

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.05.018

注塑模具随形冷却管道自动生成技术

王静¹, 吴浩杰²

(1. 浙江机电职业技术学院智能制造学院, 杭州 310053; 2. 宁波奇红电器有限公司, 浙江宁波 315312)

摘要: 作为一种新颖的水路结构, 随形水路以其优越的冷却效果在模具工程中得到了越来越多的应用。然而由于随形水路的特殊性, 其管道的创建过程并不容易。针对注塑模具随形水路传统设计方法中普遍存在的操作复杂耗时且易出错的问题, 受莲藕内部导管结构的启发, 结合实际模具工程中随形水路的设计要求, 提出了一种随形水路自动生成算法。该算法的基本思路是首先沿模具型芯高度方向建立一系列基准面, 作为切片层, 通过对模具零件进行分层切片, 获得每一个切片层上的型芯轮廓线。然后在每一个切片层上以指定管径按照逐点扫描的方法进行曲线干涉检查, 筛选出样条曲线的控制点, 并制定连线策略使用样条曲线依次连接各个切片层上的控制点, 从而获得样条曲线。最后以样条曲线作为管道扫描中心线, 扫描形成随形冷却管道实体。以 NX 为算法实现平台, 开发了随形水路自动设计系统与 NX 无缝衔接, 实例验证表明, 该方法大幅度缩短了设计时间, 减轻了设计人员的工作负担, 提高了随形水路的设计效率和质量。

关键词: 注塑模具; 模具设计; 随形水路; 随形冷却; 冷却系统

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)05-0121-07

Automatic generation technology of conformal cooling channels for injection mold

WANG Jing¹, WU Haojie²

(1. College of intelligent manufacturing, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China;

2. Ningbo Qihong Electrical Appliance CO., Ltd., Ningbo 315312, China)

Abstract : As a novel cooling channel structure, the conformal cooling channel has been increasingly applied in mold engineering due to its superior cooling effect. However, due to the particularity of the conformal cooling channel, the process of creating its pipes is not easy. Aiming at the common problems of complex, time-consuming, and error prone operation in traditional design methods for injection mold conformal cooling channel, inspired by the internal conduit structure of lotus roots and combined with the design requirements of conformal cooling channel in actual mold engineering, a conformal cooling channel automatic generation algorithm was proposed. The basic idea of this algorithm was to first establish a series of reference planes along the height direction of the mold core as slicing layers. By slicing the mold parts layer by layer, the contour lines of the core on each slicing layer were obtained. Then, on each slice layer, a curve interference check was performed using a point by point scanning method with a specified pipe diameter. The control points of the spline curve were selected, and a connection strategy was formulated to sequentially connect the control points on each slice layer using the spline curve, thereby obtaining the spline curve. Finally, a spline curve was used as the centerline for pipeline scanning to form a solid shape of the cooling channel. Using NX as the algorithm implementation platform, a seamless connection between the automatic design system of cooling channel and NX has been developed. Example verification shows that this method significantly shortens the design time, reduces the workload of designers, and improves the design efficiency and quality of shaped waterways.

Keywords : injection mold ; mold design ; conformal cooling channel ; conformal cooling ; cooling system

基金项目: 浙江机电职业技术学院 2022 年度校级科教融合重大研发孵化项目(A-0271-22-103)

通信作者: 王静, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为数字化设计、模具 CAD

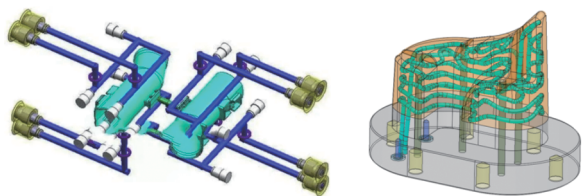
收稿日期: 2023-03-05

引用格式: 王静, 吴浩杰. 注塑模具随形冷却管道自动生成技术[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(5): 121-127.

WANG Jing, WU Haojie. Automatic generation technology of conformal cooling channels for injection mold[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5): 121-127.

冷却系统是注塑模具的重要组成部分,冷却液在模具内部开设的冷却水道中不断流动,将模具内多余的热量带走,从而保证模具温度控制在合适的范围。高效的冷却系统不但能够显著提高塑料制品的成型质量,而且能够大幅度缩短塑件的成型周期,提高生产率、降低生产成本^[1]。

传统的注塑模具冷却系统是以直管道的形式在模具内部纵横交错构成冷却回路,如图1a所示,由于受钻削加工的限制,这种水路结构的弊端在于它无法达到某些需要冷却的区域,因此其冷却效果难以达到最佳。随着3D打印技术在模具制造领域的深入应用,在模具中加工出“如影随形”的水路通道已是轻而易举的事情^[2-3],如图1b所示,随形水路正以其优良的冷却效果日益得到企业的广泛认可^[4-5]。然而,虽然通过3D打印技术加工出自由形状的随形水路已非难事,但设计出这种自由灵活变化多端的水路通道却是一项比较繁琐的工作。在整个设计过程中,设计人员不得不利用基本的曲线编辑命令,进行频繁互动操作,才能完成随形水路的设计,这期间存在的大量重复性的操作不但极其耗费时间,而且容易出错,即使经验丰富的工程师,无论技术水平如何,都无法简化这一设计过程。因此如何快速设计出随形水路是企业模具设计实践中亟待解决的问题,对其研究具有重要工程意义。



(a) Traditional cooling channel (b) Conformal cooling channel

图1 传统水路与随形水路

Fig. 1 Traditional cooling channel and conformal cooling channel

由于工程中塑件结构的极其复杂和不可预测性,随形水路的设计很难像传统水路那样有着比较固定的套路和标准^[6-8],整个设计过程充满了不确定

性和创新性,这引起了众多研究者的无比兴趣,人们总是试图在其中寻找某些规律以达到快速设计的目的,为实现随形水路的快速设计,研究人员从不同角度,基于各种理论提出了一系列设计方法和算法,实现了包括螺旋线形^[9-10]、Zigzag形^[11]、轮廓线形^[12-14]和仿血管形^[15-16]等在内的诸多随形水路结构的自动生成,在理论探索和实践方面都取得了长足的进展。但现有大多数关于随形水路设计的研究偏重理论,可操作性不强,尤其是面向通用设计平台的算法实现更是鲜见,无法实际满足企业的现实需求。为提高注塑模具随形水路设计的效率和质量,笔者在莲藕内部导管结构的启发下,结合随形水路“如影随形”的自身特点,提出了一种随形水路的自动生成方法,通过对模具零件进行切片分层,依次找出各层中的控制点,通过样条曲线连接控制点生成轨迹线,然后通过扫描形成冷却管道实体。在应用广泛的NX三维软件平台上开发了随形水路自动生成系统,可针对模具零件的随形水路进行快速设计。

1 基本原理

莲藕是日常生活中一种常见的食材,如图2a所示,它生长在水底的淤泥中,莲花是莲藕的花,它在水面上开花。如果沿着横截面将莲藕切开,如图2b所示,就会发现莲藕内部并非实心,而是有许多通孔,这些通孔被称为导管。导管在莲藕的横截面上大致呈现均匀分布且互不干涉,它们贯穿整根莲藕,其自由形状随莲藕外形轮廓的变化而变化,就像人类的血管一样,它承担着为植物输送水分和营养的角色。

观察莲藕内部的导管结构,并与注塑模具随形水路相比较,可以发现两者在一定程度上具有类似之处,其对比见表1。

莲藕内部的特殊结构为构建随形水路模型提供了新颖的思路,考虑到两者的差异,在具体转换思路时,还需结合注塑模具冷却系统设计的实际情

表1 莲藕导管与随形水路对比

Tab. 1 Comparison between lotus root conduit and cooling channel

Item	Lotus root conduit	Cooling channel
Section shape	Similar to a circle	Circular or similar circular shape
Distribution	Uniform distribution	Uniform distribution
Location	Near the outer surface of lotus root	Tightly adhere to the mold surface
Whether to interfere	Non-interference	Non-interference
Spatial shape	Undulating with the shape of lotus roots	Varying with the undulation of the mold surface
Surface smooth or not	Smooth	Smooth

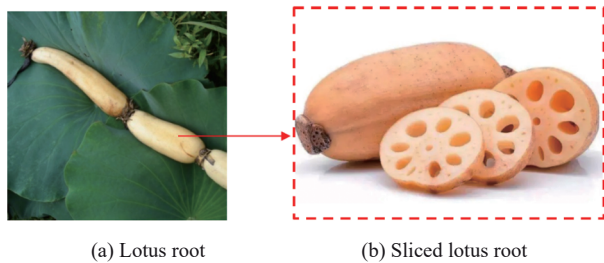


图2 莲藕示意图

Fig. 2 Lotus root diagram

况,注意几个关键问题:

(1) 均匀分布。从截断面来看,莲藕导管均匀布置且尽量靠近外层表面;随形水路通道也只有均匀布置在模具型面四周才能获得最佳的冷却效果。

(2) 避免干涉。莲藕导管无论空间多么狭小,都没有彼此干涉,同样随形水路也不能出现干涉、交叉情况。

(3) 折弯。莲藕所有导管自下向上,并行排列,没有彼此连通;随形水路则需要实行串联结构,才能构成冷却通道,因此必须考虑水路末端的连通问题。

(4) 随形。莲藕导管的整体空间形状随着莲藕外形结构变化而变化的;随形水路也需要考虑到这一点,才能够达到最佳的冷却效果。

(5) 进出水口的设置。随形水路需要设置进水口和出水口的位置,以符合模具工程需要。

2 基本思路

受莲藕内部结构的启发,提出了一种自动生成随形冷却通道的方法,其基本思路如图3所示:

步骤1:沿模具型芯高度方向建立一系列基准面,作为切片层;

步骤2:将基准面与模具型芯相交,得到各个切片层上的相交轮廓线;

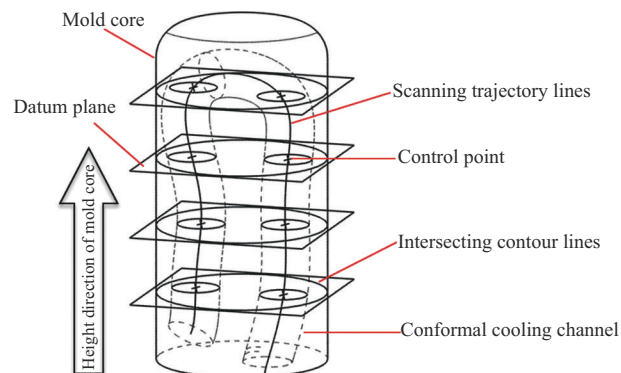


图3 水路生成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cooling channel generation

步骤3:通过干涉检查,获取位于各个切片层上的控制点;

步骤4:使用样条曲线依次连接各个切片层上的控制点,形成扫描轨迹线;

步骤5:选择扫描轨迹线,使用管道扫描形成随形冷却通道;

根据这一基本思路,可设计一系列复杂算法来实现随形冷却通道的自动生成,系统的整个生成流程如图4所示。

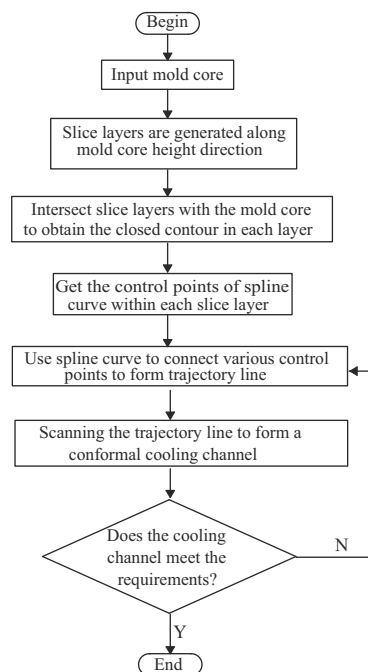


图4 随形水路自动生成流程图

Fig. 4 Automatic generation of flow chart for conformal cooling channel

在设计具体算法时,需要重点考虑以下问题:

2.1 轨迹线的选择

由于冷却通道采用管道扫描的方法来生成,因此要求轨迹线整体呈现柔顺。如果采用直线段加圆弧的方法,势必会增加算法的复杂程度。样条曲线是经过一系列控制点的光滑曲线,曲线的形状可由这些点予以控制。采用样条曲线来充当扫描轨迹线不但能够减轻算法的复杂度,便于操作,而且根据样条曲线扫描成的管道由于没有尖角过渡,从而利于3D打印成型。

2.2 控制点的获取

在指定管径的情况下,需要计算出所有符合要求的控制点,以供后续连线操作。控制点的获取要遵循不干涉原则,即根据控制点生成的圆不能与轮廓线干涉,更不能与已有圆发生干涉。

2.3 连线操作

在各层控制点已经计算出的前提下,面对各层控制点个数不同的具体情况,使用样条曲线命令采用怎样的连线策略对这些控制点进行连接是关系到冷却通道生成成败的关键。

其中,各层控制点的获取及连线策略的选择是整个算法的核心部分,下文将详细阐述。

3 关键算法

3.1 样条曲线控制点获取算法

获取样条曲线控制点的传统方法需要通过频繁的草图绘制、测距等一系列操作才能做到,过程耗时且繁琐,提出一种自动获取方法,可快速侦测出符合要求的控制点,其原理如图5所示。

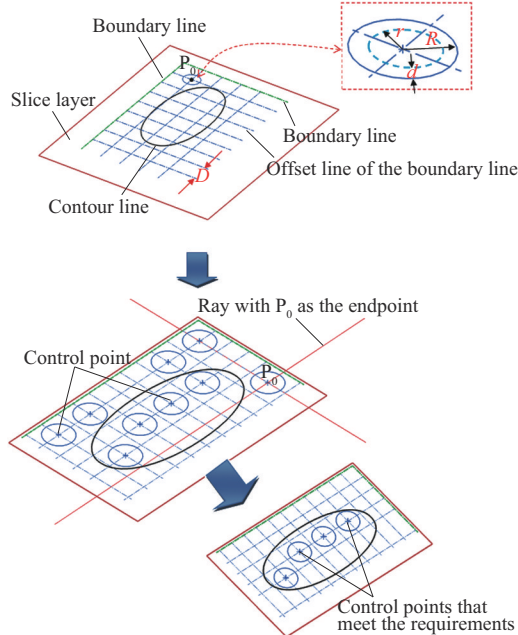


图5 控制点获取原理图

Fig. 5 Control point acquisition schematic

步骤1:在切片层上绘制两条边界线,这两条边界线应位于轮廓线外侧;

步骤2:分别对产生的边界线进行偏置,得到一系列偏置线;

步骤3:以偏置线的交点为圆心,以指定数值为半径绘制圆;

(1)判断圆是否与轮廓线相交;

(2)判断当前圆与已有圆是否相交。

步骤4:以当前圆心为端点做射线,通过射线探测法判断与轮廓线的相交情况;

步骤5:判断以圆心为球体,是否裸露在实体外部。

具体算法流程如图6所示。根据模具设计的实

际情况,具体编程时要注意五点:

(1)每个切片层上的两条边界线应在最大轮廓线之外,以确保结果的准确性。

(2)边界线的偏移值(D)应合理取值。取值太大,结果不准确;取值太小,则增加算法时间。

(3)用作圆心的交点应按照两组偏移线的相交顺序依次选择,以确保结果准确。

(4)在做相交干涉检查时,所取圆的半径 $R = r + d$,如图5所示,其中 r 为随形水道直径; d 为安全距离。

(5)射线检测法判断已知圆是否在轮廓线内的原理如图5所示,即以圆心(P_0)为端点,分别沿 $+X$ 方向、 $-X$ 方向、 $+Y$ 方向和 $-Y$ 方向进行射线检测,如果所有四条射线都与轮廓线相交,则圆在轮廓线内,否则不在轮廓线内。

(6)经过曲线干涉检查后所得到的控制点,还需要进一步检查是否在铸件实体内。通过以控制点为圆心生成 0.5 mm 半径球体,通过判断球体与实体是否能够求和即可判断该点是否为合适控制点。

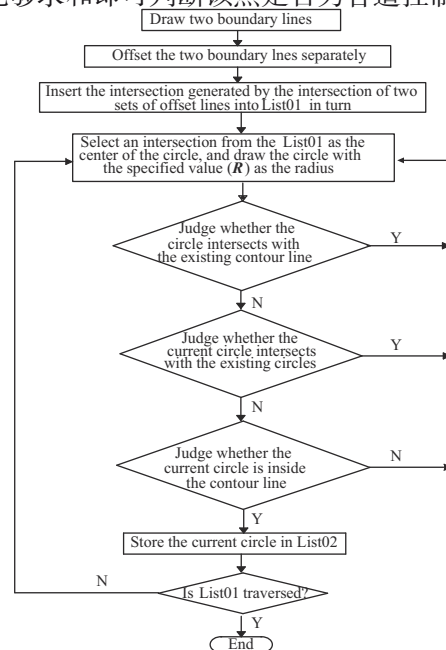


图6 切片层上控制点获取算法流程

Fig. 6 Algorithm flow for obtaining control points on slice layers

3.2 冷却水路轨迹线自动连线算法

在获得了所有切片层中的控制点后,接下来就需要使用样条曲线将这些控制点依次连接形成扫描轨迹线。为达到良好的冷却效果,采用的连线策略为首先找出所有切片层中的最小点数,从最小点数层出发,依次找出紧邻切片层中的距离最近控制点,最后将这些控制点连线,整条轨迹线沿着型芯

高度方向折叠穿行,其基本思路如图7~图9所示。

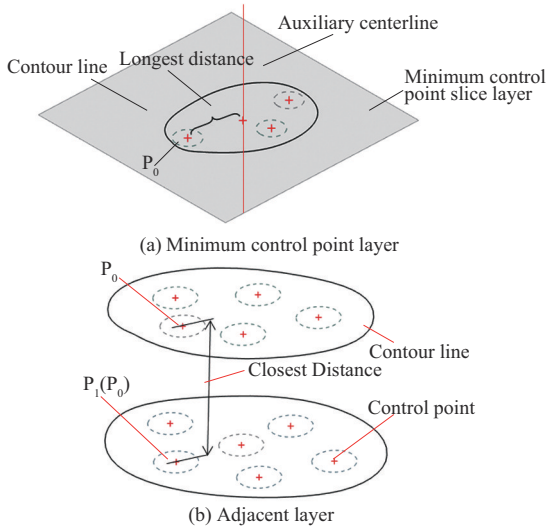


图7 最小控制点层及相邻层控制点连线示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the connection between the minimum control point layer and adjacent layer control points

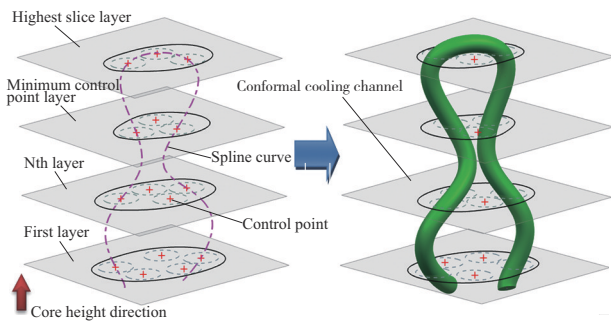


图8 连线单次折弯原理图

Fig. 8 Schematic diagram of single bending of connecting lines

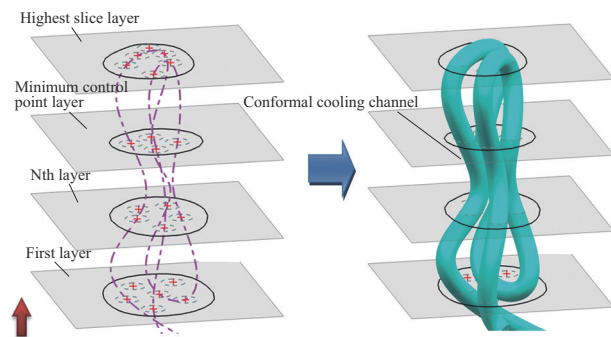


图9 连线多次折弯原理图

Fig. 9 Schematic diagram of multiple bending connections

步骤1:在最小控制点数的切片层中,找到与辅助中心线最远控制点作为基点 P_0 ,如图7a所示。

步骤2:在彼此紧邻层中,按照距离最近原则,如图7b所示,依次找到紧邻切片层中与上个基点 P_0 相距最近的控制点 P_1 ,并将其重新作为基点 P_0 。

步骤3:判断最小点数层中剩余点数是否 >1 :

(1)如果 ≤ 1 ,如图8左图所示,则进入步骤4;

(2)如果 >1 ,如图9左图所示,则进入步骤2,继续搜索控制点。

步骤4:使用样条曲线依次选取所有的控制点生成冷却水路轨迹线。

步骤5:以指定截面沿着轨迹线进行扫描生成随形水路,如图8右图、图9右图所示。

需注意的是:(1)辅助中心线位置决定了整条随形水路是否会紧贴模具型面,根据实际模具水路,可将其设置在模具型芯坐标中心;(2)当轨迹线需要在最高层或第一层中进行折弯变向时,在同一层中对应的下一个控制基点 P_0 是按照距离最近原则选取的,如图10所示,以避免管道之间发生干涉,并尽可能做到均匀布局。详细算法流程如图11所示。

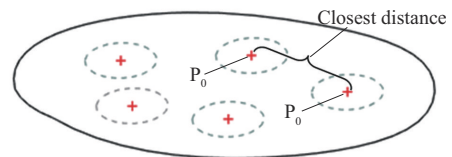


图10 最高层及第一层中控制点连线示意图

Fig. 10 Schematic diagram of connection between control points

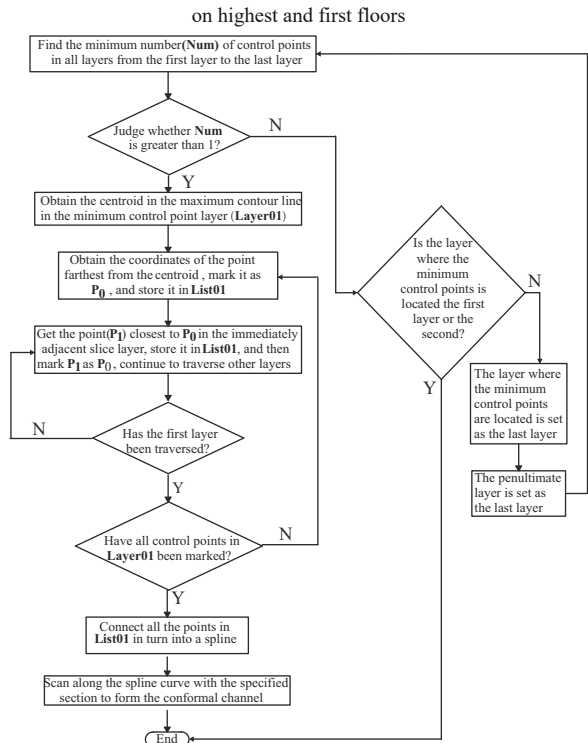


图11 连线算法流程图

Fig. 11 Connection algorithm flowchart

4 系统界面设计

以在模具行业广泛使用的NX作为实验平台,基于NX OPEN API接口,使用Python语言进行随形水路自动生成模块的开发,系统界面使用NX二次开发工具BLOCK UI Styler样式编辑器进行设计,如图12中左图所示。系统操作界面如图12中右图所示,在操作界面上,“选取镶件”是指选择待冷却的模具镶件;“冷却分界面”是指镶件基座和模具型面的分界面;“左下角点”和“右下角点”的选择要能保证其构成的矩形范围能够涵盖模具型面在冷却分界面上的投影;“进水口”和“出水口”位于镶件底面,需要人为指定;“水路管径”指的是冷却通道的直径;“安全距离”指的是水路管道离模具内部其他构件的最小距离。用户依次选取各项参数,点击确定,系统即可自动生成随形水路。

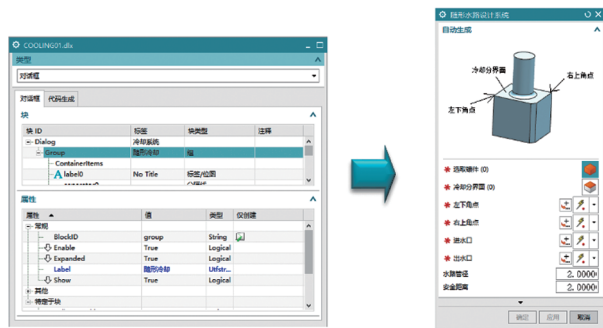


图12 交互界面设计

Fig. 12 Interactive interface design

5 应用实例

电子烟是新兴消费类电子产品,市场对电子烟外壳需求量很大,而且对于其质量控制要求很严格。传统的直管道水路无法为电子烟模具提供良好的冷却效果,现实工程中设计人员常常需要在模具内部设计随形水路,以保证塑件的成型质量。

基于提出的全部算法,在NX10.0平台上开发出随形水路自动化设计系统对电子烟类模具进行随形水路设计验证。算例1的成型部位基本尺寸约为10 mm×20 mm×34 mm,成型部位中间有一不规则的盲孔,深度约为24 mm,底座尺寸约为14 mm×23 mm×35 mm。算例2的成型部位最大外径约为30 mm,最小约为15 mm,高度约为67 mm,成型部位中间凹孔深度约为6 mm,底座尺寸约为40 mm×45 mm×106 mm。按照传统的设计方法,设计人员需要频繁地使用画线、倒圆、修剪等曲线编辑命令在狭小的模具空间手工设计随形水路,还必须实时注意

干涉问题,耗时费力;如采用笔者开发的自动化程序,如图13~图14所示,只需简单的输入必要参数,即可快速生成模具的随形水路,两种方法的效果对比见表2和表3。

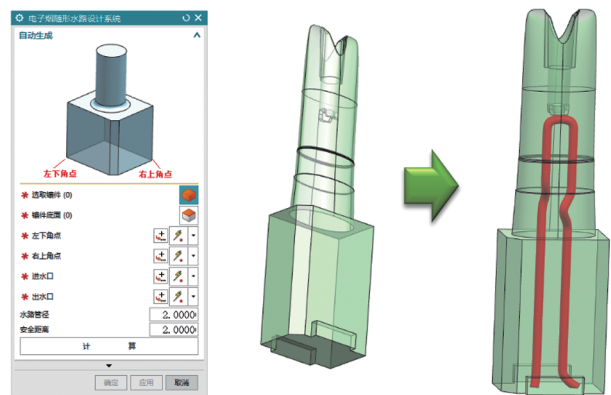


图13 算例1的随形水路

Fig. 13 Conformal cooling channel of Example 1

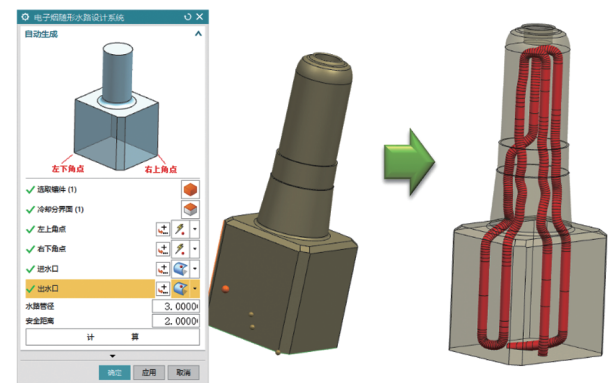


图14 算例2的随形水路

Fig. 14 Conformal cooling channel of example 2

表2 例子1设计效果对比

Tab. 2 Design effects comparison of example 1

Item	Traditional method	Proposed method
Mouse clicks	>200	about 20
Time-consuming	about 70min	about 5 min

表3 例子2设计效果对比

Tab. 3 Design effects comparison of example 2

Item	Traditional method	Proposed method
Mouse clicks	>300	about 20
Time-consuming	about 130 min	about 12 min

6 结论

随着3D打印技术在模具制造领域的深入应用,随形水路的设计在模具设计工程实践中越来越引起人们的重视。按照现有的传统设计方法,模具内部随形水路的设计过程是十分耗时且比较繁琐的。为解决现实存在的随形水路快速设计问题,在

莲藕内部导管结构的启发下,提出了一种随形水路自动生成方法,并以NX为应用平台,开发了专门的设计系统,实现了提出的全部算法。通过实际工程案例验证,该方法可大幅度缩短设计时间,提高随形水路的设计效率,具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] HASSAN H, REGNIER N, PUJOS C, et al. Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(13): 1 547–1 557.
- [2] SACHS E, WYLONIS E, ALLEN S, et al. Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2000, 40(5):1 232–1 247.
- [3] SANCHEZ R, AISA J, MARTINEZ A, et al. On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding[J]. *Measurement*, 2012, 45(5):1 051–1 056.
- [4] VLADISLAV A, LIBOR B, JAN Z, et al. Case study of large three-dimensional-printed slider with conformal cooling for high-pressure die casting[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2023, 10(4):587–608.
- [5] Feng S C, Kamat A M, Pei Y T. Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates—Science Direct[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 171. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082.
- [6] 王武. SLM技术在注塑模具中的应用及安全评价[D]. 上海:上海应用技术大学, 2020.
WANG Wu. Application and safety evaluation of SLM technology in injection mold[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.
- [7] 马一恒. 基于3D打印的注塑模随形冷却水路优化设计及应用研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2020.
MA Yiheng. Research on the optimal design and application for the conformal cooling channel of the injection mold based on 3D printing[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2020.
- [8] 李亚勇. 带随形水路的注塑模具成形零件3D打印工艺开发[D]. 贵阳:贵州大学, 2020.
LI Yayong. Development of 3D printing process for injection moulded parts with conformal waterways[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [9] BARBEIRO S, ENGUICA R, LOBO D. Automatic generation of conformal cooling channels in injection moulding[J]. *Computer-Aided Design*, 2022, 150. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103312.
- [10] 王乾. 注射模随形冷却水道生成与优化[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
WANG Qian. Generation and optimization of cooling channel following the shape of injection mould[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [11] TUTESKI O, KOCOV A. Conformal cooling channels in injection molding tools design considerations[J]. *Mach Technol Mater*, 2018, 12:445–448.
- [12] ALTAF K, RANI A M B A. Numerical study of profiled conformal cooling channels for cooling time reduction in injection mould tools[J]. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 2015, 7(4): 230. DOI: 10.1504/IJESMS.2015.072508.
- [13] WANG Jing, XUAN Jiamin, NI Yong. Automatic design of conformal cooling channels of injection mold based on lotus root model[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023. DOI:10.1007/s00170-022-10714-1.
- [14] RAHIM S Z A, SHARIF S, ZAIN A M, et al. Improving the quality and productivity of molded parts with a new design of conformal cooling channels for the injection molding process[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2016, 35(1). DOI: 10.1002/adv.21524.
- [15] BERGER G R, ZORN D, FRIESENBIHLER W, et al. Efficient cooling of hot spots in injection molding. A biomimetic cooling channel versus a heat-conductive mold material and a heat conductive plastics[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2018, 59(7). DOI:10.1002/pen.25024.
- [16] 吴茜. 注塑模具随形冷却水道设计方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
WU Qian. Research on the design method of cooling channel following the shape of injection mould[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.