

# 摘要

随着中国经济和社会的快速发展，配电变压器的市场需求和市场环境发生了前所未有的变化和趋势：产品需求呈现高度定制化的趋势；订单结构呈现小批量和多品种的趋势；产品交付呈现短期化和快速化的趋势；价格竞争呈现白热化和差异化的趋势。配电变压器制造企业迫切需要通过提高生产效率、降低生产成本、提高产品交付能力和缩短产品制造周期等来提升企业竞争力、适应市场变化和满足客户需求变化。精益生产作为先进的生产管理方式，将有助于配电变压器制造企业解决所面临的生产过程的痛点和难点。

本文的研究基于精益生产的理论，首先结合 T 公司配电变压器多品种、小批量、定制化的订单结构特点、产品结构和生产流程等，通过客户需求节拍时间计算和价值流图分析找出影响装配-试验工序生产能力和生产效率的主要问题：在制品库存数量过多、物流效率不高和加工过程存在各种浪费等。然后针对这些问题进行深入分析，结合装配-试验工序的生产过程和工艺流程，使用精益工具如工时测量、价值流图、5-Why 分析法、单件流和 ECRS 改善原则等对装配-试验工序进行全面改善。最后设计和实施装配-试验单件流、建立以辊排运输线为主的新型物流方式以及使用 ECRS 原则消除生产过程中的浪费，有效解决了生产资源有限的前提下生产效率不高和生产能力不足的问题，使装配-试验工序的循环时间 C/T 改善到低于客户需求节拍时间 T/T，与生产效率有关的评价指标也得到了显著提升，真正解决了当前企业生产营运遇到的痛点和难点，最终满足了客户需求，提高了企业竞争力和客户满意度。本文的精益改善实践解决了配电变压器行业因多品种、小批量和定制化的订单结构特点所导致的产品规格、尺寸和重量的差异对生产效率和生产能力的影响，拓展了精益生产理论在多品种、小批量和定制化生产模式的适用范围，为国内配电变压器制造企业或者类似生产模式的重型设备制造企业提供了较好的参考和借鉴。

**关键词：**精益生产；多品种小批量；单件流；ECRS；生产效率；配电变压器

## ABSTRACT

With the rapid development of China's economy and society, the market demand and environment of distribution transformers have undergone unprecedented changes and trends: product demand presents a highly customized trend; The order structure presents the trend of small-batches and multi-varieties; The product delivery presents the trend of short term and fast; Price competition presents white-hot and the trend of differentiation. Distribution transformer manufacturing enterprises urgently need to improve production efficiency, reduce production costs, improve product delivery ability, and shorten product manufacturing cycle to enhance enterprise competitiveness, adapt to market changes and meet customer demand changes. As an advanced production management method, lean production will help distribution transformer manufacturers to solve the pain points and difficulties in the manufacturing process.

Research of this paper is based on the theory of lean production, first of all, combined with multi-varieties, small-batches and customized order structure of T company distribution transformer, product structure and manufacturing process, etc., through customer demand Takt Time calculation and the analysis of value stream mapping, the main problems which affected Assembly-Test process production capacity and production efficiency were: WIP inventory was too much, logistics efficiency was not high and there were all kinds of wastes in the process. Then an in-depth analysis of these problems was conducted. Combining with manufacturing process and technological process of Assembly-Test process, an overall improvement to Assembly-Test process by using lean tools, such as man-hour measurement, value-stream-mapping, 5-Why analysis, one-piece-flow and ECRS improvement principles were conducted: design and implementation of Assembly-Test one-piece-flow, establishing new logistics mode with roll transportation line and elimination the waste in the production process by ECRS principle, this solutions effectively solved problems of low production efficiency and insufficient production capacity under limited production resources, and improve the cycle time to be lower than customer demand takt time, meanwhile the production efficiency evaluation index has been significantly increased, and indeed solved the current enterprise production operation pain points and difficulties encountered, eventually to satisfy the customer demand, improved enterprise competitiveness and customer satisfaction. The lean improvement practice in this paper solved the impact of the differences from different product specifications, sizes and weights on production efficiency and capacity which caused by multi-varieties, small-batches and customized order structure in distribution

transformer industry and expanded the application scope of lean production theory in multi-varieties, small-batches, and customized production mode. It provides a good reference for domestic distribution transformer manufacturing enterprises or similar production mode of heavy equipment manufacturing enterprises.

**Keyword:** Lean production, Multi-varieties and small-batches, One-piece-flow, ECRS, Production efficiency, Distribution transformer

# 目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目录.....	IV
图表清单.....	VII
<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 国外研究现状.....	2
1.2.2 国内研究现状.....	2
1.3 精益生产理论概述及常用工具.....	4
1.4 生产效率改善流程及其评价指标.....	6
1.4.1 生产效率诠释.....	6
1.4.2 生产效率改善流程.....	7
1.4.3 生产效率评价指标.....	7
1.5 研究内容、方法和技术路线.....	8
1.5.1 研究内容.....	8
1.5.2 研究方法.....	9
1.5.3 技术路线.....	9
1.6 本章小结.....	10
<b>第二章 装配-试验工序现状介绍</b> .....	<b>11</b>
2.1 企业简介.....	11
2.2 产品结构和生产流程介绍.....	11
2.3 过去一年订单结构分析和节拍时间计算.....	13
2.3.1 过去一年订单结构分析.....	13
2.3.2 节拍时间（Takt Time）计算.....	15
2.4 装配-试验工序生产现状概况.....	16
2.4.1 加工时间测量.....	16
2.4.2 生产布局介绍.....	18

2.4.3 当前状态价值流图 .....	20
2.4.4 现状问题总结 .....	20
2.5 本章小结 .....	22
<b>第三章 装配-试验工序现状问题研究 .....</b>	<b>23</b>
3.1 现状问题原因分析 .....	23
3.1.1 在制品库存分析 .....	23
3.1.2 物流现状分析 .....	26
3.1.3 加工时间测量与分析 .....	29
3.2 改善机会总结 .....	32
3.3 本章小结 .....	32
<b>第四章 装配-试验工序生产效率改善方案设计 .....</b>	<b>34</b>
4.1 设计装配-试验单件流 .....	34
4.1.1 单件流方案设计 .....	34
4.1.2 单件流工作站切分 .....	35
4.1.3 改善效果评估 .....	39
4.2 设计新型物流运输方式 .....	40
4.2.1 设计辊排线运输系统 .....	40
4.2.2 优化物流路径 .....	42
4.2.3 改善效果评估 .....	43
4.3 ECRS 改善加工过程 .....	44
4.3.1 改善流程说明 .....	44
4.3.2 浪费识别与 ECRS 改善 .....	45
4.3.3 改善效果评估 .....	50
4.4 本章小结 .....	51
<b>第五章 装配-试验工序生产效率改善方案实施与效果评价 .....</b>	<b>52</b>
5.1 实施装配-试验单件流 .....	52
5.2 实施新型物流运输方式 .....	53
5.3 装配-试验工序生产效率改善总评价 .....	54
5.3.1 直接收益评价 .....	54
5.3.2 间接收益评价 .....	55

5.4 本章小结.....	55
总结与展望.....	56
1 总结.....	56
2 展望.....	56
参考文献.....	58
附录.....	61
附表 1 2000kVA 产品装配-试验加工时间测量结果.....	61
附表 2 2000kVA 产品改善后的装配-试验加工时间测量结果.....	65
攻读硕士学位期间取得的研究成果.....	69
致谢.....	70

## 图表清单

图 1-1 生产效率改善流程.....	7
图 1-2 论文技术路线.....	10
图 2-1 环氧树脂浇注干式变压器的产品结构.....	12
图 2-2 环氧树脂浇注干式变压器生产流程图.....	12
表 2-1 过去一年 T 公司配电变压器订单 ABC 类别分布 .....	13
图 2-3 过去一年 T 公司配电变压器订单 XYZ 类别分布 .....	14
表 2-2 过去一年实际产出和未来两年市场需求表.....	15
表 2-3 AX 类产品加工时间 P/T 及极差 .....	16
表 2-4 2000kVA 产品各工序循环时间 C/T.....	17
图 2-4 2000kVA 产品各工序 C/T 和未来两年 T/T 比较图 .....	18
图 2-5 当前配电变压器装配-试验工序生产布局 .....	19
图 2-6 当前状态的装配-试验工序价值流图 .....	20
图 3-1 5-Why 分析法寻找装配工序前在制品库存原因.....	24
图 3-2 5-Why 分析法寻找试验工序前在制品库存原因.....	25
图 3-3 当前装配-试验工序物流路径示意图 .....	27
表 3-1 装配-试验工序物流距离和物流时间统计表 .....	28
图 3-4 行车操作时间构成图.....	29
图 3-5 装配-试验加工时间类别分布图 .....	30
表 4-1 单件流工作站切分和加工内容调整一览表.....	35
图 4-1 装配-试验单件流工作站设置及生产流程示意图 .....	39
图 4-2 装配-试验单件流各工作站工作负荷图 .....	39
表 4-2 不同物流运输设备优缺点对比表.....	41
图 4-3 改善后的装配-试验工序物流路径示意图 .....	42
表 4-3 改善后的装配-试验工序物流距离和物流时间统计表 .....	43
图 4-4 改善前与改善后物流距离和物流时间对比.....	44
图 4-5 瓶颈工作站工艺流程改善流程图.....	45
表 4-4 消除改善过程表（举例） .....	46
表 4-5 合并改善过程表（举例） .....	47

表 4-6 重排改善过程表（举例） .....	48
表 4-7 简化改善过程表（举例） .....	50
图 4-6 改善后的装配-试验单件流各工作站负荷图 .....	51
图 5-1 装配-试验单件流生产线布局及物流路径示意图 .....	52
表 5-1 改善前后装配-试验工序在制品库存及产出准时率对比表 .....	53
图 5-2 改善前后的物流距离和物流时间对比 .....	54
图 5-3 改善后的装配-试验工序价值流图 .....	54
表 5-2 改善前和改善后装配-试验工序生产效率评价指标对比表 .....	55



# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

随着中国经济和社会的快速发展，近几年中国加快推行新型基础设施建设，大力发展包括太阳能、陆上风电和海上风电等绿色环保可再生能源来应对全球气候变化，结合“一带一路”国家发展战略，包括配电变压器在内的传统能源设备制造企业迎来了发展的风口期，配电变压器的市场需求和市场环境也产生了剧烈的变化：

(1) 产品需求呈现高度定制化的趋势。与以往的客户需求不同，现在的客户特别是工业设备客户会根据所在行业标准规范和产品研发需求与配电变压器生产企业直接技术对接，提出适合其实际应用的定制化需求，甚至直接参与配电变压器的设计和生产阶段。

(2) 订单结构呈现小批量和多品种的趋势。客户根据技术要求、项目进度和配置参数等提出产品需求，导致生产企业呈现订单数量变多但单个订单金额变少、产品品种变多但单个品种数量变少的趋势。

(3) 产品交付呈现短期化和快速化的趋势。项目的不确定性导致工期不断被压缩，客户期望包括配电变压器在内的电力设备能够准时交付甚至提前交付，生产企业短期内快速交付的能力逐渐成为客户招标时的关注点。

(4) 价格竞争呈现白热化和差异化的趋势。配电变压器市场需求很旺盛也细分明显，不同行业客户对产品关注重点也不尽相同，但都对产品价格越来越敏感。不少相当有实力的国内电力设备企业进入配电变压器行业后，导致产品价格战频频发生，部分细分市场例如建筑楼宇、数据中心等已经进入以量换价的时代，市场竞争力不够的生产企业很难生存和发展。

变压器行业属于典型的离散型制造业，其行业特点是离散为主、流程为辅、装配为重点，生产模式大多采用小批量、多品种、定制化和面向订单式生产。精益生产作为当前工业界最佳的组织体系和方式之一，已经被众多制造企业采用以解决管理经营中存在的诸多问题，在解决多品种和小批量生产模式方面有非常成功的应用经验，例如汽车行业、电子设备行业，但鲜见配电变压器行业的成功应用，其中很重要的原因就是高度定制化的变压器产品不同规格之间的尺寸、重量和加工时间差异明显，产品标准化程度低。精益工具在改善生产流程、改进生产管理方面的成功案例很多，但利用精益工具改善轻则几吨重则十几吨的配电变压器装配-试验生产效率方面的研究应用非常少见。

本文为国内配电变压器制造企业或者类似生产模式的重型设备制造企业提供了较好的参考和借鉴作用。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

泰勒在《科学管理》一书中最早提出效率的概念以及提升效率的方法，随后吉尔布雷斯夫妇总结的动作研究、大野耐一提出的丰田拉动生产方式以及麻省理工学院詹姆斯教授提出的精益生产等进一步丰富了生产效率提升的理论和方法。精益生产总结制造过程中存在七大浪费：制造过多浪费、停工等待浪费、搬运浪费、动作浪费、存货浪费、加工浪费、和不良品浪费。精益生产的核心思想是消除制造过程中的一切不必要的浪费减少制造过程中的无效生产和异常，促进生产效率的提升和改善<sup>[1]</sup>。Ogorodnyk、Granheim 和 Holtskog<sup>[2]</sup>（2016）以精益思想和运营管理为研究基础，使用柔性生产线、5S 现场管理及作业管理等精益方法，提升滑雪板装配线的生产效率。Chutima<sup>[3]</sup>（2017）研究和应用精益原则、价值流和 ECRS 等方法提升汽车装配线生产效率。Jitchaiyaphum 和 Prombanpong<sup>[4]</sup>（2015）针对生产工艺复杂、人员数量过多、制造过程浪费很多等现状问题，消除过程中的各种浪费以及改善线平衡的方法提高包装生产线的生产效率。Eva、Janez 和 Lidi<sup>[5]</sup>（2019）应用精益六西格玛方法来提升生产效率与缩短制造周期。Paveethrun、Bakthavachalam 和 Kannan<sup>[6]</sup>（2016）利用精益生产思想和方法，优化涡轮增压器的装配工艺、重新设计装配线的工站以及引入多功能夹具等方式提高涡轮增压器装配线的生产效率。Wan S, Wan A N 和 Musa M A<sup>[7]</sup>（2016）通过对发动机装配部件成套工艺性能测量的时间研究以及生产过程优化从而提高大批量定制柔性装配线的生产效率。Jamil 和 Razali<sup>[8]</sup>（2016）针对生产线的效率没有达到客户要求以及在制品库存过高的现状，应用 Pro Model 软件建立一个仿真模型来对比仿真数据和实际结果，发现影响生产效率的各种浪费，然后制定措施消除浪费从而提高生产线的效率。Parthanandee 和 Buddhakulsomsiri<sup>[9]</sup>（2014）价值流图分析和仿真系统分析两种方法，改进生产流程的瓶颈环节从而提高生产效率。Sunil Kumar, Ashwani Kumar Dhingra, Bhim Singh<sup>[10]</sup>（2018）通过绘制价值流图、计算节拍时间以及识别瓶颈位置，同时结合“5-Why 分析法”和“头脑风暴法”来实施精益改善，降低了在制品库存、缩短了交货期，提高了生产效率。

### 1.2.2 国内研究现状

精益生产思想及相关工具解决多品种、小批量和定制化生产模式下的制造企业生产现状问题的相关研究和文献很多。周玲玲<sup>[11]</sup>（2018）以 H&H 公司非标立式圆瓶定位贴标机生产线为研究对象，通过鱼骨图分析法和程序分析法对产生问题的根本原因进行识别，并通过快速换型技术解决生产过程中多品种小批量生产问题。方锐<sup>[12]</sup>（2019）以 S 公司的配电变压器生产过程为研究对象，运用多种精益工具解决小批量多品种生产方式下的大规模定制化产品遇到的各种生产问题。王奕<sup>[13]</sup>（2018）以 K 集团中国工厂为研究对象，根据多品种小批量生产模式特点，建立精益管理模型，总结出一套适用工厂当前情况的精益实施路线图。王波<sup>[14]</sup>（2019）针对多品种小批量制造企业实施精益单元化生产的难题，提出了 TODMO 模式的精益单元实施路径，通过价值流分析图、产品分族、操作和生产工艺标准化等方法建立了精益单元化生产线。高广鑫和朱洁<sup>[15]</sup>（2021）研究从生产现场改善理论和人-机-环境最优性原则出发，以动作分析、JACK 仿真模拟和快速上肢评估方法，改善多品种小批量生产线操作者劳动负荷高、生产效率低的现状问题。

生产效率的提升是一个系统工程<sup>[16]</sup>。精益生产思想及相关工具在改善和提升制造企业的生产效率方面的研究和应用非常多。贾玉新<sup>[17]</sup>（2019）诠释了生产效率理论和管理实施流程，通过识别生产过程中的七大浪费以及实施流程的 7 个步骤来系统提示生产效率。张衍钧<sup>[18]</sup>（2019）结合精益生产理论、生产率评价理论、PDCA 戴明环对表面贴装生产线的利用率、焊接生产线的利用率以及组装生产线的利用率进行深入分析，提出提升生产线效率的具体方案。姜晨光和严广乐<sup>[19]</sup>（2019）运用 ECRS 等精益工具对 H 公司的生产线进行优化、重组，消除不必要的浪费，将原来的生产线平衡率提高至 72% 以上。俞宏明<sup>[20]</sup>（2021）以某公司 BM2 车间纸机作为研究对象，分析其生产过程中的浪费原因，通过作业标准化、人员调整和员工技能提升等方法来提升纸机的生产效率。曹刚<sup>[21]</sup>（2018）研究基于精益生产和 IE 工业工程的理论和方法，运用改善库存及物流、提升线平衡率、运用 SMED、改善车间 5S 管理等方法改善和提高笔记本电脑装配流水线的生产效率。杨春华<sup>[22]</sup>（2015）以生产线改善前的工时测量为基础数据，分析生产线的 UPPH 水平，运用 ECRS 原则优化作业标准时间并导入工作因素法优化作业标准时间，最后重新设计生产流程，提升了生产效率。崔琰<sup>[23]</sup>（2016）基于精益生产理论和工业工程 TOC 约束理论，对影响集装箱流水线平衡的瓶颈位置进行分析和改善，通过流程分析和动作分析、工位设计等方法改善和提升集装箱流水线的线平衡和生产效率。钟志超<sup>[24]</sup>（2018）研究和分析 M 公司洗衣机装配线的线平衡

率现状，运用 ECRS 原则、设备故障改善、SMED 快速换型等方法来改善装配线的线平衡和稼动损失来提高生产效率。葛安华、邹银萍<sup>[25]</sup>（2015）以某公司洗碗机内胆生产线为研究对象，绘制洗碗机内胆生产线的现状价值流图，找出制约生产线产能的瓶颈问题，结合精益生产思想、原则方法对洗碗机内胆生产线改善线平衡，提升了生产效率。刘晓冰、周春柳<sup>[26]</sup>（2015）以某连杆的加工流程为研究对象进行全过程价值流分析，通过绘制的现状价值流图识别出生产中的各种浪费，应用 5Why 方法分析各种浪费的根源，运用 ECRS 原则提高生产效率并绘制出适合某连杆加工流程的未来价值流图。

综上所述，生产效率提升研究与制造企业的生产实践活动关联密切，众多学者站在学术前沿，对如何运用精益生产工具提升制造企业的生产效率提出了理论和实践。但是作者发现，不同于精益生产在汽车行业、电子设备行业等大批量、自动化、流水线生产模式的成熟应用，借用精益生产理论和精益生产工具改善小批量、多品种和定制化生产模式的重型制造企业的生产效率方面的研究应用比较少见，属于该类制造企业的配电变压器生产效率改善方案有待提出。

### 1.3 精益生产理论概述及常用工具

精益生产的概念源于即时生产，也叫准时生产，英译为 Just-In-Time，简称为 JIT。精益生产最早出现于上个世纪六十年代的日本，同日本经济的高速发展密不可分。二战后，日本丰田公司为了三年赶超美国的汽车制造业，创新建成了适合本国国情的生产管理方式，因此也称丰田生产系统（Toyota Production System）<sup>[27]</sup>。1985 年，美国花费五年时间对 14 个国家近 90 个汽车装配厂进行实地考察。最后于 1990 年出版了《改变世界的机器》一书，首次提出了精益生产（Lean Production）的概念<sup>[28]</sup>。该书中的精益生产方式是指以消耗较少的人力、空间、时间和资金制造最少缺陷的产品来准确的满足客户的需要。接着在 1996 年，“国际汽车计划”第二阶段研究成果《精益思想》一书总结了由大批量生产过渡到精益生产所要遵守的原则，进一步阐述了精益生产的思想内涵，即在企业管理工作中全面贯彻精益生产的原则，以整体优化的观点合理配备和利用所有的管理要素，消除管理全过程中的一切浪费<sup>[29]</sup>。

精益思想在丰田生产系统的基础上，吸收和结合了工业工程、六西格玛等管理思想与理念的精华，逐渐转变为一套应用于全球各个经营管理组织的集成理论。精益企业已成为全球知名企业发展追求的方向。精益生产方式是综合批量生产与单件生产的

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/657061132160006053>