

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.0014

电热式变模温注塑模具热响应辅助分析程序开发^{*}

周杭超, 姜少飞, 李吉泉^{*}, 徐伏宇

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对快速变模温注塑成型模具热响应分析复杂问题,对电热式变模温注塑模具热响应作了研究,采用随形加热系统设计方案,将复杂的电热式变模温注塑模具简化为单个加热细胞单元,以电热元件的规格和布局为设计变量,以加热时间和型腔表面温差为热响应指标,结合 Matlab 图形界面开发模块和 ANSYS 有限元分析软件,开发了基于加热细胞单元的电热式变模温注塑模具热响应辅助分析程序,并对其准确性做了验证分析。研究表明,该辅助分析程序可以较好地预测模具的加热效率和型腔表面温度均匀性,可为电热式变模温注塑模具的设计、分析一体化提供一条快捷和高效的途径。

关键词:电热式变模温注塑模具;结构设计;参数化建模;有限元分析

中图分类号:TP391.77;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0573-06

Development on thermal response aided analysis program of electrical rapid heat cycle molding mold

ZHOU Hang-chao, JIANG Shao-fei, LI Ji-quan, XU Fu-yu

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the complex thermal response analysis of rapid heat cycle molding (RHCM) mold, the thermal response of electrical rapid heat cycle molding (ERHCM) mold was studied. Based on the method of conformal heating system design, a complex ERHCM mold was simplified as a single heating cell unit for thermal response analysis. Then, combined with matlab graphical interface module and ANSYS software, a thermal response aided analysis program of ERHCM mold based on heating cell units was developed, in which the specifications and layout of electrical heating element were the design variables, the required heating time and cavity surface temperature difference were the thermal response index. Moreover, the accuracy of the program was evaluated. The results indicate that this thermal response aided analysis program can well predict the heating efficiency and cavity surface temperature uniformity and provides a fast and efficient way in the integration of ERHCM mold design and analysis.

Key words: electrical rapid heat cycle molding (ERHCM); structural design; parametric modeling; finite element analysis(FEM)

0 引言

传统注塑制品已愈来愈难以满足人们对注塑制品力学性能、外观质量等方面越来越高的要求^[1-2]。快速变模温注塑成型(RHCM)技术是这些年来发展起来

的一种新注塑成型技术,该技术可消除产品表面的熔接痕、流痕、浮纤等缺陷,提升制品表面质量^[3-4]。RHCM 成型工艺与传统注塑成型工艺最大的不同之处在于,在聚合物熔体填充前模具型腔表面的温度被快速地加热到注塑制品材料玻璃化转变温度之上^[5]。

收稿日期:2015-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375451;51205357);浙江省自然科学基金资助项目(LY15E050015)

作者简介:周杭超(1990-),男,浙江桐庐人,主要从事变模温注塑模具结构设计与优化。E-mail: 1183791214@qq.com

通信联系人:李吉泉,男,副教授,硕士生导师。E-mail: hutli@163.com

为了研究 RHCM 模具中特殊的温度历程,提高 RHCM 模具的加热效率和改善模具加热完成后的型腔表面温度均匀性,国内外的一些学者对此做了相关方面的研究。王桂龙等^[7]根据快速变模温注塑工艺要求和模具结构特点,建立了 RHCM 注塑模具加热系统优化设计模型,利用自主研发的多目标粒子群算法对目标函数进行了非线性优化,最终实现了 RHCM 注塑模具加热系统的优化设计。王梦寒等^[7]以大尺寸空调塑料面板过热水辅助快速变模温模具为原型,提出了一种综合有限元分析、响应曲面法、多目标优化算法和帕累托最优决策技术的 RHCM 注塑模具加热管道设计方法,最终获得了最优的管道设计方案,以满足加热效率和型腔表面温度均匀性要求。Xiao 等^[8]以 RTCM 注塑模具为例,结合试验设计、有限元分析、响应面代理模型、人工神经网络以及帕累托遗传算法来解决多目标优化模型,其中以加热元件的空间参数为设计变量,所需的加热时间和最高型腔表面温度为目标函数。结果表明,优化的设计参数明显地提高了模具型腔表面温度的分布均匀性和加热效率。

在上述快速变温注塑模具设计的研究中,设计者需要进行多次建模并分析,获得相应模具型腔表面温度响应,从而进行模具加热系统空间管道布局的设计,以满足模具加热效率和型腔表面温度均匀性要求。该过程建模分析工作量大,重复度高,设计周期长。

本研究以电热式变模温注塑(ERHCM)模具为研究对象,将复杂的 ERHCM 注塑模具简化为单个加热细胞单元,集成 Matlab-GUI 开发模块和 ANSYS 参数化 APDL 设计语言来分析单个加热细胞单元的热响应,获得加热所需的时间以及加热完成后型腔表面的温度差,以满足 ERHCM 注塑模具加热系统设计需求。

1 模型简化及参数设计

在 RHCM 注塑模具中,模具的加热效率和加热后模具型腔表面温度均匀性是加热系统设计的两个重要技术指标,前者影响注塑制品的生产效率,后者影响注塑制品的成型质量。对于 ERHCM 注塑加热系统来说,电热棒的规格和布局对模具的加热效率和加热后模腔表面的温度分布均匀性有着决定性的影响。为了保证模具型腔表面快速、均匀的加热,ERHCM 注塑模具中的电热棒应尽量安排在距离型腔壁的较近处,且管间距尽量小,从而减少需要加热和冷却的模具型腔/型芯的体积,并且每个电热棒管道中心距型腔表面的

距离相同,称之为随形加热系统设计方法^[8-9]。加热过程中,模具型腔板中热量传递的快速响应主要局限于相邻电热棒周围的小范围内,各加热棒的热响应相似,并且模具冷却管道中冷却水在加热之前已经通过空气压缩机被排除。因而,ERHCM 注塑模具可以简化为由多个加热细胞单元组成的整体,对其热响应的研究可以转换为对单个加热细胞单元热响应的研究,电热变模温加热细胞单元结构示意图如图 1 所示。

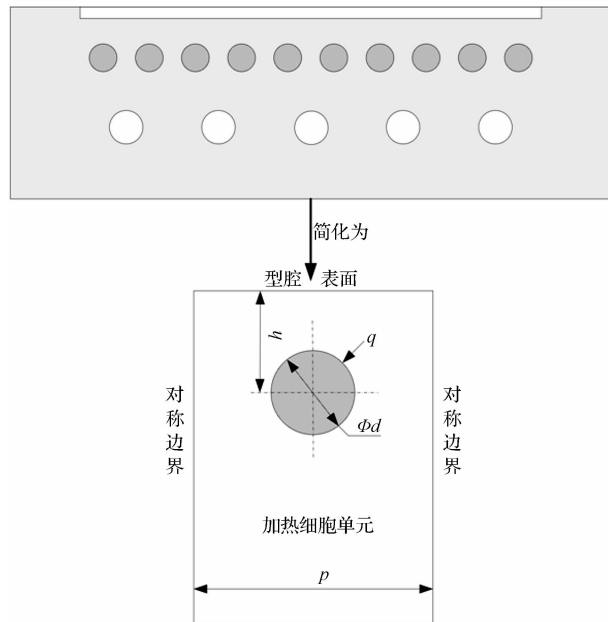


图 1 电热变模温加热细胞单元结构示意图

d —电热棒的直径, q —电热棒的功率密度, h —电热棒至型腔表面的距离, p —相邻电热棒间的中心距。

图 1 中, d, q, h, p 这 4 个参数也是影响 ERHCM 注塑模具加热效率以及模具型腔表面温度均匀性的重要因素。基于图 1 中的加热细胞单元,加热效率可以用模具型腔表面被完全加热到 ERHCM 注塑成型工艺所要求的温度(T)时需要的时间(t)来表示, t 值越小,表示的是该 ERHCM 注塑模具的加热效率越高,反之亦然。加热阶段,由于加热的结束标志为模具型腔表面的最低温度达到 ERHCM 成型工艺要求的温度(T),故模具型腔表面温度均匀性可以用加热结束时模具型腔表面的最高温度与 ERHCM 成型工艺要求的温度之差(ΔT)来表征。

电热棒的规格和布局对 ERHCM 注塑模具加热系统的设计有重要的影响。在 ERHCM 注塑模具加热系统过程中,综合考虑模具的加热效率、型腔表面温度均匀性、模具的结构强度以及模具的制造成本等其他因素,其设计参数取值范围如下:电热棒的直径 d 在 4 mm ~ 8 mm 之间;电热棒的功率密度 q 在 10 W/cm²

~40 W/cm² 之间;电热棒至型腔表面的距离 h 取值范围为 8 mm~16 mm,其约为电热棒直径 d 的 1~2 倍;相邻电热棒间的中心距 p 取值范围为 12 mm~28 mm,其约为电热棒直径 d 的 2.5~3.5 倍^[10]。根据常用注塑制品所用材料的玻璃化转变温度,加热后模具型腔表面所需的温度 T 一般在 80 ℃~120 ℃ 之间。

2 辅助分析程序的开发

辅助分析程序的开发的大致过程如下:首先通过 ANSYS 创建 ERHCM 注塑模具热响应分析模型的参数化 APDL 代码(如图 2 所示),然后在 Matlab-GUI 中对热响应分析模型的参数化 APDL 代码进行编译,最后对分析程序进行打包生成可执行程序。本研究利用 Matlab 对 ANSYS 参数化建模程序进行封装的 ERHCM 注塑模具热响应分析系统结构图如图 3 所示。用户输入设计参数并确认执行后,便可自动后台调用 ANSYS 软件进行计算分析,然后后处理提取所需的结果数据,最后将计算结果返回到人机交互的图形界面显示。

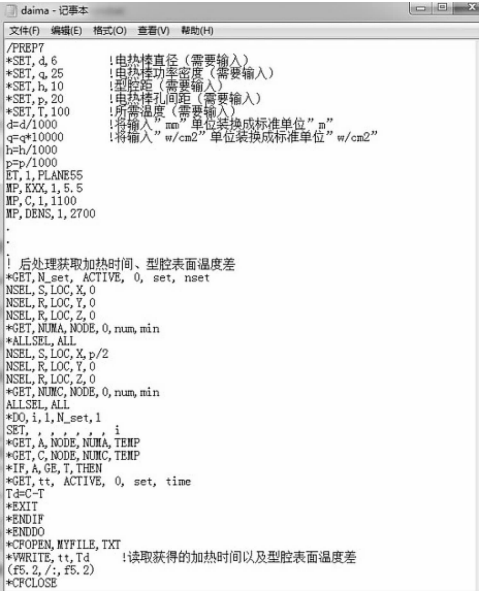


图2 参数化 APDL 代码文件

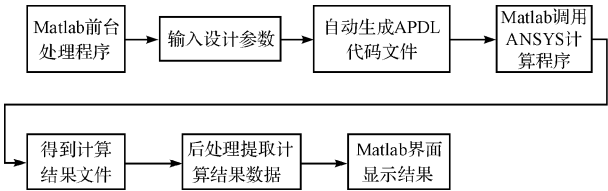


图3 ERHCM 注塑模具热响应分析系统结构图

2.1 程序开发编译

程序编译的第一步是使用 Matlab-GUI 模块构建热响应分析程序的 GUI 任务对象^[11-14]。Matlab-GUI

模块中包括很多可以使终端用户与软件交互的界面组件,因而用户可以通过 GUIDE 开发环境轻松地创建 GUI 任务对象,同时自动生成相应的 M 文件代码框架。在该 M 文件代码框架下,本研究通过 M 文件编辑器完成对各控件回调函数的后台程序的编译,最终获得相应的可执行分析程序。

ERHCM 注塑模具热响应分析程序编译逻辑图如图 4 所示,当中包含可编辑文本框控件回调函数、“计算输出”控件回调函数和“清空结果”控件回调函数。以下针对编译过程中的主要控件回调函数程序以及 Matlab 调用 ANSYS 程序作进一步的阐述。

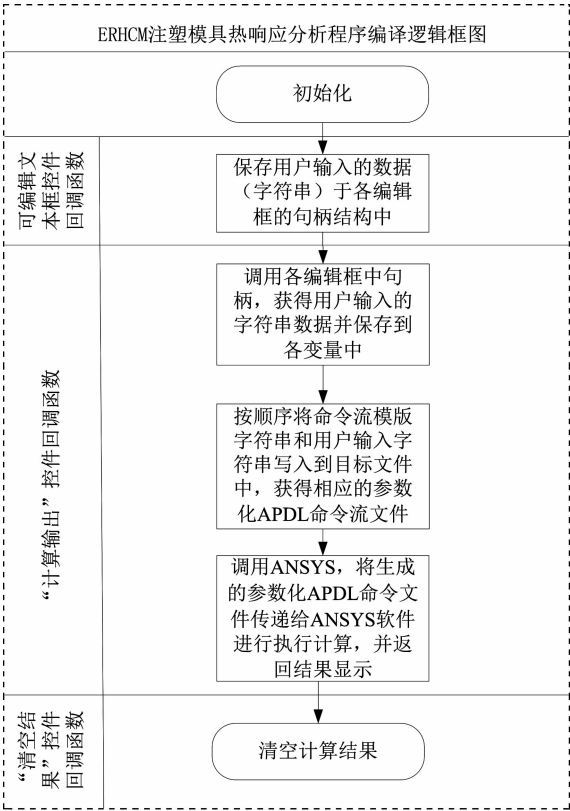


图4 ERHCM 注塑模具热响应分析程序编译逻辑框图

2.1.1 回调函数

(1) “参数化 APDL 代码存储路径”可编辑文本框控件回调函数

```
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
input = str2num( get( hObject, String' ) );
if( isempty( input ) )
set( hObject, String', 0' );
end
guidata( hObject, handles );
```

“参数化 APDL 代码存储路径”可编辑文本框唯一标识码(string) 属性值为 edit1,因而该回调函数命名为 function edit1_Callback() 函数,与文本框属性值

相对应。其中 hObject 为发生事件的源对象, handles 为传入的 GUI 数据。该回调函数的功能为将用户输入可编辑文本框中的字符串存储于句柄结构体中, 并且保证输入的字符串为数字, 使得在编译“计算输出”控件回调函数时可以被调用。

(2) “计算输出”控件回调函数

该编译过程中最核心的部分是“计算输出”控件回调函数的编写。该控件回调函数会通过调用全部文本框的 string 属性值用以修改参数化 APDL 命令流模版中与调用的 string 属性相对应位置的数据, 并最终生成相应的热响应分析模型参数化 APDL 命令流文件。下面以如何将参数化 APDL 命令流最初始部分的命令写入到目标文件中为例来说明该回调函数。

FINISH

/CLEAR, START

/COM, Thermal

/PREP7

* SET, d, 6 ! 电热棒直径

* SET, q, 25 ! 电热棒功率密度

* SET, h, 10 ! 型腔距

其中命令流“FINISH”、“/CLEAR, START”、“/COM, Thermal”、“/PREP7”、“* SET, d,”等字符串在 ERHCM 注塑模具热响应分析模型的参数化 APDL 命令流模版中固定不变, 可以直接写入到目标文件中。而“* SET, d, 6”中的“6”是电热棒的直径, 为可变字符串, 每次分析时都需要修改参数化 APDL 命令流模版中这部分由用户通过可编辑文本框输入的可变字符串, 因而在编程的过程中一定要严格区分需用用户输入的可变字符串和固定字符串。生成这部分参数化 APDL 命令流代码的回调函数程序如下:

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
fid = fopen('E:\matlabwork\daima.txt', 'wt');
```

```
fprintf(fid, '%s\n', 'FINISH');
```

```
fprintf(fid, '%s\n', '/CLEAR, START');
```

```
fprintf(fid, '%s\n', '/FILNAME, fenxi, 1');
```

```
fprintf(fid, '%s\n', '/TITLE, The analysis of fenxi');
```

```
fprintf(fid, '%s\n', '/COM, Thermal');
```

```
fprintf(fid, '%s\n', '/PREP7');
```

```
fprintf(fid, '%s', '* SET, d, ');
```

```
d = get(handles.edit1, 'string');
```

```
d1 = cell2mat(d);
```

fprintf(fid, '%s\n', d1); % 在文件中写入用户输入的电热棒直径字符串。

其中, cell2mat() 函数主要作用是将获得的元胞数组转换为一个单独的矩阵, 以便于在目标文件中写入需要用户输入的可变字符串。用户输入可编辑文本框“edit1”中的数值, 即输入的电热棒直径, 通过 get(handles.edit1, 'string') 命令会被存储在元胞数组中, 而 fprintf() 函数无法直接将元胞数组中存储的电热棒直径输出到目标文件中。如果不用 cell2mat() 函数将可编辑文本框中输入的数值由存储在元胞数组中转换为存储在单个矩阵中, 那么最后 fprintf() 函数输出为空值。

以上是核心语句的使用方法, 剩余部分的参数化 APDL 命令流代码需要用同样的方法逐行写入, 最后程序自动生成相应模型的参数化 APDL 命令流代码文件。

(3) “清空结果”控件回调函数

该控件用于在计算完成后清空结果显示文本框。用户单击“清空结果”按钮后, 就可以清空文本框中显示的加热时间和温度差结果, 以便于为下一次的计算分析做准备, 代码如下:

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
set(handles.text1, 'string', '');
```

```
set(handles.text2, 'string', '');
```

```
clear all;
```

2.1.2 Matlab 调用 ANSYS

ANSYS 软件提供了 batch (批处理) 运行方式, 这使得在其他程序中可以后台调用 ANSYS 软件。Matlab 调用 ANSYS 的程序如下:

```
!"D:\Program Files\ANSYS Inc\v145\ansys\bin\winx64\ANSYS145.exe" -b -p ane3fl -i E:\daima.txt -o E:\ansys\daima.out
```

其中: -b batch—软件运行模式; -p—软件代码 (用户可以在 ANSYS 帮助文件中获得); "D:\Program Files\ANSYS Inc\v145\ansys\bin\winx64\ANSYS145.exe"—安装地址; E:\daima.txt—生成的参数化 APDL 命令流文件地址; E:\ansys\daima.out—输出文本所在的位置, 输出文本包含了程序运行的有关信息。

2.2 最终分析程序的编译和发布

本研究采用 Matlab 的程序编译和发布功能, 通过其内置的编译发布工具箱生成通用的可执行程序。具体步骤是在 Matlab 命令窗口中输入 deploytool 命令, 调出编译工具窗口, 在该编译工具中导入需要发布的工程, 包括各种 .m 文件以及所需的 Matlab 组件运行环境 (MCR), 然后对其进行打包生成相应的可执行程序 FENXI.exe, 通过该工具可以快捷地编译发布该热响应辅助分析程序。

2.3 程序验证与分析

按照上述思路,本研究编制了 ERHCM 注塑模具热响应辅助分析程序,相应的程序编译代码如图 5 所示。

```
程序编译代码 - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
Function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
%生成相应模型的参数化APDL命令流代码文件
fid=fopen('E:\matlabwork\daime.txt','wt');
fprintf(fid,'%s\n','CLEAR,START');
fprintf(fid,'%s\n','/COM, Thermal');
fprintf(fid,'%s\n','/PREP7');
fprintf(fid,'%s\n','*SET,d,');
d=get(handles.edit1,'string');
d=cell2mat(d);
fprintf(fid,'%s\n',d1);
fprintf(fid,'%s\n','*SET,q,');
q=get(handles.edit2,'string');
q=cell2mat(q);
fprintf(fid,'%s\n',q1);
fprintf(fid,'%s\n','*SET,h,');
h=get(handles.edit3,'string');
h=cell2mat(h);
fprintf(fid,'%s\n',h1);
fprintf(fid,'%s\n','*SET,p,');
p=get(handles.edit4,'string');
p=cell2mat(p);
fprintf(fid,'%s\n',p1);

fprintf(fid,'%s\n','*GET,tt, ACTIVE, 0, set, time');
fprintf(fid,'%s\n','*ENDIT');
fprintf(fid,'%s\n','*EXIT');
fprintf(fid,'%s\n','*ENDOF');
fprintf(fid,'%s\n','*CPOFEN, MYFILE, TXT');
fprintf(fid,'%s\n','*WRITE, tt, Td');
fprintf(fid,'%s\n','(FS, 2, /; FS, 2)');
fprintf(fid,'%s\n','*CPCLOSE');
fclose(fid);
%后台自动调用ANSYS执行生成的APDL命令流代码文件
!D:\Program Files\ANSYS Inc\v145\ansys\bin\winx64\ANSYS145.exe" -b -p
ans3fl -i E:\matlabwork\daime.txt -o E:\matlabwork\daime.out
%分析计算获得的加热时间和型腔表面温差在界面的输出文本框显示
fid = fopen('E:\matlabwork\MYFILE.txt','rt');
A1 = fgetl(fid);
A2 = fgetl(fid);
fclose(fid);
set(handles.text1,'string',A1);
set(handles.text2,'string',A2);
guidata(hObject, handles);
```

图5 程序编译代码

为了验证该辅助分析程序的正确性和可靠性,本研究采用文献[15]中的一组试验设计值与该辅助分析程序获得的结果进行比较。文献[16]中电热元件的规格和布局的设计参数 d 、 q 、 h 、 p 分别是 6 mm、30 W/cm²、9 mm、20 mm,加热结束时模具型腔表面所需的最低温度要求为 120 ℃,加热时间 t 为 12.06 s,加热结束时型腔表面温度差 ΔT 为 12.79 ℃。设计者将上述的文献中的设计参数依次输入到 ERHCM 注塑模具热响应辅助分析程序框中,自动分析计算后可以获得所需的加热时间 t 为 12.51 s,加热结束时型腔表面温度差 ΔT 为 13.30 ℃,计算结果实例如图 6 所示。

该热响应辅助分析程序计算获得的结果与文献中的参考值误差在 5% 以内,表明该程序在一定程度上可以预测 ERHCM 注塑模具热响应情况。

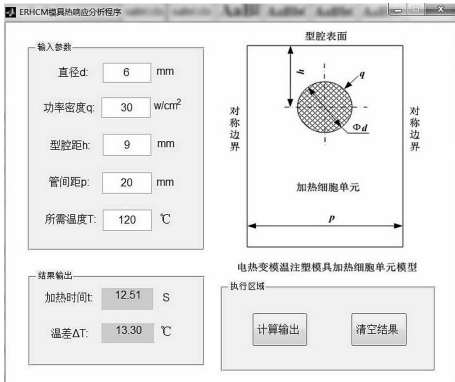


图6 计算结果实例

3 结束语

本研究将复杂的 ERHCM 注塑模具简化成了单个加热细胞单元,基于加热细胞单元开发了针对 ERHCM 注塑模具热响应分析的具有人机交互中文界面的辅助分析程序。本研究允许设计人员根据实际设计工况,输入设计参数,包括直径、功率密度、型腔距、型腔中心间距以及模具型腔表面最低要求的温度,获得相应的模具加热时间以及加热后型腔表面温度差。该辅助分析程序有助于设计者对于 ERHCM 注塑模具加热系统设计参数的修改,避免盲目的设计开发,进而减少试验设计次数,大幅缩短模具的开发周期。

需要说明的是,此处建立的 ERHCM 注塑模具热响应辅助分析程序并非是要取代实际热响应测试,而是将热响应分析结果提供给设计研究者,作为模具设计时的参考。在 ERHCM 注塑模具设计完成后,仍然需要将所设计的模具制作出来,并进行最终的热响应测试。

参考文献 (References):

[1] ZHAO P, WANG S, YING J, et al. Non-destructive measurement of cavity pressure during injection molding process based on ultrasonic technology and Gaussian process [J]. **Polymer Testing**,2013,32(8):1436-1444.

[2] ZHOU H M. **Computer modeling for injection moulding: simulation, optimization, and control** [M]. New York, John Wiley & Sons,2013.

[3] CHEN S C, JONG W R, CHANG J A. Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line [J]. **Journal of Applied Polymer Science**,2006,101(2):1174-1180.

[4] 王桂龙,赵国群,李辉平,等. 变模温注塑热响应模拟与模具结构优化[J]. 机械工程学报,2009,45(6):216-221.

[5] 李熹平. 快速热循环注塑模具及工艺关键技术研究[D]. 山东:山东大学模具工程技术研究中心,2010.

[6] WANG G, ZHAO G, LI H, et al. Research of thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding processes, respectively, with steam heating and electric heating [J]. **Materials & Design**,2010,31(1):382-395.

[7] WANG M, DONG J, WANG W, et al. Optimal design of medium channels for water-assisted rapid thermal cycle mold using multi-objective evolutionary algorithm and multi-attribute decision-making method [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2013,68(9-12):2407-2417.

- [8] XIAO C L, HUANG H X. Multiobjective optimization design of heating system in electric heating rapid thermal cycling mold for yielding high gloss parts [J]. **Journal of Applied Polymer Science**, 2014, 131(6): 596-602.
- [9] XIAO C L, HUANG H X. Optimal design of heating system for rapid thermal cycling mold using particle swarm optimization and finite element method [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2014, 64(1): 462-470.
- [10] ZHAO G, Wang G, Guan Y, et al. Research and application of a new rapid heat cycle molding with electric heating and coolant cooling to improve the surface quality of large LCD TV panels [J]. **Polymers for Advanced Technologies**, 2011, 22(5): 476-487.
- [11] 陈垚光. 精通 Matlab GUI 设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [12] 魏佳广, 孙 铁, 赵志海. 基于 Matlab GUI 技术的离心泵装置特性绘制软件二次开发[J]. 计算技术与自动化, 2010, 29(3): 27-30.
- [13] 蒙杨超, 董自安, 王 珂. 电液比例泵控马达系统辨识及实验分析研究[J]. 液压气动与密封, 2015, 35(3): 35-40.
- [14] 吴 侃, 于明礼, 李 明. 基于 Matlab GUI 的超声电机控制系统串口通信研究[J]. 机电工程, 2015, 32(11): 1471-1476.
- [15] WANG G, ZHAO G, GUAN Y. Research on optimum heating system design for rapid thermal response mold with electric heating based on response surface methodology and particle swarm optimization [J]. **Journal of Applied Polymer Science**, 2011, 119(2): 902-921.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

周杭超, 姜少飞, 李吉泉, 等. 电热式变模温注塑模具热响应辅助分析程序开发[J]. 机电工程, 2016, 33(5): 573-578.

ZHOU Hang-chao, JIANG Shao-fei, LI Ji-quan, et al. Development on thermal response aided analysis program of electrical rapid heat cycle molding mold[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016, 33(5): 573-578.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 565 页)

仿真与验证, 提前能够发现及避免加工中的撞刀、过切等错误, 确保转子实际加工过程中的可靠性。最后笔者给出了一份转子加工指导说明书和加工视频, 致力于能使新员工能更直观、全面地认识转子加工刀具的结构、性能和转子加工工艺顺序。研究期间, 在沃伦贝克 1 400 车床上用三维工艺替换了原先的纯纸质工艺, 试验结果表明, 即使是操作车床 2~3 年的操作工也能通过查阅说明书或者加工视频独立的完成转子的数控加工, 从而节约其学习成本和时间, 大大提高了转子的加工效率。

转子三维工艺项目是顺应公司降本增效、精益化生产, 跟上智能制造潮流的一项举措^[10-11], 首先在某台数控车床上试行, 进而推广到公司所有的数控机床, 实现公司产品加工的模块化、精细化、智能化, 增加公司在同行业领域中的竞争力。但是本研究只是三维工艺的前期探索, 探索中发现由于编程所用的刀具与实际加工刀具的不一致, 导致 Vericut 软件仿真验证时, 无论如何修改程序, 都不能解决过切残留问题, 该问题急需在下一阶段中进行解决。

参考文献 (References):

- [1] 张中伟, 田锡天, 黄利江, 等. 机加工工艺三维可视化表示与生成技术研究[J]. 制造业自动化, 2013, 35(2): 26-30.

- [2] 王英健, 刘立双. 复杂产品装配工艺规划与仿真技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2014(5): 32-35.
- [3] KAMAT V R, MARTINEZ J C. Visualizing simulated construction operations in 3D [J]. **Journal of Computing in Civil Engineering**, 2014, 15(4): 329-337.
- [4] KANAI S, SHIBATN T, KAWASHIMA T. Feature-Based 3D Process Planning for MEMS Fabrication (Special Issue on CAD, CAM, and Digital Engineering) [J]. **International Journal of Automation Technology**, 2014(8): 406-419.
- [5] 王海飞, 李铁钢. 基于 Edgcam 的结构件数控加工[J]. 装备制造技术, 2014(1): 110-111.
- [6] 陈 波, 赵福令. 基于 VERICUT 的数控加工过程仿真技术[J]. 机械设计与制造, 2006(6): 58-60.
- [7] 陈国芳, 徐立新. Unigraphics NX、Vericut 在汽轮机转子车削加工中的应用[J]. 汽轮机技术, 2006, 48(6): 477-478.
- [8] 冷进明, 桂启志. 转子数控加工自动编程及仿真系统开发[J]. 现代制造工程, 2007(2): 44-47.
- [9] 陈雅芳. 宏程序编程与 Vericut 仿真技术的结合应用[J]. 机电工程, 2013, 30(8): 963-966.
- [10] 傅建中. 智能制造装备的发展现状与趋势[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 959-962.
- [11] 张 铁. 工业机器人及智能制造发展现状分析[J]. 机电工程技术, 2014, 43(4): 1-3, 8.

[编辑: 李 辉]