

文章编号:1005-0523(2015)04-0038-07

双离合变速器装配线的优化与仿真

周尔民,王贵用,张成冲

(华东交通大学机电工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:基于Flexsim仿真软件对格特拉克公司的双离合变速器装配线进行优化改造。首先,建立该装配线的初始模型,通过运行初始模型,输出统计结果。从初始模型的结果中发现装配线存在一些问题,包括产能不能达到要求、设备和人员的利用率不够充分、装配线存在堵塞和不平衡等。针对这些问题,提出对于装配线在布局、工序、设备、工艺和人员等几方面的可行性改善方案。通过对不同投产顺序的混流生产方式建立模型、仿真并得到最优投产顺序。建立改善后的仿真模型、运行并输出改善后的统计结果。最后通过比较优化前、后的统计数据,计算优化后的线平衡率,可以发现,使用Flexsim可以对生产线进行改善,从而减少成本,缩短工期,能够较快实现对生产线的优化,按时完成客户的订单,使企业获得更多的效益。

关键词:装配线;双离合变速器;Flexsim软件;优化与仿真

中图分类号:U463.2

文献标志码:A

双离合变速器(dual clutch transmission, DCT)是新型的变速器,目前发展比较迅速。和传统的手动变速器不同的是,它增加了电控组件和双离合器,因此具有较好的燃油经济性和良好的性能。简单地说,DCT将两个输入轴、两个传统的变速器、两个离合器集合在一起(分别是偶数挡和奇数挡),但是输出轴只有1根。DCT也可以提供手动换挡的模式,因为它通过电脑操作液压机构进行离合器的分离和接合工作的。DCT已经成为继可变气门正时、可变气门升程、涡轮增压和缸内直喷之后的又一个技术亮点,具有3大优势:成本低于传统自动变速箱、动力传递效率高(因此油耗低)和挡位切换迅速。变速器作为汽车的一部分,随着汽车产业的发展,其优化和改进越来越受到关注。钟自锋为了提高变速器齿轮轴的低阶固有频率,避免其发生共振,采用自适应模拟退火算法对齿轮轴的轴颈直径进行优化^[1]。

对于DCT装配线进行优化和改善是格特拉克公司在实际生产过程中着手建立的一个新项目,公司项目组用了1年多的时间才完成。DCT装配线产能过低是格特拉克公司实际生产中面临的一大问题,同时也是很多大中型企业流水化生产需要解决的一项难题。通过仿真建模、优化,除了可以提高公司的经济效益、保障员工生产过程中的安全性、降低流水线运行的费用、改善工人工作的环境,还可以提高流水线的产能,适应市场的变化,提高企业竞争力。

工厂/车间布局及生产节拍的控制对生产效率高低、资源利用率高低等有直接的影响,并直接影响到企业生产是否可顺利进行。由于生产系统的复杂程度高,运用传统的数学模型,很难进行车间方案的优化。Flexsim是可视化较强的3D模拟软件,是分析车间布局、工艺流程柔性和面向对象的离散事件仿真工具,是对生产工艺流程的准确性与生产效率进行仿真与分析的三维数字工厂环境。通过物理建模和逻辑建模将实际生产线映射到虚拟环境中,可以建立反映实际生产线几何和逻辑属性的虚拟仿真模型。

用计算机建模与仿真的技术,对生产系统进行评价和分析,发现瓶颈、找出改进措施,可有效避免人

收稿日期:2014-11-16

基金项目:江西省研究生创新基金项目(YC 2014-S260)

作者简介:周尔民(1962—),男,教授,硕士生导师,研究方向为工业工程、虚拟制造、CAD/CAM。

通讯作者:王贵用(1989—),男,硕士研究生,研究方向为工业工程、虚拟制造。

力、资金和资源的浪费^[2]。为了实现双离合变速器的虚拟仿真,文献[3]运用 DELMIA 创建某双离合变速传动机构的主要螺栓装配仿真过程;并且对装配仿真进行了碰撞干涉和甘特图分析;最后,利用 DELMIA 的数字化制造工艺与 DELMIA 工艺工程师的数据交换提前安排制造计划。郑顺水基于生产线仿真与优化技术,建立了应用对象、类库、仿真模型,进行了物流和生产调度仿真^[4]。贾晨辉等以生产系统缸盖加工生产线为例,建立了生产线仿真模型,优化该生产线的配置和布局^[5]。徐正等采用基于 Lightning 的虚拟现实技术对生产线进行了模拟仿真,有效加快了虚拟设备、工艺及控制的建模^[6]。门佳等运用 Witness 软件对某快速消费品企业的包装原材料仓库进行了仿真建模研究,降低了设计成本^[7]。Tahar R 等将仿真技术对汽车制造系统进行建模和分析,减少汽车的生产周期,提高生产的效益^[8]。周尔民等基于 Quest 仿真直观的得到各个工位库存量,结合相关企业生产线操作数据进行工厂设备优化,以仿真数据为依据找出变速器生产线中存在的瓶颈、物流运送不顺畅等问题,提出优化方案,最终实现生产工艺流程的可视化、精益化^[9]。由此可见,运用仿真技术模拟生产线的运行情况,找出制约生产线效率的瓶颈,优化性能,提高设备的效率和生产效率,对现代制造企业的生产和经营具有重要的意义。本文依托 Felxsim 仿真平台,对双离合变速器装配线进行建模,得到相关的数据,找出生产线瓶颈,提出了优化方案,优化投产顺序,有利于双离合变速器生产企业提高线平衡率,降低生产成本。

1 双离合变速器装配线引入

1.1 建立仿真模型

虽然 DCT 装配工艺过程比较复杂,但无论如何复杂,我们都可以把整个过程的工序分为主要工序和辅助工序。为了寻找到主要问题,对主要工序进行仿真建模。可以将装配过程分为 8 个主要工序:齿轮轴啮合、变速器合箱、装配 MAM、装配速度传感器和 TRS、导向管及离合器执行杆装配、激励装置和啮合组件装配、装配马达、双离合器压装。

格特拉克设计该条变速器装配线共生产 3 种类型的变速器,分别为变速器 1、变速器 2 和变速器 3,计划年产量依次为 30 000,20 000,10 000 台,假设 1 年的工作时间为 300 d,工人工作采用两班制,每班有半个小时的准备时间,不考虑改变产品时的切换时间,而且在每个工序所完成的产品都是合格的。根据各工序的加工时间约束,确定工序组合,利用生产线平衡理论,共划分为 8 个工作地,如图 1 所示。同时,分别用 A,B,C,D,E,F,G,H 表示,3 种产品在该装配线各个工序上的加工时间如表 1 所示。该装配线上有一个机械手,其工作所用时间相对固定,它的装载时间、卸载时间和移动时间分别为 5,4,13 s。在装配导向管及离合器执行杆时需要 1 名工人对变速器进行翻转,时间符合均值为 20 s、方差为 2 s 的正太分布。

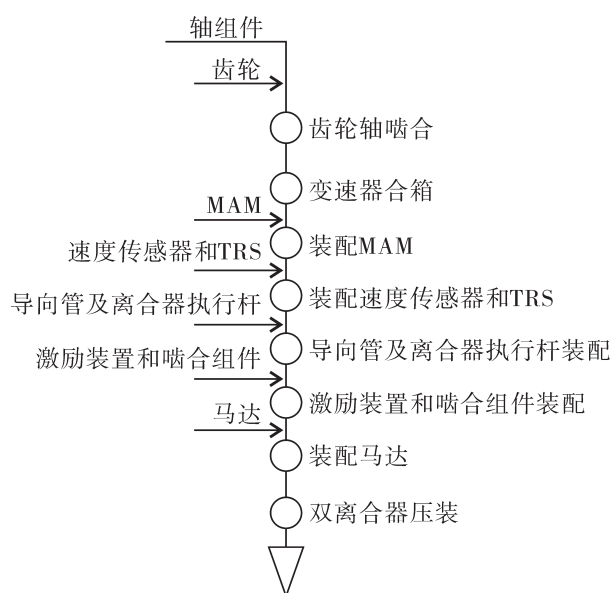


图1 变速器的装配工艺流程图

Fig.1 The assembly process of transmission

表 1 3 种产品在各个工序上的加工时间

产品	A	B	C	D	E	F	G	H
变速器 1	132	32	123	215	112	348	129	295
变速器 2	151	38	119	277	112	320	120	357
变速器 3	112	30	135	213	98	258	236	420

根据 Flexsim 的模块化设置,结合实际生产情况对生产系统中各个模块进行参数和属性设置,建立变速器装配线系统的仿真模型。装配线在 Flexsim 中所建立的模型图,如图 2 所示。

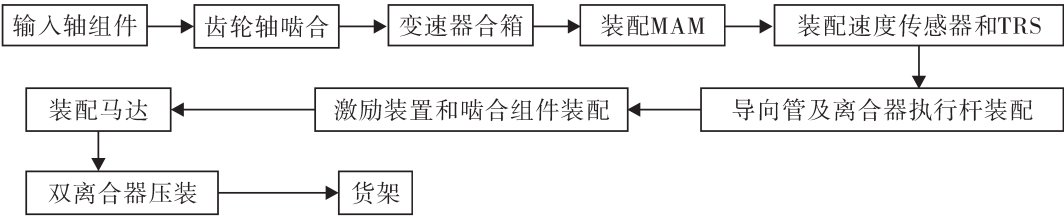


图2 装配线总装工艺段模型图
Fig.2 The model of the assembly line

1.2 仿真结果

Flexsim 提供 Excel 的接口,可以随时从 Excel 中进行数据导入和仿真结果的数据输出,反应模型中各个模块的实时运行状况。在运行 Flexsim 变速器装配线仿真模型时,可以通过 Flexsim 的窗口,实时观察仿真模型的运行情况,如图 3。同时,也可以得到各个时刻仿真模型的运行报告,如表 2 所示。

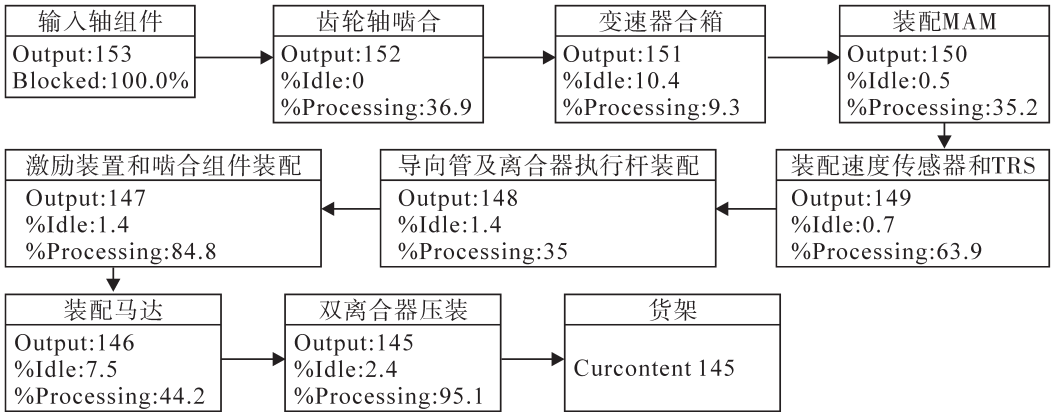


图3 仿真时间 1 d (54 000 s)时总装工艺段模型图
Fig.3 The model of assembly line running one day (54, 000 s)

表2 仿真时间 1 d (54 000 s)时总装工艺段仿真报告

Tab.2 The simulation report of assembly line running one day (54 000 s)

仿真实体	输入数 /件	输出数 /件	平均容量 /件	平均停留 时间 / s	空闲时间 百分比/%	工作时间 百分比/%	堵塞时间 百分比/%
A	153	152	1	354.22	0	36.9	63.1
B	152	151	0.895	319.52	10.4	9.3	80.3
C	151	150	0.995	357.163	0.5	35.2	64.3
D	150	149	0.993	358.929	0.7	63.9	35.4
E	149	148	0.986	358.609	1.4	35	63.6
F	148	147	0.986	361.003	1.4	84.8	13.7
G	147	146	0.925	341.027	7.5	44.2	48.3
H	146	145	0.976	362.459	2.4	95.1	2.5
机械手	152	152	0.048	17	90.2	9.8	0
运输机	145	145	0.029	10.928	94.5	5.5	0

表 2 的仿真报告数据反应了产品发生器共发出 3 种类型变速器待加工的产品 153 件,共交付了 145 件的 3 种类型变速器产成品(在该装配线中即是总装完成的汽车变速器)。当仿真时间为 1 d 的时候,3 种类型产品的产量是 145 件,还有 8 件在制品。

1.3 仿真结果分析

由图3和系统运行时间为1 d时的仿真报告,可以发现原有生产系统存在若干问题。

- 1) B工序的空闲时间百分比比较大,说明该工序存在较大的闲余能力。
- 2) 在随机运行的过程中,除了F和G工作时间百分比比较大以外,其他工序有大量的阻塞现象。
- 3) F和H工序比较忙,空闲时间较少,是“瓶颈”所在。
- 4) 装配线的投产顺序未必是最优的,造成机器的空闲时间和超载时间较多。

按照这样的生产方式,无法按时完成生产计划所需的产量。为了解决这些问题,需要对原来的双离合变速器装配线进行改善。首先,需要对“瓶颈”工序进行优化,减少其他工序的阻塞现象,其次,可以优化投产顺序,开发机器闲余能力和减少机器超载的现象,除此之外,为了按时完成订单,减少延期成本,必须提高原有装配线的产能。

2 瓶颈工序优化

2.1 优化方案

对于上面这些问题,提出如下优化方案。通过仿真动画和仿真报告可以看出,该装配线运行时的主要瓶颈工序是:激励装置和啮合组件装配工序以及双离合器压装工序。因此可以再增加一个激励装置和啮合组件装配工位和一个离合器压装工位,如图4所示。

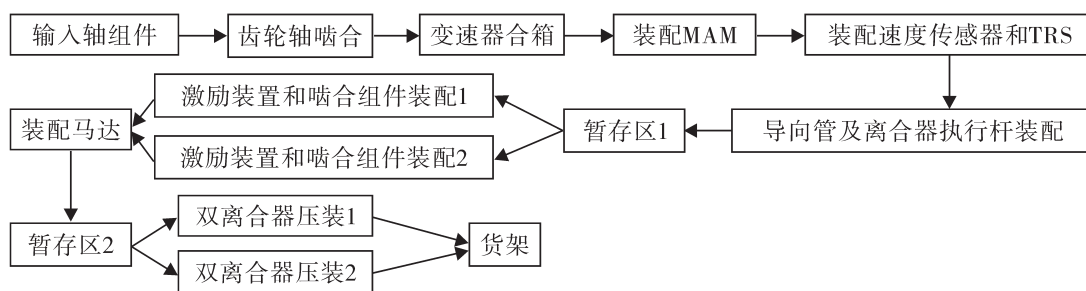


图4 优化方案模型图

Fig.4 The model of optimization scheme

2.2 优化方案结果及分析

根据方案的设想建立仿真模型,并输出方案的仿真结果,如图5所示,可以得到如下仿真报告,如表3。

表3 运行时间为1 d(54 000 s)的标准仿真报告

Tab.3 The simulation report of optimization scheme running one day (54 000 s)

仿真实体	输入数 /件	输出数 /件	平均容量 /件	平均停留 时间/s	空闲时间 百分比/%	工作时间 百分比/%	堵塞时间 百分比/%
A	232	231	1	233.831	0	56.5	43.5
B	231	230	0.845	198.504	15.5	14.2	70.2
C	230	229	0.995	234.707	0.5	53.2	46.3
D	229	228	0.993	235.325	0.7	99.3	0
E	228	227	0.536	127.512	46.4	53.6	0
F1	106	105	0.616	316.512	38.4	60.7	0.9
F2	121	121	0.705	314.79	29.5	69.4	1.2
G	226	225	0.663	159.249	33.7	66.3	0
H1	113	112	0.754	362.8	24.6	73.5	1.9
H2	112	112	0.76	365.984	24	74	2
机械手	231	231	0.073	17	85	15	0
运输机	224	224	0.046	10.982	91.5	8.5	0

由表3数据得到,产品发生器共发出232件原产品,交付了224件成品。

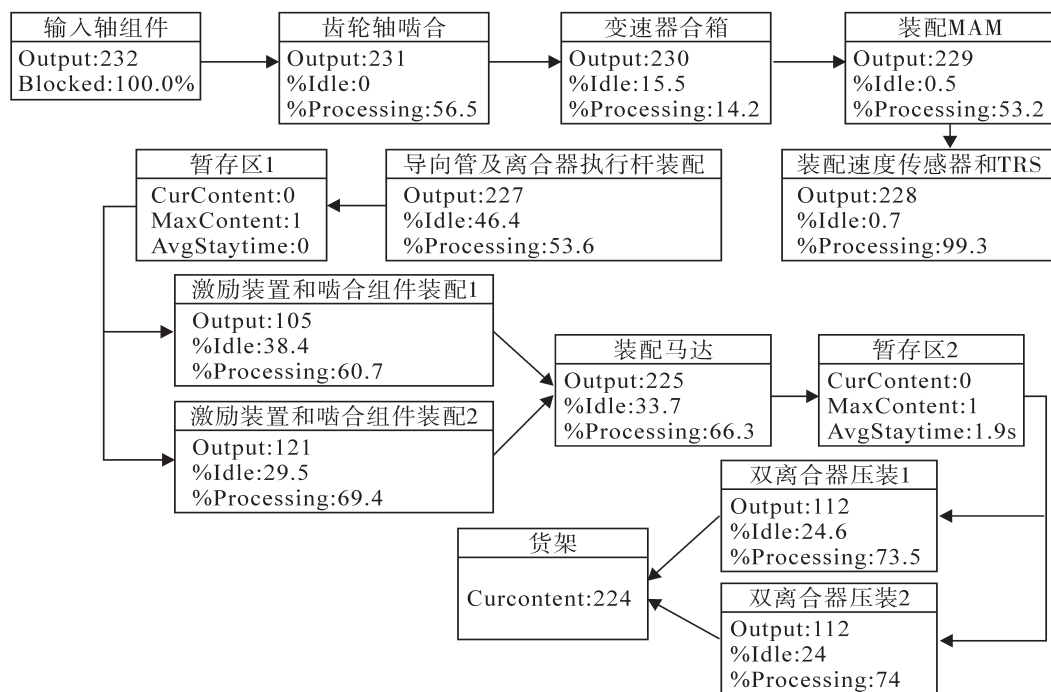


图5 运行时间为1d时优化方案的模型图

Fig.5 The model of optimization scheme after running one day (54, 000 s)

可见产能比之前有了很大提高,改善前每天可以产出 145 件,瓶颈工序优化后每天可以产出 224 件,产能比之前提高了 54.48%,即

$$\frac{224 - 145}{145} \times 100\% = 54.48\%$$

能够满足生产要求,且堵塞情况相对较少。

通过比较改善前后模型的运行情况、状态图和仿真报告,可以得出如下结论:

- 1) 对于“瓶颈”工序的优化改善,可以在很大程度上使装配线运行更加顺畅,减少整条装配线的生产节拍,从而提高装配线的产能,缩短生产时间,减少延期风险和成本。
- 2) 通过减少“瓶颈”工序的加工时间和开发闲余能力较大的工序时间,协调了各工序的生产效率,提高了装配线整体的运行效率。

3 混流投产顺序优化

3.1 模型调整

因为装配线采用混流生产方式,所以投产顺序采用最小装配单元排序法。其思路是:对于 1 条生产 M 种产品的生产线,假设 1 个周期内各种产品的产量分别是 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_M$, 将他们同时除以 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_M$ 的最大公约数,得到 1 个循环流程内各种产品的生产数量,假设为 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_M$ 。将这些产品进行不同的排序就得到不同的投产顺序,总共有 $(r_1 + r_2 + \dots + r_M)! / (r_1! r_2! \dots r_M!)$ 种投产顺序。

该混流装配线共装配 3 种类型的变速器,3 种产品的计划年产量依次为 30 000, 20 000 台和 10 000 台,则在一个流程中 3 种变速器的数量分别为 3, 2, 1 台,总共有 60 种投产顺序。分别对 60 种投产顺序用 Excel 表导入到 Flexsim 软件中进行仿真,对于 60 种投产顺序,各运行 40 个流程。为此,当仿真运行到总产量为 240 台时,停止运行,可在工位 1 上添加下面的程序,分别对 60 种投产顺序进行运行仿真。

If getinput(current)=240 then closeinput ports of the current object

3.2 仿真结果及分析

模型运行结束之后,运用 Excel 表格形式导出运行数据,并进行分析处理,以装配线上所有工序的空闲

时间和超载时间之和作为目标函数对投产顺序进行优化,即

$$f_{\min} = \sum_{i=1}^n X_i + \sum_{i=1}^n Y_i。$$

其中, X_i 为各工序的空闲时间; Y_i 为各工序的超载时间; i 为工序号, $i=1,2,\dots,n$, n 为总工序数,得到60种投产顺序运行40个流程的 $f_{\min}$,如表4所示。

表4 投产顺序加工240台变速器的 $f_{\min}$

Tab. 4 Different order's $f_{\min}$ in producing 240 sets of transmission

s

投产顺序	$f_{\min}$	投产顺序	$f_{\min}$	投产顺序	$f_{\min}$	投产顺序	$f_{\min}$
111223	53 588.98	213211	48 013.01	232111	53 864.20	211312	50 238.75
212113	52 726.01	213112	47 765.40	231211	56 755.35	121312	48 132.80
121123	52 958.58	123121	53 400.66	231121	50 873.65	112321	51 811.45
112123	54 350.78	123211	57 998.32	231112	49 774.16	211321	49 625.73
121213	50 067.01	123112	54 534.23	132211	48 645.90	121321	55 191.32
221113	53 758.24	111232	47 662.40	132121	56 066.39	311122	51 540.75
122113	55 216.55	121132	52 077.28	132112	52 759.69	312112	50 510.70
112213	53 144.46	211132	53 819.11	131221	57 055.62	311212	53 595.85
211213	56 070.81	112132	55 979.83	131122	50 580.61	312211	53 220.16
211123	55 363.16	112231	49 549.39	131212	52 614.86	312121	47 548.48
223111	58 212.89	122131	55 028.42	111322	49 118.47	311221	50 065.99
113221	54 151.63	221131	51 570.69	122311	51 474.34	322111	57 394.01
112312	48 281.05	212131	55 042.20	212311	56 674.32	321211	49 969.84
113122	56 178.29	211231	57 236.19	221311	50 232.91	321121	49 021.42
213121	52 282.30	121231	55 264.05	112312	57 186.29	321112	52 627.55

从表4可以看出,在该装配线上,最优的变速器投产顺序是3-1-2-1-2-1,空闲时间和超载时间之和为47 548.48 s;最差的投产顺序是2-2-3-1-1-1,这两种时间之和为58 212.89 s。两种投产顺序在加工240台变速器时空闲时间和超载时间之和相差10 664.41 s。最优投产顺序比最差投产顺序减少了22.4%,所以,采用3-1-2-1-2-1投产顺序可以大大减少机器空闲和生产堵塞现象。

4 装配线平衡率

一般情况下,生产线的节拍是指生产线最后一道工序上产出两件相同产品的时间间隔,而对于混流装配线,由于最后生产出来的产品是混合交替的,无法从严格意义上确定各种产品的节拍。因此,采取对某段时间内3种产品的平均节拍 C 作为装配线的节拍。对于该装配线,经过瓶颈优化和投产顺序优化后的仿真模型,在运行1d(54 000 s)之后,交付的3种变速器总数是252台,所以,生产节拍 $C=54\ 000/252=214.286$ s。

对于各种产品在各工序的加工时间,本文取3种变速器在各工序的加工时间的平均值作为装配线在各个工序的加工时间理论值 T_i 。通过表1可以计算8个工序的 T_i ,分别为131.67,33.33,125.67,235.00,107.33,308.67,161.67,357.33 s;因此,可以计算装配线的平衡率为

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{nC} = \frac{1\ 460.67}{1\ 714.286} = 85.21\%。$$

其中: n 为工序数($n=8$); C 为生产线节拍; T_i 为各个工序的加工时间理论值。通常,以机器加工为主的生产线平衡率不低于75%。通过计算可看出,改善后的平衡率已经达到比较高的水平。

5 结论

1) 通过对生产系统建立三维模型,并运行仿真,可以直观、较快地发现生产系统中隐藏的一些问题,结

合工业工程的改善知识,针对存在的问题,提出有效的优化方案,并通过仿真软件运行优化方案的模型,验证优化方案的可行性和有效性。

2) 以变速器装配线的虚拟装配工艺流程仿真为主线,在三维数字化工厂仿真软件 Flexsim 中就变速器虚拟装配线对象建模方法、装配工艺仿真环境的规划和搭建进行了研究,分析了装配线中存在的瓶颈、不平衡等问题,找出了装配线的关键工序和存在闲余能力等环节,并基于这些分析,对装配线进行瓶颈工序优化。

3) 针对混流生产线投产顺序问题,比较不同投产顺序的机器空闲时间和超载时间总和,找出较优的投产顺序,减少机器的空闲时间和堵塞现象。最后计算优化后的线平衡率,验证了优化方案的有效性。结果表明运用仿真软件,对变速器装配线进行资源动态评估与优化,可以提高企业快速应变能力,满足不同用户需求,产生可观的经济效益,使企业数字化迈上一个新台阶。

参考文献:

- [1] 钟自锋.基于模态分析的变速箱齿轮轴尺寸优化[J].华东交通大学学报,2014,31(1):94-97.
- [2] 朱耀祥,朱力强.设施规划与物流[M].北京:机械工业出版社,2005:290-294.
- [3] 周尔民,彭小剑.基于 DELMIA 的双离合变速器装配过程可视化仿真[J].机械传动,2013,37(1):65-67.
- [4] 郑顺水.生产线仿真技术研究[J].先进制造技术,2004,23(4):22-23.
- [5] 贾晨辉,任小中,李云峰.数字化制造系统规划与建模仿真研究[J].组合机床与自动化加工技术,2009(6):30-34.
- [6] 徐正,单忠德,李周,等.基于 Lightning 的生产线仿真[J].中国机械工程,2011,22(14):1690-1693.
- [7] 门佳,周泓.基于 Witness 的仓库设计建模及仿真研究[J].系统仿真学报,2011,23(2):420-424.
- [8] TAHAR R B M, ADHAM A A J. Design and analysis of automobiles manufacturing system based on simulation model[J]. Modern Applied Science, 2010, 4 (7):130-134.
- [9] 周尔民,郑亚波,彭小剑.基于 Qwest 的生产线资源优化研究[J].制造业自动化,2012,34(15):19-21.

Simulation and Optimization on Dual-clutch Transmission Assembly Line

Zhou Ermin, Wang Guiyong, Zhang Chengchong

(School of Mechatronics Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on Flexsim simulation software, dual-clutch gearbox assembly line in GETRAG company is optimized. Firstly, this study establishes the initial model on the assembly line, runs the initial model and gets the output results. From the results of the initial model some problems are detected in the assembly line, including the production capacity being unable to meet the requirements, the insufficient utilization of equipment and personnel, the congestion and imbalance in the assembly line, etc. To solve these problems, it puts forward a feasible scheme on the assembly line layout, process, equipment, technology and personnel. By building up different models of different order of production, it finds out the optimization order of production and then establishes the improved simulation model after statistical results of operation and output improvement. Finally by comparing statistical data before and after optimization and calculation of line balance rate, it proves that Flexsim can be used to improve production, thus reducing the cost, shortening the construction period and realizing the optimization of production line, which can much faster finish the customer's order and make the enterprise gain more benefits.

Key words: the assembly line; DCT; Flexsim software; optimization and simulation

(责任编辑 刘棉玲)