

基于 FDM 工艺的零件成型质量工艺参数研究

杨继全,徐路钊,李 成,王璟璇,尹亚楠

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 成型精度和打印质量一直是 FDM 打印的关键问题,在已有模型误差和机械误差的研究基础上,从工艺参数误差着手,分析了不同参数设置所导致的精度误差问题,提出了一种基于正交试验法来提高打印精度和成型质量的切片参数优化设计方法.在参数选取时,利用 FDM 成型原理构建参数设置方程,将该参数对成型精度的影响具体化,通过设置方程计算出最合理的参数并应用正交试验选择出最优的参数配比,进而实现 FDM 工艺参数优化设计,并利用实例验证了该方法的有效性.

[关键词] FDM 工艺,正交试验,参数优化

[中图分类号] TM615 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)02-0001-06

Research of Process Parameters Optimization of Molding Quality Based on FDM

Yang Jiquan, Xu Luzhao, Li Cheng, Wang Jingxuan, Yin Yanan

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Since the molding precision and the printing quality have been the key issues of the FDM printing, this article analyzes the precision problems caused by the different parameters setting error which proceed from process parameter errors on the basis of the existing model error and mechanical error, then puts forward a slice parameter optimization design method based on orthogonal experiment in order to improve the printing precision and molding quality. In the parameters selection, FDM molding principle is used to construct parameter equations and concretize the influence of parameters on the forming precision. The most reasonable parameters are calculated based on the parameter equation, and ratio of the optimal parameters is selected by the orthogonal experiments so as to realize the optimization design of the FDM process parameters and then the examples are used to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: FDM process, orthogonal experiment, parameter optimization

在制造业日趋国际化的 21 世纪,缩短产品开发周期和减少开发新产品投资风险,成为企业赖以生存的关键,因而也相继涌现出大量的先进制造理念及制造技术,其中典型的是 20 世纪 80 年代末、90 年代初发展起来的快速成型 RP(Rapid Prototyping and Manufacturing)技术,它突破了传统的加工模式,不需机械加工设备即可快速地制造形状极为复杂的工件,被认为是近 20 年制造技术领域的一次重大突破^[1].

FDM 工艺的三维打印机由于具有维护简单、成本低、后处理简单、工艺干净、可安全地用于办公环境等特点,使其成为快速成型技术中非常具有潜力的一个分支.以目前的国内外发展现状,Stratasys 3D 公司在 FDM 工艺的打印机的制造领域具有领先水平.本文主要使用本课题组研发的上位机控制软件(DOGO Printer)和 FDM 工艺打印机(DOGO 480),进行上位机工艺参数的优化,以提高打印成品的成型精度和表面质量.

由于其他工艺的三维打印机与 FDM 工艺打印机有类似之处,所以对其上位机的工艺参数优化具有普遍的适用性.之前大量的学者在提高打印精度方面主要致力于研究三维模型与 G 代码的转换.将设计好的三维模型(STL 格式)载入到上位机进行切片时,其实是将三维模型转换成许多个三角面,用三角面与三位模型进行正交,在切片时,每个面上正交所得到的点就成为轨迹规划的路径.但是使用三角面片来近似处理三维模型的曲面,就会带来在表面、形状和尺寸产生误差的问题.尽管有人提出再次细化三角面片,提高 STL 格式三

收稿日期:2013-04-10.
基金项目:国家自然科学基金资助(61273243).
通讯联系人:杨继全,博士,副教授,研究方向:数字化设计制造及先进制造技术. E-mail: yangjiquan@njnu.edu.cn

维模型的精度,然而这也同时增大了三维模型的数据量,加长了切片时间和成型时间^[2].

工艺参数的统一有利于提高调试人员的调试效率和打印精度. 本文将运用上位机的工艺参数设置,调节层厚的大小,说明层厚给成型精度带来的影响,优化协调打印速度、进丝速度和冷却风扇的使用条件.

1 FDM 工艺参数的设置

影响 FDM 成型件成型质量的主要工艺参数有步进电机的步进量、层厚、线宽和冷却风扇开启时间. 在下位机控制板中,有对步进电机步距角细分数控制的拨码开关,因此,需要根据拨码开关的值和挤丝轮的周长来设定步进电机的步进量. 在完成步进量与层厚的设置后,需要对打印模型进行测试,量取打印的实际丝宽,与理论丝宽进行比较,通过公式计算挤丝倍率,再重复以上步骤直至丝宽的实际值与理论值一致. 冷却风扇的使用对于打印尖细的模型有很大的帮助,缩短其凝固时间,降低模型因塌陷而带来的误差影响. 参数设置流程如图 1 所示.

1.1 步进电机步进量的设置

本课题组研发的 FDM 工艺打印机(DOGO 480)选用步距角为 1.8°的步进电机,通过步进电机的驱动芯片(A4982)将步距角进行 16 细分. 原来步进电机转一圈需要 200 个脉冲,16 细分之后则需要 3 200 个脉冲. 要提高成型精度首先要将进丝电机的步进量调试准确. 采用本课题组研发的上位机控制程序(DOGO Printer 由图 2 所示)进行工艺参数设置^[3].

在代码发送栏发送 G 代码:M92 E100、G92 E0. 上位机将三维模型切片所得的 G 代码,由下位机程序进行定义. 在 G 代码中,M92 是定义步进电机带动丝料进给 1 mm 所需要的脉冲数. 通过量取进丝轮的直径,计算出其周长 L . 用式(1),即可计算出挤丝电机步进量的理论值. 本款打印机经计算所得的步进量为 98.7,因此近似成 100 进行测量.

$$\text{step}=3\ 200/L. \tag{1}$$

量取 3 cm 长度的耗材丝,将挤丝速度改为 100 mm/min,单次挤出量改为 1 mm,向下挤丝,点击挤丝按钮 A 次后,达到 30 mm 的挤丝量.

$$\text{step}_e=(A\times K\times\text{STEP})/N, \tag{2}$$

式中: step_e 为进丝电机步进量的实际值; A 为挤完所量取的耗材所用的点击次数; K 为单次点击产生的挤出量; N 为理论所需点击的次数.

使用式(2),将计算所得的 step_e 值填入到 START GCODE 文本文件中,经测试挤丝倍率值为 0.85.

1.2 层厚的设置

分层厚度是指将三维模型通过上位机进行切片时,层与层之间的距离,同样也是 FDM 工艺打印机在打印实体时每层的厚度. FDM 工艺又称熔融堆积工艺,因此在打印外表面时会出现一层一层堆积的不连续现象,很像生活中的台阶,于是称之为“台阶”效应,层厚越小,“台阶”效应越小,表面精度越高,但成型时间会大大加长,降低了打印效率. 反之,层厚设置较大,“台阶”效应明显,零件表面有明显的粗糙感^[4].

层厚的设置取决于喷嘴的直径、成型精度和打印时间这些因素. 本课题组研发的 FDM 工艺打印机 DOGO 480 选用的是喷嘴直径为 0.3 mm 的喷头,因此层厚的取值必要小于 0.3 mm. 这是为了确保在打印时上下两层能够牢固的粘结.

在图 3 中,将成型件的外表面圆弧近似为等半径圆弧,在此近似的基础上将圆弧半径设为 R ,即 OA , OB 段. M 为堆积材料沿着圆弧方向的缩进距离, N 为堆积材料的实际边界与成型件理论边界的最大距离. M 可以用来表示成型件的体积误差,而 N 则可以表示成型件的表面粗糙度. 选择其中的任一层进行公示推倒,找出层厚的选择对成型精度的影响关系. 设层厚为 S :

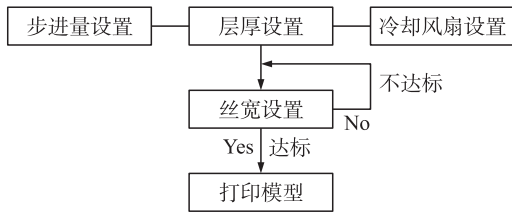


图 1 参数设置流程图

Fig. 1 Flowchart of parameter setting

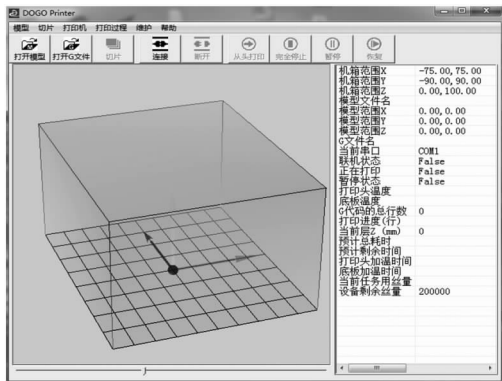


图 2 上位机程序 DOGO Printer

Fig. 2 Interface of control software(DOGO Printer)

$$\sin y = \sin x + S/R, \quad (3)$$

$$M = R(\cos x - \cos y), \quad (4)$$

将式(3)代入到式(4)中得:

$$M = R(\cos x(1 - (\sin x + S/R)^2)), \quad (5)$$

$$N = R\left(1 - \left(1 - \frac{2S}{R\sin x - (S/R)^2}\right)\right), \quad (6)$$

当 $x=0$ 时,分别代入到式(5)、式(6)中,得:

$$M = N = R(1 - (1 - (S/R)^2)).$$

此时得到的 M 、 N 两种误差评判标准是完全一样的.

当 $y=90^\circ$ 时,分别代入到式(5)、式(6)中,得:

$$M = R\cos x = R(1 - (1 - S/R)^2),$$

$$N = R(1 - (1 - S/R)) = S,$$

由公示推倒可知,在圆弧达到 90° 时,产生最大误差,其数值为所设置的层厚 S .

根据所得结论,设打印时间为 T ,精度为 λ ,成型件的高度为 h ,则:

$$T = h/|S - \Delta S|, \quad \lambda = |\Delta S|/h.$$

规定 h 为常数,等于 5,根据测试经验 S 也为常数,设为 0.2,让 ΔS 在 -0.1 与 0.2 之间变换,取得最优设置.将所得的公示放入 Matlab 中仿真,得到如下的函数图,如图 4 所示.

由图 4 可知,当时间在 $-0.1 \sim 0.05$ 之间变化时精度为最高,可见将层厚设置为 0.2 是较为合理的.

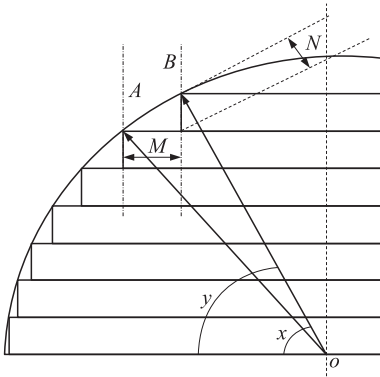


图 3 “台阶”效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of “step” theory

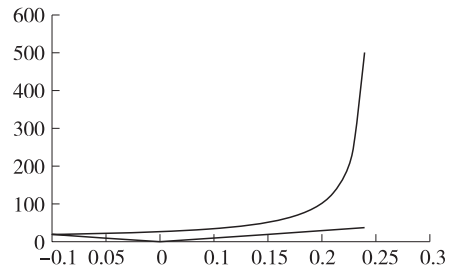


图 4 精度与时间函数图

Fig. 4 Schematic diagram of accuracy and time

1.3 冷却风扇的开启时间设置

冷却风扇的作用加速丝料的凝固速度,主要应用在打印尖顶模型上.制作时如果一层的打印时间较短,从喷头挤出的丝料还没有冷却到 ABS 丝料的玻璃化温度 105°C ,则会导致下一层在打印时出现坍塌的情况^[5].通过多 ABS 丝料受热的微元化分析,可以得到丝料的温度与路径之间的关系,如式(7)所示:

$$\alpha = 70 + 200e^{-7.27 \times D}. \quad (7)$$

在移动速度设为 50 mm/s 的情况下,丝材从 230°C 降到 105°C ,喷头所需移动的时间为 4.8 s .因此设置冷却风扇在小于 5 s 是开启状态.

1.4 线宽的设置

熔融状态的丝材从喷嘴挤出,在自由的状态下,挤出的丝呈圆柱状,因为将加热温度设置在 230°C ,远远高于室温,因此在丝被挤出喷嘴时会迅速膨胀,随着温度的降低而逐渐凝固.在丝材被挤出堆积时,由于喷头的移动将丝进行挤压,因此丝材堆积时不再是圆柱状而是扁平状.结合这两种因素,会使挤出丝的宽度略大于喷头直径,因此这就需要将移动速度与挤丝速度相配合,降低丝的宽度对模型精度的影响^[6,7].

根据调试经验,通常将移动速度设置为 50 mm/s ,将挤丝速度设置为 28 mm/s .将测试模型的 STL 文件导入上位机,进行切片,如图 5 所示.

将打印完成的测试模型进行测量,测量其实际壁厚即挤丝宽度是否与切片的理论值一致,若一致则保持该移动速度与挤丝速度的配比,若不一致,则需要进行计算,更改配比.

在此讨论不一致的情况,在上位机切片之前,需要准确测量喷头直径和丝材直径,将数值填写到上位机软件中.在填写时,有一栏为 Extrusion multiplier,该栏就是用来优化移动速度和挤丝速度配比的.在第一次设置时,设置为 1.

设切片理论宽度为 W_T ,实际宽度为 W_P :
$$\text{multiplier_new} = (W_T/W_P)^2 \times \text{multiplier} \quad (7)$$
将计算出来的参数值填入栏中,重复以上步骤,直至实际线宽与理论线宽一致.

2 基于正交试验的参数优化设计

现以测试模型的成型精度为研究对象,使用控制变量法,在保证系统的上位机软件以及硬件控制板不变的前提下,合理选择切片中的工艺参数,优化参数的组合,来提高模型零件成型精度,达到以最低的成本提高精度的方法.

正交试验法(Orthogonal experimental)是研究多因素多水平的一种设计方法,它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点,正交试验设计是分析因式设计的主要方法,是一种高效率、快速、经济的实验设计方法.

2.1 正交试验的设计

从打印零件的成型过程来看,影响 FDM 工艺制件尺寸精度的因素有很多,并且每个影响因素的水平各不相同,不同水平的影响因素对模型制件尺寸精度的影响程度也大不一样.影响尺寸精度的参数主要挤丝的步进量、层厚的设置、挤丝倍率的设置以及冷却风扇的开启时间.由于选取的测试模型不存在尖细的部件,冷却风扇的开启时间对该模型的影响较小,所以选取挤丝的步进量、层厚的设置、挤丝倍率的设置为正交试验的影响因子.

将每个影响因子选取 3 个水平,选取方法为前面所介绍的计算方法,将上位机的工艺参数进行设置,选取挤丝的步进量为 96.8,层厚为 0.2 mm,挤丝倍率选取计算值为 0.85.为了验证上述的参数优化是否能达到降低成型误差的目的,以计算所得的影响因子的最合理值为中心值,在其左右两边再各取一值.

假设对这 3 个各包含 3 水平的工艺参数影响因素全部进行试验,需要做 $3^3 = 27$ 次试验,这不仅浪费财力、物力,还浪费了大量的时间,这样做显然是不可取的.使用正交试验法就可以简化试验次数.

为研究零件成形过程中的各因素对成形零件的尺寸精度的影响情况,本文运用三维设计软件设计了一个“拱门”形测试件作为实验样件进行试验分析.考虑到测量的经济性和便利性以及加工的方便性,运用将模型件的长宽高为 20 mm×30 mm×20 mm,如图 6 所示.

由图 6 可知,成形试验件的长度和宽度分别沿成形平台的 X 轴和 Y 轴放置,高度则沿 Z 轴放置.由于成形

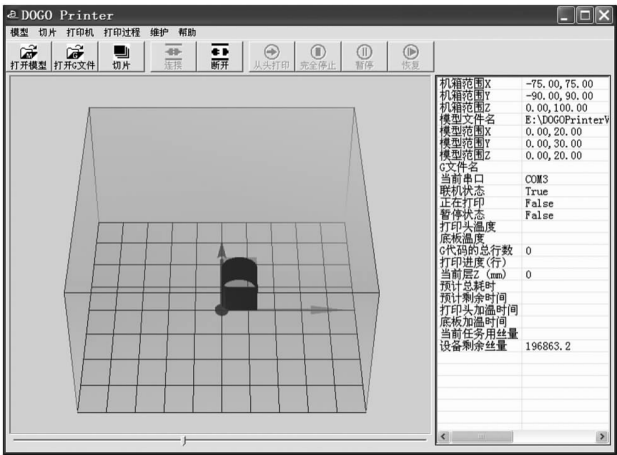


图 5 上位机切片示意图

Fig.5 Schematic diagram of slicing

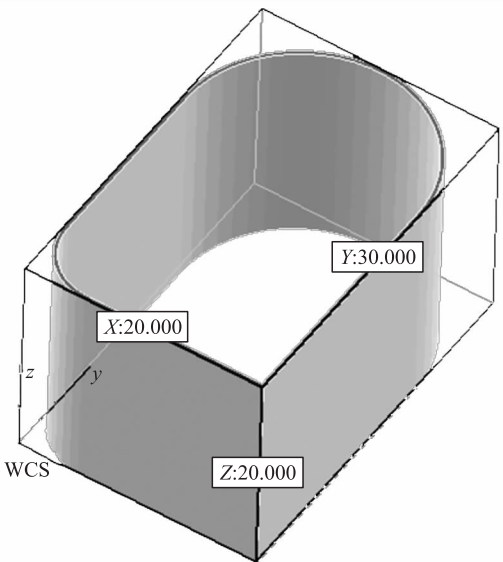


图 6 试验样件

Fig.6 Test model

室的温度不均衡,在不同的位置加工出来的试件尺寸可能会有所差异,为了消除这种影响,每次成形时试件都在成形室的同一位置摆放.

将上述选取的影响因素,运用正交试验法,研究各影响因素单独或相互作用时对成形件的尺寸精度的影响. 根据各影响因素的常用取值范围,决定对每个影响因素取用 3 个水平. 各影响因素水平的取值如表 1 所示.

对于本实验,根据正交试验表设计要求,正好可以用正交表 $L_9(3^3)$,需做 9 次实验,最终的正交试验设计方案如表 2 所示.

表 1 影响因素水平取值表

Table 1 The table of influencing level factors

影响因子	水平 1	水平 2	水平 3
切片层厚(A)/mm	0.1	0.2	0.3
挤丝倍率(B)	0.7	0.85	1
挤丝步进量(C)	94.8	96.8	98.8

表 2 正交试验设计方案表

Table 2 The table of orthogonal experiment design

实验 序号	影响因子及水平			实验 序号	影响因子及水平			实验 序号	影响因子及水平		
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
1	0.1	0.7	94.8	4	0.2	0.7	96.8	7	0.3	0.7	98.8
2	0.1	0.85	96.8	5	0.2	0.85	98.8	8	0.3	0.85	94.8
3	0.1	1	98.8	6	0.2	1	94.8	9	0.3	1	96.8

2.2 基于正交试验的误差分析

成形试件的 X 、 Y 、 Z 3 个方向的尺寸误差为本试验的分析内容,长、宽、高 3 方向上的尺寸误差分别用 $\Delta x\%$ 、 $\Delta y\%$ 、 $\Delta z\%$ 表示. 根据表 2 所选择的参数,随机加工出 9 个成形试验件,舍弃加工不理想或者是不方便测量的试件. 把加工好的成形试件在室内通风干燥的环境静置 24 h 以上,其后用千分尺来分别测量测试件 X 、 Y 、 Z 3 个方向上的误差值.

表 3 正交试验实验数据表

Table 3 The table of the data for orthogonal experiment

实验号	影响因子			X 方向误差	Y 方向误差	Z 方向误差
	A	B	C	$\Delta x\%$	$\Delta y\%$	$\Delta z\%$
1	0.1	0.7	94.8	22.223	2.372	2.287
2	0.1	0.85	96.8	22.776	2.389	2.178
3	0.1	1	98.8	24.502	3.989	4.052
4	0.2	0.7	96.8	23.434	3.268	3.490
5	0.2	0.85	98.8	20.671	0.728	0.978
6	0.2	1	94.8	22.333	2.854	1.973
7	0.3	0.7	98.8	22.032	1.884	1.237
8	0.3	0.85	94.8	23.621	2.937	3.922
9	0.3	1	96.8	22.765	2.137	2.810

依据表 3 所测的成形件各方向误差,分别计算 X 、 Y 、 Z 各方向误差的均值填入下表 4 中.

依据表 4 可以看出 3 个主要影响因子的水平变化对成形件 X 、 Y 、 Z 3 个方向尺寸精度误差的影响. 根据以上图表分析可知,对于 X 、 Y 方向成形精度影响因子的最佳水平组合都为 A2B2C3,即切片层厚取 0.2 的水平因子,挤丝倍率取 0.85 的水平因子,挤丝步进量取 98.8 的水平因子时, X 、 Y 方向尺寸精度最高. 同理分析可知, Z 方向成形精度的最佳水平因子组合为 A2B1C3. 通过极差值分析可以看出,在成形加工过程中, X 、 Y 方向尺寸精度主要受切片层厚以及挤丝倍率的影响, Z 向尺寸精度主要受切片层厚和挤丝步进量的影响.

根据实验结果可知,影响测试模型的各个方向的尺寸精度的参数因子水平数组合并不是固定的,若对零件某一方向上的成形尺寸精度有较高要求,可参考

表 4 误差均值表

Table 4 The table of mean error for orthogonal experiment

实验误差		影响因子		
		A	B	C
$\Delta x\%$	均值 1	3.167	2.563	2.726
	均值 2	2.146	2.356	2.992
	均值 3	2.806	3.2	2.401
	极差	1.021	0.844	0.591
$\Delta y\%$	均值 1	2.917	2.508	2.721
	均值 2	2.283	2.018	2.598
	均值 3	2.319	2.993	2.200
	极差	0.634	0.975	0.521
$\Delta z\%$	均值 1	2.839	2.338	2.727
	均值 2	2.147	2.359	2.826
	均值 3	2.656	2.945	2.089
	极差	0.692	0.607	0.737

试验所得的最优组合结果,选择适当影响因子水平组合,从而实现成形件的精确加工制造.

3 结论

本文根据本课题组研发的上位机软件及 FDM 工艺打印机,进行工艺参数优化,具有一定的通用性.成型件精度影响因素还有很多,如机械误差、模型误差等,这些还需其他方面进行弥补,如在绘制三维模型时根据材料的收缩性和丝宽的影响对模型的外边进行扩大或缩小的操作,弥补打印时的误差,机械误差不能完全消除,只能尽可能地减少,如将带传动改成直线导轨等结合机械优化的原则,提高成型精度.

[参考文献](References)

- [1] 杨继全,徐国财.快速成型技术[M].北京:化学工业出版社,2006:22-50.
Yang Jiquan,Xu Guocai. Rapid Prototyping Technology[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2006:22-50. (in Chinese)
- [2] 骆锐,吴沁.基于三维 CAD 软件的快速成型制造技术及其精度控制[J].机床与液压,2010,38(4):96-97.
Luo Rui,Wu Qin. Rapid prototyping manufacturing technology based on 3D CAD software and its control precision[J]. Machine Tool and Hydraulics,2010,38(4):96-97. (in Chinese)
- [3] 夏俊,杨继全.彩色三维打印机控制系统的开发[J].南京师范大学学报:工程技术版,2009,9(2):8-12.
Xia Jun,Yang Jiquan. Development of the control system of colorful 3D printer[J]. Journal of Nanjing Normal University:Engineering Edition,2009,9(2):8-12. (in Chinese)
- [4] 鲁建慧.熔融沉积快速成型精度及工艺研究[D].大连:大连理工大学机械制造及其自动化学院,2009.
Lu Jianhui. Reserach of fused deposition molding precision and process [D]. Dalian:Dalian University of Technology Mechanical Manufacturing and Automation,2009. (in Chinese)
- [5] 罗晋,叶春生,黄树槐.FDM 系统重要工艺参数及其控制技术研究[J].新技术新工艺,2005(6):77-80.
Luo Jin,Ye Chunsheng,Huang Shuhuai. Research of important process parameters and control technology of FDM system[J]. New Technology and New Process,2005(6):77-80. (in Chinese)
- [6] 江开勇.熔融挤压堆积成形中材料丝的熔融过程分析[J].华侨大学学报:自然科学版,2000,21(3):302-306.
Jiang Kaiyong. Melting process analysis of materials in melt extrusion pile forming[J]. Journal of Huaqiao University:Natural Science Edition,2000,21(3):302-306. (in Chinese)
- [7] 郭磊.FDM 快速成型技术对产品模型表面质量的影响[J].机电产品开发与创新,2005,18(5):52-54.
Guo Lei. Impact of FDM rapid prototyping technology on surface quality of the product model[J]. Development and Innovation of Machinery,2005,18(5):52-54. (in Chinese)
- [8] 杨继全,朱玉芳.先进制造技术[M].北京:化学工业出版社,2004:178-207.
Yang Jiquan,Zhu Yufang. Advanced Manufacturing Technology[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004:178-207. (in Chinese)
- [9] Zhu Yufang,Peng Chen,Yang Jiquan,et al. An integrated design and fabrication approach for heterogeneous objects[J]. Advanced Materials Research,2012,383:5 810-5 817.
- [10] Zhu Yufang,Yang Jiquan,Fadel G M,et al. Heterogeneous objects design and manufacturing: multi-materials three dimensional printing system[C]//Advances in Heterogeneous Material Mechanics(2011). 3rd International Conference on Heterogeneous Material Mechanics(ICHMM-2011). Shanghai:2011,22-26.

[责任编辑:刘健]