

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2017.03.010

基于标准样件的机床能耗分析与加工生产线优化

张新诚¹, 贾敏忠², 李小水²

(1.清华大学 机械工程学院, 北京 100084; 2.福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为了便于对比分析不同机床的加工过程能耗, 设计了包括几种典型加工元素的能耗分析标准样件。使用不同的机床对标准样件进行加工, 根据测得的功率计算各个部分的加工能耗, 以对比不同机床的能耗信息。同时依据不同机床的功率信息, 计算不同生产线安排的总的工作能耗, 寻找能耗更少的生产线安排方案。

关键词: 机床能耗; 标准样件; 生产线优化

中图分类号: TH162

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)03-0247-06

Analysis of machine tool energy consumption and optimization of production line based on standard sample

Zhang Xincheng¹, Jia Minzhong², Li Xiaoshui²

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

2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To improve the analysis of energy consumption of different machine tools in the process, a standard analysis sample that includes several typical processing elements was designed. The standard sample was cut by different machine tools and the energy consumption of the elements (different parts) was calculated to compare the energy consumption of the machine tools. Meanwhile, the total energy consumption of different production lines was calculated based on the power of different machine tools to better arrange the production line.

Keywords: machine energy consumption; standard sample; production line optimization

机床种类繁多,除传统的车铣镗磨等单功能机床外,数控机床、加工中心等复杂的多功能机床使用日益广泛。机床种类的多变给机床能效分析带入了更多的复杂性、不可靠性以及更少的广泛使用性,为了研究机床能耗,许多学者利用标准样件对机床加工过程进行测量分析。

Behnood^[1]设计了一种标准件用来对粗加工能耗进行评估,并对使用的材料、刀具和切削路径进行了限制。Behrendt 等^[2]使用设计的标准样件对不同机床的待机功率和加工功率进行研究对比。Holkup 等^[3]使用标准样件进行研究,力图寻求在设计阶段通过尺寸及外围设备选择最小化固有能量的损失。杨增光^[4]利用设计的标准样件,通过正交实验设计寻找最佳的切削参数。Mikami 等^[5]使用美国 NAS979 标准试件对五轴加工中心进行几何精度测量,该试件开启了利用检测试件的实际切削和检测来评估数控机床的方法。继 NAS979 试件之后,国际标准化组织^[6]在 ISO 10791-7 中提出另一种检测试件用来检测机床使用铣镗钻等方式在多种插补方式下精加工不同型

收稿日期: 2017-03-07
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2014AA041503);福建省自然科学基金(2016J01723);福建工程学院科研发展基金(GY-Z13015)
通讯作者: 贾敏忠(1972-),女,四川双流人,副教授,硕士,研究方向:可持续设计与制造、数控技术与装备。

面特征的精度。此外,还有美国工程师协会^[7]在 SAME B5. 54 标准中介绍的标准件,以及 Claudet^[8]使用的切削精度检测试件都是广为使用的标准样件。样件种类繁多,且无法与机床其他衡量体系兼用,不便于学者之间的交流。本文在已有精度检测标准样件的基础上,设计了一种新的标准样件。这种新的标准样件一方面可以将机床的不同标准结合起来,更好地检验机床;另一方面可以将机床能耗与机床检验结合,为把能源消耗量作为未来机床验收的标准提供依据。

1 标准样件设计

新标准样件的设计包含了现有机床验收精度检测样件中常见的圆面、斜边和孔等几种结构简单、易于加工的典型形状元素,也包含比较常见、比较复杂的球形典型形状元素,如图 1。

标准样件包括①圆球台:半径为 50 mm,高度为 30 mm;②圆柱体:直径 180 mm,高度为 5 mm;③长方体:高度为 5 mm,顶面为与圆柱顶面内接的正方形,与毛坯边缘的倾斜角为 15°;④方肩:宽度为 5 mm,高度为 10 mm;⑤斜方肩:高度为

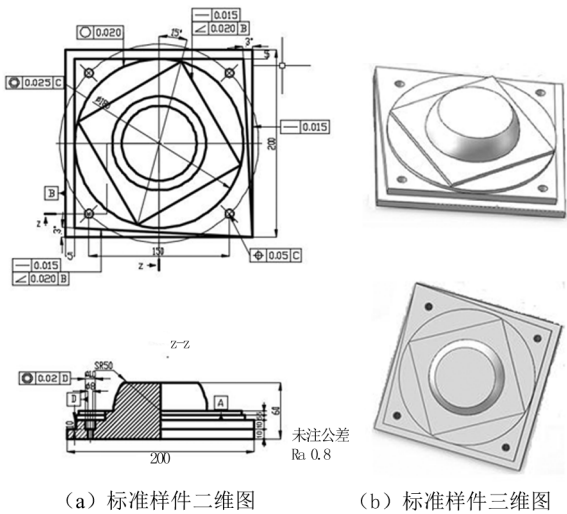


图 1 标准样件设计图
Fig.1 Diagram of standard sample

10 mm,角度为 3°;⑥通孔:直径为 8 mm,深度为 20 mm;⑦沉孔:直径为 10 mm,深度为 10 mm。

为保证在实验过程中不受其他因素影响,对标准样件加工使用的刀具型号以及切削参数作了一些限制,见表 1。

表 1 标准样件加工过程的限制条件
Tab.1 Restrictive condition of standard sample processing

项目	数值	项目	数值
材料	铝 6061	粗加工转速/($r \cdot \min^{-1}$)	3 000
毛坯尺寸/($\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$)	200×200×100	粗加工进给/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	960
铣削刀杆	EMP01-016-G16-AP11-02	粗加工切削深度/mm	2
铣削刀片	APKT11T308-LH	最大移刀距离/mm	150
精加工球面	球头铣刀 R5X10HSSAL	部件侧面余量/mm	0.8
数控程序	UG_NX8.0 自动生成	安全距离/mm	10
精加工进给速度/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	600	精加工转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	4 000
精加工球面转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	3 500(4 000)	精加工球面进给/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	800(1 500)
钻孔刀具	1101SC05-0800/1000	钻孔转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 200
钻孔进给/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	80	冷却液	开

2 实验应用

2.1 实验设计及结果

使用设计的标准件对比两种机床的能效以及

切削性能。通过 MCV-810 加工中心和嘉泰数控 VL-850 立式加工中心的实际加工举例说明。两种机床的参数见表 2。

表 2 两种加工中心参数对照

Tab.2 Comparison between parameters of two processing centers

项目	MCV-810	VL-850
X 轴行程/mm	810	800
Y 轴行程/mm	510	500
Z 轴行程/mm	560	560
工作台面积/mm	1 000×510	900×500
主轴转速/(r·m ⁻¹)	8 000	10 000
主轴马达规格/kw	15/10	7.5
X、Y、Z 轴 快移速度/(m·min ⁻¹)	15/15/12	48/48/48
最大切削速度/ (mm·min ⁻¹)	7 000	7 000
机床功率/kVA	20	20
面板系统	FUNAC 系列	FUNAC 系列

实验过程分为 6 步,使用插补法加工球面,①将毛坯粗铣到精加工所需的加工余量;②对球面以外所有的加工平面进行精铣;③精铣球面;④再次精铣球面;⑤钻 φ8 mm 的孔;⑥钻 φ10 mm 的

孔。实验过程中使用 WT333 型功率计对加工过程中的实时功率进行测量。为了增加对比研究,也除对两种机床在加工标准样件时进行功率测量之外,对其在空载情况下运行程序进行功率测量。

切削能耗是刀具切除材料引起的能量消耗,与切削材料、刀具尺寸以及切削参数等有关,在忽略误差的情况下,切削参数相同,加工不同元素消耗的功率相同,因此将此实验中加工参数相同时的切削功率视为常数,功率测量实验结果见表 3,部分功率曲线图对比见图 2。

2.2 实验结果处理与分析

从表 3 可看出,由于两个机床加工时应用的切削参数完全相同,使用切削刀具以及加工路径也完全一致,因此两个机床加工标准样件的切削功率也基本相同。但是由于机床的结构不同,非切削功率差别很大,为了简化计算,忽略极少的刀具空运行时间,假设运行时间即为切削时间,对整个加工过程的加工能耗进行计算,结果见表 4。

从能耗角度看,机床 JT-VL850 的能效比 MCV-810 高。究其原因,主要是因为 MCV-810 为 20 世纪 90 年代的老版机床,其内部接线方式

表 3 两台机床加工标准件的测量功率

Tab.3 Measured power of standard samples processed by two machine tools

标准件		测量功率/W					
		粗加工	精加工	精铣球面 1	精铣球面 2	钻孔 1	钻孔 2
JT-VL850	加工时	490	420	375	380	503	485
	空载时	420	380	350	370	465	465
MCV-810	加工时	914	887	890	885	896	886
	空载时	850	850	870	877	870	870
运行时间/s		7 000	1 039.0	921.5	1 579.2	700	440

表 4 标准件加工能耗

Tab.4 Energy consumed in processing standard samples

kJ

标准件		能耗						总能耗
		粗加工	精加工	精铣球 1	精铣球 2	钻孔 1	钻孔 2	
JT-VL850	加工	3 430	436.38	345.562 5	600.096	352.1	213.4	5 377.538 5
	空载	2 940	394.82	322.525	584.304	325.5	204.6	4 771.749
MCV-810	加工	6 398	921.593	820.135	1 397.592	627.2	389.84	10 554.36
	空载	5 950	883.15	801.705	1 384.958 4	609	382.8	10 011.613

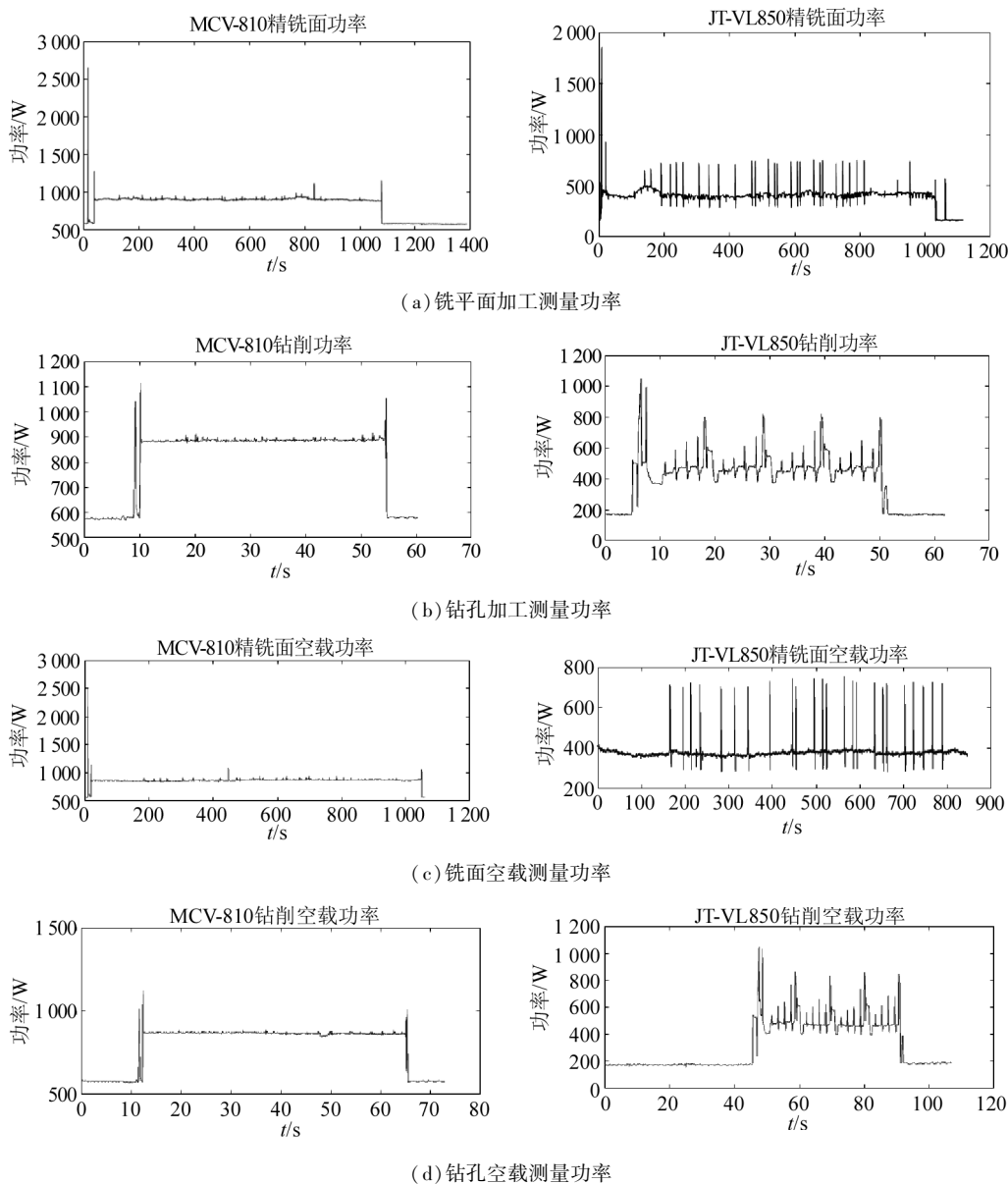


图 2 两种机床加工标准样件以及空载过程机床总功率曲线对比图

Fig.2 Comparison of measured power between standard sample processed by two machine tools and the total power curve of machine tool without load

复杂,而 JT-VL850 大量使用集成电路,使得继电器等效率更高。另一方面,从图 2 可以看出, JT-VL850 在切削以及空载运行过程中,功率的波动都比 MCV-810 大,说明机床在运行过程中的稳定性或者机床刚度要略差,由于机床的稳定性影响工件加工表面的质量,因此在加工过程中,虽然能耗较小,但对于表面质量要求高的精加工, JT-VL850 不如 MCV-810 加工效果好。由于机床的用途多种多样,加工的工件需求也各有不同,单纯从功率等因素来判断机床的好坏是不符合实际

的,因此要使用不同机床对同种标准件加工,测量多个因素总结机床评价对比表,在实际运用中根据加工需求选择更优的机床。

机床加工过程中,由于机床运行所需的功率比较大,粗加工过程的非切削功率可占总功率的 80% 以上,精加工过程材料去除体积小,因此非切削功率占更大的比例。并且实际加工过程中,非切削状态持续时间比较长,因此能耗占据比例更大。由实验结果可知,在误差允许范围内,切削功率与机床的选择无关,在确定切削参数及刀具之

后,切削能耗部分很难再有优化空间。而占总能耗绝大部分的非切削能耗部分,通过机床的选取以及合理安排,能获得极大的能耗提升空间。

3 基于机床能耗的加工生产线优化

3.1 生产线能耗理论分析

根据上述实验结果可知,机床的选择影响机床非切削能耗的大小,当切削参数及机床确定后,加工工步的能耗就可以确定。在实际加工过程中,一个零件包含着多个加工工步以及多个加工机床,而整个加工过程往往以多机床同时参与的生产线方式进行。由于同一个工步可以选择不同的加工参数以及不同的机床,因此生产线中不同机床个体的安排以及加工参数不同,导致不同工序的切削功率以及切削时间都会发生变化。考虑到流水线加工存在生产节拍问题,当不同工步生产时间不同时,加工时间短的工步在完成切削加工之后,由于前端机床工步尚未完成,没有工件继续加工,导致机床处于空运行状态,也就是说机床的实际运行时间等于整个生产线所有工步中机床运行最大时间值。无分支的生产线示意图如图 3。



图 3 无分支的生产线示意图

Fig.3 Production line without branches

忽略工件运输时间,则加工单个工件总能耗为:

$$\begin{cases} E = \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \times t_{\max} + \sum_{i=1}^n (P_{ci} \times t_{ci}) \\ t_{\max} = \max(t_i) \end{cases} \quad (1)$$

式(1),中 p_i 为工步 i 机床空载功率; t_{\max} 为加工节拍; p_{ci} 为工步 i 切削功率; t_{ci} 为工步 i 切削时间; t_i

为工步 i 机床运行时间。
实际加工过程中,为了达到生产线工艺平衡,通常会在生产时间瓶颈单元通过设置多个相同机床来减少加工节拍,如图 4。忽略未进入稳定状态的批次开头和结尾,总能耗使用式(2)计算:

$$\begin{cases} E = \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \times t_{\max} + \sum_{i=1}^n (P_{ci} \times t_{ci}) \\ t_{\max} = \max\left(\frac{t_i}{N_i}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,工步 i 并联机床个数。

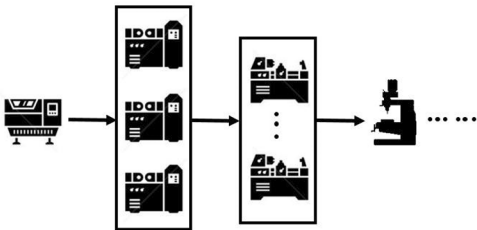


图 4 包含分支结构的生产线示意图

Fig.4 Production line with branches

通过上文的切削能耗预测以及机床能耗分析,可以获得整个加工过程的总能耗,以此用来指导生产线的安排。如将时长大的工步安排在空载功率小的机床上,从而减少整体加工能耗。

3.2 生产线能耗实例应用

以研究的两种机床为例,对上述标准件进行精加工,包括精铣平面、第一次精铣球面、第二次精铣球面、钻孔 1、钻孔 2 五个步骤,用 MCV-810 和 JT-850 机床各 5 台,不考虑表面质量要求,设计一条生产线。

根据上文研究结果,在选定切削参数之后,切削过程的切削能耗由切削参数与切削时间确定,与生产线的安排无关,忽略不同机床的误差影响,加工单个工件的切削能耗可视为常数。因此只考虑加工过程的非切削能耗。上述机床能耗实验可以获得不同加工工步的功率和时间数据,见表 5。

表 5 标准样件加工功率与时间

Tab.5 Power and time of processing standard samples

标准样件	加工功率 P/W				
	精加工	精铣球面 1	精铣球面 2	钻孔 1	钻孔 2
JT-VL850	380	350	370	465	465
MCV-810	850	870	877	870	870
运行时间/s	1 040	920	1 580	700	440

将 10 台机床连接为并列两条生产线,如图 5。

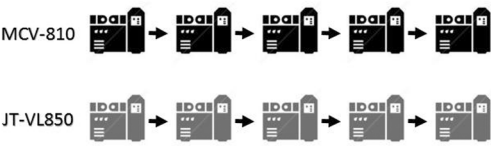


图 5 无分支排列生产线

Fig.5 Arrangement of production line without branches

上述方案中,由于第二次精铣球面时间过长,导致其他工步完成切削后,机床很长时间仍处于空运转的状态,而机床加工过程,空运行能耗占总能耗的大部分比例,因此在安排工艺流程时要考虑尽量减少机床空载时间。与此同时,根据不同机床特性,合理安排机床布局,在减小加工能耗的同时提高加工质量。针对上述例子,对加工时长大的工步安排并列的工序,从而减少整条生产线的空闲时间,另外,由于 MCV-810 刚性好,加工的表面质量好,因此将刚性较差的 JT-VL850 型机床安排在球的第一次精加工以及主受力为刀具轴向受力的钻削步骤。机床排序如图 6。

第一种安排方式,平均加工单个工件的非切削总能耗计算见式(3),第二种安排方式,平均加工单个工件的非切削总能耗见式(4)。

$$E = \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \times t_{\max} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \times t_3 + \left(\sum_{i=1}^n P'_i \right) \times t_3}{2} = 5\,029\,930\text{ J} \quad (3)$$

参考文献:

[1] Afsharizand B. Investigation on quantitative assessment of energy consumption and the associated sustainability performance of CNC milling machines[D]. London: Brunel University, 2012:1-135.

[2] Behrendt T, Zein A, Min S. Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(1):43-46.

[3] Holkup T, Vyroubal J, Smolik J. Improving energy efficiency of machine tools[C]// The Global Conference on Sustainable Manufacturing, Berlin. Sep.23-25, 2013. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2013:125-130.

[4] 杨增光. 数控加工标准样件设计及能耗数据管理系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[5] Mikami S, Saito A, Tsutsumi M. Simulation of estimating method of geometric accuracy in 5-axis machining centers based on NAS979 standard[J]. The Japan Society for Precision Engineering, 2004(SD):274-274.

[6] ISO. Accuracy of a finished test piece conditions:10791-7-1998[S]. Geneva: ISO 2998.

[7] ASME. Methods for performance evaluation of computer numerically controlled machining centers: B5.54-2005[S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2005.

[8] Claudet A, Tran H, Su J. Quantification of uncertainty in machining operations for on-machine acceptance[R]. California: Sandia National Laboratories, 2008:1-20.

$$\begin{cases} E = (P_1 + P'_2 + P_3 + P'_4 + P'_5) \times t_{\max} = 1\,769\,600\text{ J} \\ t_{\max} = \max\left(\frac{t_1}{2}, \frac{t_2}{2}, \frac{t_3}{4}, \frac{t_4}{2}, t_5\right) \end{cases} \quad (4)$$

从两种不同的生产线能耗结果对比可知,第二种非切削能耗相对于第一种减少了 65%左右,此外,还可以将其他的安排方案进行能耗计算,寻求更优的生产线安排方案。因此,研究机床的基础特性和能耗数据,针对特定的加工过程安排合理的生产线从而减少能耗有着重要的意义。

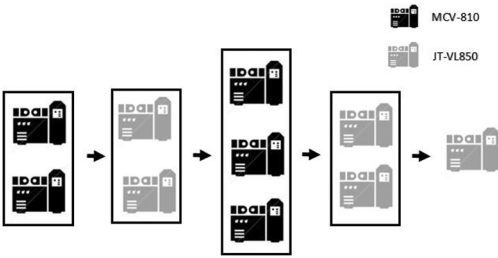


图 6 有分支混联排序生产线

Fig.6 Serially arranged production line with branches

4 结论

在前人研究的基础上,将机床验收精度检测标准样件与加工过程能耗研究样件结合起来,并进行改进,获得具有广泛适用性的加工能耗标准样件。通过标准样件的加工,获得不同机床的非切削能耗量化结果以及切削质量的定量分析,为机床的对比及选用提供理论依据,并对生产线的设计提供指导,获得较小的能源消耗。