

# 面向大规模定制的开关柜智能装配生产线设计研究

肖栋

(上海市建筑科学研究院科技发展有限公司, 上海 201500)

**摘要:**针对开关柜装配作业、检测以及管理落后、低效的问题,以 KYN28 型开关柜为例,从产品结构及装配流程入手,运用 Gephi 对部件零件进行可视化分析和模块划分,结合人工装配工艺,提炼自动化装配工艺流程。运用 QFD 明确需求后计算成本、理想节拍、最少工位数及人员分配,归纳关键指标参数及限制条件。设计总布局,计算平衡率及平滑性指数,量化产线性能。用 FlexSim 进行产线排产仿真,进一步验证各个工序工位利用率、空闲率及堵塞。生产线投产后具备柔性化、信息化、低成本、减员增效的优势,突破了装配环节瓶颈。

**关键词:** KYN28 型开关柜;智能装配生产线;Gephi;QFD;FlexSim;MES

**中图分类号:** TP278 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2021)05-0138-04

## Design and Research of Smart Assembly Line of Switch Cabinet for Mass Customization

XIAO Dong

(Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 201500, China)

**Abstract:** To improve the low efficiency in switch cabinet assembly operations, inspections and management, with KYN28 switchgear as an example and starting from the product structure and assembly process, Gephi is applied for visual analysis and module division on the components. Manual assembly process being combined, the automated assembly process is refined. QFD is adopted to clarify the requirements, calculate the cost, ideal tempo, minimum number of stations and personnel allocation, and summarize the key index parameters and constraints. The overall layout is designed, the balance rate and smoothness index is calculated to quantify the performance of the production line. With FlexSim, production line scheduling simulation is conducted to further verify the idle rate and blockage of each process station utilization. The improved assembly in production is provided with flexibility, informatization, low-cost, staff downsizing and efficiency improvement, which breaks the bottleneck of the assembly link.

**Keywords:** KYN28 switchgear; intelligent assembly production line; Gephi; QFD; FlexSim; MES

## 1 开关柜装配现状及面临的问题

开关柜生产模式逐渐地由“产品导向性”朝着“顾客导向性”的方向发展<sup>[1]</sup>,大规模定制及超短交货周期为必须的核心竞争力。然而国内开关柜普遍以人员地面安装为主要模式,部分企业陆续使用装配线来生产,但多为刚性生产线<sup>[2]</sup>,且核心设备严重依赖进口,价格高昂、回报周期漫长,大部分企业无法承受,由此而导致开关柜装配生产依然有不少企业采用“人海战术”、“地面安装”、“摆地摊”形式(图 1),3~5 个人从柜体零部件一直安装到成品。生产企业在装配环节面临以下问题:1)产品的大规模定制需求,需兼顾各类配置及尺寸要求。2)大规模定制生产管理困难。3)想仿造行业龙头企业装配线作业却受制于高昂改造成本及漫长回报周期。4)人力成本增高,产品交货周期缩短。解决上述问题,突破装配瓶颈成为相关企业的迫切需要。现以 KYN28 型开关柜为例展开探索研究。



图 1 人工地面装配

## 2 开关柜智能装配线布局方案设计

### 2.1 Gephi 可视化分析和模块划分

基于 Gephi 软件分析 KYN28 型开关柜的零部件之间的关系和装配顺序的相关数据,对产品进行定性分析<sup>[3]</sup>。建立及导入节点数据、边数据后采用统计、分割、排序、流程、滤波等手段对产品数据进行定性分析<sup>[3]</sup>。运作模型及结论图分别如图 2-图 3 所示。

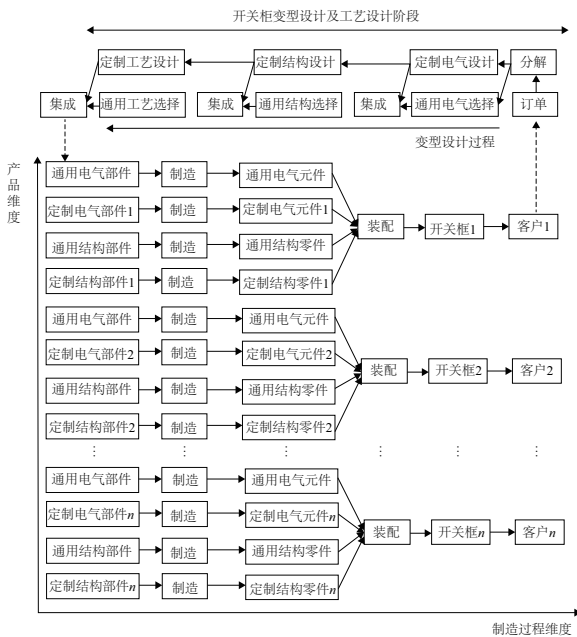


图2 大规模定制开关柜运作模型

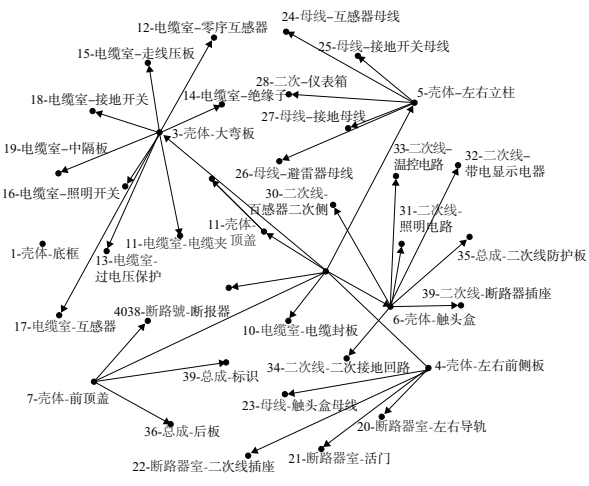


图3 结论图

产品的结构会影响其装配<sup>[4]</sup>,通过图3可以发现零部件是聚类分组、相对独立的。可以根据以上规律结合人工装配工艺,最终归纳整理的自动化装配工艺如图4所示。

## 2.2 QFD 对装配作业需求进行分析

运用 QFD 工具做装配作业的需求分析。对用户需求与设计需求的相关关系进行量化<sup>[5]</sup>,如表1所示。

表1 重要度计算表

用户需求	重要度
提供合适的装配工艺流水线	78
将工艺分解至每个工位	72
提供机器人全自动解决方案	72
提供缓存工位	36
提供辅助工装、登高车	70
产线信息化	42
在线检测工位	30

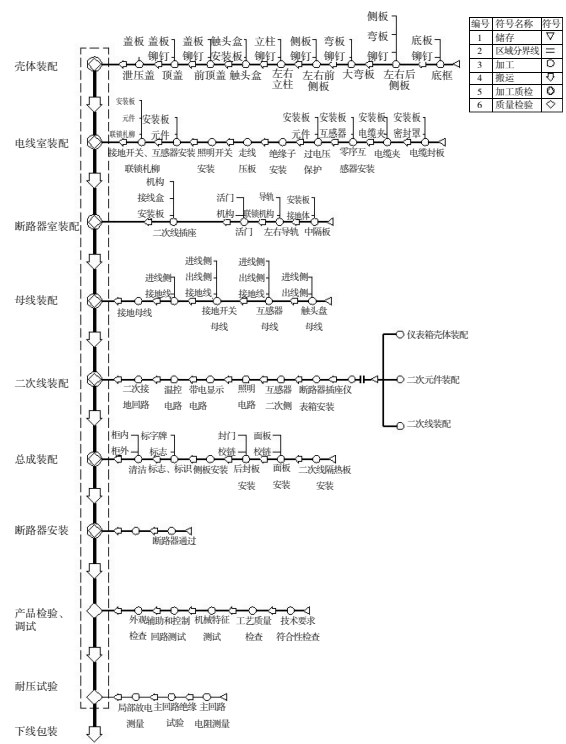


图4 KYN28 自动化装配工艺

## 2.3 装配线布局方案

以常规企业为例,装配人员20人、250d、8h,产能为2500台。同等条件下实现产能翻一番,投资回报周期为1年才具备改造价值,现以产量5200台为目标,归纳关键指标参数如表2所示。

表2 关键指标参数表

序号	产线要求明细	设计技术指标	备注
1	可承受产品最大质量/kg	1 500	
2	兼容最大尺寸/(mm×mm×mm)	1 200×1 800×2 300	宽×深×高
3	兼容最小尺寸/(mm×mm×mm)	650×1 500×2 300	同上
4	生产节拍/(min/台)	≤22.8	取整为22 min
5	年产量/台	5 200	
6	理想工作站数量/个	≥19	
7	产线总成本/万	≤224	含MES软件
8	工位操作方式	触摸屏	
9	工位间转运	RGV	
10	工位物料转运	物料盒、物料小车	
11	生产线整体水平精度/mm	<3	
12	单体设备水平精度/mm	<1	
13	噪声/dB	<75	1 m处
14	故障率/(次/月)	低于4	控制故障
15	信息化	MES系统、扫码枪	

RGV 做主物流输送,工位非字型排布在轨道两侧。设计机器人拼柜作业岛及人工拼柜作业岛,兼顾全自动化

尝试及保证装配线的正常运转。28 个标准工位,包含装配作业工序。开关柜平行轨道放置,装配人员可同时安装前后部,提高安装效率。缓存工位均匀分布,方便就近缓

存,节约节拍。在互感器与仪表箱装配位置配置助力机械手及平衡吊。设置耐压测试区,实现在线检测。具体布局如图 5 所示。

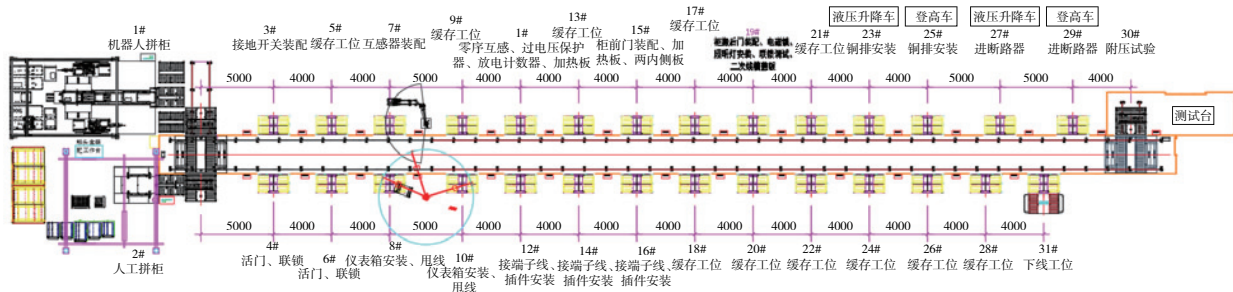


图 5 装配线布局图

计算布局的生产节拍  $C_T$ 、工作站数  $m$ 、平衡率  $P$ 、平衡延迟率  $B_D$ 、装配线平滑指数  $S_1$ 。布局的生产节拍  $C_T = 22 \text{ min}$ , 工作站总数为 31, 其中缓存工位数为 11, 故工作站数  $m = 20$ 。则所有工作站作业时间总和为 654 min, 最大工作站时间  $\max(T_k) = 44 \text{ min}$ , 代入如下公式可得平衡率为

$$P = \frac{\sum_{k=1}^m T_k}{m \times \max(T_k)} \times 100\% = \frac{654}{20 \times 44} \times 100\% = 74.32\%$$

由平衡率可得平衡延迟率为

$$B_D = \frac{m \times \max(T_k) - \sum_{k=1}^m T_k}{m \times \max(T_k)} \times 100\% = 1 - P = 25.68\%$$

根据分类平衡率 70%~85%, 平衡延迟率 15%~30%, 该产线生产方式定义为大体科学管理装配线, 基本满足设计要求。

平滑性指数计算:

$$S_1 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (C_T - T_k)^2}{m}} = \sqrt{\frac{5734}{20}} = 16.93$$

## 2.4 FlexSim 仿真

应用 FlexSim 软件对布局做详细仿真分析, 布局连接如图 6 所示。布局虽然集成了机器人拼柜岛与人工拼柜岛, 但机器人拼柜岛尚处于研发摸索阶段, 暂时没有成熟的产品。所以仿真仅仅针对人工拼柜岛部分进行仿真。

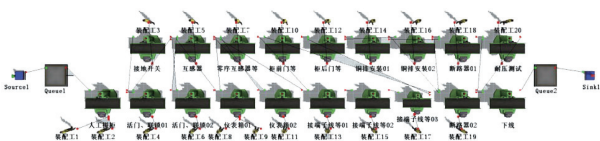


图 6 连接对象图

想让整个产线发挥出最大的效能, 必须使各工序的生产能力均衡一致<sup>[6]</sup>。对装配线进行仿真, 分别输入各个工位的操作时间, 整体仿真时间设置为 4 800 min, 如图 7 所示。

由图 7 所知, 除下线工位外, 其余工位利用率均达到 90% 以上。整体产线状态良好, 说明装配线设计合理, 可实施性较强。

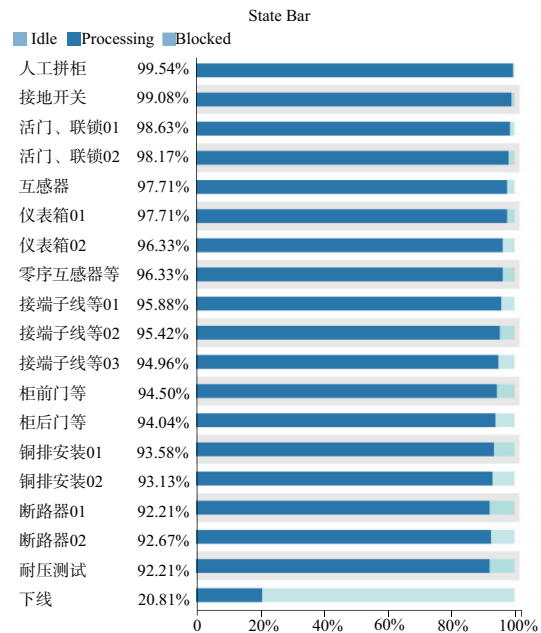


图 7 4 800 min 仿真数据

## 3 开关柜智能装配生产系统实现

### 3.1 装配生产线设计实现

节选部分关键机械设备、电气控制及 MES 系统来介绍开关柜智能装配生产系统的具体实现(图 8-图 11)。

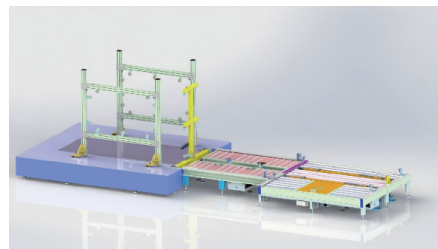


图 8 人工拼柜岛三维设计图

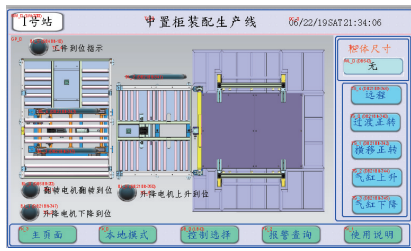


图9 壳体拼装操作界面

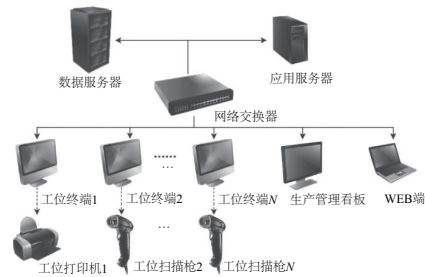


图10 MES系统硬件结构

通过表3可知产能比以往翻了一番,达到要求。下面将关键指标和实测做个比较,如表4所示。

表4 产线关键指标参数对比表

序号	要求明细	设计指标	实测指标
1	可承受最大质量/kg	1 500	2 000
2	兼容最大尺寸/ (mm×mm×mm)	1 200×1 800×2 300	1 200×1 800×2 300
3	兼容最小尺寸/ (mm×mm×mm)	650×1 500×2 300	650×1 500×2 300
4	生产节拍/ (min/台)	22	22
5	年产量/台	5 500	暂无数据
6	工位操作方式	触摸屏	实现
7	工位物料转运	物料盒、物料小车	实现
8	生产线水平精度/mm	<3	<5
9	单设备水平精度/mm	<1	<1
10	噪声/dB	<75	<85
11	故障率(次/月)	4	2
12	信息化	MES系统、扫码枪	实现

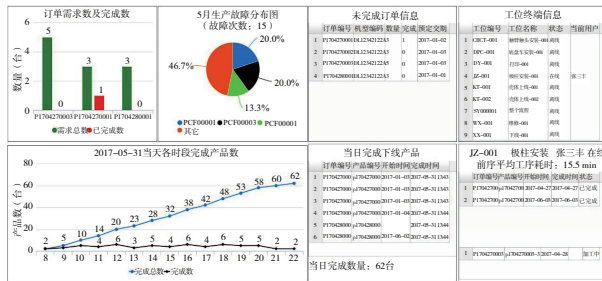


图11 生产状态看板

### 3.2 实施效果

开关柜智能装配生产线安装调试完成后,须进行联调和运行,检验其实际效果。实际生产统计产能如表3所示。

表3 产能对比表 单位:台

日期序号	地面安装产能	产线仿真产能	产线实际产能
1	10	4	4
2	10	21	18
3	9	22	19
4	10	22	20
5	10	21	18
6	9	22	19
7	10	22	19
8	10	22	20
9	8	22	20
10	10	21	19
11	10	22	20
12	9	22	20
13	10	22	20
14	10	22	20
15	10	22	18
16	10	21	19
17	10	22	20
18	9	22	21
19	10	22	20
20	9	22	20
21	10	21	18
22	9	22	20
23	10	22	20
24	10	22	20
25	7	22	20
26	10	22	20
27	10	21	18
28	10	22	20
29	8	22	19
30	10	22	20

## 4 结语

该装配线后期使用中实现如下效果:1)实现产品的大规模定制,兼顾各类配置及尺寸。2)MES系统接入使生产管理便捷高效。3)成本仅为进口同类型功能装配线的1/4,回报周期仅为1年。4)不增加人员及工作时间实现产能翻番,交货周期进一步缩短。装配线具备柔性化兼容性强、信息化程度高、投入低回报快、减员提效等四大优势,将助力开关柜企业突破装配瓶颈,满足市场需求。

### 参考文献:

- [1] 郑杜,唐敦兵,王旭,等. 个性化定制生产模式下的云制造系统设计研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):33-36.
- [2] 车晓明. 浅析开关设备智能制造新模式——柔性智能制造技术在数字化车间建设中的研究与应用[C]//2015年第五届全国地方机械工程学会学术年会暨中国制造2025发展论坛论文集. 腾冲:2015:928-940.
- [3] 杨璟. A公司装配生产线优化研究[D]. 上海:华东理工大学,2017.
- [4] PARALIKAS J, FYSIKOPOULOS A, PANDREMENOS J, et al. Product modularity and assembly systems: an automotive case study[J]. CIRP Annals, 2011, 60(1):165-168.
- [5] 周生祥,郑枫. 集成AHP/QFD/AD的产品设计方法研究[J]. 包装工程,2021,42(2):150-154,166.
- [6] 吴晓艳. 装配生产线平衡的研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.

收稿日期:2020-10-20