

液动控制活门关闭过程水锤分析与实验研究

王璐^{1,2}, 韩贞荣^{1,2}, 陈屹^{1,2}

(1. 航空工业金城南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211106;

2. 航空机电系统综合航空科技重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘 要:在某型飞机飞行过程中,其燃油系统因液动控制活门关闭过程产生水锤效应,导致剧烈噪声并引发管路振动,严重影响飞行安全。通过分析系统工作原理并进行仿真计算后,提出调低射流传感器响应频率、降低活门匹配腔压力、缩小管路通径等方案解决了此问题。研究结果可以为液动控制活门系统水锤问题的解决及飞机燃油系统设计优化提供指导和借鉴。

关键词:飞机燃油系统;液动控制活门;Flowmaster;动态特性;水锤抑制

中图分类号:V228.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)04-0137-05

Analysis and Experimental Study of Water-hammer of Hydraulic Control Valve for Aircraft Fuel System

WANG Lu^{1,2}, HAN Zhenrong^{1,2}, CHEN Yi^{1,2}

(1. Nanjing Engineering Institute of Fuel System, AVIC, Nanjing 211106, China; 2. Aviation

Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing 211106, China)

Abstract: During the flight, the water hammer effect is caused by frequently switching the hydraulic control valve in the aircraft fuel system. It leads to loud noise and strenuous vibration of the pipe, thus causing serious air accidents. This paper analyzes the operating principle of this system, does its simulation and calculation and puts forward the scheme that the response frequency of the sensors is adjusted down, the pressure of the valve matching chamber is slowed and the pipeline is shortened. The reference and guidance are provided for the solution of the similar problems and the optimization of the aircraft fuel system.

Keywords: aircraft fuel system; hydraulic control valve; Flowmaster; dynamic characteristics; water hammer suppression

0 引言

在燃油系统中,转输油子系统对实现系统功能至关重要,关系到发动机连续供油和重心调节。某型飞机转输油子系统在机载系统联试和空中飞行时,其控制附件液动控制活门在开关瞬间产生系统压力水锤,引发管路系统的剧烈振动并产生异常声噪。水锤的压力波沿着管路传播,导致管路耦合振动和压力脉动,影响燃油系统长期工作可靠性,最终可能造成管路产生疲劳裂纹并破裂,给飞行安全带来严重威胁。

文献[1]中Joukowski首次提出阀门关闭速率对水锤的影响关系式,即 $T < 2L/a$ 时(T 为关阀时间, L 为管长, a 为波速),水锤压力最大。文献[2]中Allievi等人对控制策略的优化进行了深入研究。蒋劲等人利用模拟试验方法分析了水泵出口阀的关闭特性对水锤的影响,提出两阶段关阀的最优调节方案[3]。杨成等人则利用CFX软件对输水管道阀门突然关闭后的水锤现象进行数值研究,总结了流速、管壁表面粗糙度、管道结构、结构变形等因素对水锤的影响[4]。上述研究多见于液压系统以及输水输油管路系统等,充液介质以液压油、水、石油等为主,而飞机燃油系统介质为航空煤油,其密度、粘性、可压缩性等物理特性都与液压油有着较大的差

异;不仅如此,与液压系统的大压力、小流量相反,燃油系统流量大且压力小。

周瑞祥针对飞机燃油复杂管路的压力瞬变过程,提出采用特征线法和有限元法相结合的方法来研究流体结构相互作用[5]。张洪则系统阐述了基于射流理论的液动输油系统控制技术和相关附件的工作原理[6]。

综上所述,迄今为止,对飞机燃油管网系统及液压管路水锤的研究虽都已有一定成果,但对于燃油系统活门关断水锤却缺乏相关的研究。

本文采用特征线法建立液动控制活门管路系统数学模型,分析活门关闭过程的动态特性,并利用实验验证了数学模型能够准确地模拟系统在液动控制活门关闭过程产生的水锤效应。运用仿真模型分析比较了不同关键设计参数对管路水锤效应的影响,提出了抑制水锤效应的几种解决方案并进行了仿真计算的验证,给飞机燃油系统同类问题的解决提供了借鉴。

1 基于特征线法的管路水锤的数学模型与计算方法

飞机燃油系统管路是一种充液管路,其管内流体在活门临界关闭过程中的流动特性可以用水锤的基本微分方

程来表示,其运动方程和连续方程如下^[7-8]:

运动方程:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + f \frac{V|V|}{2gD} = 0 \quad (1)$$

连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \sin \theta = 0 \quad (2)$$

其中: H 为测压管水头; V 为流速; g 为重力加速度; D 为管路直径; f 为摩擦系数; a 为波速; x 和 t 分别为位置变量与时间变量。

求解基本微分方程常采用数值解法的特征线法,其可以利用计算机计算复杂管路系统压力脉动,速度快、精度高,目前在国内外获得广泛的应用^[9-10]。求解过程如下:

令运动方程为 L_1 ,连续方程为 L_2 ,某实数 λ ,使其组成特征线方程:

$$L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (3)$$

根据微分法则将式(3)化为全微分方程,则应有:

$$V + \lambda g = V + \frac{a^2}{\lambda g} \quad (4)$$

$$\text{可得特征线:} \quad \lambda = \pm \frac{g}{a} \quad (5)$$

同时由 $Q = V \cdot A$,其中 Q 为流量, A 为流通面积,可得特征线方程为:

$$C^+ \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{af}{2gDA^2} Q |Q| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{cases} \quad (6)$$

$$C^- \begin{cases} \frac{dH}{dt} - \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} - \frac{af}{2gDA^2} Q |Q| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \quad (7)$$

对式(6)、式(7)沿特征线积分并进行有限差分,可得管路中某点 P 的瞬态压头 H_p 与管路已知点 A 、 B 的关系,由特征线方程式(6)、式(7)表示为:

$$\text{沿 } C^+ : H_p - H_A + \frac{a}{gA} (Q_p - Q_A) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_A |Q_A| = 0 \quad (8)$$

$$\text{沿 } C^- : H_p - H_B - \frac{a}{gA} (Q_p - Q_B) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_B |Q_B| = 0 \quad (9)$$

2 油泵控制活门临界关闭过程建模

Flowmaster 是专业一维工程流体管路系统的分析软件,擅长于对流体管路系统进行整体分析。因此本文采用 Flowmaster 作为管路压力脉动数值模拟的首选工具。

2.1 液动控制活门结构及工作原理

图1为液动控制活门的结构示意图,其中, P 为主油路来油端压力, P_b 为活门入口压力, P_c 为控制腔压力, P_d 为匹配腔压力, P_e 为活门出口压力。

活门的开关由阀芯的动作来控制,其控制腔接收来自射流传感器的压力信号。当压力信号为高压时,推动活塞牵引阀芯克服匹配腔压力与弹簧压力向下运动,活门打开;当压力信号为低压时,在弹簧力与匹配腔压力的作用下,活门关闭。

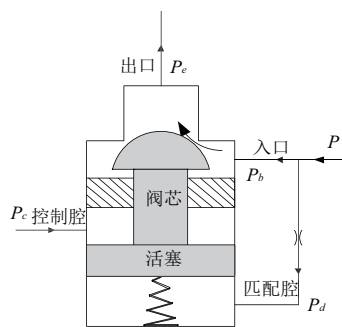


图1 液动控制活门结构图

2.2 活门及燃油系统模型

依据液动控制活门的工作原理及其结构图,在 Flowmaster 软件中采用机械类零件建立精细化模型。液动控制活门模型如图2所示。

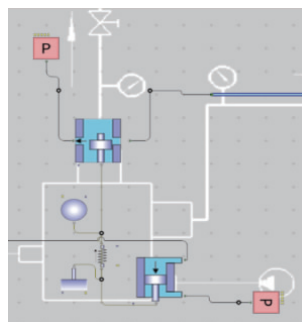


图2 液动控制活门模型

在液动控制活门模型中,采用 piston 模块模拟控制腔与匹配腔同时作用的活塞模块;阀芯与活塞的质量对于活门响应速度的影响不可忽略,采用 mass 模块来模拟;在质量块的下端加以 spring 模块以及固定位模块 earth 模拟弹簧。同时由于对阀芯的行程有限制要求,因此需采用 port 模块。将上述模块构成液动控制活门主体。

在液动控制活门管路系统中,主油路来油端分别连接液动控制活门和射流传感器的入口,射流传感器出口连接液动控制活门控制腔,利用其在空气中和燃油中不同的接收率来控制射流传感器的开关。采用 valve opening tabular controller 模块模拟射流传感器的控制逻辑,其开度变化范围为0~1(1代表射流传感器处于油箱液位之上,0代表射流传感器处于油箱液位之下)。射流传感器模型如图3所示。由控制活门及射流传感器、管路等模型搭建而成的完整系统计算模型如图4所示。

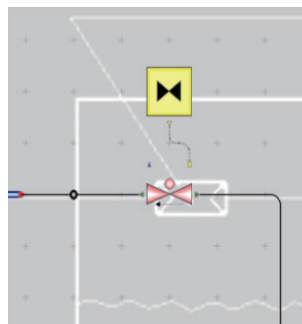


图3 射流传感器模型

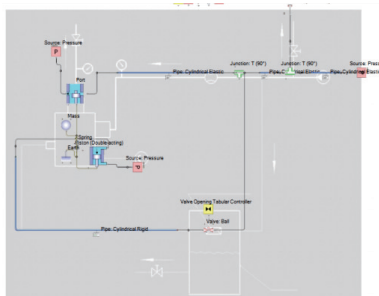


图4 控制阀及燃油系统仿真模型

仿真流体类型为 RP-3 航空燃油。系统模型中各模块均按照实际液动控制活门管路系统参数设定。各特性参数见表 1。

表 1 模型参数设置

参数名称	参数值	参数名称	参数值
阀芯质量/kg	2.64×10^{-2}	燃油密度/(kg/m^3)	0.78×10^3
阀芯最大位移/m	1.4×10^{-2}	弹簧刚度/(N/m)	1.14×10^4
弹簧长度/m	3.19×10^{-2}	管路通径/m	0.05
管路长度/m	2.4	活门流通面积/ m^2	1.5×10^{-4}

2.3 仿真计算

仿真时间步长为 0.00125 s ,持续时长 1 s 。从 0.2 s 起开始模拟活门关断动作,即射流传感器被液位淹没后向控制活门传递关断信号。输入系统的稳态压力为 0.4 MPa ,考察活门关闭过程中入口的压力变化情况。液动控制活门入口压力冲击如图 5 所示。

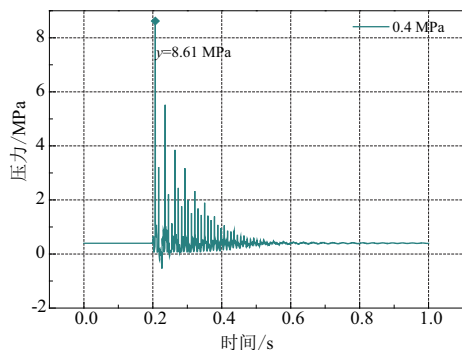


图5 压力脉动仿真结果

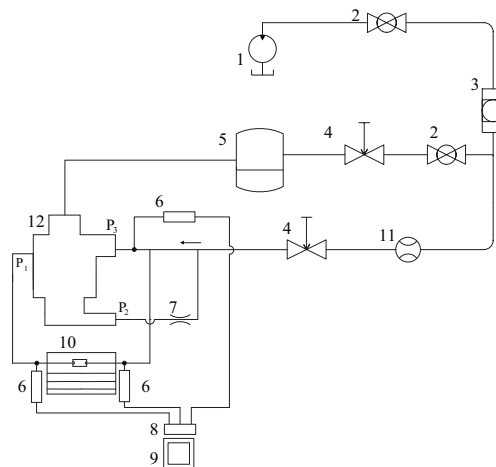
根据仿真结果可以看出,活门的骤然关闭使燃油运动受阻,导致活门入口处产生压力冲击。冲击压力的最大幅度高达 8.61 MPa ,瞬时压力升高为 8.21 MPa 。压力波在管路中传播并与之耦合作用,能量逐渐耗散,因此随着时间的推移压力波不断衰减直至消失。

3 地面实验验证

3.1 地面实验平台搭建

为了验证仿真模型的准确性,搭建了结构如图 6 所示

的地面实验平台系统。试验时齿轮泵泵出的燃油通过过滤器,除去燃油带有的灰尘等杂质,获得较为纯净的燃油。燃油由主油路经调节阀调节油液流量与压力后,分别来到液动控制活门入口与射流传感器入口。此时射流传感器暴露于空气中,接收率较高,控制腔接收高压信号,活门打开,燃油通过活门经管道进入油箱;当射流传感器被液面淹没时,射流传感器接收率大幅降低,活门关闭,停止输油。齿轮泵泵出的燃油由辅油路经流量传感器,气动薄膜调节阀进入油箱。



1—齿轮泵;2—球阀;3—过滤器;4—气动薄膜阀;
5—油箱;6—压力传感器;7—限流孔;8—数据采集卡;
9—计算机终端;10—射流传感器;11—流量表;12—油泵控制活门

图6 地面试验台系统结构

地面试验台系统主油路管路总长 8.2 m ,管路通径 50 mm ,壁厚 3 mm ;管路材质为碳钢, $E = 203\text{ GPa}$;管路介质为航空煤油,密度为 $0.78 \times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$,粘度 $4.3\text{ mm}^2/\text{s}$;系统元件中齿轮泵的系统压力为 2.5 MPa ,额定转速 $1000\text{ r}/\text{min}$;活门前组球阀均为通径 50 mm ,公称压力 1.6 MPa 。

与仿真输入参数相对应,调定系统稳态压力为 0.4 MPa 。从打开泵源到系统工作,产生剧烈振动与噪声,直至噪声消失,系统稳定后关闭泵源。将这一过程中通过活门入口处安装的压力传感器检测到的数据以模拟信号的形式输出到计算机信号采集系统。

3.2 实验数据分析

实验过程中系统稳态流量为 $3605\text{ kg}/\text{h}$,油泵控制活门入口压力脉动曲线如图 7 所示。

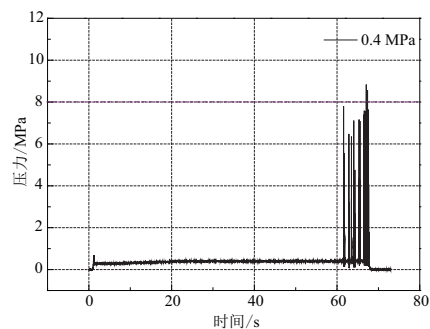


图7 活门入口压力

对图 7 中活门入口压力变化曲线进行分析,系统压力变化如下:开始时,泵源打开向系统建压,此时系统稳定。后由于活门突然关闭,高速油液传输受阻,活门入口发生巨大压力冲击,其瞬时峰值高达 8.136 MPa,产生了 7.736 MPa 的升压值。此时液动控制活门系统中发出有如锤击的噪声并伴随剧烈振动,由此可判断管路中产生了水锤现象。由于管路较长且排布复杂,压力波沿着管路传播,虽然管路有一定的约束作用,但不能使压力波迅速衰减,剧烈振动与噪声仍然持续 7 s 左右才消失。水锤压力波逐渐衰减消失后,系统恢复稳定。

实验曲线与仿真曲线对比如图 8 所示,可见仿真计算结果与试验结果较为吻合,因此本文所建立的管路系统模型是准确有效的。证明该模型搭建合理、计算结果准确,可用于开展后续工况计算。

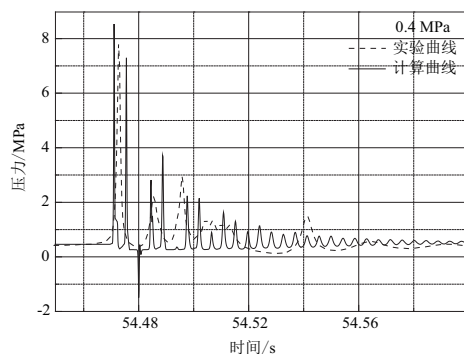


图 8 实验曲线与计算曲线对比

4 水锤抑制优化策略仿真分析

本节主要通过对控制活门动力特性的模拟,从而模拟活门开启或引起的管路压力脉动特性,分析不同控制策略下活门入口处的压力脉动变化情况,最终给出相应改进措施。

根据工程经验,压力脉动幅度主要受射流传感器响应速度、活门匹配腔入口压力及控制端管路流通面积 3 处影响。因此,设定仿真计算工况如表 2 所示。

表 2 仿真计算工况参数

序号	设计变量	参数 1	参数 2	参数 3
1	射流传感器响应速度/s	0.001 25	0.012 50	0.125 00
2	匹配腔入口压力/MPa	0.3	0.2	0.1
3	管路通径/m	0.034	0.024	0.014

a) 射流传感器响应速度对水锤效应的影响

图 9 为射流传感器响应速度降低时控制活门入口的压力仿真计算情况。图中当射流传感器响应速度从 0.001 25 s 下降到 0.125 s 时,冲击压力脉动幅度随着射流传感器响应速度降低(液面下降速率)而降低。对比 0.125 s 与 0.001 25 s 的压力变化曲线,射流传感器响应速度变慢的同时压力脉动波衰减速度也明显加快,说明延长射流传感器的响应速度能够有效地控制水锤现象的产生,响应速度越慢,控制效果越好。

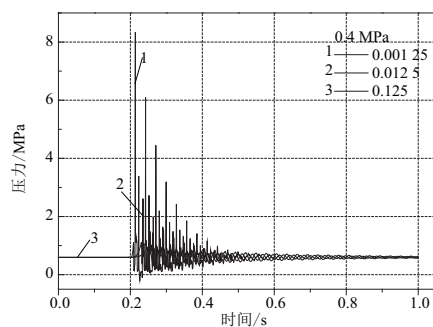


图 9 活门入口压力变化

b) 匹配腔压力对水锤效应的影响

匹配腔压力的作用是保证液动控制活门关闭性能。图 10 为降低匹配腔压力时活门入口的压力脉动仿真情况。当把匹配腔压力从 0.3 MPa 降低到 0.2 MPa 和 0.1 MPa 之后,冲击压力幅度也随之降低。

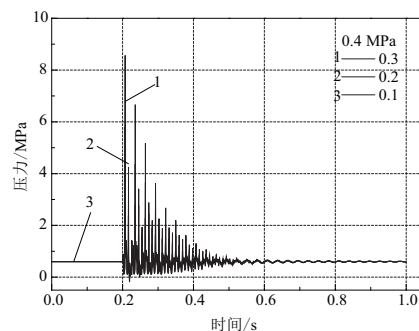


图 10 活门入口压力变化

c) 控制腔管路管径对水锤效应的影响

图 11 为不同管径下控制活门入口压力变化曲线。可以看出,控制端管路流通直径(压力变化速度)越小,活门关断引起的压力脉动幅度越小。

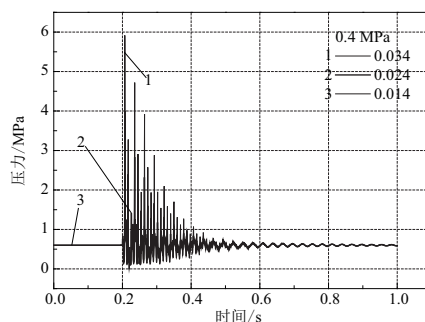


图 11 活门入口压力变化

通过对关键设计变量进行优化策略仿真分析,在控制活门结构设计无法改动的条件下,抑制压力脉动可从以下 3 方面着手:

- 1) 调低油面传感器响应速率,或者降低液面下降速率;
- 2) 降低液动控制活门匹配腔压力;
- 3) 缩小控制端管路通径。

5 结语

通过特征线法的水锤模型建立,利用 Flowmaster 对控制活门管路系统进行瞬态特性仿真分析,得到活门入口处的压力脉动以及射流传感器开度变化曲线,并搭建控制活门及其管路系统试验台,将采集到的实际工况下压力脉动数据与仿真计算结果进行对比,验证了数学模型和仿真方法的可靠性。

通过分析系统工作原理并进行仿真计算后,提出调低射流传感器响应速率、降低活门匹配腔压力、缩小管路通径等 3 项解决方案,为燃油系统优化设计提供一定的借鉴与参考。

参考文献:

- [1] 董玉娥. 大流量大高差重力流输水过程的水锤防护研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [2] 徐艳艳. 长距离高扬程多起伏输水管道采用箱式双向调压塔等措施的水锤防护研究[D]. 西安:长安大学,2008.

- [3] 蒋劲. 确定泵系统阀门最优关闭程序的 VS 法研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1994(5):481-486.
- [4] 杨成. 基于 CFX 的输水管道水锤现象的数值研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [5] 周瑞祥,王建平,沈燕良,等. 飞机燃油复杂管道压力瞬态特性分析[J]. 系统仿真学报,2004(5):887-889.
- [6] 张洪. 基于射流理论的液动输油技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2011.
- [7] 李阳. 基于 CFD 大流量水隔离泵系统逆止阀噪声特性研究[D]. 沈阳:沈阳大学,2015.
- [8] 李斌,蔡标华,俞健,等. 船舶泵阀移水系统水锤抑制方法研究[J]. 舰船科学技术,2017,39(1):96-103.
- [9] 刘文彬. 水管路系统阀门流固耦合振动噪声特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [10] 封海波. 海水管路系统中阀门动态特性和噪声控制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.

收稿日期:2018-02-26

(上接第 128 页)

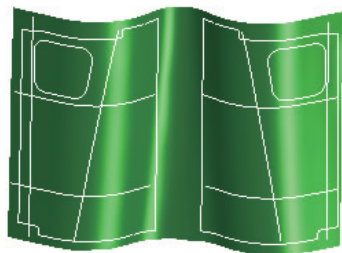


图 9 模具刻线重建结果

均误差为 0.0570 mm,能够满足工艺要求。人工操作进行刻线点采样的随机性较大,测量数据中可能存在少量噪声,因此最大误差可能略高。此外采用平面拟合求交法获得的重建结果可能比直接拟合样条曲线并投影误差稍大,但是更能反映实际工程应用语义。图 10 给出了重建模型的误差分布云图。

表 1 重建模型误差分析

	最大值	平均值	标准差
侧向偏差	0.342 0	0.001 0	0.014 8
法向偏差	0.522 7	0.057 0	0.054 0
几何偏差	0.522 7	0.057 3	0.054 0

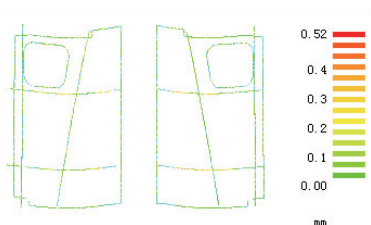


图 10 重建模型误差分布云图

4 结语

本文研究了航空模具刻线的测量与重建问题。对于刻线测量采用了视觉和接触式相结合的测量形式,灵活性、现场性和测量精度较好。在数据点处理过程中充分利用了采样点的几何特性,并引入了统计学的知识,所提两种方法优势互补可明显提高重建效率。根据数据点的分布特征总结了模具刻线的重建方法,并对重建结果进行误差评价从而证明本文方法的有效性。该方法对于同类型的既有自由曲面外形又有复杂刻线的航空实物制造依据的逆向重建亦有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 范玉青. 现代飞机制造技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
- [2] Raja V, Fernandes K J. Reverse Engineering: An Industrial Perspective[M]. [S.I.]: Springer Publishing Company, 2006.
- [3] 成思源,张湘伟,黄曼慧. 逆向工程技术及其在模具设计制造中的应用[J]. 机械设计与制造,2009(6):233-235.
- [4] 彭艳敏,党建卫,蔡渊,等. 基于综合切面模线的飞机零件逆向建模[J]. 航空制造技术,2016,502(7):87-90.
- [5] 王相君,赵肖楠. 运-12 飞机发房模具高精度逆向设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2014(6):39-42.
- [6] 景智,许学军. 关于提高大型工装逆向及加工精度的探讨[C]. 北京:2012 航空试验测试技术学术交流会论文集,2012.
- [7] Kim P, Kim H. Point Ordering with Natural Distance Based on Brownian Motion[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2010,123:1-17.
- [8] Zeng Y, Nguyen T A, Yan B, et al. A distance-based parameter free algorithm for curve reconstruction[J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(2):210-222.

收稿日期:2018-02-26