

基于Flexsim的汽车空调生产线 优化研究

袁亚银，叶学敏

上海马勒热系统有限公司 上海 200120

摘要：针对A公司汽车空调生产线产品制造节拍不平衡问题，提出一种应用三维仿真软件进行模拟优化的优化方案。结合实际生产流程，采用Flexsim软件建立仿真模型，挖掘关键瓶颈工序，制定优化方案，合理进行资源配置优化，进而提高该生产线生产效率和产能。

关键词：汽车空调；生产线；仿真；模型；优化

在全球化日益成熟的今天，对于制造业，有效的工厂布局和规划有助于控制制造业成本和制造时间。尤其在面对客户日益多变的需求和多品种小批量的产品需求时，实现制造的快速响应至关重要。工厂设施的合理设计可以加速物料的流转，缩短资源运输时间和产品的生产周期。另外，设备布局的合理性有助于提高制造系统的运行性能，有效地降低平均制造成本^[1]。

Flexsim软件是由美国FlexSim公司开发的生产系统仿真软件，旨在对离散事件系统、连续流体生产系统及物流系统进行模拟。在国外，该软件应用涉及生产设施和布局优化、航空公司对机场进行规划设计，以及政府和金融部门的统筹规划等领域。国内目前对该软件的应用也趋于广泛，如石宇强应用达宝易和Flexsim软件对产品生产线进行分析，找出瓶颈工序并进行优化，提高生产线平衡率^[2]。王珊珊、吴保国等使用Flexsim仿真软件建立了小麦粉生产线加工流程模型

并进行实验分析，大大提高了设备利用率^[3]。石菁菁通过Tecnomatix软件对燃气轮机数字化生产线进行了仿真实践，介绍了数字化工厂的技术路线和主要功能^[4]。通过以上这些研究分析，将Flexsim软件应用于码头相关物流仿真的相对较多，而用于分析加工制造业领域的相对较少。

本文结合生产实际，使用Flexsim三维仿真软件对A公司汽车空调生产线进行建模仿真。通过对生产线的相关数据进行统计和分析，确定关键瓶颈工序后提出优化方案，对优化前后生产线进行仿真模拟和数据结果分析比较，进而对生产线进行系统优化改造，提高生产效率。

制造流程简析

A公司是一家开发、生产汽车电子设备系统（汽车温度控制系统）及相关零部件的现代化高科技企业。该企业拥有多条汽车空调生产线，是行业内规模最大

的汽车温度控制系统的制造企业之一。

A公司汽车空调系统的生产线流程由各分布式壳体运动机构装配、左右侧壳体及风门装配、暖风热泵及电动机装配、线束装配、分布式壳体及新回风壳体合壳装配、管路及支架等后出风模块装配、密封条及防火墙装配、空调总成功能检测以及最后的目检装箱等多部分组成。具体生产线工艺流程如图1所示。

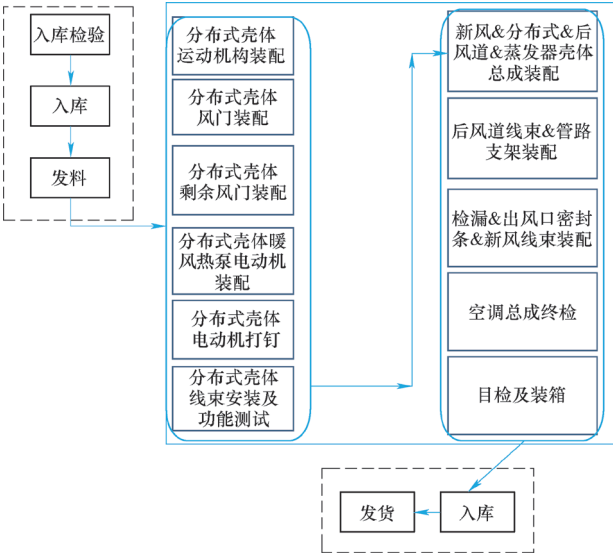


图1 汽车空调生产线流程

现状分析及建模仿真

1.生产现状

生产节拍（cycle time）是衡量生产线平衡的指标之一^[5]，它是指相邻两个工位之间传输的时间间隔^[6]。若工位的操作时间与节拍接近，则此工位处于平衡状态；若工位的操作时间大于节拍，则此工位处于滞后状态，这样的工位为瓶颈工序；若工位的操作时间小于节拍，则表示此工位的工作内容不足，同样会影响其紧前和紧后工位，进而影响生产线平衡^[7]。根据对该公司汽车空调生产线的实地观察测定，得到各工位的操作时间，见表1。

从表1可以看到，各工位的加工时间非常不均衡，其中“暖风热泵盖板及电动机装配”和“管路，支架、后风道线束等装配”两个工位加工时间远大于其他工位，是整条生产线中的关键瓶颈工序。

同时，根据该生产线每天有效工作时间（8h）和最长工位加工时间（220s），得出该生产线每天汽车空调产能和线平衡率分别为：

生产线产能=每天有效工作时间/周期时间=163台
线平衡=工位时间/（周期工位数）=55.95%

表1 空调生产线各工位操作时间

工位号	工位名	人员数	总工时/s	平均工时/s
PWS1	运动机构预装配	1	78	78
WS1	分布式壳体运动机构装配	1	96	96
WS2	左侧壳体及风门装配	1	98	98
WS3	右侧壳体及风门装配	1	120	120
WS4	暖风热泵盖板及电动机装配	1	220	220
WS5	线束装配	1	91	91
WS6	分布式壳体新回风壳体及蒸发器壳体装配	1	167	167
WS7	管路，支架，后风道线束等装配，后出风模块预装配	1	200	200
WS8	密封条、防火墙装配	1	94	94
WS9	空调总成功能检测	1	100	100
WS10	目检及装箱	1	90	90

2.生产线建模与仿真

建模活动是通过对实际系统的观测和检测，在忽略次要因素以及不可检测变量的基础上，用物理或数学的方法进行系统描述，从而获得实际系统的简化近似模型^[8]。对生产线的优化过程，首先要对产品的生产工艺流程、各生产工段的加工时间进行建模和仿真分析，找出影响生产效率的主要因素，并在此基础上针对影响生产效率的问题制定相应的改进方案。由于该汽车空调生产线涉及的设备较多且流程较复杂，本文在采用Flexsim仿真软件进行建模仿真时，为使仿真模型尽量简单实用，在保证功能实现的前提下，对其工艺流程进行了合并简化：即使用一台设备模拟代替某一生产工段。

(1) 模型建立 根据生产线流程，采用Flexsim仿真软件进行建模，首先对汽车空调生产线的相关工序（见图1）进行实体定义，设置1个发生器（Source 1）用以表示进入生产线的物料；11个处理器（PWS1，WS1~10）表示各道工位；2个暂存区（Queue1，Queue2）用来暂时分别存放加工配件和成品。并将各实体进行A或S连接^[9]（其中：A连接为实体连接，使相邻的Ports产生联系，可以交换flow items；S连接类似信息流，能够使操作者对被操作者发出各种指令并执行），使各实体构成连贯的生产线模型，完成可视化模型结构基本布置。

完成可视化模型结构基本布置后，需设定假设条件以保证该模型运行可行。假设条件如下：汽车空调生产线各中间产品在各工位上的加工时间基本服从正态分布且标准差较小；暂存区最大库存量为1000个；中间产品在传送带上的传递时间由于较短设置为0；中间产品资源量无限（即不考虑因零部件不足而造成停线的状况）。在完成假设条件的设定后，根据该产品生产工艺流程建立的仿真模型如图2所示。

(2) 结果分析 根据A公司汽车空调系统生产线实际生产计划，设定有效工作时间仿真钟后，得到该生产线模拟运行数据结果，详见表 2。

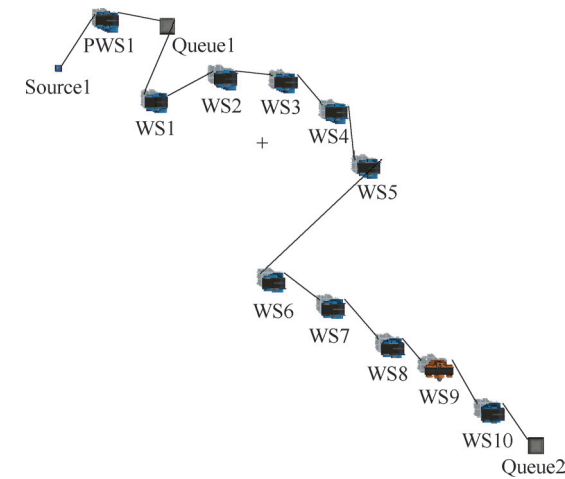


图2 生产线仿真模型示意

表2 生产线模型优化前仿真结果 (单位：%)

工位号	工位名	空闲率	加工率	阻塞率
PWS1	运动机构预装配	0.005	70.675	29.320
WS1	分布式壳体运动机构装配	0.040	43.687	56.273
WS2	左侧壳体及风门装配	0.083	44.553	55.364
WS3	右侧壳体及风门装配	0.128	54.500	45.372
WS4	暖风热泵盖板及电动机装配	0.182	99.818	0.000
WS5	线束装配	58.694	41.247	0.058
WS6	分布式壳体新回风壳体及蒸发器壳体装配	24.297	75.621	0.082
WS7	管路，支架，后风道线束等装配，后出风模块预装配	9.435	90.474	0.091
WS8	密封条、防火墙装配	57.372	42.480	0.148
WS9	空调总成功能检测	54.651	45.147	0.202
WS10	目检及装箱	59.148	40.591	0.260

结合上述数据可以看出：

1) WS4 暖风热泵盖板及电动机装配和WS7 管路、支架、后风道线束等装配（含后出风模块预装配）两个工位的繁忙率最高，达到90%以上，为该生产流程关键瓶颈工序。

2) WS1分布式壳体运动机构装配、WS2 左侧壳体及风门装配热泵及电动机装配、WS3 右侧壳体及风门装配热泵及电动机装配、WS5线束装配、WS8 密封条及防火墙装配、WS9 空调总成功能检测以及WS10目检装箱工位的有效加工率都在70%以下，空闲率比较高，存在很大的浪费。

3) WS1分布式壳体运动机构装配、WS2 左侧壳体及风门装配热泵及电动机装配、WS3 右侧壳体及风门装配热泵及电动机装配，配件堵塞率超过45%，影响该生产线产能。

同时，结合生产线平衡率计算结果可以看出，该生产线不同工位之间加工时间相差较多，整条生产线平衡状态较差。

生产工艺流程优化方案

结合上述生产线平衡率计算数据和生产线模拟仿真结果，制定生产工艺流程优化方案如下。

1.工位优化方案

1) 当前生产线加工时间最长的工位是暖风热泵盖板及电动机装配和管路、支架、后风道线束等装配（含后出风模块预装配），时间分别为220s和200s。结合仿真结果和考察实际发现，该工序同时存在容易导致下一道工序线束装配、密封条、防火墙装配空闲时间过长。经核实现场SOP（标准作业指导书），暖风热泵盖板及电动机装配工序包括暖风热泵预装配及暖风热泵盖板及电动机装配两个主要动作，分别是94s和110s，根据工艺要求，无法减少步骤。因此，增加一台机器和一名操作工，进行暖风和热泵的预装配，优化后该工位加工时间94s。

2) 将暖风热泵盖板及电动机装配工位优化后，管路、支架、后风道线束等装配（含后出风模块预装配）成为新的关键瓶颈工序，加工时间为200s。结合仿真结果和考察实际发现，管路、支架、后风道线束等装配（含后出风模块预装配）工序包括将管路、支

架、后风道线束等装配和后出风模块预装配这2个主要动作，分别是100s和116s。因此，同样增加一台机器和一名操作工，预装后出风模块，然后交给下一站进行密封条、防火墙装配。经过优化，该工位工时为116s。

3) 根据表2的阻塞率数据，分布式壳体运动机构装配工位、左右侧壳体及风门装配工位存在配件堵塞的情况。结合仿真结果和考察实际，采用增加两个工位优化工时为 96s 和 98s。同时增加两台机器和一名操作工可以有效解决配件堵塞的情况。

2.流程优化方案

采用工位优化方案后，发现瓶颈工位移动至右侧壳体及风门装配工位，其工时为120s。对其前后工位进行细化分析，发现该工位打螺钉时间为10s，后续工位打螺钉时间为15s，因此考虑优化为：将右侧壳体及风门装配工位和后续工位的打螺钉动作合并到一个打螺钉工位上。经过上述流程优化，右侧壳体及风门装配工位工时为85s，后续工位暖风热泵盖板及电动机装配工时为74s。

优化前后数据对比分析

制定上述生产工艺流程优化方案后，运用Flexsim 三维仿真软件来对该汽车生产线重新建立生产线仿真模型，如图3所示。

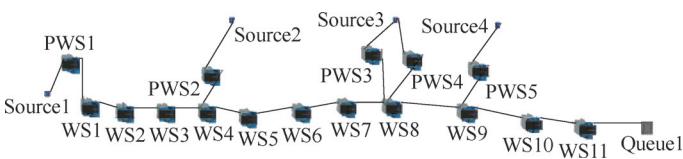


图3 优化后生产线仿真模型

重新建立生产线仿真模型后，将暖风热泵盖板及电动机装配工位和分布式壳体新回风壳体及蒸发器壳体装配工位都增加一个处理器，并将各个工位的加工时间按照表3进行修改。

根据A公司汽车空调系统生产线实际生产计划，设定有效工作时间仿真钟后，得到该生产线模拟运行数据结果，见表4。

将优化前和优化后仿真数据整理对比见表5。

结合上述数据可以看出：优化前各工位的平均利用率只有58.98%，平均空闲率较高，达到24%；优化后各工位的平均利用率得到很大提升，达到89.52%，平

表3 优化后生产线工位加工时间

工位号	工位名	人员数	总工时/s	平均工 时/s
PWS1	运动机构预装配	1	78	78
WS1	分布式壳体运动机构装 配	1	87	87
WS2	左侧壳体及风门装配	1	91	91
WS3	右侧壳体及风门装配	1	85	85
PWS2	暖风和热泵预装配	1	74	74
WS4	暖风热泵盖板及电动机 装配	1	94	94
WS5	自动打钉及右电动机装 配	1	62	62
WS6	线束装配	1	94	94
WS7	分布式壳体新回风壳体 及蒸发器壳体装配	1	91	91
PWS3	新回风预装配	1	96	96
PWS4	蒸发器壳体预装配	1	98	98
WS8	管路, 支架, 后风道线束 等装配	1	100	100
PWS5	后出风模块预装配	1	116	116
WS9	密封条、防火墙装配	1	93	93
WS10	空调总成功能检测	1	100	100
WS11	目检及装箱	1	90	90

表4 生产线优化后模型的仿真结果 (单位: %)

工位号	工位名	空闲率	加工率	阻塞率
WS1	分布式壳体运动机构装 配	0.089	86.896	13.015
WS2	左侧壳体及风门装配	0.175	90.800	9.024
WS3	右侧壳体及风门装配	0.266	84.729	15.005
WS4	暖风热泵盖板及电动 机装配	0.085	93.887	6.028
WS5	自动打钉及右电动机 装配	0.242	61.864	37.894
WS6	线束装配	0.240	93.700	6.060
WS7	分布式壳体新回风壳 体及蒸发器壳体装配	0.334	90.619	9.047
WS8	管路, 支架, 后风道 线束等装配	0.11	99.88	0.01
WS9	密封条、防火墙装配	0.13	92.89	6.98
WS10	空调总成功能检测	0.22	99.78	0
WS11	目检及装箱	10.28	89.71	0

表5 优化前后仿真数据对比 (单位: %)

	改造前	改造后
平均空闲率	24.00	1.11
平均加工率	58.98	89.52

均空闲率降低到1.1%。

基于上述数据分析, A公司汽车空调系统生产线采用工位和流程优化方案进行系统改造, 汽车空调生产线上总工时由1276s缩短至987s, 每天产量由163台增加到310台。该生产线合理地实现了各工序间人员的调度, 闲置时间大大减少, 产量大幅提升。

结语

本文针对A公司汽车空调系统生产线实际流程特点, 应用Flexsim三维仿真软件建立模型并进行系统仿真计算, 并结合生产线平衡率计算结果, 找到制约生产的关键瓶颈工序, 制定相应优化方案并进行验证。对该汽车空调系统生产线实施改进后, 生产线平衡率和生产产能得到大幅提升。

参考文献

[1] 李扬, 丁顺玉, 何月杰, 等. 基于仿真的装配生产线布局设计与优化[J]. 制造技术与机床, 2021 (1): 51-54.

[2] 石宇强. 基于达宝易与Flexsim的生产线优化研究[J]. 机械设计与制造, 2011 (2): 130-132.

[3] 王姗姗, 吴保国, 钱建平, 等. 基于Flexsim的小麦粉生产过程仿真与优化[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35 (5): 161-166.

[4] 石菁菁. 基于Tecnomatix的燃气轮机生产数字化双胞胎实践[J]. 热能动力工程, 2016, 31 (12): 116-119.

[5] 金辉, 张晓丹, 马莉, 等. 生产线平衡与优化研究[J]. 新课程(下), 2015 (7).

[6] 杨静. 基于焊装生产线节拍平衡的布局优化研究[D]. 天津大学, 2014.

[7] 田磊, 王婕. VR眼镜后组装生产线流程优化研究[J]. 制造技术与机床, 2020 (3): 139-144.

[8] 刘薇娜, 李俊烨. 工程系统建模与仿真[M]. 兵器工业出版社, 2009.

[9] 曾鸣, 程文明, 曾刚. 铁路货场仓储作业过程仿真与优化[J]. 工业工程, 2014 (3): 121-127.