

# 基于学习曲线的装配式建筑构件生产 人力配置优化研究



重庆大学硕士学位论文  
(学术学位)

学生姓名：龙春晓

指导教师：蔡珍红 研究员

专 业：管理科学与工程

学科门类：工 学

重庆大学建设与房地产学院

二〇一七年五月



# **Study on the Optimization of Productive Manpower Allocation of Prefabricated Building Components Based on Learning Curve**



A Thesis Submitted to Chongqing University  
in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Master's Degree of Economics

**By**  
**Long Chunxiao**

**Supervised by Prof. Cai Zhenhong**  
**Specialty: Management Science and Engineering**

College of Construction Management and Real Estate of  
Chongqing University, Chongqing, China

May 2017



## 摘 要

近年来，建筑产业化得到大力推广不断发展，装配式建筑作为实现建筑产业化的一种建造形式和重要载体，也迎来新的成长机遇。装配式建筑的特点之一是将建筑物分解成诸多单元部品和构件，在工厂预先生产，再运送至现场装配而成，因此装配式建筑离不开预制构件的工厂化生产。而构件生产离不开工人集体作业，同时这种工厂化的生产方式对工人的知识、技能、素质都提出了新的要求，导致传统建筑工人往往难以匹配，造成了从业工人的整体素质偏低、预制构件生产技术工人稀缺的现状，因此工厂多采用非熟练工与熟练工搭配的模式进行生产；另一方面，随着施作天数的增加，构件生产工人的经验积累使得生产效率不断提升，而当前构件生产人力管理模式仍十分粗放，大多延续传统的根据“平均生产力”加“经验调整”的方式进行人力配置，既未充分考虑工人技能的熟练程度对操作时间的影响，也未根据这种变化对生产过程的人力配置进行精细化、动态化管理，导致后期出现人员配置过剩、人力成本增大的情况。因此，研究工人的施作天数与生产效率的关系将有助于实现工厂人员的优化配比，降低劳动成本。

学习曲线是指作业者随着劳动次数的增加，知识不断积累，熟练度不断提高，从而降低单位工时和单位成本的现象，它可以反映出操作熟练度与生产效率之间关系。预制构件生产有诸多流程和工序，工人在不同工序、不同学习阶段会有不同的熟练度，影响着工人在每一工序上的操作时间，进而影响整个生产流程的耗时。通过改变熟练工和非熟练工配置的比例，可以调控整个流程时间，进而调整人力成本。因此，本文将学习曲线引入构建的人力资源配置方案，考虑工人操作时间的变化对人力配置的影响，以期改善当前粗放的人力管理方式，降低人力成本。

首先从预制构件生产流程着手，分析工作内容并进行工序划分。然后根据实际数据，求出每项工序的学习曲线方程，刻画工人施作天数与操作熟练度之间的关系。再结合生产过程的其他限制条件，如计划完成时间、工人薪资差异等，以最低人力成本为目标，建立起适用于预制构件生产过程的人力配置方案。利用 Visual Studio 平台进行方案的组合和比选，从中选取人力成本最小时的人力配置优化方案。最后，本文以台湾省某预制构件厂为案例，进行实证研究，验证本方案的可行性。实证结果显示本方案成效良好，可以求得最佳人力配置结果，并能识别出关键工序及各项工序熟练工培养时间，作为技术工人培训和考核的参考。

**关键词：**装配式建筑，预制构件生产，学习曲线，人力分配，成本优化



## ABSTRACT

In recent years, with the booming promotion of industrialized building, prefabricated building, as one of the important built forms and a critical carrier to achieve industrialized building, has embraced a brand new chance to develop. Prefabricated building can never continue without industrialized production of prefabricated components. The reason lies in the fact that industrialized building is an aggregation of several components that have been pre-produced in the factory and then sent to the site to assemble, which is one of those prominent technical characteristics. That pre-production of components can never continue without collective work of workers and that such mode of production demands updated knowledge、skills、quality from traditional workers who are likely to suffer maladjustments lead to the comparatively low quality of labor workers and shortage of skilled workers. Thus, the majority of factories combine journeymen and the unskilled ones in the process of production. On the other hand, due to the increasing work days, component production workers will gather rich experience to improve the efficiency. However, the traditional extensive manpower management that average productivity and experience adjustments are utilized to carry out human resource allocation, fail to consider how the technical proficiency will influence operation time nor adjust to a more elaborate and dynamic management. Consequently, human resource allocation exceeds and manpower cost soars. Owing to the above reasons, research on the relationship between work days and production efficiency contributes to optimized allocation of workers and cost decrease.

Learning curve means that with the increase of labor times, knowledge is accumulated and proficiency is raised so unit man-hour and cost will reduce, which can reflect the relationship between proficiency and efficiency. There are numerous process and procedure in the components production. Workers in different procedure and learning stage will have different proficiency affecting the time on each operation resulting in different consumption of time during the whole production. Altering the proportion of journeymen and the unskilled ones in allocation can adjust and control flow time and further cost. So, this article will adopt learning curve in the established human resources allocation, in order to improve extensive management and reduce the labor cost, and take the effect of changing work time into consideration.

At the first step, started from the production process of components, this article analyzed its work content and divided it into several parts in terms of procedure. Then based on the actual statistics, this article figured out the Learning curve equation of each procedure to describe the relationship between work days and proficiency. Afterwards, under the other limitations during production process such as estimated finish time、wage differential, the human resources allocation suitable for components production was established. Platform—Visual Studio was adopted for comparison and selection and choose the allocation with the lowest manpower cost. In the end, this article took a prefabricated components production factory as example to carry out research and test the feasibility. The result turned out to be good, namely the best allocation scheme was worked out, and critical processes as well as time spent on them to train journeymen were identified so that they could help to train and examine those skilled workers as significant reference.

**Keywords:** Prefabricated Building, Components Production, Learning Curve, Human Resources Allocation, Cost Optimization



## 目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
1 绪 论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	3
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 预制构件生产人力资源配置研究.....	3
1.2.2 运用学习曲线进行人力资源配置研究.....	5
1.2.3 研究评述.....	6
1.3 研究内容、方法和技术路线.....	6
1.3.1 研究内容.....	6
1.3.2 研究方法.....	7
1.3.3 技术路线.....	8
2 相关概念及理论基础.....	9
2.1 装配式建筑相关概念界定.....	9
2.2 人力资源配置相关理论概述.....	9
2.2.1 人力资源配置的相关概念及含义.....	9
2.2.2 人力资源配置相关理论.....	10
2.3 学习曲线相关理论概述.....	12
2.3.1 学习曲线的涵义及特性.....	12
2.3.2 学习曲线的常用模型.....	15
2.3.3 学习曲线发展脉络.....	18
2.4 学习曲线的形成过程.....	19
2.5 本章小结.....	20
3 基于学习曲线的预制构件生产人力配置方法研究.....	21
3.1 预制构件生产人力配置现状及问题.....	21
3.1.1 预制构件人力配置现状.....	21
3.1.2 预制构件人力配置问题.....	23
3.2 预制构件生产人力及其配置特征分析.....	24
3.2.1 预制构件生产特征分析.....	24

3.2.2 预制构件生产人力特征分析 .....	25
3.2.3 预制构件生产人力配置特征分析 .....	26
3.3 基于学习曲线的人力配置流程 .....	27
3.3.1 学习曲线的适用性 .....	27
3.3.2 基于学习曲线的人力配置流程 .....	28
3.4 本章小结 .....	28
4 预制构件生产人力配置优化方案构建 .....	29
4.1 方案构建基础资料 .....	29
4.1.1 方案优化对象 .....	29
4.1.2 工序划分 .....	31
4.1.3 工序调整 .....	33
4.1.4 各项工序配置人数 .....	33
4.2 人力配置优化目标及原则 .....	34
4.2.1 人力配置优化目标 .....	34
4.2.2 人力配置优化原则 .....	34
4.3 人力配置优化方案构建 .....	35
4.3.1 假设条件 .....	35
4.3.2 第一次优化 .....	37
4.3.3 第二次优化 .....	39
4.4 求解方法与步骤 .....	40
4.5 本章小结 .....	41
5 实证研究——以台湾某预制构件厂为例 .....	43
5.1 案例选取原因 .....	43
5.2 数据采集过程 .....	44
5.2.1 数据采集原则 .....	44
5.2.2 数据采集步骤 .....	45
5.3 预制构件生产工人薪资表 .....	45
5.4 学习曲线数据收集及基础处理 .....	46
5.4.1 学习曲线数据基础处理 .....	46
5.4.2 学习曲线模型选取 .....	50
5.5 预制构件生产各项工序学习曲线分析 .....	51
5.5.1 浇筑前各项工序学习曲线分析 .....	51
5.5.2 浇筑阶段各项工序学习曲线分析 .....	58
5.5.3 浇筑后各项工序学习曲线分析 .....	63

5.5.4 各项工序学习曲线分析小结 .....	67
<b>5.6 人力配置优化结果及分析 .....</b>	<b>70</b>
5.6.1 人力配置优化结果 .....	70
5.6.2 输出结果分析 .....	75
5.6.2 案例对大陆的借鉴意义 .....	78
<b>5.7 本章小结 .....</b>	<b>78</b>
<b>6 结论与展望 .....</b>	<b>79</b>
6.1 结论 .....	79
6.2 展望 .....	79
<b>致 谢 .....</b>	<b>81</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>83</b>
<b>附 录 .....</b>	<b>87</b>
A. C#程序代码 .....	87
B. 学习曲线数据收集 .....	93
C. 读硕士学位期间发表学术论文情况 .....	157



## 1 绪 论

### 1.1 研究背景与意义

#### 1.1.1 研究背景

建筑业是我国国民经济的支柱产业，传统建筑生产方式普遍存在资源能耗高、环境污染严重、人员劳动强度大、工程质量和安全无法有效保障等问题，在当前中国经济发展进入新常态的时代背景下，建筑业的转型升级迫在眉睫。2015 年国家在《建筑产业现代化发展纲要》中提出，建筑产业现代化是国家推进产业转型升级战略的重要内容。建筑工业化是迈向建筑产业现代化的必经之路，它具备以下四个方面的特征：建筑设计标准化、构配件生产工厂化、施工装配化和组织管理信息化，同时，这四化也是实现建筑工业化的有效途径和基本方法。简而言之建筑工业化就是要让传统建筑业的生模式由“建造”向“制造”转变(李登龙, 2014)。推行建筑工业化离不开大力推广装配式建筑，装配式建筑离不开建筑部品部件的工厂化生产(即预制构件的工厂化生产)，这种全新的生产方式不仅可以节约能源、减少环境污染、缩短工期，还可以有效节约劳动力，解决我国人口红利逐渐消失、人工费不断上涨的问题。因此，劳动力短缺是当前推动建筑工业化发展的主要原因和重要目的。

面对工厂化生产这种全新的建筑生产方式，对一线工人和人力管理方式都提出了新的要求，但目前我国建筑工业化还处于起步阶段，各个方面的支持都不完备，使得当前的劳动成本跟成熟生产还有一定差距，没有达到预想的效果，存在优化空间。具体原因如下：

##### ① 预制构件生产工人稀缺

虽然工业化建造模式可有效的促进建筑全产业链的流动，并且可以有效解决传统施工造成的诸多问题，但是要使项目各参与方都对产品满意，则需要对大量的从业人员进行培训，发挥出工业化生产的价值 (MB Jelodar, 2013)。但我国建筑工业化发展水平较低，仍面临政策体系不健全、初始成本较高、技术标准缺失、专业化人员缺少等阻碍 (Blismas and Wakefield, 2000; Goodier and Gibb, 2005)。

一方面，预制构件的生产方式、制造工艺都与传统方式不同，对工人的知识和技术水平都提出更高要求，而目前从事预制构件生产的工人多由传统建筑工人转变而来，且工人进入预制生产领域的时间长短不一，导致现有工人能力水平参差不齐，有的熟练程度高(熟练工)，有的熟练程度低(非熟练工)，这种“非熟练工和熟练工共存”的局面使工人整体能力远未达到行业发展要求；这也进一步导致了相关劳动力的严重不足，部品构件生产的技术工人和施工现场的装配式建筑工

人普遍缺乏，目前缺口已近 100 万（沈维莉和张克纯，2016），随着装配式建筑的规模化发展，部品构件的生产工人的需求量将越来越大。

## ② 当前人力管理方式粗放

传统建筑行业在进行人员配置时，大多依据定额和企业管理人员经验判断，调整制定人员安排计划。而目前产业化定额还未编制完成，企业生产经验也积累不够，使得在工人稀缺的大环境下，预制构件厂的人员管理方式仍十分粗放，基本延续了传统建筑行业的人力分配方式。一般预制构件厂在进行每个工作班组的人员搭配时，会考虑模具数量、生产设备和工作面等因素，确定好各项工序的配置人数，再根据机械设备和作业人员的平均生产效率辅以经验值进行调整，确定最终的人员配置方案。

一方面，根据平均生产力和经验数据确定工人数量，未考虑到熟练工和非熟练工搭配比例的不同导致各个工作班组生产效率有差异，往往造成整个工厂各工作班组间生产节奏失衡，导致人力配置低效，不利于整体的生产安排。另一方面，根据“学习效应”可知，非熟练工的生产效率会随着工作时间及作业熟练度的增加而增加，进而可以改善人力资源的分配（Malgorzata and Ojelanki, 2010），这是因为在工期不变的情况下，可以通过调整熟练工与非熟练工的比例降低人力成本。但现行人力分配方式未考虑这一变化对人力资源的改善作用，因此人力配置还存在优化空间。

因此，在预制构件生产工人稀缺的情况下，人力资源管理方式又比较粗放，既没有充分利用工人效能，也没有解决企业人才持续培养和供给的问题，使得装配式建筑在降低人力成本这一优点上并未很好的体现出来。所以，如何通过优化人力配置，用好用尽现有稀缺的人力资源，在提升生产效率的同时降低人力成本，具有重要意义；同时，装配式建筑的成本一直略高于传统建造方式，成为阻碍装配式建筑发展的因素，究其原因主要是因为预制构件的生产、运输以及安装费用偏高（张招华，2013；刘春梅，2016）。其中，人力成本是预制构件生产成本中的重要组成部分，面临人工费不断上涨的趋势，如何充分利用每位工人的效能，实现人力资源的最佳配置仍具有其现实意义。

所以，将“学习效应”引入人力配置，构建优化模型，协调好工人数量与工人质量（熟练工与非熟练工）的关系，更加科学合理的进行人力资源分配，实现最小人力成本下的最佳人力配置，是本研究的目的之一。

第二，目前建筑产业工人面临转型难题，但市场上预制构件生产工人稀缺，且各级各类院校在这类人才培养上很少涉猎，一是由于在知识、理论、技能等方面未及时更新，二是由于工人的技能培训、考核、继续教育体系尚未健全。因此，本文想通过研究预制构件生产过程的学习曲线，识别出关键工序及工人学习时间，

作为企业和高校制定培训计划的参考，帮助产业化工人转型，以保证产业工人充分持续地供给。这是本研究的第二个目的。

### 1.1.2 研究意义

随着装配式建筑的不断发展，预制构件生产也迎来新的契机。装配式建筑从设计、生产、施工都与传统建造方式有诸多不同，预制构件的工厂化生产是实现装配式建筑的关键途径，为其生产过程配置合理的熟练工、非熟练工数量，不仅关系到生产时间的长短，还会影响人力成本的高低。主要从以下两个方面阐述本文的研究意义：

#### ① 理论意义

人力资源是社会和企业发展的重要财富，不断优化人力配置已成为企业增强自身竞争力的有效手段。国内外学者对人力资源的理论和分配模型已有较为深入的研究，但这些研究常常忽略了工人学习对于改善人力资源分配的作用。对于个人来说，随着操作时间增加，自身经验会不断积累、生产力不断提升，进而可以为企业人力配置提供优化空间，实现动态的人员管理。

本文考虑了学习对人员配置的影响，将学习曲线和人力资源配置有机结合，构建了基于学习曲线理论的人力配置动态优化方案，对于丰富预制构件生产过程中的人力配置具有一定的理论意义。

#### ② 实际意义

目前预制构件生产工人稀缺，企业应当科学分配人员，充分发挥人力管理的优势。引入学习曲线：1) 改善人员配方案，降低人力成本。预制构件厂建设前期厂房修建、设备购买、模具设计等成本投入大，且大多企业还未达到规模经济，故在成本方面一直略高于传统建造方式。本文通过将学习曲线引入人力配置优化方案，考虑工人不断变化的生产效率为人力配置提供的优化空间，通过动态调整熟练工与非熟练工的搭配比例，改善人员配置，实现工人效用的最大化利用，达到优化人力成本的目的。2) 完善产业化工人培训体系，帮助产业工人转型。本文通过绘制预制构件生产各项工序的学习曲线，识别出关键工序、熟练工养成时间和操作工时，帮助企业制定合理的培养计划，实现人才的储备和供给，能够促进整个产业链的稳定发展，提升建筑工业化发展水平。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 预制构件生产人力资源配置研究

本章主要梳理了当前预制构件生产中关于人力资源配置的研究。

装配式建筑已在国外发展多年，欧美等发达国家的预制构件生产技术也相当成熟，近几年国内也掀起研究热潮，因此国内外学者在预制构件生产管理方面都

有比较丰富的研究成果。但其中只有少部分学者的研究中涉及了预制构件生产的人力配置问题，且并未对这一问题进行深入讨论。Warzawski（1984）根据预制构件生产的不同特点，将其分为标准品的长线生产和专项订单特殊规格的短线生产；此外，作者还将生产组织区分两类：一是针对移动生产线的专业工班组织；一是针对固定生产位置的全能工班组织。Chan and Hu（2002）在 Warzawski 基础上进行进一步研究，着重分析了长线生产问题以及专业工班组织的求解。赵俊宏（2012）以预制柱为研究对象，将精益生产与六标准差有机结合，通过消除生产过程中的无效劳动，使工人操作标准化，提升工人生产效率。Peng Wua 等（2013）用精益生产理念来分析预制构件生产过程中的无价值活动，作者站在全生命周期的角度，对新加坡 17 个预制构件厂进行调查，用加权因子模型分析预制构件生产过程，发现缺乏有经验的员工是预制构件生产过程中最不能产生价值的原因之一。陈怡如（2013）研究高科技厂房建厂的人力配置问题，将精益管理中的“应用生产指示看板”引入研究，用以量化工人的生产进度，然后建立模型计算出最佳的人力增加数量；实证结果证明，运用该模型可以保证按时完工甚至提前完工，并使总成本降低 10% 左右。

以上是粗略的、有涉及到构件生产过程中人力问题的研究成果，更多的学者是从技术升级和组织优化管理的角度对生产管理过程中人力、材料、机械设备等资源进行优化。

#### ① 关于模具的研究

Benjaoran 和 Dawood（2003）研究如何改善模具的设计、更换和浪费问题。A. Khalili 等（2014）研究如何增加模具的灵活性以降低成本，证明新模具可以使成本降低 9%。冯建文（2013）研究如何对划线机进行自动编程，提高模具划线机的准确性。

#### ② 关于车间调度的研究

W.T.Chan 和 Hao Hu（2002）将流水车间调度技术运用于预制构件生产调度，实现资源的最佳利用。Benjaoran 和 Dawood（2006）发表文章对预制生产计划系统进行优化，发现运用遗传算法的流水作业调度模型比传统的 EDD(earliest due date)节约 25% 的时间。

#### ③ 关于预制构件储运和吊装的研究

胡珉和陆俊宇（2013）利用 RFID 技术对预制生产过程中的材料、品质检验和储运管理全过程等信息收集整理，并对信息进行评估分析。李萍萍（2016）从配送车辆调度角度研究预制构件配送的物流成本问题，在考虑配送车辆运输成本、等待卸车时间成本等约束条件下，比较全面的建立了物流成本最低下的运输模型。温日新（2008）研究如何可视化预制构件吊装顺序，以节省工人书面编写时间。



综上所述，国内外学者对预制构件生产管理的研究颇多，但涉及人力配置或者直接讨论人力资源分配的研究较少。而装配式建筑的核心就是“像造汽车一样造房子”，其预制构件生产流程具有单元重复施作的特性，这也使其具备了制造业生产的特点。因此，本章希望梳理出学者在制造业人力资源分配中的研究，以期对预制构件生产领域能有借鉴意义。

### 1.2.2 运用学习曲线进行人力资源配置研究

中外学者对制造业的人力资源配置提出了一系列的理论和方法，Curis(1987)利用平滑指数和线性回归预测技术估计人力资源总需求，王景光(2001)利用 Perin 网数学工具构建人力资源内部量化分配模型，袁利金(2001)提出模糊综合测评方法，林家豪(2003)用回归分析和因素分析法构建现场管理人员的配置模式，李贞仪(2005)用混合整数规划模型研究人员配置问题，鄢萍等(2004)用 MES 软件进行车间人员需求数量的安排，Corominas 等(2008)提出利用信息理论构建网状模型，Thomas 等(2007)提出用层次分析法研究人员配置问题。

前述文献在人力配置优化时考虑了诸多因素，却较少考虑“学习效应”对工人分配的改善作用。因此，有学者通过引入学习曲线从全新的角度研究学习效应对人力配置的优化作用，下面将重点梳理运用学习曲线解决人力问题的相关文献。

#### ① 运用学习曲线分析工人素质与生产力变化

王佳镇(1999)研究将学习曲线运用于电子通讯产业，发现学习曲线并可作为管理人力、成本的工具。陈世坤(2005)将学习曲线运用于企业员工的职能评估，对企业组织整体及员工个人的职能进行评价，了解员工的需求和弱点，并进行针对性的培训和提升，用以改善企业的人力品质，提升企业的竞争力。刘晓勇(2007)以电子类上市公司为研究对象，对比分析引入学习曲线前后工人操作不良率与平均工时的差异，说明工人通过学习可以大幅改善产品质量，并通过实例证明减少工种、降低工作岗位调换频率更有利于技术上的提升。

#### ② 运用学习曲线进行工人熟练度评价

部分学者利用学习曲线评价工人操作熟练度并将其分类，以优化人力资源配置。Corominas 等(2008)研究摩托车行业的装配人员，根据学习曲线规律得出工人工作效率的稳定状态，将工人分为熟练工和非熟练工两种类型，以减少装配人员数量、控制生产节拍时间为目标，构建了人员优化配置模型。李柏林(2015)也做了类似研究，根据工人熟练程度将生产线上的工人分为不同类型的多能工，以装配生产线资源平衡因素为限制条件，以降低生产节拍为优化目标，构建了人力优化模型。

#### ③ 将学习曲线引入人力分配模型

Fogliatto 等(2007)研究指出，工人的学习能力是影响生产力的关键因素，作

者用学习曲线反映工人的学习能力的差异，并将其引入人员优化模型，求得最优解。陈淑强（2012）通过学习曲线测定工人操作的学习率，并分析员工个体差异、作业复杂程度和组织激励对学习效率造成的影响，作为制订作业标准工时的依据，优化生产过程中人员分配。江姮臻（2014）将学期曲线应用于模内装饰（In-Mold Decoration），对其生产线进行人力配置与调度，以降低人力资源成本和提升生产效益为目标，提出一个结合学习曲线与仿真优化的模型，求得最佳人力配置。朱莉（2015）将学习曲线和项目人力资源分配相结合，利用 0-1 模型描述员工能力和岗位匹配之间的关系，用学习曲线评估员工在多个项目积累后的工作表现和能力变化，找出组织价值最大化的人力资源分配模式，并有实例验证了模型的有效性。

### 1.2.3 研究评述

从以上文献分析可以看出，学习曲线在人力资源分配上的研究是非常丰富的，涉及电子生产、摩托装配、建筑项目管理等多个领域。国内外学者也已经意识到基于学习曲线对人力资源分配是有价值的，个人的学习能力对团队整体人力配置优化具有重要意义。

虽然学习曲线的应用范围广且研究成果丰富，但特地将其运用于预制构件生产领域的研究却较少。学习曲线反映的是作业者随着劳动次数的增加，从中学习积累不断改进操作方法，从而降低单位工时和提高生产效率的过程（侯步蟾，2011），而预制构件生产具有重复性作业流程的特点，工人会因施作天数的增加而使操作时间不断减少，这些特征符合学习曲线的基本理论，因此，学习曲线也是适用于预制构件生产领域的。虽然目前预制构件厂人力分配方式较为粗犷，未考虑学习效应对人员分配的改善作用，但前人研究已经证明，在制造业中引入学习曲线可以有效地改善人员配置，而预制构件生产又与制造业有诸多相似，所以将学习曲线引入预制构件生产领域也应能有相同效果。

综上，目前缺少对预制构件生产中人力资源配置的研究；而学习曲线又是解决动态人力配置优化的重要工具；同时学习曲线又适用于预制构件生产过程。故本文尝试将学习曲线、预制构件生产和人力资源配置三者相结合，以期填补目前研究的空白。

## 1.3 研究内容、方法和技术路线

### 1.3.1 研究内容

本论文共分为六个章节，分别简述如下：

第一章，绪论。首先介绍了本文的研究背景，说明目前预制构件生产存在工人稀缺性、人力分配方式的不合理以及预制构件生产成本偏高的现象，引出改善现行人力分配模式的必要性和意义；接着对预制构件人力资源分配的相关文献进

行梳理，发现学习曲线是解决人力资源分配的有效方法，进而提出本文的研究方法、研究内容以及技术路线。

第二章，相关概念及理论基础。首先对装配式建筑的相关概念进行界定，并指出本文的研究范围。接着介绍了人力资源分配的基础理论，包括概念和与本研究相关的几大理论，并分析这些理论在本文中的运用；接着介绍学习曲线的相关概念、特性、主要模型和发展脉络，指出学习曲线被广泛应用在各个行业和领域。

第三章，基于学习曲线的预制构件生产人力配置方法研究。首先介绍了预制构件生产特征、人力特征和人力配置特征，比较他们与传统建筑行业要求的不同。接着阐述了预制构件厂人力配置的现行方式，并分析了存在的问题。然后指出学习曲线可以解决上述问题，并解释了为什么学习曲线适用于本文的研究，并基于此梳理了基于学习曲线进行人力配置的流程。

第四章，优化方案构建。首先梳理方案构建的基础资料，明确研究对象，确定预制构件生产流程上各项工序的人员配置。然后确定优化的目标及原则，在满足时间控制的前提下进行人力成本的优化。接着，构建人力配置优化方案，介绍求解方法和步骤，并用 C#编写程序求解最佳方案。

第五章，实证研究。通过实地采集台湾某预制构件厂数据，运用 SPSS 软件对学习曲线数据进行拟合和显著性检验，并利用 Visual Studio 平台运行程序，筛选出最佳方案，并对输出结果进行分析。

第六章，结论与展望。总结本文的研究结论及不足，提出未来研究建议方向。

### 1.3.2 研究方法

本研究将用到的研究方法如下：

① 文献研究法。对预制构件生产管理以及人力资源分配的相关研究成果进行梳理，明确现有研究的空白点，确定本研究的意义及方法，为论文撰写提供有力支撑。

② 实地调研法。通过实地到预制构件厂调研，得到许多宝贵的一手资料。了解预制构件生产的具体流程和施工工艺，通过观察工人实操情况，跟踪记录工人的学习时间，收集了大量的实际数据，为后续案例分析打下基础。

③ 实证研究法。通过对台湾某预制构件厂实际生产过程中工人的学习状况进行观察，并进行数据记录、整理和分析，用学习曲线理论测定施作天数与操作时间之间的关系，并带入构建的人力配置优化方案，验证方案的正确性和实用性。

④ 专家访谈法。1) 选取高校从事建筑产业化研究的学者以及从事预制构件生产的有经验的（工作年限>5 年）企业人员，了解生产过程中人力配置的实际情况；2) 与专家讨论方案的假设条件是否合理、方案构建是否完善，并请专家对实证研究的结果进行验证。

### 1.3.3 技术路线

本文技术路线图如下图所示：

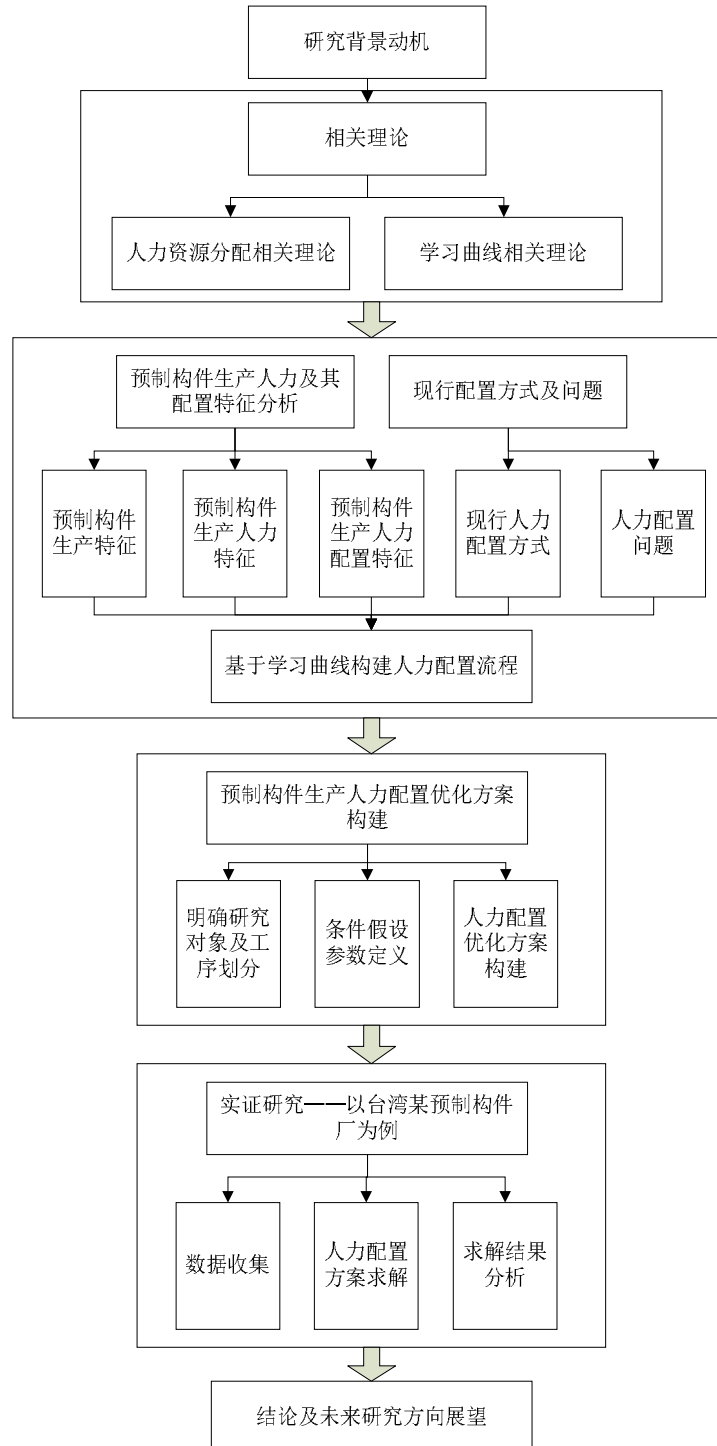


图 1.1 技术路线图

Fig1.1 The technology roadmap of this paper

## 2 相关概念及理论基础

### 2.1 装配式建筑相关概念界定

装配式建筑是推进建筑产业现代化的一个特征表现，是建筑工业化生产方式的一种生产手段、技术方法和路径，它是指将部分或全部的建筑部品构件在工厂预先生产，包括梁、柱、楼板、内外墙板、门窗、楼梯、连接节点、水暖电设备等，然后送到施工现场，通过机械或其他手段可靠连接的建造方式（李天华，2011），它被广泛运用于住宅、科技厂房等多种建筑类型。装配式建筑根据建筑材料的不同，可以分为木结构体系、轻钢结构体系和混凝土体系。目前我国装配式建筑的结构体系以混凝土结构和轻钢结构体系为主，相比于木结构，这两种结构在满足构件工厂化生产、现场机械组装的同时，更符合中高层建筑的需求（徐雨濛，2015）。

本文研究的是装配式建筑中的混凝土体系（即预制装配式混凝土结构）的生产过程，是指以预制混凝土构件为主要构件，经预制生产、物流运输、装配连接或部分现浇而形成的混凝土结构，建造的对象包含住宅、公共建筑、工业建筑等。

### 2.2 人力资源配置相关理论概述

#### 2.2.1 人力资源配置的相关概念及含义

在经济学理论中，配置主要是指社会或经济活动主体在现行市场机制约束下，对其全部的要素或资源在经济生产活动中进行规划、统筹、安排和调配的过程，目的是为了实现在资源的最大化利用（黄莉，2013）。人力资源作为经济生产活动中必不可少的投入要素，势必存在如何配置的问题，如何将人力资源效用最大化，实现“物尽其用”，则是人力资源配置的初衷（肖鸣政，2001）。

按照统筹角度的不同，人力资源配置可分为宏观层面和微观层面。宏观配置常由政府机构和部门对其行政区域内的人力进行整体调配和安排，以实现国家和地区人力发展战略的需求。微观配置一般由市场规律决定，是市场经济主体买卖双方自由选择的结果，更能激发作业者的主动性和积极性；同时，由于这种配置方式省略了繁琐复杂的行政审批过程，也比宏观配置更高效、更迅速，降低了人员配置的相关成本（陈雷，2015）。本文研究的是预制构件厂人力配置，属于微观角度，即企业采取筛选、招募、培训、定岗、评价和考核等方法，将企业所需的各类人才合理、恰当的安排对应的岗位上，形成完整的组织结构，实现人尽其才。让各个岗位上的员工形成一个互相激励、互相制约的整体，使组织内部自发发生经济运动，以提高企业的运行效率，为公司创造出更大的价值。

## 2.2.2 人力资源配置相关理论

### ① 劳动分工理论

Adam Smith（亚当·斯密）在《国民财富的性质和原因的研究》提出了经济增长模型，具体见图 2.1。其中提出了劳动分工理论，并详细分析了劳动分工为社会和企业带来的经济增长效益（亚当·斯密，1972）。他指出，促进一个国家或地区经济增长的因素主要有 3 个：一是生产性劳动和非生产性劳动之间的比例关系，二是劳动分工对生产效率提升的影响，三是相关固定资本和流动资本的投入。其主要观点概括如下：

第一，劳动分工水平的提高是生产率提升的根本推动力。作者指出，如果工人长期从事同一种类型的工作，因为其工作转换时间的减少和不断重复操作导致经验的积累，工人的熟练程度会越来越高；同时，机械化生产使得工人的操作日益简单，也使得劳动者的整体生产效率提升。这些变化的根本原因是劳动分工产生了专业化人才，更大效率地发挥了人的效用，使得劳动生产效率不断提高。本文研究的是预制构件生产的人员配置问题，生产过程中不同工序对应着不同的工作内容和特点，为满足专业度和熟练度要求，也会出现劳动分工和专业划分，以提升生产效率。

第二，劳动分工受市场和生产规模的影响。作者指出，劳动分工具有地域特性，与所处地域和当地经济状况有关。经济较为发达的地区，其劳动分化的程度及合理性往往高于偏远地区，这是因为只有当市场容量和市场需求达到一定程度之后，真正的劳动分工才会有其出现的意义和价值。劳动分工可以促进市场的扩大和经济的发展，但劳动分工的程度也受市场范围的影响，所以需要根据市场容量合理控制分工的程度。这一理论后被称为“斯密定理”。同理，只有当预制构件厂达到规模生产时，企业为达到目标产量、提升生产效率必须进行专业化管理，这时劳动分工会更加细化，专业工种才会发挥其最大价值，不同工种之间的人力配置才更具有研究价值。故本文方案构建的假设之一，即为构件厂已经达到规模生产。

第三，作者对生产性劳动和非生产性劳动的解释为，生产性劳动的特征是创造物质，或将物质进行加工使其具备更高价值，反映的是物质产品的生产，强调生产者阶层的劳动价值和意义；非生产性劳动的特征是创造非物质性产品，比如服务、专利等无形资产，强调知识对生产的作用。预制构件厂的生产工作不仅仅是简单的体力劳动，更包含对信息和知识的接受、理解、传递过程，故同时包含生产性劳动与非生产性劳动。

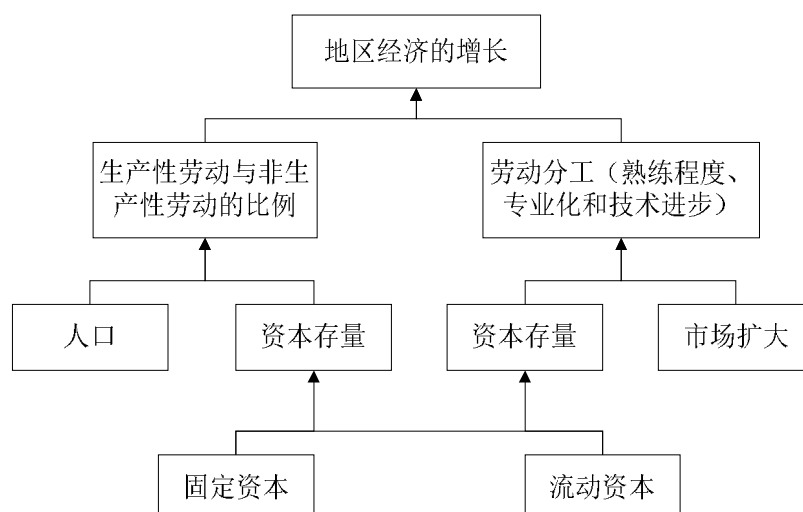


图 2.1 亚当·斯密经济增长模型

Fig2.1 Adam Smith's economic growth model

## ② 人岗匹配理论

人力资源管理中很重要的两大要素是人和岗位。人力资源管理最基本的问题就是人岗合理匹配的问题（单联宏，2007）。人岗匹配理论的基本思想就是让人自身具备的特点与岗位所需的特点相一致，从而达到人员在岗位上创造最大效益的目的。如果人岗匹配程度高，则说明个人特点与岗位需求的匹配程度高，则工作起来会游刃有余，提升工作效率；反之，则会降低工作效率。因此，无论对于个人效益还是组织效益来说，人岗匹配都是相当重要的。人岗匹配一般有三种模式（江会，2013）：

一是按人配岗。即根据员工的知识、能力和素质将其安排在匹配的岗位上。

二是因岗选人。即根据岗位的知识 and 技能需求，选择匹配的人员。

三是扬长避短。在现实中，极少存在某个员工完全符合某个岗位的情况，因此在进行岗位安排时，充分考虑员工的优缺点，将人员安排在最能发挥个人优势的岗位上，也是人岗匹配的一种方式。

人岗匹配的核心是追求最合适，而不是最优，因为最优的不一定是最合适的。只要能让员工在岗位上发挥其最大价值，发挥其最大的潜能，就能为企业创造最大的财富（周承群，2010；牛天安，2008；袁有明，2008）。人岗匹配理论在实际中得到大量的运用和推广，不仅从理论上丰富了管理学科，更为实际工作提供了方法论。预制构件生产工序繁多，每项工序对工人有不同的素质和能力需求，因此，企业需要综合考虑工人的特点和工作的内容，安排最合适的员工到最匹配的工位，发挥工人的最大效益。

## ③ 人力资源的自我积累机制

人在与自然和社会的不断作用中，可以通过自我学习，不断丰富经验，提升知识水平，这称为人力资源的自我积累（陈雷，2015）。由于人与人之间学习能力和生长环境的差异，导致这种自我积累出现差异。在传统农业时期，劳动者主要从事简单、重复的农业生产，技术含量较低，反而是对其体能要求较高。随着经济不断发展，社会劳动分工日趋成熟，劳动者的经验积累（工作熟练度）成为工业时代的重要衡量标准。而在知识经济时代，提高了对劳动者知识和技术能力的要求，而这也加大了劳动者之间的差异，形成了人力资源的异质化。

预制构件生产过程与制造业相似，更多的是用操作的熟练度来衡量工人能力的差异，但也结合了对员工知识能力水平的考察。工人之间的能力差异，如不及时调整，则可能会造成人力资源配置低效，进而造成人力资源的浪费。因此，预制构件厂要想进行合理的人力配置，必须要协调好预制构件工人资源数量和工人资源质量（经验、教育、技能）之前的关系，才能发挥人的最大价值。

## 2.3 学习曲线相关理论概述

### 2.3.1 学习曲线的涵义及特性

#### ① 学习曲线的涵义

在定义学习曲线之前，需要先了解“学习效应”。所谓学习效应是指作业者对同一件事情反复练习，知识水平不断提高，工作经验不断增加，操作越来越熟练，使得完成相同单位产品所需的设备投资、人工、机械时间、原材料等逐渐减少，从而出现时间或成本会随着循环次数的增加而逐渐减少的现象。

学习曲线就是对“学习效应”的数学化描述，也被成为经验曲线。典型的学习曲线如下图 2.2（Thomas，2009）所示，展示了工作时间与工作效率（熟练度）之间的关系。其中，横坐标  $x$  代表累计工作的次数（或时间），纵坐标  $y$  代表完成单位产品需要的时间，从图中可以看出，重复性作业的工作效率随着工作时间的增加而增加。

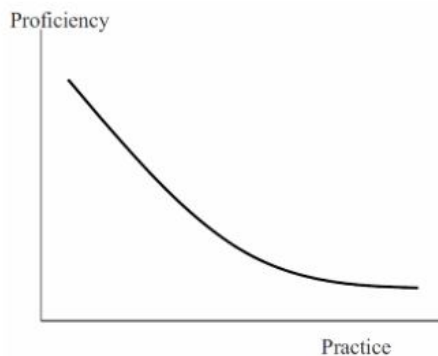


图 2.2 典型的学习曲线

Fig2.2 Typical learning curve



学习曲线成立的前提有以下几个 (Thomas, 1992):

- 1) 随着工作的不断重复, 所消耗的时间不断减少;
- 2) 减少的时间遵循一定的规律, 即时间降低率;
- 3) 行业内的改进率是完全一致的, 因此可以将学习曲线作为管理工具。

## ② 学习曲线的特性

学习曲线的形成和变化会受工作的难易程度、学习者自身差异、组织架构、技术结构甚至工作环境的影响, 因此学习曲线除了可以反映学习期间行为变化的累积效果, 还可以显示个人或组织的成就水平。虽然学习曲线会有波动起伏, 但仍有主要脉络可寻, 归纳起来学习曲线呈现出以下几种现象 (苗延仁等, 1986):

### 1) 负加速变化

此种学习曲线的大致趋势是在学习初期进步快, 之后进步速度变慢。如图 2.3 所示。产生此类学习曲线的原因可能有: 学习者在学习初期兴趣浓厚、自我驱动力强, 学习速度快; 或者学习者之前已具备相似经验, 能更快地理解知识和掌握技能, 因而学习进步快, 这又被称为学习迁移效果; 再或者是因为随着学习过程不断深入, 学习内容易变难, 出现进步速度减缓的现象。

### 2) 正加速变化

此种学习曲线的大致趋势是在学习初期进步慢, 之后进步速度逐渐减增快。如图 2.4 所示。产生此类学习曲线的原因可能有: 学习者在初期缺乏激励和动力, 学习兴致和主动性不高; 或是在学习初期学习者毫无相似经验和基础, 需要时间去适应, 一般在接触新领域时较易出现此类现象; 或是初学阶段作业复杂且难度高, 难以快速掌握; 或是学习者受到以往不良作业习惯的影响, 需要时间改变旧有的作业方式。

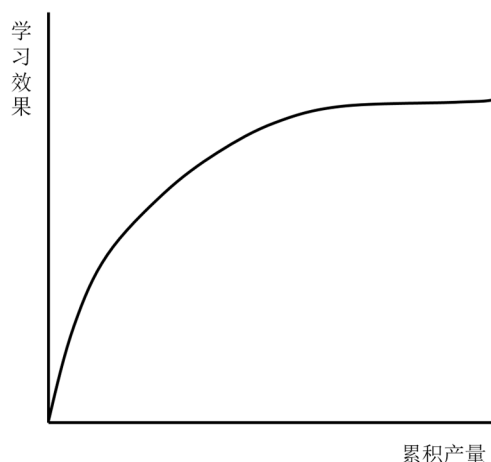


图 2.3 负加速变化学习曲线

Fig2.3 Negative acceleration learning curve

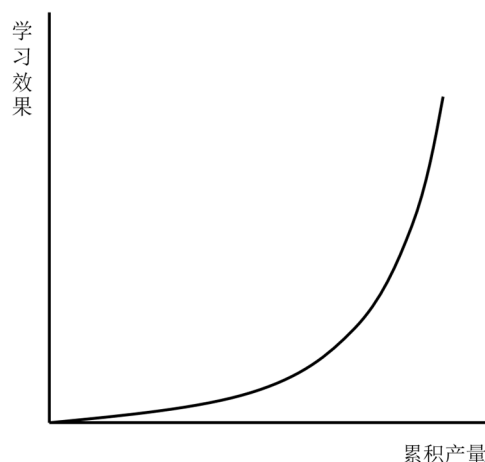


图 2.4 正加速变化学习曲线

Fig2.4 Positive accelerated learning curve

### 3) 正负加速变化

即综合前两种变化趋势形成的新的曲线。在作业开始初期进步慢，之后增快，呈正加速变化；而后随着学习时间和深度的增加，速度又趋于变缓，呈负加速变化，又称为 S 型曲线。如图 2.5 所示。

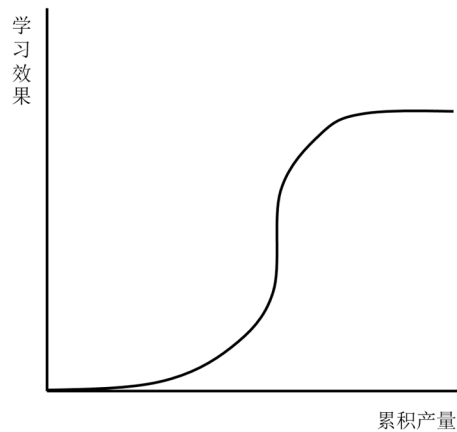


图 2.5 正负加速变化学习曲线

Fig2.5 Positive and negative acceleration change learning curve

### 4) 平台现象

当学习不断进行，知识积累到达一定程度后，某一特定资源对学习效果的影响变得十分微弱，进步已经变得非常缓慢，学习曲线趋于稳定，此现象称为平台现象。若无其他影响学习的资源进入（如新的设备、改善制造或管理方法、生产技术的突破等），此时即为该学习曲线的极限值。如图 2.6 所示：

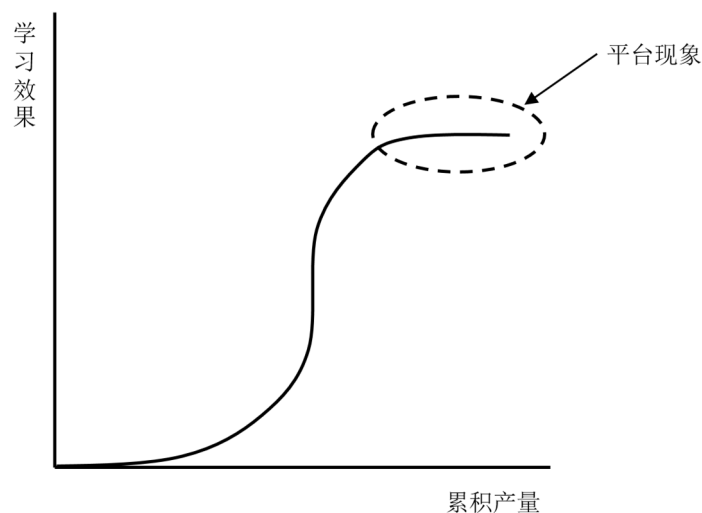


图 2.6 学习曲线平台现象

Fig2.6 Platform phenomenon of learning curve

若管理人员想突破这一瓶颈进入另一学习阶段时，就必须关注造成平台现象的深层次原因并加以改善，如改进组织管理的方法、改进生产技术、引进先进设备等。只有引进新的正确的影响因子，才可能进入新的学习阶段，进一步提升学习效果或生产效率。

### 2.3.2 学习曲线的常用模型

将某类学习曲线进行归纳分析，用统一的数学化方式表达出来，这个数学表达式即为学习曲线模型，也可称为学习曲线方程。通过数十年的发展，对学习曲线的研究不断深入，发展出多种学习曲线模型，它们适用于不同的学习因素、研究对象和环境。总结起来，这些模型可以分为单因素模型和多因素模型两大类。本文将列举常用的几种模型。

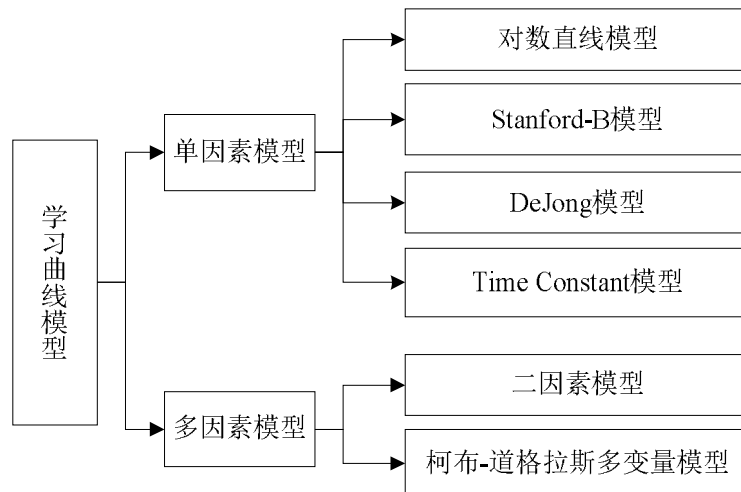


图 2.7 学习曲线模型

Fig2.7 Learning curve models

#### ① 单因素模型

##### 1) 对数直线模型 (Log-Linear Model)

Wright (1936)是第一个发表学习曲线论文的人，他也是第一个研究累计生产量 and 时间成本降低之间关系的人。其描述的现象是，随着累计产量不断增加，单位产品的劳动时间会下降某一百分比。其数学模型为：

$$F(x)=aX^{-b}$$

$F(x)$ : 累计生产至第  $X$  件产品所需要的平均时间

$a$ : 生产第一件单位产品所需时间

$X$ : 累计产量

$B$ : 学习曲线常数

对数直线模式提出时间早且简单易懂，被认为是最为经典、应用范围最广的学习曲线模型。此模型在石油化工、飞机通讯、航空工业飞机结构组装等行业和领域均有应用。在此基础上，许多学者将影响学习曲线的其他因素纳入考虑，发展出了新的数学模型。

## 2) Stanford-B 模型 (Stanford-B model)

1949 年 Stanford Research Institute 提出 Stanford-B 模型：

$$F(x)=a(X+B)^n$$

$F(x)$ ：累计生产至第  $X$  件产品所需要的平均时间

$a$ ：常数，生产第一件产品所需要的时间

$X$ ：累计产量

$n$ ：学习曲线常数

$B$ ：修正系数，指在生产活动未开始前便已经获得的单位经验（介于 1~10 之间）

这个模型的基本假设是学习者进入某一行业之前已有类似经验，因此在生产第一件产品时就可以提升效率，常数  $B$  即代表学习者自身具备的经验的程度，系数  $B$  通常介于 1-10 之间。当  $B=0$  时，Stanford-B 模型就转换为对数直线模型。不仅如此，学者 Hoffman(1967)研究发现，常数  $B$  的出现可以使函数差值平方和越来越小，使模型得到的数值更精确。Stanford-B 模型通常应用在企业在达到一定生产水平后，通过引进设备或技术更新，发挥修正系数  $B$  得到新的学习曲线。

## 3) DeJong 模型 (DeJong model)

DeJong(1957)在 Stanford-B 模型上进一步发展，将生产过程中的机械化程度引入模型，通过研究发现：当生产活动以劳力为主时，生产单位产品的时间随着产量的增加而减少；当生产活动以机械为主时，产量的增加对生产单位时间影响不大。

$$F(x)=a[M+(1-M)X^{-n}]$$

$F(x)$ ：累计生产至第  $X$  件产品所需要的平均时间

$a$ ：生产第一单位产品所需时间

$X$ ：累计产量

$n$ ：学习曲线常数

$M$ ：不能被压缩的因素（介于 0~1 之间），指机械化程度

此模型可以用来衡量产业的自动化程度，从理论上讲， $M$  值越高表示斜率越小，说明自动化程度越高时，学习进步倾向越低； $M$  值越小，斜率越大，说明自动化程度越低，进步程度越大。特殊的，当  $M$  值为 1 时，表示没有进步倾向，产业的自动化程度接近 100%；当  $M$  值为 0 时，则和对数模型一致。因此该模型可以应

用于企业确定机械化程度、人工操作程度等。

#### 4) Time Constant 模型 (Time Constant model)

一般的学习曲线是横轴表示累计生产量，纵轴表示单位产品操作时间，描述随着生产量的增加而平均生产时间不断减少的现象。如果将横纵坐标对换，以累计的工作时间作为横坐标，以产量或产出率（件数/时间）或生产单位产品的时间为纵坐标，则可以预测随着时间的延续生产量的改变，得到新的模型：

$$Y(t) = Y_c + Y_f(1 - e^{-t/l})$$

此模型的效用在于可以根据累计工作时间的长短来预测每日或每月的生产量，适用于重复性工作较高的工作，如汽车零配件生产。

#### ② 多因素模型

多因素模型在实际中应用相对较少，主要是由于因素的分析 and 求解方式过于复杂。然而随着软件工具的不断强大，多因素模型也有越来越多的应用。

##### 1) 二因素模型

Conway 和 Schultz(1959)是最早提出多因素模型的人，他们用成本的相对生产效率 and 累计生产量作为模型的研究变量。

$$F(x) = \beta_0 X_1^{b_1} X_2^{b_2}$$

$F(x)$ : 为累计产量平均成本或时间

$\beta_0$ : 为生产第一件产品的成本或者时间

$x_i$ : 为第  $i$  个变量累计产量

$b_i$ : 为第  $i$  个因素的学习率

##### 2) 柯布-道格拉斯多变量模型(Cobb-Douglas Multiplicative Power Model)

通常情况下，因为考虑了更多的可能性，采用多因素的学习曲线模型要优于单因素曲线模型。但是，当因素之间的相关性太高、相互作用明显时，多因素反而会影响模型的准确性。因此 Cobb-Douglas 提出一个新的模型，对多因素赋予新的定义：

$$C = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_n^{b_n} \varepsilon$$

$C$ : 估计成本

$b_0$ : 模型的系数

$x_i$ : 独立变量

$b_i$ : 变量的指数

$\varepsilon$ : 误差项，且  $\varepsilon = e^u$ ,  $u \sim N(0, \sigma^2)$

此模型成立的前提是所有的变量都是独立变量，才可以消除变量之间的相互影响。但实际中不可能所有变量都是独立的，且难以从众多资料中分解出完全独立的信息。因此，Goldberger (1967) 提出一个新模型，通过对数转换消除资料的

相关性，并且发现，通过该模型修正的学习曲线的走向会从平均数趋近于中位数。但是该模型无法完全消除变量间的相互作用关系，难以达到最佳的回归效果。在此基础上，Waller 和 Dwyer (1971) 建立了一个新的模型：

$C=c_1x_1^{b_1}+c_2x_2^{b_2}+c_3x_3^{b_3}+.....+c_nx_n^{b_n}$ 。这个模型结合了对数转换和多元回归两种方法，弥补了 Cobb-Douglas 和 Goldberger 模型的缺陷，并且成功用于预测导弹整修和测试设备的成本。

本文将根据研究内容和对象的特点，从以上模型中选取最合适本研究的学习曲线模型。具体分析详见 5.4。

### 2.3.3 学习曲线发展脉络

学习曲线最早可以追溯到 19 世纪中叶，钟表师 Chauncey Jerome 发现随着制造钟表的工艺日益熟练，钟表的制造成本也日益降低，这是首次发现并记录学习现象。到 19 世纪末，Thorndike (1797) 发现完成某项工作所需的时间随着经验的增加而不断减少，所犯的错误也随之减少。在 1936 年，Wright (1936) 发现在飞机制造业中，建造一架飞机所需的时间随着累计产量的增加而减少，且产量每增加一倍所需的劳动就减少 20%，即 70% 学习曲线。此后，学习曲线在飞机生产、船只建造方面得到大量应用。1965 年联合国对建筑行业不同作业阶段、不同结构类型的学习率进行统计分析，发布报告显示，针对可单独作业的工作如木工、电工、米板、钢筋等，其学习率可达到 70%~90%；普通复杂的整体结构，如办公大楼、住宅建筑等，其学习率可达到 90%；而针对工厂化生产的部品元件，如预制混凝土板、窗等，学习率可达到 90%~95% (Gates and Scarpa, 1972, 1976, 1977)。这一研究说明，预制构件生产领域同样存在学习效应。1964 年 Hirschmann (1964) 发现劳动力投入较少的石油提炼行业也存在学习曲线，这时学者们才注意到学习曲线不仅存在于劳动密集型行业，同样存在于技术和资本密集型行业。Hirschmann 并由此提出，任何行业都会有学习现象，只是有些需要较长的观察时间，其学习效应才会显著表现出来。此后，学习曲线的研究不仅局限于劳动力、劳动时间和产量之间的关系，还开始研究学习曲线与组织结构、技术结构的关系，也从对少数行业的研究拓展到社会生产中的各个行业和领域。

直到 19 世纪 70 年代，研究发现：即使在同一行业，企业之间的学习速度以及学习曲线也有所不同，有的企业甚至不存在学习曲线。同时，Nicks (1972) 发现即使同一位工人在同一个公司的不同岗位，或者在不同公司的同一岗位上工作，其学习曲线也会有所不同。这些现象的出现，说明学习曲线的差异不仅与行业有关，也与企业内部的组织环境有关，还与个人的知识、学习能力有关。此后学者们便开始研究影响学习曲线和学习效率的因素，并提出投入影响论 (Lieberman, 1974; Hayes et al., 1996; Sinclair et al., 2000)、专业影响论 (Barnett et al., 1994;

Ingram and Joel, 1997)、培训影响论 (Adler, et al., 1991) 和团队协调论 (Cooper and Johri, 2002) 等诸多流派。

此后, 学习曲线研究不断发展, 一是拓展其研究广度, 在建筑业、电子通讯产业、食品服务业等领域的相关研究均证明学习曲线可以有效改善企业生产效率, 另一方面学习曲线还可用于解决人力配置、研究产品合格率、组织调配等实际问题, 丰富了学习曲线研究的实际成果。

## 2.4 学习曲线的形成过程

由上可知, 学习曲线体现了熟能生巧的过程。学习者通过不断重复地做某一件产品时, 由于动作逐渐熟练, 或者摸索到一些更有效的作业方法; 或者通过理论学习和系统的培训, 从中掌握一些工作的技巧和思路, 使得工作效率不断提高; 或者是企业在产品设计、技术进步、管理水平以及其他资本投资的提高, 经验不断积累, 不断改进管理方法, 提高人员生产效率。因此, 学习曲线的形成受诸多因素的影响, 主要有:

- ① 操作者动作的熟练程度, 这是形成学习曲线的最基本因素;
- ② 管理技术的改善, 正确的培训、指导, 充分的生产准备与周到的服务, 工资奖励以及惩罚政策的运用;
- ③ 产品设计的改善;
- ④ 生产设备与工具的质量;
- ⑤ 各种材料的连续供应;
- ⑥ 信息反馈的及时性;
- ⑦ 专业化分工程度。

这些因素相互影响, 相互作用, 且在学习曲线形成过程中, 企业会不断调整这些因素, 改变学习效率, 形成最终的学习曲线。

本文研究的是预制构件生产过程中的学习曲线, 经过调研访谈得知, 由于预制构件生产处在初级阶段, 且生产方式较传统建筑业有诸多不同, 目前虽然企业会对工人进场时进行简单介绍与指导, 但预制构件厂对工人的培养缺少完善的理论体系与培训计划, 工人主要是依靠以下三种方式进行学习: 自身实操积累经验; 现场“老带新”, 熟练工对非熟练工进行技术指导和技巧传授; 机械设备供应商对工人进行前期培训, 指导如何运用机械设备进行生产。一般来讲, 企业在一段时间内, 其管理水平、材料供应等方面的能力是趋于稳定的, 因此不考虑这些因素对学习曲线形成的影响, 所以, 本文研究的学习曲线的形成过程主要依赖于工人在实操过程中经验的积累和“老带新”的作用。

## 2.5 本章小结

本章通过梳理人力资源分配理论和学习曲线理论，明确了本研究的理论基础。首先介绍了人力资源分配的概念，重点介绍了与本文相关的劳动分工理论、人岗匹配理论和人力资源的自我积累机制，并分析了这几大理论与预制构件生产的关系和运用方式。另外，本章介绍了学习曲线基本概念、特性、常用模型和学习曲线的发展脉络，说明学习曲线的相关研究已经比较成熟；并指出学习曲线的适用范围广，且已有研究表明预制构件生产过程中也存在学习曲线，这一研究结果为后文分析学习曲线引入预制构件生产人力配置的适用性提供了有力的支撑。



### 3 基于学习曲线的预制构件生产人力配置方法研究

#### 3.1 预制构件生产人力配置现状及问题

在介绍预制构件现行人力配制方法之前，先定义本文提出的几个重要概念：

##### ① 熟练工与非熟练工

由第 2 章介绍可知，在学习资源不改变的情况下，学习曲线最终会出现平台现象，表示学习带来的效率提升到达某一水平后（极值）便趋于平稳，我们将达到这一稳定状态的工人称为熟练工；相应的，在未达到极值之前的工人称为非熟练工。

##### ② 熟练工养成时间

工人操作都会经历从不会到会的过程，熟练工都是由非熟练工转换而来。非熟练工需要通过不断学习才能积累经验，而学习需要时间的消耗，故我们将非熟练工转换为熟练工的这段学习时间称为熟练工养成时间。

##### 3.1.1 预制构件人力配置现状

传统建筑行业计算工期和人员配置时，一般根据定额计算出初步计划，管理者再考虑自身资源、现场环境、机械设备和工人的平均生产力，将定额辅以一个调整系数（该系数为历史项目的经验值），进而确定现场人力配置（俞伟武，2008）。通过调研访谈十余位从事预制构件生产的（工作年限>5 年）企业人员得知，由于现在装配式建筑定额正在编制中，在缺少全新的配置方式和定额参考之前，传统建筑行业的人力管理模式延续到了预制构件生产过程中，即根据历史经验数据和构件生产量，估算现阶段子订单的生产周期，安排相应的生产计划和生产节奏。

##### ① 拆分生产任务及构件生产类型

预制构件生产具有规模大、构件类型复杂等特性，在对其进行计划管理时，应当把所有订单任务划分为一个个独立的子项目来完成，降低生产安排的复杂性。首先，根据构件服务的建筑类型的不同，将订单划分为不同的子订单。如果将企业获得所有订单看做一个完整的系统，那么每一个子订单可视为不同的子系统，子系统之间相对独立，具有不同的生产特性，但也应该具有一定的相关性，这种关系来源于企业整体资源的分配和占用。接着，根据每个子系统对构件的需求，工厂确定构件的生产类型。如下图所示：

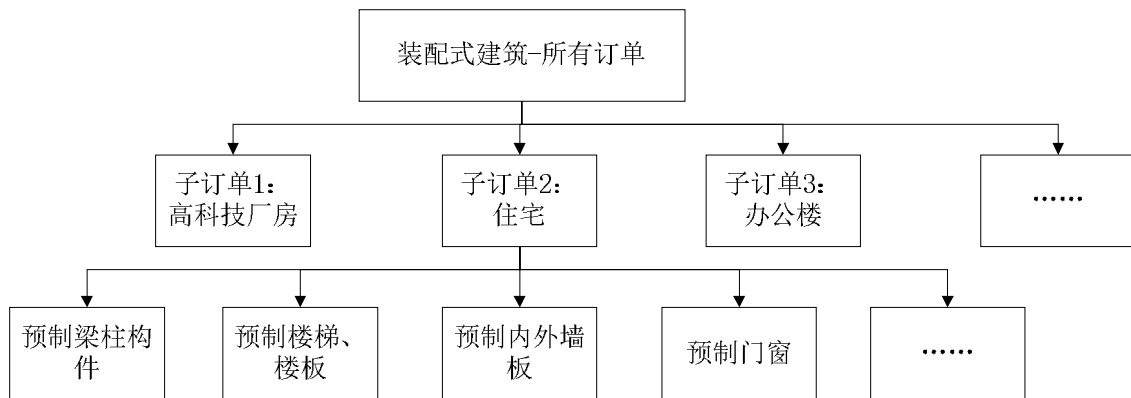


图 3.1 预制构件生产订单拆分图

Fig3.1 Production order split of prefabricated component

## ② 确定生产周期

根据历史经验和数据积累估算生产周期并进行划分。预制构件生产通常具有阶段性、连续性和相似性，当前阶段的任务也具备历史订单的某些特性。因此，可以参照以前类似项目的耗时来估算现阶段任务所需时间。

## ③ 确定每类构件的工作班组人数

根据构件生产的流程，确定每一工序所需的作业人员。由于构件工厂化生产的特殊性，有的工序可以独立操作（如清模），有的工序则需要互相配合才能完成（如吊放钢筋笼）；而又由于各项工序施工工艺、操作难度、机械设备、占用工作面大小的不同，配置的人员数量也有差异。因此，在实际生产过程中，企业根据实际观察和经验数据，为每项工序配置合适的作业人数。将所有工序整合起来，则得到该类构件完整生产流程的人员需求，并将其视为一个工作班组，作为具体生产时的标准配置，负责一套模具的生产。

## ④ 设置最少/最多工作班组数量

当施工现场工期紧迫，进度加快时，构件的生产时间也应做调整，这时需要多配置工作班组提升生产效率，以满足对现场的供应；同时，工作班组数量受模具数量、生产设备和厂房大小的影响，如果工厂的现有设备及资源最多只能满足 30 个模具同时开工，那么最多也只能安排 30 个工作班组同时作业。综上所述，工作班组的数量同时受工期和资源的限制，因此企业在接受订单和配置人员时，会考虑以上因素和突变情况，确保自身资源足以完成生产任务。

## ⑤ 确定工人薪资

工人有非熟练工与熟练工之分，视工人的熟练度、工作难度的不同，薪资水平也有差异。刚进厂时，非熟练工的工资较低，但当其生产效率有较大幅度提升时，企业会适当提薪以示激励，提高员工的主动性、积极性。而进厂时即为熟练

工的工人，由于其生产效率较高且基本稳定，所以工资较高且不会发生较大变化。因此，企业会制定不同的薪资标准，作为控制人力成本的基础。

### 3.1.2 预制构件人力配置问题

#### ① 忽略了工人之间熟练度的差异

根据以上分配方式，把每位工人、每个工作组的生产效率视为是相同的，即平均生产效率。但实际上由于工作组之间配置的非熟练工、熟练工比例的差异，导致各工作组完成单位构件的时间不同。生产效率高的工作组配置的熟练工必定较多，付出的人力成本也相对较高；生产效率较低的工作组配置的非熟练工较多，人力成本相对较低，但可能会影响产品的交付时间。所以，为了使各个班组的生产节奏和人力配置趋于合理，需要视不同工作组的生产效率差异，调整“生熟工人”的搭配比例，保证产量的按时完成。

#### ② 缺乏人员的动态分配

根据学习效应，非熟练工随着经验的积累，其操作时间是不断减少的，所以，配置有非熟练工的工作组其完成时间是呈下降趋势的。当工人生产效率增加到一定程度后，企业会提升薪资以示激励，在计划作业时间不缩短的前提下，那么生产单根构件的人力成本是增加的。但现行方式是，人力配置完毕后，人员就基本固化，即使生产效率发生变化，也是根据现场需求和经验对人员动态调整，缺乏科学性。所以，为了保证人力成本的经济性，根据工人生产力的变化动态调整人员配置方案，是非常必要的。

#### ③ 未合理利用机动时间

当工人的熟练度不断增加，操作时间不断减少时，与计划完成时间之间的差额会越来越大。如果计划作业时间不变，“生熟”搭配比例不变，那么每天剩余的机动时间越来越多，但这些时间却未得到充分利用。如果将这些机动时间利用起来，则可以通过合理增加非熟练工、减少熟练工，降低资源供给强度，降低人力成本。

综上，现行人力资源安排方式，既没有反映出学习对人力配置的改善作用，也没有充分利用工人的劳动价值。本文通过将学习曲线引入人力配置方案，研究生产过程中施作天数与操作时间的关系，在计划作业时间不变的前提下，通过优化非熟练工和熟练工配比，动态调整人力配置，降低劳动成本。同时，可以根据这个动态的人员调整方案，帮助企业对人力资源保持持续观察和及时补充，在面临订单量突增，或人员突然流失而出现人力短缺时，企业可以快速做出反应，尽快恢复正常生产水平。

## 3.2 预制构件生产人力及其配置特征分析

### 3.2.1 预制构件生产特征分析

要对人力进行合理配置，解决上述问题，就需要对预制构件生产特征以及对人力资源的需求特点进行深入分析，才能针对性的解决问题，实现人力的科学配置。

预制构件生产的特点是在工厂中进行批量式生产，采用机械自动化、半自动化完、人工作业三者结合的方式生产构件，明确工作划分，工艺成熟规范，使产品达到同一质量标准（梁冠成，2009）。可以说，预制化程度是目前衡量建筑工业化发展的重要指标之一。预制构件生产的特征有以下几点：

#### ① 工厂化生产

预制构件的工厂化生产，即将部分或全部的建筑部品构件在工厂预先生产，相比传统现浇作业，有以下几点优势：1）施作环境改善，工厂化生产受自然天气影响小，施工环境更加稳定，且可以有效解决施工现场建筑垃圾多、材料浪费严重、环境破坏大等问题。2）保证产品质量，传统施工方式中，对结构精度、施工平整度的控制大多依赖建筑工人的经验，如果后期验收不满足标准规范，要么重新修补，要么拆除重做，造成资源的浪费；而预制构件生产大大减少了误差，并且在生产各个环节和出厂前均进行质量检测，剔除不合格的构件，保证了现场施工的进度和质量。3）规模化生产，预制构件工厂化生产技术相对先进，机械化程度高，在规模生产的同时大大减少了施工人数，提高了劳动生产效率。

#### ② 标准化、模数化生产

预制构件的标准化生产，要求有科学合理的生产组织设计，以此来指导生产过程的经济化管理。具体包括：1）在生产实施前期，根据深化设计图纸、产品供应计划等，组织技术人员对项目的生产工艺、生产方案及堆放场地、运输方式、生产进度计划、物资采购计划、模具设计及进场计划和人员需求计划等内容进行策划，并编制相关保证措施，保证实施阶段生产的顺利进行。2）在生产过程中，对不同构件的材料的检测、生产的流程、施工工艺、作业规范、构件质量管理实行统一的标准和要求。3）生产标准化离不开设计标准化，设计标准化是将建筑构配件的类型、规格、尺寸、质量、材料进行统一的规定和设计，既能够实现生产过程的标准化，又能实现现场组装时各部品构件的有效连接。这与早期标准化设计中仅是某一参与方的标准图集或模数化设计不同，它更侧重于信息技术的应用，即通过信息共享，打破原来各个专业之间的壁垒和局限性，减少现场施工的碰撞，建立起可复制性高的标准化的单元，实现建造过程中的重复使用。

综上所述，标准化生产可以减少构件类型，提高构件的通用性，促进施工标准化；同时可以实现规模化生产、增大模具的周转次数、分工专业化、提升生产

效率等目的，从而降低成本、增加收益。

### ③ 流水作业生产

流水作业生产是指以施工的专业化为基础，将不同施工对象的相同工作内容安排给同一专业的人员执行，各专业队伍按统一安排依次完成指定操作的生产方式。预制构件的工厂化生产具备制造业装配线工作的特点，按照预制构件的生产流程划分一系列工序，每道工序完成之后流水进入下一步，直至最后一道工序作业完毕则构件生产完成。流水作业使劳动分工更加明确，而专业的分化又可以提升工作效率，使得企业整体效益提高。

### ④ 机械化生产

施工机械化是除了装配式建筑现场施工的特点，也是预制构件生产的核心。预制构件厂通过引进先进的机械设备，采用自动化或半自动的生产方式，逐步代替大部分的人工劳作（仍有部分工作需要人工作业）。施工机械化有效改善了施工条件，实现快速、优质、规模的生产，因此先进的机械化施工技术代替繁重复杂的人工作业是建筑业发展的必然趋势。

## 3.2.2 预制构件生产人力特征分析

### ① 行业岗位调整及升级

基于上文分析的预制构件生产的特征，其生产方式与传统建筑有诸多不同，因而对从业人员的素质和能力也提出了新的要求。这种新的生产方式和管理模式，需要工人更加懂技术、懂操作、懂方法、懂科学。比如，学会各种预制构件机械的使用、各类大小型机械的调度和操作；熟悉预制构件的尺寸精度要求，并掌握控制精度的方法和要点；通过熟悉机械操作和图纸要求，保证吊装的准确性；完成构件间的焊接、浇筑使其达到交付标准。

但目前从事预制构件生产工人大多由传统建筑行业转型而来，整体素质偏低，缺乏稳定的、高素质的一线操作工人，不能很好的满足预制构件生产的需求。这就需要工人转换长期以来形成的思维定势，学习新的技术操作技能，循序渐进地从传统的人力劳动向脑力劳动转变。

### ② 预制构件生产人员具体特征

预制构件生产是装配式建筑的重要一环，关系到建造的效率和建筑的质量。预制构件生产工人的特点有如下几点：

#### 1) 知识化

预制构件生产工人需要大量接收信息、传递信息和反馈信息，因此要求其具备一定的知识水平。首先，工人需要熟悉施工图纸，将构件设计进行拆分，确定构件尺寸、配筋、重量、安装节点、预埋件埋设位置等，并按照图纸要求精确的完成每一步骤，才能保证构件之间的顺利组装。另外，生产过程中大量引进机械

设备，如自动划线机、数控机床、吊车、养护窑等，使工作性质从以前的体力劳动为主转向以知识学习、信息处理的脑力劳动为主。

## 2) 技能化

为保证快速生产出满足工期、质量达标的产品，预制构件生产大多采用机械完成，但仍有许多技术性工作需要人工来完成，如模具组装、操作各种机械设备、定期维修与护理设备、材料选择、成品质量检验等工作，需要作业人员充分具备相关知识技能。再者，预制构件种类繁多，各类构件的尺寸、难度各有差异，因此一线工人还必须具备足够灵活的适应能力。

## 3) 复合化

传统建筑业是以个人分工、独立操作为主的生产方式，而预制构件生产领域专业间业务交叉，工作范围拓宽，一位工人可能需要完成所有类似工作，因此工人需要具备多方面的知识和技能，转单一型人才为复合型人才。

综上所述，预制构件的生产与传统现浇作业有不同之处，但也离不开建筑业这个大领域；同时，预制构件生产也具备制造业装配线生产的特点，故这是一种“传统建筑业+制造业”的新型生产方式。相应的，其人员分配也同时具备这两者的特点。下面将分析预制构件生产人力分配的特征。

### 3.2.3 预制构件生产人力配置特征分析

#### ① 工人分配数量减少

传统建筑行业的工种众多，就土建专业即可分为泥工、木工、水电工、焊工、架子工、钢筋工、幕墙工、混凝土工等等岗位，几乎建筑的每一个环节都有对应的人工劳动，分工十分精细化，人员需求量大。而装配式建筑的核心是像搭积木一样造房子，正式建造前构件大部分都已经在预制构件厂生产完成。而预制构件进行工厂化生产，稳定、室内的施作环境更有利于机械化程度的提高，机械化生产大大减少了对人员的需求量。

#### ② 人员的动态配置

人力资源配置结果受需求和供给两方面影响。而当生产任务发生变化时，预制构件厂需要综合考虑生产任务对人力的需求和现有的人力供给，对人力资源进行动态调整，保证顺利完成生产任务（刘从虎，2009）。1) 供给受人员流动性的影响。预制构件厂的工人不是稳定不变的，都会不断有非熟练工的进入和熟练工的退出，而为了解决人员供给不足的问题，一般有两种方法：一是将新员工快速培养成熟练工，满足企业的生产需求；二是从外部直接招聘熟练工。2) 需求的变动性受构件生产难度和订单情况的影响。一方面，预制构件涉及的建筑类型繁多，每一建筑类型又可划分为多种部品构件，不同构件生产的复杂性和多变性就会改变对人员的需求；另一方面，订单量的多少、订单的交付时间，也会影响当前阶

段的需求人数，订单数量大且交付时间紧，那么工厂就需要多开模具、多安排工作班组，此时人力需求量增大，人力资源配置也会发生变化；反之亦然。

### ③ 人员匹配要求严格

视构件类型、操作内容和难易程度的不同，所需的操作时间和技能要求也有所不同。操作工人的技术水平和熟练程度又影响着构件生产的数量和质量，而构件的精度和质量会影响施工现场构件组装及建筑质量。因此，为了保证建造的质量和效率，需要根据工人的能力和熟练度差异，兼顾工作难度、工期要求及生产任务，协调好各工序上的人员配置，实现整个生产线上人力资源价值最大化。

### ④ 信息化、科学化管理

预制构件的生产工序复杂，且每道工序又有不同的特点、难度和检验标准，说明生产过程中的信息具备种类繁多、数量庞大、更新快速等特点。因此需要利用现代的信息管理系统，科学地将它们进行分类收集、整理和分析，利用反馈出的工人施工水平、施工技术要求、构件生产的急缓程度等信息，合理的配置工人人数，实现人力资源效益最大化。

## 3.3 基于学习曲线的人力配置流程

### 3.3.1 学习曲线的适用性

#### ① 解决人力配置问题

本文的目的之一是构建一个人力配置优化模型，解决现存分配模式的问题。根据前述内容可知，学习曲线存在于各行各业，且学习曲线多次被运用于制造业中改善生产效率、提升人力品质，也被用于项目管理中人力分配的改善。预制构件工厂化生产具有重复性作业特点，与制造业有诸多相似，比如流水作业、机械化程度高、标准化生产等，这些特点符合学习曲线基本理论，说明预制构件生产也存在“学习效应”；另一方面，预制构件生产也具备传统项目管理的特质，那么运用学习曲线解决项目管理中人力配置问题的方法，也可借鉴于预制构件生产领域。

#### ② 识别关键信息

根据学习曲线表现出的内容及图形特性，可以识别出以下信息：工人初做时间、熟练工操作时间、熟练工养成时间以及学习速度的变化，这些都可以作为企业和高校制定培训计划及考核节点的参考，完善各参与方的培训体系，保证人才的持续培养和充分供给，实现本文的第二个目的。

综上，基于学习曲线的特点及其运用范围，结合本文的研究目的，说明学习曲线是适用于本研究的，将学习曲线引入预制构件生产中的人力配置优化方案，可以实现人员的动态管理和精细化管理。

### 3.3.2 基于学习曲线的人力配置流程

根据上述分析，工人的学习经验和学习效率会影响其完成单位构件的操作时间，进而影响工作组的“生熟”工人搭配比例，最后影响人力成本。结合学习曲线理论相关知识，本文提出学习曲线在本文中的应用步骤：

① 明确方案构建的对象及范围，再将生产过程划分为不同工序和流程。分析各项工作的内容和边界，画出生产流程图。

② 确定需要的工人类型。根据划分的工作流程，明确各项工序需要的工种。

③ 选取合适的学习曲线模型。根据研究对象的特点和实际采集的数据，对比单变量模型和多变量模型，选取匹配的函数模型。

④ 将学习曲线运用到构建的人力资源分配方案中。具体方案构建及优化流程详见第四章。

⑤ 选取合适的语言进行编程并运行求解。根据目标函数和约束条件，用 C# 语言编程并在 Visual Studio 平台上运行，从多种组合中选取人力成本最小的方案。

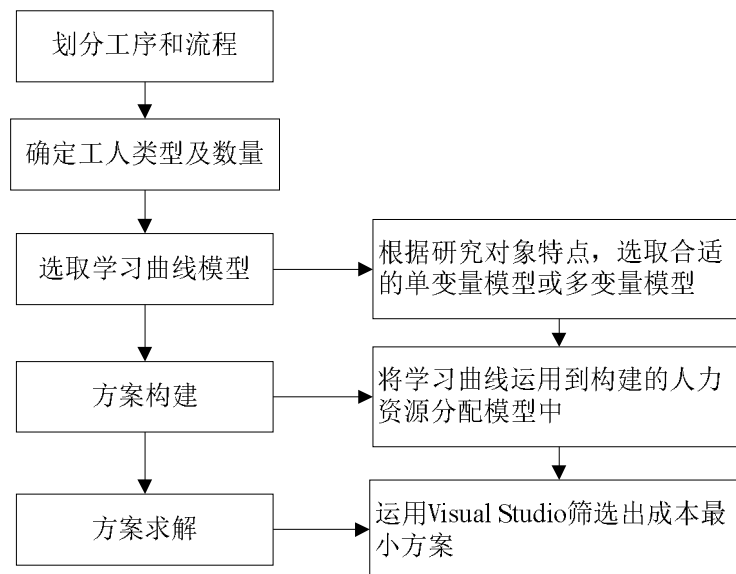


图 3.2 基于学习曲线的人力配置流程

Fig3.2 Human resource allocation process based on learning curve

## 3.4 本章小结

本章首先介绍了现行的人力配置现状及存在的问题；接着阐述了预制构件生产的特征，以及与这种生产方式所匹配的人力特征和人力配置特征，并指出引入学习曲线可以有效解决这些问题；然后从研究目的出发，说明学习曲线在本文的适用性，并提出了基于学习曲线的人力配置流程。



## 4 预制构件生产人力配置优化方案构建

### 4.1 方案构建基础资料

#### 4.1.1 方案优化对象

预制构件类型繁多，各自的生产流程又有所不同，为保证方案构建的适用性和可行性，本文主要讨论运用台座法生产梁柱构件时，制造阶段的人力配置问题。下面将针对以上三项做详细介绍。

##### ① 构件制作工艺——台座法

根据预制构件生产过程中成型和养护的不同，其制作工艺可以分为机组流水法、传送带法和台座法（周义和王荣涛，2013）。

机组流水法是指根据预制构件的生产工艺在车间内划分几个阶段，每个阶段配置相应的机械设备和人工，各自完成本阶段的工作内容的方式。传送带法是指台模在一条封闭的传送带上移动，台模每移动到一个工位完成对应的工作，如喷涂、浇筑、养护等，传送结束则该次构件的所有生产工序完毕。台座法是指模板的组装、混凝土浇筑、构件的成型养护、脱模等过程都在台座上进行，是固定不移动的，台座可以是表面光滑的混凝土地坪、胎模或者钢模，是用来完成各项工作的操作平台。

目前预制外墙、预制楼梯、预制阳台等以台座法生产为主，部分标准化生产的预制内隔墙条板已经实现了机组流水法或传送带法。本文研究的制作工艺是台座法。

##### ② 预制构件类型——梁柱构件

预制构件的生产类型可以分为梁、柱、板、阳台板、楼梯、外墙等，其中，阳台板、板、楼梯、墙的制作工艺和流程复杂特殊且变化性大，不适合进行整体讨论；梁、柱的生产过程基本统一，标准化程度较高且具有代表性，故本研究以梁柱构件为例，探讨预制构件生产的流程及特性。

##### ③ 预制构件生产流程——制造阶段

梁柱预制构件的主要生产流程可以分为以下三个阶段。如下图所示。

第一阶段：前置阶段，即生产前准备阶段，包括钢筋、预埋件、混凝土等物料准备，也包括按照设计图纸，进行钢筋的切割、弯折及钢筋笼的绑扎等加工工序，属于前期生产流程。如图 4.1 中 1#范围。

第二阶段：制造阶段。由模具清扫组装、吊放钢筋笼及预埋件埋设、混凝土浇筑及养护至成品修补等作业组成的过程称为制造阶段，该阶段为生产流程中的中段，也是机械设备和施工人员投入最多的阶段。如 2#范围。

第三阶段：储运阶段。将成品进行编号运送至储存场，或交货至施工现场，该阶段为生产流程的后段。如 3#范围。

本模型主要针对制造阶段进行方案构建。

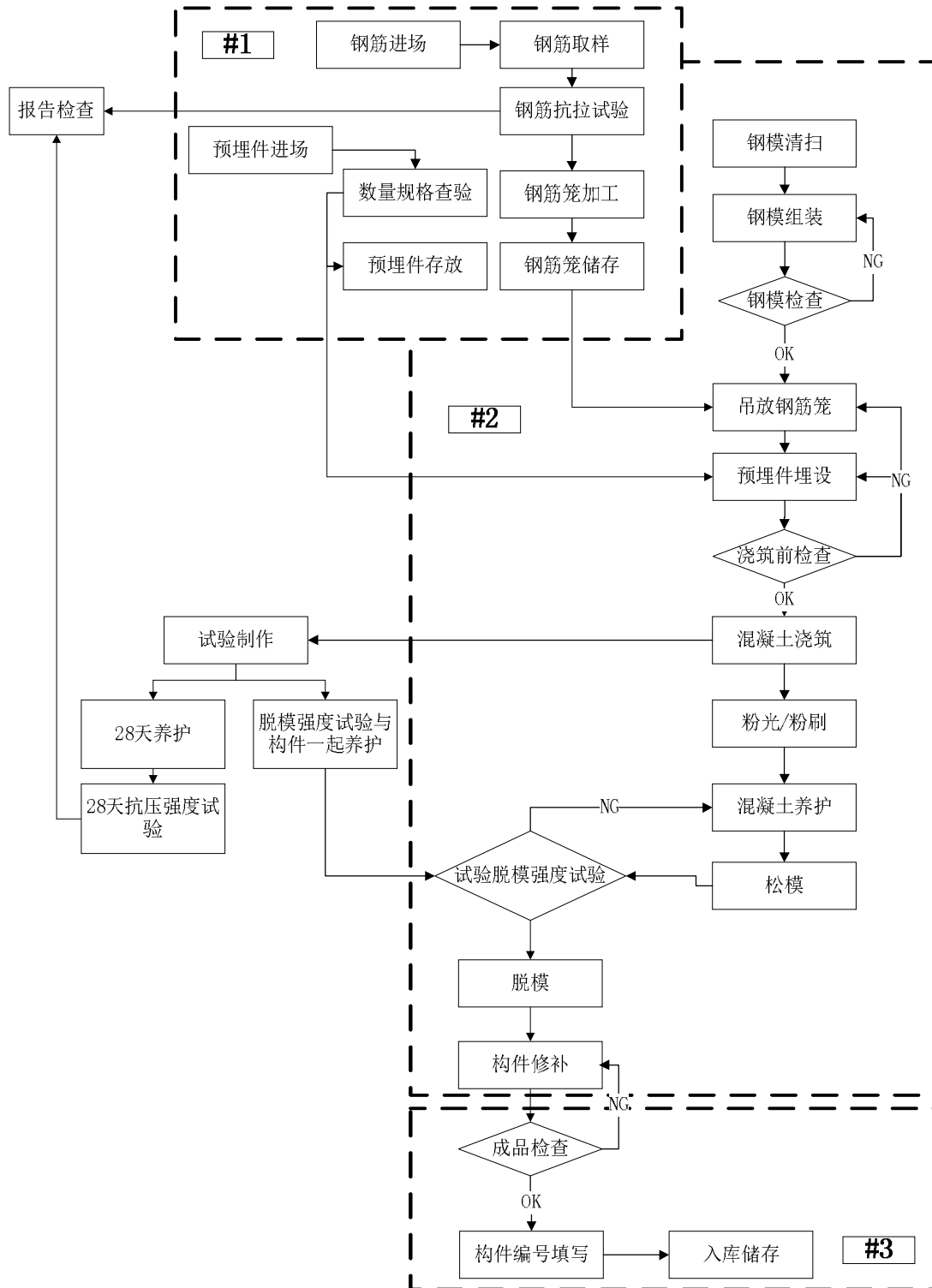


图 4.1 预制构件生产流程图

Fig4.1 The flow chart of prefabricated production

4.1.2 工序划分

本文研究的是预制梁柱构件生产流程中制造阶段的工序及特性，根据实际调研和相关文献阅读，将梁柱构件的生产流程分为以下 14 道工序，如下表所示：

表 4.1 预制构件制造阶段生产工序划分

Table4.1 Production processdivisionin the manufacturing stage of prefabricated

序号	工序名称/内容
1	模板清扫（钢模）
2	模板组装
3	放样（铁件位置）
4	吊放钢筋笼
5	木模放置
6	预埋件埋设
7	浇筑前检查
8	混凝土浇筑
9	粉光与拉毛
10	治具拆除
11	混凝土养护（蒸汽）
12	拆除模具
13	脱模
14	构件修补

在分析各项工序的学习曲线之前，需要先了解各项工序的工作内容，明确工序之间的划分依据和衔接关系，为后续论文撰写打下基础。具体工作内容如下所述：

① 模板清扫（钢模）：模板清扫是指将上次施做中粘结的混凝土残渣清理干净，避免下次使用时影响混凝土表面观感。针对木模板，还需要及时起钉补洞。模板清扫后，需要按规格或编号分类整理，堆放整齐，以便周转使用。

② 模板组装：模板组装是指按照设计图纸，将模板组合成需要的尺寸和形状进行施工，使混凝土构件最终能到达设计要求。在模板组装前，需要在模板和混凝土接触面涂刷隔离剂，使得模具与混凝土之间形成一层吸附型薄膜，便于后期脱模；组模时必须按照图纸所要求的形状、线性、尺寸安装，模板组装完成后需要按照图纸进行检查，保证模板界面的尺寸、标高是否符合要求，是否在规定的误差范围内（范玉等，2015）。

模板又分为底模、侧模和端模（白瑞，2010）。底模又叫台模，是生产预制构件的大平台，大部分预制构件都在台模上进行生产，如梁、柱、板；少数构件由于造型特殊，不适宜在台模上生产，需要定制单独的模具，如楼梯。侧模放置在预制构件侧面，保证构件的里面和外包尺寸达到要求。端模放置于预制构件的端头，保证构件断面尺寸达到要求；为了使模具实现尺寸可调，端模可以采用木模。

③ 放样（铁件位置）：放样（铁件位置）是利用经纬仪和划线机在模板上标出钢筋、预埋件和接驳器等的位置，精确定位其标高、尺寸。此项工序关系到各种构件之间能否顺利组装，因此对精确度要求很高。

④ 吊放钢筋笼：将钢筋笼从钢筋加工区（或存放区）吊放至模板中。一是要注意钢筋笼起吊点位置，确保钢筋笼不会倾斜，防止变形保证其整体性；吊放时要对准槽段中心，不可与模板碰撞；吊放后进行局部调整。

⑤ 木模放置：当模板尺寸需要变化时，常用木模作为端模，有时也用木模用固定夹具，确保其位置的牢靠。在木模拆除时会对构件造成不同程度的损伤，在第9和14项工序将对损伤部位进行修补。

⑥ 预埋件埋设：是指预先将一部分构件埋设在构件中，方便后项工序的连接或固定，所以预埋件需要严格按照图纸进行加工，在模板上定位出精确位置，并且在浇筑前必须经过严格的检查，保证达到设计精度后才能进行下一道工序。

⑦ 浇筑前检查：混凝土浇筑前需要对模板、预埋件、钢筋、混凝土进行检查。检查模板尺寸是否正确，拼缝是否严密，台模上是否有垃圾木屑等；检查预埋件安装位置是否准确，固定是否牢靠；检查钢筋绑扎、放置位置是否正确，并进行隐蔽工程验收；混凝土供应量是否充足，坍落度等质量指标是否符合标准。

⑧ 混凝土浇筑：运用混凝土浇筑设备（布料机）进行混凝土浇筑，一般来说，布料机里的混凝土体积是提前计算的、与被浇筑构件的混凝土体积相匹配的，因此可以机械控制混凝土浇筑量。期间利用振捣台或者振捣棒将混凝土振捣密实，排除混凝土中的气泡使其密实结合，保证预制构件的质量达到设计的强度要求。混凝土振捣需要人工凭经验判断是否达到要求。

⑨ 粉光与拉毛：即抹光、拉毛工序。混凝土初凝之后构件基本成型，上表面可能会出现蜂窝麻面或破损，影响观感；或是在拆除一部分器具时对构件表面造成轻微破坏，需要抹光。拉毛是根据设计和施工要求，增加连接构件之间的摩擦力时需要拉毛。

⑩ 治具拆除：治具即一些用于固定模板和预埋件的小器具，比如连接螺栓、定位销、夹具等，用于连接和固定预制构件的各个组成部分。有些治具是需要拆除的，有些治具则需要永久保留在预制构件中，固定各零件的相对位置，使零件在模具拆除时不会发生重大变化或位移（吴杰，2010）。

⑪ 混凝土养护（蒸汽）：预制构件厂一般用蒸汽进行混凝土养护，又分为两个阶段，一是预养护至其达到初凝状态，二是至其达到脱模状态。在初凝之后就可进行上述第9道工序。本项工序的作业内容是指工人将构件送入指定养护地点，不是指混凝土养护时间。

⑫ 模具拆除：拆模是指将构件的侧模和端模拆掉。

⑬ 脱模：即脱离模板，指将构件从台模上吊放至下一作业区（一般是构件修补区）。这一工序要注意吊具和吊点等设置要求，涉及到吊装的具体工艺。

⑭ 构件修补：由于在浇筑混凝土期间可能存在振捣不够密实，或是拆模（木模和钢模）时对构件造成边角损伤，在不影响构件强度的前提下，对构件进行修补，满足交货品质（杨朝跃和王磊，2015）。

### 4.1.3 工序调整

以上流程是理论上构件生产的施作顺序，但混凝土构件的一大特点是需要养护至规定强度才能拆模，并且在构件养护期间，模具不能周转用于另一构件的生产；同时，预制构件的模板大多定制而成，模具采购费用高，只有通过周转次数的增加，才能分摊成本。基于以上考虑，实际生产中工厂一般会在白天完成上述1~11道工序，夜间进行蒸汽养护（蒸汽养护一般6~8h），第2天直接进行拆模、脱模作业，之后模具又可以继续使用，减少模具的闲置时间。而构件修补是脱离模板开展的工作，这项工序与模板无关，可以与清模同时进行。通过对实际施工分析不难发现，预制构件厂在进行生产时，所有的工序是以模板为主线的，即所有的主轴线的工序都离不开模板。从另一个方面讲，其他不需要模板的工序皆可以在空余时间穿插进行。综上，对每天的操作工序做出如下调整：

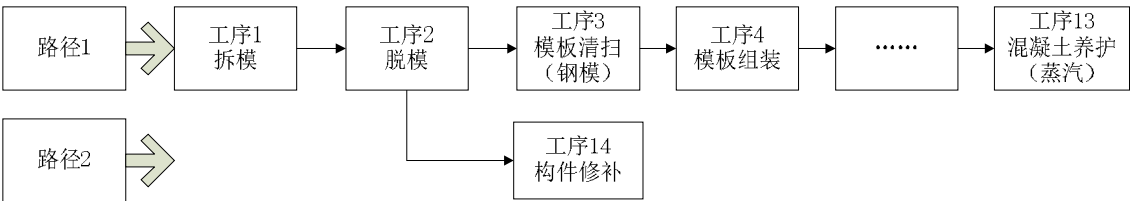


图 4.2 预制构件生产流程图（修正版）

Fig4.2 The flow chart of prefabricated component production (modified version)

从上图可以看出，构件修补工序操作时间的长短不影响后续工序的进行，只要保证在其在工作时间内完成指定作业即可。所以，在讨论优化时主要针对1~13道工序。

### 4.1.4 各项工序配置人数

预制构件生产各项工序施工工艺、操作难度、机械设备、可利用工作面大小

的不同，对配置的工人人数也有要求。比如，针对吊放钢筋笼工序，至少安排 3 位工人，1 人操作天车吊放钢筋笼，另外 2 人分别在钢筋笼的两端负责对其安放位置辅助调整；而针对清模工序，不需要工人之间的配合，根据工程量的大小，一般配备 1 位工人就已足够。因此，工厂一般会根据实际观察及经验积累，确定各项工序合理的配置人数，以保证构件的顺利生产。

## 4.2 人力配置优化目标及原则

### 4.2.1 人力配置优化目标

人力配置优化的目标：时间——人力成本优化目标，即求出在规定划作业时间内的最小人力成本。

根据 4.1.3 分析可知，预制构件厂为了增加模具的周转次数，提升工作效率，一般将混凝土的养护工序调整至夜间进行，第二天白天开始拆模。为此，工人需要在一天内完成从拆模至混凝土养护（蒸汽）之间（共计 13 项）的所有工序，否则就会出现第二天白天养护构件的情况，降低了模具的有效周转。按每天工作时间  $T_0=8h$  计算，则表示工人完成这 13 道工序的最长时间为 8 小时。而根据工人熟练度的不同，我们将工人分为熟练工与非熟练工，相应的，其薪资会存在差异；不同工序之间，由于工作内容、操作复杂程度的不同，对于从业人员的能力要求也不同，因而薪资也会有差异。综合考虑时间限制及薪资差异，构件生产过程中的人力配置可能有三种情况：

① 各项工序全部配置熟练工。若全部配置熟练工，将其完成所有工序的时间设为  $T_M$ ，且  $T_0 > T_M$ （否则工厂不可能在 8h 之内完成 13 道工序，实现模具的有效周转），但人力成本最大。

② 各项工序全部配置非熟练工。若全部配置非熟练工，将非熟练工完成所有工序的时间设为  $T_S$ ，且  $T_0 < T_S$ 。这样的配置保证了人力成本最低，但是会出现在  $T_0$  时间无法完成工作的情况。

③ 某些工序配置熟练工，某些工序配置非熟练工。通过合理配置不同熟练度的工人，保证在  $T_0$  时间内完成 13 道工序，且人力成本介于①②之间。当其中生熟工人安排最得当时，会出现完成所有工序的时间等于或最接近  $T_0$  且人力成本最小的情况。

因此，本文人力配置优化的目标就是如何通过合理分配非熟练工和熟练工，使其在  $T_0$  时间内完成作业且人力成本最小。

### 4.2.2 人力配置优化原则

① 遵循“二八”原则。二八原则也叫帕累托定律，是指在任何一组东西中，最重要的部分大约只占其中的 20%，其余 80% 是次要的大多数。该原理指导实际生

产时，是指 20%的投入影响着 80%的产出，将主要精力用于解决这 20%的问题，可达到事半功倍的效果。

② 持续动态优化原则。由于非熟练工的生产效率随着时间的增加是不断提高的（在一定范围内），特别是当其生产效率提升到需要调整其工资时，当前的人力配置方案并不是最经济的，因此需要重新进行调整。

③ 在人力配置档案需要调整时，尽量用现有的工人去逐步完成改善，避免过多额外的人力投入，增加人员培训成本。

## 4.3 人力配置优化方案构建

### 4.3.1 假设条件

#### ① 工序问题

在上文提及的 14 道工序中，为了保证工人施作的专业性，假定每位工人只负责完成指定工位的一道工序，不考虑工序之间人员的指派，且只有待前项工序全部完成后，后项工序才能进行。在以上的工序划分中，有几项的工作内容有小范围重叠，但对整个生产过程的操作时间影响极小，故不进行单独考虑。

#### ② 人力成本

人力成本作为预制构件生产直接成本的重要组成部分，降低人力成本可以使整体成本降低。本文讨论的人力成本只针对工人薪资，人力成本的其他范畴不在本方案考虑范围。由前文可知，根据工人操作的熟练度，可以将工人分为熟练工和非熟练工。同一工序内，非熟练工和熟练工的工资水平是不同的；视工序的难易程度、技术难度不同，不同工序之间生熟工人的工资差距也不同。故本文在计算人力成本时，将熟练工与非熟练工分别进行讨论。

#### ③ 关于工人熟练度的假设

假定在进行人员调整时，新加入生产线的工人只有以下两种类型：1）经验值为零的非熟练工，2）经验值达到恒定状态的熟练工；即不存在“有一定生产经验但又没达到熟练工水平”的工人。具体解释为，这些工人要么毫无预制构件生产的经验，生产效率极低；要么经验丰富达到熟练工水平，生产效率基本恒定。这样假设的原因为：一方面，让同一工序中非熟练工的学习起点是一致的，统计绘制出的学习曲线才能完整真实反映工人“从完全不会到完全会”的学习过程；另一方面，如果存在“有一定生产经验但又没达到熟练工水平”的工人，那么当下的生产水平难以衡量，且“生+熟”共同完成一项工序时的操作时间无法计算，导致优化困难。

#### ④ 关于熟练工养成的假设

假设：针对同一项工序，工人转换为熟练工的时间都是相同的。

由于经验、能力、年龄的差异，各位工人的学习效率是不同的，即熟练工养

成时间是不同的。但学习曲线可以反映出工人的平均学习时间，体现出较为普遍的规律。所以，本文理想化的假设为工人在某工序上的学习时间相同且等于熟练工养成时间。

#### ⑤ 关于工资调整的假设

假设：工人的工资有且只有两档，第一档——非熟练工的工资，第二档——熟练工的工资。根据假设③，工人类型只有两种，完全的非熟练工和完全的熟练工。随着工人经验不断积累，非熟练逐渐转变为熟练工，这时需要对非熟练工的工资进行调整，调整工资的标准为：每周第一天检视该位工人是否完全达到熟练工水平，若工人在本周第一天未达到熟练工水平，无论其生产效率提升为多少，均视为非熟练工人，按照第一档工资支付；若达到熟练工水平，则按照第二档工资进行支付。

为了便于理解，举例说明工资调整问题。假设某项工序工人的学习时间为 12 天（即从非熟练工转化为熟练工需要 12 天），可以得到下列表格（以下数据均为假设）：

表 4.2 某工序工人工资取值表（假设值）

Table 4.2 Worker's wages of one process (assumed value)

周数	工作天数	熟练工的生产效率	非熟练工的生产效率	非熟练工资
第一周	第 1 天	100%	10%	第一档
	第 5 天	100%	43%	第一档
	第 7 天	100%	65%	第一档
第二周	第 8 天	100%	83%	第一档
	第 12 天	100%	100%	第一档
	第 14 天	100%	100%	第一档
第三周	第 15 天	100%	100%	第二档
	.....	.....	.....	第二档
	第 21 天	100%	100%	第二档

注：熟练工生产效率基本处于恒定状态，将其生产效率设为 100%，非熟练工的生产效率以熟练工为基准进行换算。

由上述表格可以看出，因为该位工人在第 8 天未达到熟练工水平，即使在第 12 天生产效率达到 100%，第 2 周仍然按第一档工资进行计算，从第 3 周开始按照第二档工资进行计算。

本项假设基于以下两个原因：



一是简化提薪标准。在实际生产中工厂人员众多、工序复杂，构件厂不可能每天对每项工序的每位工人测量其生产效率，在工人达到熟练工人标准后及时提薪。假设⑤以每周周始的生产效率确定薪资的支付条件，既考虑了生产效率变化带来的薪资变化，又简化了每天测定生产效率繁琐的工作量。

二是调薪幅度和调薪频率。经过调研访谈发现，当非熟练工的生产效率有较大幅度提升时，企业会适当提薪以示激励，故这个提薪动作是阶梯式的；但是当非熟练工最终转换为熟练工时，其薪资仍然低于刚进厂时就是熟练工的那批工人。这是因为企业考虑了培养一位非熟练工转换为熟练工所耗费的时间成本、教育成本、风险承担费用等花费，间接转嫁在每位“生转熟”工人的薪资低于初始就是熟练工的薪资上。假设⑤将阶梯式提薪变为一次性提薪，且将“生转熟”工人的最终工资确定为与熟练工相同，对比两种方式，阶梯式提薪时间早，但是提薪总幅度较低；一次性式提薪时间晚，但是提薪总幅度高。“一次式”通过较晚提薪的方式，间接地消化了企业对非熟练工的培养成本，而且从调薪频率和单次调薪幅度上考虑，一次式提薪方式更加简便可行。

⑥ 关于等待时间的假设

假设工序之间的等待时间为 0。在实际生产中，工人完成上一道工序后，可能会因材料设备未及时就位、工人交接不及时或其他意外情况而出现等待的现象，若考虑这些因素，难以标准化工序间的等待时间，增加方案构建的难度，故本文理想化的假设每道工序完成后工人可以立即进行下一道工序。

### 4.3.2 第一次优化

① 根据本次优化流程，确定以下参数：

表 4.3 参数定义

Table 4.3 Parameter definition

符号	定义
$i$	表示第 $i$ 项工序， $i=1, 2, \dots, 13$
$j$	表示熟练工养成时间为 $j$ 天
$ij$	表示第 $i$ 项工序的熟练工养成时间
$t$	表示工作至第 $t$ 天
$Q_i$	表示第 $i$ 项工序配置的人员数量
$f_i(t)$	表示第 $i$ 项工序非熟练工的学习曲线函数， $0 < t < j$ 且为整数
$g_i(t)$	表示第 $i$ 项工序熟练工的学习曲线函数， $t \geq j$ 且为整数
$T_0$	工人每天最长工作时间，以 8h 计算

符号	定义
$T_M$	完成一根构件最短工作时间（全为熟练工）
$T_S$	完成一根构件最短工作时间（全为非熟练工）
$T_n$	表示第 $n$ 次优化后的操作时间
$C_i$	表示非熟练工做第 $i$ 项工序的日薪
$D_i$	表示熟练工做第 $i$ 项工序的日薪
$Z_i$	表示改进后变化的成本

注：以上学习曲线函数均为施作天数与操作时间的函数关系。

## ② 优化流程

假设最开始各项工序配置的全为非熟练工，非熟练工完成所有工序需要的时间为  $T_S$ 。每天最长工作时间为  $T_0=8h$ ，显然， $T_S > T_0$ 。假设优化后的操作时间为  $T_1$ 。那么，第一次优化的流程是：

第一步：确定可以优化的工序数量，第一次所有工序都是潜在优化对象。

第二步：确定每项工序标准配置人数。

第三步：确定优化目标，同时满足时间目标和成本目标。

时间优化——通过将某些工序的非熟练工调整为熟练工，以减少操作时间，使  $T_M < T_1 \leq T_0=8h$ （优化时尽量使  $T_1 = T_0$ ）。

成本优化——时间减少必然会导致人力成本的增加，满足  $T_M < T_1 \leq T_0=8h$  的工序调整方案众多，从中选取总成本增加最小的方案，增加成本为  $Z_1$ 。

以考虑 3 项工序为例，解释方案的具体选择过程：

表 4.4 第一次优化工序选择表（示例）

Table 4.4 Optimization scheme selection table of the first time (for example)

方案	工序	该项工序 配置人数	操作时间（分钟）		日薪（元）		熟练工替代非熟练工	
			非熟练工	熟练工	非熟练 工	熟练 工	减少时间 （分钟）	增加总成本 （元）
A	i=1	$Q_1$	$f_1(1)$	$g_1(t)$	$C_1$	$D_1$	$f_1(1) - g_1(t)$	$Q_1(D_1 - C_1)$
B	i=2	$Q_2$	$f_2(1)$	$g_2(t)$	$C_2$	$D_2$	$f_2(1) - g_2(t)$	$Q_2(D_2 - C_2)$
C	i=3	$Q_3$	$f_3(1)$	$g_3(t)$	$C_3$	$D_3$	$f_3(1) - g_3(t)$	$Q_3(D_3 - C_3)$

则可以组成的优化方案有：

表 4.5 优化方案组合（示例）

Table4.5 The combination optimization scheme （for example）

方案组合	减少时间（分钟）	增加总成本（元）
A	$f_1(1) - g_1(t)$	$Q_1(D_1 - C_1)$
B	$f_2(1) - g_2(t)$	$Q_2(D_2 - C_2)$
C	$f_3(1) - g_3(t)$	$Q_3(D_3 - C_3)$
A+B	$f_1(1) - g_1(t) + f_2(1) - g_2(t)$	$Q_1(D_1 - C_1) + Q_2(D_2 - C_2)$
A+C	$f_1(1) - g_1(t) + f_3(1) - g_3(t)$	$Q_1(D_1 - C_1) + Q_3(D_3 - C_3)$
B+C	$f_2(1) - g_2(t) + f_3(1) - g_3(t)$	$Q_2(D_2 - C_2) + Q_3(D_3 - C_3)$
A+B+C	$f_1(1) - g_1(t) + f_2(1) - g_2(t) + f_3(1) - g_3(t)$	$Q_1(D_1 - C_1) + Q_2(D_2 - C_2) + Q_3(D_3 - C_3)$

从这 7 个方案中选取满足时间优化目标且增加成本最小的工序组合即为最优方案，对应的人力配置即为当前阶段的最优人力配置。

③ 目标函数：

$$\begin{cases} Z_1 = \min \sum_{i=1}^{13} [a_i \cdot Q_i \cdot (D_i - C_i)] \\ \sum_{i=1}^{13} a_i [f_i(1) - g_i(t)] \geq T_s - T_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$a_i = 0 \text{ 或 } 1 \quad (4.2)$$

### 4.3.3 第二次优化

按照第一次优化的结果，某些工序配置熟练工，某些工序配置非熟练工，按照此分配方案，非熟练工通过不断学习会提升其生产效率，根据假设⑤，在这“生转熟”期间，企业支付较低的人力成本（即非熟练工工资）却获得了不断提升的生产力，企业从中获取利益；但当工人达到熟练工水平时，企业则需要调整薪资（即熟练工工资）。设当第一周检视非熟练工操作水平时的总操作时间为  $T_1'$ ，人力成本为  $Z_1'$ ，则  $T_1' < T_1 < T_0$  且  $Z_1' > Z_1$ ，说明由于新的熟练工出现，导致原来的配置方案人力成本增加，经济性受到影响，故需要再一次调整。调整流程与第一次类似，但区别在于：1）优化的对象——配置熟练工的工序；2）优化的手段——将熟练工替换为非熟练工，适当延长操作时间从而降低人力成本。

① 参数定义（与表 4.3 相同的参数则不再赘述）

$m$  表示进行第二次优化时，配置熟练工的工序， $m=1, 2, \dots$

② 优化步骤

第一步：确定可以优化的工序数量，有  $m$  项工序配置了熟练工，故可优化的工序数量为  $m$ 。

第二步：确定每项工序标准配置的人数。

第三步：确定优化目标，同时满足时间和成本两个目标。

时间优化——通过将某些工序的熟练工调整为非熟练工，以增加操作时间，使  $T_M < T_2 < T_0 = 8h$ ，且优化时尽量使增加时间为  $T_0 - T_1'$ 。

成本优化——减少熟练工增加非熟练工必然会减少人力成本，从多种工序组合中选取总成本减少最多的方案，增加成本为  $Z_2$ 。

第二次优化时，可优化的工序与第一次不同，对应的  $Q_i, f_i(t), g_i(t), C_i, D_i$  均不同，进而影响各项工序减少时间和增加的总成本，故需要全部重新计算。

③ 目标函数：

$$\begin{cases} Z_1 = \max \sum_{i=1}^m [a_i \cdot Q_i \cdot (D_i - C_i)] \\ \sum_{i=1}^m a_i [f_i(t) - g_i(t)] \leq T_0 - T_1' \end{cases} \quad (4.3)$$

$$a_i = 0 \text{ 或 } 1 \quad (4.4)$$

综上，每当有非熟练工转换为熟练工时，则需要对原配置方案进行重新检视，判断其是否为当前人力最小。根据假设⑤，将调整周期控制为 1 周。后续优化的方法与第二次相似。

## 4.4 求解方法与步骤

### ① 数据收集与分析

本方案需要收集的数据主要包含以下几个部分：一是对预制梁柱构件的生产工序进行梳理，划分出界限和流程，此部分工作前文已经完成，故不再赘述；二是收集各项工序的配置人数；三是根据划分的流程收集数据，并进行分析拟合，计算每一项工序的学习曲线函数；四是收集不同工序工人的薪资情况；

#### 1) 收集各项工序配置人数

通过专家访谈和实地考察，观察记录各项工序配置人数。

#### 2) 收集工人学习时间数据

针对每一道工序，统计工人不同施作天数的操作时间，连续几十天对同一位进行跟踪，直至达到熟练工的生产水平。为了消除数据采集对象因个体差异造成的数据偏差，应扩大样本数量，记录  $N$  位工人 ( $N \geq 30$ ) 在同一道工序上操作时间的变化。

#### 3) 分析数据，拟合绘制学习曲线

根据数据采集的结果，可得到  $N$  位工人每天的操作时间数据。考虑到工人的个体差异，同一天的操作时间也不尽相同。本文采取如下方法消除数据误差：将  $N$  位工人在同一天的操作时间取平均值，作为当天的平均操作时间。依次类推，可以计算出工人在养成期间每天的操作时间。然后，根据以上数据绘制施作天数——操作时间的曲线图，并用 SPSS 软件对数据进行拟合和显著性检验，最终确定学习曲线方程。

#### 4) 收集工人薪资数据

视工序难度、工人熟练度不同，薪资均会有差异。工人薪资关系到人力成本，即优化的目标，因此，需要分别收集每一道工序非熟练工和熟练工的薪资数据，作为计算人力成本的基础。

#### ② 计算可优化工序对应的改进时间和变化成本

针对每次可优化的工序，分别计算以下数据：非熟练工操作时间、熟练工操作时间、两者操作时间差值、人员变化导致的人力成本变化值。

#### ③ 选取最佳优化方案

利用 C#编写程序，并输入各项工序配置人数、非熟练工学习曲线函数、熟练工学习曲线函数、熟练工工资、非熟练工工资、时间优化目标等各项参数，利用 Visual Studio 平台运行程序，从中选取人力成本增加最小（或减少最多的）方案。具体程序代码见附录 A。

#### ④ 方案可应用范围

本方案主要利用学习曲线，即施作天数和操作时间的变化关系作为人力配置的考虑因素，从预制构件生产过程出发，提出一套人力配置优化方案，进行各项工序的“生熟手”搭配。同时，此方案可以根据不同工序之间的学习特点和人力成本差异，定期检视工人的学习变化和人力资源配置状态，及时调整人力分配方案，使企业人力资源配置达到最优。

若在求解中发现某种工人供给不足时，可以作为人力招募及人员培训的依据；若出现人员过剩的情况，可以作为人员裁剪或调配的参考；若几个项目并行，还能作为项目间人员支援的参考。除此之外，在建筑产业化领域的其他人力分配，如构件运输储存工人、现场组装工人等其他具有流水施工性质且存在学习效应的人力设计，也可以参考本模型求得最佳的人力配置方案。

## 4.5 本章小结

本章节利用项目管理网络计划优化中工期——成本优化原理，考虑了工人学习效应引发的生产力的变化，动态优化预制构件生产过程中人员配置。并通过 C#编程并在 Visual Studio 平台上运行，从众多备选方案中选取最优方案，大大提升了计算效率。并且可以根据不同构件的学习曲线、配置人数，在工人学习状态发生变化，或订单进度改变，或人力需求发生变化时，及时修正人力配置方案，为决策者提供人员训练、招募、裁剪或调度的参考。



5 实证研究——以台湾某预制构件厂为例

5.1 案例选取原因

实证研究的数据主要来于台湾润泰集团某预制构件厂。以台湾作为案例分析对象，有如下两个原因：

① 充分性。润泰集团 1943 年成立于上海，后从大陆迁至台湾，1995 年润泰从日本、芬兰引进预制构件生产技术到台湾，开始致力于建筑工业化的发展；大陆地区从 20 世纪 90 年代开始学习日本、瑞典等发达国家的先进经验进行住宅工业化的相关研究，直到近几年建筑产业化全面进入发展阶段，由此可以看出台湾与大陆的学习路径是相同的。

再者，预制构件生产的特点之一就是工厂化、标准化生产，通过对比分析台湾和大陆地区各项工序人员配置表（具体如 5.1 所示）可以看出，两个地区在操作流程、工序划分和人员配置方面是趋于一致的。不同点在于：1）大陆地区缺少木模放置和治具拆除工序，这是因为台湾采取可变式模具，在端模处一般借用木模改变构件尺寸，以实现模具的通用性和多次利用；木模的另一用处就是固定治具（即固定预埋件的夹具等），大陆地区构件相对简单，预埋件埋设相对较少，故而治具拆除常与拆除模具工序合并进行。2）针对放样、构件修补等工序，大陆地区配置人员数量较少，这是受预制构件难度、质量和精度要求所影响的，难度越大，表面观感质量要去越高，配置的人员数量就越多。

从上述分析可以看出，台湾与大陆的预制构件生产是大同小异的。从工序划分上来讲，台湾更加细致、分工更加明确，生产的构件更加复杂，质量要求更加严格。大陆预制构件的生产处于早期阶段，台湾发展更加成熟，大陆的预制构件生产终将走向更精细、更科学的管理方式，借鉴台湾生产经验可以促进大陆的发展。

表 5.1 台湾与大陆各项工序配置人数对比分析表

Table5.1 The number of people in each process (Taiwan VS PRC)

台湾地区			大陆地区	
编号	工序名称/内容	配置人数	工序名称/内容	配置人数
1	模板清扫（钢模）	1	模板清扫（钢模）	1
2	模板组装	2	模板组装	2
3	放样（铁件位置）	3	放样（铁件位置）	2
4	吊放钢筋笼	3	吊放钢筋笼	3

台湾地区			大陆地区	
编号	工序名称/内容	配置人数	工序名称/内容	配置人数
5	木模放置	1	无	
6	预埋件埋设	2	预埋件埋设	1
7	浇筑前检查	1	浇筑前检查	1
8	混凝土浇筑	3	混凝土浇筑	3
9	粉光与拉毛	1	粉光与拉毛	1
10	治具拆除	1	无	
11	混凝土养护（蒸汽）	2	混凝土养护（蒸汽）	2
12	拆除模具	2	拆除模具	2
13	脱模	3	脱模	2
14	构件修补	2	构件修补	1

② 必要性。为了绘制学习曲线，需要大量收集构件生产过程中一线工人的操作时间，并进行跟踪记录，直至作业者从非熟练工转换为熟练工。因此，采集到这些数据的前提是工厂可以实现持续化、规模化生产，工人有足够多的时间和实操机会，才能完整记录他们从“完全不会到完全会”的学习过程。但目前大陆市场处于起步阶段，大多预制构件厂缺少足够的、连续性的订单，难以达到规模化生产，导致工人缺乏持续的学习机会，相关数据的收集也较困难。台湾在预制生产领域发展探索了 20 余年，其工业化和技术化程度都远超大陆，代表着更高标准的生产状态；且目前台湾大多预制构件厂已达到规模生产，积累了大量的实际数据和生产经验，更易从中获取实证研究所需的数据，验证方案构建的有效性。

综上所述，选取台湾为案例对大陆仍具有借鉴意义和指导价值。

## 5.2 数据采集过程

### 5.2.1 数据采集原则

为了保证数据的一致性和有效性，在数据采集过程中把握了以下几个原则：

① 关于工人。数据采集对象即一线工人来自各个国家和地区，样本选取具有随机性；第二，毫无预制构件生产的相关经验，即被称为完全的非熟练工。

② 关于构件类型。构件以柱、梁为主。一是由于梁、柱构件的生产过程具有代表性，适用于标准化讨论；二是该厂主要生产梁、柱构件，数据容易采集。

③ 关于数据的跟踪记录。为准确反映工人生产效率的变化，连续几十天跟踪作业者在同一工序上的操作时间并进行记录，直至该位工人达到熟练工生产水平（工人连续 5 天生产率趋于稳定即视为达到熟练），再根据这些数据绘制学习曲线。



### 5.2.2 数据采集步骤

本文采用观察法进行数据的采集。观察法适用于那些主要是通过身体活动来完成的工作，可以让观察者直观、可靠的采集到真实数据，简便易行，灵活性强，可随时进行。结合预制构件生产特点和需要收集的数据内容，采用观察法是最有效也最符合实际的。

按照预制构件的生产流程，可划分为 14 道工序（具体划分工序已在前文阐释，此处不再赘述），通过在工厂实地进行观察各位工人实际操作，经工程师判定作业达标之后，记录操作时间。对部分已有数据进行记录，剩余数据进行观测搜集。

本案例收集了 14 项工序 30 位（或 31 位）工人的学习数据，共计 450 个样本 18000 余个数据，耗时半年，在此基础上进行数据分析和模型构建。以模板组装工序为例，介绍数据的收集步骤如下：

① 制作数据记录表格。主要包含三项内容，工人编号、施作天数和操作时间。

② 确定样本容量。在数据采集时，考虑到工人个体和每天生产环境的差异，可能会导致操作时间浮动，为消除样本偏差，将样本容量 $\geq 30$ 。选取 31 位模板组装工人作为研究对象，记录这 31 位工人的基本信息，并进行编号，编号为工人 1，工人 2……

③ 观察、记录数据。从工人进场的第 1 天开始，观察记录每位工人完成该工序所耗时间。在数据记录过程中，工程师从旁协作，每当工人完成一项工作后，由工程师判定工人是否达到操作要求，确认达到后，该时间才是工人的操作时间。以模板组装为例，操作第 1 天，工人 1 耗时 38 分钟，工人 2 耗时 41 分钟，……工人 31 耗时 36 分钟。由于采集的工人人数众多，数据庞杂，难免出现记录错误，为规避此类问题，通过工程师和自主两组对比的记录方式。

④ 持续跟踪，直至达到熟练水平。持续跟踪这 31 位工人，直至其操作时间趋于稳定（连续 5 天操作时间趋于稳定即视为达到熟练）。以模板组装为例，工人 1 从第 1 天至第 10 天，其操作时间不断减少，在第 11 天~15 天，操作时间基本稳定在 20 分钟左右，说明已经达到熟练工的水平，故在第 15 天结束观察。其他工人依次类推。

⑤ 整理数据。将采集的数据按工序顺序、施作时间顺序进行归类整理。

⑥ 其他工序采用上述方法依次类推。

## 5.3 预制构件生产工人薪资表

为保证与学习曲线数据的一致性，此处的薪资数据来自同一预制构件厂。通过现场访谈和查阅相关资料，得到工人薪酬，如表 5.2 所示。

表 5.2 台湾预制工人薪资表

Table 5.2 Prefabricated workers' wages in Taiwan

编号	工序名称	非熟练工日薪（元）	熟练工日薪（元）
1	模板清扫（钢模）	240	280
2	模板组装	220	260
3	放样（铁件位置）	460	600
4	吊放钢筋笼	240	280
5	木模放置	220	260
6	预埋件埋设	400	540
7	浇筑前检查	240	280
8	混凝土浇筑	220	260
9	粉光与拉毛	420	580
10	治具拆除	200	240
11	混凝土养护（蒸汽）	200	240
12	拆除模具	200	240
13	脱模	240	280
14	构件修补	420	680

## 5.4 学习曲线数据收集及基础处理

### 5.4.1 学习曲线数据基础处理

下表 5.3 是模板组装工序采集的具体数据，其余工序的数据采集详见附录 B。

① 剔除数据中的极大值、极小值和偏差过大的值。剔除之后，用剩下数据平均值替换该数据，以减小数据的误差。

② 将各项工序工人每天的操作时间取平均值，得到平均操作时间，作为绘制学习曲线的基础数据。如下表 5.4 所示。

表 5.3 模板组装操作时间数据统计表

Table5.3 Operation time of templated disassembly

工人编号	工人每天操作时间（分钟）														
	Day1	Day2	Day3	Day4	Day5	Day6	Day7	Day8	Day9	Day10	Day11	Day12	Day13	Day14	Day15
工人 1	38.00	32.00	28.00	26.00	25.00	22.00	21.47	21.00	19.70	19.26	20.00	19.50	20.00	19.00	20.50
工人 2	41.17	30.08	21.59	19.55	21.51	23.80	21.00	23.02	20.50	20.50	22.43	19.91	15.24	14.43	19.80
工人 3	42.68	27.83	27.93	21.17	23.51	21.01	23.50	19.57	19.69	22.29	21.37	18.25	17.46	18.77	22.80
工人 4	36.34	34.99	23.08	23.09	27.31	23.50	22.59	19.04	22.36	18.30	21.92	20.62	15.82	15.04	22.20
工人 5	40.82	24.71	22.00	25.48	20.93	21.79	15.81	17.27	19.73	19.63	18.51	15.18	15.59	18.84	17.09
工人 6	36.09	36.02	22.28	20.27	19.53	18.41	22.86	17.35	18.21	15.38	22.10	15.07	16.11	14.28	22.83
工人 7	41.28	27.39	27.70	22.47	24.19	19.63	22.58	20.56	19.26	16.80	20.77	20.69	15.58	18.57	17.04
工人 8	45.09	25.39	24.49	28.81	21.10	17.61	23.27	17.86	17.17	19.26	22.44	18.97	18.54	20.92	19.68
工人 9	40.30	29.93	31.38	26.49	24.02	23.39	22.66	22.56	19.20	22.61	21.07	15.76	16.72	15.39	16.61
工人 10	44.97	35.24	22.89	22.78	26.71	24.15	23.67	17.93	19.67	18.29	22.03	17.87	21.80	21.07	16.34
工人 11	45.28	34.33	25.26	26.80	22.84	19.45	21.01	19.71	18.23	20.46	19.54	18.05	17.70	17.26	22.77
工人 12	35.92	31.57	29.79	23.86	20.86	17.13	16.14	18.80	18.51	19.07	15.95	18.56	19.69	16.55	18.71
工人 13	33.06	29.28	24.57	28.19	26.76	16.81	21.64	16.24	18.19	18.12	16.14	21.53	18.43	20.37	17.67
工人 14	42.39	28.27	31.14	23.83	20.51	18.03	17.64	18.22	17.84	18.81	16.11	19.92	19.97	17.88	23.00
工人 15	40.95	35.17	31.57	24.81	26.23	23.75	21.59	16.41	19.01	21.51	16.44	18.87	15.04	17.18	17.64
工人 16	35.67	34.42	23.10	25.65	27.19	21.21	21.06	19.38	18.20	15.70	17.91	19.02	19.83	20.72	22.71
工人 17	35.09	34.98	29.59	27.01	24.83	21.54	22.15	21.34	20.31	22.27	22.27	19.83	15.28	18.63	17.01

工人编号	工人每天操作时间（分钟）														
	Day1	Day2	Day3	Day4	Day5	Day6	Day7	Day8	Day9	Day10	Day11	Day12	Day13	Day14	Day15
工人 18	41.72	31.49	30.38	25.89	27.44	20.97	21.06	20.60	16.24	16.32	16.44	18.02	15.28	15.17	15.49
工人 19	40.72	35.78	28.18	22.46	26.20	19.08	16.59	18.93	19.17	22.21	22.00	16.74	19.51	17.37	22.31
工人 20	45.96	34.62	25.71	24.00	25.50	18.28	20.61	16.91	15.48	18.49	16.05	15.15	19.99	18.70	18.50
工人 21	45.55	31.41	22.72	27.47	20.52	22.82	17.42	16.06	17.03	18.97	15.60	17.13	19.48	20.52	19.10
工人 22	42.66	28.02	30.32	23.25	25.40	16.77	19.86	18.39	17.38	16.29	19.93	19.38	16.91	20.98	22.58
工人 23	44.38	32.66	25.43	28.08	21.06	23.25	16.37	20.58	21.19	21.43	22.32	18.17	22.18	16.88	18.44
工人 24	37.88	35.61	21.97	28.85	19.82	20.23	22.95	21.52	20.95	23.09	18.87	21.70	19.76	17.41	18.14
工人 25	41.04	28.21	28.40	19.52	18.85	17.57	18.36	22.04	16.51	15.41	15.72	18.38	17.86	16.67	15.75
工人 26	44.92	25.08	30.18	26.43	22.28	17.86	20.76	17.59	21.89	16.27	15.14	17.56	15.95	16.30	21.35
工人 27	45.28	30.88	23.13	27.10	21.84	21.56	19.78	22.03	16.55	22.74	18.82	18.11	15.02	20.04	22.25
工人 28	36.34	28.10	29.96	22.69	21.73	23.36	18.21	21.03	15.47	21.37	21.33	20.30	18.59	18.48	19.97
工人 29	38.08	30.13	29.67	23.40	27.15	23.27	23.22	20.77	20.87	20.81	20.93	21.96	15.13	14.80	15.43
工人 30	40.14	24.42	22.53	29.01	20.13	16.56	19.39	23.06	18.93	20.92	21.02	18.40	21.86	16.29	22.88
工人 31	36.15	28.11	24.52	22.43	23.05	20.45	22.84	19.26	16.15	22.45	15.86	16.95	19.11	18.55	17.03
平均值	63.05	56.77	52.43	52.98	50.42	47.31	46.97	43.78	42.68	41.27	37.10	35.13	34.89	33.06	31.83

注：横向表示工人施作天数，纵向表示观察的工人人数，主体数据表示完成该工序需要的操作时间。

表 5.4 各项工序平均操作时间

Table 5.4 Average operating time of each procedure

工序名称	各项工序平均操作时间（分钟）														
	Day1	Day2	Day3	Day4	Day5	Day6	Day7	Day8	Day9	Day10	Day11	Day12	Day13	Day14	.....
模板清扫（钢模）	63.05	56.77	52.43	52.98	50.42	47.31	46.97	43.78	42.68	41.27	37.10	35.13	34.89	33.06	.....
模板组装	40.51	30.84	26.43	24.74	23.35	20.49	20.59	19.52	18.70	19.52	19.26	18.57	17.92	17.84	
放样（铁件位置）	94.18	91.17	96.40	95.65	95.98	90.92	87.78	90.73	85.51	90.88	86.77	91.25	91.10	88.72	.....
吊放钢筋笼	53.18	53.87	50.87	49.38	47.02	44.67	42.09	44.81	37.59	36.90	33.76	32.88	31.18	32.59	.....
木模放置	37.46	32.22	24.67	21.32	16.51	14.31	13.20	12.89	10.79	10.33	10.85	10.37	9.73	10.83	.....
预埋件埋设	125.90	124.41	119.11	117.89	117.78	121.70	118.51	119.46	117.64	116.41	109.34	113.62	114.14	101.73	.....
浇筑前检查	27.59	25.92	25.95	23.78	22.33	22.01	21.07	19.85	18.64	17.42	17.42	16.15	16.77	14.55	.....
混凝土浇筑	63.35	55.49	53.35	46.40	45.38	42.54	44.37	44.70	43.36	43.90					
粉光与拉毛	92.93	94.21	92.18	95.38	87.16	87.66	89.83	90.08	88.76	90.36	88.37	90.86	88.23	75.16	.....
治具拆除	33.71	27.15	22.64	20.97	18.95	17.83	18.76	17.58	17.50	17.57					
混凝土养护（蒸汽）	21.14	15.96	14.28	13.32	12.93	12.62	12.05	12.33	12.54	12.47					
拆除模具	24.31	20.89	16.75	15.25	16.14	16.61	16.52	16.67							
脱模	28.56	26.55	25.57	23.55	22.85	22.00	21.38	19.85	19.29	18.08	17.80	15.94	16.46	15.15	.....
构件修补	194.86	184.14	190.58	176.88	177.63	180.47	177.95	178.66	179.91	172.89	180.06	179.99	175.95	174.39	.....

### 5.4.2 学习曲线模型选取

关于学习曲线模型，第 2 章已进行相关阐述。本文采用多项式学习曲线模型，原因如下：

#### ① 与对数直线模型比较

对数直线模型是出现最早且运用最久的模型，是指当累计产量加倍时，单位产品的劳动时间会下降某一百分比。对数直线模式被认为是学习曲线的最佳代表，被广泛运用于各个行业和领域。

本文研究的是预制构件生产过程工人熟练程度与施作天数的关系，可以用对数模型进行研究。但是根据实际数据进行拟合时发现，对数直线模型拟合精度差、显著性检验不合格，不能较为准确的刻画学习曲线，因而不选取此模型。

#### ② 与 Stanford-B 模型的比较

Stanford B 比对数直线模型多了一个常数 B，将工人在进入某行业之前已获取的经验引入模型，这使 Stanford B 模型要比对数直线模型更合理，精度也更高。但本次研究为了保证数据的一致性，选择的工人均没有预制构件生产的工作经验，所以 Stanford B 并不适合本次研究。

#### ③ 与 DeJong 模型的比较

DeJong 模型将机械化程度引入模型，用参数 M 表示机械化程度的测度率（不能被压缩的因素）。在预制构件生产过程中，机械与人协同工作，机械化程度在全厂中所占的比重不能够很好的量度，故不用此模型。

#### ④ 与 Time Constant 模型的比较

Time Constant 主要适用于重复性高、产品单一、变化少的产业。预制构件的生产虽然有可重复性，但由于各个项目的构件类型、尺寸大小、技术要求各有不同，产品并不是完全一致的复制生产。但可以借用 Time Constant 横纵坐标对调的处理方式，更好地反映本文学习曲线的特点。

#### ⑤ 与多因素模型的比较

多因素模型适用于影响变量不止一个的研究，且变量和变量之间可能存在着相互影响，本文的研究变量只有一个，故不用此模型。

综上所述，根据实际数据的拟合情况，多项式拟合更为准确合理，显著性检验好，故采用此回归方程。同时，在进行学习曲线绘制时，结合 Time Constant 模型的统计特点，以累计施作天数为横轴，以产量或生产单位产品的时间为纵轴，记录随着时间的延续操作时间的改变。

## 5.5 预制构件生产各项工序学习曲线分析

### 5.5.1 浇筑前各项工序学习曲线分析

#### ① 模板清扫（钢模）学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.1 所示。

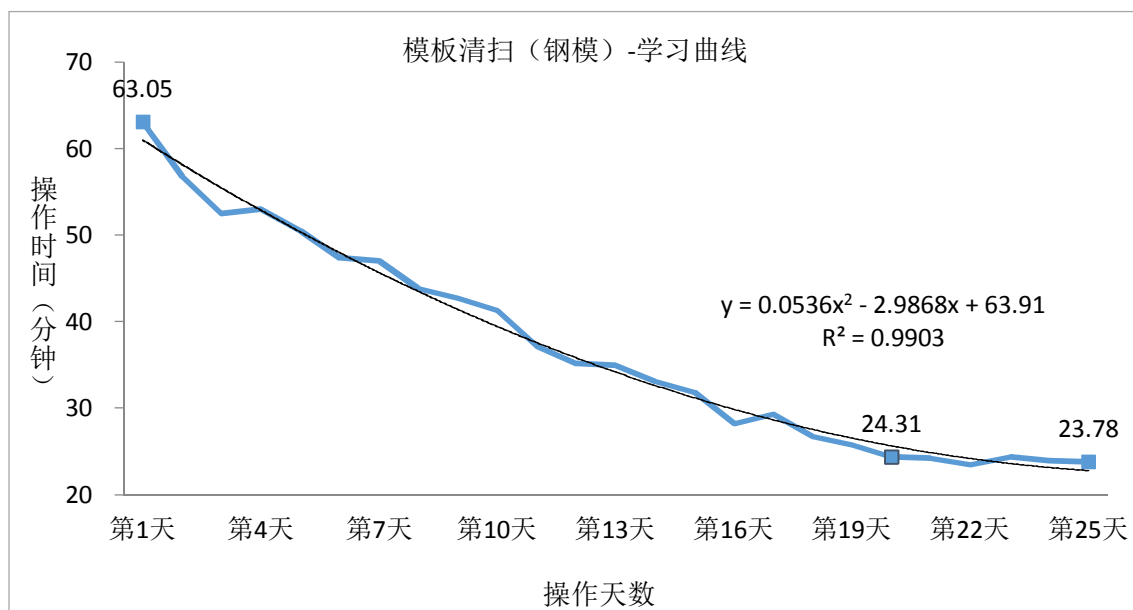


图 5.1 模板清扫（钢模）学习曲线

Fig 5.1 The learning curve of steel mold cleaning

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现模板清扫（钢模）工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 63 分钟。
- 2) 工人在第 20 至 25 天，操作时间趋于稳定，学习曲线平缓，最长为 24.31 分钟，最短为 23.43 分钟，差距约为 1 分钟，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 20 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 24 分钟，相较于非熟练工节约时间 39 分钟，效率提升 61.9%。
- 5) 从整体来看，学习曲线的斜率比较平稳，说明工人通过学习进步稳定，水平持续提高，效果良好。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.0536x^2 - 2.9868x + 63.91, & x < 20 \\ 24, & x \geq 20 \end{cases}, R^2=0.9903, \text{ 满足显著性}$$

检验。

## ② 模板组装学习曲线分析

通过观察记录 31 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.2 所示。

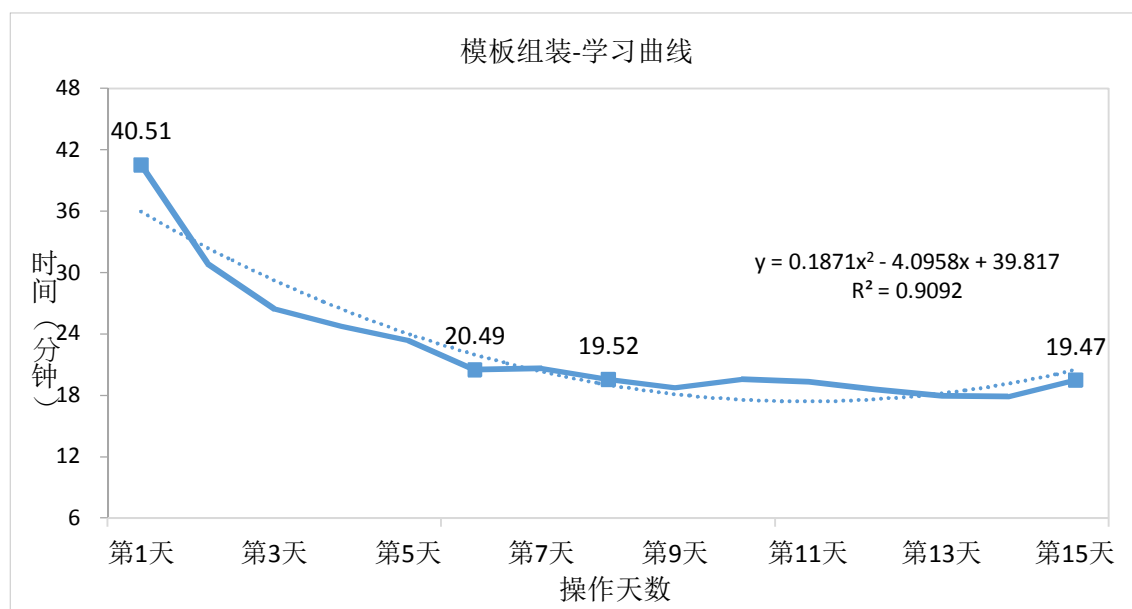


图 5.2 模板组装学习曲线

Fig 5.2 The learning curve of template assembly

- 1) 工人初始操作时间约为 41 分钟。
- 2) 工人在第 8 至 25 天，操作时间趋于稳定，学习曲线平缓，最长为 24.31 分钟，最短为 23.43 分钟，差距约为 1 分钟，可以认为已经达到稳定的操作水。
- 3) 熟练工养成时间为 8 天。
- 4) 熟练工的操作时间取第 8 天至 15 天的平均值，约为 19 分钟，相较于非熟练工节约时间 22 分钟，效率提升 53.7%。
- 5) 此项工作随着工作时间的增加，操作时间大幅降低，在第 6 天熟练工基本养成（与最终水平差别不大），说明此项工作学习相对简单，学习速度快。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.1871x^2 - 4.0958x + 39.82, & x < 8 \\ 19, & x \geq 8 \end{cases}, R^2=0.9092, \text{ 满足显著性}$$

检验。

## ③ 放样（铁件位置）学习曲线分析

通过观察记录 31 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.3 所示。



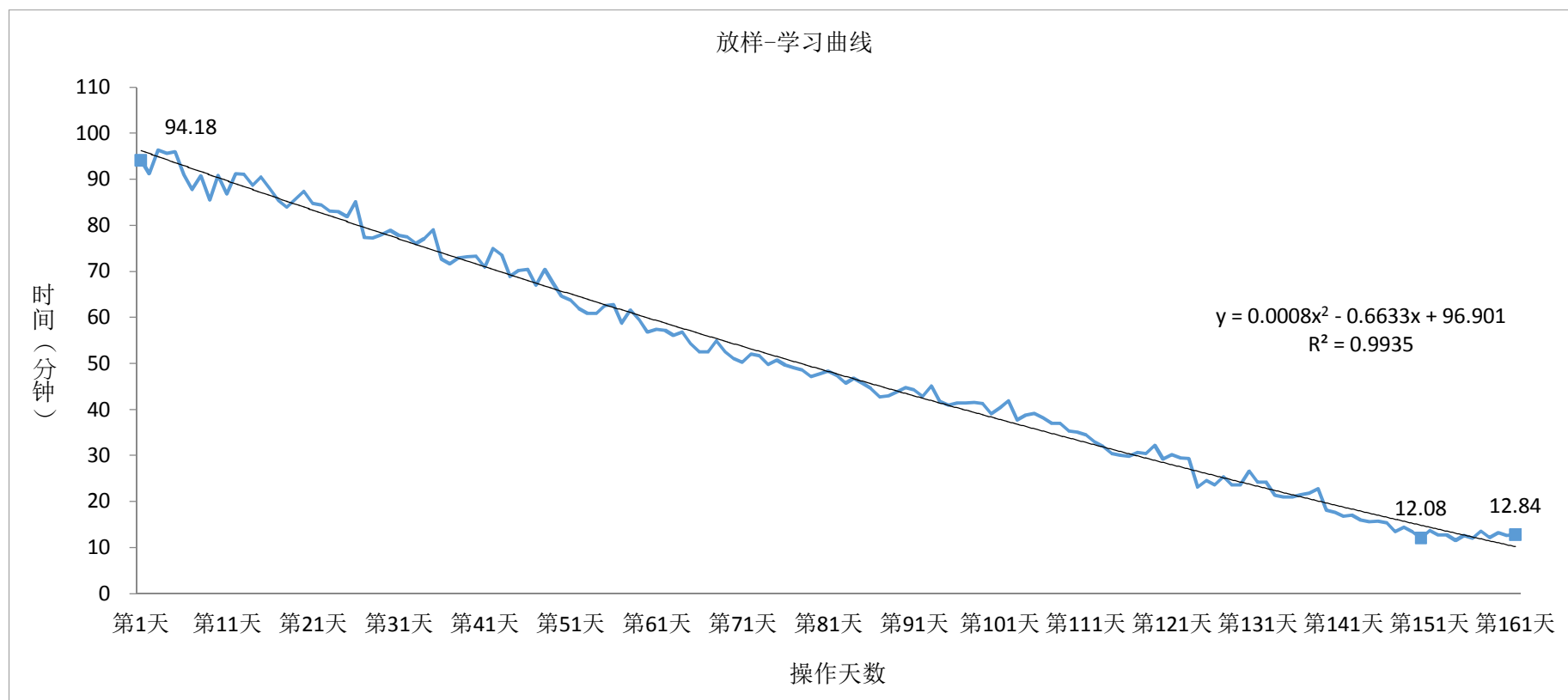


图 5.3 放样（铁件位置）学习曲线

Fig 5.3 The learning curve of measurement lofting

根据记录、整理、分析 31 位工人操作的平均时间，由图可发现放样（铁件位置）工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 94 分钟。
- 2) 工人在第 150 至 161 天，学习曲线平缓，操作时间稳定，最长为 12.84 分钟，最短为 11.49 分钟，差距约为 1 分钟，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 150 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 13 分钟，相较于非熟练工节约时间 81 分钟，效率提升 86.2%。

5) 在熟练工养成期间，出现几个小幅的平台现象，分别在 25 天、30 天、85 天、125 天左右，此后操作时间又继续下降，可以看出此项工序在学习过程中有小瓶颈，需要持续学习、培训才能突破达到标准熟练工的操作水平。

6) 从图中可以看出，培养一位成熟的放样（铁件位置）工人耗时久、投资大，但同时最终效率提升大，说明熟练工与非熟练工生产力差异大，值得重点关注。

7) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.0008x^2 - 0.6633x + 96.90, & x < 150 \\ 13, & x \geq 150 \end{cases}, R^2=0.9935, \text{ 满足显著性检验。}$$

性检验。

#### ④ 吊放钢筋笼学习曲线分析

通过观察记录 31 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.4 所示。

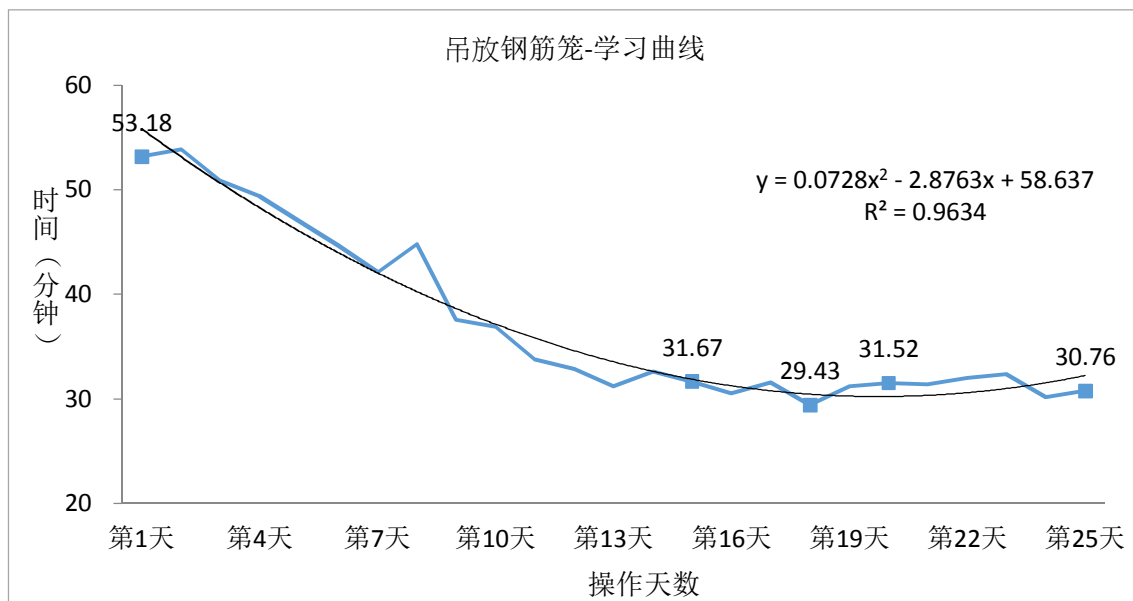


图 5.4 吊放钢筋笼学习曲线

Fig5.4 The learning curve of dipping steel cages

根据记录、整理、分析 31 位工人操作的平均时间，由图可发现钢筋笼吊放工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 53 分钟。
- 2) 工人在第 15 至 25 天，操作时间有小幅波动，波动范围在 29 分钟~31 分钟，波动幅度可控，因此可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 15 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 30 分钟，相较于非熟练工节约时间 23 分钟，效率提升 43.4%。
- 5) 在第 8 天 31 位工人的操作时间出现整体上浮的情况（群体现象，而非个人现象），判断为某客观原因造成，属于数据偏差，不作为讨论的范围。
- 6) 从图中可以看出，此项工序改进空间略微偏小，且在 15 天之后，工人操作时间仍有小幅波动，表示工人操作成熟度还不稳定，也说明此项工序较易受工人、客观环境的影响。

7) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.0728x^2 - 2.8763x + 58.64, & x < 15 \\ 30, & x \geq 15 \end{cases}, R^2=0.9634, \text{ 满足显著性}$$

检验。

#### ⑤ 木模放置学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.5 所示。

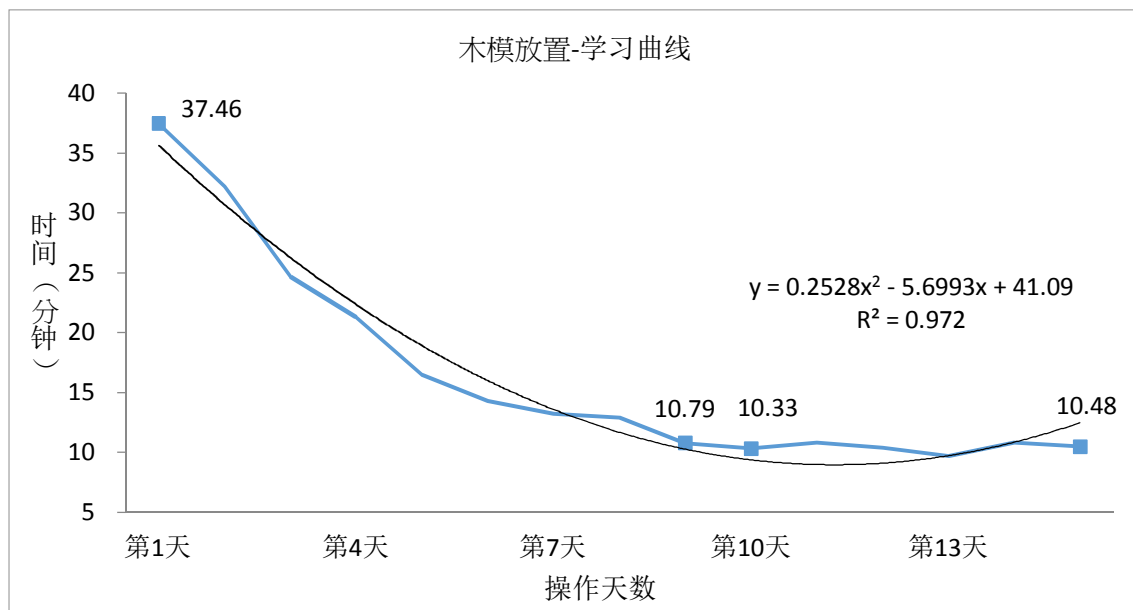


图 5.5 木模放置学习曲线

Fig5.5 The learning curve of wooden template placed

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现木模放置工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 37 分钟。
- 2) 工人在第 9 至 15 天，操作时间比较稳定，整体在 10.30~10.80 分钟波动，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 9 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 10 分钟，相较于非熟练工节约时间 27 分钟，效率提升 71.1%。
- 5) 此项工作在学习初期即表现出时间大幅减少的现象，在第 5 天操作时间即减少 50%以上，说明针对此项工作内容工人学习速度快，技能容易掌握；且最终效率提升明显，非熟练工的进步空间大。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.2528x^2 - 5.6993x + 41.09, & x < 9 \\ 11, & x \geq 9 \end{cases}, R^2=0.9720, \text{ 满足显著}$$

性检验。

#### ⑥ 预埋件埋设学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的操作时间，得到该工序的学习曲线，如图 5.6 所示。

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现该项工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 126 分钟。
- 2) 工人在第 54 至 76 天，操作时间最长为 62.53 分钟，最短为 55.83 分钟，差距略大，但从学习曲线整体发展趋势来看，此阶段的操作时间较为平稳，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 55 天。
- 4) 熟练工操作时间约为 60 分钟，比非熟练工节约 66 分钟，效率提升 52.4%。
- 5) 从整个学习曲线的演变规律来看，学习曲线的斜率较小甚至较为平缓，说明此项工序学习相对缓慢，效率相对较低；且在学习过程中操作时间反复波动，忽高忽低，即使在达到熟练工水平之后仍有小幅变化，说明工人的操作熟练度并不稳定，需要持续不断地学习和训练，才能确保效率可控，同时也从侧面反映出此项工序的复杂性和难度系数。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.0154x^2 - 2.142x + 132.09, & x < 55 \\ 60, & x \geq 55 \end{cases}, R^2=0.9842, \text{ 满足显著性}$$

检验。

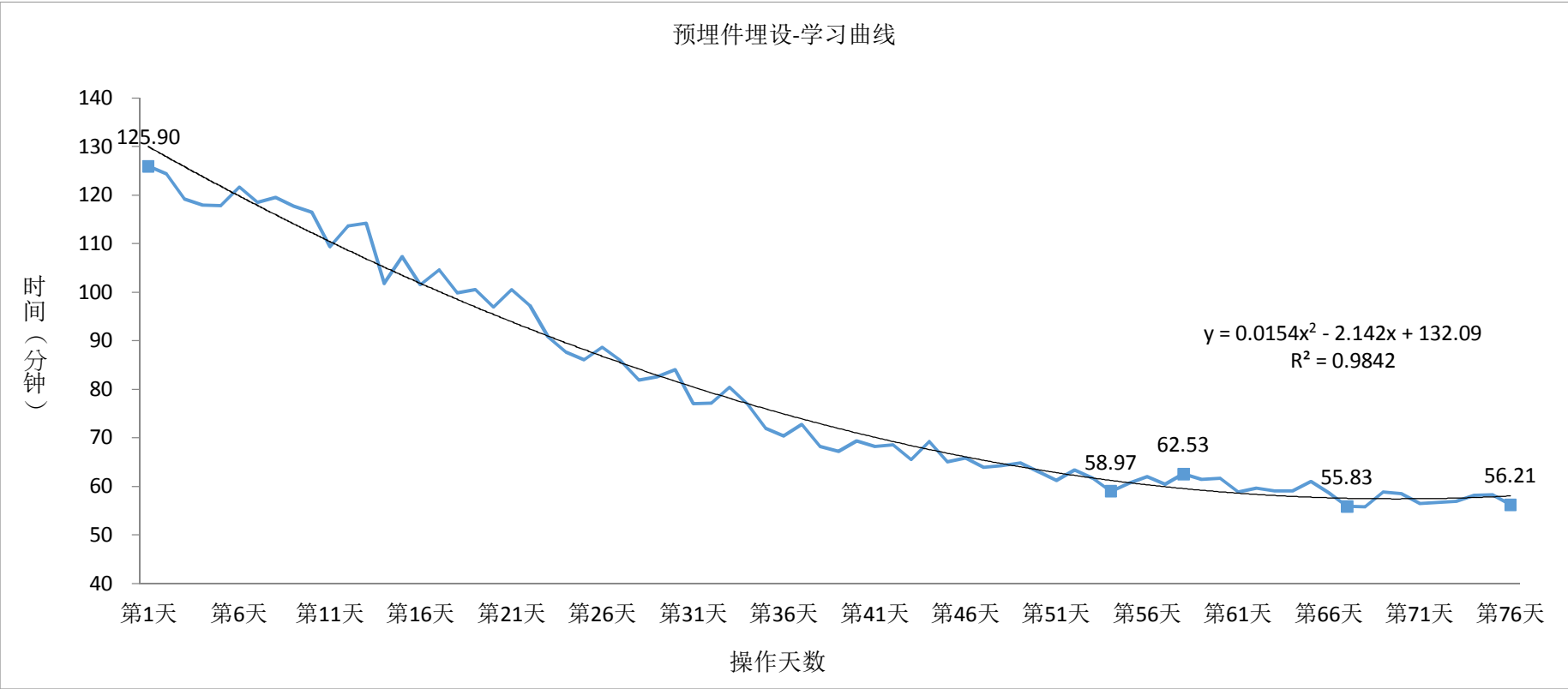


图 5.6 预埋件埋设学习曲线

Fig 5.6 The learning curve of burying embedded parts

### 5.5.2 浇筑阶段各项工序学习曲线分析

#### ① 浇筑前检查学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.7 所示。

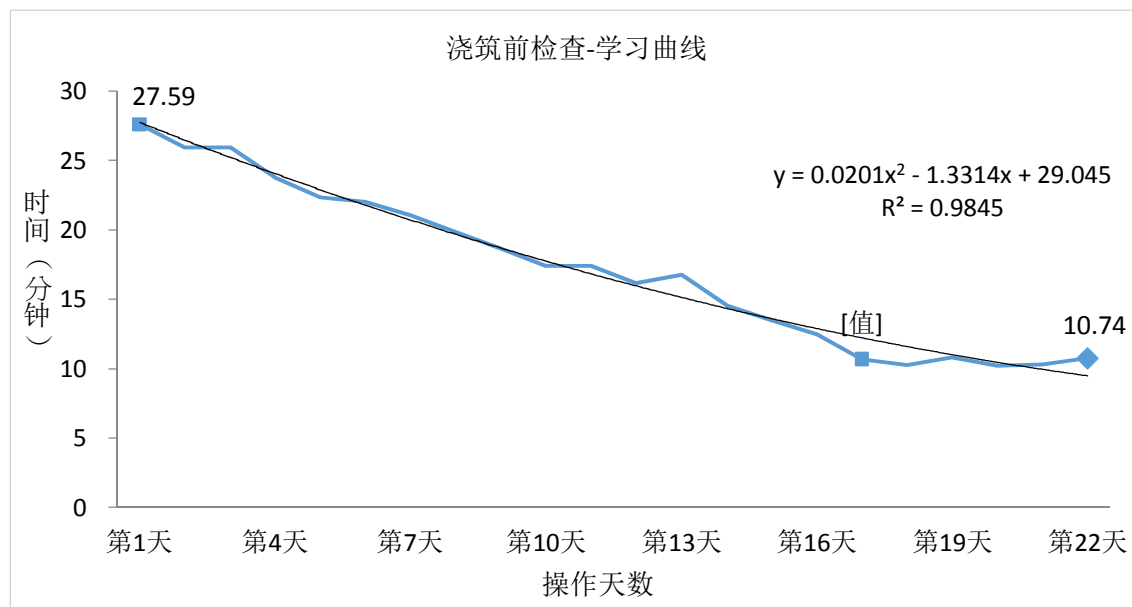


图 5.7 浇筑前检查学习曲线

Fig 5.7 The learning curve of inspection before pouring

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现浇筑前检查工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 28 分钟。
- 2) 工人在第 17 至 22 天，操作时间趋于稳定，最长为 10.81 分钟，最短为 10.19 分钟，差距在 1 分钟以内，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 17 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 11 分钟，相较于非熟练工节约时间 17 分钟，效率提升 60.7%。
- 5) 从整体来看，学习效率较为稳定，波动不大，说明工人在学习的过程中表现出持续不断、稳定进步的现象，也从侧面反映出该项工序工人学习情况和掌握程度良好。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.0201x^2 - 1.3314x + 29.05, & x < 17 \\ 11, & x \geq 17 \end{cases}, R^2=0.9845, \text{ 满足显著性}$$

检验。

## ② 混凝土浇筑学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.8 所示。

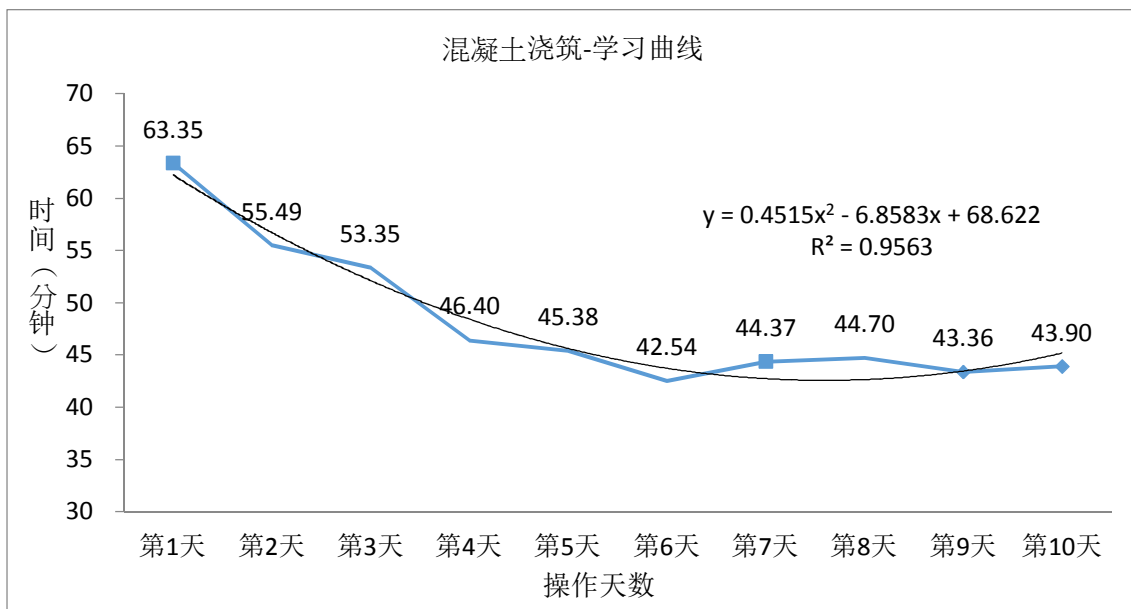


图 5.8 混凝土浇筑学习曲线

Fig5.8 The learning curve of concrete casting

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现混凝土浇筑工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 63 分钟。
- 2) 工人在第 6 至 10 天，操作时间有小幅波动，最长为 44.7 分钟，最短为 43.36 分钟，差距约为 1 分钟，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 6 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 44 分钟，相较于非熟练工节约时间 19 分钟，效率提升 30.2%。
- 5) 从整体来看，学习曲线的起伏稍大，说明此项工序受环境影响较大，操作不稳定性较大。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.4515x^2 - 6.8583x + 68.62, & x < 6 \\ 44, & x \geq 6 \end{cases}, R^2=0.9563, \text{ 满足显著性}$$

检验。

## ③ 粉光与拉毛学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.9

所示。

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现粉光与拉毛工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 93 分钟。
- 2) 工人在第 91 至 106 天，操作时间趋于平稳，在这 15 天中最长为 32.32 分钟，最短为 29.64 分钟，差距很小，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 90 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 32 分钟，相较于非熟练工节约时间 61 分钟，效率提升 65.6%。
- 5) 熟练工养成期间，出现几个短暂平台现象，分别在 6 天、20 天、80 天左右，此后操作时间又继续下降，说明在此项工作的学习过程中，一开始并非达到熟练工水平，要注意识别平台假象，需要持续学习培训，改进相关措施，才能突破“假平台”达到真正的标准熟练工的操作水平。
- 6) 虽然期间出现从整体来看，在学习初期学习曲线波动稍大，之后出现不断下降趋势，说明工人在初学时困难稍大，不易掌握关键技巧，也从侧面反映出该项工序的复杂程度和难度系数。

7) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.0023x^2 - 0.9x + 96.97, & x < 90 \\ 32, & x \geq 90 \end{cases}, R^2=0.9765, \text{ 满足显著性检验。}$$



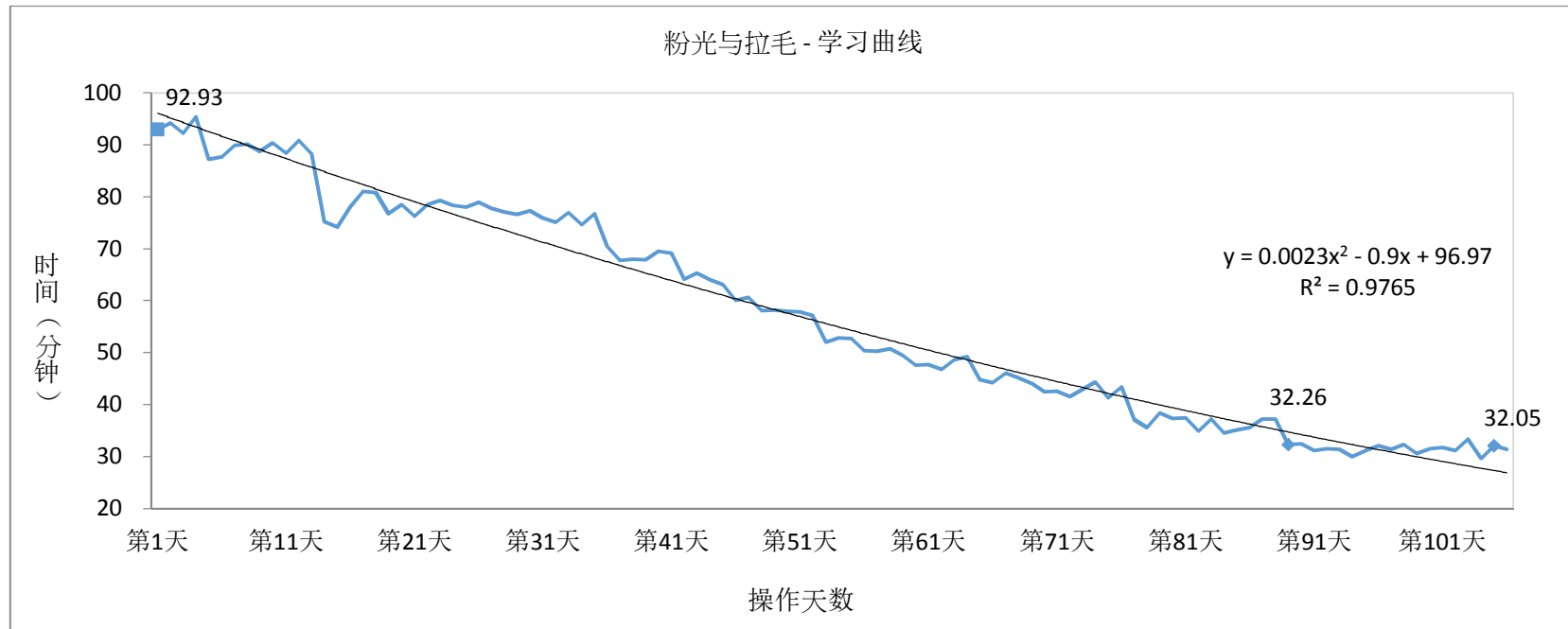


图 5.9 粉光与拉毛学习曲线

Fig 5.9 The learning curve of powdering

## ④ 治具拆除学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间,得到这项工序的学习曲线,如图 5.10 所示。

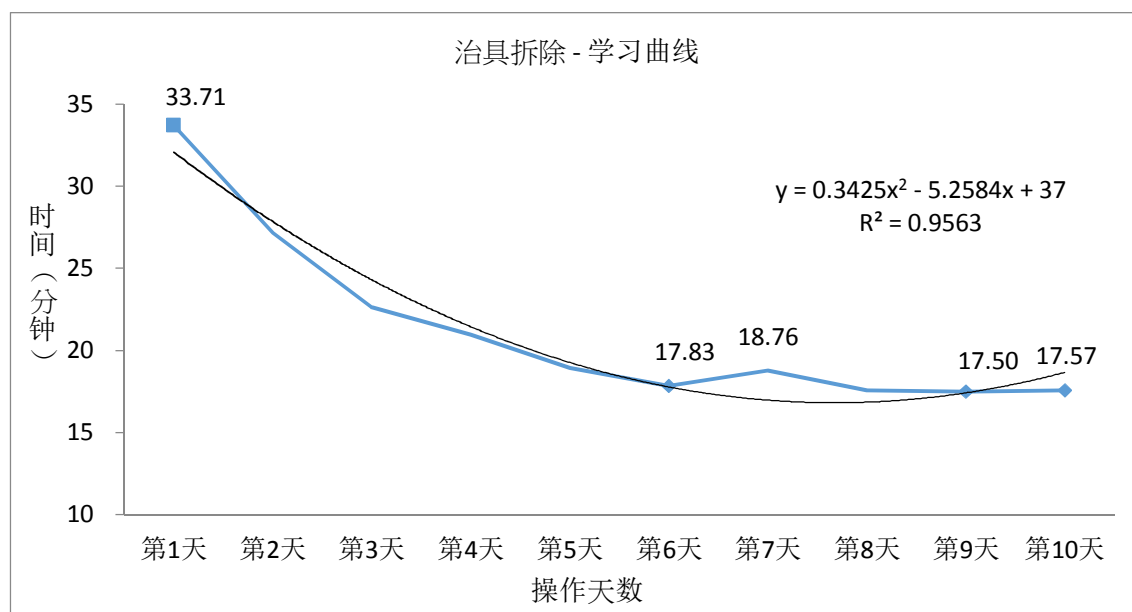


图 5.10 治具拆除学习曲线

Fig 5.10 The learning curve of removing fixtures

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间,由图可发现治具拆除工序学习曲线的特点有:

- 1) 工人初始操作时间约为 34 分钟。
- 2) 工人在第 6 至 10 天,操作时间有小幅波动,最长为 18.76 分钟,最短为 17.50 分钟,差距约为 1 分钟,可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 6 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 18 分钟,相较于非熟练工节约时间 16 分钟,效率提升 47.1%。

5) 从整体来看,在前 3 天学习曲线的斜率大,第 3 至 6 天斜率稍缓,说明工人初期学习速度快,工作内容和技巧容易掌握,改进速度可观。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为:

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.3425x^2 - 5.2584x + 37, & x < 6 \\ 18, & x \geq 6 \end{cases}, R^2=0.9563, \text{满足显著性检验。}$$

## ⑤ 混凝土养护（蒸汽）学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间,得到这项工序的学习曲线,如图 5.11 所示。

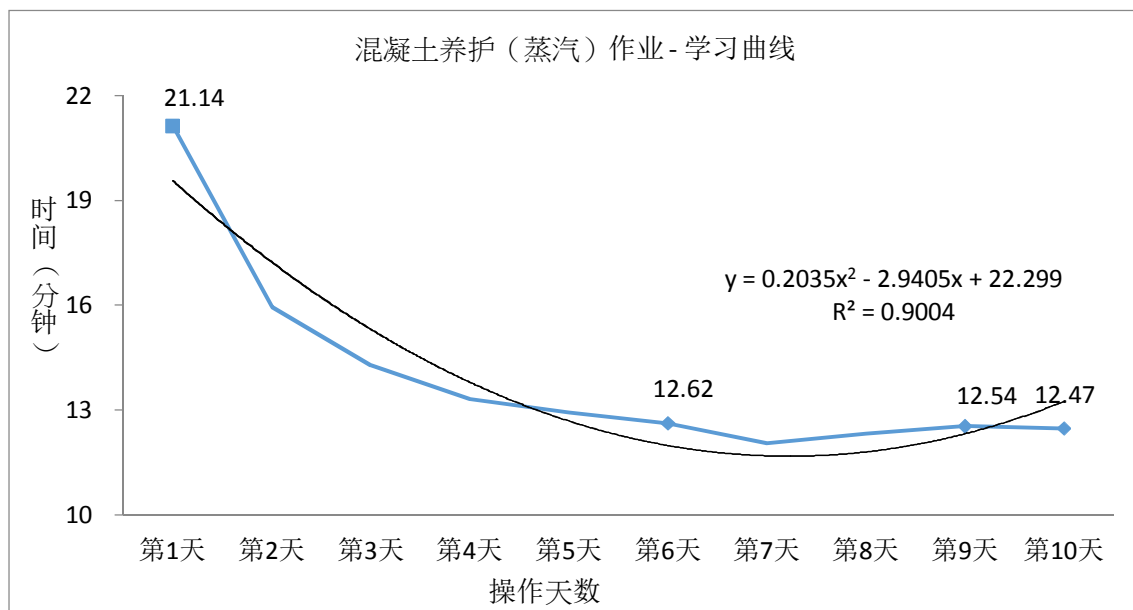


图 5.11 混凝土养护（蒸汽）学习曲线

Fig 5.11 The learning curve of concrete curing

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现混凝土养护（蒸汽）工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 22 分钟。
- 2) 工人在第 6 至 10 天，操作时间有小幅波动，最长为 12.62 分钟，最短为 12.05 分钟，差距不到 1 分钟，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 6 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 12 分钟，相较于非熟练工节约时间 10 分钟，效率提升 83.3%。
- 5) 从整体来看，在第 2 天工人操作时间就减少到 14 分钟，已经接近最终标准，说明在第 2 天工人就基本达到熟练工的操作水平，学习速度非常快，改进空间巨大。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.2035x^2 - 2.9405x + 22.299, & x < 6 \\ 12, & x \geq 6 \end{cases}, R^2=0.9004, \text{ 满足显著性检验。}$$

检验。

### 5.5.3 浇筑后各项工序学习曲线分析

#### ① 拆除模具学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.12 所示。

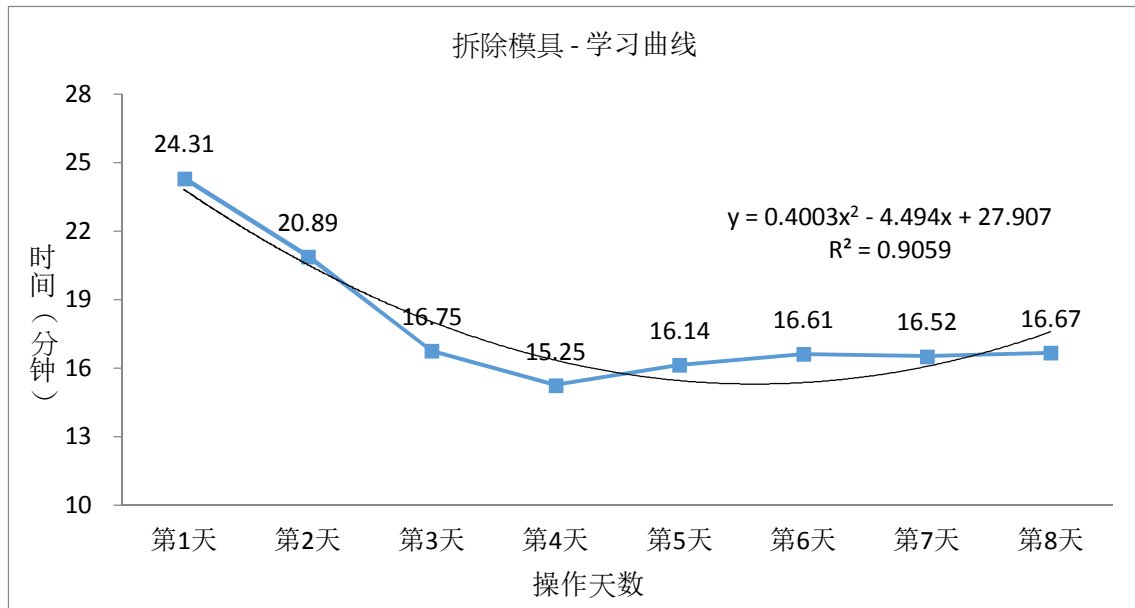


图 5.12 拆除模具学习曲线

Fig 5.12 The learning curve of removing moulds

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现拆除模具工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 24 分钟。
- 2) 工人在第 5 至 8 天，操作时间趋于稳定，在 16.16~16.67 之间波动，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 5 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 16 分钟，相较于非熟练工节约时间 8 分钟，效率提升 33.3%。
- 5) 从整体来看，学习曲线斜率较大，学习速度较快。
- 6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.4003x^2 - 4.494x + 27.91, & x < 5 \\ 16, & x \geq 5 \end{cases}, R^2=0.9095, \text{ 满足显著性检}$$

验。

## ② 脱模学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.13 所示。

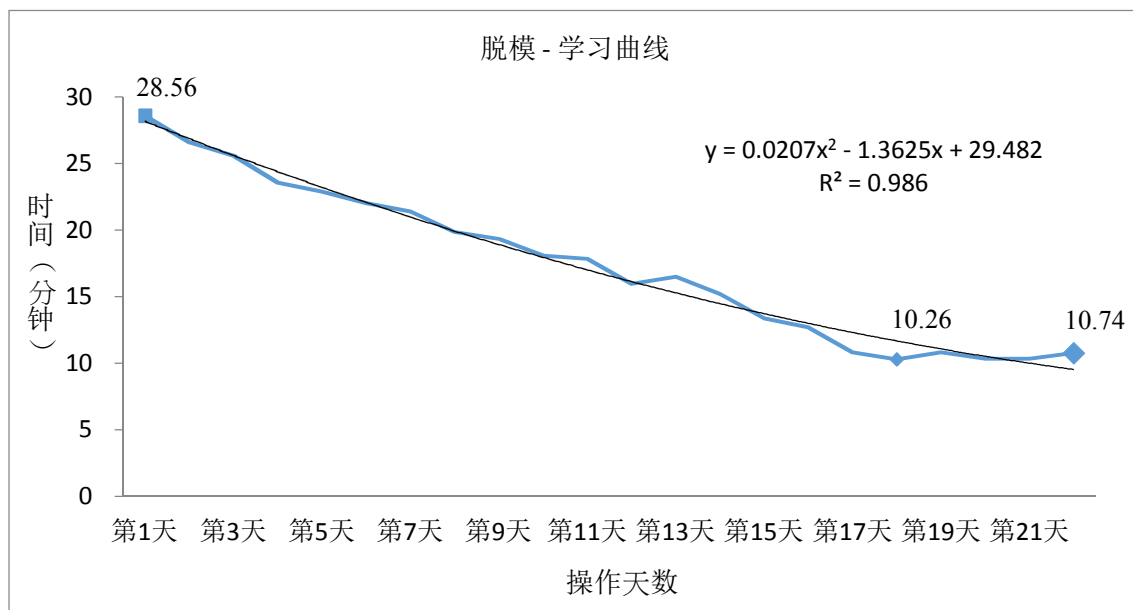


图 5.13 脱模学习曲线

Fig 5.13 The learning curve of demoulding

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现脱模工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 29 分钟。
- 2) 工人在第 18 至 22 天，操作时间趋于稳定，最长为 10.8 分钟，最短为 10.26 分钟，差距在 1 分钟以内，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间为 18 天。
- 4) 熟练工的操作时间约为 10 分钟，相较于非熟练工节约时间 19 分钟，效率提升 65.5%。
- 5) 从整体来看，学习曲线比较平滑，说明此项工序学习速度和效率平稳提升，工人学习情况比较稳定。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.0207x^2 - 1.3625x + 29.48, & x < 18 \\ 10, & x \geq 18 \end{cases}, R^2=0.9860, \text{ 满足显著性检验。}$$

检验。

### ③ 构件修补学习曲线分析

通过观察记录 30 位工人的实际操作时间，得到这项工序的学习曲线，如图 5.14 所示。

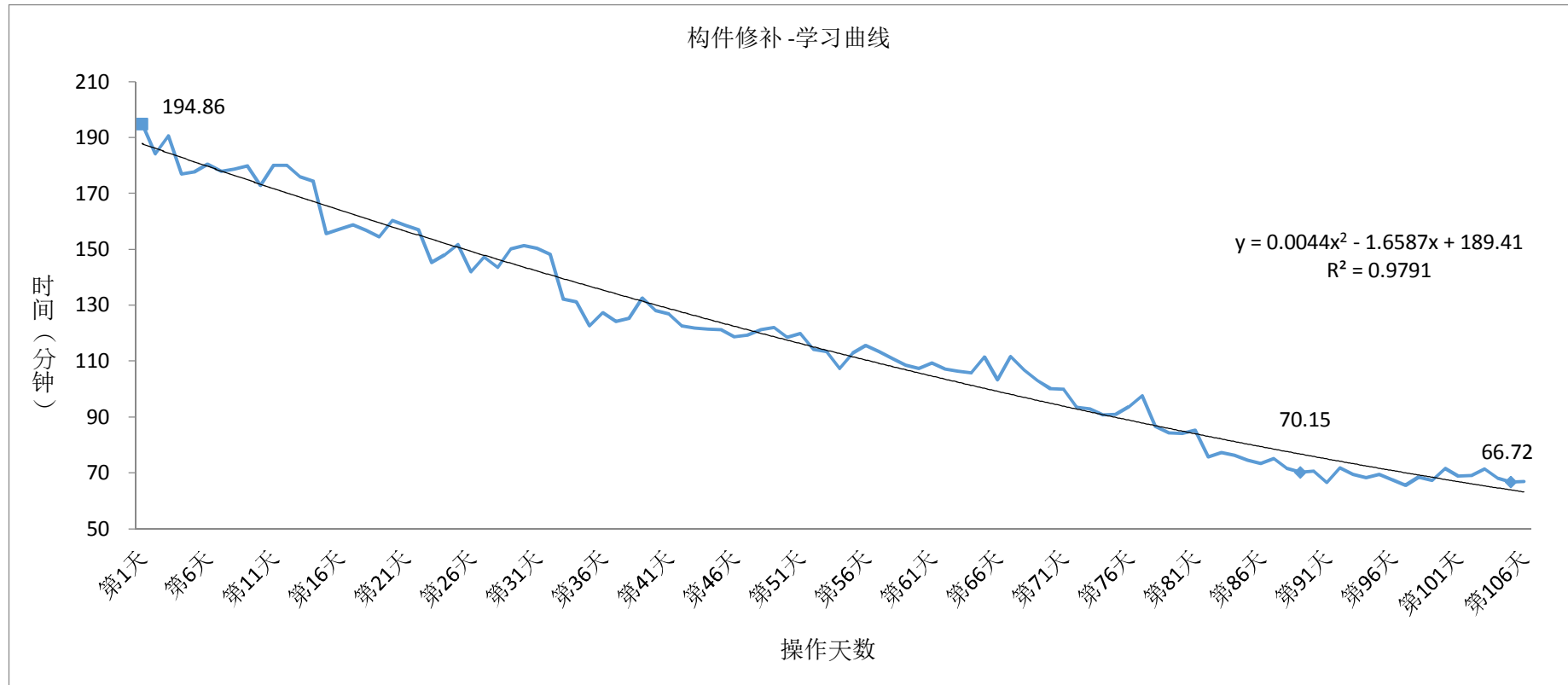


图 5.14 构件修补学习曲线

Fig 5.14 The learning curve of concrete element mending

根据记录、整理、分析 30 位工人操作的平均时间，由图可发现构件修补工序学习曲线的特点有：

- 1) 工人初始操作时间约为 195 分钟。
- 2) 工人在第 90 至 106 天，操作时间最长为 71.81 分钟，最短为 65.56 分钟，虽有小幅波动，但是曲线整体基本平稳，可以认为已经达到稳定的操作水平。
- 3) 熟练工养成时间约为 90 天。
- 4) 对第 90 天至 106 天的操作时间取平均值，得到熟练工的操作时间约为 68 分钟，相较于非熟练工节约时间 127 分钟，效率提升 65.1%。
- 5) 分析学习曲线的整体情况可以发现，该项工序学习曲线虽然整体呈现持续下降的特点，但是期间起伏较大，波动明显；在第 90 天后，操作时间仍然有小幅波动，说明此项工序所耗时间与构件本身待修补程度紧密相关，但一位熟练工可以大幅降低受其影响的程度。

6) 通过 SPSS 软件拟合分析得出该工序的学习曲线方程式为：

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.0044x^2 - 1.6587x + 189.41, & x < 90 \\ 68, & x \geq 90 \end{cases}, R^2=0.9791, \text{ 满足显著}$$

性检验。

#### 5.5.4 各项工序学习曲线分析小结

汇总以上信息，得到下列表格 5.5，通过分析 14 道工序学习曲线，得出以下几点结论：

① 从熟练工养成时间来看，放样（铁件位置）、预埋件埋设、粉光与拉毛、构件修补四道工序所耗时间最长，分别为 150 天、55 天、90 天和 90 天，约是其他工序的 3~10 倍，表明这 4 道工序工人学习最慢，工作内容也最为复杂，故这四道工序专业技术人才应为企业培养和关注的重点，应随时注意人才的储备和及时补充。

② 从效率提升幅度来看，放样（铁件位置）、木模放置提升空间最大，分别为 86.2%和 71.1%；粉光与拉毛、脱模、构件修补这三道工序改进率约为 65%，处于中间水平；混凝土浇筑和模具拆除工序提升空间较小，分别为 30.2%和 33.3%。说明放样（铁件位置）、木模放置、粉光与拉毛、脱模、构件修补这几道工序可以通过学习和培训大幅提升生产效率，学习训练对工人生产效率的影响大，因此企业应加大力度培养这几类工人，让熟练工为企业创造更大的价值。

③ 从单位时间效率提升幅度来看，放样（铁件位置）、预埋件埋设、粉光与拉毛、构件修补四道工序改进最为缓慢，单位时间改进效率在 1%以下，与结论①吻合；木模放置、治具拆除、混凝土养护（蒸汽）的单位时间改进效率最快，均在 8%左右；模板组装、模具拆除的单位时间改进效率约为 6.7%。

表 5.5 学习曲线分析表（1）

Table5.5 Learning curve analysis（1）

编号	工序名称	初做时间 (分钟)	熟练工操作时 间 (分钟)	熟练工养成 时间 (天)	改进时间 (分钟)	回归方程	显著性检验
1	模板清扫（钢模）	63	24	20	39	$y = 0.0536t^2 - 2.9868t + 63.91, 0 < t < 20$ $y=24, t \geq 20$	$R^2 = 0.9903$
2	模板组装（组模）	41	19	8	22	$y = 0.1871t^2 - 4.0958t + 39.82, 0 < t < 28$ $y=19, t \geq 8$	$R^2 = 0.9092$
3	放样（铁件位置）	94	13	150	81	$y = 0.0008t^2 - 0.6633t + 96.90, 0 < t < 150$ $y=13, t \geq 150$	$R^2 = 0.9935$
4	吊放钢筋笼	53	30	15	23	$y = 0.0728t^2 - 2.8763t + 58.64, 0 < t < 15$ $y=30, t \geq 15$	$R^2 = 0.9634$
5	木模放置	38	11	9	27	$y = 0.2528t^2 - 5.6993t + 41.09, 0 < t < 9$ $y=11, t \geq 9$	$R^2 = 0.9720$
6	预埋件埋设	126	60	55	66	$y = 0.0154t^2 - 2.1420t + 132.09, 0 < t < 55$ $y=60, t \geq 55$	$R^2 = 0.9842$
7	浇筑前检查	28	11	17	17	$y = 0.0201t^2 - 1.3314t + 29.05, 0 < t < 17$ $y=11, t \geq 17$	$R^2 = 0.9845$
8	混凝土浇筑	63	44	6	19	$y = 0.4515t^2 - 6.8583t + 68.62, 0 < t < 7$ $y=44, t \geq 7$	$R^2 = 0.9563$
编号	工序名称	初做时间	熟练工操作时	熟练工养成	改进时间	回归方程	显著性检验



		(分钟)	间(分钟)	时间(天)	(分钟)		
9	粉光与拉毛	93	32	90	61	$y = 0.0023t^2 - 0.9000t + 96.97, 0 < t < 90$ $y=32, t \geq 90$	$R^2 = 0.9765$
10	治具拆除	34	18	6	16	$y = 0.3425t^2 - 5.2584t + 37.00, 0 < t < 6$ $y=18, t \geq 6$	$R^2 = 0.9563$
11	混凝土养护(蒸汽)	22	12	6	10	$y = 0.2035t^2 - 2.9405t + 22.30, 0 < t < 6$ $y=12, t \geq 6$	$R^2 = 0.9004$
12	拆除模具	24	16	5	8	$y = 0.4003t^2 - 4.4940t + 27.91, 0 < t < 5$ $y=16, t \geq 5$	$R^2 = 0.9059$
13	脱模	29	10	18	19	$y = 0.0207t^2 - 1.3625t + 29.48, 0 < t < 18$ $y=10, t \geq 18$	$R^2 = 0.9860$
14	构件修补	195	68	90	127	$y = 0.0044t^2 - 1.6587t + 189.41, 0 < t < 90$ $y=68, t \geq 90$	$R^2 = 0.9791$

备注①：改进时间=初做时间－熟练工操作时间

备注②：t 表示施作天数，且取正整数

从上述分析可知，有的工序虽然单位时间提升效率缓慢，但成为熟练工后可大幅提升生产效率，针对这部分工序企业应该充分保证其学习培训时间，成为熟练工后可为企业创造巨大价值；有的工序提升少且学习时间短，企业可以在订单量突增时合理应对，及时制定计划补充人员供给。上述表格可简化为下表 5.6。

表 5.6 学习曲线分析表（2）

Table 5.6 Learning curve analysis (2)

编号	工序名称	熟练工养成时间 (天)	改进时间 (分钟)	总效率提升 (%)	单位时间效率提升 (%)
1	模板清扫（钢模）				
2	模板组装（组模）				☆☆
3	放样（铁件位置）	○○○		☆☆☆	○
4	吊放钢筋笼				
5	木模放置			☆☆	☆☆☆
6	预埋件埋设	○			
7	浇筑前检查				
8	混凝土浇筑				
9	粉光与拉毛	○○		☆	○
10	治具拆除				☆☆☆
11	混凝土养护（蒸汽）				☆☆☆
12	拆除模具				☆☆
13	脱模			☆	
14	构件修补	○○		☆	○

备注①：总效率提升（%）=改进时间/初做时间。

备注②：单位时间效率提升（%）=总效率提升（%）/熟练工养成时间。

备注③：○○○表示熟练工养成时间最长，○○表示熟练工养成时间第二长，○熟练工养成时间第三长。

备注④：☆☆☆表示改进程度最优，☆☆表示改进程度较优，☆表示改进程度一般。

## 5.6 人力配置优化结果及分析

### 5.6.1 人力配置优化结果

#### ①第一次优化

根据第 4 章分析，构件修补工序与路径 1 并行，对其余 13 道工序操作时间无影响，故第一次优化的对象对路径 1 的 13 道工序。每项工序的具体分析如下：

表 5.7 可优化工序时间—成本分析表

Table5.7 Time-Cost analysis of optimized process

编号	工序名称	配置人数 (A)	初做时间 (分钟) (B)	熟练工操作时间 (分钟) (C)	熟练工养成时间 (分钟) (D)	非熟练工日薪 (元) (E)	熟练工日薪 (元) (F)	改进时间 (分钟) (G)	增加成本 (元) (H)
1	模板清扫（钢模）	1	63	24	20	240	280	39	40
2	模板组装	2	41	19	8	220	260	22	80
3	放样（铁件位置）	3	94	13	150	460	600	81	420
4	吊放钢筋笼	3	53	30	15	240	280	23	120
5	木模放置	1	38	11	9	220	260	27	40
6	预埋件埋设	2	126	60	55	400	540	66	280
7	浇筑前检查	1	28	11	17	240	280	17	40
8	混凝土浇筑	3	63	44	6	220	260	19	120
9	粉光与拉毛	1	93	32	90	420	580	61	160
10	治具拆除	1	34	18	6	200	240	16	40
11	混凝土养护（蒸汽）	2	22	12	6	200	240	10	80
12	拆除模具	2	24	16	5	200	240	8	80
13	脱模	3	29	10	18	240	280	19	120
总计			708					408	

备注①：改进时间=熟练工操作时间—非熟练工操作时间，即 G=C-B

备注②：增加成本=改进时间×配置人数×（熟练工日薪-非熟练工日薪），即 H=G×A×(F-E)

由上表可知，以上 13 道工序全部配置非熟练工时，一共耗时 708 分钟。而每天的工作时间为 480 分钟，则需要至少优化  $708-480=228$  分钟。将 1~13 道工序任意组合，这样的方案共有  $2^{13}$  种，从中挑选出减少的时间  $\Delta T \geq 228$  分钟且增加的人力成本最小组合，即为求解结果。则对应的目标函数变为：

$$\begin{cases} Z_1 = \min \sum_{i=1}^{13} [a_i \cdot Q_i \cdot (D_i - C_i)] \\ \sum_{i=1}^{13} a_i [f_i(1) - g_i(t)] \geq 228 \end{cases}$$

通过 Visual Studio 运行分析得到的结果为：将模板清扫（钢模）、木模放置、治具拆除、粉光与拉毛、模板组装、预埋件埋设这 7 项工序的非熟练工替换为熟练工，其余的 6 道工序配置非熟练工，使总操作时间变为 477 分钟（小于 480 分钟），且增加的人力成本最小为 640 元，总人力成本为 7480 元。具体配置结果如下：

表 5.8 第一次优化后人力配置方案

Table 5.8 Optimized human resource allocation for the first time

编号	工序名称	配置人数	是否为熟练工	操作时间 (分钟)	总人力成本 (元)
1	模板清扫（钢模）	1	是	24	280
2	模板组装（组模）	2	是	19	520
3	放样（铁件位置）	3		94	1380
4	吊放钢筋笼	3		53	720
5	木模放置	1	是	11	260
6	预埋件埋设	2	是	60	1080
7	浇筑前检查	1		28	240
8	混凝土浇筑	3		63	660
9	粉光与拉毛	1	是	32	580
10	治具拆除	1	是	18	240
11	混凝土养护（蒸汽）	2		22	400
12	拆除模具	2		24	400
13	脱模	3		29	720
总计				477	7480

## ③ 第二次优化

当经过 5 天后，拆除模具工序熟练工养成；当经过 6 天后，混凝土浇筑和混凝土养护（蒸汽）熟练工养成，需要对这三道工序进行调薪。此时的操作时间如下所示：

表 5.9 第一次优化后时间—成本分析表（第 6 天）

Table 5.9 Time-Cost analysis table after the first optimization (the sixth days)

编号	工序名称	配置人数	是否为熟练工	操作时间（分钟）	总人力成本（元）
1	模板清扫（钢模）	1	是	24	280
2	模板组装	2	是	19	520
3	放样（铁件位置）	3		93	1380
4	吊放钢筋笼	3		44	720
5	木模放置	1	是	11	260
6	预埋件埋设	2	是	60	1080
7	浇筑前检查	1		22	240
8	混凝土浇筑	3	是	44	780
9	粉光与拉毛	1	是	32	580
10	治具拆除	1	是	18	240
11	混凝土养护（蒸汽）	2	是	12	480
12	拆除模具	2	是	16	480
13	脱模	3		22	720
总计				417	7760

从上表可以看出，第一次优化后有 7 道工序为非熟练工，其操作时间不断减少，使得总耗时最终减少至 417 分钟，远远小于 480 分钟；同时，由于拆除模具、混凝土浇筑和混凝土养护（蒸汽）薪资提高，导致总人力成本增加至 7760 元，此时的人力配置并不是最优的。通过第二次优化：在尽可能多的减少人力成本的情况下，将以上部分工序中的熟练工替换为非熟练工，并使总操作时间在 480 分钟以内即  $\Delta T \leq 480 - 417 = 63$  分钟，则对应的目标函数变为：

$$\begin{cases} Z_1 = \max \sum_{i=1}^m [a_i \cdot Q_i \cdot (D_i - C_i)] \\ \sum_{i=1}^m a_i [f_i(t) - g_i(t)] \leq 63 \end{cases}$$

根据上表,共有9项工序的工人全为熟练工,故第二次可优化的工序数量为9,共有 $2^9$ 种方案。通过 Visual Studio 运行,从中筛选出 $\Delta T \leq 63$ 分钟且人力成本减少最多的方案即为最佳方案。最终得到的结果为:将模板组装、混凝土浇筑、混凝土养护(蒸汽)和拆除模具这4项工序的熟练工替换为非熟练工,使总操作时间变为476分钟(小于480分钟),且减少的人力成本最多为360元,总人力成本为7400元。具体配置结果如下:

表 5.10 第二次优化后人力配置方案

Table 5.10 Optimized human resource allocation for the second time

编号	工序名称	配置人数	是否为熟练工	操作时间 (分钟)	总人力成本 (元)
1	模板清扫(钢模)	1	是	24	280
2	模板组装(组模)	2		41	440
3	放样(铁件位置)	3		93	1380
4	吊放钢筋笼	3		44	720
5	木模放置	1	是	11	260
6	预埋件埋设	2	是	60	1080
7	浇筑前检查	1		22	240
8	混凝土浇筑	3		63	660
9	粉光与拉毛	1	是	32	580
10	治具拆除	1	是	18	240
11	混凝土养护(蒸汽)	2		22	400
12	拆除模具	2		24	400
13	脱模	3		22	720
总计				476	7400

随着时间的进行,不断有非熟练工变为熟练工,当有熟练工出现且需要调整薪资时,则需要再一次优化。优化的方法与第二次类似,根据实际情况,判断是需要“增加熟练工减少操作时间”还是“减少熟练工增加操作时间”,再从若干方案中

选择总成本最小的方案，即为人力配置最优方案。

#### ④ 第 1 至 5 次优化结果

本文将前 1 至 5 次的优化结果用下列表格列出。

表 5.11 人力配置优化结果（第 1-5 次）

Table 5.11 Manpower allocation optimization results (1<sup>st</sup> to 5<sup>th</sup>)

优化次数		熟练工 人数	非熟练工 人数	总操作时间 (分钟)	总人力成本 (元)	配置熟练工工序
第 1 次 优化	前	0	25	708	6840	无
	后	8	17	477	7480	1、2、5、6、9、10
第 2 次 优化	前	15	10	417	7760	1、2、5、6、8~12
	后	6	19	476	7400	1、5、6、9、10
第 3 次 优化	前	15	10	386	7760	1、2、5、6、8~12
	后	8	17	479	7280	1、2、5、9、10、11
第 4 次 优化	前	20	5	428	7750	1、2、4、5、7~13
	后	12	13	476	7440	1、2、4、5、7、9、10、12
第 5 次 优化	前	17	8	423	7640	1、2、4、5、7~12
	后	9	16	473	7320	1、2、5、7、9、10、12

## 5.6.2 输出结果分析

### ① 模型求解结果

#### 1) 动态人力配置方案

从以上表格可以看出，每次优化后熟练工与非熟练工人数、匹配的工序均有变化，且每次优化后的人力成本均比优化前低。

出现这样现象的原因是：这 13 道工序同时存在熟练工与非熟练工，优化的空间则来自于非熟练工转变为熟练工的过程。一方面，当非熟练工处在养成阶段时，其生产效率是不断提升的，但获得的却是较低的工资（非熟练工工资），相当于企业在付出较低的成本的同时获得了不断增加的生产力，对企业来讲是有利的；同时，非熟练工的操作时间不断减少，使得可利用的机动时间越来越多（在计划作业时间不变的前提下），可优化的空间越来越大，所以可以通过调整熟练工与非熟练工的配比，充分利用机动时间，减小人力成本。正是由于非熟练工存在，才使生产流程有了优化的空间和意义，才会出现人力成本优化越来越低的情况。

#### 2) 工序的调整规律

根据上述配置结果可以看出，第 1、5、6、7、9、10 等工序几乎在每次方案

中都被选择为配置为熟练工。出现这样现象的原因是：1、5、7、9、10 这几项工序从非熟练工转换为熟练工大约只需要 2 周时间，熟练工养成时间短，可在较短时间内提高生产效率；同时，这几项工序变为熟练工后，效率改进幅度均在 50%-65%，说明配置熟练工后对总操作时间的改进效果明显；最重要的是，这几项工序薪资偏低，且非熟练工和熟练工之间的薪酬差距不大，使得“生改熟”时人力成本增加小。综合以上三个因素，在进行方案组合时，这几道工序成为最佳方案中的必选项之一。

② 识别关键工序及划分作业等级。根据刻画的学习曲线图，可以发现各项工序的学习速度均出现负加速变化的特点。以熟练工养成时间的长短为标准，判断工序的难易程度，并将其分成 A、B、C 三类，其中 A 类为简单工序、B 类为较难工序、C 类为关键工序。具体结果见下表：

表 5.12 各项工序熟练工养成时间

Table 5.12 Skilled worker's developed time of each proceasure

类别	工序编号	工序名称	熟练工养成时间（天）	备注
A	2	模板组装（组模）	8	简单工序
	5	木模放置	9	
	8	混凝土浇筑	6	
	10	治具拆除	6	
	11	混凝土养护（蒸汽）	6	
	12	拆除模具	5	
B	1	模板清扫（钢模）	20	较难工序
	4	吊放钢筋笼	15	
	7	浇筑前检查	17	
	13	脱模	18	
C	6	预埋件埋设	55	关键工序
	9	粉光与拉毛	90	
	14	构件修补	90	
	3	放样（铁件位置）	150	

1) 针对 C 类工序，放样（铁件位置）、预埋件埋设、粉光与拉毛、构件修补四道工序养成时间最久，说明其难度最大、操作最复杂。这四项工序学习困难，培训成本高，可替代性小，应作为企业重点培训对象，做好人才的培育保留措施。同时，根据学习曲线图分析得知，越复杂的工序，学习的波动性越大，具体表现



为非熟练工在学习期间出现几次短暂的平台现象，即阶段性学习瓶颈，且达到熟练工水平后仍有较大波动，操作时间不太稳定。因此，对于 C 类工序需要持续跟进、反复训练、加强考核，以期消除平台假象，使工人真正的、稳定的达到极值状态。

2) 针对 A 类工序，工人经过较为短暂的学习和实操就能从非熟练工转换为熟练工，实现生产力的提升，说明企业可以快速培训、实现人才的积累，也反映出 A 类工人可替代性强，不是企业的关键性技术人才。

3) 制订培训计划。不同的订单对工人的供给数量、供给强度、供给时间均有差异，企业可根据各项工序的熟练工养成时间有计划、有安排的进行人才循序渐进的培养，做好的各类型工人的积累和及时、充分供给。比如 C 类工人学习时间长，企业在早期就应开始培训，充分保证其学习时间和学习资源的供给；A 类工人成长速度快，可以实现熟练工的快速补位，可适当后置或延缓其学习时间和资源分配，将前期资源分配给其他复杂工序，降低资源供给强度，实现资源的平衡、充分利用。

③ 识别标准工时。根据学习曲线图，可以判断出熟练工生产效率的极值点，即最少的操作时间，该时间可以作为标准工时的制定参考。具体如下表所示：

表 5.13 各项工序标准工时

编号	工序名称	熟练工操作时间（分钟）
1	模板清扫（钢模）	24
2	模板组装（组模）	19
3	放样（铁件位置）	13
4	吊放钢筋笼	30
5	木模放置	11
6	预埋件埋设	60
7	浇筑前检查	11
8	混凝土浇筑	44
9	粉光与拉毛	32
10	治具拆除	18
11	混凝土养护（蒸汽）	12
12	拆除模具	16
13	脱模	10
14	构件修补	68
合计		368

1) 制订标准工时。学习曲线计算出的熟练工的操作时间是根据几十位工人的统计数据得出的,具有一定的代表性和普适性,将其作为工厂制定标准工时的参考和依据具有可行性。2) 考核培训效果。通过记录非熟练工在规定的学习时间内学习速度和操作水平,作为考核培训效果的指标,若成功转换为熟练工,则说明培训效果良好,若与熟练工差距较大,则需要分析产生偏差的原因,及时调整培训计划。

综上所述,根据上述结果分析,既可以实现人力的优化配置,又可以根据熟练工操作时间和养成时间,识别出关键工序,并作为企业和高校制订培训计划和标准工时的参考,本文的两个目的都得以实现,说明构建的方案是合理可行的。

### 5.6.2 案例对大陆的借鉴意义

前文分析了台湾某预制构件厂的学习曲线,并对其模型运行结果进行了分析。虽然大陆的预制构件生产水平不及台湾,但是根据案例分析得出的许多方面的结论仍然适用于大陆。

首先是专业分工的细化。学习台湾细致的工序划分与专业人员配置,专业化分工越细致,越能提升生产效率。

第二是标准化设计和模板的可变性。台湾通过标准化设计减少了模板的制作费用,并且通过木模改变模板尺寸,满足各类型构件的生产;目前大陆的设计还未达到标准化,常常一套模板生产一批次构件后就不能再循环使用,造成巨大的浪费,因此大陆需要在标准化设计和模板可变性设计上提升。

第三是熟练工养成时间的改善。目前大陆的预制构件厂无法实现规模生产,工人学习机会不够,其熟练工学习时间必然较长,因此需要企业从其他维度提升工人的学习效率,比如课程体系建设、理论培训、企业自身管理水平的提升等,来缩短大陆与台湾学习时间的差距。

第四是关键工人的培育。虽然台湾与大陆的发展水平有差距,但工序和制作流程上是大同小异的,构件生产的关键节点也是一致的,因此,上述案例分析出的台湾关键工序也是大陆的关键工序。针对这类关键工序,大陆企业也需要做好人才的培育用留工作,保证关键人才的持续供给。

## 5.7 本章小结

本章节主要是通过实证研究验证优化方案的可行性和合理性。首先收集学习曲线数据、配置工人人数和工人薪资信息,再绘制各项工序的学习曲线并分析其特点,将学习曲线带入构建的优化方案,利用 Visual Studio 平台对优化组合进行筛选,选取符合时间目标且人力成本最小的配置方案,并对求解结果进行分析。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

随着建筑产业化的大力推广和发展，面对大规模的预制构件需求，企业如何在尽量控制成本的情况下提升自己的生产效率尤为重要。而目前预制构件生产工人稀缺，企业一方面需要高效利用现有工人，另一方面也需要有计划有针对性的培养关键技术人才，做好人才井喷式需求的应对之策。现行预制构件厂一般根据经验进行人员派遣，已有研究也大多根据线性规划模型进行单一的人员调控。本文通过构建人力优化方案，对预制构件生产各项工序进行动态人力配置，使其在规定的时间内完成构件生产，并使人力成本最低。

① 构建人力配置优化方案并进行实证研究。首先了解学习曲线理论及其应用范围，说明将学习曲线引入人力资源分配可有效改善人力配置。接着通过研究预制构件的生产过程，将其划分为 14 道工序，并利用学习曲线分析每道工序的学习特点。然后建立人力配置优化方案，该方案引入学习曲线理论，充分考虑了工人生产力的变化对分配方案的影响，实现人员的动态配置。最后，通过实证研究验证方案的可行性，利用 Visual Studio 筛选出同时满足时间目标和成本目标的方案组合，实现快速精确求解预制构件生产过程中人力成本最小的指派方案。

② 根据模型的求解过程，可以达成以下目的：

1) 求得最佳人力配置方案。

2) 求得各项工序熟练工养成时间，以及熟练工操作时间。这两类信息一是可以作为企业制订标准工时的参考，二是可以作为制定培训计划、安排考核节点、评价培训效果的参考。

3) 识别关键工序。根据熟练工养成时间，可以识别出关键工序。一方面，这些工序是企业必须重点关注的对象，对产品的质量、精度、交付结果产生重要影响，因此要严控操作过程，严抓质量；另一方面，这些工序技术含量较高，对应的工人也应是企业人才储备的重要对象。

4) 人员配置方案动态调整。工人的生产效率会随着经验的增加而增加，故其生产时间也会发生变化。为了顺应生产力变化趋势充分利用工人，企业需要定期调整人员分配方案，使人力配置达到最优。

5)

### 6.2 展望

①模型的应用

本文建立的模型，可以根据不同工序、工人所处的不同学习阶段或改变计划

产量或公司扩大生产线时，修改模型中的时间、成本限制式；或者可以根据工人生产力的变化来调整公司整体人力结构；还可以用于帮助企业判断人力需求人数，及时进行人才的招聘和培养，保证人才的及时补充。调整后的模型可以应用于不同行业，比如传统建筑行业、工厂生产线等，因为本模型具备可拓展性和广泛适用性。同时实证研究结果反映出，模型除了可以快速的求解最低人力成本的最佳指派组合外，还能分析出每项工序的熟练工养成时间以及关键工序，帮助企业合理制定培训计划和内容，安排考核节点和评价标准，促进传统建筑工人向产业化工人的转型。

## ②未来研究建议

本文的研究存在以下不足，一是本文主要研究的台座法施工过程中，梁柱构件的人力配置问题，针对流水施工、传送带施工，以及板、楼梯等预制构件类型的人力配置方案并未对其进行讨论，这可以作为后续研究方向。二是本文在方案构建时基于工人专业度和熟练度的考虑，提出假设条件之一是工人固定工位完成同一项工作，而针对某些简单、学习快速的工序，工人可以通过学习同时掌握几个的工作，进而引出工序之间的人力指派问题，这一角度也值得进一步研究和探索。

## 致 谢

时光总是来去匆匆，转眼间硕士生活已经接近尾声，我也即将离开学校迈入社会。我在重庆大学度过了七年的时光，这七年浓缩了我人生中最宝贵最难忘的青春，也是我成长最大收获最多的七年。

毕业论文是研究生三年知识的积累和学习缩影，这篇论文是在蔡珍红、刘贵文和徐鹏鹏三位老师的指导下完成的，他们三位是我在研究生阶段最感激也是最敬仰的人。蔡老师平时公务缠身，但也会时常关注我的生活情况和学习进展，难得闲暇时间也会与我讨论论文，确立论文题目及大纲。刘老师是一位优秀的学者，更是我人生的导师。他治学严谨、视野宽阔，他泰而不骄矜而不争，他大开大合勇求突破，不管从学术研究、思维方式，还是待人接物，刘老师的人格魅力都深深影响着我，教导着我。刘老师不仅是我学术路上的引路人，更是我人生路上的指明灯。徐老师在研究生期间指导我们完成多个项目，感谢他在项目开展过程中给予我们的信任、帮助、理解和包容，毕业期间他关心着我的论文从开题、大纲到成文的每一个过程，不断地帮助我梳理思路，明确研究的关键环节，指正研究中的问题，修改文章中的字句。没有三位老师的点滴付出，我无法完成顺利毕业论文，也无法在研究生三年收获成长。能受教于这三位老师实属幸运，师恩如山，学生自当铭记于心，不敢相忘。

此外，我还要感谢台湾中央大学的陈介豪老师和戴兴伟博士，在我赴台交流学习期间，给予我诸多帮助。陈老师学术底蕴丰厚，视野宽广，为我打开了研究的方向和思路；戴博士有着丰富的装配式建筑生产的实践经验，为我的论文提供数据来源，指导我论文的撰写，并提出意见和建议，给予我很大的支持和鼓励。同时，两位前辈丰富的生活阅历和精彩的人生体验也让我大为触动，深受启发，让我对未来多了一份憧憬、坦然和自信。这份宝贵的情谊将一生难忘。

更重要的是，这里有一群志同道合的同窗。回想一起做项目、一起准备面试、一起讨论学术的日子，虽艰辛忙碌，但也因陪伴变得甘甜。感谢 14 位优秀的同门，一路相伴，共同成长。

感谢我的父母，是他们无悔的支持和付出，让我求学之路毫无后顾之忧。家是最温暖的地方，家人是最坚强的后盾，每每想到此处，心中更是不敢懈怠，唯有奋勇前行。

感谢一路支持我帮助我的师长、朋友和同学，面对即将到来的新挑战，我将

继续笃定前行，不负期望。

最后感谢在百忙之中对我论文进行评阅各位专家教授！

**龙春晚**

二〇一七年五月 于重庆

## 参考文献

- 白瑞. 浅谈预制构件施工的质量控制[J]. 福建建材, 2010(5):75-76.
- 陈雷. 东北地区人力资源配置问题研究[D]. 东北师范大学, 2015.
- 陈世坤. 运用学习曲线建构人员职能评核模式[D]. 国立台湾大学. 电机工程学研究所硕士论文, 2005.
- 陈淑强. 基于学习曲线理论的 K 公司标准工时体系研究[D]. 山东大学, 2012.
- 陈怡如. 以精实管理及模拟优化求解高科技厂建厂施工人力数量问题[D]. 国立成功大学. 制造咨询与系统研究所硕士论文, 2013.
- 单联宏. 人力资源管理的关键——人岗匹配[J]. 技创业月刊, 2007, 1: 142-143.
- 范玉, 徐华, 黄新, 等. 新型装配式建筑构件生产及其施工技术的研究与应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(12):87-89.
- 冯建文. PC 构件生产线模具划线机自动编程系统研究[D]. 石家庄铁道大学, 2013.
- 侯步蟾. 基于环境学习曲线的我国重点行业节能减排潜力分析[D]. 华北电力大学(北京), 2011.
- 胡珉, 陆俊宇. 基于 RFID 的预制混凝土构件生产智能管理系统设计与实现[J]. 土木建筑工程信息技术, 2013, 5(3):54-60.
- 黄莉. 机械产品装配过程线上人员调度问题研究[D]. 合肥工业大学, 2013.
- 江姮臻. 考虑学习曲线下多重产品生产线之动态人力资源分配[D]. 台湾国立清华大学. 工业工程与工程管理学系学位论文, 2014.
- 江会. 三级综合医院神经内科患者分类及护理人力配置研究[D]. 第二军医大学, 2013.
- 李柏林. 考虑人员能力差异的装配生产线优化[D]. 广东工业大学, 2015.
- 李登龙. 建筑工业化的发展历程与趋势[J]. 建筑经济, 2014, 34(4):215-219.
- 李萍萍. 装配式 PC 构件配送成本优化研究[D]. 西安建筑科技大学, 2016.
- 李天华. 装配式建筑寿命周期管理中 BIM 与 RFID 应用研究[D]. 大连理工大学, 2011.
- 李贞仪. 项目监造人力指派优化决策模式研究[D]. 国立中央大学. 土木研究所硕士论文, 2005.
- 梁冠成. 混凝土预制构件生产周期内裂缝的形成及其防治[D]. 华南理工大学, 2009.
- 林家豪. 营造厂现场管理人力配置之研究[D]. 国立台湾科技大学. 营建工程研究所硕士论文, 2003.
- 刘春梅. 预制装配式混凝土建筑建造成本分析与控制[D]. 聊城大学, 2016.
- 刘从虎. 多装配线生产车间人力资源优化配置方法及支持系统研究[D]. 重庆大学, 2009.
- 刘晓勇. 电子类上市公司学习曲线实证研究[D]. 长沙理工大学, 2007.
- 苗延仁, 汪守仁, 林聪明. 学习曲线在少数制造成本上的应用[D]. 国立台湾科技大学. 工程技术研究所工业管理组硕士论文, 1986.

- 牛天安. 人力资源管理中人—岗匹配问题研究[J]. 经济视角(下), 2008, (10):56-57+21.
- 沈维莉, 张克纯. 基于 BIM 技术的装配式建筑技能人才培养研究[J]. 山西建筑, 2016, (34):216-217.
- 王佳镇. 学习曲线在通讯产业之应用—一个案研案[D]. 台湾国立交通大学. 工业工程与管理系硕士学位论文, 1999.
- 王景光. 系统人力资源的 Petri 网分配模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 04:106-1.
- 温日新. 预铸构件吊装顺序展示辅助工具之研究[D]. 国立台湾大学. 土木工程学研究所硕士学位论文, 2008.
- 吴杰. 住宅产业化之 PC 构件的精度控制及保护技术研究[J]. 建筑施工, 2010, 32(5):449-451.
- 肖鸣政. 试论人力资源配置及其作用与模式[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2001, (04):26-29.
- 徐雨濛. 我国装配式建筑的可持续性发展研究[D]. 武汉工程大学, 2015.
- 亚当·斯密. 国民财富的性质及其原因的研究[M]. 北京:商务印书馆, 1972.
- 鄢萍, 刘飞, 贺德强, 何勇, 易润忠. 网络化制造中的一种多功能信息终端[J]. 机械与电子, 2004, 05:3-6.
- 杨朝跃, 王磊. 建筑工业化住宅装配式(PC)技术应用[J]. 建筑安全, 2015, 30(3):4-9.
- 俞伟武. 营建工程短期人力指派优化模式之研究[D]. 国立中央大学. 土木工程研究所硕士学位论文, 2008.
- 袁利金. 人力资源质量成长的模糊综合动态测评算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, . 08:67-74.
- 袁有明. 人力资源管理中的人岗匹配问题[J]. 市场周刊(理论研究), 2008, (09):140-141+158.
- 张招华. 工业化建筑 PC 外墙施工技术与经济效益的研究[D]. 华南理工大学, 2013.
- 赵俊宏. 应用精实六标准差于预铸厂生产力改善[D]. 国立台湾大学. 工学院土木工程学系硕士学位论文, 2012.
- 周承群. 人岗匹配的影响因素及其提升对策研究[J]. 中国商界(下半月), 2010, (12):267+269.
- 周义, 王荣涛. 混凝土预制构件的生产管理[J]. 城市建设理论研究:电子版, 2013(26).
- 朱莉. 考虑学习曲线的项目人力资源分配研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- Adler, P. S, Clark, K. B. Behind the learning curve: a sketch of the learning process. Management Science, 1991, 37(3), 267-281.
- Benjaoran V, Dawood N. Development of an artificial intelligence planner framework for bespoke precast concrete production [J]. 2003.
- Benjaoran V, Dawood N. Intelligence approach to production planning system for bespoke precast concrete products [J]. Automation in Construction, 2006, 15(6):737-745.



- Blismas N, Wakefield R. Drivers, constraints and the future of offsite manufacture in Australia[J]. Construction Innovation: Information, Process, Management, 2000, 9(1):72-83.
- Chan W. T. and Hu, H. Constraint programming approach top re-cast production scheduling [J]. J. Constr. Eng. Manage., ASCE, 128 (6), 513-520(2002).
- Chan W. T. and Hu, H. Production scheduling for precast plants using a flow shop sequencing model [J]. Journal of Computing in Civil Engineering. 165-174, 2002.
- Conway, R, Schultz. A. The manufacturing progress function [J]. Journal of Industrial Engineering, 1959, 10(1):39-53.
- Corominas A, Pastor R, Plans J. Balancing assembly line with skilled and unskilled workers [J]. Omega, 2008, 36(6):1126-1132.
- Curis R G. Top management system for forecasting and monitoring pay costs and staff numbers [J]. Journal of Operation Research Society, 1987, 38(10):935-940.
- De Jong, J. R. The effects of increasing skill on cycle time and its consequences for time standards [J]. Ergonomics, 1957, 1(1): 51-60.
- Fogliatto F S. Learning curve modelling of work assignment in mass customized assembly lines [J]. International Journal of Production Research, 2007, 45(13):2919-2938.
- G. Sinclair, S. Klepper, W. M. Cohen. What's experience got to do with it?--Sources of cost reduction in a large specialty producer [J]. Management Science, 2000, (1):28-45.
- Gates M, Scarpa A. Errata to learning and experience curves [J]. American Society of Civil Engineers, 1976.
- Gates M, Scarpa A. Learning and experience curves [J]. American Society of Civil Engineers, 1972.
- Gates M, Scarpa A. Optimum number of crews [J]. Journal of the Construction Division, 1978.
- Goldberger A S. The Interpretation and estimation of cobb-douglas functions [J]. Econometrica, 1968, 36(3/4):464-472.
- Goodier C I, Gibb A G. Barriers and opportunities for offsite in the UK[J], 2005.
- Hayes, R. H, Pisano, G. P and Upton, D. M. Strategic Operations: Competing through Capabilities. NewYork: The Free Press, 1996.
- Hirschmann, W. B. Learning Curve. Chemical Engineering, 1964, 7(17):95-100.
- Hoffman, T. R. Effect of prior experience on learning curve parameters. The Journal of Industrial Engineering, 1968, 19(8):412-413.
- Khalili A, Chua D K. Integrated prefabrication configuration and component grouping for resource optimization of precast production[C]// Bios Europe. International Society for Optics and Photonics, 2014:505-505.

- Lieberman, M. B. The Learning curve and pricing in the chemical processing industry [J]. *BAND Journal of Economics*, 1984, (15):213-228.
- Malgorzata Plaza, Ojelanki K. Ngwenyama. A comparative analysis of learning curves: Implications for new technology implementation management [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 200(2):518-528.
- Nicks J. E. Basic programming solutions of manufacturing [J]. *Society of Manufacturing Engineers*, Dearborn, MI, 1982.
- P. Ingram, Joel A. C. Baum. Chain affiliation and the failure of manhattan hotels, 1898-1980 [J]. *Administrative Science Quarterly*, 1997, (42):68-102.
- Russell Cooper, Alok Johri. Learning-by-doing and aggregate fluctuations [J]. *Journal of Monetary Economics*, 2002, 49(8):1539-1566.
- Saaty T L, Peniwati K, Shang J S. The analytic hierarchy process and human resource allocation: Half the story [J]. *Mathematical & Computer Modelling*, 2007, 46(7-8):1041-1053.
- Thomas, H. R. , Sander, S. R. , Bilal, S. Comparison of labor productivity [J]. *J. Constr. Engrg. And Mgmt.* , 118 (4), 635-650, 1992.
- Thomas, H. R. Construction learning curves [J]. *J. Constr. Engrg. And Mgmt.* , 14(1), 14-20, 2009.
- Thorndike E. L. Animal intelligence: an experimental study of the association processes in animals [J]. *PsychoLRev. Ser. Monogr. Suppl.*, 1898, (2):1-109.
- Thorndike E. L. Animal intelligence: an experimental study of the association processes in animals [J]. *PsychoLRev. Ser. Monogr. Suppl.*, 1898, (2):1-109.
- W. P. Barnett, Henrich, R. Greve, Douglas, Y. park. Competitive organizational behavior [J]. *Strategic Management Journal*, 1994, (15): 11-28.
- Waller E. W , Dwyer T. J. Alternative techniques for use in parametric cost analysis [J]. *Concepts-Journal of Defense Systems Acquisition Management*, 1981, 14(2): 48-59.
- Warzawski A. , Production planning in prefabrication plant [J]. *Build. Environment*, 19(2), pp139-147(1984).
- Wright T. Factors affecting the cost of airplanes [J]. *Journal of Aeronautical Science*, 1936, (3):122-128.
- Wu P, Sui P L, Jin X. Identification of non-value adding (NVA) activities in precast concrete installation sites to achieve low-carbon installation [J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2013, 81(6):60-70.

## 附录

## A. C#程序代码

```
using System;
using System. Collections. Generic;
using System. Linq;
using System. Text;
using System. Threading. Tasks;

namespace DuckEggs
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            WorkTime wt = new WorkTime();
            wt. CalcBestChoice();
            Console. WriteLine(wt. ShowStr);
            Console. Read();
        }
    }
}

using System;
using System. Collections. Generic;
using System. Linq;
using System. Text;
using System. Threading. Tasks;

namespace DuckEggs
{
    public class WorkTime
    {
        public List<string> WorkNameList;
```

```
public List<int> FirstWorkTime;
public List<int> OldWorkTime;
public List<int> FirstMoney;
public List<int> OldMoney;
public List<int> WorkPeople;
public int BestMoney;
public int BestNumber;
public string ShowStr;
public WorkTime()
{
    BestMoney = 0;
    BestNumber = 0;
    WorkNameList = new List<string>();
    WorkNameList.Add("拆除模具");
    WorkNameList.Add("脱模");
    WorkNameList.Add("钢模清扫（清模）");
    WorkNameList.Add("模板组装（组模）");
    WorkNameList.Add("放样（铁件位置）");
    WorkNameList.Add("吊放钢筋笼");
    WorkNameList.Add("木模放置");
    WorkNameList.Add("预埋件埋设");
    WorkNameList.Add("浇筑前检查");
    WorkNameList.Add("混凝土浇筑");
    WorkNameList.Add("粉光与粉刷（磨光）");
    WorkNameList.Add("治具拆除");
    WorkNameList.Add("混凝土养护（蒸气）");
    WorkPeople = new List<int>();
    WorkPeople.Add(2);
    WorkPeople.Add(3);
    WorkPeople.Add(1);
    WorkPeople.Add(2);
    WorkPeople.Add(3);
    WorkPeople.Add(3);
    WorkPeople.Add(1);
```

```

WorkPeople. Add(2);
WorkPeople. Add(1);
WorkPeople. Add(3);
WorkPeople. Add(1);
WorkPeople. Add(1);
WorkPeople. Add(2);
    FirstWorkTime = new List<int>();
FirstWorkTime. Add(24);
FirstWorkTime. Add(29);
FirstWorkTime. Add(63);
FirstWorkTime. Add(41);
FirstWorkTime. Add(94);
FirstWorkTime. Add(53);
FirstWorkTime. Add(38);
FirstWorkTime. Add(126);
FirstWorkTime. Add(28);
FirstWorkTime. Add(63);
FirstWorkTime. Add(93);
FirstWorkTime. Add(34);
FirstWorkTime. Add(22);
    OldWorkTime = new List<int>();
OldWorkTime. Add(16);
OldWorkTime. Add(10);
OldWorkTime. Add(24);
OldWorkTime. Add(19);
OldWorkTime. Add(13);
OldWorkTime. Add(30);
OldWorkTime. Add(11);
OldWorkTime. Add(60);
OldWorkTime. Add(11);
OldWorkTime. Add(44);
OldWorkTime. Add(32);
OldWorkTime. Add(18);
OldWorkTime. Add(12);

```

```
        FirstMoney = new List<int>();
FirstMoney. Add(200);
FirstMoney. Add(240);
FirstMoney. Add(240);
FirstMoney. Add(220);
FirstMoney. Add(460);
FirstMoney. Add(240);
FirstMoney. Add(220);
FirstMoney. Add(400);
FirstMoney. Add(240);
FirstMoney. Add(220);
FirstMoney. Add(420);
FirstMoney. Add(200);
FirstMoney. Add(200);

        OldMoney = new List<int>();
OldMoney. Add(240);
OldMoney. Add(280);
OldMoney. Add(280);
OldMoney. Add(260);
OldMoney. Add(600);
OldMoney. Add(280);
OldMoney. Add(260);
OldMoney. Add(540);
OldMoney. Add(280);
OldMoney. Add(260);
OldMoney. Add(580);
OldMoney. Add(240);
OldMoney. Add(240);
    }

    public int CalcMoney(int number)
    {
        int totaltime = 0;
        int totalmoney = 0;
        for (int i = 0; i < 13; i++)
```

```
        {
if ((number >> i) % 2 == 1)
        {
totaltime += FirstWorkTime[i];
totalmoney += (WorkPeople[i] * FirstMoney[i]);
        }
else
        {
totaltime += OldWorkTime[i];
totalmoney += (WorkPeople[i] * OldMoney[i]);
        }
        }
if (totaltime >= 480)
        {
return -1;
        }
else
        {
return totalmoney;
        }
        }
public void CalcBestChoice()
        {
            BestMoney = int. MaxValue;
            BestNumber = 0;
            for (int i = 0; i < 8192; i++)
            {
                int money = CalcMoney(i);
                if (money > 0 && money < BestMoney)
                {
                    BestMoney = money;
                    BestNumber = i;
                }
            }
        }
```

```
        ShowStr = "";
for (int i = 0; i < 13; i++)
{
    if ((BestNumber >> i) % 2 == 1)
    {
        ShowStr += (WorkNameList[i] + ":新手; \n");
    }
    else
    {
        ShowStr += (WorkNameList[i] + ":老手; \n");
    }
}
ShowStr += ("\n 总价" + BestMoney);
}
}
```



## B. 学习曲线数据收集

（备注：以下数据的计量单位均为分钟）

表 1 学习曲线数据收集——模板清扫（钢模）

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21	day22	day23	day24	day25
1	61.21	58.46	57.17	55.04	51.71	50.29	48.25	46.17	45.25	43.92	40.38	37.83	36.29	35.00	34.08	30.75	30.25	28.21	27.71	26.54	25.79	25.42	25.88	25.58	26.50
2	66.07	65.79	56.61	43.18	55.50	41.50	38.71	40.15	43.98	38.65	31.22	36.77	31.04	38.65	29.51	25.49	24.50	21.95	27.64	22.21	22.93	24.60	22.08	26.15	25.37
3	62.78	62.20	46.69	50.54	39.50	52.03	36.82	50.13	43.44	35.92	34.22	38.78	38.69	27.84	26.51	29.70	29.72	21.48	25.65	27.17	23.42	25.14	20.75	23.23	22.76
4	72.89	61.45	60.76	58.62	46.63	37.89	45.38	38.92	36.62	47.23	42.68	33.03	32.25	32.08	25.91	32.75	33.13	25.80	28.61	20.36	27.19	21.21	24.40	20.37	22.25
5	53.31	55.66	43.60	53.90	52.63	50.30	44.65	41.81	42.14	42.87	45.44	39.34	38.94	29.28	29.99	28.10	33.35	30.85	22.37	24.06	28.21	27.99	25.82	20.47	24.38
6	66.65	57.02	43.97	47.38	44.76	38.69	49.32	44.12	36.08	43.11	38.41	39.85	33.84	37.44	25.92	23.54	23.51	29.25	21.73	28.10	23.23	20.14	19.45	21.10	24.45
7	72.03	60.16	45.72	54.83	48.74	50.27	48.09	51.59	34.27	47.81	38.21	31.31	40.65	34.37	29.83	31.52	33.04	28.07	23.59	21.56	23.71	19.24	20.47	25.37	22.60
8	58.98	49.06	48.07	53.17	52.80	38.98	36.26	45.66	41.29	42.52	35.62	34.36	34.79	29.91	29.22	26.03	32.86	25.57	23.57	21.82	28.89	19.32	23.61	19.62	27.49
9	71.49	61.61	57.05	50.19	50.35	55.31	48.56	49.74	49.95	45.39	36.81	33.72	36.83	36.42	28.60	23.10	27.45	24.83	25.96	28.54	21.30	25.45	22.84	20.81	29.30
10	58.89	43.86	53.01	57.43	48.37	38.93	49.85	47.65	47.92	42.05	42.82	29.51	37.17	26.29	27.70	23.47	31.76	25.92	27.35	28.49	24.54	26.57	27.79	28.43	28.10
11	70.93	46.74	48.73	61.95	58.14	51.33	51.47	43.96	41.79	36.07	36.61	38.30	32.53	31.78	31.12	32.23	28.50	25.71	21.02	20.15	19.57	21.59	26.21	22.28	21.92
12	70.69	64.79	51.81	58.42	49.61	53.30	52.80	44.47	43.59	33.76	30.55	35.59	30.71	33.13	28.78	25.40	24.36	26.28	21.00	20.23	24.27	28.46	25.61	25.59	24.85
13	55.25	62.54	59.30	47.25	57.99	38.21	51.03	41.77	46.12	45.72	44.76	40.49	40.80	34.62	34.70	27.22	31.77	30.31	24.36	24.21	25.92	27.03	20.68	21.36	24.75
14	52.71	46.81	62.31	41.76	42.66	47.82	47.07	43.30	39.90	39.41	32.39	28.64	40.54	36.22	32.30	34.30	28.46	21.35	21.25	23.86	26.12	20.61	26.79	25.72	21.06
15	55.40	57.25	58.63	57.30	57.51	56.24	47.97	42.82	50.37	39.75	33.13	36.94	27.84	31.20	33.86	31.22	32.73	30.75	29.34	22.08	29.06	21.65	22.48	24.60	20.89
16	54.21	46.87	45.91	61.32	52.24	53.03	42.72	38.95	41.53	41.06	42.87	31.53	30.22	38.96	31.45	25.10	28.21	25.47	24.31	20.19	28.20	26.11	24.32	28.38	20.37

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21	day22	day23	day24	day25
17	67.12	44.70	59.65	57.02	53.93	39.86	50.86	45.91	49.21	49.05	34.18	29.07	32.98	33.25	32.58	26.38	31.26	24.66	25.86	23.53	25.71	19.23	23.34	20.34	25.74
18	58.04	62.71	47.57	55.14	43.80	43.38	47.02	40.25	39.38	33.80	33.29	36.61	34.73	37.00	35.96	34.03	28.22	27.95	21.96	28.25	26.90	21.53	22.91	28.66	22.31
19	74.22	61.04	43.98	51.65	50.65	40.35	46.43	51.37	38.19	48.04	33.88	39.43	27.28	32.08	32.69	31.09	29.76	30.78	31.16	26.06	22.12	23.09	25.55	25.60	23.38
20	61.74	55.61	60.84	53.29	49.91	44.11	52.66	43.46	35.54	47.99	42.42	30.49	34.14	30.24	35.22	26.05	32.77	26.72	25.28	19.91	25.57	27.98	28.96	27.81	20.33
21	66.19	54.94	53.56	47.57	50.67	55.12	51.44	36.56	41.84	37.86	33.49	42.26	39.65	30.88	33.86	32.87	25.07	21.81	22.16	23.19	22.24	22.31	25.97	27.09	21.55
22	71.95	64.53	50.49	51.23	55.37	39.30	39.15	35.89	43.03	36.24	30.65	37.86	33.38	26.89	33.56	23.16	25.28	22.22	26.65	26.99	20.16	23.08	26.02	23.71	26.60
23	63.11	51.99	52.83	49.88	43.07	48.88	47.75	43.30	39.04	38.36	38.16	39.54	38.94	33.26	34.57	24.54	29.78	31.84	29.67	25.13	19.98	20.71	28.19	19.44	26.45
24	75.19	63.69	45.27	51.75	55.63	51.70	46.91	50.20	34.39	33.89	43.54	31.16	35.28	33.64	34.45	25.45	24.42	23.97	29.15	24.81	26.60	20.77	22.85	21.46	23.94
25	52.50	64.40	51.30	54.48	45.36	56.74	38.16	51.72	50.92	41.59	34.23	29.05	37.29	39.14	34.83	29.96	25.69	29.13	29.99	21.07	25.72	25.03	21.15	20.58	20.30
26	71.24	61.40	51.94	47.02	53.45	43.98	43.81	38.79	38.55	40.12	33.97	39.58	34.25	33.86	26.91	30.28	33.68	27.17	30.95	25.83	21.50	25.60	28.06	27.14	26.16
27	57.65	48.17	59.13	54.12	57.72	47.90	52.42	34.98	46.15	45.92	30.38	31.34	35.01	32.12	38.08	26.45	30.26	29.46	28.06	29.09	19.73	23.31	28.93	28.21	23.55
28	59.10	58.12	53.20	54.68	48.25	50.02	49.78	52.04	42.41	33.37	43.12	32.23	28.11	29.45	36.75	23.96	31.96	26.98	26.28	24.17	21.64	24.33	20.91	25.90	21.02
29	55.03	62.05	49.71	59.20	39.57	51.97	53.96	35.29	49.24	48.61	44.56	35.40	35.45	29.74	34.16	29.64	30.38	30.67	22.96	25.86	25.13	19.22	20.94	21.59	21.63
30	54.92	49.61	54.00	50.03	56.02	51.75	49.92	42.35	48.15	38.15	31.04	33.95	36.91	37.11	31.72	31.46	26.56	26.62	26.07	25.88	20.15	26.19	25.83	19.71	23.25

表 2 学习曲线数据收集——模板组装

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15
1	38.00	32.00	28.00	26.00	25.00	22.00	21.00	21.00	20.50	20.50	20.00	19.50	20.00	19.00	20.50
2	41.17	30.08	21.59	19.55	21.51	23.80	21.57	23.02	19.70	19.26	22.43	19.91	15.24	14.43	19.80
3	42.68	27.83	27.93	21.17	23.51	21.01	23.50	19.57	19.69	22.29	21.37	18.25	17.46	18.77	22.80
4	36.34	34.99	23.08	23.09	27.31	23.50	22.59	19.04	22.36	18.30	21.92	20.62	15.82	15.04	22.20
5	40.82	24.71	22.00	25.48	20.93	21.79	15.81	17.27	19.73	19.63	18.51	15.18	15.59	18.84	17.09
6	36.09	36.02	22.28	20.27	19.53	18.41	22.86	17.35	18.21	15.38	22.10	15.07	16.11	14.28	22.83
7	41.28	27.39	27.70	22.47	24.19	19.63	22.58	20.56	19.26	16.80	20.77	20.69	15.58	18.57	17.04
8	45.09	25.39	24.49	28.81	21.10	17.61	23.27	17.86	17.17	19.26	22.44	18.97	18.54	20.92	19.68
9	40.30	29.93	31.38	26.49	24.02	23.39	22.66	22.56	19.20	22.61	21.07	15.76	16.72	15.39	16.61
10	44.97	35.24	22.89	22.78	26.71	24.15	23.67	17.93	19.67	18.29	22.03	17.87	21.80	21.07	16.34
11	45.28	34.33	25.26	26.80	22.84	19.45	21.01	19.71	18.23	20.46	19.54	18.05	17.70	17.26	22.77
12	35.92	31.57	29.79	23.86	20.86	17.13	16.14	18.80	18.51	19.07	15.95	18.56	19.69	16.55	18.71
13	33.06	29.28	24.57	28.19	26.76	16.81	21.64	16.24	18.19	18.12	16.14	21.53	18.43	20.37	17.67
14	42.39	28.27	31.14	23.83	20.51	18.03	17.64	18.22	17.84	18.81	16.11	19.92	19.97	17.88	23.00
15	40.95	35.17	31.57	24.81	26.23	23.75	21.59	16.41	19.01	21.51	16.44	18.87	15.04	17.18	17.64
16	35.67	34.42	23.10	25.65	27.19	21.21	21.06	19.38	18.20	15.70	17.91	19.02	19.83	20.72	22.71
17	35.09	34.98	29.59	27.01	24.83	21.54	22.15	21.34	20.31	22.27	22.27	19.83	15.28	18.63	17.01

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15
18	41.72	31.49	30.38	25.89	27.44	20.97	21.06	20.60	16.24	16.32	16.44	18.02	15.28	15.17	15.49
19	40.72	35.78	28.18	22.46	26.20	19.08	16.59	18.93	19.17	22.21	22.00	16.74	19.51	17.37	22.31
20	45.96	34.62	25.71	24.00	25.50	18.28	20.61	16.91	15.48	18.49	16.05	15.15	19.99	18.70	18.50
21	45.55	31.41	22.72	27.47	20.52	22.82	17.42	16.06	17.03	18.97	15.60	17.13	19.48	20.52	19.10
22	42.66	28.02	30.32	23.25	25.40	16.77	19.86	18.39	17.38	16.29	19.93	19.38	16.91	20.98	22.58
23	44.38	32.66	25.43	28.08	21.06	23.25	16.37	20.58	21.19	21.43	22.32	18.17	22.18	16.88	18.44
24	37.88	35.61	21.97	28.85	19.82	20.23	22.95	21.52	20.95	23.09	18.87	21.70	19.76	17.41	18.14
25	41.04	28.21	28.40	19.52	18.85	17.57	18.36	22.04	16.51	15.41	15.72	18.38	17.86	16.67	15.75
26	44.92	25.08	30.18	26.43	22.28	17.86	20.76	17.59	21.89	16.27	15.14	17.56	15.95	16.30	21.35
27	45.28	30.88	23.13	27.10	21.84	21.56	19.78	22.03	16.55	22.74	18.82	18.11	15.02	20.04	22.25
28	36.34	28.10	29.96	22.69	21.73	23.36	18.21	21.03	15.47	21.37	21.33	20.30	18.59	18.48	19.97
29	38.08	30.13	29.67	23.40	27.15	23.27	23.22	20.77	20.87	20.81	20.93	21.96	15.13	14.80	15.43
30	40.14	24.42	22.53	29.01	20.13	16.56	19.39	23.06	18.93	20.92	21.02	18.40	21.86	16.29	22.88
31	36.15	28.11	24.52	22.43	23.05	20.45	22.84	19.26	16.15	22.45	15.86	16.95	19.11	18.55	17.03

表 3 学习曲线数据收集——放样（铁件位置）

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20
1	90.50	90.00	91.00	89.00	90.50	91.00	86.00	86.00	85.00	85.50	86.00	87.00	86.00	85.00	86.00	85.00	83.00	80.00	81.00	83.00
2	86.62	89.11	86.84	97.14	104.70	91.90	102.55	98.77	88.12	90.96	95.29	82.61	101.90	83.22	82.84	99.38	100.61	94.84	74.23	86.51
3	110.49	94.00	108.07	90.10	99.19	80.63	89.86	94.84	99.01	99.25	82.93	105.31	94.62	97.58	101.39	91.79	83.77	95.48	71.41	87.39
4	83.50	92.44	85.43	105.04	99.46	90.69	73.27	101.88	80.74	95.71	75.01	78.60	83.17	90.42	105.24	72.76	75.81	97.86	79.78	101.77
5	101.17	81.11	104.69	101.58	107.80	111.73	83.05	77.44	84.85	88.48	88.80	84.85	96.78	75.79	84.43	81.89	90.04	71.84	88.28	85.33
6	92.25	81.28	101.33	95.91	91.57	81.87	82.54	92.44	82.15	91.64	98.67	74.00	98.39	80.96	105.33	97.05	86.29	86.62	88.31	101.73
7	82.29	89.19	96.96	90.73	95.02	79.99	105.24	76.94	101.43	99.81	74.53	94.79	96.04	95.60	102.76	81.25	88.11	90.19	95.21	92.97
8	102.25	84.03	77.97	108.65	107.29	96.91	82.79	105.02	84.28	90.68	80.34	103.09	94.66	87.14	82.29	85.45	96.48	75.96	82.67	94.19
9	82.83	90.64	83.18	79.97	109.66	79.51	83.36	86.31	86.97	98.81	98.03	80.59	84.90	94.78	79.72	82.58	83.88	75.24	95.34	100.83
10	106.50	103.06	111.19	106.63	108.91	99.12	74.06	91.70	82.12	79.71	99.51	104.67	79.37	93.31	85.20	80.26	93.50	89.38	78.35	97.03
11	84.34	108.68	79.39	103.79	77.74	108.32	102.52	100.12	80.97	102.99	76.38	100.76	75.26	80.75	81.26	98.80	86.93	86.16	73.86	89.66
12	91.70	80.81	97.18	89.85	86.19	97.67	102.56	90.83	96.26	77.70	94.00	101.00	90.91	95.28	100.77	100.77	90.59	69.35	97.32	78.29
13	100.57	109.22	88.39	89.55	96.74	82.27	93.75	84.74	97.50	102.16	100.36	75.81	84.73	93.54	100.67	76.82	76.85	94.41	98.84	99.56
14	99.32	83.27	85.14	86.94	85.42	81.27	82.90	100.86	85.98	77.69	87.17	104.61	105.28	101.80	98.97	90.33	91.29	70.39	92.95	76.83
15	82.87	89.25	110.11	97.37	102.53	102.47	97.96	97.65	81.85	87.79	79.64	93.42	100.23	73.41	87.14	82.19	71.51	73.15	83.06	97.33
16	87.22	89.80	109.05	100.53	85.82	109.65	83.02	88.02	78.65	85.96	101.49	89.68	79.10	77.36	103.72	77.18	82.29	79.28	84.33	80.88
17	103.39	77.30	111.11	87.49	106.44	92.89	78.60	83.02	74.84	98.73	76.34	104.45	80.40	90.09	77.67	100.42	71.14	86.73	72.10	83.27
18	109.18	90.47	111.65	109.21	90.30	81.23	91.74	81.55	87.37	93.38	78.08	94.45	80.94	88.57	84.45	102.94	93.74	92.45	95.11	94.93

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20
19	106.27	98.07	84.91	87.65	98.24	78.91	93.62	102.15	92.10	94.72	76.92	90.54	87.84	94.22	99.18	82.33	100.36	85.54	93.50	74.63
20	80.02	82.00	99.79	100.03	91.67	82.69	76.52	93.44	89.10	78.52	77.14	81.59	91.98	82.93	94.42	90.06	81.12	73.16	78.84	79.28
21	110.98	99.31	102.64	101.16	91.73	77.36	99.65	80.28	76.48	73.94	76.13	83.01	75.04	91.85	99.40	81.79	82.52	81.87	97.12	95.92
22	76.96	89.83	93.97	105.24	110.27	108.95	83.96	97.38	73.24	98.00	100.56	104.92	99.62	91.20	75.92	100.24	80.90	84.47	95.44	77.05
23	107.08	84.88	91.68	88.82	81.21	78.88	96.53	76.15	102.37	90.94	78.82	86.11	102.69	91.03	79.22	100.76	88.17	88.18	87.30	78.74
24	86.37	99.46	89.57	85.70	79.34	105.55	99.92	104.70	97.94	81.05	104.41	98.81	75.31	100.02	90.20	100.02	75.22	90.17	76.37	72.72
25	83.47	101.31	108.20	101.24	100.05	102.40	75.57	87.34	90.64	81.97	80.90	83.91	90.61	91.04	91.27	86.15	93.15	95.52	91.85	100.17
26	105.17	78.09	89.16	94.01	96.34	84.31	81.74	96.84	75.31	100.85	105.08	95.00	100.05	79.60	99.35	94.82	77.27	94.14	89.51	78.17
27	101.56	77.55	110.03	101.19	109.02	101.40	77.60	92.73	87.20	99.95	80.15	91.05	100.54	83.32	96.44	78.55	100.73	71.76	71.97	75.04
28	88.09	93.50	96.51	88.45	89.48	85.82	90.06	74.10	73.02	97.58	76.21	77.63	92.11	83.35	74.76	74.76	84.15	90.09	86.81	90.15
29	85.60	104.59	82.03	104.71	92.26	93.06	98.71	86.11	73.45	83.73	95.54	80.42	101.79	95.75	94.78	81.20	85.99	75.18	93.50	86.19
30	79.98	108.71	109.72	80.20	106.60	82.39	74.78	87.06	75.21	95.89	89.74	102.79	90.86	100.94	76.18	83.47	79.31	70.33	94.19	73.16
31	110.92	85.35	91.35	97.23	84.01	77.61	76.82	96.16	86.53	93.08	75.61	93.33	102.92	80.63	82.65	87.91	72.30	91.48	69.21	96.42

表 3 学习曲线数据收集——放样（铁件位置）（续表 1）

编号	day21	day22	day23	day24	day25	day26	day27	day28	day29	day30	day31	day32	day33	day34	day35	day36	day37	day38	day39	day40
1	80.00	81.00	80.00	80.00	81.00	82.00	76.00	75.00	76.00	77.00	74.00	72.00	73.00	74.00	75.00	70.00	71.00	68.00	72.00	69.00
2	90.65	82.63	70.84	71.15	76.83	81.24	71.29	90.69	76.86	90.62	87.78	77.90	65.03	70.05	72.75	70.42	63.79	83.14	61.98	65.38
3	72.23	98.55	74.96	97.72	78.51	76.06	89.83	88.43	73.98	73.60	90.62	73.01	65.90	80.60	80.32	83.67	62.06	83.23	74.17	76.51
4	78.04	98.51	69.72	82.13	70.40	82.78	66.67	87.90	85.41	76.84	90.25	66.76	88.37	66.51	86.13	82.50	64.74	72.21	80.19	62.87
5	91.00	90.03	79.76	87.89	96.39	85.10	69.42	70.97	71.62	85.66	82.42	78.58	75.50	74.68	65.13	72.46	76.47	82.59	80.59	75.83
6	90.27	76.87	71.73	77.95	89.08	87.72	65.12	81.47	74.50	67.27	86.05	86.54	77.16	71.35	64.44	81.59	63.09	78.39	76.10	60.66
7	74.36	91.92	92.28	84.25	76.84	91.46	89.24	74.23	74.33	89.60	65.38	87.51	74.08	68.90	87.75	68.16	71.43	79.62	63.91	79.63
8	90.80	90.96	77.34	96.57	98.24	87.68	88.75	70.27	70.86	68.43	66.65	71.32	69.07	76.02	90.98	61.77	83.76	69.66	70.58	68.48
9	83.37	75.30	83.74	78.56	69.98	86.31	67.72	72.84	85.09	77.36	72.69	81.74	74.83	78.27	84.81	79.77	72.13	74.67	79.37	58.86
10	97.55	81.77	72.49	88.37	71.39	82.29	69.08	84.89	83.90	65.86	84.12	82.11	73.83	66.08	69.60	75.15	71.16	81.50	68.77	71.41
11	95.68	84.20	94.12	82.70	82.35	72.01	70.73	64.50	86.10	93.54	80.16	86.66	62.66	70.24	72.19	85.91	79.81	77.68	62.06	75.60
12	77.44	98.99	81.65	90.81	82.63	77.47	84.06	69.93	71.83	93.07	85.55	75.75	72.22	74.45	88.16	68.19	65.19	82.23	69.93	79.99
13	89.84	91.72	84.80	80.75	91.16	98.02	90.19	65.04	75.50	92.28	66.21	70.00	80.96	83.26	68.15	67.94	67.82	60.04	71.80	80.30
14	83.88	93.04	85.13	88.20	84.96	84.14	78.32	88.75	66.95	72.65	71.59	76.28	79.07	68.40	83.39	78.52	74.19	82.58	86.35	77.18
15	75.78	88.41	83.31	74.26	85.03	91.01	66.21	76.61	69.48	78.66	65.54	85.49	72.73	84.12	75.63	62.12	74.27	79.42	87.26	82.65
16	68.43	72.91	83.21	81.96	80.57	80.13	66.06	74.31	81.66	80.14	63.74	71.80	79.17	76.47	73.85	60.25	67.61	79.56	66.40	82.21
17	80.39	77.40	89.18	70.94	85.05	76.14	85.05	68.76	84.02	73.14	76.36	76.34	89.38	70.10	65.91	59.93	69.10	73.92	67.72	75.13

编号	day21	day22	day23	day24	day25	day26	day27	day28	day29	day30	day31	day32	day33	day34	day35	day36	day37	day38	day39	day40
18	93.95	92.16	86.58	70.68	70.58	90.69	93.44	87.44	70.99	89.03	71.85	87.61	77.69	77.01	70.18	71.14	61.10	63.36	76.98	76.71
19	77.83	91.02	86.19	68.35	92.43	85.59	90.04	80.93	70.95	73.14	74.11	86.53	70.76	80.17	80.23	71.04	81.11	60.58	69.20	59.70
20	85.05	73.51	76.53	84.26	74.80	100.40	70.15	67.51	89.51	88.42	78.59	61.22	82.45	88.38	80.72	64.86	84.01	72.86	69.33	69.26
21	95.47	87.69	75.21	94.50	77.61	93.10	84.74	87.31	66.65	93.57	67.14	87.60	88.84	85.52	92.13	66.37	63.77	70.94	66.59	70.42
22	96.72	92.54	86.12	71.31	70.68	70.79	80.75	86.56	91.49	79.72	79.30	73.54	71.05	83.85	86.42	77.73	64.18	83.38	61.73	75.96
23	92.90	74.40	87.91	70.15	74.27	86.22	65.12	79.60	88.46	66.55	76.38	74.59	70.46	71.70	68.36	78.70	85.33	68.59	81.94	75.05
24	78.91	85.92	91.57	96.81	72.55	97.43	67.44	64.55	69.75	82.86	90.42	86.79	76.51	86.34	88.89	77.72	60.37	60.55	78.29	63.73
25	77.11	70.59	87.60	81.03	77.40	87.91	73.68	67.77	88.49	67.14	79.65	67.45	76.74	88.83	88.82	75.75	67.18	68.38	72.28	79.19
26	76.48	75.33	79.68	83.30	81.25	89.61	89.95	78.35	75.24	70.04	89.50	85.61	84.36	64.46	65.78	72.82	62.69	75.78	63.43	73.86
27	86.65	79.64	89.14	92.56	89.18	81.33	69.44	88.62	84.44	66.79	83.76	64.50	81.42	87.42	90.84	61.50	67.32	61.10	69.29	81.32
28	92.26	82.60	91.79	81.73	93.09	79.25	65.22	71.79	73.81	78.39	63.04	76.46	89.09	76.24	77.86	84.44	84.41	63.48	81.13	73.55
29	93.17	90.12	89.59	95.95	98.82	82.24	84.94	82.00	79.59	79.36	86.15	84.76	68.47	85.36	86.28	65.21	72.41	67.72	85.06	66.52
30	90.04	77.67	76.22	77.20	80.28	75.73	81.64	81.87	75.11	87.12	75.24	66.78	68.37	90.51	84.44	83.35	86.75	69.71	70.65	84.11
31	71.99	69.42	96.69	91.43	86.34	97.04	88.86	66.33	85.48	67.91	88.38	77.36	79.33	70.65	84.57	73.87	81.20	67.24	82.69	79.33



表 3 学习曲线数据收集——放样（铁件位置）（续表 2）

编号	day41	day42	day43	day44	day45	day46	day47	day48	day49	day50	day51	day52	day53	day54	day55	day56	day57	day58	day59	day60
1	69.00	70.00	70.00	66.00	67.00	66.00	65.00	68.00	65.00	63.00	62.00	61.00	60.00	60.00	61.00	61.00	56.00	57.00	56.00	55.00
2	83.31	74.98	80.62	75.49	73.74	60.21	72.90	74.43	64.10	58.34	61.16	62.37	53.69	56.81	62.10	70.73	47.93	52.30	57.93	47.59
3	61.36	60.80	72.27	69.03	69.98	77.97	73.02	66.45	57.09	55.57	60.14	63.87	62.76	67.40	54.47	63.35	61.85	65.67	61.56	62.31
4	61.39	73.78	71.49	66.13	81.31	68.29	62.11	81.26	65.43	56.37	75.34	52.79	57.34	72.71	62.87	53.05	62.58	63.73	65.86	47.32
5	74.23	81.01	79.40	69.86	69.42	72.73	66.50	76.64	78.01	67.61	62.21	68.94	69.94	67.59	65.75	56.16	55.94	63.54	58.38	59.68
6	83.96	71.25	81.99	72.27	76.36	70.62	79.05	65.61	61.63	61.65	54.69	57.56	62.28	55.35	57.29	65.79	48.13	65.92	67.15	50.33
7	77.61	80.01	68.41	73.76	70.06	66.43	65.26	59.09	59.41	65.31	72.45	61.53	60.29	58.73	74.31	67.55	57.89	68.33	67.02	47.73
8	58.75	80.88	61.81	58.40	63.24	72.99	62.28	72.27	55.62	77.13	55.19	54.92	67.23	62.00	71.67	62.53	49.62	70.07	50.04	54.25
9	65.06	62.36	76.92	74.58	69.75	71.66	55.47	78.44	76.89	71.46	67.64	54.43	54.58	59.47	58.83	65.25	49.46	66.96	68.57	56.24
10	79.57	67.23	61.81	78.55	57.06	80.26	55.28	76.98	57.31	72.32	70.00	67.17	57.22	66.80	62.91	63.99	51.13	69.58	66.96	50.67
11	68.88	83.24	77.34	62.65	58.25	66.82	65.08	77.96	63.22	54.81	71.77	69.22	57.83	64.88	55.86	69.17	54.74	68.87	54.81	64.66
12	80.61	77.30	73.07	75.73	57.57	80.86	79.11	77.47	73.39	66.67	53.41	59.58	61.72	60.13	60.62	72.35	60.02	68.90	53.58	61.88
13	82.08	66.86	68.64	71.99	78.61	80.63	77.01	65.09	60.55	58.51	61.71	64.26	61.17	69.05	63.47	72.88	59.65	65.94	52.08	58.10
14	70.83	76.20	69.42	62.91	65.12	77.00	62.65	74.75	63.82	58.52	59.60	55.60	68.51	53.93	64.35	53.53	68.18	65.04	49.07	61.47
15	71.33	78.94	67.12	59.89	62.81	61.31	57.58	58.93	65.47	74.04	55.24	59.79	55.18	55.19	61.78	58.99	53.52	60.54	57.25	51.33
16	76.10	83.05	69.38	75.62	80.87	73.36	73.68	78.49	70.10	54.43	67.76	53.20	66.47	53.46	54.15	63.03	59.14	64.47	54.98	61.39
17	68.57	70.93	78.05	79.19	75.45	63.04	55.57	67.43	71.08	75.96	66.79	62.74	64.00	51.50	58.58	54.37	62.06	66.43	49.60	61.44

编号	day41	day42	day43	day44	day45	day46	day47	day48	day49	day50	day51	day52	day53	day54	day55	day56	day57	day58	day59	day60
18	59.35	79.39	74.19	63.41	66.26	74.89	70.99	71.13	66.95	58.34	70.78	64.49	64.92	65.30	70.49	68.61	66.71	55.23	55.88	62.80
19	74.29	66.54	79.50	69.11	72.75	70.34	64.08	72.04	75.37	55.90	55.52	58.69	62.20	57.34	69.86	53.03	67.04	65.14	59.16	59.82
20	62.81	85.92	78.70	70.64	63.22	62.72	75.15	73.81	62.54	75.85	63.85	66.63	63.67	52.99	62.38	74.04	67.10	49.01	67.97	64.05
21	64.11	83.80	76.02	68.94	74.82	71.86	72.83	58.01	71.36	60.01	68.91	71.07	53.48	56.60	56.30	61.07	66.02	54.65	57.92	48.66
22	71.58	85.44	64.24	78.76	66.82	72.21	79.94	79.58	61.82	54.79	67.30	63.08	58.76	57.33	59.06	69.34	64.31	70.10	52.11	61.20
23	78.84	65.45	82.03	73.31	81.52	69.83	63.67	59.79	71.94	60.25	74.75	73.02	62.85	54.96	52.04	54.43	54.98	62.35	64.08	48.48
24	65.24	68.91	65.90	74.91	72.02	60.29	64.94	64.66	74.75	53.99	67.71	65.80	61.95	65.92	69.67	53.75	66.88	50.88	66.21	56.81
25	61.26	76.89	84.13	68.19	77.85	78.77	77.83	71.88	67.99	67.91	52.97	63.24	61.26	67.98	58.97	64.73	50.71	48.96	61.54	59.87
26	64.84	78.12	82.15	63.36	61.18	56.33	56.61	71.25	74.16	57.97	72.59	65.61	52.20	55.25	63.85	67.19	59.60	67.57	68.83	52.10
27	73.75	83.74	81.61	62.36	72.53	77.89	67.94	65.90	71.70	75.41	53.63	57.72	58.92	69.56	69.80	63.29	57.58	52.63	67.74	63.14
28	78.53	67.25	76.37	60.44	70.28	65.96	59.17	60.85	63.42	76.92	61.86	63.54	64.69	57.52	72.23	59.56	58.86	60.31	54.93	54.01
29	63.38	74.60	62.41	60.86	79.61	71.17	64.30	70.51	70.87	61.91	75.34	59.60	62.17	62.97	62.40	64.18	57.28	51.75	50.77	60.36
30	84.55	79.46	79.60	70.10	63.98	78.85	64.20	73.86	79.32	77.06	55.29	56.31	55.61	69.02	55.06	52.85	62.28	56.41	68.76	66.51
31	63.74	70.14	64.77	59.67	75.12	62.40	66.09	70.81	71.75	75.34	57.76	64.28	63.80	58.39	66.38	65.67	63.15	59.64	56.01	50.62

表 3 学习曲线数据收集——放样（铁件位置）（续表 3）

编号	day61	day62	day63	day64	day65	day66	day67	day68	day69	day70	day71	day72	day73	day74	day75	day76	day77	day78	day79	day80
1	57.00	56.00	54.00	55.00	53.00	51.00	51.00	52.00	50.00	49.00	48.00	51.00	50.00	48.00	49.00	47.00	47.00	46.00	45.00	45.00
2	57.92	51.60	47.69	56.17	51.89	53.63	54.84	58.87	50.37	57.16	58.26	44.76	52.44	51.44	57.42	46.00	52.15	41.92	52.72	52.13
3	64.21	53.96	61.21	59.55	47.66	44.41	59.57	50.09	52.42	51.73	47.00	59.55	49.33	50.29	54.63	46.03	46.99	43.96	43.83	41.10
4	53.26	63.11	56.67	50.55	54.02	43.40	48.52	56.96	57.73	48.02	48.55	54.21	49.46	41.82	44.97	41.45	43.36	53.01	49.85	52.76
5	60.93	56.60	58.42	58.51	58.34	57.06	52.55	47.32	60.67	54.70	53.30	47.92	51.41	54.47	42.06	49.14	53.37	53.05	41.39	47.82
6	48.61	62.17	49.32	64.50	58.26	44.30	44.33	51.69	59.95	57.31	54.20	49.13	42.54	55.61	57.58	47.07	56.08	53.57	39.09	53.91
7	69.21	47.91	65.41	66.51	53.35	56.53	47.71	54.17	43.94	43.99	50.16	55.30	60.35	42.67	52.87	51.49	50.01	47.42	48.19	45.91
8	67.05	66.77	63.56	58.37	63.64	56.21	59.55	53.42	61.09	42.73	54.05	50.40	50.52	45.61	58.70	46.13	44.81	41.79	54.22	52.25
9	52.61	61.44	59.53	51.36	45.69	51.78	46.44	63.67	53.79	53.83	43.09	45.49	42.96	51.47	53.95	57.46	47.78	47.44	54.78	40.32
10	49.81	57.06	53.94	60.13	53.53	57.69	52.65	55.33	57.99	53.56	45.81	49.18	55.81	41.19	47.81	49.78	48.22	40.04	54.22	44.63
11	53.23	53.85	56.46	50.44	61.94	52.95	61.81	56.91	46.08	45.43	55.42	48.29	55.82	45.22	49.68	55.87	56.06	53.63	39.69	54.64
12	67.30	50.43	54.21	54.75	52.00	50.56	48.61	63.27	51.16	45.54	49.37	55.53	52.86	48.03	46.77	49.05	48.07	40.80	45.32	51.41
13	65.09	65.34	51.75	50.44	64.95	54.45	44.41	44.24	56.45	55.41	47.91	45.15	58.49	41.46	49.43	51.51	47.65	48.87	47.79	46.32
14	65.48	53.43	55.07	56.37	47.80	58.83	43.65	57.13	49.96	46.26	58.46	50.41	58.81	58.67	45.06	44.85	49.35	42.19	52.33	55.02
15	48.50	67.28	53.18	60.29	53.51	59.23	58.75	58.93	57.62	41.71	45.09	61.59	47.03	47.24	60.05	54.05	53.19	47.63	39.85	47.43
16	63.80	61.86	65.08	48.83	49.08	50.47	45.17	48.45	44.28	44.57	45.72	46.91	44.62	48.77	55.10	47.83	43.11	48.68	41.97	52.47
17	53.69	48.20	56.15	59.14	52.52	56.63	56.81	63.08	45.58	54.70	56.48	45.49	58.93	46.57	59.62	44.56	42.98	49.33	44.38	40.68

编号	day61	day62	day63	day64	day65	day66	day67	day68	day69	day70	day71	day72	day73	day74	day75	day76	day77	day78	day79	day80
18	65.22	47.76	53.99	64.06	62.28	61.94	62.01	54.33	50.87	57.53	46.86	57.59	54.68	44.50	45.21	46.64	56.52	51.99	40.17	50.88
19	52.50	57.47	50.12	47.47	62.40	53.41	56.21	59.49	50.33	45.98	45.79	54.99	60.45	56.34	42.40	44.29	45.89	53.08	52.73	52.75
20	49.21	52.98	50.18	54.17	48.79	49.99	47.56	53.59	57.28	48.12	43.95	52.44	42.56	44.96	52.52	52.26	49.70	42.65	52.26	54.57
21	54.85	49.84	47.91	49.75	49.73	45.35	56.64	59.96	59.03	54.57	54.73	54.56	51.84	53.45	49.69	57.59	48.78	42.23	52.68	47.25
22	53.58	59.01	65.79	54.16	55.27	52.37	53.98	46.19	42.79	49.76	49.61	58.58	50.67	49.90	42.54	44.92	53.95	56.25	42.31	50.90
23	52.22	57.22	55.32	54.20	46.06	50.98	56.86	49.88	56.26	45.70	56.61	60.61	53.20	41.41	56.55	50.53	57.57	52.28	42.65	38.69
24	56.42	66.31	49.62	66.01	52.73	50.62	46.94	63.41	50.31	55.27	53.14	51.13	54.60	51.20	50.03	43.42	49.44	47.83	49.62	48.24
25	51.78	58.12	50.27	66.96	63.42	44.38	60.23	57.35	43.92	53.40	53.88	55.30	55.78	56.19	42.31	56.04	49.56	53.07	42.96	47.09
26	53.10	57.41	56.76	56.83	49.92	45.26	51.57	61.17	58.02	48.58	49.85	43.41	51.51	48.68	49.84	54.72	54.26	56.44	48.30	47.17
27	67.88	62.42	58.60	66.32	48.87	58.35	55.58	45.02	58.59	56.35	41.06	58.51	46.49	55.17	51.93	56.79	42.93	56.34	50.79	47.01
28	66.72	47.84	65.76	48.86	57.09	52.35	54.43	59.28	52.69	58.45	45.05	46.26	49.07	57.43	50.25	42.12	40.12	39.64	42.50	51.65
29	55.86	65.09	64.96	53.33	51.25	57.87	54.67	53.21	43.00	48.31	51.64	52.05	53.36	58.33	51.59	49.49	44.66	55.28	50.33	39.19
30	49.73	60.03	47.11	63.77	57.73	62.55	48.17	49.41	48.67	56.31	58.86	53.63	45.27	49.83	42.82	53.74	40.36	54.33	47.32	42.85
31	53.00	52.03	60.13	52.87	56.20	43.97	44.86	53.22	58.59	58.37	44.50	52.99	52.83	55.80	59.17	56.47	55.72	46.00	52.27	38.34

表 3 学习曲线数据收集——放样（铁件位置）（续表 4）

编号	day81	day82	day83	day84	day85	day86	day87	day88	day89	day90	day91	day92	day93	day94	day95	day96	day97	day98	day99	day100
1	46.00	46.00	45.00	45.00	44.00	45.00	42.00	42.00	43.00	43.00	42.00	42.00	43.00	40.00	41.00	40.00	40.00	40.00	40.00	38.00
2	43.36	55.41	45.88	41.57	50.62	44.46	48.02	44.97	36.96	38.97	43.59	36.39	49.25	41.30	45.33	43.26	40.26	46.76	34.17	36.36
3	56.02	42.74	40.61	49.78	47.85	38.55	48.53	47.57	45.61	36.61	49.75	43.72	43.49	47.37	50.11	48.40	48.49	40.41	45.72	42.85
4	54.53	55.28	43.03	53.38	51.28	50.70	46.71	39.95	38.81	46.85	42.21	50.62	44.77	38.98	35.18	39.25	45.30	35.87	40.40	43.01
5	45.40	52.42	48.13	47.13	43.75	39.64	43.84	51.37	43.53	45.38	48.16	50.59	49.71	47.13	34.89	41.40	48.11	34.37	36.03	45.93
6	49.78	42.30	50.79	47.61	53.95	51.60	37.89	48.25	44.95	52.45	36.11	37.47	36.98	48.13	39.64	35.00	35.68	35.19	38.17	38.70
7	47.01	40.35	41.23	44.42	49.59	43.66	46.17	40.45	38.75	47.06	43.82	40.86	43.76	41.89	47.20	47.94	36.67	35.44	34.92	45.04
8	41.40	40.67	43.40	38.95	43.13	45.50	37.46	44.53	46.11	37.27	41.65	46.91	47.21	40.53	37.45	34.52	36.21	48.92	45.50	35.52
9	40.79	43.37	43.15	53.14	41.35	43.52	37.91	37.11	51.63	51.60	49.81	38.46	36.74	36.66	38.17	44.04	40.84	37.59	45.96	38.05
10	55.56	46.37	51.05	52.24	44.45	49.32	41.58	39.69	37.69	44.83	50.63	36.83	40.96	35.65	35.26	43.29	34.90	48.85	42.67	44.35
11	54.55	54.39	42.71	52.66	50.13	44.24	47.69	49.16	43.95	46.57	50.36	47.22	48.27	37.36	42.12	48.12	40.54	35.67	37.31	36.43
12	42.92	55.69	49.18	52.31	48.41	42.24	38.99	50.99	46.29	39.44	43.98	45.11	38.45	42.80	40.12	48.72	36.57	40.67	35.60	38.51
13	54.93	49.65	38.59	41.57	53.19	39.92	38.45	50.54	47.98	40.29	48.90	37.87	43.27	35.03	45.28	45.93	48.46	41.37	44.29	38.42
14	45.05	52.35	51.00	47.92	51.03	45.92	43.19	39.39	49.97	49.01	47.79	38.75	51.29	46.00	50.19	34.51	43.78	48.34	44.80	37.89
15	53.88	47.80	44.40	41.21	40.10	43.26	44.19	38.89	44.75	36.95	41.25	38.98	47.30	37.63	35.65	35.80	42.04	42.73	41.41	44.31
16	53.69	54.72	39.19	39.23	45.17	42.65	39.15	49.52	45.82	51.69	49.41	42.06	48.94	35.73	40.24	36.13	46.47	48.70	35.03	33.90
17	42.76	43.30	52.50	48.01	44.62	47.29	37.35	37.05	45.22	44.77	43.58	46.21	44.40	46.22	37.24	44.66	35.06	44.41	37.49	38.62
18	39.67	55.07	43.50	41.99	38.80	44.96	36.07	44.92	42.92	46.58	50.68	44.52	38.45	45.12	37.23	38.34	37.66	48.63	49.17	38.77

编号	day81	day82	day83	day84	day85	day86	day87	day88	day89	day90	day91	day92	day93	day94	day95	day96	day97	day98	day99	day100
19	47.83	47.71	54.21	47.08	40.54	46.13	36.76	35.88	44.73	41.75	35.75	48.75	43.19	44.28	35.95	38.12	48.32	34.99	39.25	33.50
20	55.10	44.18	54.02	40.48	41.64	47.12	46.66	50.40	42.94	52.52	44.33	50.37	46.18	44.78	35.34	37.52	48.89	38.04	37.99	33.88
21	44.02	44.69	51.55	49.90	38.71	40.83	47.96	42.35	42.27	47.48	50.77	39.35	45.15	45.14	37.19	40.29	36.20	39.73	35.17	41.32
22	48.99	40.15	45.09	41.90	53.95	46.18	50.40	38.13	45.73	49.92	43.29	36.06	50.87	42.99	49.20	43.07	40.03	47.13	40.12	46.44
23	40.86	46.92	38.95	41.89	38.32	44.98	38.68	35.88	39.35	44.34	48.88	46.95	46.64	36.24	41.58	46.07	39.61	43.72	47.70	34.07
24	51.75	50.19	49.90	48.13	39.49	43.61	51.08	46.63	48.47	51.00	37.16	36.31	52.07	45.80	44.82	46.91	38.05	48.56	48.42	34.38
25	52.48	48.78	38.90	52.36	42.15	39.17	38.92	45.48	40.77	46.27	36.82	42.40	50.25	45.45	35.09	36.33	40.99	39.93	47.69	33.25
26	46.02	41.99	52.31	54.74	43.42	48.88	37.91	36.18	50.53	45.61	48.02	39.54	41.47	45.37	43.75	41.76	40.22	38.63	39.38	39.43
27	54.08	54.31	49.01	51.62	41.21	44.00	49.77	37.74	41.94	45.37	35.89	45.02	45.84	37.66	48.43	35.34	46.90	48.58	35.73	39.10
28	47.96	39.77	40.63	46.76	53.69	40.58	48.17	44.23	39.20	43.17	47.12	41.34	52.11	42.55	36.38	42.81	39.40	36.18	47.49	41.86
29	56.25	42.93	40.92	52.78	43.57	48.75	40.86	35.92	39.46	39.93	40.12	39.87	50.57	40.35	38.87	44.57	35.22	38.71	43.98	41.73
30	41.32	43.16	46.06	42.46	50.63	47.26	42.22	42.79	51.51	42.85	40.63	51.58	38.91	37.21	46.01	45.73	43.99	37.72	47.64	41.12
31	42.95	46.59	42.39	40.15	49.84	39.69	38.13	43.80	38.24	38.12	41.15	45.52	37.98	43.79	43.24	35.93	48.66	39.66	40.46	35.29

表 3 学习曲线数据收集——放样（铁件位置）（续表 5）

编号	day101	day102	day103	day104	day105	day106	day107	day108	day109	day110	day111	day112	day113	day114	day115	day116	day117	day118	day119	day120
1	39.00	40.00	38.00	38.00	37.00	37.00	36.00	35.00	34.00	34.00	34.00	32.00	30.00	30.00	29.00	29.00	29.00	30.00	31.00	28.00
2	37.91	38.46	45.79	33.28	45.22	36.08	42.76	42.90	34.67	38.94	38.43	29.82	35.88	25.72	30.28	27.99	27.48	33.94	32.14	28.22
3	37.28	36.23	35.36	32.51	37.51	35.25	31.46	42.02	41.31	32.18	30.59	28.18	31.14	35.12	33.20	33.77	30.97	25.91	30.41	34.35
4	41.98	47.12	36.00	44.19	34.94	39.99	32.77	30.52	33.31	32.19	40.89	37.80	36.21	31.56	32.64	27.36	33.06	36.36	34.40	33.20
5	37.95	42.55	32.40	41.66	39.67	43.20	44.09	41.71	36.11	32.37	29.29	34.29	29.29	28.48	27.26	30.11	33.32	32.92	36.05	33.78
6	43.84	48.81	34.63	38.14	37.00	38.18	38.20	41.04	31.88	29.49	29.56	38.09	34.66	29.83	26.76	29.14	28.06	28.00	32.15	30.00
7	39.31	47.07	37.45	39.92	43.51	39.96	33.03	42.21	39.54	33.29	29.63	28.55	36.53	35.36	25.33	25.24	29.51	28.26	26.37	32.73
8	38.96	41.13	38.60	36.37	39.23	36.66	31.07	33.50	39.46	39.44	35.32	35.70	28.07	36.01	30.56	30.21	31.56	27.08	26.58	32.08
9	33.60	34.04	44.72	34.99	39.83	37.13	44.25	30.14	38.76	36.16	33.30	32.59	33.84	27.44	26.57	30.63	25.07	33.32	32.38	25.97
10	45.01	47.66	35.15	35.36	44.13	40.64	32.31	32.02	34.13	31.17	37.97	33.02	32.09	32.68	34.36	35.01	30.22	34.63	29.76	31.41
11	39.35	35.16	39.12	35.64	42.63	36.78	31.32	41.56	33.68	37.27	38.64	34.86	27.39	26.11	28.77	31.65	33.91	32.72	26.54	24.71
12	34.06	40.49	36.41	38.14	44.50	43.35	33.98	30.55	32.83	34.92	34.86	36.12	33.45	29.21	27.97	30.85	30.03	27.10	31.56	28.36
13	41.62	49.16	39.73	32.90	41.00	44.82	41.31	36.92	37.47	35.80	31.80	27.42	32.39	26.57	29.27	32.54	31.69	36.87	30.99	27.04
14	44.57	39.56	33.15	34.32	39.88	37.79	43.80	40.49	32.85	30.84	29.86	32.83	35.52	30.62	33.50	28.68	33.08	29.97	31.73	26.16
15	47.26	45.78	36.28	43.64	32.68	32.44	31.11	30.01	34.51	37.62	37.93	37.94	28.57	29.82	25.02	25.75	34.60	36.46	36.76	27.51
16	35.78	45.15	34.29	32.31	41.19	33.41	31.97	29.75	36.06	30.79	31.43	28.12	31.00	28.17	25.31	29.35	28.12	28.31	31.55	25.97
17	46.43	34.26	33.50	40.53	35.98	39.41	33.89	36.78	36.46	37.69	35.71	36.88	30.57	28.17	34.37	34.39	33.28	33.18	34.10	30.69
18	40.84	44.58	37.34	36.43	31.46	42.16	33.94	37.84	30.65	41.48	41.56	37.44	35.42	26.66	26.16	29.27	30.09	27.83	32.82	34.22

编号	day101	day102	day103	day104	day105	day106	day107	day108	day109	day110	day111	day112	day113	day114	day115	day116	day117	day118	day119	day120
19	44.81	46.66	35.58	37.36	33.13	40.94	40.74	34.40	32.33	34.48	36.53	38.81	30.86	36.61	34.85	29.17	32.29	28.96	30.46	32.18
20	47.10	47.20	33.16	39.23	32.09	32.80	33.46	42.81	30.05	34.96	32.39	37.35	26.09	33.04	31.95	29.63	30.42	25.78	36.53	27.45
21	40.16	41.61	41.50	45.79	44.93	35.62	32.41	40.10	32.30	38.02	37.29	33.34	36.67	29.35	33.35	25.04	26.09	26.97	26.61	24.28
22	43.23	46.46	41.17	36.30	32.53	33.92	40.88	39.84	38.12	35.42	33.30	31.91	30.35	35.36	29.06	30.69	28.85	28.13	35.23	26.99
23	37.26	42.06	34.42	43.27	43.78	32.40	37.98	41.93	36.82	30.10	30.33	29.07	30.91	27.66	28.51	31.01	32.47	28.21	26.58	29.07
24	37.92	34.86	37.87	46.08	40.60	34.46	39.74	35.02	36.79	32.74	31.87	28.61	31.00	34.30	34.01	29.35	34.37	35.97	36.46	32.78
25	42.02	43.16	45.80	44.08	36.36	34.28	37.65	40.83	37.96	37.67	29.20	27.99	33.87	29.49	29.33	28.77	35.60	29.88	34.81	26.49
26	33.47	34.41	40.44	43.08	31.51	38.56	37.21	33.59	35.93	37.41	32.02	27.56	26.80	34.51	33.08	26.26	35.65	29.90	33.91	33.37
27	40.25	37.46	36.28	43.05	36.88	45.29	36.86	30.96	30.92	41.51	40.60	33.68	36.40	29.33	25.31	28.03	31.52	27.42	33.75	24.75
28	37.12	44.41	42.35	38.71	43.09	43.55	43.03	42.72	30.74	29.63	39.31	34.52	34.17	26.33	34.22	30.77	26.33	28.39	37.22	32.84
29	44.62	36.90	42.55	32.50	42.31	39.63	40.69	42.57	38.98	39.47	30.55	34.05	28.95	32.30	27.33	31.96	24.95	29.34	35.11	26.51
30	42.22	40.51	35.93	40.34	44.73	37.80	41.12	34.03	40.58	39.29	36.52	27.53	27.38	27.94	28.90	35.46	26.43	35.87	34.58	25.27
31	34.77	44.72	34.28	44.05	42.72	40.15	35.99	30.93	34.15	31.08	37.36	33.61	36.10	30.23	34.54	25.60	32.93	26.91	30.47	31.26



表 3 学习曲线数据收集——放样（铁件位置）（续表 6）

编号	day121	day122	day123	day124	day125	day126	day127	day128	day129	day130	day131	day132	day133	day134	day135	day136	day137	day138	day139	day140
1	29.00	29.00	28.00	22.00	23.00	23.00	24.00	22.00	23.00	25.00	23.00	23.00	20.00	20.00	20.00	21.00	21.00	22.00	17.00	17.00
2	34.48	33.82	28.82	23.61	27.98	22.13	23.07	23.04	24.75	21.87	25.83	22.91	19.99	22.47	20.46	20.84	22.62	25.13	20.02	19.24
3	26.84	31.37	32.84	19.74	27.75	25.49	23.89	22.30	21.09	28.45	27.41	22.60	24.24	22.90	19.42	19.60	19.16	26.06	20.70	17.59
4	33.90	29.55	32.94	25.40	20.94	21.46	24.20	25.46	27.99	30.54	23.75	27.55	18.70	24.53	21.57	20.77	23.11	22.01	20.35	17.94
5	28.42	35.42	31.30	26.25	19.99	24.63	21.24	22.73	22.29	30.41	22.26	24.90	24.22	20.45	19.65	21.65	21.53	25.43	15.73	18.62
6	31.17	30.27	30.93	21.02	22.52	22.91	26.89	23.30	21.79	30.07	26.91	25.70	21.95	20.44	24.10	21.82	21.02	24.86	19.89	17.64
7	32.42	26.47	27.07	19.10	25.05	19.61	24.26	26.01	23.19	27.65	26.61	26.84	21.10	18.14	23.84	24.08	20.48	18.81	18.71	19.31
8	31.66	27.91	31.93	18.80	27.46	21.52	23.32	25.22	25.70	23.98	20.09	21.96	23.75	20.44	17.92	23.77	22.16	22.28	14.63	18.96
9	26.45	29.11	30.07	24.66	27.14	21.31	29.08	24.38	26.65	23.24	25.61	25.90	24.08	17.87	22.70	22.52	23.68	24.30	18.83	15.02
10	26.50	29.82	31.37	26.88	20.96	23.60	24.86	25.11	20.07	26.53	20.35	26.20	23.49	20.63	22.54	23.37	18.51	22.44	14.68	18.53
11	32.10	27.02	26.69	23.48	21.27	22.61	21.44	26.69	21.75	23.12	20.94	20.03	24.54	18.29	22.38	25.53	21.14	26.47	16.88	20.62
12	29.04	29.93	29.34	21.33	27.85	21.08	25.62	26.44	21.25	26.18	25.66	27.71	24.46	19.06	17.57	21.31	17.89	21.38	16.28	19.10
13	30.84	29.24	29.70	24.11	20.23	26.32	25.68	22.89	23.64	26.14	22.90	21.83	22.20	19.49	20.25	24.13	25.06	21.93	15.78	15.50
14	27.06	35.03	31.45	19.43	26.97	26.90	27.60	19.23	27.02	24.75	24.68	25.27	17.56	24.03	17.54	20.39	22.10	26.99	15.08	15.90
15	32.35	29.35	27.13	26.52	21.70	27.94	22.20	22.85	24.11	30.42	26.99	27.99	17.82	24.20	17.94	19.35	20.23	19.14	18.39	14.53
16	25.07	34.37	31.63	22.97	27.51	19.58	20.97	26.69	27.74	23.72	19.78	23.05	20.11	20.88	18.33	21.24	24.36	22.58	18.41	19.30
17	29.97	31.76	26.30	23.24	27.62	28.23	28.37	24.12	19.79	25.49	27.10	25.29	23.25	23.97	21.98	18.20	23.56	22.20	19.85	20.83
18	26.22	32.75	27.90	23.27	26.69	26.53	23.26	19.36	25.39	27.12	21.94	21.40	21.29	19.24	17.02	18.07	19.83	22.32	15.61	20.34

编号	day121	day122	day123	day124	day125	day126	day127	day128	day129	day130	day131	day132	day133	day134	day135	day136	day137	day138	day139	day140
19	35.45	25.48	24.88	23.60	21.71	20.57	25.42	26.06	22.76	24.28	20.34	22.35	24.47	23.40	24.01	21.48	23.71	23.73	17.61	19.78
20	29.07	24.74	34.22	23.81	20.87	26.50	27.81	26.15	23.69	23.19	23.88	24.96	19.92	18.01	21.66	23.10	18.76	22.26	20.90	18.18
21	31.86	27.95	32.82	25.54	23.09	23.55	25.80	21.48	22.00	30.44	20.99	23.68	21.20	22.04	21.08	20.03	21.21	20.78	20.11	14.50
22	25.04	26.67	27.01	26.39	27.54	21.17	27.23	26.72	27.64	30.50	24.72	28.19	17.30	18.15	23.34	19.16	22.65	19.59	19.42	17.93
23	34.77	29.43	33.52	20.21	20.79	20.30	26.57	23.83	23.04	25.56	23.03	27.15	22.75	23.63	23.04	19.64	23.73	20.54	17.81	19.55
24	29.99	31.02	25.40	23.63	23.56	25.76	29.17	20.19	23.81	28.84	28.03	20.44	24.24	23.10	21.37	25.14	24.45	20.63	20.56	14.87
25	26.74	29.32	32.26	19.32	28.07	27.80	29.35	26.42	20.46	27.55	24.63	25.61	21.40	18.02	23.48	21.69	19.70	23.61	17.46	18.08
26	29.71	27.34	26.68	24.23	27.09	24.62	28.02	22.32	27.13	28.51	27.00	20.75	20.69	22.23	19.00	18.73	23.88	23.78	19.38	16.20
27	35.15	25.32	29.31	21.75	28.21	24.09	20.50	21.17	22.42	24.02	26.40	22.43	20.55	24.49	23.44	20.36	23.11	23.15	15.70	18.51
28	34.64	24.82	23.83	25.98	19.71	20.57	27.58	26.06	20.08	30.38	28.03	27.87	18.88	19.73	21.21	18.94	20.21	24.78	17.22	17.10
29	33.27	30.46	30.51	25.62	26.66	26.85	27.01	20.65	20.19	25.39	20.98	23.03	17.30	23.26	23.49	24.83	22.19	19.03	19.01	16.24
30	28.42	24.85	29.53	21.28	24.85	22.97	24.77	19.77	26.01	26.23	25.99	20.50	17.14	19.43	21.31	24.30	24.66	20.18	19.37	15.20
31	26.27	32.56	24.54	23.55	27.61	23.46	29.39	22.65	25.29	24.98	25.56	24.72	21.49	17.20	18.32	19.96	21.49	26.75	18.46	15.53

表 3 学习曲线数据收集——放样（铁件位置）（续表 7）

编 号	day141	day142	day143	day144	day145	day146	day147	day148	day149	day150	day151	day152	day153	day154	day155	day156	day157	day158	day159	day160
1	16.00	16.00	16.00	15.00	15.00	15.00	13.00	14.00	13.00	12.00	12.50	12.00	12.00	11.50	12.00	11.50	12.50	12.00	12.50	12.00
2	19.60	14.59	17.13	15.38	17.74	15.19	15.39	15.23	13.03	10.52	15.12	12.77	13.23	12.53	10.74	11.63	11.53	13.34	14.44	12.39
3	15.90	15.11	16.08	15.80	15.61	14.50	15.74	16.31	11.82	13.75	13.22	14.51	11.24	10.25	10.75	12.12	13.40	12.91	12.52	14.50
4	17.62	16.87	19.40	17.25	16.69	13.54	14.64	15.08	15.01	11.36	15.19	13.95	12.21	10.45	10.36	10.91	14.62	11.75	14.91	10.85
5	14.14	18.38	17.55	13.03	16.12	17.62	12.69	15.07	13.41	14.08	11.54	12.41	10.28	11.54	11.77	11.92	13.76	10.86	11.05	11.40
6	15.78	19.49	16.60	17.40	17.80	16.82	14.22	13.40	12.24	11.66	12.31	11.56	13.25	10.08	13.67	11.11	14.63	10.62	11.94	14.08
7	15.62	18.36	14.75	12.75	14.47	15.70	12.86	12.96	13.86	14.00	13.93	13.24	11.08	10.39	14.27	13.89	13.29	11.50	14.06	10.74
8	13.84	18.83	16.60	16.17	17.24	15.54	12.53	14.18	11.85	11.94	13.83	10.55	11.99	13.37	12.79	10.77	15.17	11.10	11.86	14.07
9	18.22	19.28	14.25	18.22	15.87	17.59	15.00	16.24	15.70	10.85	13.72	12.51	11.94	10.39	13.90	9.89	14.02	12.35	10.78	13.21
10	16.26	17.29	15.87	14.06	15.94	16.27	12.08	12.56	11.50	10.64	14.72	14.05	14.58	12.48	14.00	13.12	10.84	10.62	15.33	13.18
11	15.16	18.90	16.09	16.82	16.36	16.94	15.44	12.43	13.63	12.49	12.05	11.16	14.33	11.10	14.26	10.26	14.96	13.71	12.53	14.25
12	16.52	18.15	14.96	13.49	16.76	13.65	14.51	14.67	14.27	11.94	13.30	14.74	14.60	10.11	12.73	11.77	14.37	10.77	13.20	13.43
13	14.96	15.44	15.57	15.90	16.99	15.93	11.86	14.98	15.15	14.21	11.89	11.59	14.38	13.72	10.78	12.29	11.80	13.88	14.74	14.50
14	15.69	16.50	14.60	16.10	15.92	12.82	11.85	12.20	11.89	14.22	14.71	10.31	14.49	12.79	14.16	12.99	10.93	10.33	15.01	12.66
15	16.02	18.05	15.66	16.11	15.96	13.03	13.83	12.11	14.56	10.90	13.91	12.42	14.46	12.56	12.82	12.39	15.30	13.29	12.40	11.28
16	17.58	18.70	14.32	16.77	17.79	15.00	12.12	16.29	12.66	13.78	14.78	12.94	10.80	10.67	13.97	12.96	14.29	10.72	15.28	11.37
17	14.87	16.44	17.27	14.61	17.36	14.03	11.50	12.99	13.58	12.29	14.81	13.93	14.19	10.99	14.18	13.14	15.16	11.36	13.04	14.46

编号	day141	day142	day143	day144	day145	day146	day147	day148	day149	day150	day151	day152	day153	day154	day155	day156	day157	day158	day159	day160
18	17.35	15.04	14.60	16.93	17.66	14.58	15.04	15.36	11.48	11.51	13.37	12.29	10.39	11.28	12.92	11.85	15.09	13.92	11.98	12.30
19	17.15	17.61	17.63	16.16	14.30	15.13	15.35	16.11	15.90	11.68	14.88	13.35	12.20	13.89	12.29	9.84	13.38	12.78	14.03	11.86
20	17.12	14.73	16.97	16.79	15.10	17.67	12.89	13.77	11.56	10.25	15.32	13.26	13.86	10.16	11.84	9.90	15.16	12.25	14.54	13.74
21	18.80	15.33	17.89	17.12	14.55	13.10	13.68	12.50	13.51	10.33	14.11	13.23	10.39	12.83	11.68	14.10	14.32	10.30	11.77	14.06
22	18.80	17.32	19.10	15.74	14.05	16.86	14.83	15.32	14.91	13.72	14.75	11.29	12.69	11.95	14.75	11.13	13.54	10.95	13.87	11.75
23	19.53	18.28	13.75	14.93	16.08	15.95	13.89	17.10	13.59	11.22	13.86	14.09	12.17	13.33	11.89	10.27	11.26	11.57	14.63	11.79
24	15.72	19.30	13.77	14.80	12.80	16.86	12.58	12.80	14.46	12.26	12.41	14.58	11.15	10.95	14.29	13.82	11.90	13.86	11.53	10.45
25	16.86	15.04	13.79	12.83	15.20	13.41	12.63	15.85	13.37	11.73	13.71	11.14	13.87	11.62	11.22	11.28	11.32	13.72	12.70	11.71
26	17.82	18.02	16.21	15.16	14.94	14.56	12.98	14.63	14.66	13.31	14.84	13.03	13.58	11.39	13.16	13.73	14.80	14.17	11.34	14.38
27	19.59	16.66	15.31	17.23	17.56	16.63	11.85	14.71	13.75	11.47	15.24	13.95	14.26	10.64	11.15	12.24	15.00	12.07	14.98	12.84
28	19.50	14.99	13.95	14.52	13.60	14.88	14.04	17.01	13.70	14.36	11.99	12.47	13.47	12.81	10.48	13.33	13.80	10.85	11.08	11.66
29	17.43	17.66	15.64	14.44	14.02	17.35	13.72	13.29	14.88	10.38	13.05	12.76	12.99	10.21	11.72	13.42	14.46	11.03	15.32	12.77
30	15.04	14.55	18.78	17.53	13.71	16.50	12.20	13.30	11.38	10.33	12.75	11.71	10.83	10.29	13.81	13.15	14.87	12.63	11.77	10.79
31	15.94	17.20	15.32	15.40	15.15	12.78	12.72	13.94	13.98	11.43	11.63	12.36	13.45	9.83	12.26	13.18	11.13	14.72	13.47	11.26

表 4 学习曲线数据收集——吊放钢筋笼

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21	day22	day23	day24	day25
1	51.00	50.00	49.00	45.00	46.00	43.00	42.00	43.00	36.00	35.00	33.00	32.00	31.00	32.00	30.00	29.50	30.00	29.00	30.00	30.00	30.50	30.50	31.00	29.50	30.00
2	49.74	61.02	52.94	52.36	49.39	40.39	42.87	51.67	40.36	32.46	30.15	34.13	26.76	32.09	32.76	25.29	26.49	24.89	33.03	29.75	27.81	25.93	27.49	27.22	29.84
3	52.43	52.77	43.33	53.20	48.81	44.35	39.49	49.77	35.18	32.52	28.07	30.44	26.64	33.69	36.74	34.76	33.93	27.46	28.71	31.61	29.01	31.99	27.79	35.02	30.45
4	56.30	49.57	50.25	38.35	44.61	45.73	49.34	43.27	40.62	32.73	38.00	28.60	27.68	31.86	31.04	33.55	30.45	26.16	33.03	31.50	34.23	36.37	26.69	26.99	25.90
5	58.47	60.25	56.07	53.47	49.49	50.81	44.93	36.99	31.29	34.17	30.47	33.11	26.87	31.46	36.53	29.18	33.99	25.76	29.61	28.38	35.57	28.99	30.58	25.43	29.40
6	59.73	55.31	52.78	41.57	48.19	49.05	41.62	50.02	31.46	41.86	36.62	35.93	36.43	29.33	30.51	29.23	29.30	25.65	25.55	28.73	35.96	37.27	36.83	35.06	28.43
7	58.99	50.51	45.51	45.63	49.48	42.16	41.41	46.88	38.35	37.00	30.49	31.70	28.56	30.29	26.25	30.94	36.32	28.76	32.81	36.85	34.29	34.35	33.29	30.53	27.18
8	53.79	51.63	46.69	46.22	44.08	50.56	38.20	51.91	39.89	35.05	31.31	33.43	36.31	35.37	28.80	34.72	31.00	33.87	34.02	34.22	29.39	32.92	31.68	25.33	27.66
9	50.99	57.02	52.02	49.38	44.62	48.11	50.52	41.70	41.90	41.25	33.92	37.84	26.81	38.81	36.31	34.42	33.05	31.69	32.84	31.71	32.07	35.61	37.40	35.96	35.74
10	49.52	54.53	52.84	52.89	52.11	43.41	50.09	52.62	33.34	32.17	29.43	37.79	28.95	29.95	33.91	33.61	35.30	32.52	31.46	27.65	26.69	34.40	26.72	34.05	31.21
11	54.00	54.56	52.48	55.25	54.22	37.38	43.66	39.15	36.44	42.46	33.70	28.26	27.34	29.34	32.60	33.29	30.17	27.87	29.04	34.55	35.24	33.38	36.32	26.33	35.45
12	59.33	61.10	49.83	45.38	39.51	45.17	44.87	40.67	37.46	41.31	32.96	28.40	28.83	32.36	25.56	31.13	34.34	28.11	29.16	29.45	26.07	30.47	30.11	28.61	32.76
13	53.84	55.02	53.16	51.27	43.14	37.57	45.30	42.67	30.63	34.14	37.56	34.30	30.85	32.16	30.72	28.04	35.19	30.54	26.09	32.92	35.48	28.29	33.80	29.12	29.51
14	51.11	54.63	60.12	52.65	43.17	42.08	48.68	47.35	42.90	33.27	29.56	33.78	35.64	31.90	33.25	28.57	33.30	25.50	29.57	34.16	31.33	25.99	26.91	32.47	33.27
15	59.80	47.83	43.46	55.32	45.27	38.88	38.46	48.39	36.39	30.18	33.94	31.23	36.66	37.50	32.26	29.28	34.22	26.82	35.21	26.71	32.53	32.90	31.31	27.25	26.65
16	45.48	58.73	46.85	47.24	46.14	50.03	40.15	42.98	39.83	42.93	38.30	30.71	35.08	27.64	33.99	27.46	35.28	30.55	31.76	36.05	29.68	33.72	34.48	27.70	31.42
17	43.87	55.13	43.45	43.48	51.20	39.45	37.21	45.00	43.75	42.39	31.92	29.66	28.40	35.36	36.33	33.63	28.09	27.81	33.80	34.46	28.04	36.25	33.07	32.05	26.81
18	51.57	57.16	54.34	46.26	54.68	48.81	37.97	44.54	35.43	32.15	29.54	32.55	32.56	32.15	34.17	28.84	31.37	31.25	27.92	31.88	26.26	35.83	36.85	31.51	27.09

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21	day22	day23	day24	day25
19	44.75	59.39	51.50	52.45	46.25	37.96	42.96	44.04	31.30	34.45	38.08	28.20	28.10	38.06	32.76	30.98	27.65	32.47	28.96	26.98	31.70	32.35	32.88	32.79	30.54
20	51.91	48.89	52.90	53.96	51.70	48.70	38.00	47.71	39.41	38.70	34.11	28.10	29.81	33.18	34.58	33.35	25.59	31.00	35.00	27.89	34.93	37.20	28.93	28.33	32.04
21	62.29	44.84	48.75	51.75	42.34	49.91	37.10	38.79	42.36	35.57	38.82	28.12	27.66	34.09	35.93	29.14	26.31	28.40	35.22	26.63	30.03	34.99	36.12	33.58	28.88
22	55.21	46.69	58.45	51.20	52.71	39.40	37.30	49.82	39.48	41.32	36.78	38.29	37.03	37.84	33.97	29.26	33.98	30.71	27.22	29.03	33.10	26.57	32.65	25.29	34.63
23	59.69	60.15	50.67	45.89	44.29	41.92	41.88	37.15	42.55	39.64	39.65	37.19	35.12	28.94	26.91	28.92	27.78	27.08	33.96	31.81	26.23	26.45	35.47	30.90	32.68
24	43.58	49.36	52.65	50.59	40.59	46.10	46.62	39.49	33.27	41.47	38.84	30.93	29.68	27.84	26.70	26.06	36.12	32.16	30.24	33.39	36.19	29.67	30.56	27.26	28.15
25	47.36	52.46	57.09	55.07	54.55	43.62	48.43	50.82	33.31	32.88	40.05	37.63	37.27	32.36	33.92	35.40	29.19	27.64	36.05	31.75	30.72	35.07	31.65	26.62	31.79
26	52.23	59.27	53.44	45.00	51.35	51.82	38.43	48.53	38.48	38.79	29.75	33.22	26.71	31.12	29.55	27.74	26.33	27.07	30.09	35.43	27.85	28.12	35.76	32.75	36.00
27	50.29	61.15	50.02	43.14	49.79	49.78	39.75	47.99	38.44	39.19	30.55	34.57	34.32	36.57	35.62	27.96	36.46	34.89	34.58	29.86	31.85	30.61	37.82	29.57	31.97
28	50.15	45.95	49.17	45.88	40.41	45.34	38.83	37.17	32.97	35.34	33.09	35.51	32.26	27.24	30.21	28.65	35.40	34.72	29.67	32.67	36.79	34.10	26.50	35.24	36.83
29	59.79	56.89	43.78	53.58	40.93	40.99	36.16	50.85	37.34	38.22	31.68	36.30	34.48	31.87	27.69	31.20	30.33	30.09	32.37	34.16	27.44	28.43	32.45	28.03	27.27
30	60.29	44.95	54.43	52.90	46.93	47.61	46.75	38.94	42.65	42.55	29.53	35.95	32.29	32.45	26.11	33.67	32.68	34.97	33.62	34.80	35.72	33.25	36.42	28.66	28.06
31	50.99	53.20	49.15	54.41	41.74	44.51	35.72	39.25	42.37	32.87	36.61	31.39	30.56	35.51	26.09	28.72	29.99	26.83	27.45	32.01	30.42	30.42	34.08	35.41	35.91

表 5 学习曲线数据收集——木模放置

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15
1	35.00	30.00	24.00	20.00	16.00	14.00	13.00	12.50	11.00	10.00	10.50	10.00	9.50	10.50	10.00
2	30.31	32.90	26.76	23.37	14.33	13.54	11.30	14.90	9.65	11.23	12.24	12.11	8.92	10.55	11.03
3	41.64	36.69	20.89	18.79	16.37	16.53	12.10	11.60	10.81	12.04	9.69	9.68	8.47	11.61	9.89
4	34.72	32.69	26.07	18.20	17.69	15.85	11.29	11.19	11.11	11.25	12.87	12.22	8.84	9.55	10.39
5	40.64	34.78	27.88	22.50	18.64	12.21	15.00	13.16	13.25	10.87	10.89	12.09	9.30	11.97	11.82
6	40.64	34.89	21.38	17.85	18.00	12.77	11.50	12.98	11.88	11.07	12.07	9.01	9.84	11.90	12.09
7	32.71	31.49	29.40	22.91	13.96	16.84	12.46	14.10	10.01	9.26	10.90	9.44	11.57	12.23	12.16
8	36.27	36.80	26.06	21.26	15.83	13.32	14.93	11.97	10.47	10.13	10.41	9.17	8.44	12.30	12.24
9	42.34	25.65	21.27	22.63	18.65	12.78	13.58	13.40	10.03	11.58	12.74	9.85	10.16	12.73	8.88
10	42.14	32.94	25.36	19.93	17.73	15.45	11.37	10.95	9.84	8.96	10.08	11.01	10.42	9.26	8.55
11	41.62	27.46	26.95	22.15	19.64	14.88	15.83	11.66	10.15	10.34	11.80	8.73	8.09	10.35	10.56
12	35.60	36.26	23.04	22.77	16.64	12.13	14.05	15.03	10.64	8.70	12.36	11.17	8.31	10.39	9.11
13	38.64	34.10	23.05	20.17	15.78	14.20	14.20	12.06	10.39	8.80	12.50	9.40	8.69	10.21	12.08
14	35.64	29.71	24.44	24.30	14.91	12.36	13.88	13.76	11.29	10.54	9.54	11.94	11.22	9.08	11.21
15	39.15	31.88	23.32	24.57	18.21	12.09	15.75	11.78	9.52	9.89	10.50	8.66	11.13	10.86	8.89
16	33.75	28.23	24.27	17.10	15.19	15.51	14.42	13.83	11.72	10.21	9.19	8.93	9.80	11.49	12.04
17	41.45	26.63	28.70	21.99	14.32	16.20	13.73	12.74	12.90	11.64	10.05	10.88	10.25	12.40	11.52
18	32.70	33.07	23.88	20.86	15.03	13.11	14.95	14.23	11.81	10.24	11.29	10.29	9.08	10.95	9.67

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15
19	37.39	36.06	24.21	23.73	17.34	17.16	13.76	11.33	10.38	10.31	11.20	9.65	9.52	11.04	10.99
20	30.00	26.18	21.67	19.10	14.28	14.99	11.75	15.00	9.55	10.27	10.30	10.28	9.24	9.33	10.74
21	41.58	30.27	22.87	19.30	15.18	16.94	13.66	14.23	9.36	12.02	9.98	9.44	8.23	12.50	10.36
22	36.87	35.20	22.71	22.22	17.72	14.11	12.02	15.22	12.75	8.50	9.52	11.98	8.74	9.71	9.91
23	34.61	36.50	28.41	20.71	17.55	11.90	14.60	13.42	9.96	10.38	11.34	10.75	11.44	11.44	12.08
24	35.96	28.98	28.64	23.58	15.69	14.59	11.38	11.28	11.13	10.03	10.64	9.08	10.40	9.69	10.51
25	35.49	35.62	21.78	18.99	15.05	16.39	12.25	14.62	11.51	11.90	12.71	12.22	11.32	9.48	9.14
26	41.38	29.63	26.31	21.15	19.37	13.22	11.12	12.53	10.04	11.73	9.46	11.19	9.75	9.17	10.22
27	30.03	33.82	20.79	23.40	16.69	13.82	15.29	11.66	9.76	8.71	9.69	9.38	9.58	11.91	10.64
28	43.02	35.54	23.63	21.63	16.49	15.15	11.16	12.42	10.34	10.79	12.39	11.34	10.67	12.07	9.75
29	39.92	35.83	24.76	22.98	16.46	14.25	12.84	11.70	12.44	9.73	9.34	11.08	9.59	10.84	8.60
30	42.53	26.68	27.69	21.54	16.56	13.15	12.96	11.53	9.96	8.90	9.30	10.08	11.27	9.29	9.34



表 6 学习曲线数据收集——预埋件埋设

编 号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20
1	121.00	120.00	118.00	116.00	117.00	115.00	115.00	110.00	111.00	110.00	109.00	106.00	107.00	100.00	101.00	98.00	98.00	97.00	95.00	94.00
2	109.26	142.55	100.91	128.00	119.92	137.09	115.52	101.42	98.68	101.20	94.26	105.80	122.36	109.74	89.48	120.30	100.30	105.38	106.67	98.90
3	147.08	136.25	135.51	139.87	102.96	120.14	140.08	111.83	128.51	132.07	109.66	127.33	114.25	108.02	110.45	108.58	90.62	108.43	95.46	110.74
4	115.57	131.32	119.02	120.03	102.45	120.20	104.32	101.33	128.72	134.77	121.56	114.76	111.98	105.53	98.38	88.38	109.97	91.42	114.70	80.42
5	130.76	124.07	101.38	133.80	104.48	114.04	119.95	129.99	121.36	101.68	93.75	115.54	127.05	116.31	120.91	98.76	106.46	95.27	86.75	107.80
6	139.69	122.92	116.72	106.23	118.06	109.62	127.04	114.87	128.32	107.24	110.95	113.02	127.70	104.52	114.43	120.18	89.12	106.95	98.96	80.47
7	137.63	124.95	115.49	128.20	116.02	130.94	127.91	116.39	112.21	120.84	108.96	120.08	99.88	94.09	102.25	84.73	107.60	101.03	86.42	111.57
8	146.99	118.72	127.65	125.25	120.18	107.95	135.12	121.85	100.47	126.70	125.85	127.99	100.12	86.57	121.89	114.04	100.24	117.04	113.38	84.87
9	124.49	117.00	141.38	99.30	132.60	131.56	113.36	129.25	116.55	123.07	116.67	119.60	115.49	120.35	93.32	113.69	92.33	88.40	97.43	98.67
10	143.78	128.48	112.53	112.52	129.76	107.12	103.28	122.20	120.72	117.98	111.54	121.66	112.61	90.74	104.61	112.13	119.36	85.63	106.54	85.73
11	116.87	112.75	135.01	103.76	111.37	140.08	107.34	124.96	132.47	118.39	113.81	104.14	117.52	100.93	92.12	90.47	115.03	102.45	81.37	84.22
12	118.09	120.42	128.71	99.26	118.56	127.04	103.39	126.36	127.96	106.20	102.95	107.72	99.07	88.29	96.32	100.42	116.33	83.37	114.81	107.22
13	120.11	123.69	115.16	126.21	135.90	116.41	111.88	115.64	117.35	134.71	121.74	122.05	123.50	116.54	116.21	89.38	102.67	115.82	109.49	101.57
14	118.29	103.17	139.87	139.38	127.32	115.31	100.21	131.19	107.48	134.01	112.00	101.09	122.27	110.84	110.43	96.14	106.41	100.06	109.87	86.92
15	106.25	133.79	103.39	99.09	118.31	135.73	140.48	117.14	117.92	123.04	96.25	113.71	116.32	113.88	112.78	96.51	89.90	97.56	116.52	106.66
16	107.48	109.61	129.87	122.33	130.13	105.82	126.57	122.72	96.64	103.80	112.55	121.73	130.64	103.94	122.17	111.10	104.33	103.26	81.57	104.22

编 号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20
17	104.87	115.16	116.23	123.46	119.29	126.63	126.00	120.02	135.87	121.83	100.34	104.69	123.80	86.69	95.75	95.25	98.61	93.71	97.38	80.32
18	111.44	131.56	122.29	142.58	118.61	114.40	120.23	129.82	136.06	124.04	93.64	115.17	110.78	107.38	112.76	84.86	111.49	91.44	85.00	108.07
19	127.71	131.40	102.30	124.07	109.29	135.18	115.51	126.28	109.56	124.50	107.17	126.23	117.44	88.31	93.98	99.33	102.99	117.12	103.47	91.62
20	121.58	114.50	125.67	120.55	116.46	137.74	99.14	124.96	104.83	117.98	95.23	94.72	108.52	116.67	118.12	116.63	118.04	115.59	112.13	83.75
21	106.98	141.02	100.74	113.15	122.22	98.33	103.00	116.49	123.94	134.62	98.75	106.62	130.90	112.01	114.61	111.16	106.93	96.20	96.53	103.46
22	138.70	108.01	122.44	106.31	115.07	124.70	112.86	127.93	98.88	112.77	115.77	101.13	112.46	85.88	101.36	95.31	100.38	95.71	109.94	101.65
23	138.59	139.54	112.45	140.52	117.98	131.20	111.30	110.14	132.98	129.50	92.96	115.36	115.07	92.21	90.58	102.35	99.64	100.86	86.46	84.93
24	105.21	137.01	130.74	115.69	119.47	103.67	120.64	114.42	113.45	95.15	104.59	118.71	97.51	95.19	114.26	91.77	100.90	86.37	104.92	99.04
25	146.26	142.63	123.45	99.58	131.92	112.58	103.34	101.03	121.00	97.63	129.40	104.42	109.51	109.43	112.70	99.02	105.49	95.20	112.65	99.77
26	107.75	116.30	111.06	111.16	129.98	111.35	122.61	114.40	131.80	99.25	117.20	110.54	122.46	86.74	107.28	98.76	112.51	84.57	83.61	92.30
27	141.29	127.33	129.30	123.23	107.88	113.16	137.72	132.49	117.77	110.75	102.84	101.91	105.18	99.31	113.05	107.44	113.08	115.71	97.67	113.81
28	133.50	131.47	101.25	107.58	112.77	136.27	119.95	134.03	105.99	118.02	127.82	111.41	106.55	101.41	100.97	114.43	103.94	105.91	112.49	86.63
29	147.84	118.74	131.38	110.40	99.90	133.87	130.98	112.24	106.88	114.73	103.24	125.32	99.69	101.32	114.14	84.98	96.70	111.67	90.68	112.50
30	141.90	107.89	103.32	99.07	107.50	137.97	140.65	122.27	123.70	95.77	129.73	130.13	116.56	99.06	122.11	102.15	116.71	85.32	106.17	103.53

表 6 学习曲线数据收集——预埋件埋设（续表 1）

编号	day21	day22	day23	day24	day25	day26	day27	day28	day29	day30	day31	day32	day33	day34	day35	day36	day37	day38	day39	day40
1	95.00	94.00	86.00	85.00	84.00	85.00	84.00	80.00	81.00	80.00	75.00	74.00	76.00	75.00	68.00	68.00	69.00	66.00	65.00	67.00
2	114.46	90.39	98.94	87.71	85.52	74.71	71.72	86.71	79.51	95.14	88.01	83.32	89.55	67.71	83.28	70.31	80.58	61.52	70.98	70.03
3	110.07	93.87	84.81	86.18	82.63	101.18	77.00	88.73	77.64	95.08	75.74	65.96	82.57	80.49	60.17	66.28	80.87	60.04	65.69	58.57
4	83.69	79.96	82.37	85.08	101.73	82.13	98.44	93.56	91.29	84.72	77.41	74.70	82.84	66.27	83.20	58.95	66.84	79.12	62.59	60.34
5	114.93	81.21	76.96	83.43	80.55	98.86	84.75	68.09	78.43	94.26	65.75	83.82	72.38	74.58	61.80	59.97	59.25	61.35	78.91	77.19
6	103.71	97.02	81.03	98.54	75.49	88.63	83.02	85.44	73.09	74.20	71.94	80.63	76.60	70.35	68.86	82.36	79.64	62.50	68.75	63.10
7	115.95	88.68	92.76	77.45	85.50	84.41	88.25	81.28	82.31	73.71	65.55	76.65	78.93	91.14	66.21	70.94	80.28	79.72	64.02	58.42
8	92.48	111.07	74.59	89.14	80.53	91.39	87.57	92.64	70.98	73.51	89.38	87.30	92.50	66.85	83.38	67.14	78.51	80.75	56.05	59.28
9	99.35	96.77	92.39	93.15	77.28	95.57	73.31	74.63	81.24	97.71	85.34	69.46	80.59	82.26	68.29	59.68	61.63	59.72	69.78	58.35
10	105.86	88.78	85.73	85.87	85.57	99.30	74.10	84.15	79.75	75.10	73.06	68.81	85.18	80.00	73.91	68.67	84.50	58.42	67.88	63.68
11	96.46	103.72	101.77	80.45	71.50	84.84	84.89	87.27	90.62	95.99	64.70	87.23	79.31	91.19	81.56	69.00	76.23	76.43	69.48	70.54
12	105.51	102.44	105.39	85.43	77.13	86.35	83.27	71.51	92.11	71.56	81.47	79.02	85.44	84.17	78.83	78.07	60.64	74.09	69.47	77.73
13	88.20	89.68	105.04	92.77	98.07	93.93	79.69	70.31	84.41	93.01	80.70	83.90	77.20	65.63	69.81	76.77	65.97	78.83	66.74	57.84
14	98.72	95.80	80.05	81.07	102.21	82.31	84.58	80.57	70.87	76.93	82.99	68.73	75.93	65.44	76.91	79.71	64.66	64.18	58.40	67.20
15	95.74	96.05	81.91	82.70	96.23	101.47	82.79	83.31	69.59	73.51	81.30	72.41	76.52	66.88	65.98	77.37	68.35	63.37	61.64	79.50
16	100.45	112.32	80.79	99.60	99.89	102.78	97.52	87.05	79.77	90.25	74.32	74.18	86.67	83.58	69.18	60.37	76.83	60.91	69.86	79.87
17	84.60	86.63	91.96	87.00	78.90	82.06	84.28	92.23	98.92	98.20	77.36	82.00	81.84	68.22	60.39	72.31	73.82	79.60	59.61	77.27

编号	day21	day22	day23	day24	day25	day26	day27	day28	day29	day30	day31	day32	day33	day34	day35	day36	day37	day38	day39	day40
18	83.07	107.84	94.07	98.76	82.68	74.34	83.14	79.65	82.76	90.81	79.12	67.89	84.21	90.39	77.02	66.39	63.61	74.87	59.94	78.22
19	102.66	100.75	97.35	86.33	97.21	96.91	79.82	81.13	93.95	88.98	70.57	78.61	66.71	73.83	59.93	80.73	64.08	58.09	75.16	64.02
20	92.29	108.35	101.62	88.99	85.61	103.19	96.25	80.06	84.62	77.88	91.74	70.83	81.10	83.44	83.58	68.62	84.11	56.62	62.87	78.30
21	103.39	83.00	94.67	99.55	91.69	85.83	71.97	76.44	83.26	70.15	66.08	78.50	85.97	78.34	76.19	64.62	63.71	80.26	72.03	72.63
22	103.40	106.32	80.34	74.27	86.12	77.73	91.29	87.68	98.65	90.74	84.14	82.65	72.36	77.69	63.24	78.42	77.63	75.45	75.10	77.04
23	104.71	109.55	86.52	90.81	85.24	78.29	98.40	94.37	75.52	82.28	75.13	71.51	93.22	86.36	71.17	75.64	68.47	74.91	64.37	78.33
24	95.96	93.25	91.26	89.94	100.71	75.98	99.43	68.68	70.56	87.82	70.99	64.09	75.47	66.08	63.11	59.96	78.66	63.28	69.57	64.68
25	109.90	106.65	98.73	102.89	75.00	93.64	90.04	93.16	81.29	76.28	76.96	78.25	76.37	77.65	67.91	66.28	64.14	57.71	76.73	74.98
26	112.53	108.04	80.91	80.07	88.62	95.46	76.35	78.22	68.92	87.48	88.32	75.26	73.38	75.94	76.78	76.12	80.77	80.16	55.64	77.85
27	115.28	82.40	89.18	91.90	80.52	81.42	96.20	86.16	79.33	83.08	85.64	89.01	82.76	90.19	76.94	70.35	80.56	62.49	73.41	62.07
28	83.88	113.77	104.20	79.37	73.91	77.59	99.34	74.36	93.26	87.92	72.36	64.17	79.91	64.32	76.87	70.04	80.87	63.92	76.29	74.16
29	97.21	82.37	103.00	78.13	83.21	101.29	98.51	79.37	84.95	82.39	69.08	90.42	91.24	74.48	77.09	81.60	70.62	63.86	57.09	71.10
30	104.41	106.62	98.78	86.77	87.66	81.50	77.15	69.20	98.78	70.26	71.01	89.25	67.67	88.87	66.92	64.37	75.15	67.03	72.86	60.05

表 6 学习曲线数据收集——预埋件埋设（续表 2）

编号	day41	day42	day43	day44	day45	day46	day47	day48	day49	day50	day51	day52	day53	day54	day55	day56	day57	day58	day59	day60
1	65.00	65.00	64.00	65.00	63.00	63.00	62.00	61.00	63.00	62.00	60.00	60.00	60.00	58.00	57.00	59.00	59.00	60.00	59.00	60.00
2	79.89	65.84	66.52	65.25	55.62	73.64	64.64	71.57	63.65	59.27	52.10	68.31	70.88	71.24	58.56	60.41	56.31	53.11	54.40	71.55
3	74.00	60.28	71.49	63.51	75.04	72.38	63.94	74.33	71.73	53.47	52.60	57.05	54.88	69.14	64.77	68.27	69.55	66.34	59.26	63.72
4	77.42	65.15	74.19	58.31	70.28	73.01	54.26	55.98	55.10	56.56	65.34	72.99	64.68	71.08	49.57	68.70	58.71	68.03	60.45	53.60
5	74.90	69.35	56.06	69.73	56.62	75.30	66.08	58.97	72.07	68.16	68.08	60.79	56.94	59.35	49.27	66.38	69.98	65.68	52.20	58.18
6	71.29	55.89	71.28	66.29	65.63	66.22	68.77	69.25	72.26	69.95	54.92	69.69	71.91	50.66	55.25	69.88	62.19	57.39	53.03	57.46
7	59.61	69.99	64.73	72.76	68.26	56.18	72.11	72.90	65.37	59.34	57.77	61.58	67.23	55.92	53.97	65.43	52.31	56.44	66.08	57.32
8	67.38	68.52	77.95	71.19	63.73	66.02	74.91	63.23	74.61	72.76	62.99	59.09	54.13	53.96	64.08	58.14	72.21	68.24	66.10	53.20
9	64.14	68.30	68.90	68.75	67.45	56.29	57.64	62.86	73.51	53.21	58.40	63.72	54.32	61.00	69.17	61.02	66.55	62.44	55.92	60.13
10	72.31	75.48	64.84	72.20	62.94	77.27	63.90	60.00	63.62	72.41	51.93	63.77	64.33	56.16	61.30	53.79	61.28	60.75	71.99	55.46
11	71.79	64.00	75.96	55.80	70.58	73.24	75.68	67.03	67.46	56.34	70.68	54.98	54.96	66.41	63.22	63.49	55.36	69.98	64.38	69.44
12	72.54	69.95	62.95	79.81	59.00	71.19	62.03	72.16	74.74	53.77	71.19	63.66	71.93	50.55	53.38	65.88	70.50	61.83	72.38	57.20
13	70.24	67.82	66.91	62.73	54.09	68.99	62.20	58.98	60.71	64.79	59.38	71.29	70.06	62.44	57.26	56.22	55.64	51.47	54.83	58.81
14	78.16	65.73	55.79	71.79	63.60	54.07	75.16	54.18	57.66	66.59	53.59	55.82	61.60	66.38	67.01	51.92	53.31	52.78	52.51	67.21
15	59.55	73.21	74.87	72.97	73.96	57.56	66.52	71.40	65.34	68.73	64.67	59.02	61.08	67.08	65.06	70.05	53.05	69.44	63.28	70.83
16	62.95	73.44	63.96	77.63	63.24	62.04	54.86	54.69	60.71	56.08	59.41	60.94	72.79	53.49	66.45	70.94	61.75	66.98	70.21	57.14
17	60.35	78.79	65.23	61.78	66.15	69.53	70.80	66.57	60.22	58.48	68.90	66.52	56.34	62.92	59.61	57.60	53.48	71.93	51.27	66.30

编号	day41	day42	day43	day44	day45	day46	day47	day48	day49	day50	day51	day52	day53	day54	day55	day56	day57	day58	day59	day60
18	71.96	77.57	58.58	73.11	59.83	64.59	63.00	70.36	58.93	54.22	62.83	68.67	51.59	50.52	63.80	53.95	64.46	70.68	58.54	67.53
19	67.21	77.39	74.69	69.10	75.87	60.36	54.89	73.66	58.50	74.32	54.55	66.48	64.70	56.47	53.39	55.80	55.27	73.35	65.11	65.55
20	65.06	65.05	63.24	62.53	58.29	63.99	60.49	57.84	60.73	57.89	66.25	72.87	51.87	53.72	68.64	64.45	65.65	51.54	58.34	60.82
21	59.79	78.20	59.34	72.91	74.14	71.01	59.20	73.46	60.37	60.46	54.30	56.50	65.72	71.22	64.96	60.57	69.87	51.43	55.25	66.03
22	77.30	66.09	60.12	79.77	54.51	72.26	70.90	58.05	65.54	73.43	72.27	58.59	69.22	50.09	52.98	63.89	53.61	70.19	62.92	51.38
23	58.31	55.28	56.59	75.98	75.33	77.11	69.82	68.83	62.03	73.55	51.51	67.96	58.54	52.65	61.76	51.36	66.17	62.00	71.89	61.17
24	58.38	71.04	63.57	75.87	67.60	68.82	57.90	55.24	75.65	53.86	71.52	56.42	70.85	52.85	65.71	57.51	65.59	58.45	70.40	70.32
25	64.69	66.96	60.80	71.61	70.15	66.20	66.34	57.70	69.35	54.39	63.57	60.60	58.11	51.43	69.51	59.65	52.85	67.97	58.69	52.41
26	62.69	74.83	62.34	56.87	55.33	60.82	58.58	70.13	57.61	61.64	58.70	65.54	60.62	64.19	63.96	63.63	59.03	65.73	66.91	62.93
27	76.92	79.06	72.37	72.64	65.31	56.90	61.10	52.01	66.37	74.16	63.69	72.64	51.70	69.64	61.78	69.01	50.67	61.74	53.92	60.01
28	76.10	62.28	71.92	74.47	71.62	61.96	60.32	66.07	73.96	73.04	60.13	66.69	66.36	57.51	63.70	51.91	54.88	64.13	56.41	60.52
29	65.29	63.98	60.36	77.00	54.19	56.82	60.45	67.36	59.53	69.53	63.09	51.47	53.15	51.06	58.46	70.59	71.43	58.83	67.42	68.46
30	59.63	62.59	55.53	60.05	70.41	56.80	58.92	62.55	55.19	55.86	61.84	65.20	57.22	51.94	56.55	69.69	52.28	57.03	67.80	63.33

表 6 学习曲线数据收集——预埋件埋设（续表 3）

编 号	day61	day62	day63	day64	day65	day66	day67	day68	day69	day70	day71	day72	day73	day74	day75	day76
1	58.00	57.00	56.00	56.00	57.00	56.00	55.00	56.00	56.00	55.00	54.50	54.50	55.00	55.50	56.00	55.00
2	67.11	52.31	66.77	53.30	65.31	57.22	53.68	55.42	62.73	58.17	49.44	56.67	52.23	51.83	58.70	54.15
3	63.33	69.89	66.69	66.63	55.03	57.05	67.07	59.44	49.65	63.06	61.49	51.54	55.07	47.45	61.31	67.02
4	65.97	55.75	63.88	64.95	49.92	52.82	55.29	58.54	56.36	52.00	54.59	52.21	64.24	62.87	52.38	61.95
5	56.32	56.28	64.95	58.73	63.79	56.93	57.49	52.48	63.16	62.47	61.37	66.18	63.34	62.66	52.27	48.94
6	67.68	68.42	64.26	49.32	68.42	64.93	50.87	50.53	67.42	48.67	53.40	60.42	56.69	66.33	58.29	62.62
7	56.29	50.98	51.71	54.55	59.06	50.10	59.96	54.37	49.26	67.03	49.10	63.16	57.96	58.94	65.14	54.78
8	51.04	49.03	67.52	65.71	69.08	54.93	60.01	60.45	68.40	55.02	56.74	64.66	54.90	63.70	62.11	50.16
9	65.01	67.25	68.51	64.91	66.34	52.16	53.11	56.62	52.85	63.34	58.93	59.68	52.90	53.93	50.02	53.92
10	58.75	57.81	63.86	47.72	58.10	66.42	52.97	65.71	48.61	53.16	57.89	52.67	55.59	56.10	51.59	48.24
11	60.85	66.57	47.71	55.17	66.70	54.44	54.57	48.63	51.88	58.65	61.94	49.24	52.44	58.07	66.60	54.03
12	50.76	66.69	59.85	55.12	65.97	67.99	48.68	51.51	65.42	57.51	62.83	65.62	54.47	47.80	58.34	64.52
13	68.77	54.70	48.47	63.45	58.99	58.10	51.32	63.42	56.04	63.98	51.28	51.29	55.75	48.29	65.84	46.94
14	49.60	67.87	55.54	57.68	62.22	53.07	64.57	64.10	50.40	65.37	65.39	55.70	53.04	60.84	51.36	63.97
15	67.98	50.83	56.26	65.21	57.88	50.11	61.13	48.83	66.13	51.01	60.76	58.28	51.33	66.96	56.27	54.64
16	50.53	65.43	49.15	57.67	56.71	49.60	65.93	48.06	66.11	55.57	48.67	50.92	66.36	60.77	54.54	50.70
17	50.15	56.02	50.01	56.87	61.91	58.93	47.89	54.83	58.68	61.21	63.76	53.96	51.19	61.29	61.51	57.41

编号	day61	day62	day63	day64	day65	day66	day67	day68	day69	day70	day71	day72	day73	day74	day75	day76
18	50.39	65.57	49.65	61.06	51.68	65.21	58.80	67.13	62.33	48.09	65.40	53.15	55.88	59.58	64.27	55.22
19	64.12	56.94	67.38	55.14	58.62	67.77	64.52	49.66	55.78	61.04	46.85	60.10	60.60	55.08	54.66	53.46
20	55.72	62.14	64.41	50.60	56.19	47.78	59.10	66.73	62.94	53.75	51.65	66.75	50.05	63.58	58.63	54.98
1	49.48	66.90	55.20	62.08	61.40	63.22	57.84	60.47	68.52	61.88	63.33	65.45	62.28	51.45	66.93	55.15
22	51.09	50.15	62.23	60.89	59.96	51.59	47.61	67.86	60.92	66.44	56.76	63.23	60.25	51.98	51.39	65.44
3	54.81	68.43	68.61	51.13	59.63	68.19	49.25	49.76	49.61	56.03	55.06	55.76	67.58	62.35	60.46	61.29
24	66.18	61.76	54.83	64.35	57.16	60.07	49.55	52.15	58.91	63.15	51.58	47.29	57.93	48.46	59.18	53.66
25	60.52	57.39	55.95	63.30	68.80	52.11	51.01	50.05	68.27	61.35	54.78	49.41	53.01	55.79	60.38	51.52
26	59.46	52.36	67.42	65.11	65.76	67.72	50.94	60.14	68.48	65.11	62.45	54.96	63.36	59.99	50.12	59.23
27	59.12	63.03	58.11	65.83	57.00	67.99	52.45	48.00	50.27	56.10	56.27	56.97	56.11	67.57	60.14	55.19
28	60.99	56.87	48.07	62.40	69.60	67.35	62.96	52.12	51.68	54.02	56.17	47.35	60.89	56.26	61.75	59.44
29	56.41	64.52	53.80	59.21	53.30	64.77	58.78	53.42	54.70	55.82	50.81	47.22	48.41	68.08	51.66	61.79
30	66.52	50.04	64.58	55.84	66.15	53.97	52.48	48.24	61.48	61.26	48.48	64.73	58.88	59.06	64.33	50.89



表 7 学习曲线数据收集——浇筑前检查

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21	day22
1	26.00	25.00	25.50	23.00	22.00	21.00	20.00	19.00	18.00	17.00	17.00	15.50	16.00	14.00	13.00	12.00	10.50	10.00	10.50	9.50	10.00	10.00
2	27.31	21.36	26.33	25.45	25.19	18.93	19.74	19.25	21.06	18.57	17.40	14.27	15.42	12.65	14.51	12.03	10.29	10.05	11.25	11.56	11.61	11.29
3	29.91	26.94	24.26	26.33	21.14	24.24	20.68	16.76	16.28	15.23	15.62	13.43	14.55	13.81	11.84	13.40	9.50	11.89	10.68	9.23	8.54	11.38
4	26.04	29.21	24.04	26.01	19.36	18.23	23.29	20.98	15.37	19.41	16.19	16.01	18.15	12.99	14.07	11.64	9.37	9.97	11.46	10.54	8.57	12.07
5	23.25	28.10	27.65	21.77	26.32	23.43	23.71	17.44	22.00	19.27	20.01	18.61	15.85	11.98	14.71	14.14	9.16	10.82	10.82	10.73	10.06	11.87
6	31.35	22.76	30.40	21.76	21.18	18.15	23.32	21.85	21.23	16.80	19.51	15.50	18.09	12.56	14.90	13.20	10.06	9.14	10.93	9.23	10.21	11.38
7	22.64	28.00	29.40	21.23	19.38	22.95	17.72	17.35	21.03	15.21	20.78	16.55	15.40	16.64	11.20	11.92	12.81	10.23	12.55	8.18	11.44	10.20
8	26.47	29.00	28.67	27.48	19.29	24.03	20.65	22.47	17.92	20.10	15.08	18.07	16.82	12.34	13.13	12.02	10.58	10.85	9.30	10.69	10.04	10.24
9	28.19	24.21	24.03	24.02	22.80	18.90	22.65	17.93	15.85	15.59	16.93	14.11	17.00	12.81	11.58	12.49	12.28	11.48	10.38	11.15	9.10	8.50
10	30.48	30.72	25.36	27.44	23.41	23.08	20.61	17.97	21.28	14.66	20.41	18.39	15.62	15.45	12.89	12.52	9.31	10.55	11.11	11.57	9.92	12.22
11	28.95	25.44	28.20	24.76	19.07	22.37	21.41	19.21	20.30	14.77	15.65	16.76	14.00	13.47	11.78	11.35	12.36	9.22	11.86	8.43	10.95	10.81
12	30.24	27.57	24.20	23.81	24.48	21.96	20.91	23.32	18.74	18.41	17.75	17.81	18.37	17.17	12.29	11.28	11.80	11.87	9.81	11.58	10.25	12.30
13	30.07	28.75	21.87	21.15	24.30	24.77	20.26	22.44	19.27	18.24	16.90	14.42	19.67	15.18	15.00	10.30	9.21	12.26	9.13	8.60	11.03	11.79
14	29.76	22.24	29.73	28.22	20.80	20.41	20.56	21.97	19.36	16.28	19.28	17.92	16.15	13.12	13.59	13.51	10.19	10.45	9.43	10.47	11.84	11.05
15	28.24	28.90	23.60	26.74	25.42	21.39	22.25	16.21	15.77	14.60	16.13	13.38	18.71	13.94	14.18	11.76	10.59	9.70	9.60	9.49	9.30	10.99
16	25.21	27.15	24.82	21.63	21.92	19.71	17.14	23.10	16.81	17.96	18.35	14.85	19.55	15.35	13.60	13.63	11.58	9.19	10.92	11.61	8.95	9.63
17	26.14	21.37	25.71	23.63	19.55	22.81	19.10	19.32	15.52	17.03	16.44	15.92	13.60	15.46	11.32	13.63	10.26	8.61	10.57	8.87	10.53	9.63

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21	day22
18	29.89	27.21	27.59	24.54	21.19	18.86	21.50	20.75	21.57	18.80	15.50	17.53	16.94	15.55	15.46	12.54	9.36	9.35	12.78	9.36	12.09	9.05
19	27.28	27.42	22.37	21.75	18.71	23.78	18.62	18.47	17.95	18.79	14.95	13.82	15.13	16.69	14.46	12.32	12.61	9.43	11.52	10.83	9.10	9.12
20	27.13	28.68	26.55	27.12	21.57	24.53	22.98	18.53	19.79	16.24	17.60	14.93	17.54	12.01	13.03	13.68	9.17	10.26	12.80	9.63	11.42	11.41
21	24.48	29.76	22.61	22.57	22.57	23.73	19.17	22.36	16.22	19.04	18.59	14.84	15.66	15.41	13.81	11.83	9.02	10.47	11.26	10.51	9.61	10.35
22	27.08	23.69	22.86	22.18	21.24	23.76	22.75	17.05	15.73	18.22	17.60	14.74	15.78	16.87	14.43	10.93	11.37	11.47	8.93	10.33	9.79	8.74
23	24.19	27.91	25.49	22.40	25.32	24.59	23.46	22.89	18.33	20.00	20.45	19.05	17.92	11.99	11.12	12.78	9.00	11.38	11.00	9.44	9.71	10.50
24	26.17	21.64	28.24	21.66	20.74	23.47	21.51	19.56	21.65	19.42	17.62	18.33	18.78	16.91	14.73	10.65	12.19	10.31	9.21	11.34	11.83	8.57
25	30.85	24.13	22.63	24.29	24.75	22.37	24.28	20.60	18.33	15.82	17.69	15.85	19.27	16.34	12.85	13.32	10.48	11.69	12.03	9.42	9.73	12.03
26	26.39	23.39	24.20	22.21	19.00	19.65	21.42	19.59	21.43	18.24	14.89	17.56	19.02	13.28	15.03	11.34	11.02	10.75	10.30	11.64	10.73	11.56
27	26.62	27.88	26.79	21.59	23.23	23.35	23.22	19.22	21.00	19.42	14.95	18.15	15.26	15.78	12.52	13.22	12.21	10.41	12.21	10.40	11.68	11.20
28	27.89	25.18	30.60	21.19	26.76	24.72	18.77	17.16	16.36	15.69	19.91	17.69	18.96	15.08	14.09	13.08	12.65	8.98	11.32	11.45	11.12	11.57
29	28.26	21.59	28.23	20.82	25.77	19.34	20.78	21.71	17.92	15.91	14.81	14.57	15.90	16.58	15.04	13.39	9.08	8.62	10.90	9.08	9.69	11.16
30	31.34	22.27	26.49	26.62	23.43	21.65	19.53	21.01	17.03	17.79	18.60	15.87	13.83	14.96	14.32	14.63	12.60	8.77	9.79	10.72	10.75	11.70

表 8 学习曲线数据收集——混凝土浇筑

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10
1	62.00	55.00	50.00	46.00	43.00	42.00	42.50	43.00	42.00	42.00
2	57.15	54.51	50.03	50.83	50.21	38.76	49.40	45.81	37.84	47.30
3	53.48	62.57	58.21	41.82	46.19	46.88	45.99	45.95	51.03	45.74
4	52.91	58.21	44.35	49.72	44.25	43.34	48.76	47.45	38.11	41.24
5	60.22	49.95	54.86	47.90	37.76	36.16	51.59	38.96	40.77	36.43
6	71.04	50.71	59.85	40.56	43.78	37.98	36.17	51.16	40.49	39.12
7	56.67	57.73	52.70	46.97	52.17	44.31	52.16	47.52	43.33	48.54
8	59.97	66.13	60.58	54.21	52.27	37.60	39.73	41.04	37.93	50.73
9	54.64	53.64	50.60	50.16	46.68	48.52	41.26	45.27	50.94	48.52
10	72.36	58.66	52.53	55.95	52.09	39.23	47.94	48.28	50.15	40.07
11	69.66	48.69	46.85	39.89	49.41	38.14	43.59	42.64	46.13	44.36
12	72.48	50.57	57.48	48.76	41.04	37.92	44.30	48.33	37.21	41.35
13	70.38	61.34	60.56	39.97	51.46	36.80	50.87	48.24	41.31	38.18
14	73.70	51.39	57.37	44.88	45.22	41.59	39.61	43.36	46.61	39.10
15	75.00	56.02	52.91	39.66	39.38	38.68	40.87	42.09	51.18	42.41
16	58.98	53.24	61.27	39.31	42.84	39.08	42.92	49.13	50.55	46.39
17	59.37	62.09	49.43	41.96	47.73	48.84	41.50	42.57	36.63	40.91
18	60.15	54.36	50.52	45.63	37.82	44.65	38.22	44.73	47.79	39.78

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10
19	66.69	49.64	48.54	41.57	39.58	44.85	42.22	43.58	43.87	42.31
20	64.84	48.18	61.08	51.41	51.62	40.19	48.16	38.67	36.02	37.34
21	66.32	51.46	42.79	47.66	49.92	44.71	37.26	45.46	51.39	50.28
22	54.28	54.90	61.18	42.24	47.06	39.32	41.00	43.83	51.16	47.00
23	74.79	57.20	49.00	39.52	42.07	42.87	44.09	46.67	36.25	45.33
24	59.62	47.35	43.67	48.57	47.99	42.80	48.37	36.78	36.92	45.40
25	59.15	65.34	45.13	50.16	45.54	44.01	47.73	47.15	42.05	42.55
26	57.60	50.41	59.40	54.38	45.64	47.11	49.25	43.01	38.58	48.47
27	70.22	60.57	54.36	44.30	44.81	39.07	38.89	38.64	35.89	49.58
28	62.46	61.43	57.12	52.84	37.47	49.81	50.18	46.74	39.99	46.45
29	60.06	59.42	54.02	41.31	48.43	50.07	39.38	43.43	51.35	45.52
30	64.48	53.92	54.13	53.83	37.94	50.90	47.16	51.48	47.37	44.52

表 9 学习曲线数据收集——粉光与拉毛

编 号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21
1	92.00	90.00	90.00	91.00	87.00	86.00	85.00	86.00	85.00	86.00	85.00	86.00	85.00	75.00	74.00	75.00	76.00	76.00	75.00	76.00	75.00
2	89.64	100.97	110.00	102.82	86.53	75.35	75.82	76.53	76.88	90.69	80.98	98.73	95.29	84.19	85.79	78.92	78.16	79.40	88.57	79.94	84.66
3	86.91	109.94	92.90	96.22	99.40	83.24	95.76	103.04	82.60	84.09	86.10	86.42	95.96	72.23	64.01	85.58	90.96	90.09	89.53	82.11	84.19
4	90.79	106.02	89.47	97.40	85.44	80.05	87.69	87.51	93.85	89.22	76.26	82.92	79.01	88.85	75.34	77.09	68.81	69.35	80.26	81.96	74.54
5	85.42	98.16	83.90	96.86	94.71	84.78	94.80	92.74	96.51	99.09	77.41	100.15	85.06	76.91	64.84	64.29	88.12	85.58	88.03	85.49	66.32
6	99.78	93.97	96.40	102.49	86.88	84.90	91.42	95.33	84.27	90.01	91.39	81.60	78.23	72.99	64.41	74.86	90.68	87.24	68.46	83.42	64.39
7	100.77	81.74	80.66	107.92	77.03	83.45	82.79	79.76	88.31	91.98	73.43	97.12	74.35	85.15	67.52	76.27	83.47	78.13	78.91	85.12	65.24
8	107.48	110.55	109.27	111.30	77.97	104.21	87.85	100.07	82.01	79.62	87.02	81.88	89.52	84.05	78.77	91.99	67.67	92.21	86.54	71.14	74.12
9	103.62	85.03	77.17	81.06	96.53	105.22	83.74	104.00	80.40	93.35	99.15	102.90	90.65	67.89	67.74	69.19	84.35	75.45	69.86	69.58	89.19
10	108.42	86.68	101.01	87.34	95.00	94.95	90.69	83.36	96.85	77.69	94.37	81.70	103.06	82.34	80.67	90.10	86.13	89.63	83.60	71.19	89.77
11	88.71	105.80	102.29	106.68	88.85	93.51	94.86	83.69	97.14	80.98	87.33	73.78	92.63	81.65	80.19	70.11	88.45	67.82	65.26	73.82	84.29
12	90.73	95.71	95.95	109.10	74.21	74.17	100.73	93.30	80.62	82.86	102.13	90.94	87.35	69.08	74.83	86.80	90.65	81.27	69.24	81.60	72.32
13	100.48	79.37	80.26	86.85	77.52	87.74	101.34	92.55	86.83	97.60	86.15	86.02	100.29	70.70	84.61	75.48	85.62	68.26	73.21	84.03	65.93
14	80.92	97.51	96.89	82.25	99.99	89.02	89.20	95.30	104.45	94.07	72.94	100.12	87.09	78.65	82.70	82.90	66.57	81.60	69.08	85.81	81.67
15	111.73	92.51	97.09	85.60	76.43	76.25	97.55	95.73	99.66	104.40	98.06	105.63	98.97	68.49	76.65	75.53	66.45	74.28	76.05	78.08	81.32
16	83.75	81.44	92.61	94.42	99.83	97.21	103.22	92.15	87.53	97.91	86.38	95.61	87.62	80.91	81.99	78.99	82.51	83.98	89.20	72.51	74.11

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21
17	89.28	96.38	84.92	90.17	81.32	82.59	73.11	92.07	95.95	88.30	91.15	94.83	82.88	65.25	65.67	72.35	71.21	91.28	89.13	66.14	72.55
18	94.02	82.50	95.85	85.21	98.61	84.97	91.50	75.24	76.25	100.66	103.42	85.94	100.06	84.42	86.78	76.92	79.26	75.91	87.04	88.53	70.91
19	82.21	81.85	84.73	99.64	101.58	100.86	97.49	102.12	84.75	93.82	91.95	81.88	75.91	77.84	75.10	82.81	69.20	77.71	64.43	65.94	67.81
20	93.17	78.72	103.58	77.85	87.83	94.87	77.28	81.66	80.54	102.28	92.47	87.74	89.16	71.98	76.29	68.40	82.78	64.86	91.72	82.36	90.42
21	92.16	93.96	88.94	99.60	79.12	77.60	93.52	77.81	98.92	77.95	85.83	99.34	97.69	78.81	77.95	81.52	69.67	92.60	82.50	74.47	67.90
22	91.46	99.78	99.36	109.36	75.32	76.82	78.33	105.25	98.09	78.51	80.22	94.60	94.59	70.30	63.12	77.01	87.62	71.23	82.64	64.94	71.58
23	80.73	94.97	79.82	93.09	98.89	98.82	81.21	87.36	95.09	83.58	73.92	96.80	75.33	69.44	83.98	82.10	93.24	83.34	65.17	90.00	66.15
24	90.80	82.65	82.35	91.94	100.25	84.47	101.22	73.40	103.91	95.74	87.10	76.54	93.81	67.40	70.26	82.20	65.66	83.45	69.78	66.81	80.59
25	78.44	102.78	83.06	90.92	75.29	104.57	77.33	94.45	96.37	105.46	84.40	96.34	98.04	74.14	63.44	80.79	79.05	68.47	64.68	75.72	82.80
26	87.70	102.80	95.22	98.41	75.70	91.27	95.91	102.99	73.72	86.83	99.68	89.84	72.66	76.80	63.74	64.72	92.02	90.49	80.31	89.71	64.12
27	97.57	104.73	94.38	94.63	78.55	83.15	92.39	76.83	86.21	85.63	100.44	102.19	89.08	66.97	70.91	74.59	75.92	80.95	64.80	78.59	78.86
28	105.20	105.62	89.59	102.57	89.07	76.60	84.95	85.14	84.48	100.60	96.43	93.77	76.46	69.91	66.31	84.32	92.53	92.46	64.34	70.47	91.25
29	83.89	91.61	83.74	110.11	87.32	90.98	91.84	104.23	93.09	76.62	91.29	78.18	87.61	77.01	86.83	92.03	86.19	82.01	77.51	85.84	82.02
30	100.13	92.58	104.11	78.58	82.61	82.08	96.45	82.79	72.41	95.12	88.86	96.28	83.67	65.34	70.93	67.14	92.31	89.88	65.73	93.22	72.94

表 9 学习曲线数据收集——粉光与拉毛（续表 1）

编号	day22	day23	day24	day25	day26	day27	day28	day29	day30	day31	day32	day33	day34	day35	day36	day37	day38	day39	day40	day41	day42
1	75.00	76.00	77.00	75.00	76.00	76.00	75.00	76.00	74.00	74.00	72.00	73.00	71.00	72.00	68.00	66.00	67.00	65.00	66.00	66.00	62.00
2	69.42	82.19	73.55	87.86	70.54	70.29	78.63	66.00	68.47	72.06	80.11	81.49	84.70	86.98	67.80	64.07	69.45	61.78	75.89	70.72	57.48
3	78.62	77.62	75.04	81.80	89.69	84.95	65.90	74.59	80.19	76.59	85.76	77.76	84.53	77.20	81.93	58.75	61.31	71.20	72.44	66.56	55.56
4	85.74	72.27	68.98	69.39	79.35	66.17	65.54	85.17	81.97	70.91	86.23	84.85	84.46	81.03	71.97	58.43	79.21	56.92	69.15	66.66	60.18
5	89.54	66.59	90.84	66.96	78.06	87.76	69.75	75.11	83.33	73.10	64.79	76.54	68.06	70.10	76.15	63.00	75.47	64.33	57.04	58.38	57.73
6	72.52	68.66	73.70	78.48	92.15	79.21	89.26	65.95	71.05	88.91	84.46	79.96	65.01	79.01	60.74	73.53	78.46	74.46	72.45	75.66	72.67
7	86.06	71.46	80.27	75.12	68.48	67.54	77.94	76.53	86.39	64.90	69.36	78.66	70.22	65.72	62.22	75.05	59.44	60.29	64.34	66.37	59.42
8	88.92	90.05	82.33	75.59	70.38	89.47	78.45	67.46	73.02	78.79	68.91	87.82	67.32	72.41	62.94	62.52	66.39	76.62	72.28	72.41	69.74
9	67.29	89.86	75.18	73.78	82.83	67.85	88.70	66.76	82.77	82.72	81.72	66.38	80.45	87.19	64.12	73.04	59.77	69.31	59.94	61.38	65.33
10	81.13	87.82	77.17	81.28	91.70	67.81	84.91	71.87	85.76	83.21	62.00	85.51	86.46	81.21	73.77	70.99	62.80	75.37	60.99	64.44	61.43
11	76.38	78.87	69.50	74.11	86.05	71.38	86.53	67.66	69.04	66.21	72.29	89.12	79.17	81.73	74.81	70.85	62.14	69.32	69.11	74.54	70.31
12	67.80	92.91	67.61	64.08	85.92	75.80	85.02	87.35	76.58	90.93	76.57	79.10	68.87	73.46	69.30	57.85	65.17	71.58	74.49	71.80	65.20
13	87.39	80.91	68.88	84.98	81.37	73.72	83.10	69.61	65.80	66.83	82.11	76.36	78.72	72.83	80.48	72.63	57.42	68.57	62.64	65.37	75.48
14	73.18	71.59	69.04	84.54	71.10	80.23	74.63	64.79	84.44	63.18	63.47	81.86	69.24	71.29	76.78	67.25	70.64	76.34	78.56	78.24	60.51
15	70.18	74.86	90.53	78.56	68.63	79.46	81.23	82.41	65.48	66.44	83.08	66.02	85.52	83.96	62.55	77.92	62.16	66.29	68.82	64.19	65.05
16	81.17	68.23	73.24	83.25	80.26	85.04	86.57	81.97	71.42	73.89	73.24	72.04	69.67	83.10	79.85	68.89	74.29	74.68	77.78	78.84	65.36
17	77.98	90.26	73.21	80.23	67.09	71.39	83.77	91.11	84.51	84.13	71.34	84.25	70.31	69.41	64.78	79.89	61.79	59.22	81.06	78.99	57.58

编号	day22	day23	day24	day25	day26	day27	day28	day29	day30	day31	day32	day33	day34	day35	day36	day37	day38	day39	day40	day41	day42
18	91.08	71.40	65.46	90.81	87.09	72.66	71.24	73.81	79.16	79.03	78.53	89.40	74.60	85.33	81.32	63.18	69.36	56.35	59.54	66.15	61.98
19	80.03	78.45	83.08	64.61	71.02	80.54	85.48	82.82	80.74	78.88	81.82	66.78	69.81	63.89	59.15	60.24	82.06	79.30	76.98	71.28	75.94
20	66.54	88.23	79.70	84.21	82.60	84.64	74.90	67.58	77.79	73.81	72.30	83.54	84.58	69.10	76.06	56.48	70.45	70.41	76.59	78.32	69.92
21	66.24	72.35	90.23	81.07	92.96	72.85	64.53	86.91	69.14	69.69	63.92	80.01	81.87	80.94	67.84	75.00	61.03	69.65	69.00	77.35	72.67
22	70.21	89.81	82.55	69.10	71.19	71.30	88.71	72.80	76.32	90.87	88.45	63.71	76.91	76.96	62.98	60.88	58.16	61.94	75.42	70.02	54.96
23	72.11	93.44	78.57	72.49	86.15	75.37	69.64	75.22	90.20	70.85	64.98	75.67	78.70	86.12	82.91	69.05	80.69	79.69	77.34	73.70	62.67
24	76.98	82.73	76.81	68.27	69.82	88.75	80.56	83.04	72.70	72.66	81.75	68.56	63.77	80.88	63.88	70.65	58.86	57.44	77.35	56.99	68.70
25	78.63	73.73	86.69	88.92	82.72	92.61	64.59	84.92	75.65	70.58	85.47	70.93	71.36	67.52	79.35	73.92	67.34	76.67	57.88	59.80	72.88
26	88.70	71.64	84.36	75.94	70.37	76.37	68.35	87.16	81.63	74.07	74.55	83.93	63.25	83.75	79.92	66.15	70.58	64.05	78.93	71.35	62.40
27	87.53	70.74	88.50	88.66	78.85	90.93	82.86	74.75	82.46	75.92	67.36	69.76	68.27	71.84	65.78	63.71	74.44	78.26	71.79	62.35	63.51
28	89.44	92.62	87.65	83.58	79.62	70.54	73.19	85.88	73.28	85.38	69.80	79.14	75.42	87.37	62.78	66.80	79.94	67.57	62.07	62.84	64.16
29	73.40	66.79	73.52	76.86	72.01	89.82	66.13	80.57	65.35	84.95	83.25	69.85	64.60	73.28	70.37	75.79	67.24	57.19	60.81	64.68	54.58
30	84.89	86.26	88.37	80.20	82.60	71.93	65.73	71.19	90.39	72.44	63.34	66.89	79.87	66.49	61.69	68.66	66.70	57.01	59.25	80.08	57.35



表 9 学习曲线数据收集——粉光与拉毛（续表 2）

编 号	day43	day44	day45	day46	day47	day48	day49	day50	day51	day52	day53	day54	day55	day56	day57	day58	day59	day60	day61	day62	day63
1	61.00	60.00	60.00	58.00	57.00	56.00	56.00	55.00	56.00	54.00	50.00	51.00	50.00	49.00	48.00	48.00	47.00	46.00	46.00	45.00	45.00
2	60.38	67.83	65.43	68.81	69.62	53.43	63.93	58.61	56.85	63.07	56.74	48.19	58.27	43.45	47.23	51.80	54.92	48.26	50.59	53.77	39.96
3	68.29	65.44	57.17	64.10	50.07	51.90	68.79	65.05	52.80	63.10	57.11	60.31	50.24	50.98	54.83	55.62	44.14	54.12	40.55	40.05	43.19
4	73.87	70.56	73.28	54.07	58.80	60.91	56.12	47.77	65.81	57.75	43.08	60.67	54.34	59.05	58.53	53.30	46.67	42.60	47.35	49.48	51.84
5	66.10	67.91	71.15	62.91	65.54	59.69	56.11	56.11	58.63	55.70	44.78	45.69	51.19	59.71	50.39	51.67	51.74	40.70	52.83	51.41	40.00
6	64.26	52.83	53.59	49.33	65.68	66.14	59.67	51.22	57.80	49.05	51.97	59.38	59.17	55.04	43.66	49.14	51.07	50.65	50.18	38.41	41.78
7	74.76	51.50	67.91	68.28	49.47	55.97	58.41	52.47	60.75	50.11	58.59	45.81	52.78	54.53	50.85	57.84	54.39	51.34	55.14	43.20	53.52
8	61.52	69.01	64.22	61.44	65.07	47.68	54.08	57.55	51.80	65.56	49.61	54.47	54.70	52.40	52.17	54.67	47.41	40.52	52.73	47.08	44.73
9	73.85	53.45	62.37	61.86	69.21	60.51	52.13	61.02	58.40	59.69	53.03	45.24	53.71	52.47	41.91	48.77	52.54	50.28	52.10	43.14	53.68
10	69.82	72.27	67.97	68.03	63.99	59.45	49.81	54.78	53.19	56.40	52.80	59.99	52.95	56.22	47.68	46.07	50.59	47.16	53.17	52.18	50.54
11	58.65	57.47	66.51	51.72	60.16	67.02	59.28	63.41	51.42	49.98	48.47	55.09	56.41	45.80	58.08	50.00	50.48	49.29	49.78	39.99	41.55
12	59.61	71.83	63.65	60.24	59.31	68.70	65.02	46.94	49.34	58.18	45.49	54.10	46.25	55.11	57.86	48.94	48.52	53.28	40.75	46.78	49.62
13	56.09	69.41	69.68	66.89	64.05	51.67	54.37	62.90	53.79	52.62	60.78	47.23	52.91	41.87	43.84	46.95	44.19	51.06	45.44	43.78	46.92
14	73.60	59.85	70.69	60.89	51.40	65.18	49.66	61.20	66.80	66.18	58.95	58.51	43.89	43.38	58.94	50.77	50.39	39.26	51.64	48.12	55.21
15	74.29	70.36	59.31	52.17	59.02	49.95	51.88	56.28	50.65	51.54	58.91	51.99	54.17	45.42	54.43	54.65	47.29	48.82	46.02	44.84	50.66
16	71.58	58.63	60.61	56.87	68.07	58.76	65.80	52.08	53.85	46.49	45.64	51.41	56.26	43.62	48.89	48.77	55.49	44.56	40.55	42.94	51.77

编号	day43	day44	day45	day46	day47	day48	day49	day50	day51	day52	day53	day54	day55	day56	day57	day58	day59	day60	day61	day62	day63
17	68.70	68.14	55.71	65.90	56.62	68.58	49.32	57.48	58.95	65.96	57.74	55.16	49.31	47.68	46.75	56.11	41.31	53.06	45.21	45.15	50.19
18	58.52	60.95	54.77	61.06	60.19	50.60	50.25	59.71	68.21	65.04	47.27	51.57	46.50	47.84	57.24	56.45	51.15	54.13	46.52	48.47	53.36
19	64.82	67.06	71.67	65.54	56.90	57.74	60.30	66.54	56.82	55.47	45.04	55.44	58.96	48.25	53.27	43.02	44.38	39.17	41.15	41.14	49.75
20	57.13	69.69	55.33	56.11	67.71	50.92	62.65	60.09	66.48	46.93	58.41	50.27	55.73	43.02	45.93	42.39	46.17	51.28	48.03	52.19	50.29
21	54.35	51.35	59.97	66.05	49.18	68.18	57.58	61.95	48.88	61.04	47.91	55.01	50.36	59.89	55.59	56.69	47.69	56.46	46.77	53.98	54.68
22	69.35	59.30	57.96	49.32	69.59	49.43	66.54	59.64	48.32	57.72	53.87	44.60	52.52	52.67	42.32	54.51	56.33	40.50	53.19	45.53	55.07
23	56.03	59.19	73.48	51.43	50.16	49.02	61.20	65.21	64.26	65.13	49.91	51.49	48.21	47.67	58.30	52.63	41.73	55.61	44.41	43.35	44.60
24	72.49	60.01	64.30	64.52	64.98	64.58	63.16	64.04	61.42	53.03	52.11	45.41	56.14	44.08	48.31	56.28	52.21	41.99	40.18	53.24	48.37
25	69.08	65.32	51.17	70.47	61.30	57.92	65.81	57.36	56.11	51.75	54.15	57.43	58.50	48.14	44.38	52.47	43.41	40.21	45.39	39.44	51.71
26	69.65	66.53	57.08	54.42	66.56	52.20	55.15	63.94	65.85	60.45	56.78	55.49	51.78	48.46	45.50	49.53	56.31	49.91	52.46	52.13	50.20
27	73.85	71.60	56.93	58.46	59.48	54.65	65.42	51.16	67.69	55.41	55.02	59.33	49.42	52.16	50.12	46.05	55.36	46.71	50.09	48.16	43.55
28	53.28	62.56	67.79	57.42	52.52	53.79	61.39	61.58	57.93	65.76	48.04	49.68	61.46	50.23	43.18	41.98	53.40	52.48	49.80	48.40	48.55
29	53.96	71.16	59.86	56.17	63.28	63.79	48.07	55.27	60.01	50.88	42.91	43.96	52.85	59.56	51.18	42.83	53.40	44.78	49.00	55.24	49.59
30	70.08	70.40	72.23	59.62	65.14	67.78	57.80	50.41	55.13	61.01	55.28	61.70	43.54	51.93	47.89	54.06	44.88	42.15	42.46	45.11	48.61

表 9 学习曲线数据收集——粉光与拉毛（续表 3）

编 号	day64	day65	day66	day67	day68	day69	day70	day71	day72	day73	day74	day75	day76	day77	day78	day79	day80	day81	day82	day83	day84
1	46.00	43.00	42.00	43.00	43.00	42.00	40.00	41.00	40.00	41.00	42.00	40.00	41.00	36.00	35.00	36.00	36.00	36.00	35.00	35.00	34.00
2	39.78	44.21	46.93	42.68	52.52	41.51	38.52	44.46	44.72	47.54	39.03	38.21	49.43	36.37	31.30	36.67	31.51	40.70	37.48	42.51	30.53
3	39.41	44.17	36.10	39.55	44.23	44.40	48.18	36.05	43.86	47.52	37.92	34.73	47.85	31.75	40.56	32.39	36.91	43.67	33.08	42.87	32.82
4	40.34	44.50	40.22	51.73	44.47	44.89	47.34	45.54	47.17	44.63	44.64	40.72	45.87	41.06	34.90	39.24	34.90	37.52	36.01	38.94	41.17
5	44.65	50.55	39.19	40.77	38.30	42.14	43.66	36.16	40.63	46.30	40.73	45.22	43.08	32.16	30.85	43.45	38.01	39.73	31.21	42.25	34.12
6	43.66	40.96	35.78	51.85	40.14	42.37	44.24	38.99	41.85	43.11	40.72	34.43	49.28	33.59	40.05	43.09	38.23	33.56	36.04	35.50	34.01
7	40.79	39.93	42.72	48.26	42.15	42.40	34.50	47.93	39.71	49.84	45.09	34.10	41.23	32.72	42.79	38.47	41.35	34.46	30.47	35.72	29.23
8	52.02	38.07	40.27	40.35	43.32	43.29	45.78	37.83	43.14	44.14	44.27	36.75	35.00	36.09	34.96	42.37	34.08	36.50	36.31	38.90	37.20
9	47.23	39.91	50.15	51.42	46.48	41.75	37.70	35.91	41.19	48.74	50.31	38.84	42.42	41.43	29.89	42.22	36.40	34.37	31.18	30.78	39.14
10	55.98	43.33	40.99	41.09	47.23	46.37	47.96	40.24	45.92	35.99	50.64	37.30	44.22	41.70	33.07	42.84	42.87	36.51	36.73	36.75	31.26
11	55.52	40.00	50.15	44.80	47.64	36.63	46.55	46.63	38.95	47.64	50.40	40.19	40.86	43.11	40.04	39.50	40.10	35.12	36.08	38.89	35.75
12	56.10	43.28	42.54	52.30	51.70	40.05	37.27	48.51	35.20	47.34	50.39	47.39	45.16	31.87	42.66	35.53	37.37	37.07	30.68	34.20	30.80
13	46.36	48.61	45.88	45.50	49.10	43.03	47.47	48.34	42.13	37.20	51.50	38.63	50.31	34.57	36.36	38.47	38.34	42.46	29.82	33.77	32.44
14	50.16	44.45	39.98	38.73	48.56	47.75	40.46	40.48	45.88	35.58	48.78	43.73	36.86	41.11	35.28	34.01	36.76	38.99	32.54	42.59	41.33
15	53.41	48.66	36.90	49.37	45.47	48.06	41.58	40.36	46.11	38.75	50.76	46.27	48.63	43.08	36.92	44.21	37.14	43.41	30.68	40.14	34.44
16	55.33	50.49	51.51	50.70	47.84	41.51	45.10	38.72	40.15	35.62	44.23	47.30	38.99	43.62	33.59	40.17	40.11	36.41	41.41	32.34	36.87

编号	day64	day65	day66	day67	day68	day69	day70	day71	day72	day73	day74	day75	day76	day77	day78	day79	day80	day81	day82	day83	day84
17	55.40	51.77	46.77	47.63	44.86	50.07	47.48	37.69	45.66	48.40	40.70	43.31	40.35	36.98	31.23	41.29	43.09	39.07	34.90	31.12	33.54
18	52.79	46.67	37.58	44.34	48.42	46.51	40.01	45.75	39.15	49.08	38.90	39.33	45.90	35.06	38.04	43.00	37.88	38.97	40.52	39.31	33.72
19	48.01	52.65	42.62	46.05	48.02	46.76	44.10	43.19	38.34	38.33	51.16	43.76	36.96	36.22	38.79	31.39	38.36	40.83	38.24	37.37	29.37
20	51.14	43.17	46.95	50.66	46.03	39.18	40.21	49.57	40.87	36.88	41.42	42.12	47.34	38.84	32.86	35.14	42.26	40.29	42.69	34.38	39.39
21	46.79	46.45	51.05	42.21	39.28	44.48	39.75	43.77	38.14	39.56	43.26	48.22	43.41	41.96	38.21	32.20	32.17	32.01	36.70	32.20	37.91
22	49.23	45.29	36.40	42.87	45.35	44.01	35.81	49.58	37.97	46.54	45.65	35.05	37.40	36.22	30.48	35.60	39.06	31.52	38.54	30.56	31.43
23	56.27	38.74	51.44	46.52	46.99	50.70	48.43	49.02	34.58	43.45	36.25	44.28	36.70	35.74	31.64	39.27	30.84	32.87	31.88	38.83	41.62
24	52.37	42.20	47.47	49.46	37.36	48.71	47.13	46.37	47.82	44.80	37.44	43.29	50.08	31.06	38.18	39.61	39.13	39.55	35.46	33.70	35.25
25	48.22	49.17	44.83	45.16	41.00	35.96	39.35	46.15	39.28	44.18	37.35	47.07	48.08	40.12	34.96	39.15	42.08	42.28	31.05	35.76	33.25
26	54.93	47.11	48.56	48.54	38.24	50.85	35.31	38.97	42.23	50.43	39.89	40.86	41.96	38.73	31.95	37.95	35.51	32.36	41.75	41.73	32.96
27	44.42	40.38	43.73	45.40	50.59	39.49	44.39	40.60	35.09	36.98	51.39	48.39	41.27	41.25	30.96	31.78	33.23	34.33	34.56	39.82	31.29
28	49.22	43.79	47.06	46.91	40.66	46.30	46.01	39.00	38.36	38.62	49.00	37.84	47.63	33.40	37.59	40.58	30.63	37.94	31.47	42.17	38.01
29	55.89	43.17	47.10	51.09	52.57	46.22	46.53	41.73	44.88	40.76	43.62	35.90	35.34	33.87	42.51	37.94	41.09	35.41	32.35	39.14	32.76
30	45.11	48.73	51.57	41.13	41.04	45.03	34.03	39.62	45.53	39.84	40.66	46.76	48.33	32.82	30.69	37.52	33.11	40.46	30.87	37.19	30.65

表 9 学习曲线数据收集——粉光与拉毛（续表 4）

编号	day85	day86	day87	day88	day89	day90	day91	day92	day93	day94	day95	day96	day97	day98	day99	day100	day101	day102	day103	day104	day105	day106
1	34.00	34.00	35.00	35.00	31.00	31.00	31.00	30.00	30.00	29.50	29.00	30.00	30.00	30.50	29.50	30.50	30.00	30.00	30.50	29.00	30.50	30.50
2	35.47	36.05	34.71	42.05	36.04	33.02	26.87	32.25	31.11	25.66	34.13	28.17	30.29	30.22	29.68	30.58	34.72	28.54	34.02	33.13	25.96	30.06
3	30.94	36.22	36.49	37.01	37.78	30.81	27.05	33.91	33.38	31.86	33.88	36.40	28.07	34.01	26.63	36.65	34.29	30.87	36.68	26.89	32.36	34.71
4	37.46	38.28	34.91	40.92	32.89	35.95	29.82	31.09	29.40	28.67	29.11	34.96	27.03	32.55	25.54	30.79	33.68	27.15	35.75	33.89	35.32	35.32
5	33.29	39.93	34.13	34.15	33.96	30.26	29.43	25.78	35.17	26.53	30.56	34.53	36.40	29.38	26.12	34.61	32.76	26.29	34.62	29.28	28.24	31.17
6	29.80	33.48	35.12	41.68	28.43	34.36	32.45	25.73	30.00	26.89	32.10	34.60	27.60	35.31	29.44	31.04	30.36	35.00	36.33	29.33	31.05	28.52
7	31.59	35.97	42.28	36.62	29.18	30.38	35.91	28.28	36.50	28.92	34.66	27.20	28.27	33.23	30.99	27.26	34.74	30.52	36.85	30.58	34.66	26.35
8	35.74	29.57	32.29	40.69	28.60	34.95	27.44	26.33	27.79	26.38	32.48	35.20	35.93	37.26	28.49	37.03	26.64	34.68	33.54	26.58	26.96	34.09
9	31.19	40.44	41.03	35.21	34.50	29.00	36.72	35.48	26.98	33.13	28.48	36.26	28.16	29.57	26.70	36.32	25.96	35.77	33.96	28.65	27.41	27.01
10	30.70	29.07	38.52	40.04	32.59	36.02	32.30	36.06	32.66	26.25	25.20	36.10	36.74	30.23	32.43	34.80	28.20	28.48	31.44	30.51	28.68	32.77
11	32.88	29.16	41.50	39.83	35.42	35.79	27.66	27.59	35.70	30.65	30.95	35.99	31.43	33.49	33.24	34.79	29.60	35.37	33.62	31.85	35.55	35.58
12	35.46	40.13	42.09	38.54	26.67	37.72	29.80	33.23	29.70	31.53	31.19	26.73	33.09	31.14	33.07	27.62	26.67	36.36	34.30	27.24	37.16	33.85
13	41.57	40.96	32.16	40.94	36.15	34.10	34.18	33.52	29.38	35.56	33.25	35.36	33.03	37.41	25.82	27.27	35.97	36.50	33.61	29.29	35.71	27.26
14	41.08	33.90	36.73	37.24	29.75	35.45	28.26	35.48	31.88	33.78	30.47	32.71	35.92	33.33	35.80	27.15	35.09	27.59	27.63	28.38	30.82	37.43
15	39.73	39.95	39.47	39.50	26.85	33.87	32.06	36.50	29.48	29.68	29.47	33.84	28.68	32.91	32.70	27.51	31.77	30.02	35.87	25.40	34.44	30.00
16	29.46	41.12	33.80	35.79	27.06	34.39	32.55	30.52	34.79	34.95	31.36	30.67	30.50	31.65	29.40	36.77	35.71	29.41	33.35	25.92	35.16	27.49
17	29.50	37.91	38.73	39.79	37.60	30.34	27.28	27.69	32.65	30.69	30.39	32.32	31.97	31.20	30.39	27.84	30.66	35.57	36.04	30.64	28.86	36.97

编号	day85	day86	day87	day88	day89	day90	day91	day92	day93	day94	day95	day96	day97	day98	day99	day100	day101	day102	day103	day104	day105	day106
18	37.02	29.43	31.53	41.22	33.81	31.88	36.95	27.34	34.08	32.94	33.58	31.03	32.50	26.95	32.32	27.46	28.24	28.10	34.96	34.40	32.29	27.67
19	39.48	38.85	29.94	32.47	36.44	27.54	28.77	32.64	27.66	26.75	35.29	30.46	32.60	34.58	32.27	28.59	29.55	26.47	31.49	33.92	30.82	25.97
20	35.06	31.48	42.17	38.24	32.29	31.28	26.74	27.30	36.23	25.44	26.80	27.85	28.96	35.04	31.98	31.37	29.89	34.68	26.99	26.83	33.76	37.21
21	33.32	31.38	32.72	40.69	36.90	31.38	35.00	29.05	32.77	27.46	28.22	32.64	35.38	28.12	33.49	28.78	28.16	31.37	31.32	27.82	36.78	31.47
22	32.43	29.37	39.99	32.15	28.74	34.28	27.10	31.72	25.56	32.24	33.22	26.47	35.77	33.26	34.70	26.83	35.89	26.35	30.16	26.38	33.75	35.49
23	40.47	33.23	31.87	31.81	28.27	26.59	35.52	36.28	28.66	31.98	28.73	34.35	29.11	36.86	25.88	36.53	31.17	36.16	37.31	33.45	32.96	28.96
24	34.84	40.66	39.44	31.49	26.57	33.18	34.68	26.91	29.20	27.90	28.08	27.13	27.68	26.62	26.36	36.58	36.70	26.51	34.31	25.40	28.13	29.21
25	40.77	40.41	40.43	31.45	29.57	26.67	33.36	31.10	31.56	25.80	30.45	34.05	31.52	37.47	35.26	27.05	31.30	32.44	32.58	32.09	30.10	35.13
26	31.57	36.39	34.76	35.47	32.46	31.73	27.08	35.35	26.00	33.65	32.45	26.14	29.12	27.04	30.69	29.23	32.57	26.54	36.72	27.87	36.50	30.93
27	34.64	31.27	42.46	37.54	31.33	35.39	27.16	31.60	36.47	33.07	33.57	30.85	33.63	31.26	34.11	34.14	35.48	27.50	34.44	30.61	30.14	26.25
28	39.97	37.48	42.01	35.10	35.17	29.54	36.07	31.91	36.70	30.86	33.34	29.42	29.61	28.74	26.25	31.23	32.19	32.31	27.84	35.46	26.88	32.15
29	41.31	33.34	38.71	30.36	35.27	37.51	37.47	36.70	31.03	28.94	35.59	36.31	31.05	37.21	32.31	32.59	32.98	31.39	37.17	25.99	35.22	33.30
30	30.98	37.01	39.41	41.77	36.59	29.39	27.13	36.49	27.66	33.01	27.36	34.57	30.34	32.17	33.74	35.07	32.13	35.96	26.22	32.45	35.31	29.97

表 10 学习曲线数据收集——治具拆除

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10
1	32.00	26.00	22.00	20.00	18.00	17.00	17.50	17.00	16.50	17.00
2	32.45	27.18	26.24	22.75	21.69	18.96	15.37	16.20	17.36	14.66
3	29.29	29.51	22.38	22.78	20.85	15.78	20.38	17.00	17.40	15.91
4	38.61	25.82	25.82	20.66	21.10	20.10	20.29	16.20	18.54	20.89
5	35.32	31.74	19.24	24.19	18.71	16.81	19.50	20.43	16.07	20.41
6	32.87	31.71	20.71	23.01	19.00	18.17	21.42	14.46	19.60	19.08
7	33.52	23.56	23.49	18.43	20.68	15.14	18.09	17.65	19.26	17.56
8	37.39	30.93	23.95	24.35	19.76	19.35	19.05	15.75	16.02	20.16
9	34.12	24.61	18.98	19.19	17.46	14.63	20.67	20.72	19.10	20.64
10	29.71	28.95	24.81	17.82	21.62	17.41	18.49	16.30	19.40	20.41
11	32.30	23.19	18.85	19.13	18.69	19.37	19.21	14.61	16.56	17.47
12	33.87	26.43	19.84	22.52	15.93	17.77	20.44	18.91	14.44	15.22
13	29.38	30.43	23.48	24.13	15.70	16.59	16.00	17.96	19.35	16.24
14	37.86	27.14	20.69	24.28	19.18	15.69	18.22	19.25	15.35	15.15
15	37.61	28.50	26.75	23.21	17.21	17.20	16.04	19.17	19.15	20.77
16	36.94	27.17	20.09	21.43	20.09	18.12	21.44	19.01	14.83	19.95
17	34.89	28.33	21.04	17.38	21.73	17.28	17.81	16.91	20.28	18.34

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10
18	35.74	22.63	26.35	22.76	20.73	18.72	19.45	15.27	20.12	17.63
19	31.04	28.74	23.58	17.70	16.59	18.16	17.04	18.83	17.55	19.50
20	36.03	24.75	19.28	21.46	19.70	19.61	18.43	15.88	17.01	15.30
21	31.31	24.01	18.86	22.32	18.26	18.43	19.83	15.61	15.68	15.13
22	35.33	31.44	20.05	20.25	21.43	18.53	16.50	14.88	14.50	15.49
23	36.74	25.09	23.96	18.91	15.42	19.69	15.08	18.27	20.28	16.86
24	34.35	29.78	25.89	21.96	17.72	18.77	17.99	19.37	18.27	16.22
25	33.00	22.85	26.14	22.88	17.74	20.64	18.40	16.27	15.55	19.00
26	35.37	26.22	26.18	22.13	15.60	14.81	16.79	20.32	19.66	15.02
27	31.20	26.10	18.78	18.07	19.93	18.05	20.80	18.97	18.64	19.13
28	29.48	29.36	22.37	17.02	19.18	17.36	20.02	15.85	17.25	17.42
29	32.89	23.94	22.75	17.57	21.68	20.05	21.27	19.80	16.94	15.07
30	30.85	28.36	26.66	20.89	17.06	16.85	21.37	20.47	14.28	15.38



表 11 学习曲线数据收集——混凝土养护（蒸汽）

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10
1	22.00	15.69	12.50	12.00	12.50	12.00	11.50	12.00	12.00	12.00
2	19.98	14.70	13.98	12.80	11.81	13.94	10.52	11.36	11.51	14.61
3	20.76	16.84	14.24	13.67	15.12	12.14	12.37	11.98	11.17	12.81
4	19.25	14.82	13.35	11.44	11.65	12.05	11.31	12.05	11.25	12.78
5	19.44	16.56	14.73	12.58	13.24	12.04	13.42	11.45	12.22	14.23
6	20.28	15.16	14.81	12.19	15.15	13.01	10.16	10.78	12.81	14.60
7	20.46	16.21	15.25	13.58	12.77	12.15	10.01	14.28	13.58	12.84
8	18.88	15.08	13.80	12.47	12.25	13.71	11.95	12.92	11.56	11.09
9	19.46	15.43	14.70	13.30	14.28	13.60	12.38	11.25	11.10	11.39
10	23.43	18.24	15.05	14.19	12.78	10.32	12.83	10.41	13.38	10.87
11	24.08	17.61	14.67	13.07	14.45	14.16	11.88	10.64	14.52	10.25
12	22.02	16.65	13.52	14.06	12.01	13.64	13.08	12.57	11.90	13.77
13	20.79	15.45	13.90	13.66	13.69	11.46	10.04	12.28	10.59	12.85
14	21.09	16.57	14.59	13.81	13.81	10.78	13.90	11.41	10.41	13.26
15	19.54	15.09	14.28	12.64	11.33	12.33	13.04	13.99	11.35	13.05
16	21.71	16.56	14.39	14.04	11.99	14.63	13.59	14.31	11.54	11.25
17	22.77	16.86	15.98	13.29	12.62	10.90	13.78	13.37	11.89	12.28

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10
18	18.88	15.02	13.81	13.20	13.50	11.31	11.48	13.10	14.50	11.14
19	20.94	13.94	12.47	12.08	11.94	14.54	13.30	12.63	12.02	12.96
20	24.95	16.35	14.57	14.44	12.38	13.41	11.71	13.36	12.11	12.92
21	20.06	16.43	15.28	13.31	11.46	12.00	11.44	10.59	14.71	10.55
22	19.94	16.69	14.66	13.21	13.20	14.25	13.13	10.67	14.01	11.79
23	19.84	15.16	13.50	15.43	15.02	11.20	12.16	12.16	14.02	13.72
24	21.46	15.68	14.88	14.44	13.00	13.82	13.11	14.34	14.64	13.66
25	21.39	16.86	15.22	12.84	11.33	11.22	10.82	10.38	12.35	12.66
26	25.26	14.56	12.68	13.85	14.90	10.79	11.93	11.92	13.31	10.40
27	22.96	16.07	14.99	14.82	13.49	14.31	11.10	14.61	11.70	12.75
28	20.85	16.59	14.33	13.50	12.40	13.08	11.83	13.17	14.25	13.58
29	21.96	15.41	13.22	12.68	11.29	12.66	10.30	12.85	13.11	13.02
30	19.64	16.48	14.98	12.86	12.48	13.14	13.42	13.07	12.55	11.02

表 12 学习曲线数据收集——拆除模具

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8
1	24.00	21.00	16.00	15.00	15.50	16.00	15.50	16.00
2	24.06	19.35	16.57	15.34	13.97	15.80	13.73	19.09
3	22.35	18.65	14.46	14.85	16.25	16.22	18.84	18.33
4	23.78	18.29	19.50	17.32	14.81	17.30	18.05	14.04
5	25.41	20.38	14.92	17.59	17.05	16.36	18.72	15.98
6	24.74	24.52	15.66	15.03	16.26	13.77	16.67	17.65
7	24.37	22.04	14.87	18.30	19.01	18.71	18.68	16.10
8	21.22	18.50	15.49	14.01	17.39	15.31	14.64	16.61
9	26.68	21.43	18.32	18.12	18.51	17.55	14.61	15.88
10	27.71	18.81	14.86	14.74	18.21	16.30	18.66	17.41
11	25.68	25.26	16.86	14.53	15.48	14.88	18.52	17.97
12	27.41	19.17	16.15	15.18	14.86	15.78	14.67	19.47
13	24.86	20.09	16.49	17.34	13.69	16.11	17.12	13.96
14	23.73	18.74	19.09	13.72	16.03	16.32	17.01	14.40
15	22.80	25.30	16.25	14.00	18.96	17.28	14.12	19.63
16	21.96	18.77	16.18	16.32	14.38	19.03	13.67	13.81
17	24.91	24.05	16.52	13.28	15.23	19.43	18.50	17.97

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8
18	23.08	17.94	15.42	14.69	14.21	19.44	17.94	13.98
19	23.11	23.66	18.32	13.36	13.44	15.27	15.16	16.69
20	28.01	18.02	19.01	16.94	18.26	19.32	14.56	18.51
21	24.94	23.33	16.27	14.00	17.27	15.03	17.73	13.74
22	20.70	18.62	18.92	17.16	16.54	18.30	16.89	16.39
23	21.00	21.29	17.68	13.97	19.01	14.42	15.04	19.50
24	24.34	18.61	17.78	14.49	15.56	17.41	18.44	14.83
25	24.64	19.60	18.84	15.86	15.30	14.58	16.43	18.53
26	23.57	18.87	17.05	15.71	18.73	19.41	17.77	17.86
27	23.99	24.24	14.36	13.10	13.61	13.92	14.46	16.06
28	28.71	23.25	15.98	17.31	16.59	15.15	16.10	19.24
29	24.15	23.19	18.91	12.87	15.48	14.90	16.95	14.83
30	23.43	21.58	15.77	13.49	14.61	18.97	16.43	15.75

表 13 学习曲线数据收集——脱模

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21	day22
1	26.00	25.00	25.50	23.00	22.00	21.00	20.00	19.00	18.00	17.00	17.00	15.50	16.00	14.00	13.00	12.00	10.50	10.00	10.50	9.50	10.00	10.00
2	28.52	21.32	27.19	20.43	21.00	21.91	21.97	20.84	19.23	18.62	16.61	14.38	14.10	16.15	15.38	12.78	12.91	10.94	9.67	11.31	9.25	9.86
3	31.51	26.35	25.45	26.05	24.28	18.06	20.04	17.54	20.97	15.54	14.67	16.73	14.54	16.31	13.43	10.89	12.37	10.38	9.87	10.02	10.85	9.78
4	26.60	29.88	23.18	27.25	26.97	23.53	23.90	23.10	18.92	15.85	14.76	15.28	17.28	15.02	12.78	11.06	10.34	8.96	9.24	9.90	12.26	9.24
5	31.47	24.70	23.89	22.93	21.74	24.50	18.92	23.11	21.92	19.68	19.61	15.09	17.26	12.11	11.35	14.03	12.26	10.83	12.48	9.46	9.96	12.20
6	25.39	26.56	28.00	19.70	25.37	21.61	20.50	20.04	17.82	20.80	16.96	14.57	15.17	12.48	12.34	13.05	10.67	11.10	11.16	8.58	10.52	9.55
7	26.58	26.03	27.76	22.79	24.95	20.90	18.11	17.80	21.04	16.09	20.04	16.87	17.79	16.23	13.45	13.67	9.87	9.92	12.33	11.68	10.56	11.33
8	30.83	30.38	27.29	25.34	21.60	19.95	23.67	22.72	17.31	17.77	18.82	18.62	19.39	17.12	12.28	11.78	11.29	10.42	10.18	10.39	10.21	10.05
9	31.29	22.20	25.04	27.59	21.71	25.19	20.98	18.26	18.02	17.14	19.74	16.57	17.88	16.12	12.69	14.67	11.27	10.19	9.73	9.81	9.75	10.68
10	24.66	25.13	22.33	27.94	24.55	24.22	19.45	19.49	16.07	14.99	17.16	15.06	14.46	13.63	14.61	14.44	9.17	10.85	10.15	11.49	9.80	12.16
11	25.32	26.66	23.68	25.62	25.69	21.09	18.56	17.94	20.00	17.92	16.85	13.73	16.48	17.09	13.15	14.14	11.52	10.54	9.29	11.05	9.68	11.53
12	31.97	28.12	27.30	21.27	20.38	20.68	22.36	18.36	21.12	20.41	20.89	17.02	15.65	16.66	14.58	12.28	9.45	11.99	12.29	11.32	12.20	11.97
13	27.46	28.45	29.67	20.33	21.64	24.25	23.60	19.78	19.52	18.15	17.09	17.29	13.97	14.11	14.15	14.18	10.51	8.74	11.21	10.84	8.96	11.31
14	31.54	26.93	31.11	25.29	21.69	19.70	20.56	23.33	19.89	20.03	17.20	14.53	14.15	12.69	12.72	13.98	12.40	8.64	10.70	9.42	10.59	12.06
15	31.57	29.76	24.22	25.68	24.61	25.65	21.24	18.00	20.76	20.32	18.66	17.58	13.62	17.02	12.25	13.14	9.69	9.60	9.06	10.00	11.62	9.03
16	30.01	22.86	25.45	23.06	24.37	20.29	22.80	23.20	18.54	20.72	18.37	18.06	15.14	12.93	12.74	13.34	9.92	9.95	11.18	8.32	11.78	11.29
17	28.56	28.33	25.01	22.34	24.19	23.90	17.61	16.78	16.77	19.16	20.76	15.28	15.31	16.96	15.76	12.58	10.95	8.64	9.61	9.75	11.97	9.43

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21	day22
18	31.09	27.47	25.45	27.04	21.18	18.48	23.88	16.47	21.65	17.45	15.03	18.28	18.19	14.65	11.14	10.92	11.12	11.42	9.41	10.22	9.50	9.73
19	25.83	26.31	25.96	20.81	21.59	24.35	23.84	22.18	17.06	19.25	19.45	15.85	18.39	16.81	11.45	12.66	10.42	11.32	12.81	11.53	9.16	11.21
20	24.75	30.06	21.69	27.29	19.80	25.67	23.62	20.34	21.93	14.89	16.52	13.20	16.63	14.70	15.59	13.04	10.97	9.81	11.20	10.77	10.02	9.22
21	24.43	28.30	24.71	22.07	23.80	24.18	22.01	16.34	21.88	18.10	18.72	13.30	16.80	13.94	14.52	10.96	9.94	10.34	10.35	10.33	9.10	12.22
22	30.96	26.86	22.70	21.04	22.15	21.75	20.67	20.67	19.78	20.83	14.59	13.73	18.54	16.68	11.64	12.53	11.59	8.62	12.51	8.89	11.04	9.35
23	27.21	26.78	26.43	22.92	21.27	18.02	21.25	20.10	19.37	18.30	15.96	15.52	19.41	14.31	13.04	11.63	9.60	9.10	12.84	11.48	11.01	11.91
24	31.45	30.71	26.10	26.13	19.84	21.66	18.68	21.50	15.50	16.70	19.37	13.38	16.06	15.61	12.76	14.59	11.01	9.87	12.20	10.63	10.31	10.78
25	30.55	29.24	22.85	22.49	20.54	21.68	24.00	17.44	19.89	15.21	19.54	18.14	18.38	14.21	15.53	12.63	10.81	9.97	9.91	11.11	8.52	11.28
26	25.49	23.10	26.14	20.75	20.84	24.09	21.28	19.87	20.42	17.50	20.16	17.93	15.83	14.55	13.00	11.44	11.32	12.18	11.36	9.60	10.51	11.71
27	25.97	26.81	23.32	22.09	24.03	19.68	22.64	18.74	21.38	20.10	15.57	15.92	18.00	14.10	14.37	13.48	11.74	10.21	10.51	10.92	9.14	11.08
28	31.93	23.32	31.22	23.96	24.31	20.75	23.34	19.47	19.43	18.56	16.89	18.60	17.26	16.20	15.26	10.58	9.01	9.98	9.30	9.85	8.79	9.28
29	31.39	22.21	22.99	21.26	23.89	23.32	19.95	21.72	16.43	15.14	16.23	16.09	15.05	15.57	12.19	11.28	10.37	11.04	12.15	9.54	11.83	10.97
30	26.40	26.70	25.46	22.05	25.55	19.96	22.02	21.37	18.21	20.25	20.77	16.06	16.98	16.64	13.67	13.14	11.06	12.22	10.88	11.68	10.55	12.02

表 14 学习曲线数据收集——构件修补

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21
1	186.00	176.00	175.00	172.00	170.00	172.00	170.00	172.00	170.00	170.00	172.00	170.00	170.00	171.00	152.00	155.00	150.00	152.00	153.00	150.00	155.00
2	214.64	203.45	182.83	163.91	191.45	163.25	145.33	167.25	163.85	148.43	163.20	198.33	176.79	146.02	185.74	150.70	150.07	170.19	172.63	136.69	185.85
3	162.84	193.49	186.49	158.42	176.13	157.08	186.25	159.89	202.19	152.61	173.54	166.86	148.88	150.09	182.18	153.13	167.00	143.93	177.59	128.63	133.34
4	174.34	160.25	184.00	186.49	159.62	197.63	192.62	182.87	157.69	206.17	180.42	168.15	206.28	178.88	172.19	136.54	170.77	135.96	164.33	153.43	142.07
5	159.50	185.81	151.97	158.43	207.23	177.58	182.63	171.31	185.76	194.28	170.81	190.48	151.81	187.14	140.81	149.03	135.86	182.12	168.21	138.09	179.39
6	164.89	205.28	200.24	203.14	188.83	178.80	207.63	193.30	197.36	205.87	199.42	199.09	159.20	156.87	166.61	173.14	175.90	169.80	163.86	174.54	133.23
7	215.16	159.12	190.16	165.27	202.38	162.51	152.22	167.66	181.76	209.06	189.55	169.26	198.70	206.88	143.80	132.34	128.90	130.61	161.48	181.25	143.75
8	217.45	198.12	196.91	149.72	159.95	178.91	155.79	195.66	155.01	179.13	210.08	198.79	186.90	186.88	137.30	156.18	168.14	186.35	132.91	179.19	153.09
9	228.59	151.55	203.66	203.02	146.10	206.91	179.65	166.72	208.83	162.86	158.61	149.89	199.27	198.19	160.82	139.80	150.72	130.83	149.96	131.52	135.42
10	171.66	202.42	214.67	154.96	151.03	198.97	170.70	160.81	208.10	169.14	149.29	172.12	158.69	147.84	162.66	167.46	150.78	132.04	176.19	179.66	170.40
11	220.99	186.47	193.41	167.37	195.07	152.73	180.57	210.05	144.85	202.12	165.60	208.21	147.46	174.29	152.58	152.14	164.43	152.26	175.78	160.45	144.93
12	190.43	184.03	210.81	165.37	153.18	147.18	154.36	181.96	150.76	208.59	173.49	198.30	172.61	160.78	150.53	148.72	141.70	176.62	140.80	160.89	160.99
13	181.77	206.59	179.55	198.64	183.84	208.95	158.07	201.05	198.64	181.97	183.72	185.39	194.70	157.49	182.81	166.72	138.16	176.02	135.99	163.24	156.80
14	202.03	172.19	186.75	211.11	168.62	210.34	179.85	176.80	168.29	181.19	179.01	170.00	161.69	191.39	165.60	167.54	169.69	153.27	139.58	167.13	157.48
15	208.01	171.21	200.66	181.55	170.63	151.13	171.48	147.98	153.36	154.96	207.03	193.80	205.13	150.56	178.69	157.75	149.10	159.07	139.50	150.23	162.56
16	223.62	185.61	187.20	154.72	168.15	198.63	207.28	146.35	208.13	173.94	190.47	199.50	166.87	148.45	134.08	135.24	165.24	179.91	143.15	178.22	155.39
17	192.84	206.15	178.05	149.64	186.32	208.40	190.76	187.90	152.50	157.99	168.15	208.83	191.90	174.85	139.20	148.12	181.34	146.29	166.43	172.86	136.26

编号	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	day11	day12	day13	day14	day15	day16	day17	day18	day19	day20	day21
18	207.60	211.19	211.68	205.27	185.75	196.24	196.62	161.74	187.98	180.24	183.03	182.12	208.69	190.49	173.37	168.58	175.47	136.59	130.89	167.98	189.88
19	171.24	178.70	212.49	205.87	176.57	207.48	173.63	158.73	186.01	147.21	186.15	188.97	189.75	207.36	139.59	150.49	147.52	163.41	150.49	166.52	160.73
20	225.92	195.58	211.75	163.29	201.49	164.76	174.41	195.22	186.81	152.00	208.94	166.19	206.80	174.37	149.05	166.94	172.19	185.42	148.43	157.77	142.47
21	209.57	150.58	155.70	191.68	190.15	162.48	173.51	175.80	189.87	164.05	177.78	151.47	156.61	175.61	143.11	157.29	154.01	131.58	184.37	182.10	151.72
22	185.35	158.35	208.74	150.50	188.58	148.61	191.01	206.25	192.12	166.93	162.57	160.50	158.89	164.67	163.15	150.71	165.60	129.30	177.93	141.84	155.50
23	161.51	207.56	173.54	207.21	177.87	200.46	190.87	149.54	153.85	194.00	166.88	183.07	165.95	184.35	159.46	153.99	153.35	183.04	133.05	181.86	187.52
24	160.17	197.20	197.34	148.27	177.86	179.08	175.59	199.54	179.05	152.13	209.38	158.30	159.94	191.80	136.62	157.41	179.71	143.58	143.52	176.19	170.77
25	199.39	212.81	182.19	161.64	167.93	183.30	145.50	197.71	207.36	154.66	187.67	164.19	160.80	196.15	132.99	140.47	128.92	164.54	183.84	158.08	188.25
26	202.54	187.70	150.88	181.46	201.40	200.53	158.93	160.90	205.65	150.75	161.95	146.38	151.69	148.81	160.17	154.42	171.04	166.89	132.42	140.86	172.17
27	192.99	179.78	168.79	182.84	168.55	157.78	168.54	197.37	158.24	157.97	207.46	164.12	148.04	147.83	131.92	183.50	160.12	133.08	138.54	155.70	139.12
28	209.29	149.81	207.32	198.65	161.26	211.51	207.74	211.06	183.23	155.38	170.16	198.11	188.59	172.38	143.77	186.80	182.77	172.32	131.93	162.30	141.13
29	180.88	161.13	213.02	181.99	184.17	181.35	208.98	204.53	157.92	147.99	178.08	185.38	204.69	195.50	172.78	185.64	180.91	151.34	148.30	147.98	176.65
30	224.55	185.93	201.52	184.12	168.69	149.54	187.96	151.79	202.24	205.12	167.47	203.83	181.07	194.72	152.32	171.39	133.06	166.33	167.02	164.24	176.07



表 14 学习曲线数据收集——构件修补（续表 1）

编号	day22	day23	day24	day25	day26	day27	day28	day29	day30	day31	day32	day33	day34	day35	day36	day37	day38	day39	day40	day41	day42
1	150.00	145.00	142.00	145.00	140.00	142.00	140.00	142.00	145.00	142.00	143.00	125.00	122.00	120.00	122.00	123.00	122.00	125.00	123.00	125.00	119.00
2	179.33	135.75	156.97	129.76	128.90	137.84	123.90	145.64	169.63	161.67	123.36	134.34	113.06	119.90	125.50	115.95	133.32	109.06	144.45	108.47	102.32
3	178.96	149.09	162.47	148.84	133.30	136.94	138.51	123.25	148.93	165.20	124.06	113.42	120.44	131.83	142.26	135.46	144.19	108.12	149.47	123.48	125.09
4	131.51	135.41	124.31	146.46	137.04	169.54	156.33	162.39	130.87	143.14	151.63	121.39	141.50	147.58	115.62	117.81	137.00	141.32	146.02	135.81	110.59
5	172.06	148.90	143.35	149.82	134.88	144.94	153.06	162.44	169.85	122.69	143.07	124.26	110.98	102.28	109.96	142.15	122.45	126.56	136.29	116.74	124.26
6	147.48	136.87	155.69	151.91	119.87	147.66	132.81	160.54	155.03	158.75	128.28	129.44	137.21	107.77	120.87	119.90	136.86	107.59	112.87	111.84	103.56
7	139.99	165.11	154.38	158.38	127.54	156.72	145.69	155.70	146.14	164.50	154.53	149.71	114.15	105.11	120.71	118.43	104.79	143.82	125.22	133.89	146.03
8	167.74	166.47	166.93	168.97	136.84	140.47	122.90	141.64	129.13	128.85	159.72	151.22	109.79	120.58	130.47	122.73	145.90	129.89	150.31	113.19	127.60
9	142.55	135.61	174.24	173.03	160.78	142.28	145.66	122.87	176.77	132.60	123.13	121.70	122.81	146.71	126.56	132.64	116.96	152.46	130.56	144.69	113.61
10	169.21	142.28	164.97	169.66	170.55	167.32	158.00	157.32	139.80	142.78	149.21	139.00	138.53	116.91	123.39	115.66	111.24	151.07	128.74	113.11	144.29
11	155.90	153.33	161.78	141.03	144.94	155.34	152.28	164.25	149.71	123.19	162.53	128.90	140.09	112.19	122.60	143.27	143.06	137.62	104.59	120.51	112.01
12	160.56	140.74	152.87	160.99	152.36	166.36	152.71	142.52	132.14	158.96	131.79	116.06	145.86	122.02	119.55	104.61	127.94	136.02	121.23	117.08	141.95
13	152.33	143.67	137.01	170.55	134.62	159.09	166.54	138.92	127.22	163.19	148.73	145.54	132.56	146.88	142.96	136.45	117.13	129.42	137.33	130.51	144.03
14	145.72	147.05	162.85	147.55	141.40	167.15	164.92	147.00	129.18	148.17	174.23	128.36	136.77	119.01	134.21	113.99	117.39	149.23	128.76	130.59	110.71
15	151.86	126.38	146.70	174.53	126.36	155.72	162.61	152.01	139.84	169.11	159.43	137.69	149.39	146.35	136.90	126.15	133.23	124.75	106.90	126.65	109.61
16	150.07	148.37	126.43	136.95	137.48	126.58	160.71	137.94	173.46	159.89	161.34	112.05	142.92	131.81	107.41	105.86	110.20	142.72	149.17	147.82	105.31
17	180.58	147.87	127.06	169.04	157.71	140.91	137.23	129.50	131.87	127.94	175.28	119.79	143.79	113.32	129.92	132.87	138.85	139.68	112.32	132.29	130.91

编号	day22	day23	day24	day25	day26	day27	day28	day29	day30	day31	day32	day33	day34	day35	day36	day37	day38	day39	day40	day41	day42
18	130.73	150.31	143.05	133.00	140.41	165.52	141.69	123.87	167.03	151.12	145.01	137.84	146.68	136.43	139.05	114.46	118.02	121.73	130.17	148.99	132.98
19	168.08	123.47	171.39	135.98	161.77	167.14	122.87	164.53	176.04	163.77	165.64	145.10	105.40	120.78	122.55	132.74	142.05	139.79	106.49	136.34	135.66
20	173.04	160.16	130.33	150.36	135.35	146.69	145.15	172.78	130.77	158.01	147.72	121.47	149.59	105.83	139.45	136.09	125.37	107.87	124.67	132.80	146.28
21	142.88	173.46	151.90	139.92	150.77	157.81	149.07	125.16	163.86	143.05	167.19	140.04	123.69	143.32	112.01	112.89	133.28	136.71	133.83	116.67	119.30
22	184.10	176.91	142.63	172.99	134.91	130.85	124.42	171.12	151.56	150.01	139.66	139.36	114.98	108.56	149.08	110.75	125.74	144.61	115.50	150.04	119.64
23	147.17	125.43	123.93	139.99	146.13	121.50	139.75	168.88	149.98	141.44	132.03	145.74	143.19	145.38	114.83	137.74	105.57	145.31	142.60	117.45	124.95
24	148.89	131.08	147.06	159.84	135.62	123.80	144.42	136.41	155.63	163.27	163.72	123.48	150.02	108.38	113.99	115.60	120.88	118.99	107.33	135.47	115.07
25	168.29	161.80	162.41	136.47	135.35	138.88	119.21	150.98	177.07	159.10	138.72	137.01	146.62	117.51	126.76	125.64	112.24	135.96	112.19	123.26	111.47
26	159.71	158.58	122.49	151.41	152.76	121.79	126.64	169.94	125.32	169.74	138.45	144.90	141.07	144.85	129.66	115.90	106.61	117.08	112.55	111.58	128.58
27	160.62	138.94	124.34	141.23	134.87	129.80	171.01	163.32	159.03	168.02	167.77	143.06	135.30	107.14	147.07	144.40	113.05	123.20	147.34	117.69	116.97
28	165.63	124.54	136.43	172.29	171.61	163.92	119.47	172.82	160.19	144.27	126.83	123.14	128.77	108.45	127.79	132.62	146.98	152.68	145.96	128.80	129.64
29	136.75	139.51	151.95	136.31	147.77	132.96	143.43	162.79	160.11	136.58	151.99	132.25	125.18	107.03	136.84	135.17	120.49	139.23	134.09	119.51	107.64
30	147.52	123.69	172.32	138.05	124.31	158.55	141.15	135.50	168.25	148.61	149.10	130.90	106.24	114.59	128.76	106.74	127.70	139.32	119.45	135.04	117.13

表 14 学习曲线数据收集——构件修补（续表 2）

编号	day43	day44	day45	day46	day47	day48	day49	day50	day51	day52	day53	day54	day55	day56	day57	day58	day59	day60	day61	day62	day63
1	118.00	119.00	116.00	115.00	115.00	115.00	116.00	115.00	112.00	110.00	110.00	108.00	108.00	110.00	111.00	108.00	105.00	106.00	105.00	100.00	102.00
2	121.37	120.39	116.47	121.61	110.01	127.28	138.72	137.12	125.01	119.25	120.95	116.52	116.75	108.43	100.73	97.21	109.50	91.18	97.54	114.06	103.21
3	101.24	130.25	133.21	108.65	118.62	113.93	134.26	132.34	99.78	109.19	100.66	106.66	96.60	130.95	106.92	100.87	93.49	93.99	115.43	98.62	93.64
4	122.53	129.75	131.95	107.11	135.39	141.02	137.71	98.25	123.79	100.66	96.41	106.02	100.56	105.20	123.36	110.28	116.14	98.50	119.72	120.39	107.41
5	136.84	138.87	104.77	114.47	140.81	109.42	125.25	135.45	118.11	121.08	107.20	130.34	110.17	129.88	120.25	94.05	118.81	129.22	126.13	106.30	121.66
6	133.39	122.97	117.95	119.81	135.63	111.84	130.32	133.71	104.58	109.50	93.63	113.21	130.53	107.44	132.34	107.72	100.83	92.48	96.86	118.44	87.46
7	130.04	134.38	103.76	128.03	119.01	107.63	119.23	104.71	95.23	124.79	104.73	115.65	104.16	97.63	95.21	121.17	94.31	116.45	89.31	97.98	107.95
8	136.46	128.73	107.27	110.23	140.19	109.28	116.82	103.44	123.46	102.09	134.43	93.54	113.77	97.68	132.69	102.25	113.61	96.12	128.86	109.77	119.08
9	138.39	115.38	128.55	138.19	126.54	135.98	132.11	108.40	130.91	98.47	114.43	95.35	131.45	132.91	113.98	95.25	116.95	100.17	115.67	103.40	108.10
10	106.33	107.08	137.17	135.21	105.31	108.02	99.55	131.05	126.12	122.13	128.81	96.89	121.80	111.72	127.65	112.41	118.21	94.22	89.42	98.51	119.43
11	143.28	108.23	111.44	111.70	97.90	135.82	110.95	115.93	134.22	100.05	112.35	97.69	106.36	111.80	102.40	117.48	123.54	128.96	115.07	118.14	113.61
12	115.23	133.98	128.56	101.40	113.32	124.31	111.55	99.41	131.79	133.82	112.16	95.36	109.39	99.69	117.07	131.70	96.68	115.85	125.26	101.13	107.01
13	125.79	116.04	142.42	138.67	112.36	136.28	131.43	99.14	104.53	109.77	109.91	110.97	116.59	113.42	97.17	122.45	119.54	118.96	123.10	98.05	110.86
14	104.87	114.04	142.01	101.56	121.70	120.90	116.72	123.84	124.52	111.91	120.65	108.20	124.14	132.21	105.64	102.91	123.39	112.49	98.88	120.48	104.42
15	108.07	142.87	135.71	113.68	114.27	110.15	102.49	123.40	132.52	129.88	95.72	125.67	92.14	135.18	103.12	110.78	121.42	105.06	106.25	119.03	119.06
16	133.30	124.55	101.59	140.59	124.47	131.46	112.51	103.68	109.87	133.72	103.93	94.37	124.93	95.76	114.96	126.43	119.45	124.43	119.64	108.38	97.79
17	118.17	127.74	116.27	126.25	113.44	129.82	120.88	129.75	128.23	109.21	105.27	118.40	132.39	121.41	98.04	106.56	93.34	116.18	114.31	90.07	122.76

编号	day43	day44	day45	day46	day47	day48	day49	day50	day51	day52	day53	day54	day55	day56	day57	day58	day59	day60	day61	day62	day63
18	142.94	144.22	135.21	111.05	106.25	124.53	134.53	108.23	135.94	110.72	101.50	131.08	100.54	123.77	124.64	94.43	111.60	97.19	119.43	113.37	98.05
19	103.11	104.47	122.16	107.30	127.35	114.07	110.82	120.21	135.83	100.65	122.14	125.50	116.90	133.71	103.07	112.58	105.69	100.47	113.96	104.59	103.23
20	106.74	129.70	135.93	141.15	124.08	106.01	140.97	112.89	118.16	104.92	127.25	117.29	116.32	128.26	117.85	114.94	107.17	106.48	104.26	109.03	117.30
21	100.44	111.99	100.16	119.65	119.14	106.46	140.46	99.40	114.72	113.57	111.68	112.63	131.54	100.64	111.88	104.09	109.63	108.78	101.63	96.07	99.33
22	133.69	143.56	139.77	136.43	116.39	122.65	100.16	138.50	122.10	127.05	108.50	115.51	100.85	123.94	130.84	126.82	127.84	117.61	90.69	97.92	100.08
23	128.26	102.42	110.75	98.57	121.68	106.01	130.49	134.13	110.16	112.16	133.09	92.30	108.37	121.03	119.36	108.21	95.51	96.72	117.78	120.82	90.46
24	138.24	101.25	104.19	129.67	110.24	128.93	127.99	131.55	121.88	116.61	105.56	99.84	101.71	97.52	100.83	115.75	117.47	118.99	106.95	104.13	101.96
25	106.44	103.48	108.13	112.93	111.50	139.11	126.83	106.46	134.94	112.86	124.29	91.84	128.29	114.22	120.72	93.25	93.60	94.13	93.70	116.27	107.93
26	125.14	114.77	125.18	106.20	98.78	139.89	102.86	124.75	118.76	110.89	128.78	97.17	114.46	133.95	109.08	117.15	92.17	114.14	124.59	112.20	92.66
27	104.77	114.51	113.61	100.54	121.50	138.35	116.47	134.24	125.77	115.60	134.80	103.74	126.15	94.51	134.60	122.40	125.83	121.18	127.19	103.77	121.57
28	144.88	123.25	102.30	124.42	120.78	110.14	121.17	105.07	102.75	132.76	93.65	97.43	93.62	114.38	110.79	122.50	97.21	110.58	89.53	100.33	106.32
29	118.87	113.25	129.71	133.97	138.24	105.10	109.76	119.42	130.20	128.31	111.58	93.63	103.28	110.66	109.28	129.34	97.39	94.69	96.29	110.88	99.69
30	107.84	121.37	133.56	108.33	120.20	128.54	142.02	128.05	98.58	96.86	127.17	108.48	100.70	127.55	105.39	96.62	89.27	101.98	106.17	102.55	107.68

表 14 学习曲线数据收集——构件修补（续表 3）

编号	day64	day65	day66	day67	day68	day69	day70	day71	day72	day73	day74	day75	day76	day77	day78	day79	day80	day81	day82	day83	day84
1	103.00	105.00	102.00	105.00	102.00	100.00	94.00	95.00	92.00	90.00	90.00	89.00	88.00	92.00	83.00	80.00	80.00	81.00	75.00	76.00	74.00
2	118.45	115.80	107.28	123.53	107.42	119.97	102.25	84.57	81.23	99.39	84.28	84.85	93.94	86.13	76.31	75.62	83.37	79.53	82.85	67.64	90.79
3	114.33	120.08	89.68	117.23	91.62	94.79	94.35	103.47	100.18	107.45	91.60	79.50	102.12	104.51	94.03	75.69	76.78	69.81	67.37	76.63	90.83
4	115.26	104.67	87.93	99.79	110.95	109.69	103.55	84.78	108.38	109.79	98.33	81.22	75.18	80.21	76.14	82.48	95.54	89.20	79.54	67.12	71.88
5	114.06	124.62	92.80	116.68	90.82	88.77	112.92	97.23	102.63	109.33	81.39	78.23	100.24	81.48	93.13	93.96	85.85	69.40	68.22	78.39	87.16
6	112.76	122.24	109.37	124.48	113.70	91.74	101.66	105.56	102.42	106.66	82.49	101.00	77.76	88.39	94.68	75.16	89.39	96.68	89.17	68.97	67.46
7	115.68	111.61	124.03	98.02	119.38	112.13	102.34	111.72	79.44	79.03	95.84	94.30	78.49	107.15	84.03	92.26	88.81	80.89	73.56	65.90	81.56
8	107.47	117.73	114.57	103.61	123.26	86.48	90.48	87.90	91.93	76.93	81.26	105.64	88.01	110.16	100.36	92.82	90.75	97.92	66.99	69.46	69.20
9	90.55	103.54	87.25	121.11	89.37	91.81	89.21	97.07	82.53	90.77	80.57	79.79	87.99	112.88	80.76	72.47	92.23	78.90	63.98	80.78	87.01
10	117.41	112.32	87.85	96.47	99.75	88.78	109.49	90.93	112.88	96.95	87.87	80.69	107.89	102.77	96.40	74.81	85.28	82.54	80.16	91.53	73.59
11	106.61	101.59	102.84	117.50	108.59	107.97	114.35	82.83	78.95	96.21	92.44	93.01	106.30	96.32	95.57	77.62	78.39	71.81	90.89	83.52	80.13
12	109.80	114.60	121.75	105.87	116.46	122.64	100.47	101.13	78.81	77.06	90.58	95.15	85.17	104.38	86.86	69.95	77.59	98.13	79.98	87.04	70.40
13	88.29	91.90	101.16	114.66	88.51	102.95	94.89	102.51	103.52	78.24	79.86	101.81	87.67	103.70	100.43	87.47	82.85	98.31	68.65	87.37	89.80
14	91.63	104.47	102.41	126.96	98.68	116.76	91.24	116.02	112.53	85.44	107.52	81.80	103.76	100.22	100.46	97.44	83.71	72.39	67.02	81.92	89.79
15	109.99	114.55	110.46	102.67	101.57	99.97	113.03	107.67	87.54	81.65	101.75	83.87	95.46	88.92	98.91	77.26	87.71	94.48	67.27	70.41	84.34
16	103.71	110.91	94.70	115.09	106.69	89.43	93.88	96.95	110.03	93.50	98.88	101.30	90.54	92.97	82.45	88.13	81.30	96.68	77.25	78.92	75.11
17	90.50	108.88	122.88	119.32	104.69	108.27	90.62	94.88	84.98	88.97	82.50	93.18	107.45	91.23	72.38	81.28	98.27	78.58	74.27	87.17	78.97

编号	day64	day65	day66	day67	day68	day69	day70	day71	day72	day73	day74	day75	day76	day77	day78	day79	day80	day81	day82	day83	day84
18	121.91	91.58	105.16	112.39	115.58	100.99	103.08	108.75	103.72	104.20	91.96	81.33	101.12	106.14	92.49	75.44	82.96	93.86	72.46	76.25	71.53
19	100.37	125.54	102.37	110.38	111.76	101.17	103.24	114.37	85.91	83.13	84.54	103.76	105.85	107.99	86.48	86.07	76.68	84.32	89.98	84.55	72.64
20	118.03	126.15	87.93	92.88	102.09	120.20	91.23	109.95	108.43	94.23	95.46	88.79	108.11	95.11	82.69	71.30	97.91	92.69	66.65	86.08	66.68
21	107.03	124.98	92.30	97.11	95.78	96.16	103.53	115.15	83.70	84.18	81.80	100.00	78.90	83.25	95.01	91.25	89.68	80.90	84.64	91.01	66.73
22	95.04	109.77	93.62	109.49	103.34	108.91	100.44	101.97	79.93	91.13	92.58	89.80	103.15	93.81	73.30	84.24	94.85	94.62	64.37	69.25	68.50
23	103.81	118.56	87.05	98.35	124.22	113.79	90.36	109.17	92.30	107.97	98.47	86.77	107.75	98.64	84.31	92.07	72.32	79.86	79.24	76.22	77.65
24	126.48	114.70	116.54	100.56	111.04	104.21	101.14	97.66	78.73	91.35	78.49	90.18	85.83	86.90	72.51	94.27	79.41	92.33	67.77	68.76	78.29
25	89.61	106.99	120.96	106.20	111.78	113.83	111.94	83.55	105.65	104.00	99.19	106.04	101.74	98.58	93.16	91.74	75.30	91.33	76.59	68.02	76.02
26	109.80	128.15	93.50	128.06	119.47	88.28	92.32	97.49	97.97	80.80	83.98	99.37	88.11	91.95	71.94	96.42	70.04	75.70	88.78	72.44	73.08
27	120.63	117.82	125.29	127.33	104.66	92.35	105.23	116.34	83.39	107.96	94.42	82.52	77.93	104.67	90.38	95.11	70.20	72.05	72.27	73.06	65.84
28	92.83	93.00	111.87	111.36	121.81	120.14	110.44	86.13	97.25	86.36	96.43	80.39	101.23	112.26	73.49	86.89	87.58	88.32	69.29	75.94	68.92
29	88.05	94.07	115.70	127.30	106.86	97.39	80.16	82.59	96.53	96.15	95.19	98.80	91.12	104.22	82.50	86.54	75.61	95.85	83.46	68.43	69.39
30	92.66	105.82	87.80	120.16	102.95	101.04	114.88	115.73	83.05	88.28	101.56	97.83	83.41	103.33	85.75	83.81	95.66	80.99	83.89	88.25	72.50

表 14 学习曲线数据收集——构件修补（续表 4）

编号	day85	day86	day87	day88	day89	day90	day91	day92	day93	day94	day95	day96	day97	day98	day99	day100	day101	day102	day103	day104	day105	day106
1	71.00	72.00	72.00	70.00	68.00	68.00	66.00	68.00	66.00	66.00	67.00	65.00	64.50	65.00	66.00	67.00	65.00	66.00	66.50	66.00	65.00	66.00
2	69.74	67.44	78.53	66.95	67.18	60.84	65.01	59.97	69.55	80.91	69.45	72.39	60.00	78.18	72.75	79.79	75.90	69.04	69.71	80.54	63.60	68.72
3	84.96	77.60	88.04	76.63	62.43	60.94	68.22	74.96	76.57	60.66	66.56	76.57	61.56	73.38	78.56	81.15	79.93	74.34	80.83	77.40	68.33	65.64
4	82.80	86.98	65.33	59.83	77.01	76.61	80.87	78.66	68.49	56.34	73.93	75.37	55.80	72.64	65.49	59.54	61.68	80.00	73.76	75.11	56.29	63.25
5	64.99	76.64	76.52	75.60	82.05	75.73	59.97	78.86	58.67	76.06	67.57	73.00	63.17	66.22	77.71	58.30	67.45	62.76	62.60	66.20	66.53	61.50
6	75.21	82.52	79.01	65.61	74.13	63.08	56.52	61.95	78.48	78.73	57.41	69.18	57.60	77.53	65.76	69.29	72.68	64.29	80.13	79.23	76.48	63.50
7	78.36	74.92	88.24	67.77	72.40	65.91	79.64	77.87	73.79	78.55	67.56	58.30	63.95	72.42	68.46	79.79	79.68	64.53	73.25	58.39	75.91	67.78
8	77.40	65.53	67.38	67.60	70.69	71.86	65.90	64.98	71.93	72.11	73.49	66.16	67.86	67.00	61.08	72.13	70.93	79.62	77.69	62.88	61.37	74.93
9	76.30	75.43	66.66	62.21	82.42	65.41	59.02	73.42	79.93	76.98	58.41	77.75	57.10	60.61	63.30	70.24	73.70	77.91	74.37	79.70	59.82	60.20
10	67.77	61.49	63.51	60.12	62.03	66.32	71.89	73.17	65.36	79.66	79.58	57.57	59.71	71.26	70.65	72.62	58.60	57.81	79.92	71.53	61.77	58.95
11	74.24	74.64	65.52	70.88	69.54	67.46	62.13	60.13	57.59	58.59	76.79	71.80	77.37	65.33	72.24	64.02	75.40	78.10	81.38	66.22	64.53	61.38
12	74.31	78.82	63.29	75.52	75.02	83.59	65.92	68.03	80.60	64.76	81.29	57.16	63.62	55.42	69.30	76.67	68.79	74.03	81.53	57.02	66.35	77.82
13	68.02	71.53	65.01	68.18	60.42	69.27	68.36	70.45	59.06	75.44	58.43	75.22	59.28	62.19	62.76	69.40	55.46	79.65	65.98	63.33	63.97	66.75
14	77.92	62.24	72.62	79.94	63.55	75.13	60.58	66.29	62.37	65.19	76.33	74.62	71.70	59.31	57.37	59.21	73.78	79.70	73.69	69.01	78.35	72.64
15	77.25	87.68	80.39	68.98	70.14	73.27	75.30	77.59	69.97	59.14	57.16	75.49	74.42	66.60	65.30	81.46	56.14	57.88	77.84	64.22	57.47	57.03
16	68.98	68.96	68.77	74.47	75.96	75.79	75.53	81.86	67.05	61.10	67.90	61.13	57.42	73.83	70.12	71.10	63.72	74.83	62.18	64.41	77.44	69.27
17	75.06	83.89	81.81	68.01	60.04	67.22	71.03	76.48	72.97	77.92	79.27	62.63	79.07	57.53	70.98	65.49	63.29	58.46	78.92	80.74	59.43	73.97

编号	day85	day86	day87	day88	day89	day90	day91	day92	day93	day94	day95	day96	day97	day98	day99	day100	day101	day102	day103	day104	day105	day106
18	70.58	82.53	86.34	73.12	61.00	81.59	56.54	82.18	65.65	58.72	72.15	70.69	76.61	63.04	58.64	62.70	71.37	69.77	66.85	68.60	77.31	67.59
19	62.97	78.66	84.49	74.44	62.75	78.02	58.02	80.95	79.14	80.26	73.28	65.93	61.31	78.36	62.54	65.78	55.35	56.56	66.38	72.17	62.85	67.69
20	74.39	69.60	66.34	70.29	64.66	75.44	60.80	76.11	80.29	79.20	65.00	70.81	68.59	78.23	62.35	68.18	71.81	57.75	60.61	72.12	62.62	66.61
21	81.12	75.52	65.56	68.50	72.74	74.99	72.31	73.47	63.07	70.47	82.07	76.72	66.26	78.25	64.20	82.06	76.78	70.63	63.11	59.72	59.63	61.02
22	70.00	62.73	86.00	68.24	69.72	64.61	74.45	70.99	72.51	71.84	62.65	61.31	71.81	67.88	74.76	82.40	79.38	59.07	68.61	58.39	63.74	63.67
23	72.29	74.37	88.22	82.22	59.60	63.64	58.53	64.78	64.18	57.90	75.04	61.32	59.56	65.14	79.76	79.78	61.88	61.59	77.51	62.83	72.21	56.85
24	86.68	62.83	84.63	83.24	58.13	58.86	76.40	70.52	70.05	65.30	61.86	55.41	71.90	79.75	58.91	69.61	73.82	70.62	59.42	58.95	74.61	68.12
25	86.45	70.46	64.05	84.57	82.61	76.18	60.14	78.01	78.03	57.02	79.40	63.30	75.65	66.50	64.02	58.17	66.98	71.74	80.65	70.08	62.21	80.60
26	65.17	83.60	72.94	77.52	77.92	63.25	62.68	63.05	57.55	56.18	58.62	68.03	57.67	68.49	60.50	71.62	55.97	80.41	75.75	75.87	67.73	60.37
27	80.59	67.09	72.24	73.97	76.20	62.17	56.14	73.17	79.72	78.11	69.39	56.20	70.88	73.03	66.09	81.39	79.11	73.95	74.94	62.80	77.45	69.30
28	84.50	69.98	64.65	70.24	78.73	83.48	58.94	58.34	70.08	64.72	70.95	56.70	60.77	69.07	78.41	82.38	75.66	68.26	57.05	62.35	65.16	70.92
29	69.75	64.07	85.82	66.69	77.23	82.94	75.88	82.55	65.23	63.88	71.82	72.38	74.92	65.46	58.52	75.41	77.60	67.95	57.36	73.87	60.55	70.13
30	65.15	73.71	86.82	78.66	70.13	69.70	75.03	67.39	60.51	56.27	62.18	79.12	56.80	57.27	72.21	71.09	59.76	62.08	70.91	61.17	72.96	75.15



### C. 读硕士学位期间发表学术论文情况

- [1] 徐鹏鹏, 龙春晓, 刘贵文. “营改增”对施工企业成本管理的影响及对策[J]. 建筑经济, 2016, (08):29-32.

