

大型立式强力数控旋压机控制系统稳定性调节

Stability Regulation in Control System of a Large Strong Vertical NC Spinning Machine

中航工业北京航空制造工程研究所 许翠芳 张 栋

[摘要] 本设备为某大型立式三旋轮强力数控旋压机,采用封闭式整体框架结构,以加工薄壁筒形件为主。毛坯材料为超高强度钢、不锈钢和有色金属,设计要求旋轮座径向最大推力 500kN/轮,轴向最大推力 333kN/轮,机床轴向坐标行程 1600mm,径向和轴向定位精度分别为 0.02mm 和 0.04mm。设备旋压吨位大、行程长、位置精度高,控制系统采用数控系统控制液压驱动的全闭环控制模式。本文论述了采用 Siemens 840D 数控系统和西门子液压驱动模块控制高频响比例伺服阀,驱动非对称液压油缸的大型立式旋压机系统稳定性的调节。

关键词: 旋压机 全位置闭环液压驱动 稳定性

[ABSTRACT] This equipment is a large vertical three-roller powerful CNC spinning machines. It uses closed solid frame structure, consisting mainly processing thin wall barrel structure. Rough materias are ultra-high strength steel, stainless steel and nonferrous metals. Design requirement is that the radial maximum thrust of rotating wheel seal is 500kN/wheel, the axial maximum thrust is 333kN/wheel. The axial coordinate stroke of the machine is 1600mm. The radial and axial positioning accuracies are 0.02mm and 0.04mm. Large tonnage, length stroke, high position precision are the characteristics of the spinning machine. The control system uses the full closed loop control mode hydraulically driven by CNC system in the control system. This article discusses the proportional servo valves of the high frequency response controlled by Siemens 840D CNC system and Siemens hydraulic driven module are used to adjust the stability driven by the asymmetric hydraulic cylinder in large vertical spinning machine.

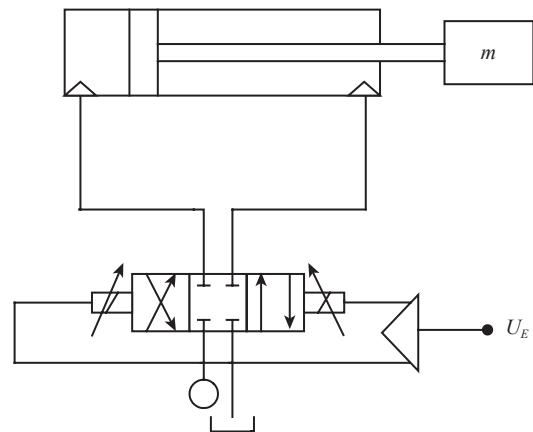
Keywords: Spinning machine All-position closed-loop hydraulic driving Stability

大型立式三旋轮强力数控旋压机采用封闭式整体框架结构,3个横向坐标采用空间 120° 独立分布的可独立也可同步驱动的方式,3个纵向坐标采用直接刚性连接的空间分布为 120° 的整体同步驱动方式,以产生相

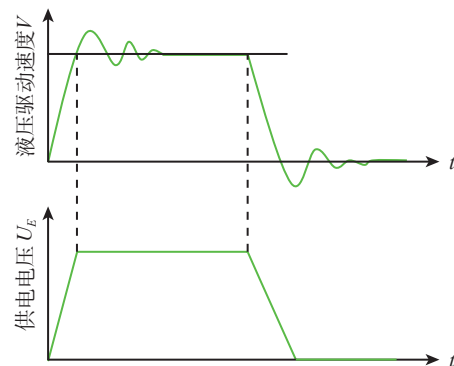
应的驱动扭矩与旋压力,满足大型立式强力数控旋压设备大推力、大扭矩、大缓冲力的特点。技术要求大型旋压机的静态精度和动态精度非常高,纵向坐标运动精确同步,横向坐标运动精确同步,主轴旋转无偏摆,旋压力与位置控制密切配合。

根据大型立式旋压机的结构特点、技术参数和精度要求,电气控制系统采用西门子 SINUMERIK 840D 数控系统和西门子 HLA 电液伺服驱动模块,执行元件采用高频响电液伺服阀和非对称伺服油缸,采用光栅尺作为位置反馈元件,构成全数字液压位置闭环控制系统。

如图 1 所示,由于存在液压油的弹性模量和液压油的张力,液压驱动不同于伺服电机,其动态响应远远低



(a) 液压驱动连接示意图



(b) 液压驱动动态响应曲线

图1 液压驱动闭环控制的跟随性能

Fig.1 Following performance of the hydraulic driving closed-loop control

于液压伺服控制器及数控系统,特别是起动、停止、换向及快速运动时,其跟随性能是很差的。旋压设备液压伺服控制技术的难点在于驱动油缸的位置随动误差和同步误差大,高速运动时动态响应特性差,这些问题往往会造成系统运行不稳,影响加工质量,甚至造成设备的损坏,因此控制系统的稳定性调节是旋压设备调试中十分重要的环节。

1 大型立式数控旋压机液压伺服驱动稳定性控制

1.1 液压驱动的自然(固有)频率

系统的动态响应取决于伺服阀的固有频率和液压驱动的自然频率,如图2所示,液压油缸和负载组成的液压驱动系统的自然频率计算公式如下:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{EA_k}{mL_{\max}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_x/L_{\max}} + \frac{\alpha}{1-L_x/L_{\max}}}, \quad (1)$$

式中, ω 为液压驱动的自然频率; E 为弹性系数; A_k 为活塞面积(m^2); α 为面积比(A_k/A_r), A_r 为活塞环形面积(m^2); m 为驱动质量(kg); L_x 为活塞位置(m); L_{\max} 为油缸的长度(m)。

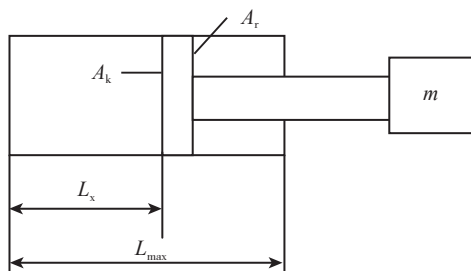


图2 液压驱动构成示意图

Fig.2 Structure diagram of hydraulic driving

在计算液压驱动自然频率时,弹性系数是一个很重要而又难确定的量,如果能保证油液中不混入空气,可取 $E=1400\text{MPa}$,但这是很难做到的,一般取 $E=700\text{MPa}$,便可得到满意的结果。

以横向液压驱动系统为例计算结果如下:

弹性系数: $E=700\text{MPa}$;

液压缸活塞直径: 230mm ;

液压缸活塞杆直径: 160mm ;

液压缸行程: $L_x=700\text{mm}$;

驱动质量: $m=3700\text{kg}$;

液压缸无杆腔面积: $A_k=41548\text{mm}^2$;

液压缸有杆腔环形面积: $A_r=21442\text{mm}^2$;

面积比: $\alpha = \frac{A_k}{A_r} = \frac{41548}{21442} = 1.9377$;

最低频率位置: $x_{\min}=407\text{mm}$;

最低频率: $\omega_{\min}=182\text{rad/s}$ 。

伺服阀的固有频率 280Hz 。横向液压系统固有频率可用下式计算:

$$f = \frac{\omega \cdot \omega_V}{\omega + \omega_V}, \quad (2)$$

式中, ω_V 为伺服阀的频率, Hz 。系统最低固有频率为 163rad/s ,则有:

$$f_{\min} = \frac{163}{2\pi} = 26\text{Hz}。$$

为了更进一步说明活塞位置对液压油缸的响应频率的影响,以 L_x/L_{\max} 为横坐标,以 f/f_{\min} 为纵坐标(这一纵坐标也相当于液压油缸的角频率之比),当面积比为 $\alpha=0.5$ 时,作图得到横向液压系统固有频率曲线如图3所示。

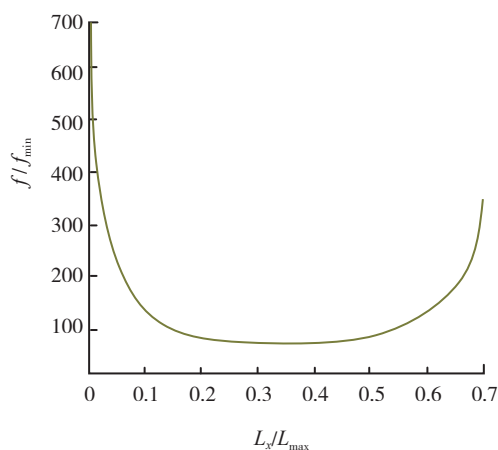


图3 横向液压系统综合固有频率

Fig.3 Natural frequency of the horizontal hydraulic system

从图3可看出,驱动自然频率是位置的函数,当在液压油缸两端的限位位置附近时,其角频率变化非常快,为了得到更好的控制品质,在调试过程中,以理论计算为依据,根据活塞在油缸中所处的位置并针对不同的运动方式,进行参数的匹配与协调,改进系统响应频率和响应时间,使油缸在闭环系统控制下稳定运行。

1.2 坐标运动的方向与变速协调控制(基于控制方向的协调)

非对称液压油缸的活塞在液压油缸两端极限位置所对应的自然频率是不对称的,会导致设定速度相等时活塞进出油缸的速度不等或活塞的实际速度与设定速度不等,使系统产生额外的轮廓误差和随动误差,导致系统振荡。因此要进行基于控制方向的调整使设定速度相同时活塞进出油缸的实际速度相等并尽可能与设定速度曲线重合。

控制系统增益由驱动模型计算得出,与系统的工作压力成正比,是速度控制器增益的参考值,对控制系统

增益、正向区域自适应因数、负向区域自适应因数进行协调,如图4所示在速度闭环的情况下进行基于控制方向的调整。

图4中,纵轴 V 表示运动速度;横轴 t 表示时间; V_{set} 表示伺服系统速度指令值; V_{act} 表示直线液压伺服驱动的实际速度值; Δ_1 表示正向运动时直线液压伺服驱动的实际速度值与系统速度指令值的误差; Δ_2 表示负向运动时直线液压伺服驱动的实际速度值与系统速度

指令值的误差。

图4(a)所示是未经调整的伺服速度特性曲线,正向和反向的实际速度曲线与系统速度指令值曲线存在一定的偏差。在本例中正反向的实际速度都小于系统速度指令值,因此要提高控制系统增益。首先按照图4(b)所示,调整系统增益使 Δ_{set} 和 Δ_{act} 曲线在一个方向上重合,再按图4(c)所示,调整正向或负向区域自适应参数使 V_{set} 和 V_{act} 曲线在另一个方向上重合。在不同的设定速度上进行基于控制方向的调整,最终实现直线液压伺服驱动正反向速度一致。

1.3 坐标(油缸)运动的自适应控制

系统的动态响应取决于伺服阀的固有频率和液压驱动的自然频率,要获得优质的控制效果和动态响应特性,伺服阀的固有频率要高于液压驱动的自然频率,以消除高频干扰。

当伺服阀的自然频率大于驱动的自然频率时,速度控制环的比例增益和微分时间必须为正值,也就是说必须得到负反馈。液压驱动的自然频率 f 是活塞相对油缸极限位置 L_x 的函数,最大自然频率的位置在行程的极限位置,最小自然频率的位置大约在行程范围的中间,如图5(c)所示。

由于驱动自然频率是位置的函数,为了得到更好的控制品质在整个行程中应根据驱动自然频率来设定比例增益和微分时间,在活塞零点已校正的前提下进行坐标(油缸)运动的自适应控制。

用控制器模型计算出对应于油缸A、B两端的速度控制环比例和微分环节相应参数,在此基础上开通速度控制器自适应调整使能信号,对速度控制器A端增益、速度控制器增益、速度控制器B端增益、速度控制器A端微分时间、速度控制器微分时间、速度控制器B端微分时间进行协调。调试中发现液压缸A、B两端的比例增益和微分时间常数分别作用于液压缸A、B两端,速度控制器增益和微分时间只作用于液压驱动最小自然

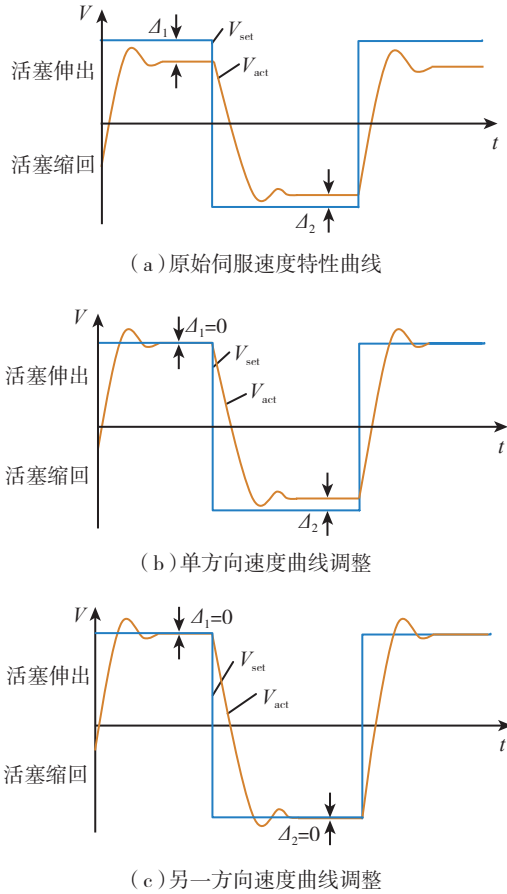


图4 基于控制方向的调整示意图
Fig.4 Adjusting diagram based on the control direction

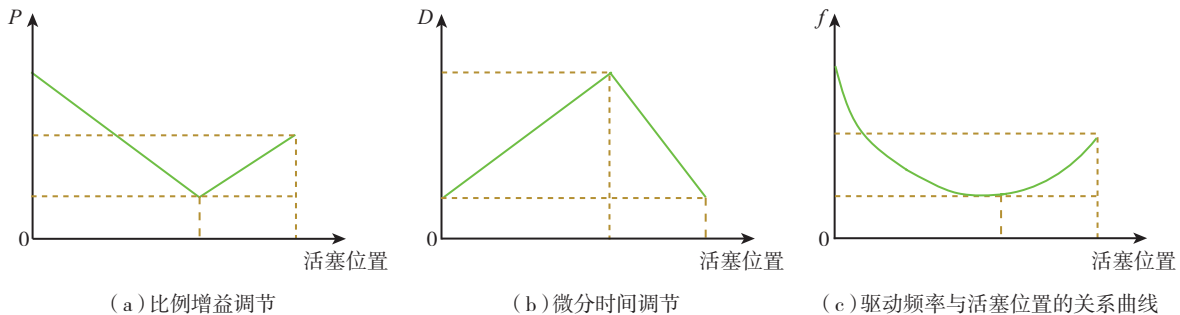
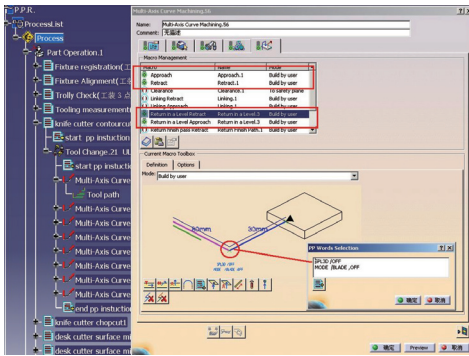
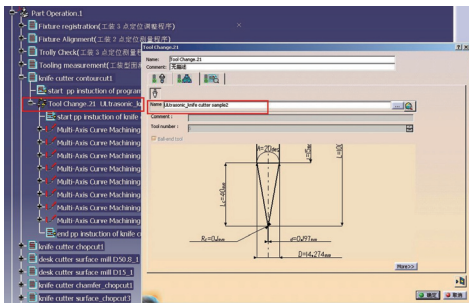


图5 速度控制器自适应调节示意图
Fig.5 Adaptive adjusting diagram of the speed controller

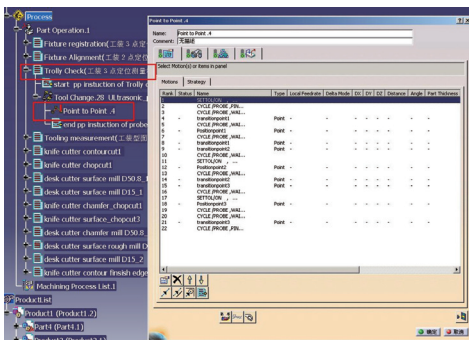
(下转第82页)



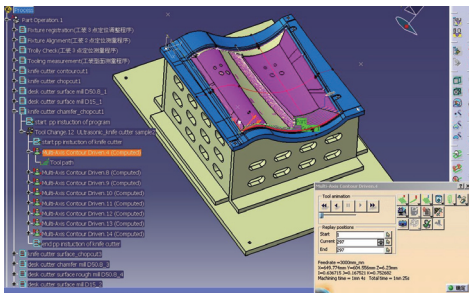
(a) 宏命令调用



(b) 刀具调用



(c) 测量程序编制



(d) 切割程序编制

图3 CATIA V5 中编程定义示意图

Fig.3 Programming definition diagram in CATIA V5

高效的数控编程环境,形成了系统、规范的编程方法,提高了蜂窝加工能力,对其他航空制造企业中引进和消化吸收此先进加工技术具有一定的借鉴作用。

(责编 小城)

(上接第 78 页)

频率的位置。

如图 5 所示为速度控制器自适应调节示意图。其中 P 为直线液压伺服驱动速度控制器比例增益, D 为直线液压伺服驱动速度控制器微分时间, f 为液压驱动的自然频率。图 5 (a)、5 (b)、5 (c) 分别是直线液压伺服驱动速度控制器比例增益、直线液压伺服驱动速度控制器微分时间、液压驱动的自然频率与活塞位置的关系曲线。

按图 5 进行速度控制环 PID 参数的调节:

(1) 比例增益 P 调整。

当伺服阀的固有频率远远高于液压驱动的自然频率时,比例增益 P 的设定值要大于 0。首先去掉 PID 的积分项和微分项,使 PID 为纯比例调节,使系统稳定。在输出无振荡时,由 0 逐渐加大比例增益 P ,直至系统出现振荡;再反过来,把比例增益 P 逐渐减小,直至系统振荡消失,记录此时的比例增益 P ,比例增益 P 为当前值的 60%~70%。

(2) 积分环节 I 调整。

积分环节应用于考虑静摩擦力的情况下,抑制位置控制操作及零速时由静摩擦引起的机床移动。采用比例和积分组合,相当于使系统具有一个含有固定部分和逐渐增大部分的放大倍数,因而既能减小误差,提高响应速度,又不出现振荡。通常利用比例和积分之组合就能使系统性能达到要求。调整积分环节时从高值开始逐渐减小积分时间 T_N 直到找到最佳的折衷。

(3) 微分环节 D 调整。

当伺服阀的固有频率高于液压驱动的自然频率时,设置微分时间 T_V 大于 0,微分环节可抑制控制系统的振荡。大型旋压机多为大惯量负载,可利用微分环节提高系统的响应速度。逐渐加大微分时间 T_V ,直至系统出现振荡;再反过来,把微分时间 T_V 逐渐减小,直至系统振荡消失,记录此时的微分时间 T_V ,设定 T_V 为当前值的 60%~70%。

综上,通过对系统增益及速度控制环的自适应调节,可以有效地抑制液压系统的振荡,系统性能稳定可靠,动态精度和响应速度都有了可靠的保证。

2 结论

本文重点叙述了数控控制的液压驱动的随动速度响应问题、位置闭环随动问题、从控制的角度完成了驱动的稳定性和可靠性问题的协调,同时我们成功地完成了大型立式旋压机的试旋,监控的数据在可控范围之内。

(责编 良辰)