

[经营·管理]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.05.020

# 基于能耗分析的轴类零件生产调度优化

龚鼎, 黄莺, 张永炬, 王永鑫, 林群阳

(台州学院机械工程学院, 浙江台州 318000)

**摘要:**为了解决某轴类零件加工工厂生产效率低下,能耗过大等问题,对该车间生产方案、车间调度及能耗等方面展开研究。首先根据生产需求量预测,选择各工序切削用量、机器设备等得到一个满足生产交货期条件下的合理生产方案。在此基础上计算了工艺流程的工序节拍,根据“5W1H”提问技术、“ECRS四原则”对工序内容进行调整,消除了工序的瓶颈,改善了生产线平衡。为了缩短生产周期提高能源利用率,使用遗传算法对3套方案进行调度研究,最后得到总能耗、平衡率、生产周期及生产成本等几个综合指标最优的方案。结果表明改善后的方案在能耗、平衡率和成本方面均有所优化,该优化方法对轴类零件加工企业有一定参考价值。

**关键词:**车间调度优化;能耗评估;遗传算法;灰度关联分析

中图分类号:F273 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)05-0091-05

## Production Scheduling Optimization of Shaft Machinery Parts Based on Energy Consumption Analysis

GONG Ding, HUANG Ying, ZHANG Yongju, WANG Yongxin, LIN Qunyang

(Department of Mechanical Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:**The production scheme, workshop scheduling and energy consumption were studied in this paper in order to solve the problems of low production efficiency and excessive energy consumption in a shaft processing plant. First of all, according to the demand of production, the reasonable production plan was obtained by selecting the cutting parameters and equipments of each process to meet the delivery time. On this basis, the process flow of the process was calculated; "5W1H" technology and "ECRS four principles" were used to adjust the process content, eliminated the bottleneck and improved the production line balance. In order to shorten the production cycle and improve energy utilization rate, the genetic algorithm was used to optimize the above three sets of scheduling scheme. Finally the optimal scheme was obtained according to the total energy consumption, balance rate, production cycle and production cost. The results show that the improved scheme is optimized from aspects of energy consumption, balance rate and cost. This optimization method has a certain reference value for shaft parts processing enterprise.

**Keywords:**workshop scheduling optimization; energy consumption evaluation; genetic algorithm; gray correlation analysis

我国制造加工车间能耗大,能耗设备种类及数量多但能源、资源的利用效率低下,随着能源和资源价格不断上涨,逐渐影响了企业的发展。有关研究表明,利用现有的技术<sup>[1-2]</sup>可以节约5%~25%的能耗,说明制造业的能源及资源的使用效率具有进一步提高的潜力。

为优化企业的生产线从而提高生产效率、降低能耗,国内外学者对加工车间生产线优化方面做了大量的研究。文献[3]通过对钻攻中心的切削技术进行实验和研究,改变和调整设备各轴的转速、位置控制等基本参数来提高加工效率;文献[4]研究了主轴电动机和伺服电动机的能耗,并通过正交试验法找出切削参

收稿日期:2017-02-18;修回日期:2017-07-10

基金项目:2015年国家级大学生创新创业训练计划项目(201510350004)。

第一作者简介:龚鼎(1994),男,浙江宁波人,学士,主要研究方向为企业的绿色生产、节能减排及智能生产调度。E-mail: 1437111797@qq.com

数降低切削能耗。在提高设备能耗方面,除了上面提到的实验研究方法外,一部分学者通过建立阶段性能耗模型来解决该问题;如文献[5-6]把机床设备能耗分为启动、加工及空载等几个时段,并计算每个时段的能耗,利用遗传算法解决以能耗、成本等为目标的多元优化问题。

还有一些学者通过优化生产调度来减少能量消耗从而节约成本提高企业的竞争力。文献[7]以无缝钢管的车间调度为研究对象,考虑产能不同、产线定修及前置库存限制等约束条件,解决以交货期、送料连续及规格转换成本最小为目标的优化问题;文献[8]针对单件离散型生产作业问题,建立了品质、成本以及交货期为目标的优化模型;虽然上述研究均得出了理想的结果,但都忽略了能耗成本方面的影响。文献[9]提出了一种基于混合整数规划的调度算法,在给定的排序和原有固定的工作分配基础上进行能源优化。该研究考虑了能源的因素,但是没有同时考虑完工时间、能耗及设备利用率等多目标优化。

笔者综合以上两方面,对加工车间生产线进行生产调度优化,以交货期为目标并结合加工能耗的分析建立了能耗模型。相比其他传统的单个设备和生产调度优化模型,课题组的研究更符合企业的实际需要,并通过一个实际案例证明了该模型的有效性和参考价值。

## 1 生产方案

浙江某汽车零部件科技有限公司主要生产中间轴等汽车配件产品。中间轴是减速器的重要零部件,市场需求量巨大。随着全球市场一体化,变速器机出口数量增多、产品类别得到很大丰富。目前该公司由于市场拓展,需要生产多种不同型号的中间轴,面临市场的多样化、小批量及交货期缩短等要求。这就要求企业安排更加合理的生产方案,制定更优化的生产调度方案,提高车间设备利用率,缩短生产周期,降低能源浪费,为企业节约更多的制造成本。

该公司目前采用专机生产线,主要由普通车床及为生产某个零部件的某个工位专门用的机床构成。它生产效率高,柔性小,只能生产加工一种产品,在生产换线生产时,要是用不到专机,那么专用机床便处于闲置状态,造成机器设备的闲置,资源浪费,生产能力得不到发挥。

### 1.1 生产方案制定

根据现有的订单量和往年行业生产平均水平及咨询相关专家得到的预测信息来制定年生产纲领。根据

目前中间轴的市场需求和未来的发展前景,做出年生产纲领为10万件的假定。目前中国大部分企业年生产月份为10个月,月工作日为22d。采用双班制每天工作16h,预估月产量为10000件,日产量为455件,班产量为114件,每小时生产15件。为了适应市场的需求而不被淘汰,尽量采用柔性大的数控一机多用的生产方案。相比于专机专用方案,该方案可以一机多用,一台设备对应多道工序,机器设备利用率高,柔性好,更能考虑到车间业务其他的发展。虽然数控车床在价格上不占优势,但可以保值不会像普通车床那样迅速贬值。

#### 1) 各工序切削用量的选择

切削用量的选择,对生产效率、加工成本和加工品质具有重要影响。首先应该选择尽可能大的背吃刀量,根据机床进给的机构强度、刀杆的刚度等限制条件,粗加工或者精加工时,尽量选取大的进给量,最后根据切削用量公式计算确定切削速度<sup>[10]</sup>。粗车时,对工件精度和粗糙度要求都比较低,在机床条件允许的情况下,尽量选用切屑深度大一点,快速车掉多余的加工余量。余量比较大,不能一次车去的时候,可进行多次切削。

#### 2) 设备选择

由于机床刀具材料的切削性能直接影响工件的加工精度和表面品质,刀具应该具有高刚度,足够的强度和韧性,高耐磨性,良好的导热性,良好的工艺性和经济性,抗粘接性,化学稳定性等。刀具的选择取决于各工序的加工方法及所用机床的性能。测量器具具体测量零件的数量、材质特性、公差大小以及几何形状特点等。测量器具的精度应该与被测零件的公差大小相适应。被测零件的公差等级高,公差值小,则选用的测量器具的精度要高一些。

#### 3) 各工序时间

通过现场测量可以得到每个工序的预计加工时间,以型号为SXCJ-94582221的零配件为例,使用铣打机铣轴端面、钻孔、扩孔需要60s,使用普通车床切除多余余量需要69s,使用加工中心对轴进行半精、精加工并铣键槽需要100s,使用钳工对轴表面进行检查并去除毛刺需要21s。滚齿、插齿及剃齿等工序分别需要32,37,35s,中间检验与最终检验需要48s,总计需要约434s。

### 1.2 生产方案改进

按照一年250个工作日,采取2个班次,1个班次8h,其中有1h设为宽放时间,因此一天的工作时间

为 14 h。考虑到设备的维修、保养等,所以设备的负荷率取 0.8。假设有一条生产线,根据公式可以计算出生产节拍时间为 100.8 s。

平衡生产对整条流水线至关重要,而平衡率是平衡生产的一个重要指标,且

$$\text{平衡率} = \frac{\text{各个工序的作业时间和}}{\text{最长工序时间} \times \text{工序总数}} \times 100\% \quad (1)$$

根据平衡率公式(1)得到该生产线的平衡率仅为 61.1%。可以看出在现有的加工条件下,该生产流水线还有较大的可提升空间。

根据“5W1H”提问技术、“ESRC 四原则”,对现行流水线瓶颈工序进行分析。

粗车工序占用时间较多,因为粗车是切削出中间轴零件的大致形状,包含内容多。而且机器设备的运转速度也不高,所以时间长。可以先粗车轴短头,再粗车轴长头。因为是粗加工根据尺寸计算原则,不影响零件尺寸和精度。另外,由于要在铣打机上先铣端面,然后钻孔,工艺多,加工时间长。可以通过增加一台铣打机来缩短该工位的加工时间。除此之外,由于数控加工中心具备有刀具库,不需要多次装夹,能够更好地满足零件精度要求,因此加工中心需要完成精车、铣键槽和钻孔这 3 个工序,是该流水线的瓶颈工位。可以通过把半精车和一部分倒角的工作从数控加工中心中分离出来,在数控机床上来完成。通过对这些工序的整改,通过增加设备和分离部分工序的方法,得到优化后的生产方案。经过计算,优化后生产方案的平衡率为 84.8%,满足了生产平衡率  $\geq 80\%$  的标准。该方案所需加工机械设备以及需要的操作人数如表 1 所示。

表 1 重点工序所需设备及操作人数

Table 1 Equipments and numbers of operators of key processes

工序	工序内容	加工设备	操作人数
10	铣端面、打中心孔	铣打机 ZBK-500	2
20	粗车轴短头	CA6140 型卧式车床	1
30	粗车轴长头	CA6140 型卧式车床	1
40	半精车、倒角	CA6140 型卧式车床	1
50	精车	数控加工中心	1
60	铣键槽、钻孔	数控加工中心	1
70	钳工	钳工台	1

## 2 能耗建模与评估

### 1) 加工方案能耗的评估

为了进一步控制企业能源、资源的配制,达到节能降耗的目的,需对方案进行能耗评估。假设待加工工

件的机器设备已经开机并进入准备状态,计算其实际加工状态能耗  $E_t$  和空闲状态能耗  $E_{idle}$  (即空载状态,有些辅助能耗太小忽略不计,此处用空载能耗来估算)并加工统计,通过比较每种加工顺序的总能耗、设备的利用率、生产的成本及生产周期指标并使用灰度关联法综合分析来选出最合理的方案。

### 2) 对实际加工状态和等待状态的建模

对于机床设备而言,机床切削工艺过程能耗(即实际加工能耗)分为准备过程本身所需的能量和加工状态外围设备所消耗的额外能量,即

$$E_t = E_{au} + E_p$$

式中: $E_{au}$  是机床消耗的辅助能量; $E_p$  是物理加工过程发生所需的能量。

辅助能量  $E_{au}$  是固定不变的,此过程包括机床启动时的能耗及达到稳定状态时主轴转动的能耗即机床的空载能耗,辅助设备如冷却系统能耗以及进给系统的能耗,即

$$E_{au} = E_{cool} + E_o + E_j + E_s$$

式中: $E_{cool}$  为冷却能耗; $E_o$  为空载能耗; $E_j$  为进给能耗; $E_s$  为启动能耗。

机床物理加工能量  $E_p$  是机床设备在加工状态时产生的切削能耗和附加载荷能耗,此部分能耗为可变能耗,附加载荷能耗  $E_a$  是机床主传动系统由于载荷(切削功率)而产生的附加损耗,这部分损耗只在切削状态下存在。文献[11]研究表明附加载荷损耗与切削功率之比为常数  $b$  (取 0.15 ~ 0.25)。则有

$$E_p = E_c + E_a = (1 + b)E_c$$

式中: $E_c$  为切削能耗; $E_a$  为附加载荷能耗。

为了计算简便,文中对过程能耗和附加能耗分别使用功率测量器和扭矩传感器来获得相关的数据。

功率参数具体获取方式<sup>[12]</sup>:

①机床开启后,不进行任何操作包括主轴的转动,获得的功率为启动功率。

②在稳定状态下,进行主轴的转动,机床功率的增量为空载功率。

③在稳定状态下,只开启冷却系统,机床增加的功率为冷却功率。

④在加工状态下,通过扭转传感器测出机床加工的瞬时切削功率和主轴转速,达到稳定时即为切削加工功率。

时间参数的具体获取方式:

通过直接测量得到  $t_1$  和  $t_2$ 。其中: $t_1$  为加工状态的时间,即机床从切削工件开始至结束的时间; $t_2$  为空

载时间,即机床加工完一道工序还未开始下一道工序的等待时间。

在加工过程中,机床设备伺服进给系统能耗和启动能耗非常小,为估算能耗方便忽略不计。

综上所述,机床设备加工的实际能耗和空闲能耗分别为:

$$E_t = (P_c + P_a)t_1 + (P_{cool} + P_o)t_2;$$

$$E_{idle} = P_o t_2。$$

### 3 调度优化

对车间生产的安排和调度方法能够直接影响产品生产周期,生产效率和能源消耗等等。根据上面分析得到的优化后的生产方案来安排 6 种型号零件的生产。通过合理安排工件的加工顺序,达到总加工时间最小,即最小的最大完工时间。有 6 个待加工的零件,1 个工件需要 7 道工序,在 8 台机床上加工完成。分别是:铣打机 2 台(编号:#01,#02),普通车床 3 台(编号:#03,#04,#05),加工中心 2 台(编号:#06,#07),钳工台 1 台(编号:#08)。假定每一台机器在每个时刻只能加工某个工件的某道工序,并且只能在上道工序加工完成后才能开始下一道工序的加工过程。此类调度问题复杂且动态化, $N$  个工件、 $M$  台机器的问题包含  $M \cdot N$  种排列,使得解空间容量巨大。由于问题的连环嵌套性,使得用图解方法根本无法实现。传统的运筹学(整数规划法等)也难以有效地应用于实际加工。

这里笔者采用遗传算法来求解,将问题的优化方案看做一条染色体,并且借用遗传学进行全局搜索,使得生产调度问题能够得到更准确的方案从而达到生产线优化的目的。文中采取多层整数的方式进行染色体编码,染色体上的基因表示工件的顺序和加工工件的机器。每条染色体的长度为所有工件在机器上的加工顺序,染色体的适应度值为全部工件加工完成的时间,通过选择、交叉、变异来获取较好适应度的子辈染色

体,经过多次迭代最终找到最优染色体即最优的解。

根据前文讨论的结果,方案 1 为专机专用,需要 6 道工序加工完成,设备数量为 12 台;方案 2 为数控一机多用,共 4 道工序,需要 8 台设备;方案 3 为生产线平衡优化后,该方案共 7 道工序,需要设备 8 台。每个方案都使用遗传算法进行调度优化。由于篇幅的限制,这里仅列出方案 3 的具体信息和结果。根据方案 3 提供的数据(如表 2 所示),使用 MATLAB 2013a 软件,运行代码,设遗传种族为 40,种群规模取 50,交叉概率取 0.8,变异概率取 0.6。以加工周期最小为适应度函数值进行生产调度。

如图 1 所示为优化后方案的生产调度甘特图。开始以零件 2 和零件 3 的第 1 道工序分别在设备#1、#2 上加工,最后以设备#8 加工零件 1 的最后一道工序结束,总共的加工时间为 327 h。图中各矩形条上的数字代表工序,例如 302 的含义为零件 3 的第 2 道工序。

为了综合考虑能耗利用率和成本等因素,现对上述 3 种方案从总能耗、平衡率、生产周期及生产成本等几个指标进行能耗评估和分析。

通过能耗建模方法可以计算得到机器设备的实际加工功率和空闲功率,计算出该生产线的总功率,并考虑了高峰用电期与非高峰用电期,计算得到成本等数据(如表 3 所示)。每种方案对应 4 个指标:总能耗、运行时间、成本及平衡率。为便于分析研究,采取跟踪单位批次的零件加工时间设置为流程程序时间,按每批次加工的中间轴为 3 600 件来计算。企业生产的原方案的总能耗经计算为 8 533.1 kW · h,生产一个批次的周期为 325 h,能耗成本为 4 266.5 元,流水线的平衡率为 61.1%。

虽然使用遗传算法对上述 3 种方案进行调度优化后生产周期是比较接近,但是由于方案 1 是专机专用,柔性化不够,而且需要 2 条流水线才能够满足生产的

表 2 零件加工设备编号与加工时间表

Table 2 Equipment numbers and processing time of parts processing

零件 代号	设备加工时间/h															
	工序 1		工序 2			工序 3			工序 4			工序 5		工序 6		工序 7
	#01	#02	#03	#04	#05	#03	#04	#05	#03	#04	#05	#06	#07	#06	#07	#08
1	31	31	18	18	18	18	18	18	19	19	19	14	14	20	20	12
2	60	60	35	35	35	35	35	35	37	37	37	28	28	38	38	23
3	47	47	27	27	27	27	27	27	29	29	29	22	22	30	20	18
4	41	41	24	24	24	24	24	24	25	25	25	19	19	26	26	16
5	27	27	15	15	15	15	15	15	16	16	16	12	12	17	17	10
6	38	38	22	22	22	22	22	22	23	23	23	18	18	25	25	15

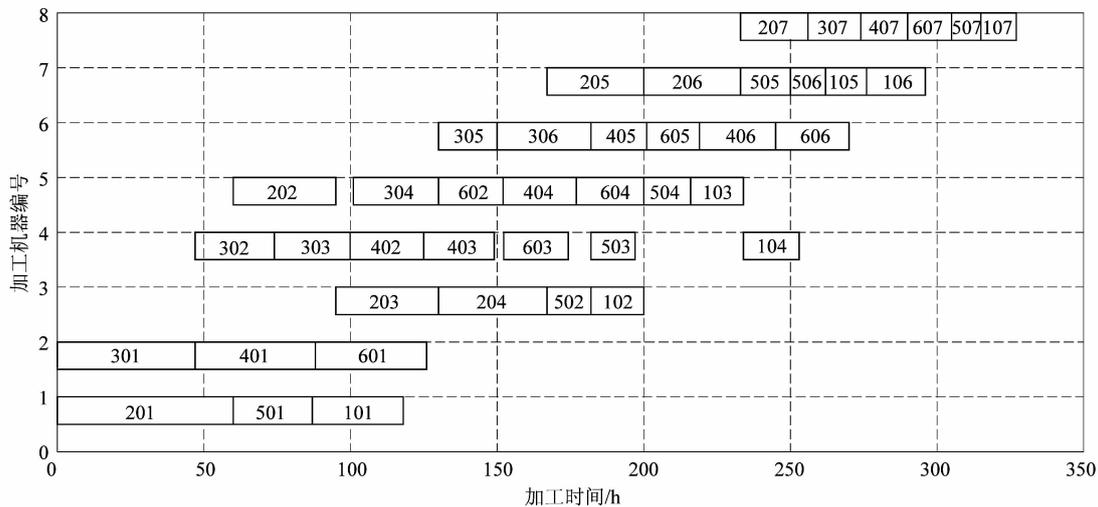


图1 遗传算法输出最优调度方案

Figure 1 Optimal scheduling scheme based on genetic algorithm

需求,不予采纳。方案2,虽然生产周期是最短的,但是能耗消耗过大。因此推荐采纳方案3,既能够满足生产交货期的条件,生产平衡率也是3个方案中最高的,约85%,能源利用率提高了,能够最大的发挥生产线的生产能力也不至于让员工处于高度紧张的状态,有利于提高产品品质。

表3 3个方案综合指标对比表

Table 3 Comprehensive index comparison for three schemes

方案序号	总能耗/ (kW·h)	总时 间/h	成本或 电费/元	平衡 率/%
1 专机专用	8 533.1	327	4 266.5	61.1
2 数控一机多用	8 569.9	310	4 366.4	69.0
3 平衡优化后	7 775.5	327	3 887.8	84.9

#### 4 结语

通过对浙江某轴类零件加工制造企业实地考察采集相关数据,针对该企业存在的生产效率低下,能耗过大等问题,笔者根据需求量预测提出了一套满足生产交货期条件的可行方案。在此基础上计算了工艺流程的工序节拍,以工业工程的5W1H和ECRS分析方法对工序内容进行调整,消除了工序的瓶颈,改善了生产线平衡。使用遗传算法来代替企业原有的手工生产计划安排方式提高了企业的生产效率从而提高能源利用率,缩短了生产周期。通过比较总能耗、平衡率、生产周期及生产成本等指标,最终得到符合车间生产线利益的最优方案。通过对该公司中间轴生产的实例和上述能耗评估方法,可得到相关数据参数并建立相关模型,结果表明改善后的方案从能耗,平衡率和成本方面

均有所提高,为解决企业车间加工提高能源和资源效率等问题提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] PELLEGRINELLI S, VALENTE A, TOSATTI L M. An integrated setup planning and pallet configuration approach for highly automated production systems with energy modelling of manufacturing operations [J]. Procedia CIRP, 2012, 3(1): 49-54.
- [2] 何纯,刘高君,刘飞,等.数控机床主动力系统空载能耗分析及其停机节能方法[J].制造业自动化,2013,35(22):108-112.
- [3] 刘江,赖立迅.钻攻中心的高速切削技术研究与优化[J].制造技术与机床,2014(12):116-119.
- [4] MORI M, FUJISHIMA M, INAMASU Y, et al. A study on energy efficiency improvement for machine tool [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2011, 60(1):145-148.
- [5] 李爱平,鲍进,李聪.基于低能耗的平面端铣削粗/精加工参数全局多目标优化[J].中国机械工程,2015,26(14):1888-1893.
- [6] 胡狄,张华,郗威,等.面向节能优化的数控铣削参数优化方法研究[J].机械设计与制造,2015(8):110-113.
- [7] 李琳,霍佳震.钢管生产计划中的多目标柔性job-shop调度问题[J].系统工程理论与实践,2009,29(8):117-126.
- [8] 杨晓英,施国洪,王雪,等.基于精益物流的单元离散型生产作业排程优化[J].工业工程与管理,2013,18(3):11-18.
- [9] BRUZZONE A A G, ANGHINOLFI D, PAOLUCCI M, et al. Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: a mathematical model for flexible flow shops [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2012, 61(1):459-462.
- [10] 刘越.机械制造技术[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [11] 刘飞,徐宗俊,但斌.机械加工系统能量特性及其应用[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [12] 张喆,李郝林.机床切削工艺方案能耗定量分析比较的方法[J].制造技术与机床,2013(12):21-24.