

电火花线切割加工能耗数据采集及其特征分析

赖旭伟,贾苛珍,郑 军

(浙江科技学院 机械与能源工程学院,杭州 310023)

摘 要: 电火花线切割加工广泛应用于难加工材料和精密复杂零件的非接触加工。为实现加工过程的高效、低耗,通过开发一种基于 LabVIEW 的能耗采集平台,对加工中的能耗特征进行分析。以电压、电流信号为采集对象,以 DK7740D 电火花线切割机床为试验对象建立完整的能耗数据采集平台,并对采集的能耗数据进行分析,获得该电火花线切割加工过程的典型能耗特征曲线,从而为后续针对该加工工艺过程的能耗优化提供数据参考。

关键词: 线切割;能耗;数据采集;特征分析

中图分类号: TG501.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2018)03-0216-08

Data acquisition and characteristic analysis of energy consumption in wire electrical discharge machining (WEDM) process

LAI Xuwei, JIA Kezhen, ZHENG Jun

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of
Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: Wire electrical discharge machining(WEDM) has been widely used for non-contact machining of difficult-to-cut materials or sophisticated parts. In pursuit of high efficiency and low energy consumption in the process of WEDM, an energy acquisition platform was developed based on LABVIEW, which could be used for analyzing the energy consumption characteristics in the process of WEDM. By collecting the voltage and current signals, the complete energy consumption data acquisition platform was established with the DK7740D WEDM machine. Then the collected energy consumption data were analyzed, obtaining the typical energy consumption characteristic curve of WEDM, which will provide data reference for the subsequent optimization of the energy consumption of WEDM.

Keywords: wire electrical discharge machining(WEDM); energy consumption; data acquisition; characteristic analysis

收稿日期: 2017-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505428);浙江省自然科学基金项目(LY18E050007);浙江科技学院研究生科研创新基金项目(2017YJSKC008)

通信作者: 郑 军(1981—),男,浙江省台州人,副教授,博士,主要从事可持续设计与制造、特种加工工艺研究。
E-mail: zhengjun@zust.edu.cn。

环境和能源问题已成为全球性的重要问题,减少工业加工过程中的能耗是制造业的重要课题。《中国制造 2025》更是明确地将“绿色制造”列入五大工程之一,指出要加大先进节能环保技术、工艺和装备的研发力度^[1]。美国能源部在分析制造业加工过程能耗状况的基础上,建立了制造工业技术发展计划来提高制造过程中的能源利用率^[2]。对此,国内外科研人员展开了制造业加工过程中提高能源利用率的相关研究,以达到节能减排目的^[3],如: Gutowski 和 Wolf 等^[4-5]从热力学角度研究了铸造过程中各种加工工艺的能量消耗特性,并对能耗进行了评估; Eberspaecher 等^[6]对制造过程中的能耗进行了预测、评估、优化和建模仿真等研究,提出了制造过程能耗预测模型; Dornflou 和 Cao 等^[7-8]在研究制造过程资源利用的基础上,建立了制造过程资源利用的监测系统体系结构; 杜彦斌等^[9]对制造系统的碳排放动态特性及优化进行了研究,提出了机械制造系统碳排放动态特性模型和面向机械加工工艺的低碳优化方法。然而,针对电火花线切割机床能耗的研究却相对较少。电火花线切割机床是一种非传统的非接触式加工方法,加工时通过电极丝与工件之间的放电产生高温,达到熔化切割工件的目的。电火花线切割加工具有能加工难加工材料和精密复杂零件以及表面成形精度高等特点;同时可以节省大量的原材料,材料利用率高,在中国制造业中占有重要地位^[10]。但是,电火花线切割加工效率低、能耗大是阻碍电火花线切割加工发展的主要问题^[11]。哈尔滨工业大学特种加工及机电控制研究所于 2000 年提出了两级结构 PWM 控制节能式脉冲电源,有效地将电能利用率提高到 70% 左右^[12]; Ho 等研究了对火花放电的监测和控制,在提高能量利用率的基础上提高加工效率^[13]。电火花线切割能耗主要由设备本身、工艺参数、加工工艺、工件材料、电参数等共同决定,因此针对电火花线切割加工过程的整体能耗研究非常必要。

1 电火花线切割加工特征

电火花线切割机床在加工过程中,通过脉冲电源向电极丝发射脉冲电能,电极丝与工件之间形成电场,随着工件与电极丝的接近,电场强度不断增加,当二者之间距离最近的一点电场强度达到一定值时,电子由电极丝向工件高速运动,击穿电极间的绝缘层,产生等离子通道,等离子通道的高温融化电极,达到切割的目的^[14]。在整个加工过程中,数控柜始终处于运行状态,以实现参数的设置以及人机信息交换控制^[15]。根据线切割的加工原理,加工过程中有五部分参与加工、产生能耗:即运丝系统、工作液系统、进给系统、脉冲电源。这几部分在数控柜的控制下完成整个加工。在加工过程中,根据加工环境的不同,其他辅助设施如照明设施等也会产生能耗。数控柜以及电路系统在整个作业过程中能耗稳定。运丝系统主要通过电机带动运丝筒的快速转动实现电极丝的往复走丝,根据实际加工需要,可设置不同的丝速,此部分能耗受相应工艺参数影响。工作液系统通过水泵向整个加工平台提供工作液,实现冷却、提供介质以及冲洗工件的作用,整个加工过程中水泵的功率整体无波动,始终维持在一定值,该部分在加工过程中能耗相对稳定。进给系统包括 X 进给、Y 进给及锥度方向上的进给。进给速度可根据实际需求进行设置,在进给时根据设计的加工轨迹,不同方向上的电机以相应的速度配合进给,形成各种复杂的加工路径,该部分能耗受加工参数影响。脉冲电源在加工时向电极丝提供脉冲能源,脉冲特性较为复杂,在加工过程中受脉间距、脉宽、跟踪、限速等电参数影响较大,同时与具体加工工件的材料也有一定的关系^[16]。

2 数控电火花线切割加工过程数据采集平台构建

2.1 加工过程能耗检测原理

能耗检测原理如图 1 所示。现有的电火花线切割机床加工多采用集中式供电方式,即机床的总电源唯一。电能由电源处经过唯一的通道传入机床,在机床内部根据机床自身的电路

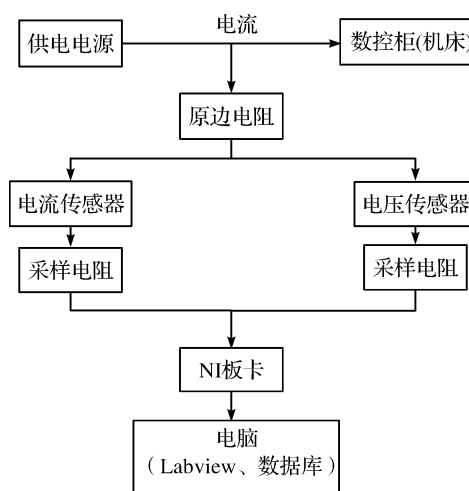


图 1 能耗检测原理

Fig. 1 Principle of energy consumption detection

系统分散式工作。在对这类供电电源唯一的机床进行能耗检测时,可通过硬件设备对其供电处的电流和电压值进行检测,并通过 LabVIEW 编程对所得电流电压值进行处理,即可得到整个加工过程中的实时总功率以及整个加工的总能耗,最后通过 MySQL 保存所采集的数据。其中电流信号的采集是通过电压采集板卡采集电流传感器处的电压信号,再通过公式运算,利用 LabVIEW 程序将其转换为电流值,此种方案相较于直接使用电流数据采集卡更加实惠。

2.2 数据采集平台硬件设计

数控电火花线切割机床能耗采集平台的硬件系统以及相关电路包括电能信号转换系统和电能信号采集系统两部分。其中电能信号转换系统主要由原边电阻、传感器、采样电阻、传感器电源、连接电路组成。电能信号采集系统主要由数据采集板卡和电脑组成。平台电路原理如图 2 所示。

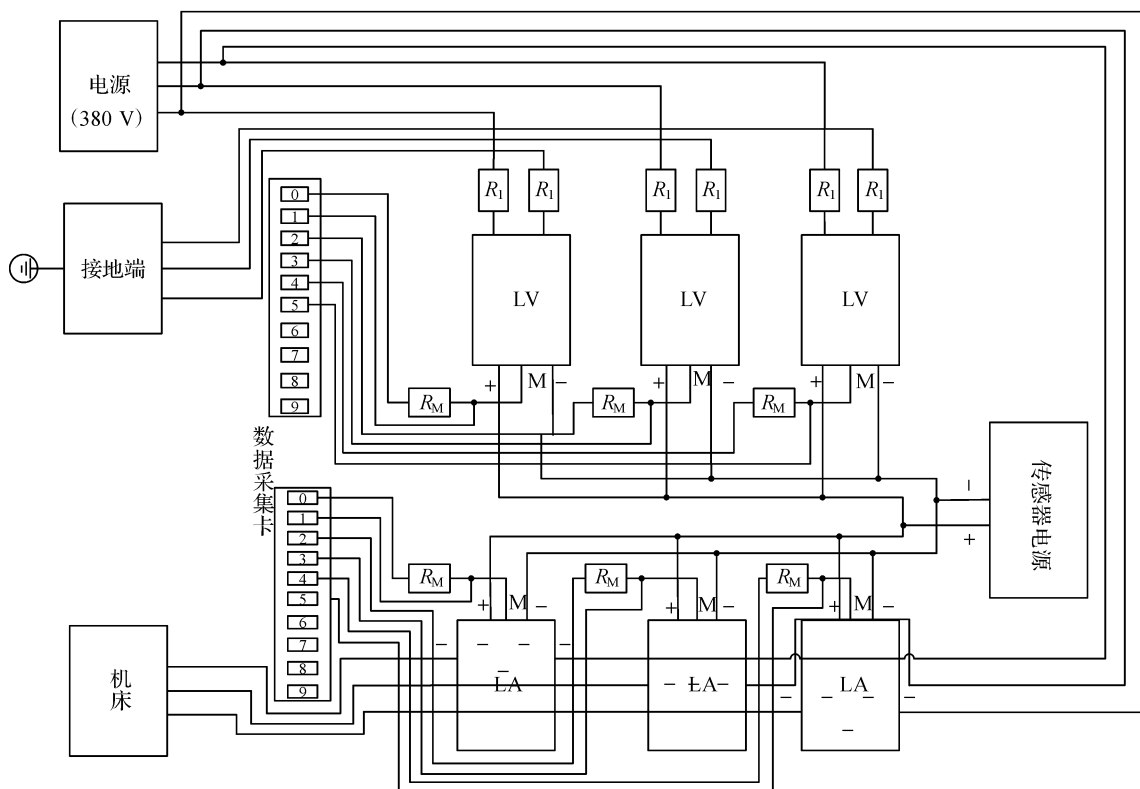


图 2 平台电路示意

Fig. 2 Platform circuit schematic

图 2 中硬件可分为电流信号采集和电压信号采集两部分。其中电流信号采集部分中,导线一端通过插头直接与电源连接,导线按电流方向穿过电流传感器(LA)内部,另一端与机床连接。电压信号采集部分中的电压传感器(LV)上引脚部分通过原边电阻 R_1 分别与电源和接地端相连。其中采样电阻 R_M 与电流(电压)传感器 M 端口连接,采样电阻的前端与数据采集板卡的偶数端口相连,采样电阻的后端与数据采集板卡的奇数端口相连。传感器由传感器电源统一供电,传感器电源型号根据传感器型号而定。

根据机床具体的电流、电压性能参数的不同,所需的电压、电流传感器也不同。鉴于中国的工业用电电压为 380 V,因此硬件中的电压传感器应具备如下性能:测量最大电压值为 537 V,数据采集速度大于 2 000 次/s。电流传感器应具备如下性能:测量最大电流值大于 $P_{pc}/380/\sqrt{3}/0.9$,数据采集速度大于 2 000 次/s,精度大于 1%。其中 P_{pc} 为机床的功率容量,根据机床不同其值也不同。因此,可测电流范围根据功率容量而发生变化,可测电流范围根据可测最大电流而定。

本平台选用的数据采集板卡模拟输入分辨率为 16 bit,支持 4 路同步采样模拟输入,最高采样率为

100 000/s 个数据,可接受电压信号范围为 $-10\sim 10$ V。硬件系统中的原边电阻 R_1 的作用是将输入平台的电压降至传感器可接受范围之内,其型号可根据具体的电压传感器的额定电压选取。采样电阻 R_M 的型号根据数据采集板卡可接受的信号范围而选取为100。

平台采集到的电压电流值是经过原边电阻以及采样电阻降低之后的值,因此在程序中,需要通过对采集到的值乘以一定的倍数才能得到机床实际的电压电流值。采集值与实际值之间的关系见式(1)和式(2)。

$$\frac{u_{in}}{u_{out}} = \frac{2R_1}{(R_M \times K_N) I_{in}}, \quad (1)$$

$$\frac{u_{out}}{I_{in}} = R_M \times K_N. \quad (2)$$

式(1)~(2)中: u_{in} 为机床实际电压值; u_{out} 为设备采集到的电压值; R_1 为原边电阻阻值; R_M 为采样电阻阻值; K_N 为传感器的转换率; I_{in} 为机床实际电流值; I_{out} 为设备采集到的电流值。

2.3 平台软件编程

本平台采用LabVIEW进行程序编写。程序用于对数据进行采集、处理以及保存,主要包括前面板的设计以及程序框图的编写。如图3所示,程序部分的整个前面板分为输入控制区和显示区。界面的左侧为输入控制部分,包括:数据通道的选取,每个数据板卡有4组通道,设备供电为三相输入,因此每个板卡需选取相应的3组通道;有效信号的范围设置,本平台选用的数据板卡所接受的电压信号范围为 $-10\sim 10$ V;数据采集频率、样本读取值以及数据采集的启动与停止。界面右侧为显示区,包括:总功率曲线图,显示整个加工过程的功率变化;分段功率曲线图,用于查看某一时段的功率特性;总能耗曲线图、实时电流电压波形图,分别有3条曲线,每条曲线代表每个相线上的实时电流、电压值。

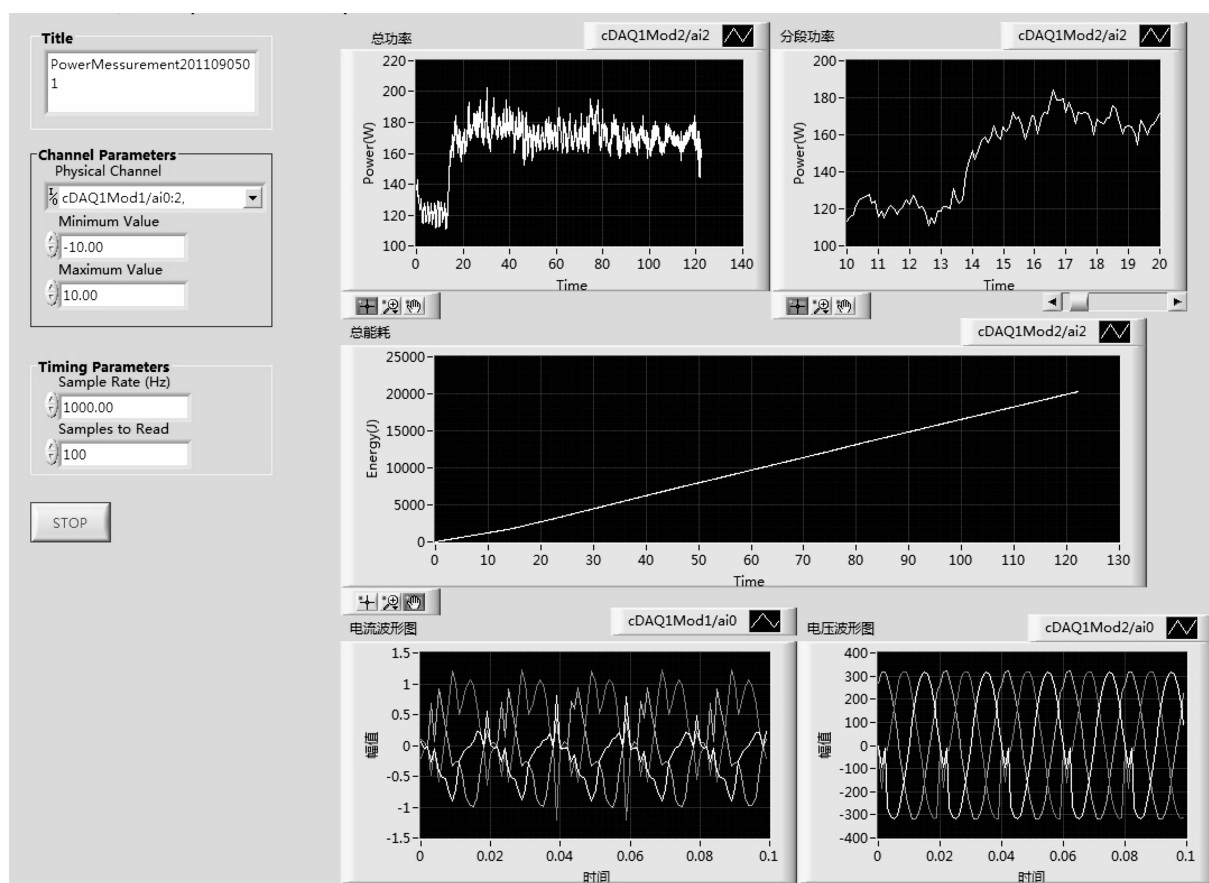


图3 系统程序前面板

Fig. 3 Program front panel

能耗采集程序流程以电流、电压数据流的处理为导向,包括数据通道模块以及相关参数的设置,对采集到的电信号处理、相关功率和能耗的计算显示和存储,如图 4 所示。

程序的编写以 while 循环为主体。对采集到的电信号进行分流以及显示。通过 for 循环对电信号进行相乘并添加到空的数组生成实时功率,对生成的功率进行积分并添加到空的数组中生成相应的能耗值。同时通过数据库板块对功率及能耗值进行储存。

3 数控电火花线切割加工过程能耗特征分析

3.1 能耗测试方案

本次平台的测试对象选取 DK7740 数控中走丝电火花线切割机床。该机床为单一电源供电,满足平台测试要求。该机床输入电压为三相 380 V 工业用电,功率容量为 3 kVA,最大输出电流为 5.064 48 A。

根据被测试对象电压电流性能参数,选择的电流传感器和电压传感器具体参数如表 1 所示。

表 1 传感器参数

Table 1 Parameters of sensor

设备名称	型号	额定电流/电压	供电电源/V	转换率 K_N
电流传感器	LA55-P	50 A	$\pm 12 \sim 15$	2.5
电压传感器	LV25-P	10.500 V	$\pm 12 \sim 15$	0.001

根据表 1 传感器的参数以及前文所述的数据采集卡的有效信号值范围,确定所需原边电阻 R_1 可选取为 22 k Ω 。根据所选传感器确定传感器电源具备如下条件。

LV25-P 对电源的要求:电压输入 ± 15 V,最大电流消耗 $I_{\max} = I_{SN} + I_c = 10 + 25 = 35$ mA。

LA55-P 对电源的要求:电压输入 ± 15 V,最大电流消耗 $I_{\max} = I_{SN} + I_c = 10 + 50 = 60$ mA。

因此传感器部分对电源的要求:电压输入 ± 15 V,带有 0 V 电势点,最大电流消耗 $I_{\max} = 35 \times 3 + 60 \times 3 = 285$ mA, $P_{\max} = 4.275$ W。

根据式(1)和式(2),以及 $R_1 = 22$ k Ω , $R_M = 100$ Ω ,可得 $u_{in} = 176 u_{out}$, $I_{in} = 10 u_{out}$ 。因此,对相应的参数值进行设置,如图 5 所示。

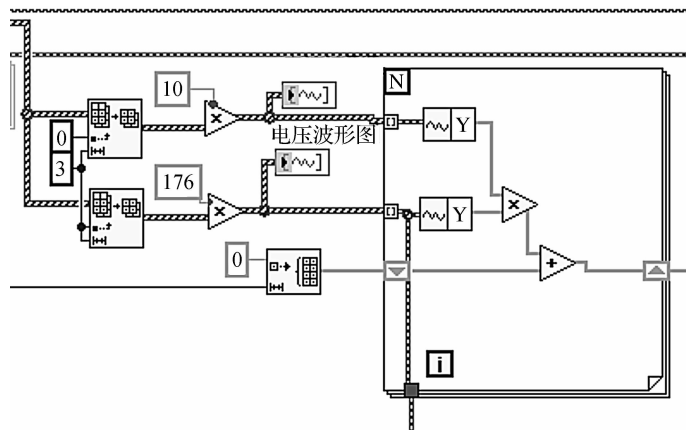


图 5 电流、电压参数设置

Fig. 5 Parameters of current and voltage

此外,针对数据需求可自行设置数据采样频率等其他参数,如 Minimum Value = -10.00、Maximum Value = 10.00、Sample Rate = 1 000 Hz、Samples to Read = 100。

试验过程中采集的主要数据为实时电压信号、实时功率等数据,通过对电压、功率以及能耗数据的直

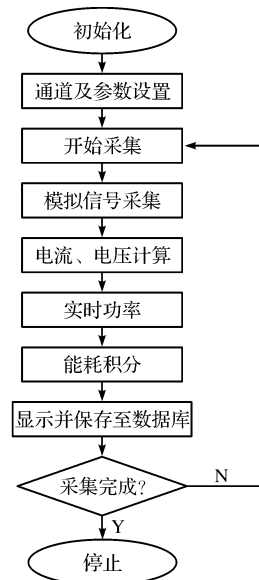


图 4 能耗采集程序流程示意

Fig. 4 Flow chart of energy consumption acquisition process

接采集,可以较为直观地对其进行分析处理。本试验方案中的线切割对象如图6所示,该工件材料为:Q235-A钢,长200 mm,宽70 mm,厚4 mm。加工路径为沿Y轴正水平切割,加工距离为75 mm、实际切割70 mm(加工轨迹如图6虚线所示,图中单位均为mm)。

3.2 加工过程能量消耗特征分析

对平台所采集的功率、能耗数据进行处理之后,可以分析并得到面向DK7740在加工过程中的主要能量消耗情况及特性。

电火花线切割机床启动到加工之前的功率如图7所示,在机床接通电源的瞬间,功率会产生一定幅度的波动。机床正式启动时,功率瞬间可达到1 620 W。数控柜电脑启动时,总功率明显上升,并保持稳定。启动BMXP驱动程序时功率会出现小幅波动。运行工作液系统后,功率上升并保持稳定。运行送丝机构后,功率上升并保持稳定。当开始正式加工时,功率出现瞬时波动。随着工件与电极丝距离的减少,二者之间逐渐形成通路,电流逐渐增加,此时功率逐渐增加,直到正式加工。根据以上所述,该能耗采集平台能够较为精确地采集到机床在加工过程中的细微功率变化,且能匹配相应的加工状态。通过试验数据可以分析得到,在机床进行任何操作之前,机床功率保持稳定状态,其能耗特性稳定。

分析整个加工过程所获得的功率曲线,如图8所示,可以将整个加工过程划分为基础运行、运丝机构、冷却液系统、材料去除等主要过程。分析得到在短期加工过程中,线切割加工的材料去除能耗与其他辅助部分的能量消耗相对占比较少。在短期加工过程中,线切割材料去除能耗与材料类型、加工的轨迹以及加工时间、工件表面具有较强的关联度。当各类参数相对稳定时,其材料去除能耗也稳定在一个相对恒定的范围内,并维持微小波动。

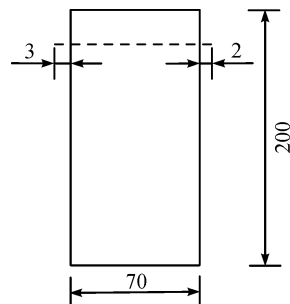


图6 试验工件尺寸
Fig. 6 Dimension figure of test workpiece

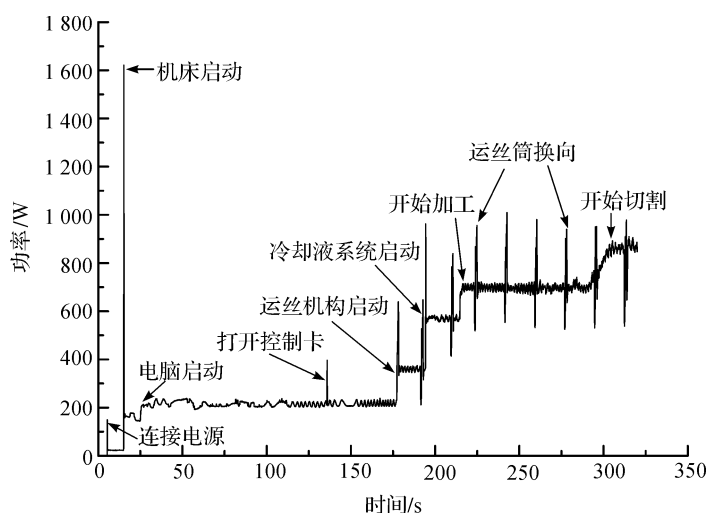


图7 DK7740 初始加工过程的功率特性

Fig. 7 Power characteristics of the initial processing in DK7740

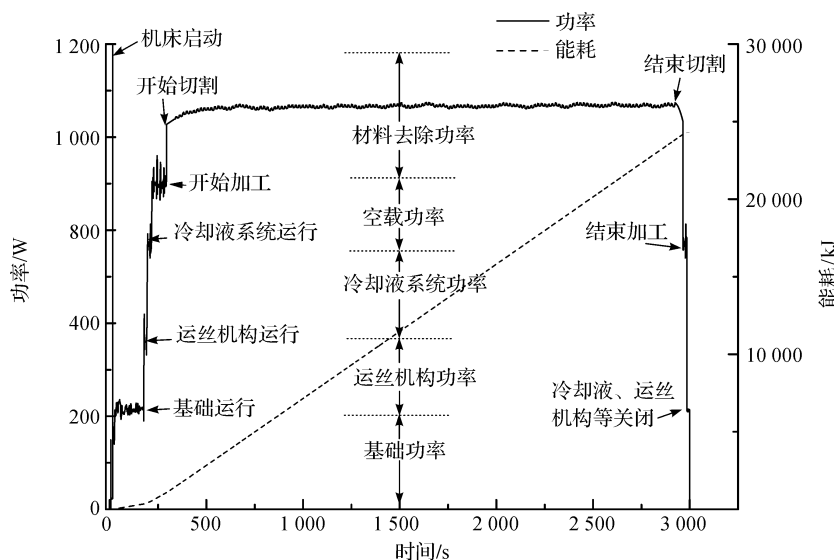


图8 DK7740 加工过程的功率、能耗曲线

Fig. 8 Power and energy consumption curve during processing of DK7740

加工过程中具体功率以及相应的加工状态见表 2。

表 2 加工过程数据
Table 2 Processing data

时间/s	运行状态	平均功率/W	能耗/kJ
0	接通电源	149.214	
15.2	机床启动	1 620.861	
15.3~175.6	机床基本运行	211.681	
175.7~193.1	运丝机构运行	358.228	
193.2~215.7	冷却液系统运行	566.448	24 322.066
215.7~293.5	开始加工状态	700.385	
293.6~2964.1	实际切割	864.718	
2 964.2~2 985.1	加工完成	574.302	
2 985.2~2 998.8	冷却液关闭(运丝机构继续运行)	212.733	
2 998.9	机床关闭	0	

根据试验平台测试分析所获得的数据,可以进一步分析线切割加工过程中辅助部分的能量消耗情况,其中冷却液系统采用固定水泵供能,以相对稳定的功率运行。运丝系统中功率的变化主要以丝速的设置为主。丝速的设置关系着加工质量与加工速度,不同的丝速所产生的能耗不同。图 9 中,分别是 DK7740 相应的 4 个丝速档位下运丝系统的功率。通过分析可以得到,随着丝速增加,该部分功率呈阶梯状上升,且换向周期逐渐缩短,换向时功率波动也越大。因此随着丝速的增加,整体能耗将增加。

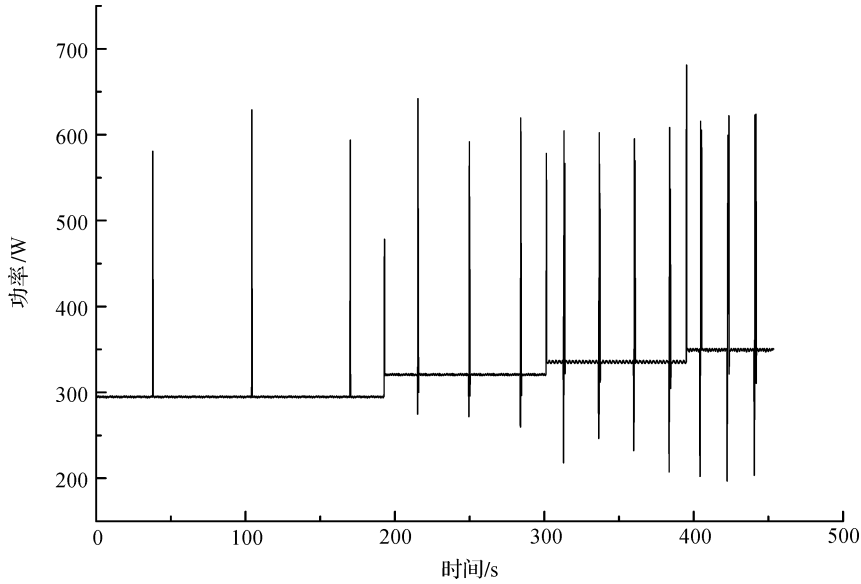


图 9 DK7740 运丝机构丝速与功率关系曲线

Fig. 9 Relation between wire speed and power of thread feeding mechanism of DK7740

进给系统的作用主要是通过电机带动工作台的进给实现各种轨迹的形成。其能耗与进给速度以及实时的材料去除状态有关。常见的加工轨迹有直线(水平、竖直)进给、斜线进给、圆弧进给。其中直线进给时只需要单一方向上的电机工作。斜线进给时根据角度的不同,X、Y 方向上的速度也不同,当斜线倾角为 45°时,X、Y 方向上所提供的速度相同。圆弧进给时,根据圆弧曲率的不同,X、Y 方向上也需要以不同的速度进给。整个进给过程中功率根据不同的进给需求而变化。图 10 为 3 种常见特征进给时的功率曲线。通过分析得到,工件的加工轨迹对能耗会产生一定的影响,且在同一加工限速下,单独的 X 或 Y 方向进给时能耗最低,斜线、弧线进给的能耗相对较高。

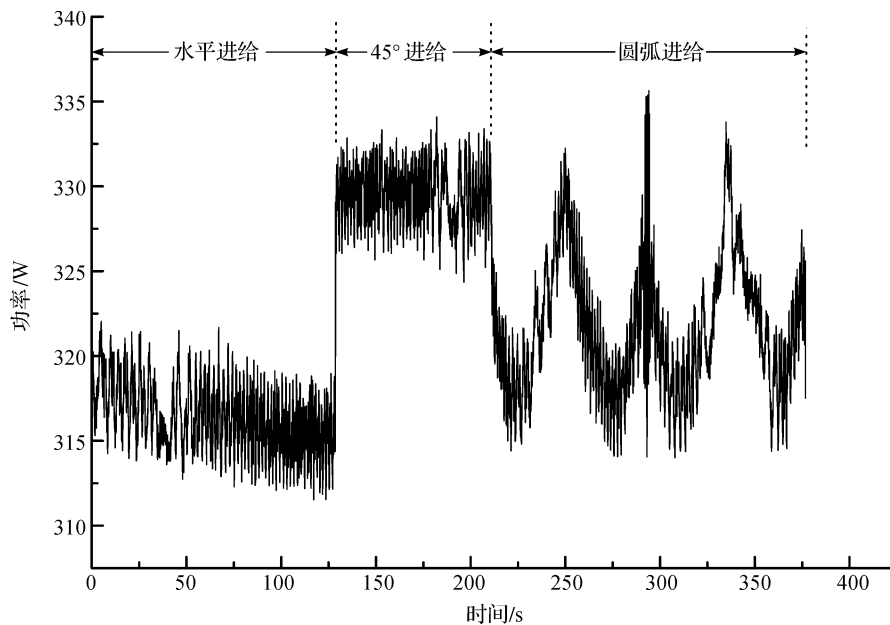


图10 DK7740不同进给下的功率曲线

Fig. 10 Power curve of DK7740 under different feeds

4 结 论

笔者从整体加工能耗的角度,提出了一种数控电火花线切割机床加工总能耗采集平台,以及对它的实际应用。通过具体的机床实例,有效地验证了平台的可靠性。并通过对采集到的实际加工数据以及机床空运行过程中的部分能耗进行分析,得出如下结论:

- 1)电火花线切割加工的材料去除能耗与其他辅助部分的能量消耗相比占比较少。当各类参数相对稳定时,其材料去除能耗也稳定在一个相对恒定范围内,并维持一定的微小波动。
- 2)电火花线切割加工辅助运动中的运丝系统的能耗受丝速影响,且丝速越高,能耗越大。
- 3)进给系统的能耗受加工轨迹特征影响,且单独X、Y方向上的进给时,能耗最低。

通过以上分析可以确定电火花线切割机床自身的能耗影响因素,尤其是针对特征进给对能耗的影响,可以在设计加工阶段起到减少能耗的作用。后续可以针对电火花线切割材料去除能耗的组成、影响因素及其优化路径等展开深入研究。

参考文献:

- [1] 周济. 智能制造:“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2274.
- [2] MORFELDT J, SILVEIRA S. Capturing energy efficiency in European iron and steel production: comparing specific energy consumption and Malmquist productivity index[J]. Energy Efficiency, 2014, 7(6): 957.
- [3] 王秋莲, 刘飞, 奚道云. 机械加工过程能效评价标准的内容框架和评价方法[J]. 机械工业标准化与质量, 2014(10): 24.
- [4] GUTOWSKI T G, BRANHAM M S, DAHMUS J B, et al. Thermodynamic analysis of resources used in manufacturing processes[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(5): 1584.
- [5] WOLF M I, COLLEDANI M, GERSHWIN S B, et al. A network flow model for the performance evaluation and design of material separation systems for recycling[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2013, 10(1): 65.
- [6] EBERSPAECHER, DIETMAIR A, VERL A, et al. Model-based energy consumption optimisation in manufacturing system and machine control[J]. International Journal of Manufacturing Research, 2011, 6(4): 380.
- [7] DUFLOU J R, SUTHERLAND J W, DORNFELD D, et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: a processes and systems approach[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(2): 587.

(下转第229页)