



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20190264

数字出版日期: 2020-12-17; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20201216.2043.004.html>

H-Bot 型 3D 打印机动力学参数辨识与定位误差补偿

曹深深¹, 毕德学¹, 邹绍昕²

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 中国人民解放军 32182 部队, 北京 100042)

摘要: 为提高经济型 3D 打印机的打印精度, 以 H-Bot 型 3D 打印机为研究对象, 对传统的运动模型进行简化, 建立新的运动学方程, 并搭建动力学仿真模型. 通过引入正交实验和参数辨识方法对模型参数进行优化, 对打印机的单轴运动进行标定, 利用微分误差补偿法对运动进行误差补偿. 提出一种基于以上方法的单轴运动标定方法, 该方法可显著提高打印机喷嘴的定位精度.

关键词: 3D 打印机; 动力学仿真; 参数辨识; 误差补偿

中图分类号: TP334.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2021)02-0040-06

Dynamic Parameter Identification and Positioning Error Compensation of H-Bot 3D Printer

CAO Shenshen¹, BI Dexue¹, ZOU Shaoxin²

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;
2. 32182 PLA Troops, Beijing 100042, China)

Abstract: In order to improve the printing precision of economical 3D printers, the 3D printer based on H-Bot is used as the research subject, the traditional motion model is simplified, a new kinematics equation is established, and a dynamic simulation model is built. By introducing orthogonal test and parameter identification method to optimize the model parameters, the uniaxial motion of the printer is calibrated, and the differential error compensation method is used to compensate the motion. A uniaxial motion calibration method based on the above method is proposed, which can significantly improve the positioning accuracy of the printer nozzle.

Key words: 3D printer; dynamic simulation; parameter identification; error compensation

3D 打印是一种快速成型的技术, 是区别于传统减材制造的一种加工方法^[1]. 它的出现使得制造模式由大批量的固化生产转向小规模个性化生产, 满足了人们在家即可完成发明、创新和低成本的个性化生产等一系列过程的需求^[2]. 从桌面级 3D 打印机用户使用层面的角度分析, 高打印精度的 3D 打印机造价较高, 很难真正普及使用; 成本较低的 3D 打印机打印精度又无法满足需求^[3]. 因此, 如何在节约成本的基础上有效提高定位精度的问题成为约束 3D 打印机普及的重要障碍. 目前国内外也提出一些提高打印机精度的方法. 罗德岛大学的 Sollmann^[4]通过建立动力学模型, 用误差参数进行补偿的方法提高了同步

带定位机构的精度; 河北工业大学的丁承君等^[5]引入了布兰森汉姆 (Bresenham) 直线算法实现了对 H-Bot 机构运动误差修正; 燕山的李江滨^[6]通过建立 3D 打印机的误差参数模型, 采用误差参数辨识和补偿的方法提高了末端执行器的位置精度.

本文提出对 3D 打印机的单轴进行标定, 该方法在小型通用自组打印机的硬件条件下, 可以将打印机定位误差降低到原来的 1/10.

1 运动模型分析与简化

为了研究提高 H-Bot 型 3D 打印机的定位精度

收稿日期: 2019-10-28; 修回日期: 2020-03-14

作者简介: 曹深深 (1993—), 男, 河南周口人, 硕士研究生; 通信作者: 毕德学, 教授, dexue@tust.edu.cn

的方法,需了解打印机的传动结构,并找出影响运动误差的因素.在 H-Bot 型 3D 打印机系统中, xy 方向的执行器为同步带牵引的 H-Bot 结构,可视为由多段弹性体串联而成,其原模型如图 1(a)所示.打印机运动一般受电机的输出转矩、运动机构的惯性以及系统内部的非线性摩擦等因素的影响.假定滑块质量 m_{cart} ,滑桥质量 m_{bridge} ,滑轮质量 m_p ,转动惯量 J_p ,同步带的质量可忽略不计.摩擦力主要是直线轴承与光轴的滑动摩擦,且其模型为非线性模型,除黏性摩擦还有库仑摩擦.摩擦力的模型为

$$F_f = fv + \text{sign}(v)F_c \quad (1)$$

式中: f 表示黏性摩擦因数; v 表示运动速度; F_c 表示库仑摩擦力.

假设滑块与滑桥之间的黏性摩擦因数为 b_{cart} 、库仑摩擦力为 F_{ccart} ,滑桥与固定滑轨之间的黏性摩擦因数为 b_{bridge} 、库仑摩擦力为 F_{cbridge} .

打印机在执行复杂轮廓时,电机需要在短距离高速运动条件下频繁启停、换向,采用指数型加减速控制.假设步进电机阻力矩为 $T_i = K_i \omega$,加速转矩为 $J \dot{\omega}$,负载运动方程为

$$\tau_{M_i} = J \dot{\omega} = T_0 - K_i \omega \quad (2)$$

式中: T_0 是电磁转矩; J 是负载转动惯量; K_i 是转矩常数; ω 是电机角速度.

拉格朗日方程对于解决复杂的非自由质点系的动力学问题十分方便^[7-8],拉格朗日方程为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_j} \right) = Q_j \quad (3)$$

式中: L 是拉格朗日函数.

如图 1(a)所示,滑轮在一定程度上被认为是可自由转动的,将 $\varphi_1 - \varphi_8$ 和 x 、 y 分别被定义为角量广义坐标和线量广义坐标,即 10 个自由度.广义力的表达式为

$$\begin{cases} Q_j = \frac{\delta W}{\delta q_j} & (j=1,2,\dots,10) \\ \delta W = -F_x \delta x - F_y \delta y + \tau_{M1} \varphi_1 + \tau_{M2} \varphi_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: δW 为系统中非保守力的虚功; δq_j 为沿广义坐标方向的虚位移; Q_j 为每个自由度的广义力.

对于微控制器来说,传统的 10 自由度传动计算量较大,需尽量简化模型,减少控制器运算时间.通过对模型中的变量进行复合,将除了滑桥上的滑轮之外的所有滑轮的惯性复合到电机滑轮上,此时 $J_{M_i} = 2J_p$ ($i=1,2$).只有当滑块沿 x 方向有位移时,才

考虑滑轮的惯性,并将其复合到滑块的质量中去^[9].此时新的滑块质量为

$$m_{\text{cart8}} = m_{\text{cart20}} + 4J_p \frac{1}{r^2} \quad (5)$$

式中: m_{cart20} 是未简化的原模型中滑块的质量; m_{cart8} 是简化后的简化模型中滑块的质量.

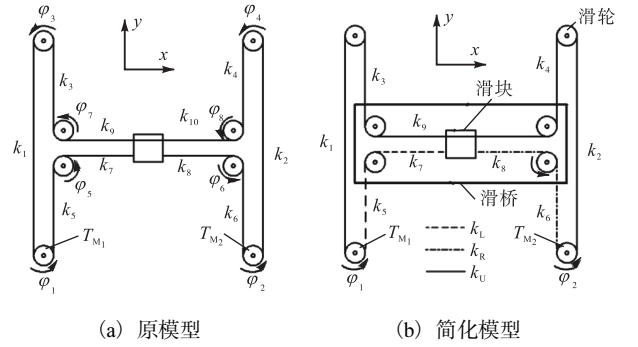


图 1 H-Bot 系统广义坐标示意图

Fig. 1 Generalized coordinate diagram of H-Bot system

简化后,除电机滑轮外,其余滑轮均视为理想滑轮,系统中的广义坐标减少为 4 个,即线量广义坐标 x 、 y 以及角量广义坐标 φ_1 、 φ_2 .对广义坐标简化后,同步带的弹性系数也相应进行简化,将同步带划分为 3 个部分 k_L 、 k_R 、 k_U ,每一部分由多段弹性体串联而成,如图 1(b)所示.弹性系数表示为

$$\begin{cases} k_L = \frac{k_5 k_7}{k_5 + k_7} \\ k_R = \frac{k_6 k_8}{k_6 + k_8} \\ k_U = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5}{k_1 k_2 k_3 k_4 + k_1 k_2 k_3 k_5 + k_1 k_2 k_4 k_9 + k_2 k_3 k_4 k_9} \end{cases} \quad (6)$$

通过以上简化,求得运动方程为

$$\ddot{x} = \frac{1}{m_{\text{cart}}} [-(k_L + k_R)x - (k_L - k_R)y + k_L r \varphi_1 + k_R r \varphi_2 - b_{\text{cart}} \dot{x} - \text{sign}(\dot{x}) F_{\text{ccart}}] \quad (7)$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m_{\text{bridge}}} [-(k_L - k_R)x - (k_L + k_R + 4k_U)y + (k_L + 2k_U)r \varphi_1 - (k_R + 2k_U)r \varphi_2 - b_{\text{cart}} \dot{y} - \text{sign}(\dot{y}) F_{\text{cbridge}}] \quad (8)$$

$$\ddot{\varphi}_1 = \frac{1}{J_{M1}} [k_L r x + (k_L + 2k_U) r y - (k_L + k_U) r^2 \varphi_1 + k_U r^2 \varphi_2 - T_0 - K_i \dot{\varphi}_1] \quad (9)$$

$$\ddot{\varphi}_2 = \frac{1}{J_{M2}} [k_R r x - (k_R + 2k_U) r y - (k_R + k_U) r^2 \varphi_2 + k_U r^2 \varphi_1 - T_0 - K_i \dot{\varphi}_2] \quad (10)$$

2 动力学仿真模型搭建

机械系统是连续的动态系统,只能通过微分方程来描述^[10],对系统的数字仿真需要将描述系统运动的微分方程通过泰勒展开式进行离散化,可借助

MATLAB 中的动态系统建模和仿真的集成环境 Simulink 来实现. 根据简化后 H-Bot 结构动力学方程式(6)–(10),建立运动学仿真模型,如图2所示. 模型中的 x_1 — x_8 分别表示 x 、 \dot{x} 、 y 、 \dot{y} 、 φ_1 、 $\dot{\varphi}_1$ 、 φ_2 、 $\dot{\varphi}_2$.

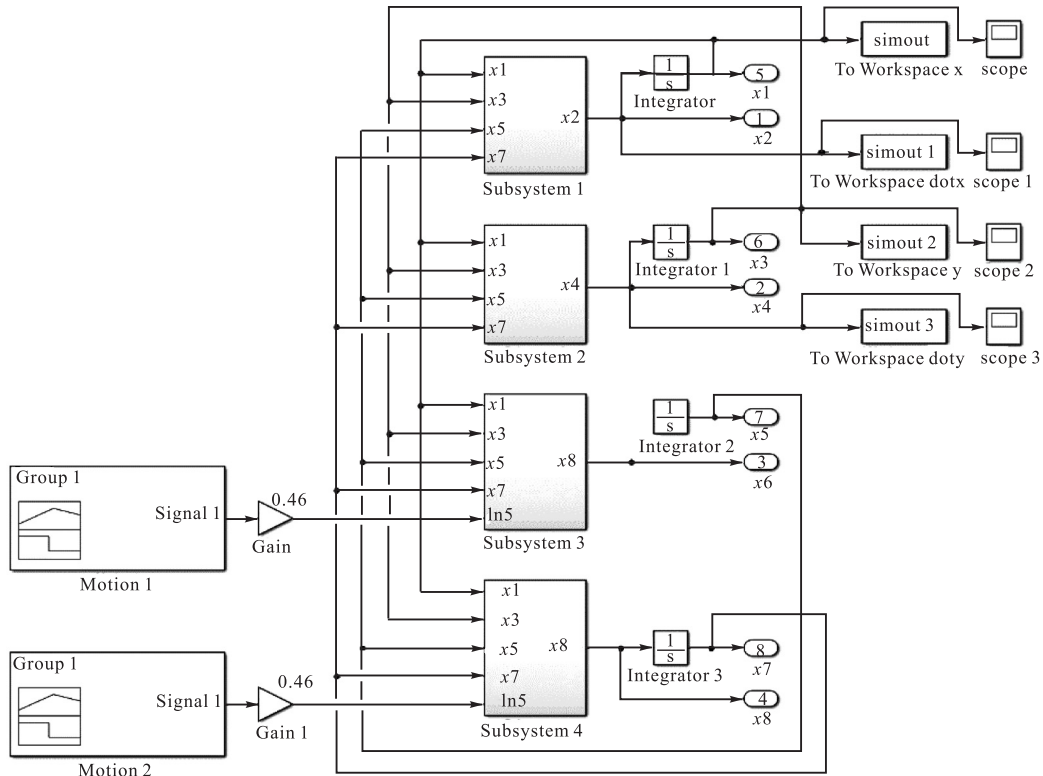


图2 Simulink 仿真模型

Fig. 2 Simulink model

3 初始化模型参数估计

在仿真模型中, T_0 、 K_t 、 J_M 、 m_{cart} 、 k_L 、 k_R 、 k_U 、 b_{cart} 、 b_{bridge} 、 F_{ccart} 、 F_{cbridge} 等参数无法通过测量等方式精确获取,又对仿真结果产生不同程度的影响,则将

这些参数视为一系列的影响因子,通过实验进行参数辨识. 通过基恩士激光位移传感器以 0.01 s 的间隔采集平台在 y 方向分别用 0.75 s 和 0.25 s 运动 8 mm 两组实验,其运动实际距离分别为 7.867 mm 和 7.979 mm. 绘制运动曲线图如图3所示.

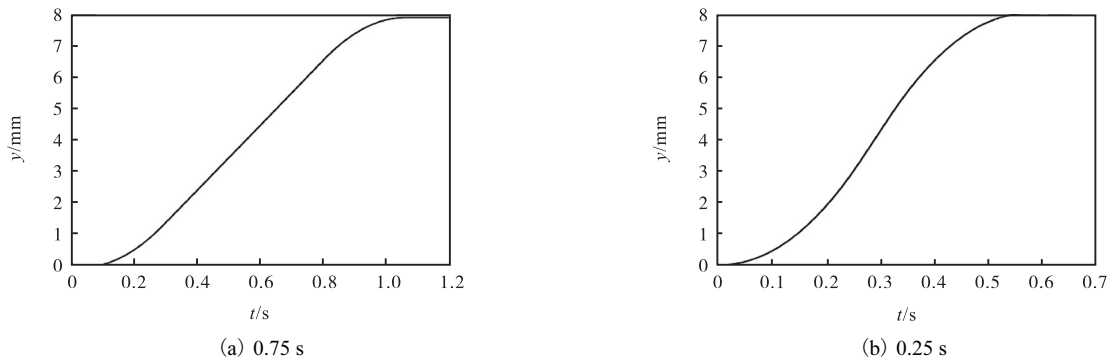


图3 y 方向运动位移曲线图
Fig. 3 y direction motion displacement curve

根据图 3 的实际运动位移曲线, 结合经验确定每个参数基本的数量级, 然后通过重复实验对各个参数进行估计, 估计值见表 1.

表 1 动力学参数估计

Tab. 1 Kinetic parameter estimation

参数	数值
r/m	6.37×10^{-3}
$T_{\theta}/(N \cdot m)$	1.2×10^{-2}
$K_{\theta}/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$	6×10^{-3}
$J_M/(kg \cdot m^2)$	1×10^{-3}
m_{cart}/kg	1
m_{bridge}/kg	1.42
$k_L/(N \cdot m^{-1})$	2×10^5
$k_R/(N \cdot m^{-1})$	2×10^5
$k_U/(N \cdot m^{-1})$	1×10^5
$b_{cart}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	30
$b_{bridge}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	50
F_{ccart}/N	5
$F_{cbridge}/N$	10

按照表 1 中参数设置进行仿真运动 8 mm 实验, 并将仿真曲线与传感器测得的实际运动位移曲线比较, 结果如图 4 所示. 仿真结果与实际情况偏差较大, 需对仿真中的参数进行辨识和优化.

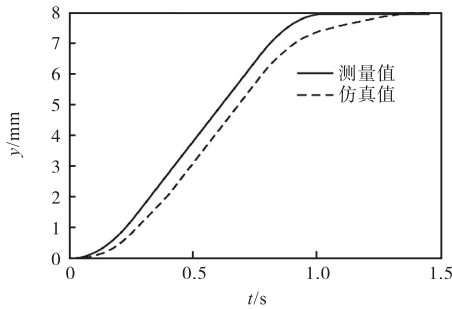


图 4 y 方向运动位移和仿真位移曲线图

Fig. 4 y direction motion displacement and simulated displacement curve

4 参数辨识与优化实验设计

实验的目标是使仿真结果与真实运动距离的差值 s 尽可能小作为实验的评价标准. 在 y 方向的传动机构运动实验中, 通过控制变量法对各个参数进行显著性分析, 以表 1 中的经验估计值为基准, 每个参数范围分别取估计基准的 0.5 倍和 2 倍. 实验时, 在表 1 数据的基础之上, 每次控制一个变量变化, 所得实验结果见表 2.

由实验数据可得: k_L 、 k_R 、 k_U 3 个参数在其 3 个水平下对实验结果的影响不显著, 其对实验的影响忽略不计, 分别取 $k_L = 1 \times 10^5 N/m$ 、 $k_R = 1 \times 10^5 N/m$ 、 $k_U =$

$1 \times 10^5 N/m$. 其余参数均对实验结果有较显著影响, 需通过正交实验进一步优化数据组合.

表 2 控制变量实验结果

Tab. 2 Control variable experiment results

参数	水平值	s/mm
$T_{\theta}/(N \cdot m)$	1.2×10^{-2}	4.8199×10^{-4}
	6×10^{-3}	3.4×10^{-3}
	2.4×10^{-2}	5.5×10^{-3}
$K_{\theta}/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$	6×10^{-3}	4.8199×10^{-4}
	3×10^{-3}	2.6×10^{-3}
	1.2×10^{-2}	2.9×10^{-3}
$J_M/(kg \cdot m^2)$	1×10^{-3}	4.8199×10^{-4}
	5×10^{-4}	7.1275×10^{-5}
	2×10^{-3}	1.5×10^{-3}
$k_L/(N \cdot m^{-1})$	2×10^5	4.8199×10^{-4}
	1×10^5	3.8204×10^{-4}
	4×10^5	4.8188×10^{-4}
$k_R/(N \cdot m^{-1})$	2×10^5	4.8199×10^{-4}
	1×10^5	4.8207×10^{-4}
	4×10^5	4.8188×10^{-4}
$k_U/(N \cdot m^{-1})$	1×10^5	4.8199×10^{-4}
	5×10^4	4.8216×10^{-4}
	2×10^5	4.8183×10^{-4}
$b_{bridge}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	50	4.8199×10^{-4}
	25	4.3577×10^{-4}
	100	1.1×10^{-3}
$F_{cbridge}/N$	10	4.8199×10^{-4}
	5	4.4756×10^{-4}
	20	6.1183×10^{-4}

通过 Minitab 软件的田口设计功能获取该五因素三水平的正交实验表, 并设置正交实验中各个参数的水平取值范围, 每个参数取 3 个水平值, 见表 3, 正交实验结果见表 4.

表 3 正交实验参数水平值

Tab. 3 Orthogonal test parameter level

参数	水平	水平值
$T_{\theta}/(N \cdot m)$	a_1	1.28×10^{-2}
	a_2	1.3×10^{-2}
	a_3	1.32×10^{-2}
$K_{\theta}/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$	b_1	6.5×10^{-3}
	b_2	7×10^{-3}
	b_3	7.5×10^{-3}
$J_M/(kg \cdot m^2)$	c_1	4×10^{-4}
	c_2	5×10^{-4}
	c_3	6×10^{-4}
$b_{bridge}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	d_1	33
	d_2	40
	d_3	47
$F_{cbridge}/N$	e_1	9
	e_2	10
	e_3	11

评价标准为测量值与仿真值之间的差值越小, 结

果越优. 观察表 4 中的实验数据, 最优组合为 $a_2 b_2 c_2 d_1 e_1$, 按照最优组合对应的参数代入仿真模型之中, 绘制仿真曲线与实际运动曲线, 结果如图 5 所示, 拟合效果较好.

表 4 正交实验结果

Tab. 4 Orthogonal experiment results

实验号	T_0	K_t	J_M	b_{bridge}	$F_{cbridge}$	s/mm
1	a_1	b_1	c_1	d_1	e_1	$4.980 5 \times 10^{-4}$
2	a_1	b_1	c_1	d_1	e_2	$4.803 6 \times 10^{-4}$
3	a_1	b_1	c_1	d_1	e_3	$4.627 2 \times 10^{-4}$
4	a_1	b_2	c_2	d_2	e_1	$1.347 7 \times 10^{-4}$
5	a_1	b_2	c_2	d_2	e_2	$1.485 1 \times 10^{-4}$
6	a_1	b_2	c_2	d_2	e_3	$1.623 0 \times 10^{-4}$
7	a_1	b_3	c_3	d_3	e_1	$6.350 3 \times 10^{-4}$
8	a_1	b_3	c_3	d_3	e_2	$6.473 9 \times 10^{-4}$
9	a_1	b_3	c_3	d_3	e_3	$6.597 0 \times 10^{-4}$
10	a_2	b_1	c_2	d_3	e_1	$2.577 0 \times 10^{-4}$
11	a_2	b_1	c_2	d_3	e_2	$2.415 1 \times 10^{-4}$
12	a_2	b_1	c_2	d_3	e_3	$2.253 9 \times 10^{-4}$
13	a_2	b_2	c_3	d_1	e_1	$4.237 8 \times 10^{-5}$
14	a_2	b_2	c_3	d_1	e_2	$4.303 4 \times 10^{-5}$
15	a_2	b_2	c_3	d_1	e_3	$4.829 2 \times 10^{-5}$
16	a_2	b_3	c_1	d_2	e_1	$3.293 2 \times 10^{-4}$
17	a_2	b_3	c_1	d_2	e_2	$3.413 4 \times 10^{-4}$
18	a_2	b_3	c_1	d_2	e_3	$3.535 1 \times 10^{-4}$
19	a_3	b_1	c_3	d_2	e_1	$3.685 9 \times 10^{-4}$
20	a_3	b_1	c_3	d_2	e_2	$3.522 0 \times 10^{-4}$
21	a_3	b_1	c_3	d_2	e_3	$3.358 8 \times 10^{-4}$
22	a_3	b_2	c_1	d_3	e_1	$1.613 1 \times 10^{-4}$
23	a_3	b_2	c_1	d_3	e_2	$1.620 0 \times 10^{-4}$
24	a_3	b_2	c_1	d_3	e_3	$1.629 5 \times 10^{-4}$
25	a_3	b_3	c_2	d_1	e_1	$1.967 1 \times 10^{-4}$
26	a_3	b_3	c_2	d_1	e_2	$2.098 4 \times 10^{-4}$
27	a_3	b_3	c_2	d_1	e_3	$2.229 7 \times 10^{-4}$
k_1	4.254×10^{-4}	3.580×10^{-4}	3.280×10^{-4}	2.449×10^{-4}	2.915×10^{-4}	
k_2	2.092×10^{-4}	1.184×10^{-4}	2.000×10^{-4}	2.807×10^{-4}	2.918×10^{-4}	
k_3	2.414×10^{-4}	3.995×10^{-4}	3.481×10^{-4}	3.503×10^{-4}	2.926×10^{-4}	
R	2.162×10^{-4}	2.811×10^{-4}	1.481×10^{-4}	1.054×10^{-4}	0.011×10^{-4}	

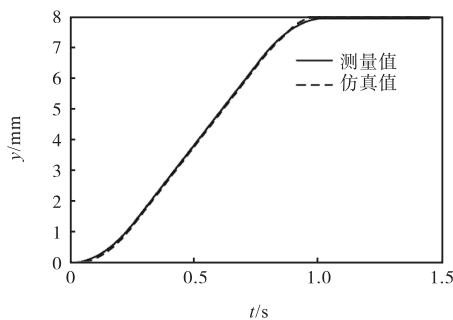


图 5 正交实验拟合曲线

Fig. 5 Orthogonal test fitting curve

对 m_{cart} 、 b_{cart} 、 F_{cart} 参数进行辨识需进行 x 方向的运动和仿真优化实验. 然后按前文中方法对参数进行辨识和优化实验. 辨识后的动力学仿真模型参数见表 5. 为确保所辨识的参数的有效性, 进行验证实验, 将采集平台和仿真中的运行时间都改为 0.8 s, 得到验证实验的拟合效果曲线如图 6 所示. 由图 6 可知: 验证实验的拟合效果十分理想, 证明了所辨识的动力学参数的合理性. 根据这组参数进行仿真, 能够较好地描述出当前速度下 3D 打印头的实际运动情况.

表 5 通过实验辨识所得动力学仿真模型参数

Tab. 5 Identification of the obtained dynamic simulation model parameters by experiment

参数	数值	参数	数值
r/m	6.37×10^{-3}	$k_R/(N \cdot m^{-1})$	2×10^5
$T_0/(N \cdot m)$	1.3×10^{-2}	$k_U/(N \cdot m^{-1})$	1×10^5
$K_U/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$	7×10^{-3}	$b_{cart}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	4
$J_M/(kg \cdot m^2)$	6×10^{-3}	$b_{bridge}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	33
m_{cart}/kg	0.7	F_{ccart}/N	0.3
m_{bridge}/kg	1.42	$F_{cbridge}/N$	9
$k_L/(N \cdot m^{-1})$	2×10^5		

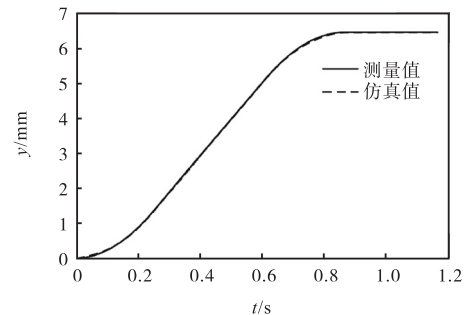


图 6 验证实验的拟合曲线图

Fig. 6 Verification curve of the verification test

5 误差补偿实验

采用基于微分变换的思想, 通过将运动参数名义值和真实值之间的微小偏差补偿给控制器的名义参数, 从而达到提高定位精度的目的^[11]. 其误差补偿原理如图 7 所示, 数学模型可表示为

$$S_{输入} = S_{名义} + S_{误差} = S_{名义} + (S_{名义} - S_{仿真}) \quad (11)$$

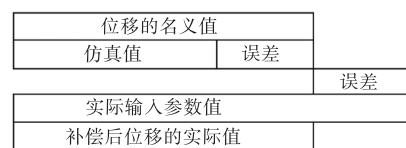


图 7 微分变换原理

Fig. 7 Principle of differential transformation

按照差分思想进行多次补偿实验,实验中设置相同的运动速度,测量在不同的运动时间内的位移,表6为进行10次实验的实验数据。

分析实验数据可以看出,通过补偿后,定位误差有了明显的减小,10次实验的误差均值由0.064 mm降为0.005 mm,误差补偿起到了显著效果。

表6 误差补偿实验结果

Tab. 6 Error compensation experiment results

序号	时间/s	理论值/mm	仿真值/mm	补偿值/mm	是否补偿	测量值/mm	误差/mm
1	0.36	3.840	3.799	0.041	否	3.801	0.039
					是	3.849	0.009
2	0.40	4.267	4.220	0.047	否	4.222	0.045
					是	4.265	0.002
3	0.44	4.693	4.642	0.051	否	4.644	0.049
					是	4.700	0.007
4	0.50	5.333	5.274	0.059	否	5.282	0.051
					是	5.331	0.002
5	0.56	5.973	5.907	0.066	否	5.733	0.060
					是	5.970	0.003
6	0.60	6.400	6.329	0.071	否	6.332	0.068
					是	6.408	0.008
7	0.64	6.827	6.752	0.075	否	6.755	0.072
					是	6.830	0.003
8	0.70	7.467	7.383	0.084	否	7.384	0.083
					是	7.469	0.002
9	0.74	7.893	7.806	0.087	否	7.806	0.087
					是	7.885	0.008
10	0.80	8.533	8.438	0.095	否	8.444	0.089
					是	8.527	0.006

6 结 语

本文在充分考虑系统中惯性、摩擦以及弹性形变等可能导致定位误差的因素的基础上,简化运动学模型,通过设计正交实验,对模型参数进行辨识和优化,使仿真结果能够准确贴合实际运动情况,设计了单轴直线运动的误差补偿的算法并进行误差补偿实验,证明了通过对3D打印机传动机构进行运动学标定和误差补偿可提高其定位精度的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] 张宝庆,潘建超,孟凡越,等. 3D打印速度对成型精度影响的有限元模拟与研究[J]. 长春理工大学学报:自然科学版,2017,40(4):45-48.
- [2] 赵志铎. 桌面级3D打印机设计定位研究[J]. 设计,2018(7):89-91.
- [3] 张朝刚. 桌面级3D打印机的技术发展及应用前景[J]. 科技经济导刊,2018,26(4):116.
- [4] Sollmann K S. Modeling, simulation and control of a belt

driven, parallel H-frame type two axes positioning system[D]. Rhode Island: University of Rhode Island, 2007.

- [5] 丁承君,张鹏,闫彬. 平面型H-bot机构的运动控制算法[J]. 天津工业大学学报,2017,36(1):77-82.
- [6] 李江滨. 基于并联机构的3D打印关键技术研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2015.
- [7] 徐涛,王美玲,张兆丰,等. 基于拉格朗日方程的积油转子系统力学建模和数值仿真[J]. 机电工程技术,2015,44(10):55-60.
- [8] 曾达幸,张星,樊明洲,等. 3-CUR解耦并联3D打印机结构优化与动力学分析[J]. 中国机械工程,2017,28(12):1413-1420.
- [9] 阴贺生,赵文豪,宋杰,等. 基于三臂并联结构的桌面3D打印机[J]. 机械,2015,42(2):36-40.
- [10] 韩东宇,陈欢龙,余春华. 空间机械臂动力学特性的仿真分析研究[J]. 上海航天,2018,35(1):9-17.
- [11] 韩金龙,李方舟. FDM型三轴并联桌面3D打印机研究[J]. 机械工程师,2016(5):19-21.

责任编辑:周建军