance. *Computers & Industrial Engineering*, **148**, Article ID: 106691. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106691>
- [5] Vanhoucke, V.M. (2006) A Comparison of Different Project Duration Forecasting Methods Using Earned Value Metrics. *International Journal of Project Management*, **24**, 289-302.
- [6] Anbari, F.T. (2004) Earned Value Project Management Method and Extensions. *IEEE Engineering Management Review*, **32**, 97. <https://doi.org/10.1109/EMR.2004.25113>
- [7] Khamooshi, H. and Golafshani, H. (2014) EDM: Earned Duration Management, a New Approach to Schedule Performance Management and Measurement. *International Journal of Project Management*, **32**, 1019-1041. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.11.002>
- [8] 王兆军, 邹长亮, 李忠华. 统计质量控制图理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] Sparks, R.S. (2000) CUSUM Charts for Signalling Varying Location Shifts. *Journal of Quality Technology*, **32**, 157-171. <https://doi.org/10.1080/00224065.2000.11979987>
- [10] Yeo, K.T. and Ning, J.H. (2002) Integrating Supply Chain and Critical Chain Concepts in Engineer-Procure-Construct (EPC) Projects. *International Journal of Project Management*, **20**, 253-262. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(01\)00021-7](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(01)00021-7)
- [11] Yeo, K.T. and Ning, J.H. (2006) Managing Uncertainty in Major Equipment Procurement in Engineering Projects. *European Journal of Operational Research*, **171**, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.036>
- [12] Lucas, J.M. and Saccucci, M.S. (1990) Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements. *Technometrics*, **32**, 1-12. <https://doi.org/10.1080/00401706.1990.10484583>