

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.02.03

## 3D 打印机速度规划算法研究与优化

吴 飞, 金云鑫, 王梦辉

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:**文章在现有速度规划算法的基础上提出 T-S 速度曲线模型。采用梯形速度曲线完成路径规划,得到各阶段的位移及临界点速度;利用贝塞尔曲线将加速阶段、减速阶段改成 S 形加减速曲线,完成整个路径段的速度规划;结合前瞻算法提出新的速度规划算法。仿真结果表明,该算法既解决了由于加速度突变而引起的柔性冲击问题又兼顾规划效率。通过振动信号采集,验证该算法在抑制振动冲击上的优势。通过实物打印试验,验证该算法明显提高了打印模型品质。

**关键词:**3D 打印;步进电机;速度规划;加减速曲线;贝塞尔曲线

**中图分类号:**TH162 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)02-0160-07

### Research and optimization of velocity planning algorithm for 3D printer

WU Fei, JIN Yunxin, WANG Menghui

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** This paper introduces the T-S velocity curve model based on existing velocity planning algorithms. Following the completion of path planning using the trapezoidal velocity curve, the displacement and critical point velocity for each stage are determined. Subsequently, the acceleration and deceleration stages are transformed into S-shaped acceleration and deceleration curves using the Bézier curve to achieve velocity planning for the entire path segment. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm effectively addresses the issue of flexible impact resulting from sudden acceleration changes while ensuring planning efficiency. Finally, the algorithm's advantage in suppression of vibration shock is validated through vibration signal acquisition. Physical printing experiments further confirm a significant improvement in the quality of the printed models.

**Key words:** 3D printing; stepper motor; velocity planning; acceleration and deceleration curve; Bézier curve

步进电机开环控制相对于闭环控制,其成本和复杂度更低,但控制性能和可靠性不足。随着细分技术的发展,开环控制利用细分驱动减小步进电机步距角提高精度、消除低频震荡;结合速度曲线算法,可有效避免失步、过冲等现象。因此在主控芯片算力有限的桌面级 3D 打印环境下,步进电机多采用这种开环控制方式<sup>[1]</sup>。然而随着 3D 打印近几十年来的迅猛发展,对打印机各方面性能的要求不断提高,打印机执行机构质量也在

不断增加<sup>[2]</sup>。根据步进电机的距频特性、加速度距频特性可知,执行机构重量增加在打印过程中连续启停、加减速过程中更易发生失步、过冲、电机堵塞等不良现象,严重影响打印成品的精度。因此提出新型速度曲线模型,成为步进电机开环控制系统的主要研究目标。

#### 1 3D 打印机中常见速度曲线模型

目前 3D 打印机控制系统中,常用的速度曲

收稿日期:2023-11-07;修回日期:2023-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52275505)

作者简介:吴 飞(1973—),男,河南叶县人,博士,武汉理工大学教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:wufei@whut.edu.cn.

线模型有梯形速度曲线模型和五段 S 速度曲线模型<sup>[3]</sup>,其速度、加速度、加加速度(加速度变化率)曲线如图 1 所示。

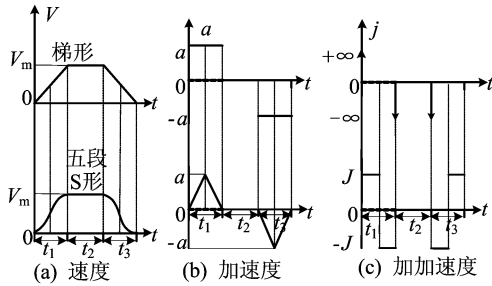


图 1 2 种速度曲线模型对比

梯形速度曲线模型的速度变化趋势一定程度上符合步进电机的频率特性,但其加速度不连续,在加减速阶段与匀速阶段衔接处存在突变的情况。在这种情况下会产生柔性冲击,从而引起打印机振动,使打印体表面产生波纹,影响打印成型精度<sup>[4]</sup>。为解决梯形速度曲线模型产生的柔性冲击问题,文献<sup>[5]</sup>将数控系统中的七段 S 形曲线简化为五段 S 形曲线,并引入到 3D 打印控制系统中。五段 S 形速度曲线控制算法将整个过程分为加加速、减加速、匀速、加减速、减减速 5 个阶段,在变速过程中加速度  $a$  先增加后减小,加加速度  $J$  为固定值。从图 1 可以看出,五段 S 形速度曲线柔性较好,解决了梯形速度曲线中存在的加速度突变引起柔性冲击问题,但由于其分段较多,结构复杂依然存在算法计算量大、实现相对复杂等问题。

## 2 T-S 速度规划算法

梯形速度规划算法和五段 S 形速度规划算法无法同时做到减小冲击和提高规划效率。因此本文提出一种 T-S 速度规划模型,既能保证速度曲线模型简单、易于实现,又能解决由于速度突变而产生的柔性冲击问题。

首先采用梯形速度曲线完成打印喷嘴的路径规划,得到喷嘴加速阶段、匀速阶段、减速阶段的位移以及各阶段临界点速度;然后根据梯形速度曲线模型规划的结果,将加速阶段和减速阶段改成 S 形加减速曲线,以完成整个路径段的速度规划,具体步骤如下。

1) 使用梯形速度曲线进行初规划。梯形速度曲线模型将整个运动过程分为匀加速、匀速和匀减速 3 个阶段。在变速过程中,加速度  $a$  始终

为固定值。总运行时间内速度表达式为:

$$V(t) = \begin{cases} at, & 0 \leq t < t_1; \\ v_m, & t_1 \leq t < t_1 + t_2; \\ -a[t - (t_1 + t_2)] + V_m, & t_1 + t_2 \leq t < t_1 + t_2 + t_3 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $V_m$  为匀速进给速度。

在 3D 打印过程中,通过对 G 代码的解析可得打印喷嘴的总位移、匀速进给速度、加速度固定值以及路径规划的初速度和末速度<sup>[6]</sup>。各个阶段位移的计算公式为:

$$S_a = \frac{V_m^2 - V_s^2}{2a} \quad (2)$$

$$S_d = \frac{V_m^2 - V_c^2}{2a} \quad (3)$$

$$S_u = S - S_a - S_d \quad (4)$$

其中:  $S_a$  为加速阶段的位移;  $S_d$  为减速阶段的位移;  $S_u$  为匀速阶段的位移;  $V_s$  为初速度;  $V_c$  为末速度。

2) 采用 6 次贝塞尔曲线,将梯形速度曲线规划好的变速阶段改为 S 形速度曲线。给定路径中的  $n$  个位置,可以得出  $n$  次贝塞尔曲线公式,即

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} P_i (1-t)^{n-i} t^i \quad (5)$$

在步进电机速度规划中,贝塞尔曲线可用于生成平滑的速度曲线。在满足计算复杂度的前提下,6 点贝塞尔曲线在平滑度、自由度方面均优于其他点数的贝塞尔曲线。以加速阶段为例,其速度随时间变化公式为:

$$V(t) = \sum_{i=0}^5 P_i B_i, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (6)$$

其中,  $B_i(t) = C_i (1-t)^{5-i} t^i$ ,  $C_0 = 1, C_5 = 1, C_1 = 5, C_4 = 5, C_2 = 10, C_3 = 10$ 。

$V(t)$  速度曲线可以改写为:

$$V(t) = At^5 + Bt^4 + Ct^3 + Dt^2 + Et + F \quad (7)$$

为了避免在变速过程中速度突变和加速度突变,令  $V_s = P_0 = P_1 = P_2, V_c = P_3 = P_4 = P_5$ , 其中:  $V_s$  为初速度;  $V_c$  为末速度。简化后有:

$$A = -6V_s + 6V_c = -6(V_s - V_c),$$

$$B = 15V_s - 15V_c = 15(V_s - V_c),$$

$$C = -10V_s + 10V_c = -10(V_s - V_c),$$

$$D = E = 0, F = V_s.$$

则有:

$$V(t) = At^5 + Bt^4 + Ct^3 + F \quad (8)$$

假设从 G 代码中解析得到打印喷嘴移动的总位移  $S = 2$  m, 加速度  $a = 1$  m/s<sup>2</sup>, 初速度、末速

度  $V_s = V_e = 0 \text{ m/s}$ 。采用梯形速度曲线模型速度规划,得到加速阶段和减速阶段位移为  $0.5 \text{ m}$ ,匀速阶段位移为  $1.0 \text{ m}$ ,已知经过梯形速度控制算法得到的加速阶段的起始速度为  $0 \text{ m/s}$ 、末速度为  $1 \text{ m/s}$ 。计算可得  $A=6$ 、 $B=-15$ 、 $C=10$ 、 $F=0$ 。其速度、加速度随时间变化的计算公式为:

$$V(t) = 6t^5 - 15t^4 + 10t^3 \quad (9)$$

$$a(t) = 30t^4 - 60t^3 + 30t^2 \quad (10)$$

减速阶段的起始速度为  $1 \text{ m/s}$ 、末速度为  $0 \text{ m/s}$ ,计算可得:

$$V(t) = -6(t-2)^5 - 15(t-2)^4 + 10(t-2)^3 + 1;$$

$$a(t) = -30(t-2)^4 - 60(t-2)^3 + 30(t-2)^2。$$

其中,  $2 \leq t \leq 3$ 。将梯形速度曲线的匀加速和匀减速阶段改为 S 形后,得到 T-S 速度曲线模型。通过 MATLAB 仿真,得到 T-S 速度曲线模型仿真结果,如图 2 所示。从图 2 可以看出,T-S 曲线模型加速度连续变化,在保证步进电机不发生失步的情况下,既保留了梯形速度曲线模型计算简单的特点,又很好地消除了由于速度或者加速度突变而引起的柔性冲击问题。

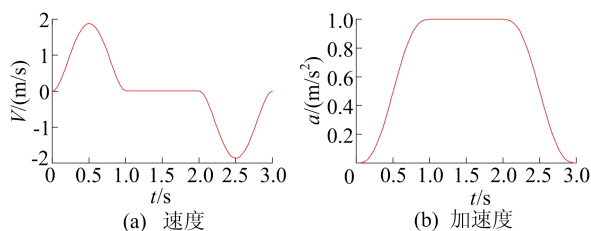


图 2 T-S 曲线模型仿真

### 3 T-S 速度曲线模型在 3D 打印中的应用

3D 打印机由各移动轴对应的步进电机共同驱动,电机旋转的角度和速度由接收到的脉冲数和脉冲频率决定。在控制模块读取的一条直线规划的 G 代码中,已给定了打印喷嘴目标点坐标和匀速运动速度,通过计算可得打印喷嘴移动的总位移;由 T-S 速度曲线模型完成对该路径段的速度规划,即得到不同运动阶段的位移以及实时运动速度;控制器根据速度规划得到的位移和速度参数,发送不同数量和频率的脉冲控制打印喷嘴的运动。根据 3D 打印机的运动特性可知,其路径速度规划通过如下步骤完成:① 协调与规划各路径段间衔接处的速度;② 对每一路径段的步进电机速度进行规划。

#### 3.1 相邻路径段间过渡速度的限制因素

在进行路径段速度规划的过程中,若单独考虑每个路径段,令其初速度、末速度为  $0 \text{ m/s}$ 。虽简化了速度规划的流程,但在路径执行阶段,每个阶段都需要从  $0 \text{ m/s}$  速度开始加速,耗费了大量的时间。并且此加速过程属于无效进给,路径执行阶段效率低下。若每次速度规划时,综合考虑多个路径段,通过对各个路径段的起始和终止速度进行预处理,则可以使得各个路径段间的速度保持在合适值,既能最大限度地减小路径执行时间,又不超过系统限制的速度<sup>[7]</sup>。因此要明确在 3D 打印过程中影响过渡速度的因素。

首先,从 G 代码中得到的速度值是打印喷嘴的匀速运动速度,亦是最大运动速度。该速度值是综合考虑 3D 打印机的执行机构、成型材料等因素,得到的最适合 3D 打印的速度。若喷嘴的速度大于该速度值,则会对打印精度产生影响。因此第 1 个限制因素为  $V \leq V_{\max}$ 。

其次,三维模型经切片软件处理后,切片层由若干个直线段首尾相连而成。每个路径段结束时的速度值等于下一个路径段的起始速度值。但速度是一个矢量值,在一个路径段结束到下一个路径段开始的过程中,速度的大小没有发生变化但是方向可能发生了突变。因此需要对相邻路径段的衔接处进行平滑处理,使其在各路径段衔接处平稳过渡,满足打印精度的要求。

为保证各路径段衔接处平稳过渡,采用圆弧过渡的方法。假设某 2 个路径段间的夹角为  $\alpha$ ,路径段间的进入速度为  $V_i$ ,退出速度为  $V_{i+1}$ 。若圆弧  $\widehat{OMN}$  相切  $V_i$ 、 $V_{i+1}$  方向,则以圆弧  $\widehat{OMN}$  的切向速度为过渡速度的限制,如图 3 所示。

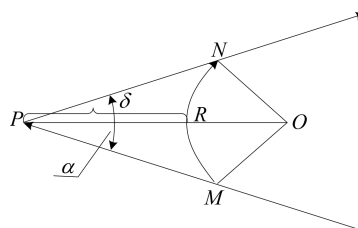


图 3 相邻路径段间速度过渡

假设打印喷嘴在路径段间衔接时做圆周运动,则过渡速度  $V_t = \omega R$ ,其中  $\omega$  为喷嘴做圆周运动的角速度。因为  $a = R\omega^2$ ,所以  $V_t = \sqrt{aR}$ ,其中  $a$  为圆周运动的法向加速度,由 G 代码中预先设定。2 个路径段间过渡速度最大值为  $V_{\max_j}$ 。因此限制各路径段间速度的另一个因素为  $V \leq$

$V_{\max_j}$ 。求出各路径段间圆弧过渡时的圆弧半径,可以得到过渡速度。已知:

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{R}{\delta + R} = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2}} \quad (11)$$

则有:

$$R = \delta \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{1 - \sin \frac{\theta}{2}} = \delta \frac{\sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2}}}{1 - \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2}}} \quad (12)$$

其中,  $\delta$  为  $P$  到圆弧的距离,表示控制系统对过渡速度的宽容度。 $\delta$  值越大表示过渡速度的极限值越大。若某路径段在速度规划时,该路径段只有升速或降速 2 个阶段,且路径段距离  $S$  较短,即

$$S < \frac{V_s^2 - V_c^2}{2a} \quad (13)$$

由式(13)可知,在短距离路径段中,即使以最大加速度加速或减速,仍不能在路径段结束时到达预定的末速度。在这种短距离路径段速度规划过程中,为保证速度的连续性,需要对速度规划参数进行调整,可变的参数有  $S$ 、 $a$ 、 $V_s$ 、 $V_c$ 、 $J$ 。加速度  $a$  本身为最大值不可增加;为保证打印成型精度,路径段位移  $S$  不可改变;只能调整初速度  $V_s$  或末速度  $V_c$  值。考虑多个路径段时,若当前路径段的末速度为下一个路径段的初速度,则调整初速度或末速度效果相同。本文采用调整初速度  $V_s$  的方式完成短距离路径段的速度规划。下面比较 T-S 速度曲线模型和五段 S 形速度曲线模型在规划短距离路径段时的计算方式。

若 3D 打印控制系统采用 T-S 速度规划算法,则其路径段的初速度应调整为:

$$V_s = \sqrt{V_c^2 + 2aS} \quad (14)$$

若采用五段 S 形速度规划算法,其短距离路径段速度处于临界状态时,则  $V_s$  应满足<sup>[8]</sup>:

$$(V_s + V_c) \sqrt{\frac{V_s - V_c}{J}} = S \quad (15)$$

对式(15)进行相应数学变换,得到:

$$V_s^3 + V_c V_s^2 - V_c^2 V_s - V_c^3 - JS^2 = 0 \quad (16)$$

式(16)的解可通过盛金公式进行求解,盛金公式的总判别式为:

$$\Delta = B^2 - 4AC \quad (17)$$

其中:  $A = 4V_c^2$ ;  $B = 8V_c^3 + 9JS^2$ ;  $C = 4V_c^4 + 3JS^2V_c$ 。则有:

$$\Delta = 81J^2S^4 + 96JS^2V_c^3 \quad (18)$$

显然  $\Delta > 0$ , 方程有 1 个实根和 1 对共轭虚根,  $V_s$  为实数。则有:

$$V_s = \frac{-V_c - \sqrt[3]{Y_1} - \sqrt[3]{Y_2}}{3} \quad (19)$$

其中,  $Y_{1,2} = 4V_c^3 + \frac{3}{2} (-8V_c^3 - 9JS^2 \pm \sqrt{81J^2S^4 + 96JS^2V_c^3})$ 。

经过对比 T-S 速度规划的处理过程,相较五段 S 形速度曲线算法计算简单、易于实现。进一步体现 T-S 速度曲线模型的优势。

综上所述,采用 T-S 速度曲线模型限制路径段间速度的因素,即过渡速度  $V_t$  应满足以下条件:

$$\begin{aligned} V_t &\leq V_{\max}, \\ V_t &\leq V_{\max_j} = \sqrt{a\delta \frac{\sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2}}}{1 - \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2}}}}, \\ V_t &\leq \sqrt{V_c^2 + 2aS} \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $V_{\max}$  为圆弧最大速度。

过渡速度  $V_t$  在满足式(20)的条件下,取最大值以便保证 3D 打印的效率。

### 3.2 速度前瞻的实现方法

3D 打印成型过程中,打印喷头的运动包含大量短程线段,传统的算法通常会根据固定的速度参数进行控制。由于没有预先规划后面的速度变化情况,可能导致后面路径段内由于减速能力和位移的限制,喷嘴无法减速到预定速度值,导致出现振动、失真和速度不匹配等问题。

为进一步实现更平滑的运动和更高的打印效率,必须在 G 代码预处理程序中添加前瞻控制功能。本文对连续读取的多条 G 代码采用先逆向后顺向的速度规划方法。已知每条 G 代码代表 1 条路径段,假设 3D 打印机控制器连续读取  $i$  条 G 代码,且规定第  $i$  条 G 代码代表的路径段的初速度和第 0 条 G 代码代表的路径段的末速度均为系统规定的最小移动速度。前瞻算法具体实现流程如图 4 所示。

首先采用先进先出队列的形式创建一个结构体数组,用于存储连续读取的  $i$  条 G 代码代表的速度信息;然后从第  $i$  条 G 代码开始,按照每个路径段的初速度与末速度满足  $V_c^2 - V_s^2 \leq 2aS$ , 计算第  $i-1$  条路径段的最大初速度,分别与系统规定的圆弧最大速度  $V_{\max}$ 、最大过渡速度  $V_{\max_j}$  比较,取三者的最小值作为第  $i-1$  条路径段的初速度。采用同样的方式,依次求得第 0 条 G 代码代表的路径段的初速度;最后从第 0 条 G 代码开始,顺

向求出每个路径段对应的末速度,最终,保证一个路径段的初、末速度同时满足该路径段前后 2 个路径段对速度的要求。

zoids 执行 T-S 的速度规划算法,并将结果存储到结构体 block 中,方便后续对打印机的控制。

表 1 速度规划器主要调用的函数

函数	功能
Void get-command()	获取 G-code 代码
Void queue.advance()	解析 G-code 代码
Void populate-block()	创建初始化速度规划结构体
Void recalculate()	实现速度前瞻算法
Void recalculate-trapezoids()	执行 T-S 速度规划算法

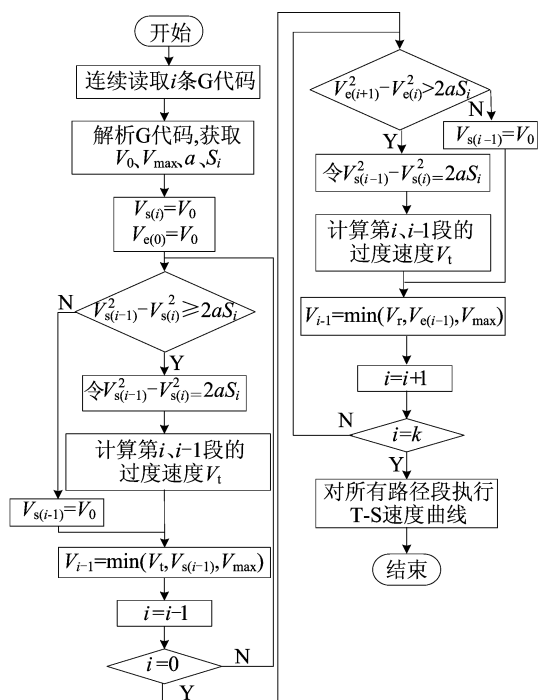


图 4 前瞻算法流程

### 3.3 T-S 速度规划器的运作流程

为了实现程序的模块化,本文提出速度规划器的概念。利用直线或圆弧插补算法、前瞻算法、T-S 速度规划算法完成对读取的 G 代码的速度规划。速度规划器首先创建一个结构体,用于存储打印机的配置参数和速度规划的结果。打印机的配置参数根据具体的使用环境确定,主要包含速度规划过程中的一些固定参数。将速度规划的结果存储到结构体中,方便后期直接通过读取结构体内相应的规划结果驱动步进电机。速度规划器调用的主要函数和功能概述见表 1 所列。

在 3D 打印机控制系统正常工作的过程中,主程序会连续不断地调用 command 函数从 SD 卡中读取 G 代码,并调用 advance 函数对 G 代码进行解析,根据 G 代码首字母的不同,进行不同的操作。其中:G0、G1 为直线插补命令;G3、G4 为圆弧插补命令。根据命令字符后的参数,获取打印喷嘴的目标坐标,计算出打印喷嘴到目标点的欧式距离。调用 block 函数,创建速度规划的结构体,并初始化相应的参数,包括起始速度、匀速速度、过渡速度、加速时间等。调用 recalculate 函数对连续路径段进行前瞻规划。调用 trape-

## 4 T-S 速度规划算法试验验证

### 4.1 T-S 速度规划器的运作流程

为了验证 T-S 速度曲线模型相较于传统速度曲线模型的优势,在生成的 G-code 文件中任取路径代码段,如图 5 所示。在 MATLAB 软件上分别编写以梯形速度曲线模型、五段 S 形速度曲线模型、T-S 速度曲线模型为核心的速度规划器。通过对比该连续路径段速度规划的时间,验证 T-S 速度曲线模型的规划效率。

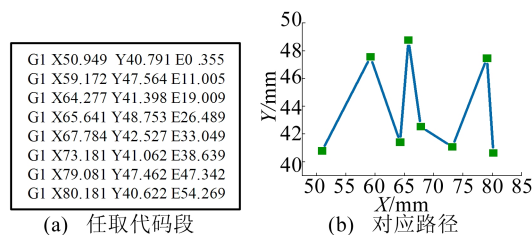


图 5 代码段与其对应路径

1) 验证前瞻算法对打印喷嘴在执行效率上的提升。给定 T-S 速度曲线模型的加速度值为  $300 \text{ mm/s}^2$ ,该连续路径段第 1 段路径的初速度和最后 1 段路径的末速度为  $0 \text{ mm/s}$ 。分别在不使用前瞻算法和使用本文前瞻算法的情况下,使用 T-S 速度曲线模型对该路径段进行速度规划仿真,速度与时间关系的仿真结果如图 6 所示。

不使用前瞻算法的情况下,每个路径段的初速度和末速度都为  $0 \text{ mm/s}$ 。在使用前瞻算法时,各路径段间的衔接速度不为  $0 \text{ mm/s}$ ,而是保证打印精度时的最大速度,节省了路径段间无效的启停运动。根据仿真结果可知,打印喷嘴执行完该 7 段路径段,所用的时间分别为  $2.247$ 、 $1.904 \text{ s}$ ,时间减少了  $0.343 \text{ s}$ 。完整的打印模型会有上万条这样的 G 代码,因此使用前瞻算法后,打印喷嘴执行效率明显提升。

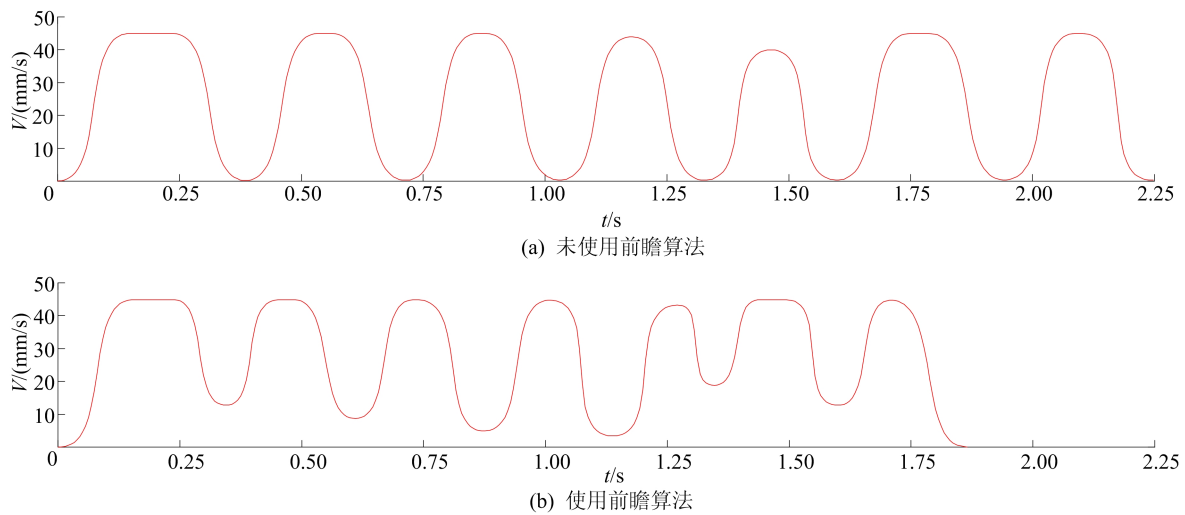


图 6 T-S 速度规划曲线

2) 然后对比不同曲线模型的规划效率。在 MATLAB 软件上分别编写以梯形速度曲线模型、五段 S 形速度曲线模型、T-S 速度曲线模型为核心的速度规划器,并记录速度规划器运行时间。由于 3D 打印机在打印模型外表面、支撑、内部填充、空走时速度参数各不相同,本文仿真采用的速度规划参数为其多种打印情况下的平均值。假设 3 种不同速度曲线模型的最大匀速运动速度为 45 mm/s,梯形速度曲线模型和 T-S 速度曲线模

型的加速度值为  $300 \text{ mm/s}^2$ ,五段 S 形速度曲线模型的平均加速度值为  $300 \text{ mm/s}^2$ ,加加速度为  $20\,000 \text{ mm/s}^3$ 。速度规划器利用前瞻算法对连续读取的 8 条 G 代码进行预处理,得到各路径段位移和衔接处的过渡速度。采用不同的速度曲线模型分别对连续路径段进行速度规划,并记录规划时间。为保证实验数据的可信度,每种曲线模型连续规划 5 次取其规划时间的平均值。速度规划器运行时间见表 2 所列。

表 2 连续路径段速度规划时间对比

单位:ms

速度规划器种类	1	2	3	4	5	平均值
梯形	43.975	39.695	42.105	41.805	41.660	41.848
五段 S 形	237.540	237.805	235.190	237.100	238.780	237.283
T-S	65.200	66.371	66.555	66.440	65.255	65.964

从表 2 可以看出,T-S 速度规划算法的计算效率稍低于梯形速度规划算法,但相较五段 S 形速度规划算法,在相同微控制器下其计算效率明显提高。证明 T-S 速度规划算法在规划效率方面的优势更适合计算能力较弱的 3D 打印机微控制器。

#### 4.2 T-S 速度规划算法的打印试验验证

以开源 3D 打印控制系统 Marlin 系统为核心,搭建桌面级 3D 打印机。通过修改速度规划器模块,将梯形、五段 S 形、T-S 速度规划算法移植到 Marlin 系统中。对不同速度曲线模型引起的振动问题进行验证试验。

振动信号检测系统主要负责 3D 打印过程中振动信号的动态采集,系统由桌面级 3D 打印机、

振动信号传感器、数据采集卡和计算机组成。

为验证不同速度曲线模型对振动的抑制,本文建立包含大量变方向路径的三维切片模型。打印过程中,打印喷嘴可以近似为一直在做反复启停运动。设置打印参数为桌面级 3D 打印机默认参数。利用烧录有不同速度规划算法的 Marlin 系统进行打印试验,并实时采集打印过程中 X 轴方向的振动信号。为保证试验数据的可靠性,在采用不同规划策略的 3D 打印过程中,随机读取 2 000 条 X 轴方向的振动信号,并在 Excel 中生成相应的振动信号图,如图 7 所示。

采用图 7 各振动数据中每次速度突变时的振动加速度,绘制振动加速度对比图,结果如图 8 所示。

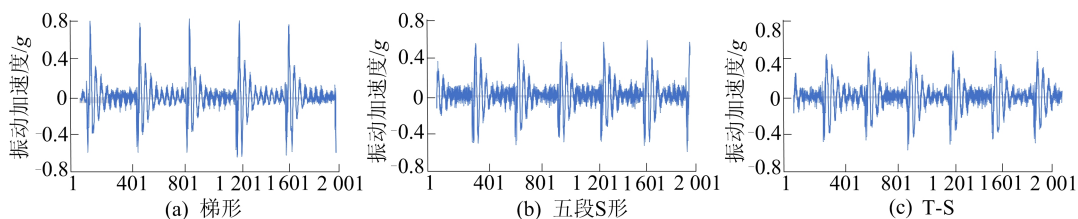


图 7 不同速度规划算法下生成的 X 轴方向振动信号

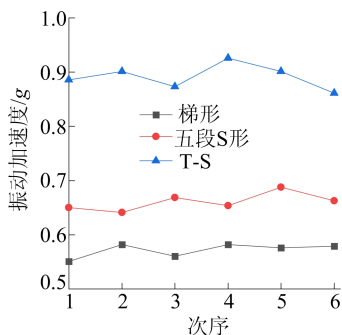


图 8 不同速度曲线模型下振动加速度对比

从图 8 可以看出,采用 T-S 速度曲线模型的 3D 打印机在打印过程中产生的振动最小,验证了 T-S 速度曲线模型在抑制振动冲击上的优势。

为验证速度规划算法对打印品质的影响,在三维建模软件 Solidworks 中建立由曲线、折线构成的复杂模型。利用传统运动控制算法打印,得到打印模型。在拐角速度突变区域和短距离连续变速区域,相较利用 T-S 速度算法打印得到的打印模型精度较低,打印结果对比如图 9 所示。

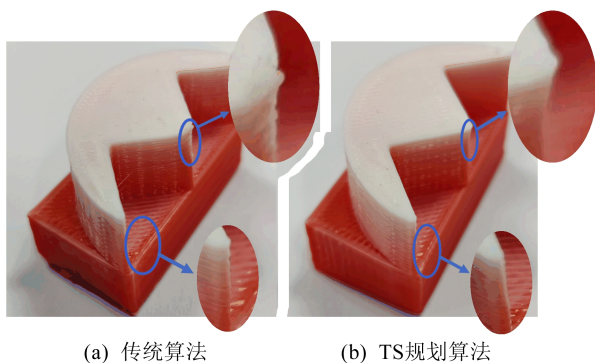


图 9 打印结果对比

由于在速度发生突变和短距离连续变速的过程中,步进电机易发送失步、过冲;传统运动控制算法在速度变化过程中产生柔性振动。相比之下,利用本文改进的运动控制算法得到的打印模型成型质量更高。

## 5 结 论

本文分析了桌面级 3D 打印机中速度曲线模

型的不足,在原有的速度规划算法基础上加以改进,提出了 T-S 速度曲线模型,并运用前瞻算法进一步提高了执行效率。基于新模型的速度规划算法既避免加速度突变又保留了梯形速度曲线规划效率高的特点。通过平台试验证明了 T-S 速度曲线模型在抑制冲击、改善模型质量方面的可行性。

## [参 考 文 献]

- [1] LAI C K, LIN B W, LAI H Y, et al. FPGA-based hybrid stepper motor drive system design by variable structure control[J]. *Actuators*, 2021, 10(113): 113.
- [2] SRINIVASAN D, MEIGNANAMOORTHY M, RAVICHANDRAN M, et al. 3D printing manufacturing techniques, materials, and applications; an overview[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 2021(1): 5756563.
- [3] YU K, ZHANG Z S, ZHOU Z T, et al. Application of the five-phase S-curve velocity model on FDM three-dimensional printer [C]//IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Piscataway: IEEE, 2020: 1365-1371.
- [4] HA C W, REW K H, KIM K S. Robust zero placement for motion control of lightly damped systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(9): 3857-3864.
- [5] 王磊, 吕东瀚. 步进电机加减速曲线优化设计与仿真[J]. *自动化应用*, 2021(1): 21-24.
- [6] 余道洋. 3D 打印机 G 代码预处理优化算法[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(1): 85-89.
- [7] LIANG Y Y, YAO C Z, WEI W, et al. Design and implementation of multi-axis real-time synchronous look-ahead trajectory planning algorithm[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(7/8): 4991-5009.
- [8] FANG Y H, LIU J, SHAO W H, et al. Smooth and time-optimal s-curve trajectory planning for automated robots and machines[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 137: 127-153.

(责任编辑 张 翎)