

单侧变截面辊弯成形系统的运动分析^①

闫 军^{②*} 李 强^{**} 周志霞^{***}

(* 内蒙古工业大学机械学院 呼和浩特 010051)

(** 北方工业大学机械与材料工程学院 北京 100144)

(*** 内蒙古工业大学电力学院 呼和浩特 010051)

摘 要 对直线电机驱动的单侧变截面辊弯成形系统进行了运动分析。应用正解法分析了末端轧辊的位移、速度、加速度等受直线电机相关参数的影响,并列出了相关的运动方程。应用 Matlab 语言描绘出了末端轧辊的运动参数的变化曲线,通过曲线对比,分析了直线电机的各个运动参数的变化对末端轧辊速度、加速度等影响;分析并探讨了有关的结构参数的变化对末端轧辊的位移、速度、加速度的影响。

关键词 辊弯成形, 运动分析, 正解法, 运动方程

0 引 言

机械系统运动学主要研究的是在已知外力作用下,求机械系统的真实运动规律,分析系统中各个构件的运动参数(包括位移、速度、加速度)以及不同构件间运动参数之间的关系^[1-3]。正解是已知电机的速度、加速度根据结构特性建立末端轧辊的速度、加速度关系式,它的用途是进行运动学分析。末端轧辊的各个运动参数不仅受 1、2 号直线电机的相关运动参数的影响,也受到相关的机械结构参数的影响以及相关运动参数的影响。末端轧辊的运动参数的稳定性,直接影响加工产品的质量,因此有必要对它们加以研究、控制。

1 系统的组成与运动

单侧电机齿轮齿条的组成如图 1 所示,伺服直线电机的定子与齿条连接。中心齿轮同时与齿条 1

和齿条 2 啮合,设 1 号电机的位移量为 S_1 , 2 号电机的位移量为 S_2 , 中心齿轮绕 Z 轴的转角为 θ , 齿轮中心的位移为 S_0 , 齿轮分度圆半径为 R , 齿轮圆心到末端轧辊成形面的旋转半径为 r , 板材通过成型设备时的速度为 v , 则通过直线电机 1、2 的直线运动带动齿条 1、2 平动,齿条 1、2 与中心齿轮啮合,中心齿轮带动轧辊机架实现沿 Y 轴的平动、绕 Z 轴的旋转运动以及两种运动的耦合运动^[4,5]。

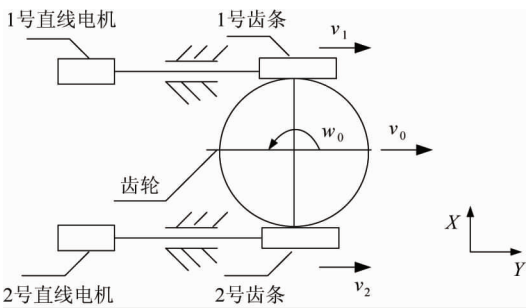


图 1 单侧系统底面图

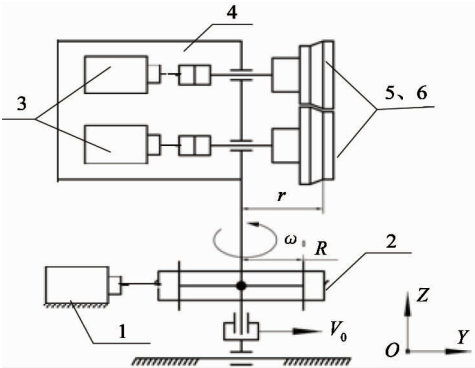
由图 1 可以看出:

① 国家科技支撑项目计划(2011BAG03B03),教育部博士基金(200801280001),内蒙古工业大学科学研究基金(ZD201602)和内蒙古工业大学校基金(X201338)资助项目。
② 男,1974 年生,博士,讲师;研究方向:机电动力学;联系人,E-mail: yan_jun11@163.com
(收稿日期:2015-10-29)

$$\begin{cases} S_0 = \frac{S_1 + S_2}{2} \\ \theta = \frac{S_2 - S_1}{2R} \end{cases} \quad (1)$$

其中 S_1 、 S_2 、 S_0 沿着 Y 轴的正方向为正, θ 逆时针为正。

图 2 为成形系统正面组成图。单道次两侧组成部件相同,采用对称结构。辊弯成形,是通过顺序配置的多道次成型轧辊,把卷材、带材等金属板带不断地进行横向弯曲,以制成特定断面型材的金属型材。变截面辊弯成形技术是一种新兴的辊弯成形技术,与传统辊弯成形不同的是,变截面辊弯成形技术通



1. 直线伺服电机; 2. 中心齿轮; 3. 驱动电机;
4. 轧辊机架; 5. 上末端轧辊; 6. 下末端轧辊

图 2 成形系统组成图^[6]

过伺服电机驱动成形轧辊,能够根据设计需求对板料进行辊弯加工,最终生产出沿纵向方向具有连续变化横截面形状的辊弯型材,图 3 所示构件是由变截面辊弯成形系统加工出来的。

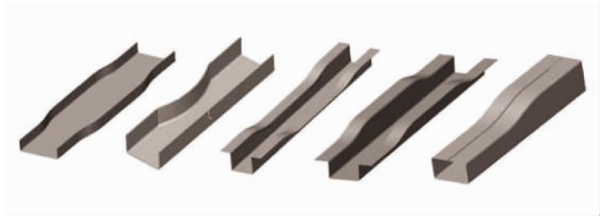


图 3 变截面辊压成形构件

2 正解法分析轧辊末端的运动参数

2.1 轧辊末端运动方程分析

设直线电机 1、2 的运动方程为

$$\begin{cases} S_1 = S_1(t) \\ S_2 = S_2(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中 S_1 、 S_2 沿着 Y 轴的正方向为正,反方向为负。

齿轮中心的运动方程为^[7,8]

$$\begin{cases} S_0(t) = \frac{S_1(t) + S_2(t)}{2} \\ \theta(t) = \frac{S_2(t) - S_1(t)}{2R} \end{cases} \quad (3)$$

其中 S_0 沿着 Y 轴的正方向为正, θ 逆时针方向为正。

图 4 是单侧系统底面坐标示意图。

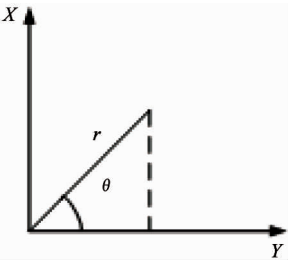


图 4 单侧系统底面坐标示意图

由设备的运动关系可以得出,末端轧辊的运动方程如下:

$$\begin{cases} y(t) = \frac{S_1(t) + S_2(t)}{2} + r \cdot \cos\theta(t) \\ x(t) = v \cdot t + r \cdot \sin\theta(t) \end{cases} \quad (4)$$

把式(3)代入式(4),得到末端轧辊的运动方程:

$$\begin{cases} y(t) = \frac{S_1(t) + S_2(t)}{2} + r \cdot \cos \frac{S_2(t) - S_1(t)}{2R} \\ x(t) = v \cdot t + r \cdot \sin \frac{S_2(t) - S_1(t)}{2R} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 速度方程分析

1、2 号电机动子的速度为

$$\begin{cases} v_1(t) = \frac{dS_1(t)}{dt} = \dot{S}_1 \\ v_2(t) = \frac{dS_2(t)}{dt} = \dot{S}_2 \end{cases} \quad (6)$$

方程(5)对时间 t 求导,即得末端轧辊的速度方程如下:

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{r}{2R} \cdot \cos \frac{S_2 - S_1}{2R} \cdot \dot{S}_2 \\ \quad - \frac{r}{2R} \cdot \cos \frac{S_2 - S_1}{2R} \cdot \dot{S}_1 + v \\ v_y = \frac{dy(t)}{dt} = \left(\frac{1}{2} - \frac{r}{2R} \cdot \sin \frac{S_2 - S_1}{2R} \right) \cdot \dot{S}_2 \\ \quad + \left(\frac{1}{2} + \frac{r}{2R} \cdot \sin \frac{S_2 - S_1}{2R} \right) \cdot \dot{S}_1 \end{cases} \quad (7)$$

当 $v_2 = 50$ (mm/s), v_1 分别为 60, 70, 80, 90, 100 (mm/s) 时, 图 5 给出了末端轧辊 X 方向速度随时间的变化。图 6 显示了末端轧辊 Y 轴方向速度随时间的变化。从图 5 和图 6 可以看出, 1、2 号电机速度的大小, 对轧辊末端的 X 、 Y 轴方向的速度影响都非常大。

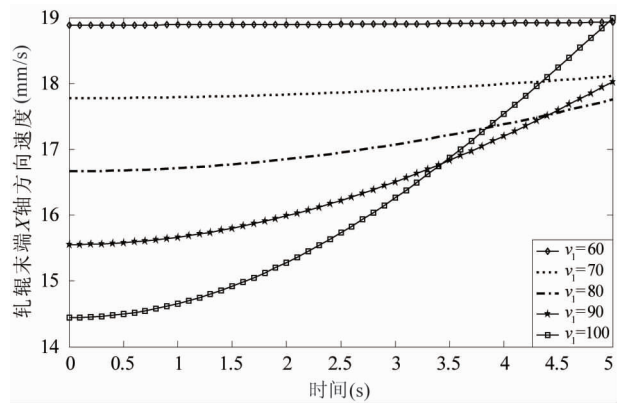


图 5 轧辊 X 轴方向的速度图

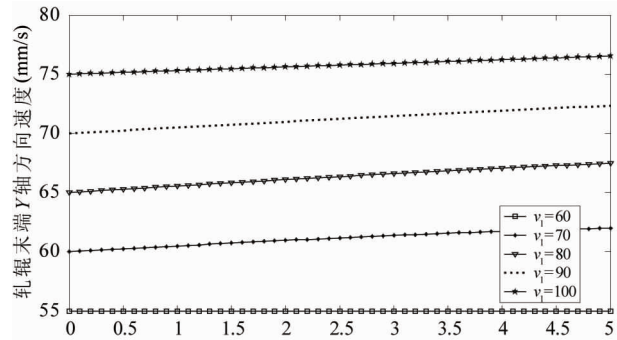


图 6 轧辊 Y 轴方向的速度图

2.3 加速度分析

1、2 号直线电机的加速度为

$$\begin{cases} a_1(t) = \frac{d[v_1(t)]}{dt} = \frac{d^2 S_1(t)}{dt^2} = \ddot{S}_1 \\ a_2(t) = \frac{d[v_2(t)]}{dt} = \frac{d^2 S_2(t)}{dt^2} = \ddot{S}_2 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)对 t 求导, 可得末端轧辊的加速度方程如下:

$$\begin{cases} a_x(t) = -\frac{r}{4R^2} \cdot (\dot{S}_2 - \dot{S}_1)^2 \cdot \sin \frac{S_2 - S_1}{2R} \\ \quad + \frac{r}{2R} \cdot \cos \frac{S_2 - S_1}{2R} \cdot (\ddot{S}_2 - \ddot{S}_1) \\ a_y(t) = \frac{1}{2} \cdot (\ddot{S}_2 + \ddot{S}_1) - \frac{r}{4R^2} \cdot \cos \frac{S_2 - S_1}{2R} \\ \quad \cdot (\dot{S}_2 - \dot{S}_1)^2 - \frac{r}{2R} \cdot \sin \frac{S_2 - S_1}{2R} \cdot (\ddot{S}_2 - \ddot{S}_1) \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 末端轧辊的加速度是直线电机的加速度、速度以及位移的函数, 因此直线电机的加速度和速度的波动对轧辊加速度的波动有很大影响, 因而对被加工件的受力、质量有很大影响。当 $a_2 = 5$ (mm/s²), $a_1 = 1, 2, 3, 4$ (mm/s²) 时, 末端轧辊 X 轴方向上的加速度随时间变化如图 7 所示, 末

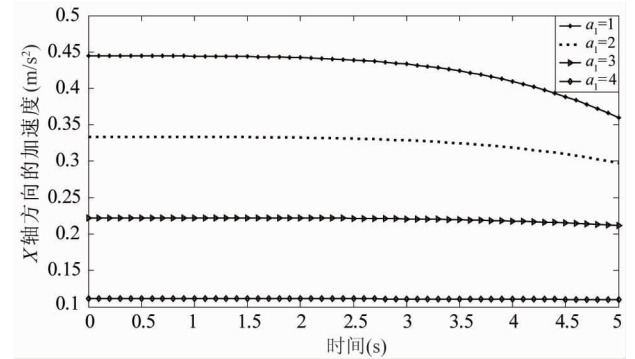


图 7 轧辊 X 轴方向的加速度图

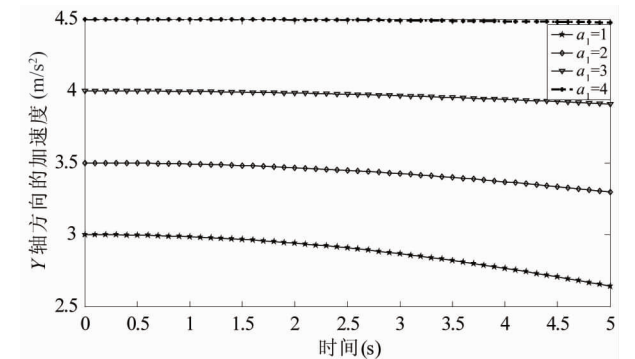


图 8 轧辊 Y 轴方向的加速度图

端轧辊 Y 轴方向上的加速度随时间变化如图 8 所示。从图 7 和图 8 可以看出 1,2 号电机加速度的大小,对轧辊末端的 X 轴、 Y 轴方向的加速度影响很大。

3 结构参数 r 对轧辊末端运动参数的影响

3.1 速度分析

当 $v_1 = 100 \text{ (mm/s)}$, $v_2 = 50 \text{ (mm/s)}$, $R = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm/s}$ 时,式(7)改写为

$$\begin{cases} v_x = 20 + \frac{5r}{18} \cdot \cos \frac{S_1 - S_2}{180} \\ v_y = 75 - \frac{5r}{18} \cdot \sin \frac{S_1 - S_2}{180} \end{cases} \quad (10)$$

当其他条件都相同时,在不同的 r 下,末端轧辊 X 轴方向速度随时间的变化如图 9 所示。从图 9 中可以看出,对于不同的参数 r ,末端轧辊 X 轴方向的速度变化是不一样的, r 越大,末端轧辊 X 轴方向的速度越大。当 $r = 0$ 时,末端轧辊 X 轴方向的速度变化最小,为常数,此时末端轧辊 X 轴方向的加速度为零。

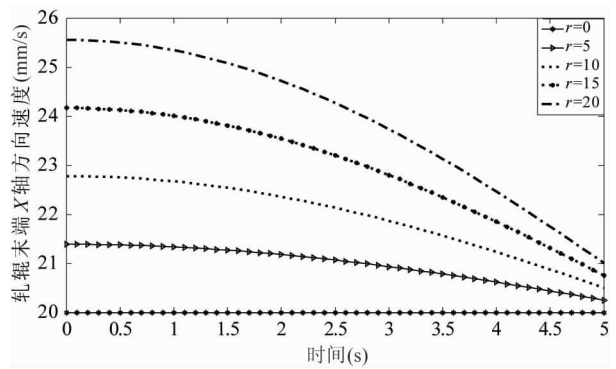


图 9 轧辊 X 轴方向的速度图

图 10 是其他条件都相同的情况下,末端轧辊 Y 轴方向速度在不同 r 时随时间的变化图。从图 10 中可以看出,参数 r 值不同,末端轧辊 Y 轴方向的速度变化是不一样的, r 越大,末端轧辊 Y 轴方向的速度越小。当 $r = 0$ 时,末端轧辊 Y 轴方向的速度最大,为常数。此时的加速度为零,也就是说 $r = 0$,是该装备系统的末端轧辊 Y 轴方向加速度最小。

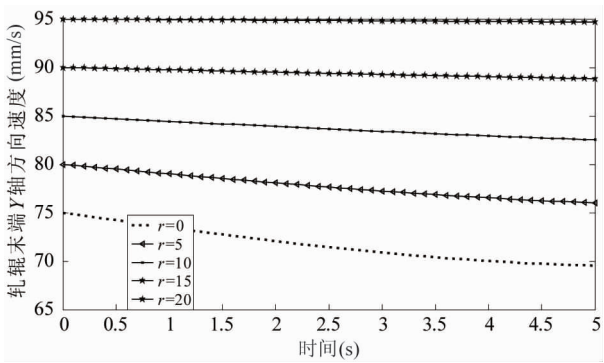


图 10 轧辊 Y 轴方向的速度图

从图 9 和图 10 可以看出,当 $r = 0$ 时,末端轧辊在 X 轴方向和 Y 轴方向的速度都为常数,此时两个方向的加速度都为零,应该是一个最优状态。

3.2 加速度分析

$a_1 = 5 \text{ (mm/s}^2\text{)}$, $a_2 = 1 \text{ (mm/s}^2\text{)}$, $R = 90\text{mm}$ 时,式(9)可改写为

$$\begin{cases} a_x(t) = -\frac{r}{4R^2} \cdot [v_1(t) - v_2(t)]^2 \cdot \sin \frac{S_1(t) - S_2(t)}{2R} + \frac{2r}{R} \cdot \cos \frac{S_1(t) - S_2(t)}{2R} \\ a_y(t) = 3 - \frac{r}{4R^2} \cdot \cos \frac{S_1 - S_2}{2R} \cdot [v_1(t) - v_2(t)]^2 - \frac{2r}{R} \cdot \sin \frac{S_1(t) - S_2(t)}{2R} \end{cases} \quad (11)$$

图 11 是 $r = 0, 5, 10, 15, 20$ 时,末端轧辊在 X 轴上的加速度随时间的变化图。从图 11 中可以看出,随着 r 的增大,轧辊末端在 X 轴方向上的加速度在增大。当 $r = 0$ 时 X 轴方向的加速度为零。

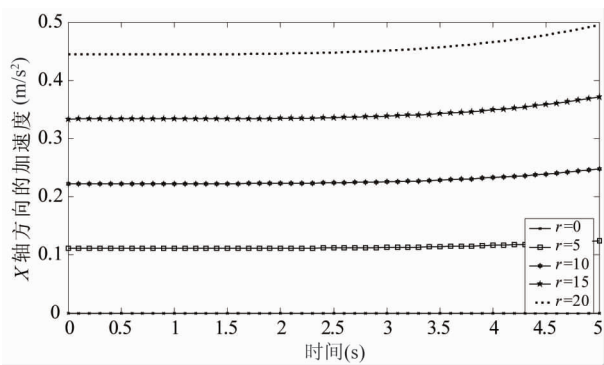


图 11 轧辊 X 轴方向的加速度图

当 $r = 0$ 时, Y 轴方向的加速度为常数。从图 8、9、10 可以看出, 当 $r = 0$ 时, 系统的速度、加速度达到最优。

4 板材速度 v 分析 (正解法)

当 $r = 0$ 时, 末端轧辊的运动规律与大齿轮中心的运动规律完全一致, 如下式所示:

$$\begin{cases} v_x = v \\ v_y = \frac{1}{2}(\dot{S}_1 + \dot{S}_2) \end{cases} \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 板材速度 v 对末端轧辊 X 轴方向的速度有影响, 而对轧辊末端 Y 轴方向的速度没有影响。

轧辊末端的加速度如下式所示:

$$\begin{cases} a_x(t) = 0 \\ a_y(t) = \frac{1}{2}(\ddot{S}_1 + \ddot{S}_2) \end{cases} \quad (13)$$

从式(13)可以看出, 板材速度 v 对末端轧辊的加速度没有影响。

5 结 论

(1) 1 号、2 号电机的速度、加速度的变化对末端轧辊的速度、加速度的变化有很大影响, 末端轧辊运动参数的变化对整个系统在生产过程中噪音、稳定性都有非常大的影响。

(2) 机构参数 r 的变化对轧辊末端的速度、加速度影响很大, 设计时应考虑该参数。当 $r = 0$ 时, 末

端轧辊的运动参数达到最优值。

(3) 在 $r = 0$ 的条件下, 板材的运动速度 v 对末端轧辊 Y 轴方向的速度、加速度没有影响。

参考文献

- [1] 王毅. 机械系统动力学的虚实混合仿真建模方法研究 [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学电子信息学院, 2007. 1-30
- [2] Bouachari A, Tebbikh H. Kinematics of a grasping articulated mechanical hand. *Mechanika*, 2013, 19(2): 197-203
- [3] Matyukhin V I. The control of a wheeled mechanical system. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2007, 71(2): 208-220
- [4] Yan J, Li Q, Wu J X. Electromechanical Dynamics Analysis and Simulation on Roll-Forming Equipment Based on Linear Motor. *International Journal of Modelling and Simulation*, 2014, 34(3): 126-133
- [5] 闫军, 李强, 武建新. 变截面辊弯成型装备的机电动力学分析及其系统控制仿真. *机械设计与制造*, 2014, 4: 79-83
- [6] 高金凤. 热辊弯成形的热力耦合有限元分析: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学机电工程学院, 2013. 1-50
- [7] 阳振峰. 高强钢三维辊弯成形生产线样机机械系统动力学分析: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学机电工程学院, 2013. 10-30
- [8] 管延智. 高强钢三维变截面辊弯成形机理与运动控制研究: [博士学位论文]. 北京: 北方工业大学机电工程学院, 2014. 1-30

Motion analysis of a system for a rollforming with one-side variable cross-section

Yan Jun^{*}, Li Qiang^{**}, Zhou Zhixia^{***}

(^{*} College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051)

(^{**} College of Mechanical and Material Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144)

(^{***} College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051)

Abstract

The motion of a system driven by a linear motor for a rollforming with one-side variable cross-section is analyzed. With the forward kinematics, the influences of the motor parameters on the displacement, velocity and acceleration of the roll at the end are analyzed, and corresponding motion equations are established. By using the Matlab language, the variable curves of the motion parameters of the roll at the end are depicted. The influences of the motor's variable motion parameters on the velocity and acceleration of the roll at the end are analyzed by comparing the curves. The influences of the corresponding variable structural parameters on the displacement, velocity and acceleration of the roll at the end are discussed.

Key words: rollforming, motion analysis, forward kinematics, motion equations