

[经营·管理]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.023

灌装包装生产线效率评估系统的设计

冯消冰¹, 刘文龙², 袁朝龙¹

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 北京泰清科技有限公司, 北京 100086)

摘要:针对国内一部分食品企业灌装包装生产线难以量化生产线效率的现状,提出了一套切实有效的生产线效率评估系统。通过评估设备速度V-曲线,以现代信息化技术为基础,提取出关键设备的停机记录,其中包含了停机的起始时间、终止时间、时长、分类、机台和原因等几大关键项内容,然后对内外部因素造成的各类时间损失进行准确量化评估,从而构建以总资产利用率、线毛产出率、设备综合利用率和线效率4项指标为衡量标准的一套生产线效率评估系统。本系统实现了灌装包装生产线数字化过程,整体透视出企业的综合管理能力、部门之间的协调配合能力、设备运行能力和故障处理能力。基于此数字化效率评估系统,可以分析停机成因,识别出影响生产线效率的核心要素,通过针对性的优化手段,达到提高效率的目的,实现降低成本和提高利润的业务目标。

关键词:包装生产线;数字化过程;智能制造;量化评估;生产线效率

中图分类号:TP274

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)03-0097-06

Intelligent Evaluation System of Filling Packaging Production Line's Efficiency

FENG Xiaobing¹, LIU Wenlong², YUAN Chaolong¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Tai Tsing Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: Intelligent evaluation system of production line's efficiency was brought up based on investigation of current internal packaging production line. First, through assessing V-curve of critical machines, machines' downtime records were generated in evaluation system on the basis of modern information technology, which included start time, end time, duration, failure categories, failure machines, and failure reasons in this system. And then, four standardized KPIs of production line's efficiency namely Overall Asset Efficiency (OAE), Gross Line Efficiency (GLY), Overall Equipment Efficiency (OEE), and Line Efficiency (LEF) could be evaluated accurately by clustering all kinds of failure categories above into different time lose. This intelligent system made packaging factories more digital, and showed detailed capability of enterprise's management, cooperation between different departments, equipment operation ability and ability to deal with failure, and further to improve efficiency and revenue by identifying key failure reasons.

Key words: packaging production line; digital process; intelligent manufacturing; quantitative evaluation; line efficiency

灌装包装生产线一般由卸垛机、洗瓶机、空瓶检验机、灌酒机、满瓶检验机、杀菌机、贴标机、装箱机、封箱机、码垛机等组成。目前我国灌装生产行业发展很快,设备制造业提高了很多,技术水平也提升不少,但是灌装包装生产线上故障率依然比较高,而且由外部原因导致的各类停机也比较多,经常因为物流部、公共事业

部、酿造部等其他原因造成生产线停机,关键的是大部分包装企业没有形成一个统一有效的生产线效率评估系统,很难去量化估计目前生产线和企业究竟有什么样的问题^[1]。另外,企业包装生产线管理方面也存在一定的不足:分厂车间之间没有统一的控制系统,对生产造成一定的浪费;生产车间包装线现场与管理人

收稿日期:2015-12-04;修回日期:2016-02-10

作者简介:冯消冰(1981),男,内蒙古呼和浩特人,清华大学机械工程系博士,高级工程师,主要从事机电与复合材料结构方面的研究,获得市级科技进步奖3项,省部级科技进步奖1项。E-mail:fxb15@mails.tsinghua.edu.cn

员信息交互存在及时性与准确性方面欠缺的问题,进而影响生产效率。为了解决包装线信息管理的瓶颈和生产线效率评估的问题,并为生产决策提供依据,建立线效率评估势必所趋^[2]。一般来说,生产线效率评估系统是人员、过程、数据库和设备有组织的集合,是加快完成管理者与执行者之间信息交换的一种方法,可为管理人员和决策者提供生产线日常信息,其目标是要在建立的计算机信息系统平台上把原有的管理模式和生产信息进行整合和完善^[3-4]。本文所描述的灌装包装线效率评估系统主要目的在于对企业生产线效率进行有效评估设立,同时对生产计划与执行情况进行动态管理,用户通过访问该系统快速发现生产问题和设备停机故障等原因以做出诊断。

1 生产线效率评估方法

1.1 生产线影响时间类别划分

中小型灌装包装生产线在生产过程中会遇到各种因素导致的时间损失,影响程度各不相同,导致的停机时长也会有所不同,基于日常停机原因和停机时长,归纳了几类停机时间,可以参照图1时间类别划分。

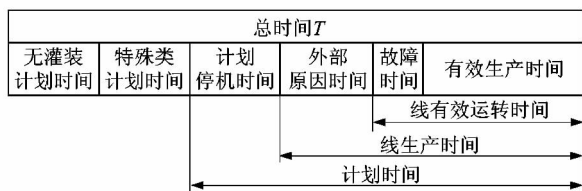


图1 时间类别划分图

Figure 1 Time classification's distribution

无灌装计划时间是因无订单、节假日等原因,生产管理部门要求灌装部门停产的时间,此时间段内,生产线上没有任何生产活动。特殊类计划时间包括一些新项目、新材料的测试时间,和其他特别规定的停机时间,比如活动什么的。计划停机时间是管理部门所安排的一些例行时间,比如大修,预防性维护,工艺清洗,泡沫清洗,交接班清洁,就餐,培训,换线,停机启动时间等。外部原因时间是由于其他部门(非灌装部门)的原因,如停水停电,酿造部酒液不到位、采购部包装材料不够、物流部仓库没位置和原料不足等原因导致的灌装停机的时间。故障时间包含机械故障,电气故障,自动化控制故障,仪表故障,操作工误操作故障等时间。有效生产时间是抛除以上各类停机造成的时间损失以外,正常进行生产的时间就是有效生产时间。也可以用入库产量除以额定速度来计算有效生产时间^[5]。

1.2 效率评估方式

包装生产线有4种KPI指标来评价整个企业管理程度以及生产效率。总资产利用率是体现资产充分利用的评价指标,保持其在合理区间,可以避免超负荷运转,也要避免资源过分浪费。线毛产出率包含生产过程中造成停机的所有时间,是工厂生产管理层的线效率指标,用来评价工厂生产组织系统综合管理能力。总设备利用率是去除了计划停机时间,如预防性维修和各种清洗以及品种转换时间,综合体现了生产跨部门之间的协调水平,一般用来评价灌装总车间综合管理能力。线效率是排除所有外部原因停机时间,设备在除去外部因素情况下运转,此指标用来衡量灌装生产线和设备维护部门的管理水平^[6]。表1所示为生产线效率指标计算。

表1 生产线效率指标计算

Table 1 Calculation of production line's efficiency

评价指标	计算方法
总资产利用率	有效生产时间 × 100% / 总时间
线毛产出率	有效生产时间 × 100% / (总时间 - 无灌装计划时间 - 特殊类计划时间)
总设备利用率	有效生产时间 × 100% / (总时间 - 无灌装计划时间 - 特殊类计划时间 - 计划停机时间)
线效率	有效生产时间 × 100% / (总时间 - 无灌装计划时间 - 特殊类计划时间 - 计划停机时间 - 外部原因时间)

2 效率评估系统设计

从设计原理,实施方案和输出结果3方面展开论述。设计原理部分描述了构建总资产利用率、线毛产出率、总设备利用率和线效率的构建过程;实施方案部分主要从效率评估系统的布局拓扑图、层次结构和组成模块详细阐述系统布局;输出结果部分将具体呈现设计好的系统、包括效率评估系统设备运行状态图、故障停机记录图、生产线效率效果图和故障分布统计。

2.1 系统设计原理

首先基于生产线设备速度测评结果,构建速度V-曲线图,通过速度V-曲线图可以锁定影响生产线效率的关键设备。通常,生产线的设计是围绕着一个关键的机器设计的,在生产线上它是一个速度最慢且最昂贵的机器,这个关键设备通常指灌装机,灌装线性能主要是由这台机器衡量的,它运行,生产线就运行,它运行慢,生产线就慢,所有的设备都应该比关键设备运行得快,绘制这些速度值产生的曲线叫做速度V-曲线^[7]。图2所示为速度V-曲线分布情况。

理论上在关键设备的下游,速度呈现递增趋势,避免上游对下游造成累积发生故障。需要在此基础上,

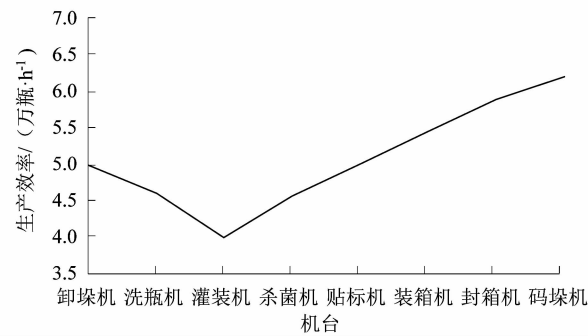


图2 速度V-曲线示意图

Figure 2 V-Curve speed's diagram

设计关键设备的停机相关数据格式,包含班次、日期、起始时间、终止时间、持续时长、停机分类、故障机台和故障类型信息^[8],具体的设计参见表2 停机数据设计。这些信息的获取将直接反映企业的综合管理能力、部门之间的协调配合能力、设备运行能力和故障处理能力。

表2 停机数据设计

Table 2 Data design of machine's stoppage

数据项目	数据示例
班次	E1
日期	2015/01/13
起始时刻	13:29:00
终止时刻	13:33:00
持续时长	4 min
停机分类	Mechanical-机械
故障机台	Labeler-贴标机
故障类型	酒机后 FBI 卡碎瓶

在设计完停机数据之后,通过部署评估系统,实现对停机记录数据的获取,然后按照第2节描述的时间划分规则对停机分类做归类处理。可以按照不同时间周期天、周或者月计算出无灌装计划时间、特殊类计划时间、计划停机时间、外部原因停机和故障时间的具体时间分布。表3所示为汇聚了某天各类时间的分布情况,并且把时间种类对应了停机分类,汇聚方法只要简单累积就可以实现。

表3 停机分类汇聚

Table 3 Downtime category's cluster

时间种类	停机分类	汇聚时长/min
时长	总时间	1 440
无灌装计划时间	法定假,无订单	0
特殊类计划时间	新材料测试,项目测试停机,活动停机	30
计划停机时间	大修,预防性维修,泡沫清洗,交接班 清洁,就餐,班组会,启动停机	423
外部原因时间	酿造部,公用工程,物流部,采购部等	159
故障时间	机械,电气,自控,仪表	72

按照1.2节效率评估方式,进行生产线指标总资产利用率、线毛产出率、总设备利用率和线效率的计算,可以计算出相关的效率结果。表4是针对时间种类所对应的汇聚时长数据做出来的分析结果。可以看出线效率比较好,说明该包装生产企业故障处理能力较强。但是线毛产出率相对偏低,表明计划停机时间和常规性的维护清洗交接班等占用了较大一部分时间,为了提升线毛生产线,可以考虑如何优化这一部分时间。

表4 生产线效率评估结果

Table 4 Evaluation example of production

line's efficiency			%
总资产 利用率 O_{AE}	线毛 产出率 G_{LY}	总设备 利用率 O_{EE}	线效率 L_{EF}
52.49	53.61	76.58	91.30

2.2 系统实施方案

从实际布局拓扑图、层次结构和功能模块3方面展开论述。

如图3所示,布局拓扑图描述了如何在灌装包装生产线上布局效率评估系统,中间会涉及到哪些设备和技术,以及输入和输出分别是什么。为了获取停机记录数据,需要对主要设备安装PLC控制器、数据采集器和串口速度表。因为采用了带串口的速度表,设备的速度可以直接由数据采集器经过串口将实时数据采集,通过局域网网络线将采集到的数据传送到服务器中;对于设备开关信号、计数感应和运行时长这些信息,需要通过带有光电开关和光电编码器的PLC控制台来传递,再经过数据采集器通过局域网网络线将数据传送到服务器中^[9]。

在车间现场或办公室可以安装液晶电子看板,即时显示每台设备的运行状态、停机记录、累积运行时长等相关信息。在办公室任何地点或移动电脑中也可以随时经过评估系统对包装生产线的即时工作情况和历史数据进行统计分析和查询追溯。

在拓扑网络的基础上,可以进一步将该效率评估系统设计为4层体系结构,如图4所示,分别为数据采集层、实时监控管理层、停机与性能层和用户界面层。数据采集层通过连接生产设备的电气系统或控制系统,对设备运行实时数据进行自动采集记录,包括设备参数(如速度、产品数量、时间等)、停机记录、故障状态等信息^[10-11]。对于复杂程度较高的设备,造成停机可能有多种因素,对各种会导致停机、低速运行、空转暂停等状态的原因进行逻辑判断定义及代码定义,以

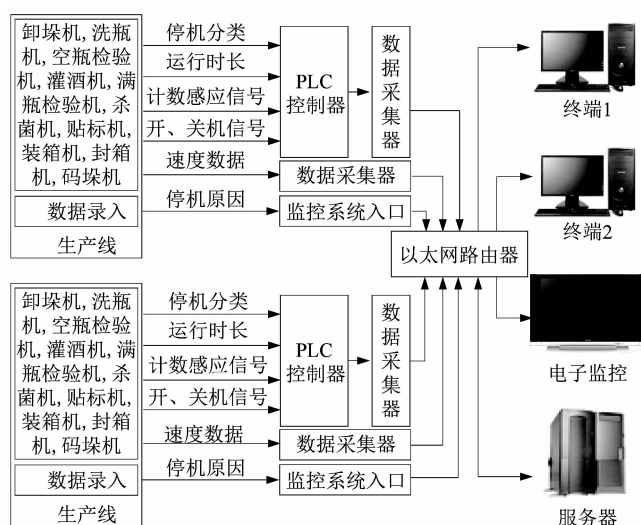


图3 包装生产线布局拓扑图

Figure 3 Distribution's topological diagram of packaging production line

方便管控系统自动对采集上来的数据进行分类记录。实时监控管理层的作用是实时、有效地监控所有生产设备的运行情况,并在软件平台上动态反映生产线信息。实时监控管理层功能:为生产设备维护人员及时提供报警信息;记录停机设备、停机时间和停机代码等信息,以作为系统统计分析的依据;为管理决策提供各种管理报表。停机与能效分析层为该系统最大的特点,该层着重研究分析设备与整线的效率^[12-13],内嵌了设备综合效率和整线综合效率的计算,其中涉及到设备效率的6大损失,有助于企业发现问题,诊断停机故障原因,减少损失,从而有效提升整个生产系统的效率。用户界面层实现用户与系统的交互,系统向用户传递生产线实时状态、效率分析结果、停机情况等信息,用户通过系统对生产线实现有效管理^[14]。

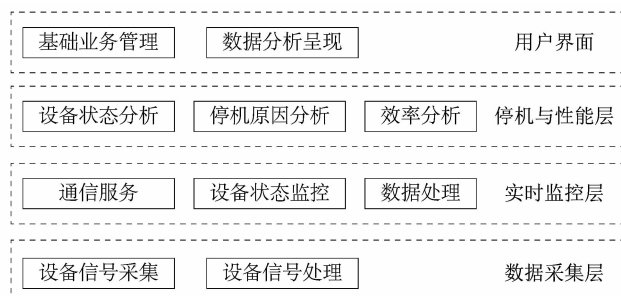


图4 包装生产线层次结构图

Figure 4 Hierarchy of packaging production line

根据相关业务流程及对效率评估系统的拓扑布局和层次设计,可以将系统进一步划分出来两大功能模

块:基础业务管理和数据分析展现。如图5所示,图中基础业务管理模块包括工厂建模和生产数据管理2部分,首先对系统进行工厂建模,然后定义与维护系统中所使用的各种数据,并对生产数据进行维护管理,作为统计分析的基础数据。数据分析展现模块是对底层采集以及人工录入的数据进行综合分析及展示,包括整线综合展现和单机综合展现等。在这部分,用户可根据具体情况选择相应的统计方式。

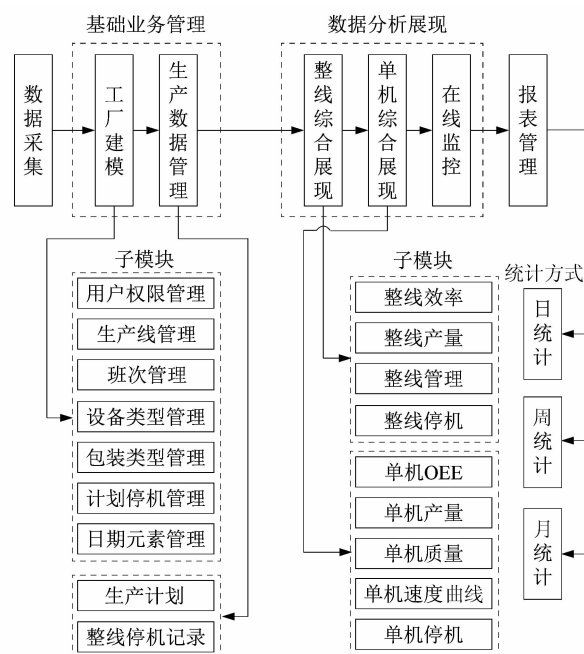


图5 生产线效率评估系统模块

Figure 5 System module of production line

在工厂建模模块里面,用户权限管理是系统用户账号的发放与管理,配置用户权限。生产线管理是创建“工厂—车间—生产线”作为系统的工厂原型,用户可在生产线上按需配置设备。班次管理:配置生产线排班情况。设备类型管理是建立设备模型库,应用于生产线设备配置,按照设备型号建立设备异常原因库。包装形式管理是建立工厂最终成品的包装形式,应用于生产计划、数据统计。产品类型管理是建立工厂产品类型库,应用于生产计划。计划停机类型管理是建立工厂计划停机类型库,应用于生产计划、数据统计。日期元素管理是对系统中日期元素(周、月)开始日期、结束日期进行自定义,用于各类数据的统计。

在生产数据管理中,生产计划应用于OEE、效率分析,包括计划录入及调整和计划导入2部分。整线停机记录是记录一个时期内整线停机信息,包括停机录入和停机信息显示。

整线综合展现模块用于对整条生产线的运行状况进行综合分析。系统对整线 LEF、整线产量、整线质量、整线停机等信息进行统计分析。其中整线 LEF 的统计结果包括整条生产线的综合效率、可用率、表现性和质量指数;整线质量统计显示整条生产线不合格品数量;整线停机信息包括停机时长、停机次数、停机原因等。用户可通过日统计、周统计、月统计的查询方式,结合班次、生产线、时间等条件对以上信息进行查询。

单机综合展现模块用于对生产线上单个设备的运行状况进行综合分析。系统对单机 OEE、单机产量、单机质量、单机停机等信息进行统计分析。其中单机 OEE 的统计结果包括设备综合效率、可用率、表现性和质量指数;单机质量统计显示该设备不合格品数量;单机速度曲线显示设备运行速度;单机停机信息包括停机时长、停机次数、停机原因等。用户可通过日统计、周统计、月统计的查询方式,结合班次、生产线、设备、时间等条件对以上信息进行查询。

2.3 系统输出结果

经过原理阐述和相关的系统设计,设计出包装生产线效率评估系统,下面将描述评估系统设备运行状态监控,设备故障输出,生产线效率评估 4 项内容结果呈现。用户通过浏览器对系统进行访问,系统对访问人员进行权限设置,不同人员访问不同内容,实现分级管理。系统界面上功能模块的划分一目了然,用户通过点击导航栏的功能分类链接,可直接在主页进行相应的基础业务的编辑以及数据统计的展现^[15]。

在设备运行中,一旦出现停机情况,可以很快的识别出是哪个机台出现问题,定位停机机台,此设备运行状态监控可以帮助快速修复问题,进而缩短停机时间,实现提高生产线效率的目的。图 6 所示为包装生产线效率评估系统,左边部分代表了设备装备,右边表示生产线效率,累积状态和停机记录。

通过点击历史停机记录按钮,我们可以获取到历史停机信息,可以按照不同的方式进行搜索,也可以按照日期阶段来查阅停机记录。图 7 展示了一部分停机数据。

在包装生产线首页输出了生产线总资产利用率、线毛产出率、设备综合利用率和线效率 4 项趋势图,也可以直接进入系统内容调取所有历史生产线效率分析结果。图 8 所示为 2015 年 1 月 1 日—2015 年 1 月 23 日的各项生产线效率数据。

基于停机记录,也可以按照停机机台进行汇总统



图 6 包装生产线效率评估系统

Figure 6 Evaluation system of packaging production line's efficiency

Shift	班别	Date	日期	Start	结束	止	Duration	downtime	Category	停机分类	Failures	故障原因
13	E1	2015-01-03	18:00:00	18:03:00	3:000				Logistics 物流部			
14	E1	2015-01-03	18:12:00	18:13:00	1:000				Quality 质量 (内部)			
15	E1	2015-01-03	18:25:00	18:26:00	1:000				Mechanical 机械			
16	E1	2015-01-03	18:45:00	18:46:00	1:000				Mechanical 机械			
17	E2	2015-01-03	19:27:00	19:35:00	8:000				Logistics 物流部			
18	E2	2015-01-03	19:42:00	19:51:00	9:000				Logistics 物流部			
19	E2	2015-01-03	19:51:00	20:00:00	9:000				Mechanical 机械			
20	E2	2015-01-03	20:00:00	20:07:00	7:000				Quality 质量 (外部)			
21	E2	2015-01-03	19:00:00	19:16:00	16:000				Foaming 泡沫漏光			
22	E2	2015-01-03	19:40:00	19:42:00	2:000				Logistics 物流部			
23	E2	2015-01-03	20:21:00	20:22:00	1:000				Mechanical 机械			
24	E2	2015-01-03	21:14:00	21:16:00	2:000				Mechanical 机械			
25	E2	2015-01-03	21:32:00	21:34:00	2:000				Mechanical 机械			
26	E2	2015-01-03	22:39:00	22:41:00	2:000				Logistics 物流部			
27	E2	2015-01-03	22:42:00	22:45:00	3:000				Mechanical 机械			
28	E2	2015-01-03	23:04:59	23:07:00	2:000				Logistics 物流部			
29	E2	2015-01-03	23:14:00	23:16:00	2:000				Electrical 电气			
30	E2	2015-01-03	23:22:00	23:24:00	2:000				Logistics 物流部			
31	E2	2015-01-03	23:31:00	23:34:00	3:000				Logistics 物流部			
32	E2	2015-01-03	23:40:00	23:42:00	2:000				Electrical 电气			

图 7 包装生产线停机记录

Figure 7 Stoppage records of packaging production line

	日期	总资产利用率	线产出率	总设备利用率	线效率
1	2015/1/1	0.477	0.726	0.833	0.909
2	2015/1/2	0.643	0.643	0.851	0.900
3	2015/1/3	0.728	0.728	0.765	0.822
4	2015/1/4	0.582	0.582	0.769	0.862
5	2015/1/5	0.728	0.728	0.757	0.880
6	2015/1/6	0.264	0.704	0.818	0.899
7	2015/1/9	0.636	0.636	0.776	0.882
8	2015/1/10	0.599	0.599	0.754	0.858
9	2015/1/11	0.643	0.643	0.729	0.880
10	2015/1/12	0.744	0.744	0.776	0.888
11	2015/1/13	0.720	0.720	0.750	0.864
12	2015/1/14	0.781	0.781	0.805	0.883
13	2015/1/15	0.663	0.663	0.872	0.921
14	2015/1/16	0.281	0.675	0.767	0.884
15	2015/1/18	0.534	0.657	0.803	0.834
16	2015/1/19	0.674	0.674	0.764	0.784
17	2015/1/20	0.582	0.582	0.680	0.757
18	2015/1/21	0.556	0.556	0.735	0.840
19	2015/1/22	0.802	0.802	0.827	0.893
20	2015/1/23	0.618	0.795	0.886	0.919

图 8 包装生产线效率 KPI

Figure 8 KPI of packaging production line's efficiency

计,可以清楚地了解到哪些个机台会导致关键设备的停机,图 9 显示了灌酒机的上游光检机和下游的贴标机对关键设备影响较大,故应该考虑优化空瓶检验机和贴标机的效率问题。

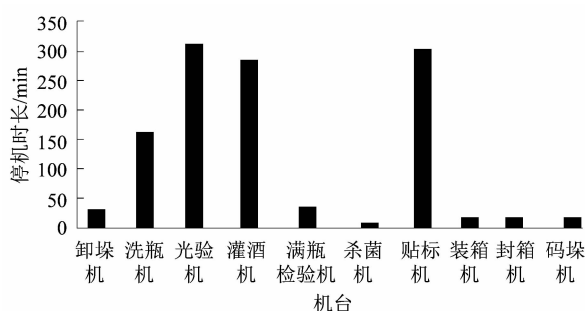


图9 故障机台停机成因分析
Figure 9 Failure machine's effective analysis to critical machine

3 结语

通过以上对包装生产线效率评估系统的设计,可以通过系统直观地洞察到企业生产过程中所发生的事情,也量化了生产线到底如何,从多方面综合评价效率指标。量化生产线总资产利用率、线毛产出率、设备综合利用率和线效率4项指标对于企业来讲有非常重要的意义。对于企业经济效益的评估,一条40 000瓶/h的生产线,每提高1%的效率,每年大约能多创造136万元纯利润。

包装工业技术的未来是信息化、高效化、绿色化和人性化的,网络信息技术的发展推动着传统啤酒工业管理模式创新与发展。该信息管理系统重点关注了设备与整线的效率分析,实现了包装生产工厂管理层对啤酒包装线的规范化管理,用户通过该系统可实现班次、用户权限等基础业务的管理,还可通过在线监控、数据统计分析展现等功能快速发现问题,减少生产线损失,提高产量和效率,并从整体上提升企业竞争力。

参考文献:

- [1] 孙照广,高发彬,刘锐.中国啤酒业装备制造使用现状和发展前景[J].酿酒,2009,36(1):30-32.

- [2] 毕钰珺.基于无线终端的车间生产信息管理系统设计[J].机械制造与自动化,2014,43(2):128-131.
- [3] 袁浩,白瑞峰,房朝晖,等.模拟啤酒生产线可视化中央监控系统设计与实现[J].实验技术与管理,2014,31(9):120-123.
- [4] 訾波.企业信息管理系统需求分析流程研究[J].煤炭技术,2011,30(8):281-282.
- [5] 唐颖,王冠,金哲堡.提高啤酒灌装线效率的研究[J].啤酒技术研究,2008(7):31-34.
- [6] 姚健建.基于多种管理模式协同提高啤酒灌装线效率的研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [7] 吴鑫森.基于OEE的设备管理系统的研究与开发[D].南昌:南昌大学,2013.
- [8] 李洋.OEE理论在生产线管理系统中的应用研究[J].经管视线,2010(7):54-55.
- [9] 张义军,张明跃.啤酒灌装生产线PLC控制设计[J].企业技术开发,2013,32(13):48-54.
- [10] YANG Guofan, CHEN Shuang, PANG Yi. Study on irrigation information management system based on the combination of C/S and B/S model[C].\Proceeding of the 2010 Second World Congress on Software Engineering, Washington: IEEE Computer Society, 2010: 101-104.
- [11] 孙莉,李树刚,陶莹,等.基于B/S模式的质量信息管理系统设计与实现[J].上海交通大学学报,2010,44(增刊1):175-177.
- [12] MUCHIRI P, PINTELON L. Performance measurement using overall equipment effectiveness: literature review and practical application discussion[J]. International journal of production research, 2008, 46(13):3517-3521.
- [13] MUTHIAH K M N, HUANG S H. Overall throughput effectiveness (OTE) metric for factory-level performance monitoring and bottleneck detection[J]. International journal of production research, 2007, 45(20):4755-4763.
- [14] MUNSON J. How to structure a battery management system; many factors must be considered in a battery management system circuit, especially packaging constraints[J]. Electronic products, 2011, 53(8):375-384.
- [15] LIU Yongxiang. Study of the interaction design of man-machine interface based on product usability[J]. Packaging engineering, 2008, 29(4):81-83.

[信息·简讯]

· 产品介绍 ·

英飞凌推出1 200 V碳化硅 MOSFET 技术

2016年5月10日,英飞凌科技股份有限公司推出革命性的碳化硅(SiC) MOSFET 技术,使产品设计可以在功率密度和性能上得到较大提高。英飞凌 CoolSiC™ MOSFET 具备更大的灵活性,可提高效率和频率。它们将有助于电源转换方案开发人员实现节省空间、减轻重量、降低散热的要求,并提高可靠性和降低系统成本。

SiC MOSFET 带来的影响非常显著。电源转换方案的开关频率可达到目前所用开关频率的3倍或以上。这能带来诸多益处,如减少磁性元件和系统外壳所用的铜和铝2种材料的用量,便于打造更小、更轻的系统,且更便于安装。

全新1 200 V SiC MOSFET 经过优化,兼具可靠性与性能优势,它们在动态损耗方面相比1 200 V 硅(Si) IGBT 低了一个数量级。这最初可以支持光伏逆变器、不间断电源(UPS)或充电/储能系统等应用的系统改进,此后将其范围扩大到工业变频器。

(文 洁)