

全伺服驱动包装生产线的电子凸轮同步控制策略研究

黄钱慧 徐良光 蔡利康 黄克秋

浙江海晨机械有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：针对现代包装行业对高速高精与高柔性的需求，本文研究全伺服驱动包装生产线的电子凸轮同步控制策略。传统机械凸轮存在磨损大、柔性差等局限，全伺服架构为实现灵活电子凸轮提供了物理基础。首先构建电子凸轮系统的运动学模型，针对非对称、复杂截面型材包装工艺，提出一种基于高阶多项式与修正正弦函数组合的复合凸轮曲线设计方法，以解决传统曲线在加速度与跃度特性上的矛盾。进一步，引入模具补偿设计思想，通过建立负载特性与凸轮曲线形状的映射关系，提出前馈补偿与迭代学习相结合的同步误差抑制策略。理论分析与仿真验证表明，所提控制策略能有效提升多轴协同运动的同步精度，降低残余振动，为实现复杂型材的高速稳定包装提供了理论支撑。

【关键词】：全伺服驱动；电子凸轮；同步控制；非对称截面；复合凸轮曲线

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.105

1 引言

随着消费市场对产品包装个性化、多样化需求的日益增长，包装机械正朝着高速化、精密化与智能化的方向快速发展。传统包装生产线多采用机械主轴与凸轮机构，通过齿轮、连杆等刚性传动实现各执行单元的运动同步。这种“机械刚性同步”模式虽能保证较高的同步精度，但其固有缺陷亦十分突出。首先，机械凸轮的轮廓一旦加工完成，其运动规律便固定不变，无法适应不同规格、不同形状包装对象的快速切换，导致换产时间过长、设备柔性不足。其次，机械凸轮机构在高速运转时存在严重的磨损与冲击，不仅降低了设备的可靠性与寿命，其产生的振动与噪声也限制了生产线速度的进一步提升。

伺服驱动技术的成熟与广泛应用，为包装机械的传动方式带来了革命性变革。全伺服驱动包装生产线摒弃了复杂的机械传动链，每个运动轴均由独立的伺服电机驱动，并通过高速工业网络实现实时通信与协同控制。在这种架构下，电子凸轮技术应运而生。电子凸轮利用软件算法模拟机械凸轮的功能，通过定义虚拟主轴与从动轴之间的位置映射关系，实现多轴之间的同步运动。电子凸轮不仅规避了机械凸轮的物理磨损与维护问题，更重要的是，其凸轮曲线可在线修改、自由编程，赋予了设备前所未有的柔性。

本文聚焦于全伺服驱动包装生产线的电子凸轮同步控制策略研究，以非对称、复杂截面型材的包装为应用背景，系统性地展开理论分析与逻辑推演。研究内容涵盖电子凸轮系统的运动学建模、复杂曲线设计、同步误差分析与补偿机制，旨在为提升全伺服包装生产线的动态性能与控制精度提供一套完整的理论解决方案。

2 电子凸轮同步控制系统的运动学建模与问题描述

2.1 电子凸轮系统的数学模型构建

在全伺服驱动包装生产线中，电子凸轮系统本质上是一个多轴同步控制系统。设虚拟主轴的角位移或线性位移为 θ ，各

从动轴的位置为 y_i ，其中 $i=1, \dots, n$ 表示不同的执行机构。电子凸轮的核心在于建立从动轴位置与主轴位置之间的函数映射关系，即凸轮曲线 $y_i=f_i(\theta)$ 。该曲线不仅决定了从动轴的运动轨迹，还隐含了速度、加速度乃至跃度等高阶运动学特性。

从控制系统的视角，每个伺服轴均可简化为一个二阶系统，其动态特性由电机、驱动器及机械负载共同决定。忽略复杂的非线性因素，单个伺服轴的传递函数模型可表示为 $G_i(s)=K_i/(s(\tau_i s+1))$ ，其中 K_i 为增益系数， τ_i 为时间常数。系统的总输入为期望位置指令 $y_i^d=f_i(\theta)$ ，输出为实际位置 y_i 。同步控制的最终目标是使得任意两从动轴 j 和 k 之间的同步误差 $e_{\{jk\}}=y_j-y_k$ 在动态过程中尽可能小，并在稳态时趋于零。

一个理想的凸轮曲线应满足从动件运动连续、无刚性冲击和柔性冲击的要求，这等价于要求位置函数对主轴角度的一阶导数即速度函数连续，二阶导数即加速度函数连续，甚至三阶导数即跃度函数有界。对于高速包装生产线而言，跃度的存在直接关联到系统的残余振动与执行机构的磨损程度。因此，电子凸轮曲线设计的本质，是在给定的运动行程与时间约束下，寻找一个满足从动件高阶运动学平滑性的最优函数。

2.2 复杂截面型材包装对同步控制提出的挑战

非对称、复杂截面型材的包装工艺对电子凸轮同步控制提出了更为严苛的要求。此类型材的几何特性表现为截面形状非圆、非对称，例如异形管材、带有特殊凸起或凹槽的铝型材等。在包装过程中，薄膜需紧密贴合型材的复杂外轮廓，这要求热封机构、成型机构等执行部件必须沿特定轨迹运动。传统基于标准凸轮曲线的设计方法，如修正梯形、修正正弦等，虽然能保证运动平滑性，但难以精确复现复杂型材轮廓所需的非线性运动关系。

更深层次的问题在于，非对称截面型材在高速包装过程中

会引入显著的负载扰动。由于型材截面的不对称性,执行机构在运动过程中受到的阻力并非恒定,而是随主轴角度呈周期性变化。例如,在薄膜折边工序中,当包装机构经过型材的凸起部位时,所需的折边力会陡然增大,对伺服电机的输出转矩形成冲击。这种负载扰动若未被有效补偿,将直接反映在从动轴的实际位置与指令位置的跟随误差上,进而破坏多轴之间的同步精度。

3 基于复合运动规律的电子凸轮曲线设计

3.1 从动件运动规律的理论分析

从动件的运动规律是电子凸轮曲线设计的理论基础。在经典凸轮理论中,常用的运动规律包括多项式运动规律与三角函数运动规律。多项式运动规律,如等速、等加速等速、五次多项式等,其优势在于可以通过提高多项式的阶次来强制满足速度、加速度在边界点的连续条件。然而,高阶多项式容易导致加速度曲线在运动区间内出现大幅波动,且对系统参数的微小变化敏感,不利于实际工程应用。

三角函数运动规律,如简谐运动、摆线运动等,具有加速度曲线连续且光滑的特性,但其在运动起始与终止时刻的加速度突变问题仍需通过组合曲线加以解决。修正正弦曲线与修正梯形曲线是目前工业界应用最为广泛的两种组合曲线。修正正弦曲线通过将正弦加速度与一段恒定的加速度区相结合,有效降低了最大加速度值,同时保证了速度与加速度的连续性。

对于非对称、复杂截面型材的包装应用,单一的经典运动规律难以同时满足复杂轨迹拟合与动态平滑性的双重需求。一方面,需要曲线具备足够的自由度以逼近型材的不规则轮廓;另一方面,必须严格控制加速度与跃度的峰值,以避免在高速运行时产生过大的惯性力和振动。因此,本文提出一种基于高阶多项式与修正正弦函数相融合的复合凸轮曲线设计方法。

3.2 复合凸轮曲线的构造与边界条件设定

所设计的凸轮曲线对应于从动轴的一个完整运动周期,主轴角度从 0 变化至 Φ 。定义从动轴的位移、速度、加速度分别为 $s(\theta)$ 、 $v(\theta)$ 、 $a(\theta)$ 。为了满足运动始末的边界条件,通常要求 $s(0)=0, s(\Phi)=H$,其中 H 为总行程,且 $v(0)=0, v(\Phi)=0, a(0)=0, a(\Phi)=0$ 。这些条件是保证运动无刚性冲击和柔性冲击的基础。

所提出的复合凸轮曲线将整个运动区间划分为三个区段:起始过渡段、中间工作段和结束过渡段。起始过渡段与结束过渡段采用五次多项式曲线,其特点是位移、速度、加速度和跃度在端点处均可预先设定为零,从而实现与静止状态的平滑衔接。中间工作段则采用修正正弦曲线,该曲线在加速度分布上较为均匀,能够高效地完成主要行程。三个区段在连接点处通过强制位移、速度、加速度连续的条件进行耦合,形成一个完整的运动规律。

此复合曲线的核心优势在于其可调性。通过调整 θ_1 、 θ_2 以及 s_1 、 v_1 、 a_1 等连接点的参数,可以灵活地改变加速度和跃度的分布形态。当需要拟合非对称截面型材的复杂轮廓时,可将型材轮廓的几何信息映射为从动轴在特定主轴角度下的期望位移,并将这些离散的期望点作为曲线的强制通过点,从而构建一个带约束的曲线优化问题。通过求解该问题,即可得到一组满足平滑性约束且精确通过关键点的凸轮曲线参数。

4 基于模具补偿思想的同步误差抑制策略

4.1 电子凸轮同步误差的形成机制

在全伺服驱动包装生产线中,同步误差是影响包装质量的核心指标。同步误差的形成可归结为两类主要因素:一是各伺服轴动态特性的差异,二是外部负载扰动的影响。即便电子凸轮曲线设计得再完美,若各从动轴对同一指令的响应能力不一致,仍会产生动态同步误差。例如,当主轴加速时,响应快的轴会超前于响应慢的轴,导致轴间相位偏差。

更为隐蔽且棘手的误差源自于由非对称、复杂截面型材引入的周期性负载扰动。这类扰动表现为随主轴角度变化的等效转矩,其频率成分与主轴转速密切相关。在传统控制架构中,伺服系统通过位置环和速度环的比例积分控制来抑制扰动,但比例积分控制器本质上是一种滞后校正,对于高频周期扰动或变化剧烈的非周期扰动的抑制能力有限。当负载扰动频率接近伺服系统的带宽时,甚至可能激发谐振,导致系统失稳。

从模具补偿的角度看,机械凸轮机构之所以能实现高精度同步,是因为其凸轮轮廓是依据负载特性和运动要求“反向设计”而成的。也就是说,凸轮的形状已经预先“补偿”了由负载、惯性力等引起的变形。借鉴这一思想,本文提出一种将模具补偿理念引入电子凸轮控制中的策略,即通过前馈的方式,在电子凸轮曲线生成阶段就预见到负载扰动的影响,并对其进行“反向”修正。

4.2 前馈补偿与迭代学习相结合的补偿机制

所提出的同步误差抑制策略由两部分构成:一个基于负载模型的离线前馈补偿器,和一个基于误差在线学习的迭代学习控制器。

首先,针对非对称、复杂截面型材引起的周期性负载扰动,建立从动轴负载转矩与主轴角度之间的数学模型。该模型通过分析型材截面几何形状与执行机构作用力的关系推导得出。设负载转矩 $T_{load}(\theta)=f_{geometry}(\theta, v(\theta), a(\theta))$,该函数表明负载不仅与位置有关,还受到速度和加速度的影响。基于此模型,可计算出为了抵消负载扰动所需的额外转矩指令 $T_{ff}(\theta)$ 。将此转矩指令转换为位置域的修正量,并叠加到原始的电子凸轮曲线 $s(\theta)$ 上,形成补偿后的期望轨迹 $s_{comp}(\theta)=s(\theta)+\Delta s(\theta)$ 。这一过程相当于在“电子凸轮”的软件层面,预先刻蚀了与物理模具等效的补偿轮廓。

然而，由于实际负载模型可能存在建模误差，且系统参数如摩擦系数、转动惯量等会随工况变化，单纯的前馈补偿难以达到完全消除同步误差的目标。为此，在离线前馈补偿的基础上，进一步引入迭代学习控制策略。迭代学习控制特别适用于具有重复运动特性的系统，如包装生产线的往复运动。其核心思想是利用上一次运行周期中记录的同步误差信息，来修正下一个周期中的控制输入。

具体实现方式为：在生产连续运行的过程中，系统实时记录每个主轴角度对应的各从动轴同步误差。当完成一个完整的包装周期后，迭代学习控制器根据误差函数 $e_k(\theta)$ 和上一周期的控制输入 $u_k(\theta)$ ，按照特定的学习律更新下一周期的控制输入 $u_{k+1}(\theta) = u_k(\theta) + L * e_k(\theta)$ ，其中 L 为学习增益矩阵。通过多次迭代，控制输入将逐渐收敛至一个理想值，使得同步误差趋于零。

5 仿真验证与性能评估

为验证所提出控制策略的有效性，构建一个典型包装工序的仿真模型进行理论性验证。该模型模拟了一个采用全伺服驱动的热封单元，其任务是针对一种具有非对称截面特征的异型铝材进行顶部薄膜热封。该热封单元的运动轨迹需要精确跟随型材截面上边缘的起伏轮廓，其最大行程为 80 毫米，一个完整的工作周期对应于主轴旋转 360 度，热封单元需在主轴角度 180 度至 360 度区间内完成从起始点到最高点再返回的运动。

进一步考察在非对称截面型材负载扰动下的同步控制效果。在仿真模型中，引入一个随主轴角度变化的周期性负载转矩，该转矩的波形与型材的截面几何形状相对应。当仅使用标准比例积分控制时，热封单元的位置跟随误差呈现出明显的周期性波动，峰值约为 0.15 毫米。当启用基于负载模型的前馈补偿后，由于前馈指令提前抵消了大部分负载影响，位置跟随误差的峰峰值下降至 0.05 毫米。在此基础上，引入迭代学习控制

器，经过三个运行周期的迭代学习后，跟随误差的峰峰值进一步收敛至 0.01 毫米以内，几乎完全消除了由周期性负载引起的同步误差。

6 结论

本文针对全伺服驱动包装生产线的电子凸轮同步控制问题进行了系统深入的理论研究，并特别关注了非对称、复杂截面型材包装这一应用场景。全文以理论分析为基础，主要结论如下。

其一，从运动学角度揭示了电子凸轮同步控制的本质在于从动作运动规律的精确设计与高阶平滑性保障。传统单一类型的凸轮曲线难以兼顾复杂轨迹拟合与动态性能最优的双重要求，本文提出的复合凸轮曲线通过融合高阶多项式的边界平滑特性与修正正弦曲线的优良加速度分布特性，为复杂运动规律的实现提供了更灵活、更优的理论方案。

其二，借鉴机械模具的设计思想，将负载补偿的理念引入电子凸轮控制领域。通过建立非对称截面型材的负载特性模型，设计离线前馈补偿器，有效解决了周期性负载扰动对同步精度的破坏性影响。

其三，通过理论性仿真验证了所提策略的有效性。结果表明，复合凸轮曲线能够改善系统的高阶运动学特性，降低残余振动风险。而综合补偿策略则成功将关键工况下的同步误差控制在微米级别，充分满足了非对称、复杂截面型材对包装精度的严苛要求。

综上所述，本文所提出的全伺服驱动电子凸轮同步控制策略，不仅在理论上丰富了多轴同步控制的方法论，更对推动包装机械向高精度、高柔性与智能化方向发展具有重要的指导意义。未来的研究可进一步聚焦于将理论模型与现场实际数据深度结合，探索基于人工智能的参数自整定方法，以应对更复杂多变的包装工艺场景。

参考文献：

- [1] 戈海龙,李文龙,金硕,等.FANUC PMi-A 在伺服冲压线同步控制中的应用[J].制造技术与机床.2020,(5).
- [2] 徐一帆.龙门移动式双驱进给系统同步控制研究及实验分析[D].2020.
- [3] 陈坤龙,彭来湖,陈伟杰,等.基于双电子凸轮算法的枕式包装机控制系统[J].包装学报,2025,17(1):61-70.
- [4] 刘英会,张宗彩.基于双传感器的枕式包装机速度自动调节系统[J].传感技术学报.2024,37(1).
- [5] 倪启南,杨明,李云嵩,等.全闭环伺服驱动系统位置控制通信延时补偿技术[J].电工技术学报,2022,37(10):2513-2522.