

基于 ADAMS 的便携式自动割胶机器人的仿真分析

罗庆生¹, 刘 杨², 李凯林²

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 为研究便携式自动割胶机器人在割胶过程中运动轨迹的准确性与实用性, 采用实体仿真模型辅助分析的研究理念, 提出了基于 ADAMS 软件的便携式自动割胶机器人虚拟样机的运动学仿真分析方法; 针对机器人匀速切割和变速切割两种切割模式, 将简化后的 SolidWorks 模型导入到 ADAMS 软件中, 应用 ADAMS 软件分析机器人割胶刀头的位移与速度, 再利用 Matlab 软件得到刀头的运动轨迹, 并与理论计算结果进行比较; 仿真结果表明: 该便携式自动割胶机器人在割胶过程中具有良好的平顺性与稳定性, 且运动轨迹与理论轨迹的误差在 0.5 mm 以内, 满足割胶生产的实际需要; 其研究成果对相关产品的实物研制及其虚拟仿真方案的制定、参数选取可提供有益参考。

关键词: 自动割胶机器人; 刀头切割轨迹; 仿真分析; 虚拟样机; ADAMS; 运动分析

Simulation Analysis of a Portable Automatic Tapping Robot Based on ADAMS

Luo Qingsheng¹, Liu Yang², Li Kailin²

(1. Electrical and Mechanical College, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the accuracy and practicability of the movement trajectory of the portable automatic tapping robot during tapping process, the research concept of physical simulation model-assisted analysis was used to propose a kinematics simulation analysis method of a portable automatic tapping robot virtual prototype based on ADAMS software. For the two cutting modes of constant speed cutting and variable speed cutting of the robot, the simplified SolidWorks model is imported into the ADAMS software. The ADAMS software is used to analyze the displacement and speed of the robot tapping cutter head, and then the MATLAB software is used to obtain the movement path of the cutter head. The theoretical calculation results are compared. The simulation results show that the portable automatic tapping robot has good smoothness and stability during tapping, and the error between the movement trajectory and the theoretical trajectory is within 0.5 mm, which meets the actual needs of tapping production. The research results can provide useful reference for the physical development of related products, the formulation of virtual simulation schemes, and the selection of parameters.

Keywords: automatic tapping robot; cutter head trajectory; simulation analysis; virtual prototype; ADAMS; motion analysis

0 引言

随着现代工业的飞速发展, 天然橡胶因其优良的自然属性, 广泛用于国民经济建设各个领域^[1], 在现代社会的发展中起着重要作用。但传统的人工割胶方式存在劳动强度高、生产效率低、工作模式复杂等问题^[2], 已无法满足橡胶产业的发展需要^[3], 人们对自动割胶机器人的需求愈加迫切。

近年来, 国内外相关学者在自动割胶机器人的结构设计^[4]、程序控制^[5]、理论创新^[6]等方面作出了有益的探索和研究, 已取得若干技术成果, 但离大规模实际应用还差之甚远, 主要原因在于自动割胶机器人的运动轨迹在准确性

方面还显得差强人意^[7], 因而有必要对其进行深入研究。

1 研究方法与仿真平台

本文所采用的研究方法为虚拟样机技术。虚拟样机技术是以机械系统运动学、动力学和控制学等建模理论及其技术实现为核心, 同时还包括三维 CAD 建模技术、有限元分析技术以及最优化技术的一门综合多学科的技术^[8]。在工程应用中, 采用虚拟样机技术可以减少重大设计失误, 避免重复建立物理样机, 从而达到节省时间, 降低成本的目的。采用虚拟样机仿真分析已经成为现代科技重要的设计方式^[9]。

ADMS 是一款由美国机械动力公司开发的虚拟样机分析软件, 主要运用多刚体动力学理论系统中的拉格朗日方法来建立机构运动学方程, 以此来对机构进行动力学、静力学或者运动学的分析。通过一系列的分析求解, 可以求得机构运动过程的速度位移或者力矩, 也可以分析预测机

收稿日期: 2019-12-15; 修回日期: 2020-01-29。

基金项目: 海南省重点研发计划项目(ZDYF2017015)。

作者简介: 罗庆生(1956-), 男, 湖南汉寿人, 博士, 教授, 博导, 主要从事特种机器人技术和机电一体化产品开发工作方向的研究。

械系统的性能运动范围等。因此本文将它用来分析便携式自动割胶机器人的整个工作过程, 并以此来检验便携式割胶机器人的轨迹规划与运动稳定性。

2 模型的建立

本文采用的物理样机为自主研制的便携式自动割胶机器人, 如图 1 所示。

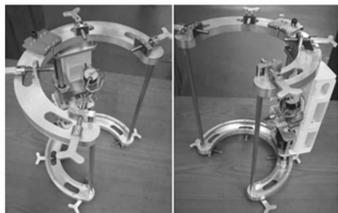


图 1 便携式自动割胶机器人

其三维模型如图 2 所示。

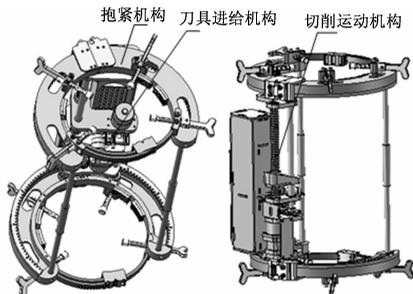


图 2 便携式自动割胶机器人的三维模型

据图 1~2 可知, 该便携式自动割胶机器人主要由 3 个机构组成: 切割深度控制机构、切割轨迹机构以及自适应径围抱紧机构。其中, 切割轨迹机构经由两个独立的电机实现轴向运动和轴向运动的分离, 以完成多样化的切割轨迹。

由于运动仿真主要模拟便携式割胶机器人切削运动的轨迹, 因此可将抱紧机构中的顶紧装置与弹簧垫去除。由于运动时机器人上装载的控制器质量较轻, 因此也可以将其省略。同时, 为了更大程度地简化便携式割胶机器人的模型, 以提升导入模型的准确度与减少计算量, 采用在 SolidWorks 平台下将同步运动的零件固结为一个零件的方法, 以减少零件的个数。之后将简化的模型另存为 x_t 格式的文件, 并将其导入到 ADAMS 中。之后分别添加 23 个 connector 和 3 个 motion。其中由于零件数的原因, 使得 connector 中有 13 个固定副、6 个转动副、1 个滑移副、2 个圆柱副和 1 个螺纹副。为了便于区分零件, 在 ADAMS 里将零件着色并添加材质, 得到如图 3 所示的机器人模型图。

便携式自动割胶机器人主要涉及 3 个运动, 这 3 个运动在 ADAMS 里都用



图 3 ADAMS 模型

STEP 函数实现。为了便于分析运动的效果, 添加必要的 Maker 点, 通过 Measure 可以看到相关点的位移速度等数值的实时状况, 仿真环境如图 4 所示。将整个框架与地面固结, 通过仿真控制平台调整仿真的时间和仿真步长等参数。

仿真通过使用 STEP 函数来驱动相关运动副的运动, 在 3 个 STEP 函数中可以通过设置运动的速度与时间, 通过分析计算轴向与周向间的运动轨迹, 可以得到相关切割角度与长度。通过设置不同速度与时间可以得到不同的切割轨迹, 从而可以对该机器人的功能性及稳定性进行有效评估。

3 仿真实验

便携式自动割胶机器人在切割时涉及 3 个运动: 刀头的收刀与进刀、滚珠丝杠带动的轴向运动与齿轮齿条实现的圆周运动。它们之间以不同的运动形式交互会表现出不同的运动轨迹效果。

图 5 是便携式自动割胶机器人切割机构的三维模型图。圆周运动是步进电机搭载减速器 (15) 带动电机上的主动齿轮 (10) 旋转, 主动齿轮 (10) 与传动齿轮 (11) 啮合带动中间轴 (15) 转动, 此时与中间轴相连的二级啮合齿轮 1 (19) 开始旋转带动二级啮合齿轮 2 (20) 转动, 二级啮合齿轮是用键与销钉与传动轴相连, 它们的运动同步, 这样电机通过二级齿轮传动带动轴端啮合齿轮旋转, 开始圆周运动, 直线运动直接由另一电机搭配减速器直接带动

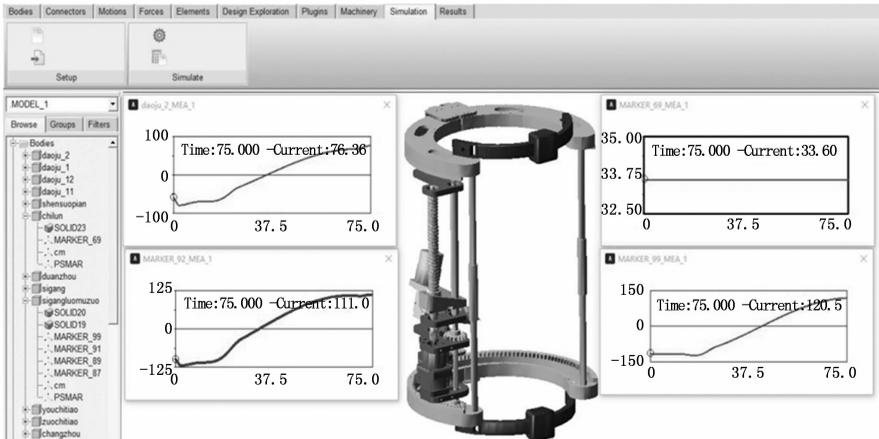
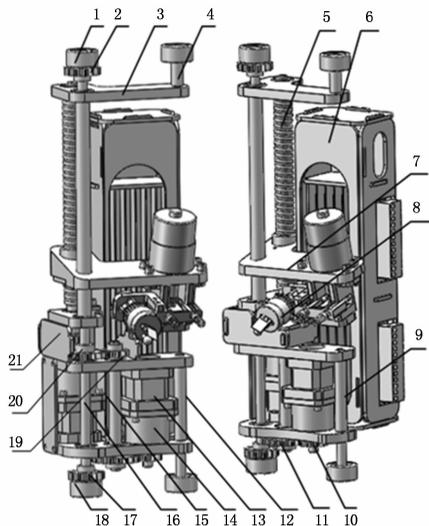


图 4 ADAMS 仿真环境

丝杠轴转动实现刀具的直线运动。便携式自动割胶机器人通过周向运动和圆周运动的复合运动来合成螺旋线。这其中主要分析齿轮齿条的圆周运动与滚珠丝杠的周向运动带来的影响。



1. 轴端滑套; 2. 轴端啮合齿轮 1; 3. 丝杠支撑板; 4. 随动滑套; 5. 滚珠丝杠; 6. 控制箱; 7. 丝杠螺母座; 8. 刀头组; 9. 随动轴; 10. 小齿轮; 11. 传动齿轮; 12. 随动轴; 13. 步进电机; 14. 减速器; 15. 中间轴; 16. 传动轴; 17. 轴端啮合齿轮 2; 18. 轴端滑套; 19. 二级啮合齿轮 1; 20. 二级啮合齿轮 2; 21. 遮挡板。

图 5 便携式自动割胶机器人切削运动机构三维模型

3.1 匀速切割运动仿真

为了保证切割的平稳性, 实际切割中多用均匀的速度来进行切割。若两运动都是匀速运动, 即滚珠丝杠是匀速直线运动, 齿轮是匀转速运动。滚珠丝杠的 STEP 函数表示为 $STEP(time, 10, 0d * time, 25, 110d * time) + STEP(time, 25, 0, 70, 0)$; 齿轮齿条传动的动力来自于电机的输出转矩, 因此给电机作用一个驱动函数为 $STEP(time, 10, 0d * time, 25, 70d * time) + STEP(time, 20, 0d * time, 70, 0d * time)$ 。从第 10 秒开始是因为 10 秒前到刀具的收刀与进刀动作, 它的驱动函数是 $STEP(time, 0, 0, 2, 20) + STEP(time, 2, 0, 10, -10)$ 。由此可以得到齿轮与丝杠匀速运动的角速度与角加速度的变化趋势, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 在前 10 s 由于是进行刀具的收刀与进刀工作, 所以此时齿轮与丝杠并没有运动, 之后在 10~15 s 是齿轮的加速运动, 而在 25 s 之后当速度稳定时, 便开始匀速运动, 因此曲线呈现如图 6 的趋势。由于匀速运动对两电机施加的驱动方式类似, 因此丝杠的角速度与角加速度的变化趋势与齿轮类似。

图 7 是在匀速运动的过程中刀头上一点的位移变化, 通过分析仿真环境下与理想估计建模情况下的 X、Y、Z 方向上的位移变化, 可以检测整个机构工作的稳定性。

由图 7 可知, 在 15~25 s 间为让电机有缓冲时间加速,

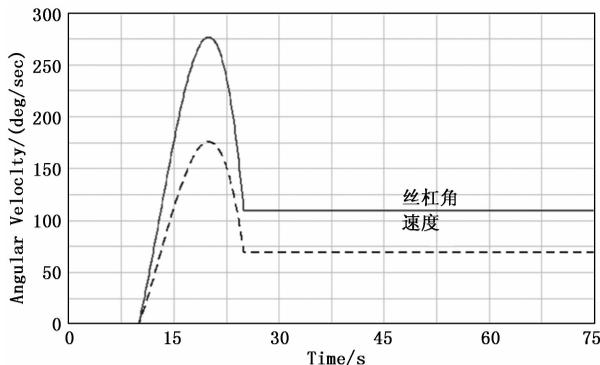


图 6 齿轮与丝杠的角速度

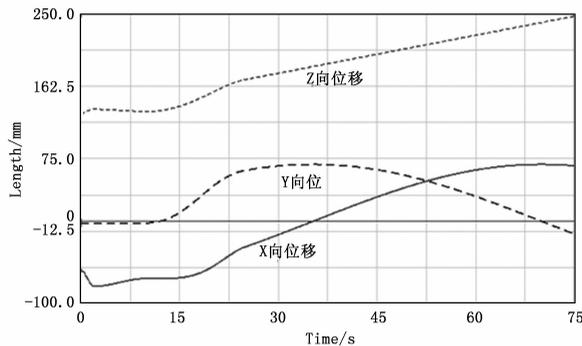


图 7 刀头的位移曲线

保证刀具切割的速度, 因为电机旋转的速度随着切割过程中速度的方向变化但大小不变, 因此在 X 轴与 Y 轴上出现如图所示的变化。速度在 Y 轴上的投影先变小, 再反向增大; 在 X 轴上方向不变, 但是速度先减小后增大; 而在 Z 方向上由于丝杠匀速运动, 所以呈一条直线。

3.2 变速切割运动仿真

双变速运动可以将切割过程完成的更快, 减少切割时间, 同时通过设置两方向运动的速度, 可以借此改变切割的角度与深度, 在此依然由 STEP 函数驱动, 滚珠丝杠的直线运动 $STEP(time, 10, 0d, 55, 9000d)$; 齿轮齿条啮合的圆周运动 $STEP(time, 10, 0d, 55, 5000d)$; 刀具的收刀与进刀 $STEP(time, 0, 0, 2, 20) + STEP(time, 2, 0, 10, -10)$; 通过这个速度驱动可得如图 8、图 9 所示的曲线图。

从图 8 与图 9 可以看出, 因为运动的时间与速度的不一致导致刀头在 Z 轴方向的位移增加了, 而在 X 轴与 Y 轴, 因为胶树圆柱体外形的原因, 位移呈对称状。速度直接从 10 s 之后开始变化, 速度呈正弦曲线变化状, 实现先加速后减速, X 轴因为运动轨迹是圆弧的原因, 速度在 X 轴上的投影先增大后减小, Y 轴是先增大减小后因为方向的改变反向先增大后在减小, 最后逐渐减小为 0, 这样的缓冲可以避免机器发生碰撞。

将 X 轴、Y 轴与 Z 轴的数据从 ADAMS 里导出, 代入 MATLAB 里求解可得如图 10 所示的曲线图。从 Matlab 图中也可以看出刀头的轨迹是一围绕胶树的螺旋线, 这是刀

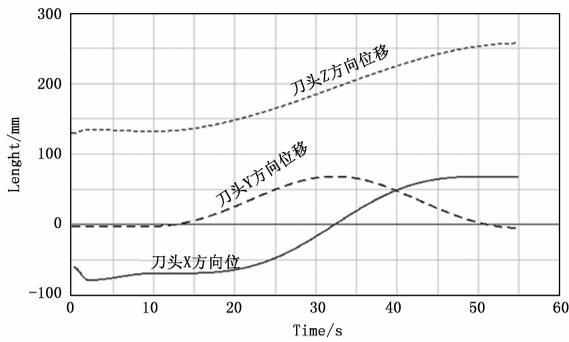


图 8 双变速时刀具的位移

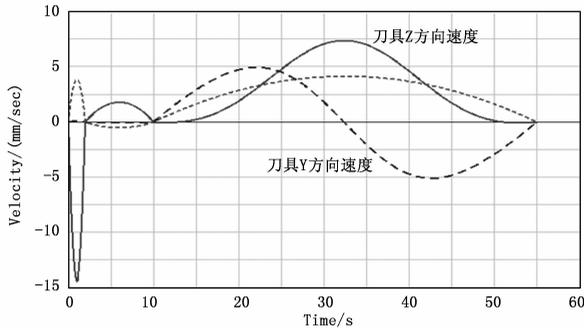


图 9 双变速时刀具的速度

具的初始位置为原点画出来的图, 在实际中的高度会加上刀具本身相对便携式割胶机器人的底端的距离。而图 10 中刚开始的时候是一直线, 代表刀具的收刀与进刀。

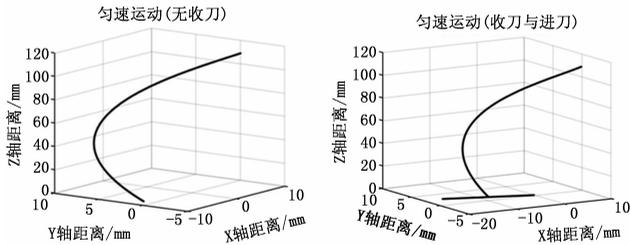


图 10 匀速运动有无收刀进刀情况图

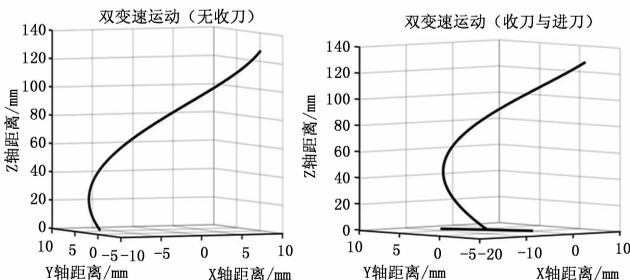


图 11 变速运动有无收刀进刀情况图

从图 10~11 可以看出, 无论是采取哪种运动方式, 在刀具完成收刀与进刀的流程之后, 在两电机的配合下切割运动能形成一定倾角的螺旋曲线, 这与预期情况相符。

将从 ADAMS 里导出的数据去掉前 10 s 的收刀动作, 分别不同速度下的 XY 平面与 XZ 平面的数据进行分析, 获

得如图 12~13 所示的平面曲线图。

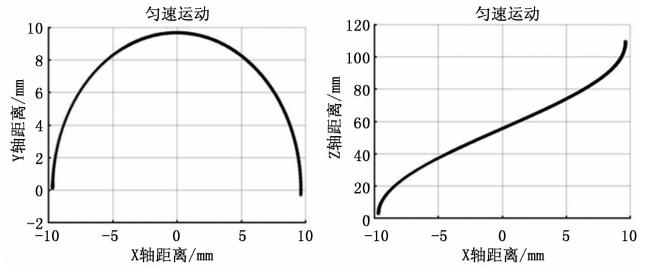


图 12 匀速运动下的平面图

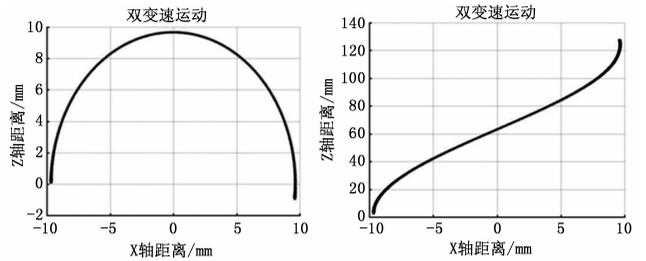


图 13 变速运动下的平面图

从图 12 的 XY 平面图可以得出在匀速状态下, 刀具在此平面的运动都是在 180° 左右, 因此表明机器的圆周运动的范围是满足割胶轨迹的需求的, 其次从 XZ 平面可以看出在与圆周运动相同的运动时间之内直线运动的距离有所不同, 从导出的数据中与图中可以得出直线运动的距离为 $z = 115$ mm, 若按割胶标准来看的话:

$$\begin{cases} \tan\alpha_1 = \frac{2z_1}{\beta_1 R} \\ \tan\alpha_2 = \frac{2z_2}{\beta_2 R} \end{cases} \quad (1)$$

式中, α_1 、 α_2 为运动下的轨迹倾角; β_1 、 β_2 为刀具绕胶树切割的角度。

从图 12~13 可以得出刀具绕胶树切割的角度, 取为 π , 则可以求得: $\alpha_1 \approx 25^\circ$, $\alpha_2 \approx 30^\circ$ 是符合切割轨迹的倾角^[9]的, 因此这样的结构布局与速度控制是可行的, 不仅能达到预期效果的切割螺旋曲线, 还能保持结构的稳定性。

4 仿真结果分析

便携式自动割胶的切割轨迹由仿真结果可知是由圆周运动的电机与轴向运动的电机的速度控制, 在实物样机中根据实际的运动情况可知:

根据传统割胶作业的开割标准可知, 此时胶林中胶树的径围为 50 cm 左右, 则有:

$$\pi R = 50 \quad (2)$$

将胶树看作圆柱体, 那么割胶轨迹近似圆柱螺旋线, 其中圆柱螺旋线的升角在阴刀与阳刀切割法^[9]的角度范围内变化, 则有, 阴刀切割:

$$\left(\frac{\pi R}{2}\right) \cdot \tan(\lambda_{阴}) = H_{阴} \quad (3)$$

$$\lambda_{阴} = (25^\circ \sim 30^\circ) \quad (4)$$

阳刀切割:

$$\left(\frac{\pi R}{2}\right) \cdot \tan(\lambda_{\text{阳}}) = H_{\text{阳}} \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{阳}} = (40^\circ \sim 45^\circ) \quad (6)$$

其中: R 为胶树的直径; $\lambda_{\text{阴}}$ 为阴刀切割的升角; $\lambda_{\text{阳}}$ 为阳刀切割的升角; $H_{\text{阴}}$ 为阴刀切割的导程; $H_{\text{阳}}$ 为阳刀切割的导程。

由公式 (1)、(2)、(3) 可知,

$$H_{\text{阴}} = 250 \cdot \tan(25^\circ \sim 30^\circ) = (116 \sim 144)\text{mm} \quad (7)$$

由公式 (1)、(4)、(5) 可知,

$$H_{\text{阳}} = 250 \cdot \tan(40^\circ \sim 45^\circ) = (209 \sim 250)\text{mm} \quad (8)$$

从割胶机器人的切削运动机构可知, 轴向运动与周向运动彼此相互独立, 因圆弧轨道上的齿条的尺寸固定, 啮合小齿轮与圆弧轨道上的齿条啮合时满足如下关系: $m'_1 = m'_2 = 2$, $Z'_1 = 15$, $Z'_{2\text{总}} = 136$ 。

圆弧轨道齿条占整个齿圈的比例为:

$$Z'_2 = (240^\circ/360^\circ) \cdot Z_{2\text{总}} \approx 90 \quad (9)$$

那么齿轮绕齿条一周运动的圈数是:

$$N' \cdot \pi d'_1 = \pi d'_2 \quad (10)$$

由式 (7) ~ (9) 可得,

$$N' = \left(\frac{m'_2 z'_2}{m'_1 z'_1}\right) = \frac{z'_2}{z'_1} = 6 \quad (11)$$

考虑到机构运动极限位置的干涉性, 取 $N' = 6$ 圈。

式中, m'_1 为小齿轮的模数; m'_2 为圆弧齿条的模数; Z'_1 为小齿轮的齿数; d'_1 为小齿轮分度圆半径, 15 mm; d'_2 为齿条分度圆半径, 134 mm; N' 为周向运动中小齿轮转动的圈数; $Z'_{2\text{总}}$ 为整个完整圆齿条总齿数; Z'_2 为轨道上优弧齿条齿数。

轴向运动是滚珠丝杠螺母的直线运动, 因此丝杠螺母座上升的距离是:

$$L' = N_s \cdot n' P' \quad (12)$$

其中: n' 为滚珠丝杠轴的头数, 这里是 1 头的; P' 为滚珠丝杠的螺距, 为 5 mm; N_s 为丝杠转动的圈数。

综上所述, 因为两运动相互独立, 因此它们之间的关系不再与半覆盖复合式割胶机器人的螺旋运动那样成一定比例, 但是在圆周运动方向满足的关系式依然是:

$$\begin{cases} x = (r - d) \cdot \cos\theta \\ y = (r - d) \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (13)$$

$$d'_2 \cdot \theta = d'_1 \cdot \left(\frac{\omega t}{2\pi}\right) \quad (14)$$

因为丝杠是独立运动, 因此 Z 向的关系式是:

$$z = np \frac{\omega_s t}{2\pi} \quad (15)$$

式中, d 为切割胶树的深度; θ 为绕胶树转动的角度; t 为运动的时间; z_s 为小齿轮转动的角速度; ω_s 为丝杠转动的角速度。

因为电机的旋转速度可控, 转动的圈数可控, 因此, 式中 ω_s 、 ω 是可控的, 可以赋予其不同的值获取不同的切割曲线。

选择匀速运动仿真情况下得到 3 个时刻的齿轮与丝杠的速度与刀头的位移数据导出, 从中随机选出 3 个时间点的数据代入式 (12)、(13)、(14) 中可得表 1 相关结果。

实际切割运动中为保证切割质量, 多采用匀速运动, 因此对匀速状态进行分析可知。由图 3 可知, 前 10 s 齿轮与丝杠处于静止状态, 这时候刀具刚好经过进刀与收刀之后处于初始位置, 10~25 s 间属于变速状态, 因此速度是变化的, 这时可求得平均速度:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_{t_{10}} t_{10} + \omega_{10.1} t_{10.1} + \dots + \omega_{25} t_{25}}{15} \quad (16)$$

$$\bar{\omega}_s = \frac{\omega_{s_{10}} t_{10} + \omega_{s_{10.1}} t_{10.1} + \dots + \omega_{s_{25}} t_{25}}{15} \quad (17)$$

将导出所得的角速度数据代入后求得 $\bar{\omega} = 49.87 \text{ deg/s}$, $\bar{\omega}_s = 81.25 \text{ deg/s}$, 而匀速运动时由数据可知 $\omega = 70 \text{ deg/s}$, $\omega_s = 110 \text{ deg/s}$ 。

表 1 匀速运动分析结果

	mm		
	$t_1 = 25 \text{ s}$	$t_2 = 35 \text{ s}$	$t_3 = 50 \text{ s}$
仿真结果	$x_1 = 37.75$	$x_2 = 67.72$	$x_3 = 110.05$
	$y_1 = 63.23$	$y_2 = 70.58$	$y_3 = 56$
	$z_1 = 22.63$	$z_2 = 53.47$	$z_3 = 76.38$
理想轨迹计算	$x'_1 = 37.28$	$x'_2 = 68.59$	$x'_3 = 110.52$
	$y'_1 = 63.76$	$y'_2 = 71.03$	$y'_3 = 55.56$
	$z'_1 = 23.12$	$z'_2 = 52.78$	$z'_3 = 76.68$
误差分析	$x = -0.47$	$x = 0.87$	$x = 0.47$
	$y = 0.53$	$y = 0.45$	$y = -0.44$
	$z = 0.49$	$z = -0.69$	$z = 0.3$

将变速运动中的角速度代入可得到 $\bar{\omega}_1 = 56.31 \text{ deg/s}$, $\bar{\omega}_{s1} = 79.43 \text{ deg/s}$ 。

由表 1 可知, 在 X 、 Y 、 Z 三个方向上, 理想状态与仿真情况的误差在 0.5 mm 左右, 这可能是仿真过程中施加的载荷或者是接触引起, 但是误差在可控范围之内, 是可以接受的。因此, 基于以上分析, 可以得知, 该便携式自动割胶机器人在切割运动中具有良好的稳定性以及切割运动轨迹的良好准确性。

5 结束语

本文主要将便携式自动割胶机器人的模型简化后导入 ADAMS 中进行运动仿真, 通过对传统割胶工艺动作的分析, 计算确定传统割胶轨迹的螺旋线长度与切割倾角的范围。在仿真环境下将得到的仿真数据导入 Matlab 中计算求解三维曲面与二维曲面状态下的切割曲线, 确定其切割倾角与切割轨迹的长度, 并从其中任意三时刻的数据导入理想轨迹方程, 计算比较理想状态下与仿真状态下轨迹误差。通过误差分析可知, 该便携式自动割胶机器人在切割运动中的平顺性和稳定性良好, 且切割运动轨迹具有很高的准确性。本文的研究成果对相关产品的实物研制及其虚拟仿真方案的制定、参数选取可提供有益参考。

(下转第 210 页)