基于电子凸轮飞剪的枕式包装机控制系统设计

姜自燃¹,徐世许¹,张浩琳²

(1.青岛大学,山东 青岛 266071; 2.烟台万华化工有限公司,山东 烟台 264002)

摘要:目的 为了丰富枕式包装机的包装种类,提高其包装精度和包装效率,对现有机器中电子凸轮飞 剪算法进行改进。方法 根据枕式包装机的工艺流程,建立电子凸轮飞剪的数学模型,设计五次多项式 运动控制算法,实现送料轴、送膜轴、切刀轴的协调同步运行,然后进行控制系统的设计。结果 通过 测试结果可以看出,随着包装速度的增加和包装长度的减少,包装的合格率会有所降低,但五次多项 式规划设计的电子凸轮曲线具有良好的连续性和柔性,避免了刚性冲击和机械振动,在包装允许的误 差±1 mm 的范围内,包装合格率始终为 100%,有效提高了控制精度。结论 设计的电子凸轮曲线完全满 足生产工艺要求,实际测试证实了基于电子凸轮飞剪的控制系统的可靠性与稳定性,也证实了运动控制 算法的优越性。

关键词: 电子凸轮; 枕式包装机; 五次多项式 中图分类号: TP273.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)13-0197-11 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.024

Design of Pillow Packing Machine Control System Based on Electronic Cam Flying Shear

JIANG Zi-ran¹, XU Shi-xu¹, ZHANG Hao-lin²

(1. Qingdao University, Shandong Qingdao 266071, China; 2. Yantai Wanhua Chemical Co., Ltd., Shandong Yantai 264002, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the electronic cam flying shear algorithm in the existing machine in order to enrich the packing types of pillow packing machine and improve its packing precision and efficiency. According to the process flow of pillow packing machine, the mathematical model of electronic cam flying shear was established, and the quintic polynomial motion control algorithm was designed to realize the coordinated and synchronous operation of feeding shaft, film feeding shaft and cutter shaft. Then, the control system was designed. According to the test results, with the increase of the packing speed and decrease of packing length, the qualified packing rate was reduced, but the electronic cam curve designed by the quintic polynomial planning had good continuity and flexibility, avoiding the rigid and mechanical vibration. Within the allowable error of ± 1 mm, the qualified packing rate was always 100%, which effectively improved the control accuracy. The electronic cam curve designed completely meets the requirements of production technology. The actual test proves the reliability and stability of the control system based on electronic cam flying shear, and also proves the superiority of the motion control algorithm.

KEY WORDS: electronic cam; pillow packing machine; quintic polynomial

收稿日期: 2022-09-13

作者简介: 姜自燃(1997—), 男, 硕士生, 主攻计算机控制等。

通信作者:徐世许(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为计算机控制、计算机管理信息系统等。

在日常果蔬产品的包装过程中,由于果蔬产品种 类众多,各类果蔬产品长度各不相同、同类果蔬产品 的长度也有或多或少的差异,传统枕式包装机在包装 种类、包装精度和包装效率上已无法满足新的要求。 为解决上述问题,对现有机器中凸轮飞剪算法进行了 改进。其控制原理为送料轴、送膜轴、切刀轴三伺服 协调运动,具有包装效率快、包装精度高、机械振动 小等优点^[1-2]。

1 枕式包装机结构及工艺流程

1.1 枕式包装机结构

枕式包装机的机械结构通常由送料机构、送膜机构、制袋机构、纵封机构、横封机构以及成品输送机构组成^[3-5]。枕式包装机的机械结构如图1所示。



图 1 枕式包装机机械结构 Fig.1 Mechanical structure of pillow type packing machine

设计的枕式包装机控制系统以 NX 控制器为核 心,搭配 NB 触摸屏、伺服设备、传感器等输入输出 设备。控制系统总体结构如图 2 所示。

主要仪器: NX1P2-1140DT 运动控制器, 日本 OMRON 公司; NB5Q-TW01B 触摸屏, 日本 OMRON 公司; R88M-1L1K530H-S2 伺服电机, 日本 OMRON 公司; R88D-1SN15H-ECT 伺服驱动器, 日本 OMRON 公司; E2ER-X2D 接近传感器, 日本 OMRON 公司; E3Z-B62 光电传感, 日本 OMRON 公司; E3Z-D61 光电传感, 日本 OMRON 公司; E3S-DC 色标传感器, 日本 OMRON 公司。

1.2 工艺流程

为保证枕式包装机各个部件之间更好地相互配 合,共同完成控制目标,需要对枕式包装机的工艺 流程进行分析。枕式包装机的工艺流程如图 3 所示。 放置在支撑轴上的包装膜经牵引向前输送到制袋机 构,在此处卷边成圆筒状,与此同时,光电传感器确 定果蔬产品位置,送料皮带将待包装的果蔬产品送入 已卷边成型的圆筒状包装膜内;之后向前输送到纵封 机构,在此处对圆筒状包装膜进行加热纵封;经过整 形之后到达横封机构,在此处进行剪切横封,完成果 蔬产品的包装;最后由成品输送机构输出。若为色标 模式,包装膜上有图案商标和色彩标识,则需要色标 传感器确定色标位置,配合横封切刀处的光电传感器 发出的切点信号,共同补偿修正横封位置。



图 2 控制系统总体结构 Fig.2 General structure of control system



图 3 枕式包装机工艺流程 Fig.3 Process flow of pillow type packing machine

2 电子凸轮飞剪运动控制算法

电子凸轮是在原有的机械凸轮基础上,通过确定 关键点位,在控制器内生成主轴点位与从轴点位的一 一对应关系,即电子凸轮曲线。模拟机械凸轮的运动 过程以实现从轴预期的运动规律^[6]。从本质上讲,电 子凸轮是一种函数关系,凸轮的主轴位移为函数的输 入,从轴位移为函数的输出。

2.1 电子凸轮飞剪过程分析

电子凸轮飞剪是包装行业和钢铁行业用来对产品 进行横向剪切的重要工艺技术。对于枕式包装机的电子 凸轮飞剪过程,最重要的就是在横封过程中对送膜轴和 切刀轴位置和速度的同步控制^[7]。通过 NX 控制器内置 的电子凸轮功能,对送膜轴和切刀轴进行协调同步控 制,以实现枕式包装机的电子凸轮飞剪工艺。

横封运动模型如图 4 所示。在电子凸轮飞剪过程 中,包装膜在送膜轴的驱动下匀速进给,通过电子凸轮 曲线调节切刀轴的速度,从而改变果蔬产品的包装长 度。整个切刀轴的运动分为调整区和同步区, 调整区又 分为追赶期和回位期^[8]。根据果蔬产品的包装长度不 同,切刀轴在调整区内加速、静止或减速运行。在同步 区内, 切刀轴速度与送膜轴速度保持同步, 切刀轴与送 膜轴的同步运行长度 $L_{\theta} = \pi \theta R_{\rm D} / 180^{\circ}$, 在剪切点 F 处完 成对果蔬产品的包装。规定剪切点位置为横封切刀作圆 周运动的 0°位置, 起始(终点)位置为 180°位置。横 封切刀从剪切点 F 逆时针旋转 360°回到剪切点 F, 这 是一个剪切周期。圆心角 $\angle EOF = \theta/2$ 、 $\angle FOG = \theta/2$, 同步角 $\angle EOG = \theta$ 。切刀轴的工作半径为 R_D ,运动周 长 C_D=2πR_D。在电子凸轮飞剪过程中,如果横封切刀在 剪切点 F 处的线速度低于送膜轴的线速度,则包装膜 会在此处堆积,造成包装膜的浪费和工艺水平的降低; 如果横封切刀在剪切点 F 处的线速度高于送膜轴线速 度,则包装膜会在此处拉扯,严重时会造成包装膜的断 裂,降低生产效率。故电子凸轮曲线的基本作用就是在 调整区内对切刀轴进行速度调节,当切刀轴运行至同步 区时,切刀轴速度与送膜轴速度保持同步。

2.2 建立数学模型

对枕式包装机的运动过程进行抽象,确定关键点位 的具体数据,建立数学模型以生成电子凸轮曲线^[9]。



图 4 横封运动模型 Fig.4 Transverse seal motion model

定长飞剪时建立虚拟轴作为主轴。设置虚轴转一 周的工作行程为 360°,虚轴采用速度控制模式,以设 置的速度匀速运行。以虚轴为主轴,虚轴与送膜轴为 电子齿轮关系,表示虚轴运行 360°,送膜轴跟随运行 一个果蔬产品的包装长度。虚轴与切刀轴为电子凸轮 关系,表示虚轴运行 360°,切刀轴跟随运行 360°, 完成一个果蔬产品的包装。虚轴与送料轴为电子齿轮 关系,送料轴与送膜轴速度同步,避免果蔬产品从送 料轴传输至送膜轴时因惯性而导致的打滑。

设虚轴角速度恒定为 ω ,果蔬产品的包装长度为 $L_{\rm C}$,则送膜轴与虚轴的电子齿轮比 $K = L_{\rm C}/360^{\circ}$,送 膜轴线速度 $v_{\rm M}=\omega L_{\rm C}/2\pi$,表示虚轴运行 360°,送膜轴 跟随运行一个果蔬产品的包装长度。

不定长飞剪时送膜轴采用速度控制模式,以设置的速度匀速运行。以送膜轴作为主轴,送膜轴与虚轴为电子齿轮关系,表示送膜轴运行一个果蔬产品的包装长度,虚轴跟随运行360°。虚轴与切刀轴为电子凸轮关系,表示虚轴运行360°,切刀轴跟随运行360°,完成一个果蔬产品的包装。切刀轴在同步区内与送膜轴速度保持同步,在调整区内加减速运行,并且根据 果蔬产品的包装长度不同,切刀轴受不同的电子凸轮曲线控制。虚轴与送料轴为电子齿轮关系,送料轴与 送膜轴速度同步,避免果蔬产品从送料轴传输至送膜轴时因惯性而导致的打滑。

设送膜轴线速度恒定为 $v_{\rm M}$,果蔬产品的包装长度为 $L_{\rm C}$,则送膜轴与虚轴电子齿轮比 $K = L_{\rm C} / 360^{\circ}$,虚轴角速度为 $\omega = 2\pi v_{\rm M} / L_{\rm C}$,表示送膜轴运行一个果蔬产品的包装长度,虚轴跟随运行 360°。

切刀轴-送膜轴-虚轴的位置关系如图 5 所示。点 F₁为剪切点,点 G 为同步结束点,点 E 为同步起始 点,点 F₂表示再次回到剪切点。图 5 与图 4 的点位 一一对应。



图 5 切刀轴-送膜轴-虚轴的位置关系 Fig.5 Position relation of cutter shaft - film feeding shaft - virtual shaft

斜率 K 表示送膜轴与虚轴的电子齿轮比。在 F_1G 段 同步区内,切刀轴速度与送膜轴速度保持同步,切刀轴 与送膜轴的同步运行长度为 $\pi \theta R_D$ / 360°,切刀轴运行角 度为 θ /2,虚轴运行角度为 $\pi \theta R_D$ / 360°K。在 EF_2 段同 步区内,切刀轴、送膜轴运行状态与在 F_1G 段同步区内 相同。在 GE 段调整区内,送膜轴运行长度为 $L_c - \pi \theta R_D$ / 180°,切刀轴运行长度为 $C_D - \pi \theta R_D$ / 180°,切 刀 轴运行角度为 360° – θ ,虚轴运行角度为 ($L_c - \pi \theta R_D$ / 180°) / K,从而确定点 G 和点 E 的坐标 分别见式(1)和式(2)。

$$G(x_G, y_G) = \left(\frac{\pi \theta R_{\rm D}}{360^\circ K}, \frac{\theta}{2}\right) \tag{1}$$

$$E(x_E, y_E) = \left(\frac{\pi\theta R_{\rm D}}{360^\circ K} + \left(\frac{L_{\rm C}}{K} - \frac{\pi\theta R_{\rm D}}{180^\circ K}\right), \ 360^\circ - \frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

根据点 *G*、点 *E*、点 *F*₂的坐标即可求取 *F*₁*G* 段 同 步 区 内 切 刀 轴 与 虚 轴 的 位 置 关 系 表 达 式 为 $y = K_1 x$, *GE* 段调整区内切刀轴与虚轴的位置关系表 达式为 $y = K_2 x + b_1$, *EF*₂ 段同步区内切刀轴与虚轴的 位置关系表达式为 $y = K_1 x + b_2$ 。

2.3 凸轮曲线设计

多项式凸轮曲线的一般表达式见式(3)。

$$y(x) = N_0 + N_1 x + N_2 x^2 + \dots + N_n x^n$$
(3)

式中:y和x分别为从轴和主轴的位移;N₀,N₁,..., N_n为常系数。为了便于分析比较选择不同次数的多项 式凸轮曲线,这里用时间 *t* 替换主轴位移 *x*,则从轴 位移 *y* 关于时间 *t* 的多项式位移曲线表达式见式(4)。

$$y(t) = N_0 + N_1 t + N_2 t^2 + L + N_n t^n$$
 (4)
将式(2)中的 y 和 t 无量纲化到区间 0~1。Y

表示无量纲从轴位移,*T*表示无量纲时间。无量纲多 项式位移曲线的表达式见式(5)。

$$Y(T) = N_0 + N_1 T + N_2 T^2 + \dots + N_n T^n$$
(5)

当 *n*=5 时,无量纲五次多项式位移曲线表达式见式(6)。

 $Y(T) = N_0 + N_1 T + N_2 T^2 + N_3 T^3 + N_4 T^4 + N_5 T^5$ (6)

对无量纲五次多项式位移曲线表达式进行微分, 得到无量纲速度曲线表达式见式(7)。

 $V(T) = N_1 + 2N_2T + 3N_3T^2 + 4N_4T^3 + 5N_5T^4$ (7)

对无量纲速度曲线表达式进行微分,得到无量纲 加速度曲线表达式见式(8)。

 $A(T) = 2N_2 + 6N_3T + 12N_4T^2 + 20N_5T^3$ (8)

对无量纲加速度曲线表达式进行微分,得到无量 纲跃度曲线表达式见式(9)。

$$J(T) = 6N_3 + 24N_4T + 60N_5T^2 \tag{9}$$

将无量纲五次多项式凸轮曲线的边界条件:当 *T*=0时,*Y*=0、*V*=0、*A*=0;当*T*=1时,*Y*=1、*V*=0、 *A*=0,代入式(6)—(8)表达式并联立方程组即可 求出各个系数。无量纲五次多项式位移曲线表达式见 式(10)。

$$Y(T) = 6T^5 - 15T^4 + 10T^3$$
(10)无量纲五次多项式速度曲线表达式见式(11)。 $V(T) = 30T^4 - 60T^3 + 30T^2$ (11)

无量纲五次多项式加速度曲线表达式见式(12)。

$$A(T) = 120T^3 - 180T^2 + 60T \tag{12}$$

无量纲五次多项式跃度曲线表达式见式(13)。

$$J(T) = 360T^2 - 360T + 60 \tag{13}$$

无量纲三次、七次多项式曲线与无量纲五次多项 式曲线求解方法相同,此处省略求解过程。无量纲三 次多项式位移曲线表达式见式(14)。

$$Y(T) = -2T^3 + 3T^2$$
 (14)

 无量纲三次多项式速度曲线表达式见式(15)。
 $V(T) = -6T^2 + 6T$
 (15)

 无量纲三次多项式加速度曲线表达式见式(16)。
 $A(T) = -12T + 6$
 (16)

 无量纲三次多项式跃度曲线表达式见式(17)。
 $J(T) = -12$
 (17)

 无量纲七次多项式位移曲线表达式见式(18)。
 $Y(T) = -20T^7 + 70T^6 - 84T^5 + 35T^4$
 (18)

 无量纲七次多项式速度曲线表达式见式(19)。
 $V(T) = -140T^6 + 420T^5 - 420T^4 + 140T^3$
 (19)

 无量纲七次多项式加速度曲线表达式见式(20)。
 $A(T) = -840T^5 + 2100T^4 - 1680T^3 + 420T^2$
 (20)

 无量纲七次多项式跃度曲线表达式见式(21)。
 $J(T) = -4200T^4 + 8400T^3 - 5040T^2 + 840T$
 (21)

 根据无量纲三次、五次、七次多项式位移曲线表达式
 X
 X
 X

 达式画出多项式位移曲线,如图 6 所示。
 X
 X
 X



Fig.6 Polynomial displacement curve

分析图 6 可以看出,三次、五次、七次多项式的 位移曲线都比较平滑,均不会使设备产生剧烈振动。 根据无量纲三次、五次、七次多项式速度曲线表达式 画出多项式速度曲线,如图 7 所示。



Fig.7 Polynomial speed curve

分析图 7 可以看出,随着多项式曲线次数的增加,特征值 Vm 也就越大,所能达到的速度也就越大。 速度过大会导致动能增大,对设备的冲击和振动就越 大,因此并不是多项式曲线次数越多越好。根据无量 纲三次、五次、七次多项式加速度曲线表达式画出多 项式加速度曲线,如图 8 所示。

根据牛顿第二定律 F=ma 可知,当枕式包装机切 刀轴的质量一定时,切刀轴的加速度越大,机械设备 所受到的合外力就越大,机械设备产生的惯性也就越 大。惯性太大不利于切刀轴的急停和变速,容易造成 受力部位的零件损伤,进而加剧设备的损耗和降低设 备的控制精度。



Fig.8 Polynomial acceleration curve

分析图 8 可以看出, 三次多项式加速度曲线是一条直线, 故其柔性较差。七次多项式加速度曲线变化 幅度最大, 相较于三次多项式和七次多项式, 五次多 项式曲线 A_m最小, 对机械设备产生的震动相对较小。 根据无量纲三次、五次、七次多项式跃度曲线表达式 画出多项式跃度曲线, 如图 9 所示。



Fig.9 Polynomial jump curve

分析图 9 可以看出,三次多项式跃度曲线为常数,七次多项式曲线的 J_m大于五次多项式曲线的 J_m、 多项式凸轮曲线特征值如表 1 所示。

表 1 多项式凸轮曲线特征值 Tab.1 Polynomial cam curve eigenvalue

曲线类型	Vm	$A_{\rm m}$	$J_{ m m}$
三次多项式	1.500 0	6.000 0	-12.000 0
五次多项式	1.875 0	5.773 3	60.000 0
七次多项式	2.187 5	7.505 5	42.500 0

综上所述,相较于三次和七次多项式凸轮曲线, 五次多项式凸轮曲线的 Vm适中,Am最小,且位移曲 线比较平滑,计算量合适。故本次电子凸轮飞剪工艺 的设计采用五次多项式规划设计调整区内切刀轴关 于虚轴的电子凸轮曲线。根据算法的功能性和实现的 便捷性,在五次多项式插补理论设计的凸轮曲线下, 电子凸轮的插补运动更加稳定^[10]。

3 控制系统软件设计

控制系统软件设计包括 NX 控制器配置、NX 控制器程序和 NB 触摸屏界面。对枕式包装机进行现场 调试,实际测试的结果为使用电子凸轮曲线产生的包 装效果较好。

3.1 NX 控制器配置

NX 控制器与 1S 系列伺服通过自动化软件 Sysmac Studio 进行系统通信网络配置。首先添加对 应型号的控制器,并设置其 IP 地址为 192.168.0.1; 其次在 Sysmac Studio 软件中完成 EtherCAT 通信网络 配置。在 EtherCAT 节点地址网络设置中添加所需要 的伺服设备类型,并设置设备名称,分配设备节点 地址。若 NX 控制器和 1S 系列伺服已与上位机连接, 则可以通过物理网络配置直接将 EtherCAT 通信网 络实际配置上传至 Sysmac Studio 软件。EtherCAT 网络配置情况如图 10 所示,其中,E001、E002、 E003 分别对应横封机构、送料机构、送膜机构的伺 服驱动器。

3.2 NX 控制器程序设计

在完成工程创建和系统配置之后,接下来的工作 就是设计、编写和调试程序。Sysmac Studio 支持使 用梯形图、ST 语言编写 NX 控制器程序,并且软件 库内封存大量的功能和功能块,使用时直接调用即 可。同时若要实现某些复杂算法,且使用 Sysmac Studio 无法编写或编写过于复杂,则可通过 C 语言编 写后转换成 Sysmac Studio 内的 ST 语言。

NX 控制器上电之后执行初始化程序,主要是各

伺服轴使能、归零、参数清零以及解除齿轮间的耦合, 之后检测初始化操作是否完成,然后选择运行模式和 工作模式,最后系统循环运行直至结束。主程序设计 流程如图 11 所示。

在电子凸轮飞剪过程中,需要对虚轴和切刀轴 进行协调同步控制。当虚轴运行 360°, 切刀轴跟随 运行 360°, 运行长度为 CD。根据切刀轴关于虚轴 的关键数据点位,计算出电子凸轮表(CamProfile), 生成电子凸轮曲线。根据果蔬产品的包装长度进行 计算,并在 Sysmac Studio 中设置同步起始点、同步 结束点、剪切点等关键点位处虚轴和切刀轴的位置, 调用 MC CamIn 功能块设定切刀轴关于虚轴的电子 凸轮曲线,执行电子凸轮动作。在 Cam 数据设置里 添加表示切刀轴与虚轴一一对应关系的电子凸轮 表,连接电子凸轮表里的相邻凸轮数据,生成电子 凸轮曲线。使用五次多项式规划设计电子凸轮曲 线,使切刀轴的位移、速度、加速度平滑变化,降 低机械振动,提高控制精度[11-14]。以虚轴的绝对位 置指定电子凸轮表的起点,在定长模式下,虚轴为 速度控制模式,当虚轴达到目标速度之后,切刀轴 跟随虚轴运动;在不定长模式下,虚轴速度由送膜 轴与虚轴的电子齿轮比决定。电子凸轮控制流程如 图 12 所示。

3.3 NB 触摸屏界面设计

通过 NB_Designer 软件创建触摸屏界面,并完成 触摸屏与 NX 控制器的通信连接,触摸屏即可对枕式 包装机进行控制,同时还具有监控输入输出信号、显 示工艺参数、查看历史信息、异常报警等功能。

触摸屏界面分为设置、运行、手动、配方、I/O、 报警等六大部分。设置界面主要用于设置工作模式和 包装参数。运行界面主要用于显示工作模式和包装参 数。手动界面主要用于对送料轴、送膜轴、切刀轴进 行手动控制。配方界面主要用于将多组产品生产参数 一键保存,同类产品包装时可直接调用配方,无需重 复设置。I/O 界面主要用于显示各个变量的输入输出 状态。报警界面主要用于提示异常报警、显示报警信 息。其中设置界面如图 13 所示。

👬 EtherCAT	×		-
节点地址(网络)	设置		
	Master 主设备	项目名称	
1	E001 R88D-1SN15H-ECT Rev:1.4	设备名称 机刑	E001 P88D_1SN15H_FCT
2	E002 R88D-1SN08H-ECT-03 Rev:1.4	501至 产品名称 版本	R8BD-ISNISH-ECT 200V/1.5kW ServoDrive
3	E003 R88D-1SN08H-ECT-03 Rev:1.4	NDC通信周期 节点地址	1本 PDO通信周期1 (2500us) 1

图 10 EtherCAT 网络配置 Fig.10 EtherCAT network configuration



图 11 主程序设计流程 Fig.11 Design flow chart of main program

4 结果与分析

4.1 凸轮曲线测试

当切刀轴工作半径为48mm,连续包装的果蔬产

品的包装长度分别为 200、400、200、800 mm,同步 角度为 60°,送膜轴线速度为 8 m/min、133.33 mm/s 时,送膜轴与虚轴的电子齿轮比分别为 200/360、 400/360、200/360、800/360,虚轴速度分别为 239.994、119.997、239.994、59.998 5(°)/s,包装



图 12 电子凸轮控制流程 Fig.12 Control flow chart of electronic cam

时间为 12 s。切刀轴与送膜轴的位置关系曲线如图 14 所示。切刀轴线速度曲线如图 15 所示。

通过测试结果可以看出,通过五次多项式规划设 计的电子凸轮曲线满足控制系统的要求。可根据果蔬



图 13 设置界面 Fig.13 Setting interface

产品的包装长度的不同而自动调整,并且曲线具有良好的连续性和柔性,避免了刚性冲击和机械振动,有效提高了控制精度^[15]。

4.2 包装合格率测试

在现场枕式包装机上进行实际包装测试,果蔬产品的实际包装如图 16 所示。测试果蔬产品的实际长度为 320 mm,果蔬产品的包装长度为 360 mm,果蔬 产品的包装宽度为 210 mm,包装速度为 8 m/min,果 蔬产品的包装高度为 40 mm。经测试,枕式包装机运 行情况良好,运行过程中横封切刀无异常振动,果蔬 产品的包装精度高,满足了生产工艺的要求。



图 14 切刀轴与送膜轴位置关系曲线 Fig.14 Position relation curve between cutter shaft and film feeding shaft



图 15 切刀轴速度曲线 Fig.15 Cutter shaft speed curve



图 16 实际包装 Fig.16 Actual packing

由于七次多项式凸轮曲线算法对设备的冲击和 振动很大,设备无法稳定运行,故只针对三次多项式 和五次多项式凸轮曲线算法,根据果蔬产品的包装长 度和包装速度的不同,对枕式包装机的产品包装合格 率进行测试。在 6、8、10、12、14 m/min 的包装速 度下分别测试包装长度为 320、480、640 mm 的产品 包装的合格率。三次多项式凸轮曲线算法下果蔬产品 包装测试结果如表 2 所示。

五次多项式凸轮曲线算法下果蔬产品包装测试 结果如表3所示。

经实际测试,长度测量精确到毫米。随着包装速度的增加和包装长度的减少,使用三次多项式凸轮曲线算法,在包装误差允许的±1 mm 范围之内,包装合格率降低了 1%~7%;使用五次多项式凸轮曲线算法,包装误差始终在允许误差范围内,并且包装合格率为 100%。相较于三次多项式凸轮曲线算法,五次多项 式凸轮曲线算法提高了枕式包装机的包装合格率。

表 2 果蔬产品包装测试结果(三次多项式) Tab.2 Fruit and vegetable packing test results (cubic polynomial)

编号 包装	与壮速度//m.m.m ⁻¹)	包装长度/mm -	误差 x/mm			台次冯美中句准合按室/0/
	包衣还及/(m·mm)		x=0	0 < x < 1	x > 1	- 几叶庆左内也表有俗平/70
1	6	320	94	6	0	100
2	6	480	95	5	0	100
3	6	640	96	4	0	100
4	8	320	94	5	1	99
5	8	480	95	5	0	100
6	8	640	95	5	0	100
7	10	320	94	4	2	98
8	10	480	95	5	0	100
9	10	640	95	5	0	100
10	12	320	92	4	4	96
11	12	480	94	4	2	98
12	12	640	94	4	2	98
13	14	320	83	10	7	93
14	14	480	90	6	4	95
15	14	640	92	5	3	97

注:误差以连续100包计。

序号	包装速度/(m·min ⁻¹)	包装长度/mm -	误差 <i>x</i> /mm			台次沿关中与准入按变/0/
			x=0	0 < x < 1	x > 1	一几斤庆左门已衣口怕平/70
1	6	320	97	3	0	100
2	6	480	97	3	0	100
3	6	640	97	3	0	100
4	8	320	96	4	0	100
5	8	480	97	3	0	100
6	8	640	97	3	0	100
7	10	320	95	5	0	100
8	10	480	96	4	0	100
9	10	640	96	4	0	100
10	12	320	95	5	0	100
11	12	480	96	4	0	100
12	12	640	96	4	0	100
13	14	320	95	5	0	100
14	14	480	95	5	0	100
15	14	640	96	4	0	100

表 3 果蔬产品包装测试结果(五次多项式) Tab.3 Fruit and vegetable packing test results (quintic polynomial)

注:误差以连续100包计。

5 结语

通过现场设备实际测试证实了基于电子凸轮飞 剪运动控制算法的优越性,证明了基于五次多项式规 划设计的电子凸轮曲线完全满足生产工艺要求,验证 了本课题设计的枕式包装机控制系统的可靠性和稳 定性。

基于电子凸轮飞剪的枕式包装机虽然包装种类 多样、包装效率快、包装精度高,但包装完成后,无 法实现果蔬产品信息的可视化。针对此问题,在下一 代产品研发时,结合梅特勒托利多的动态称量在包装 的同时完成果蔬产品的动态称量,并通过视觉识别检 测果蔬产品的种类,根据质量信息和产品类别计算出 产品价格。之后结合打码装置,将果蔬产品的种类、 质量、价格、生产日期等信息打印到果蔬产品的外包 装上,实现果蔬产品信息的可视化。最后随着疫情防 控要求的提高,结合消毒装置,在包装完成后实现果 蔬产品的二次消毒。

参考文献:

[1] 王帅. 基于 DSP 的三伺服包装机运动控制系统设计[D].济南:齐鲁工业大学, 2015: 1-37.

WANG Shuai. Design of Motion Control System of Three Servo Packaging Machine Based on DSP[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2015: 1-37.

[2] 石磊. 果蔬自动包装机控制系统设计与研究[D]. 杭

州:浙江农林大学,2014:1-27.

SHI Lei. Design and Research on Control System of Fruit and Vegetable Automatic Packaging Machine[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2014: 1-27.

- [3] 赵燕,陈秋霞,文凯. 枕式包装机控制系统设计[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(2): 42-45.
 ZHAO Yan, CHEN Qiu-xia, WEN Kai. The Design of the Control System of the Automatic Packaging Machine[J]. Packaging and Food Machinery, 2015, 33(2): 42-45.
- [4] 李敏, 孙琪, 赵敏. 基于 PLC 的三伺服枕式包装机控 制系统设计[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 183-187.
 LI Min, SUN Qi, ZHAO Min. Design of Control System of Three Servo Pillow Packaging Machine Based on PLC[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 183-187.
- [5] 云善起,徐世许,王伟,等. 基于电子凸轮飞剪的枕 式包装机控制系统[J]. 控制工程,2020,27(10): 1776-1780.
 YUN Shan-qi, XU Shi-xu, WANG Wei, et al. Pillow Packaging Machine Control System Based on Electronic Cam Flying Shear[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(10): 1776-1780.
- [6] PELLICCIARI M, BERSELLI G, BALUGANI F. On Designing Optimal Trajectories for Servo-Actuated Mechanisms: Detailed Virtual Prototyping and Experimental Evaluation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(5): 2039-2052.
- [7] 袁飞,周文彬. 枕式果蔬食品包装机的设计与试验[J].

食品工业, 2020, 41(4): 195-198.

YUAN Fei, ZHOU Wen-bin. Design and Test of Pillow Packing Machine for Fruits and Vegetables Food[J]. The Food Industry, 2020, 41(4): 195-198.

[8] 王伟,邱巧迪,徐世许.基于 NJ 控制器的前缘送纸机 控制系统设计[J].工业仪表与自动化装置,2021(5): 16-19.

WANG Wei, QIU Qiao-di, XU Shi-xu. Design of Leading Edge Feeder Based on NJ Controller Control System[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2021(5): 16-19.

[9] 陈历波. 基于电子凸轮和软 PLC 技术的数控制刷机床 运动控制系统设计与开发[D]. 杭州:浙江大学, 2020: 28-44.

CHEN Li-bo. Design and Development of Motion Control System of NC Brush Machine Based on Electronic Cam and Soft PLC Technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 28-44.

- [10] WANG S, YOU D, LEI Y, et al. Curve Fitting and Software Realization of Electronic Cam[C]// 2021 4th World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM), 2021: 252-257.
- [11] 张现忠, 徐世许, 王伟, 等. 基于电子凸轮追剪的切

坯机控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2020, 42(11): 125-128.

ZHANG Xian-zhong, XU Shi-xu, WANG Wei, et al. Design of Cutting Machine Control System Based on Electronic Cam Chasing[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(11): 125-128.

- [12] 唐健. 热收缩薄膜包装机自动控制系统的研究[D]. 济南:山东大学, 2020: 17-37.
 TANG Jian. Research on Automatic Control System of Heat Shrinkable Film Packaging Machine[D]. Jinan: Shandong University, 2020: 17-37.
- [13] MÜLLER M, HOFFMANN M, HÜSING M, et al. Using Servo-Drives to Optimize the Transmission Angle of Cam Mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 135: 165-175.
- [14] MEVSHA N V, PUNTUS A V. Determining the Minimum Size of Cam Mechanisms[J]. Russian Engineering Research, 2019, 39(1): 16-19.
- [15] 陈梅, 王舒润. 基于 PLCopen 的电子凸轮功能块算法的研究[J]. 控制工程, 2020, 27(1): 121-126.
 CHEN Mei, WANG Shu-run. Research of Electronic Cam Function Block Algorithm Based on PLCopen[J].
 Control Engineering of China, 2020, 27(1): 121-126.

责任编辑:曾钰婵