

自动切管机刀具伺服进给曲线优化分析

朱纪刚, 李 丽

(中国重型机械研究院股份公司, 陕西 西安 710018)

摘要:介绍了钢管切管主要工艺, 钢管固定, 刀具旋转并进给的切削方式有很大的优越性。分析这种切管机刀具进给传动的机械结构, 阐述了切管机一个切割周期的三个工作阶段, 建立模型并计算得出刀具位移与进给伺服油缸位移之间的函数关系。通过计算机编程得到大量位移数据, 描绘出位移关系曲线和速度变化曲线。采用曲线拟合方法对速度曲线进行模拟优化, 最终得出了实际可用的速度函数用于伺服控制器中, 取得了良好的效果。

关键词:切管机; 刀具; 进给速度; 进给曲线; 曲线拟合

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2023.2.52.55

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization Analysis of Turning Tool Servo Feed Curve of Automatic Pipe Cutting Machine

ZHU Jigang, LI Li

(China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Described here in the article are the main steel pipe-cutting processes, and the significant advantages of the cutting process featuring steel pipe-fixing, and tool turning and feeding. The mechanical structure of the said cutting machine's tool feeding drive system is analyzed. And the three working stages of one single cutting cycle of the cutting machine are elaborated, and relevant model is set up. And the displacement functional relationship between the tool and the feed servo cylinder is calculated with the model. A great amount of displacement data are obtained by the computer programming, and the displacement relationship curve and speed change curve are described. The speed curve is simulated and optimized with the curve fitting method. Finally, the actually applicable speed function is obtained, and is used in the servo controller, resulting in excellent effect.

Key words: pipe cutting machine; cutting tool; feed speed; feed curve; curve fitting

连续生产中较多采用车削的切管方式。车削有两种方式:一种是钢管旋转,刀具进给;另外一种为钢管固定,刀具旋转并进给^[1-6]。第一种方式类似于车床,由于钢管需要旋转,对台架要求较高,转动惯量大,启停需要时间长,不适合于快速连续生产。第二种方式为钢管被夹具夹持固定不动,切管机刀盘边旋转边进给,刀盘上可以安装多组刀片,因此生产效率较高,以美国PMC公司生产的切管机为代表^[1]。其优点转动惯量小,生产节奏快,特别适合比较长、质量大的钢管,在实际生产中应用

效果很好。目前设备已经国产化,广泛应用于钢管生产中。这种切管机刀具进给一般是采用伺服油缸或伺服电机驱动,在切割过程中平稳高效的进给就成为影响切割质量与工作节奏的主要问题。本文就以这种切管方式为研究对象,分析刀具伺服进给过程并给出合理的进给曲线。

1 切管进给结构模型

切管机刀具旋转切管原理如图1所示,刀具从初始位置边旋转边向下运动切断钢管壁厚后继续过切一段,然后退回到起始位置。 s_1 是刀具距离钢管外表面初始距离, s 为钢管壁厚, s_3 是过切距离。切割过程为:刀具位于初始距离 s_1 ,刀盘旋转,刀

朱纪刚(1975-),男,硕士,高级工程师,从事冶金设备设计研发工作

具向下快速运动(快进),到距离钢管表面 s_2 的时候停止快进,转换为慢速进给(工进),切入管壁中,走完壁厚 s 后继续工进到离开钢管内表面 s_3 处停止工进,然后快速回退到起始位置。

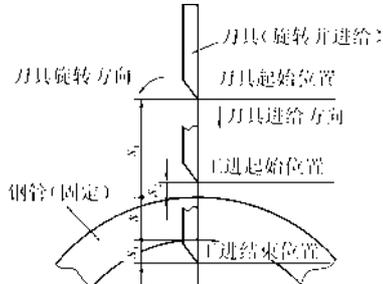


图1 刀具旋转切管原理示意

在刀具运行过程中,涉及到了三个部分:快进、工进、快退。在快进、快退过程中刀具不参与切割,所以其运行速度变化并不重要,只要快速到达指定位置就行。在工进过程中,刀具运行应该保存平稳匀速,这就需要在工进过程中合理分析其传动结构,在保证刀具匀速进给的要求下确定伺服进给机构的时间-位置关系,即确定相应的进给曲线,这是本文研究的重点。

2 切管机进给传动模型

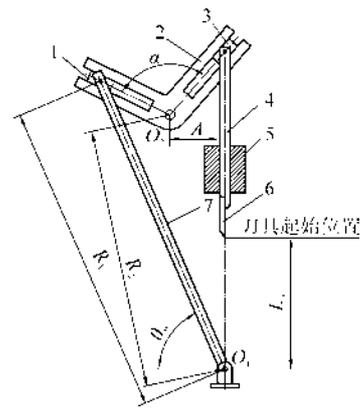
由于刀具是在刀盘高速旋转中实现径向运动,伺服驱动到刀具之间的传动机构比较复杂。为了更好地说明传动关系,将刀盘上的传动机构单独建立模型,刀具传动如图2所示。摇臂一端可以围绕固定点 O_1 旋转,另一端与滑块1铰接,其长度为 R_1 ,初始水平角度为 θ_0 。连接块可以围绕固定点 O_2 旋转,其上开有两个成 α 角度的滑槽。滑块1和滑块2分别在两个滑槽中滑动。刀杆一端与滑块2铰接,另一端安装切断刀,可以在固定的刀杆导向座中上下垂直运动。固定点 O_1 、 O_2 距离为 R_2 ,水平距离为 A 。

刀具进给工作过程如图3所示,伺服油缸通过传动机构推动摇臂围绕 O_1 顺时针旋转,摇臂通过滑块1推动连接块围绕 O_2 顺时针旋转,连接块推动滑块2带动刀杆垂直向下运动,实现刀具进给运动。

伺服油缸传动机构中,摇臂转角变化量 $(\theta-\theta_0)$ 与伺服油缸行程 y 成正比,如公式(1)所示:

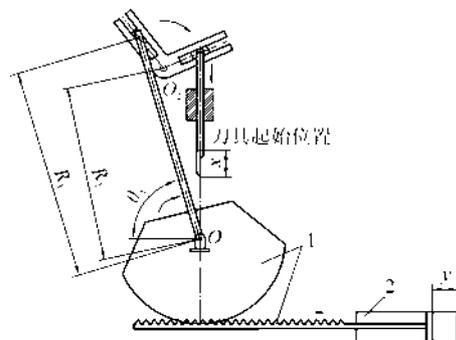
$$\theta = ky + \theta_0 \quad (1)$$

式中 k ——比例系数,rad/mm。



1—滑块1 2—连接块 3—滑块2 4—刀杆
5—刀杆导向座 6—切断刀 7—摇臂

图2 刀具传动示意



1—传动机构 2—伺服油缸

图3 刀具进给工作过程示意

公式(1)中比例系数 k 与设备具体结构有关,对某尺寸确定的切管机 k 是一个常数。

如图3所示,伺服油缸伸出长度 y ,将导致摇臂转角从 θ_0 变为 θ_1 ,根据公式(1),此时:

$$\theta_1 = ky + \theta_0 \quad (2)$$

摇臂转角变化通过传动机构推动刀杆产生径向进给行程 x 。 x 与 y 是一一对应的关系。这样就确定了油缸行程 y 与刀具进给之间的函数关系:

$$x = f(y) \quad (3)$$

$$\text{令 } x_0 = A \tan\left(\pi - \alpha - \arctan \frac{R_1 \sin \theta_0 - \sqrt{R_2^2 - A^2}}{R_1 \cos \theta_0 - A}\right),$$

由图2~3中的几何关系和上述公式可得:

$$x = x_0 - A \tan\left[\pi - \alpha - \arctan \frac{R_1 \sin(ky + \theta_0) - \sqrt{R_2^2 - A^2}}{R_1 \cos(ky + \theta_0) - A}\right] \quad (4)$$

x_0 为刀具初始位置,为一个常数,与切管机结构尺寸有关。公式(4)就是公式(3)的函数关系式。

在实际生产中,为了保证平稳切削,希望工进时进给量保持一定,这就要求刀杆进给速度维持不变。为了满足这一要求,就要从驱动端来分析,伺服油缸应该按照什么样的曲线运动才能保证刀杆匀速直线径向进给。

为了解决该问题,对公式(3)求反函数,即假设刀具侧为主动,得到进给量 x 与油缸行程 y 的关系:

$$y=g(x) \quad (5)$$

这个反函数的结果非常复杂,实际计算中,一般采用计算机编程方法来获取指定位移区间的数值结果,并将结果输入油缸伺服控制器中产生相应的位移信号来驱动油缸按照预定的进给曲线工作。

工进过程中,刀具进给保持匀速运动,则:

$$x=vt \quad (6)$$

式中 v —— 刀具工进速度, mm/s;

t —— 工进时间, s。

将公式(6)代入公式(5)并将位移 y 对时间 t 求导得出伺服油缸的进给速度:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dg(vt)}{dt} \quad (7)$$

由于刀具进给速度 v 是常数,因此公式(7)可以转换为:

$$v_j = \frac{dy}{dt} = v \frac{dg(t)}{dt} \quad (8)$$

式中 v_j —— 油缸工进速度, mm/s。

3 实例计算

对某设备实际计算,其伺服进给部分结构尺寸见表 1。

表 1 刀具伺服进给的主要结构参数

R_1/mm	R_2/mm	A/mm	θ_0/rad	α/rad	$k/(\text{rad}\cdot\text{mm}^{-1})$
323	268	56	1.17	1.82	0.007 9

工进速度 $v=0.87$ mm/s, 刀具以步长 0.1 mm 进给量来计算油缸行程,通过计算机编程计算出每个刀具固定行程对应的油缸行程,绘出刀具行程—油缸行程曲线,如图 4 所示。

图 4 看似一条直线,但从微观看是非线性的。为了看出区别,利用计算机软件绘制油缸进给速度曲线如图 5 所示。

图 5 所示油缸进给速度曲线就是公式(7)计算

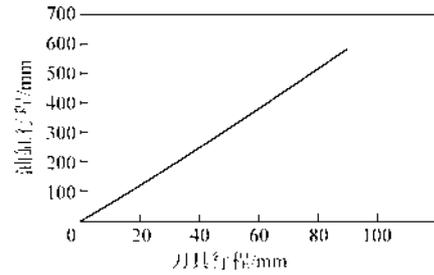


图 4 刀具—油缸行程曲线

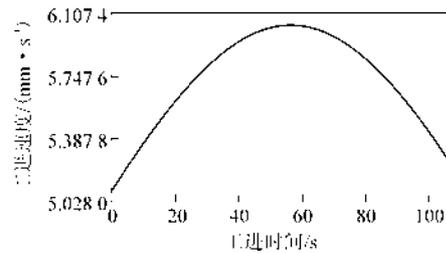


图 5 油缸进给速度曲线

出的曲线。实际生产中,为了保证刀具平稳切削,油缸的实际进给曲线应该与这个曲线对应。

4 进给曲线优化

虽然用计算机编程描点法绘制出了实际的工进曲线,但是生产中应用却很不方便。因为这个函数的精确解析式不容易直接求得,每次要先计算大量数据点,再输入伺服控制器中才能形成伺服工进动作,这个过程比较复杂。因此需要对这个曲线进行模拟优化。

为了简化问题,在该行程区间选择三个点,两个低点一个高点,代入抛物线公式中联立方程组可以求得三个系数 a 、 b 、 c ,即可用二次函数来拟合实际的速度曲线。该函数的表达式为:

$$v_j = -0.000\ 309\ 806t^2 + 0.034\ 573t + 5.070\ 864\ 86 \quad (9)$$

其对应的油缸进给速度曲线如图 6 所示,可以看成,与图 5 是高度一致的。通过计算机编程数据与步进计算选择点相比较,最大误差不超过 0.5%,实际生产中就可以用公式(9)来代替公式(8),将解析式输入伺服控制器,自动生成目标函数的速度曲线来完成切割过程。在生产实践中也取得了良好的效果。值得注意的是,这种曲线拟合仅仅只模拟了目标曲线的一段,只在所选定的进给量范围内适用,超过所选范围则无意义。

上面这些分析只针对了进给过程进行计算,一

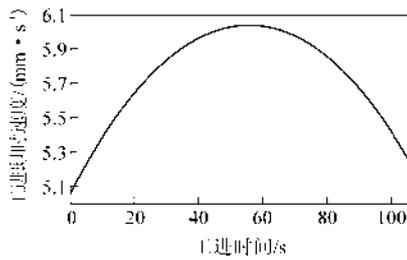


图6 拟合后的油缸进给速度曲线

个完整的切割周期还包括快进和快退过程。但是这两个过程刀具不参与切割,为空行程。为提高生产效率,这两个时间尽量短,在伺服驱动器允许的范围内采用较大的速度快速到达工进起始位置和回到原始位置即可。

一个切割周期内的完整刀具位移如图7所示,其中从 t_1 到 t_2 时刻为刀具工进过程,按照要求要保持匀速运动,这段应为直线;从0到 t_1 , t_2 到 t_3 这两个阶段不参与切割,其曲线可以任意给定,不一定要保证匀速运动,快速到达指定位置即可。

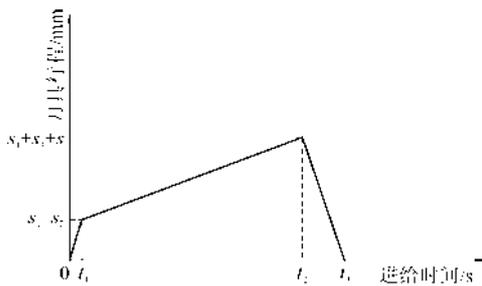


图7 刀具位移示意

5 应用

基于以上的计算方法对宝山钢铁股份有限公司无缝钢管厂的 $\Phi 194$ mm 数控接箍切管机进行了进给曲线优化,该设备主要应用于油井管接箍下料,供车丝机使用。该设备对切断效率和端面质量要求比较高,其主要工艺参数见表2,刀具进给部分结构尺寸见表3。

表2 切管机设备主要工艺参数

钢管直径/ mm	钢管壁厚/ mm	平均产量/ (支·h ⁻¹)	最大进 给量/mm	刀具 数量/把	刀盘转速/ (r·min ⁻¹)
89~195	6~25	120	39	3	150~450

表3 切管机刀具进给的主要结构参数

R_1 /mm	R_2 /mm	A /mm	θ_0 /rad	α /rad	k /(rad·mm ⁻¹)
430	340	90	1.3	1.69	0.004 86

该设备采用伺服油缸进行刀具进给,计算机编程方法取得油缸行程与刀具行程的对照表,按照前面的方法通过曲线拟合计算,得到油缸工进速度与时间函数表达式如下:

$$v_f = -0.000\ 187\ 4t^2 + 0.013\ 353t + 4.773\ 09 \quad (10)$$

将该函数应用于伺服油缸控制器中,控制刀具进给,切割过程均匀平稳端面无波纹,同时也提高了刀具的使用寿命,应用多年来取得了良好的效果。

6 结 语

综合上面的分析,这种钢管不动,刀具旋转并进给的工作方式有震动小,转动惯量小,适应范围广等优点。切管机在切割过程中,工进速度应保持均匀。由于其特别设计的机械结构导致进给是非线性的,所以在油缸驱动侧要按照特定的速度曲线进给,才能保证刀具匀速运动。根据设备的传动尺寸,通过计算机编程方法得到油缸行程与刀具行程的对应关系,进而可以描点得出位移曲线和对应的速度曲线。为了控制方便,采用了曲线拟合方法来简化这个曲线,将得出的具体解析式输入伺服控制器即可方便地走出所要求的进给曲线。

7 参考文献

- [1] 张居勤. 美国 PMC 公司管加工机床的技术特点[J]. 焊管, 1997, 20(1): 25-31.
- [2] 刘华仁. 切管机切断刀杆的国产化设计[J]. 金属加工(冷加工), 2012(7): 65-66.
- [3] 陈韦名. 曲线拟合原理及其应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- [4] 晁代坤, 孟红莉, 孟红文. Q1114 高效切管机组 PLC 程序优化及触摸感应操作系统的开发[J]. 钢管, 2000, 29(4): 15-16.
- [5] 王仁波. GXQG—168 高效切管机进给控制系统简介[J]. 钢管, 2001, 30(5): 38-42.
- [6] 冯邦良. 高速切管机送进辊道的交流变频改造[J]. 钢管, 2005, 34(2): 39-42.

(收稿日期: 2022-01-11; 修定日期: 2022-02-10)