数控系统主轴同步控制的实现与应用

■ 广州数控设备有限公司 （广东 510000） 苏 军

摘要： 在自主研发的数控系统上设计主轴同步控制的方法，通过速度同步调节、相位同步调节和相位监视调节三个阶段的调节，完成主控主轴和从控主轴的同步控制，从而实现工件在旋转过程中的对接和抓取，通过LabVIEW测试分析和机床实际应用，证明设计的控制方法是有效，可用的。

目前机床上同步控制有多种实现方案：有采用单电动机通过锥齿轮等机械结构来同时驱动双边实现同步，但这种方法机械结构复杂，传动效率低，且成本较高；有采用双轴电动机依靠轴的刚性连接来实现同步，但这种方法由于是开环控制，控制精度较差；还有就是采用双轴电动机控制的同时引入位置检测装置，与数控系统组成位置闭环来实现同步控制，这种方法在进给轴同步控制中应用较多，控制量和反馈量都是位置指令。而主轴同步控制（Spindle Synchronous Control）是针对两个伺服主轴在速度方式下同步运行的控制功能，包括回转的速度同步和角度上的相位同步。其控制量始终是转速指令*S*，因此不能简单套用上述方法来实现同步运行。由于主轴同步控制能实现旋转过程中工件的对接、抓取，可一次装夹完成工件两侧的加工，而无需停下来换夹、对刀，因此大大提高了加工效率。目前国外数控系统如FANUC 0*i*—TD，西门子840D等都具有该功能，而国产的主流数控系统却鲜有支持的。本文主要介绍在自主研发的双通道车床数控系统上实现主轴同步控制功能的设计方法，以主控主轴的*S*指令作为同步转速，使从控主轴转速跟随主控主轴，设计速度调节算法调整从控主轴的转速，使两者的转速差在阀值范围内，实现主轴速度同步；然后根据各主轴编码器的反馈位置，设计相位调节算法对主控主轴和从控主轴分别进行加减速控制，调整两者的相位差到参数设置范围内，实现相位同步；最后在取消同步控制之前，对主从控主轴之间的相位差进行监视，并通过相位监视调节算法，使相位差始终在参数允许的范围内。通过LabVIEW测试分析，实验结果与原理设计吻合，在机床上实际应用也能到达预期效果。

设计与实现

1. 功能概述

主轴同步控制是实现主控主轴$Spindle_m$和从控主轴$Spindle_s$同步运行的应用功能，两主轴以同步转速旋转，可在旋转过程中将主控主轴握持的工件改为从控主轴握持；如果是换抓异形工件，要求主控主轴与从控主轴的旋转相位，即旋转角度也必须保持同步。在自主研发的双通道车床数控系统上，这一个功能完全由CNC系统软件来实现。其典型用例如图1所示，将通道1的第一主轴设为主控主轴，通道2的第一主轴设为从控主轴。两个主轴的位置编码器线数相同，且编码器与主轴之间直接连接（或以齿轮或同步带1：1连接）。由于主轴电动机惯量、运动性能的差异；伺服功率器件的差异，以及编码器物理刻线的差异等诸多方面的不同，即使电动机、伺服和编码器完全相同，也不能仅靠输入的转速指令相同去实现主轴转速同步，更不能实现相位的同步，因此实现功能的关键在于CNC软件设计实时调节算法，及时调整转速指令来达到速度同步、相位同步的目的。

CNC系统提供M指令来具体实现主轴同步控制功能：M120指令主轴速度同步开始；M122指令主轴相位同步开始；M121指令主轴速度

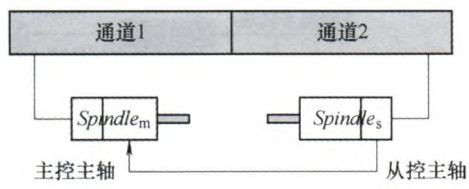


图1 双通道主轴同步典型用例
（主轴对置）

或相位同步结束。CNC系统需设置相关参数：速度同步时速度差阀值Spd_{max}；相位同步时主从控主轴间的相位差阀值$Phase_{max}$；相位同步后相位监视阀值$Monitor_{max}$。

2. 控制时序

主轴同步控制时序如图2所示，主轴同步控制调节流程图如图3所示。

在发出主轴同步控制信号前，$Spindle_m$和$Spindle_s$分别以转速指令S_1和S_2旋转；在执行M120指令后，主轴同步控制信号置位，$Spindle_m$和$Spindle_s$分别向同步速度S进行速度同步调节，当两者的速度差小于Spd_{max}时，则输出速度控制结束信号；在速度同步后，若指令M122，则发出相位同步控制信号，$Spindle_m$和$Spindle_s$通过相位同步调节，当两者的相位差小于$Phase_{max}$时，则输出相位同步控制结束信号，在相位同步调节过程中速度同步结束信号会暂时清除，在相位同步结束后该信号会恢复置位；相位同步后，主控主轴接受CNC控制，从控主轴跟随主控主轴旋转，CNC监视两者相位差，并通过相位监视调节算法保证相位差始终小于$Monitor_{max}$，直到CNC指令M121，两主轴退出同步状态。

3. 调节算法

由同步控制时序图可知，实现主轴同步控制功能关键是三个过程的调节算法：主轴速度同步调节、主轴相位同步调节和相位监视调节。

（1）速度同步调节：进行主轴速度同步时主控主轴和从控主轴的指令转速都为同步转速S，主控主轴仅接收CNC转速指令控制$S_m=S$，从控主轴跟随主轴主轴转速，受同步转速指令和调节增量控制$S_S=S+\Delta S$；其中ΔS由主从主轴实际反馈转速差经过调节系数计算而得，调节系数可由CNC界面输入，根据实际情况适时调整。当主控主轴与从控主轴的转速差小于设定阀值，即$S_m-S_S\leqslant Spd_{max}$时，完成速度同步调节。

（2）相位同步调节：在主轴速度不同后，若要实现异形工件的换抓，则必须是主控主轴与从控主轴的旋转角度要一致，即相位同步。本文设计的调节方法是以线性前加减速控制算法同时对主控主轴和从控主轴的转速进行调节，加减速速度模型如图4所示。在相位调节过程中，主控主轴和从控主轴暂时清除速度同步信号，直到相位同步完成，速度同步信号将恢复置位。

CNC发出主轴相位同步控制信号后，首先获取此时主控主轴和从控主轴编码器的位置差，设为spl，若此时相位差阀值为$Phase_{max}$，则需要调整的相位差值为（$spl-Phase_{max}$），主控主轴和从控主轴相位调整量L相同，则$L=(spl-Phase_{max})/2$；当前主从控主轴的转速都为同步转速S，即$spd_{cur}=S$；调节完成后终点速度也为同步速度，即$spd_{ed}=S$将设置转速设为spd_{set}；加速度设为spd_a；则调节算法可归纳为式（1）。

$$\left.\begin{aligned} t_1&=\frac{spd_{set}-spd_{st}}{spd_a}\\ t_2&=\frac{L-L_1-L_3}{spd_{set}}\\ t_3&=\frac{V_{set}-V_{ed}}{spd_a}\\ L_1&=\frac{(spd_{st}+spd_{set})\cdot t_1}{2}\\ L_3&=\frac{(spd_{set}+spd_{ed})\cdot t_3}{2} \end{aligned}\right\}\quad(1)$$

（3）相位监视调节：完成相位同步后，主从控主轴在旋转过程中由于电动机惯量、负载及运动特

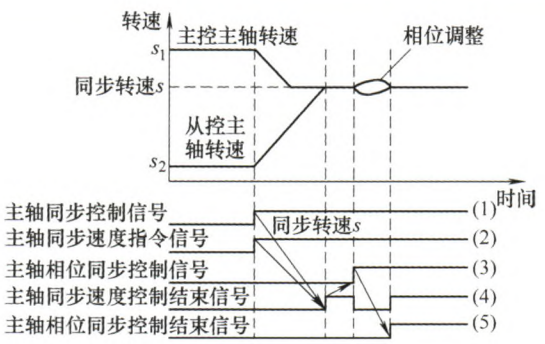


图2　主轴同步控制时序

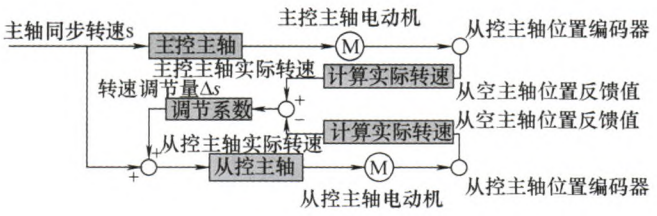


图3　主轴同步控制调节流程图

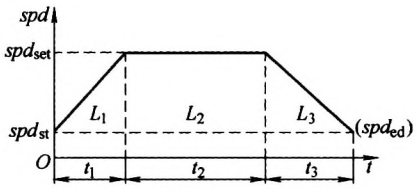


图4　线性前加减速速度模型

性等多方面的原因，会影响两者的实际转速，相位同步会有稍许偏差，而且会累积，因此CNC要监视两者的相位差，并及时进行相位监视调节。此时主控主轴仍仅受控于CNC转速指令，$S_m=S$，主要是调节从控主轴转速，调节算法与图3基本相同，只是调节系数不同，需根据实际现场调试，实现监视过程中确保主控主轴与从控主轴的之间的相位差值不超过设定阀值$Monitor_{max}$，若超过则CNC系统报警，退出主轴同步状态。

测试与应用

在自主研发的双通道车床数控系统上，接两个伺服电动机作为主轴，通道1的主轴设为主控主轴，通道2的主轴设为从控主轴，编码器线数都为2500线，通过LabVIEW采集电动机编码器的反馈值，记录主控主轴和从控主轴同步的过程，并计算同步精度。LabVIEW是目前国际上应用最广的虚拟仪器开发环境之一，主要应用于仪器控制、数据采集、数据分析及数据显示等领域，具有强大的数据可视化分析和仪器控制能力。在数控系统产品开发中已有多年的应用经验，因此对测试数据的采集和分析是可靠、可信的。

1. 测试用例

在CNC系统中编辑G代码程序如下。通道1程序：

N0001 M3 S150　（主控主轴正转150 r/min）

N0002 M100　（路径间等待）

N0003 M120 S100　（速度同步开始，同步转速100 r/min）

N0004 M122　（相位同步开始）

N0005 M30

通道2程序：

N0001 M4 S75　（从控主轴反转75 r/min）

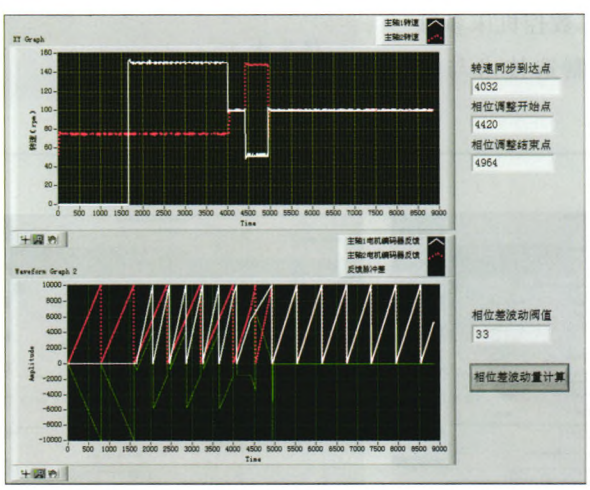
N0002 M100　（路径间等待）

N0003 M30

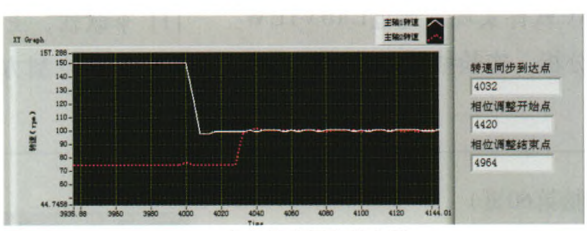
设置参数：Spd_{max}设为2 r/min；$Phase_{max}$设为50脉冲；$Monitor_{max}$设为200脉冲。

2. 测试分析

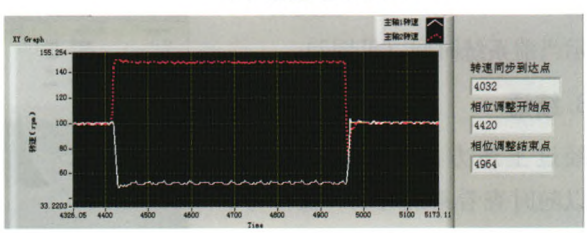
LabVIEW数据分析如图5所示（白色表示主控主轴，红色表示从控主轴）。图5a记录的是执行测试用例的过程，上半部分为速度变化图，下半部分为对应的相位变化图。图5b为速度同步放大图，在此过程中主控主轴由150r/min减速到100r/min，从控主轴由75r/min加速到100r/min，调节转速差小于2r/min后，两者转速基本在100r/min左右。图5c为相位同步放大图，在此过程中，两者有明显的加减速过程，在完成相位调整后（图5a下半部分中绿色表示的相位差基本为0），速度再次回到同步转速100r/min。而后就一直处于相位监视过程中。由此可看出基本与设计原理一致。图5a中记录的相位差波动阀值为33个脉冲，根据脉冲与角度的关系$err=abs(pulse)\times 360.0/(encoder\times 4)$（$pulse$为记录的最大相位波动阀



(a)



(b) 速度同步放大图



(c) 相位同步放大图

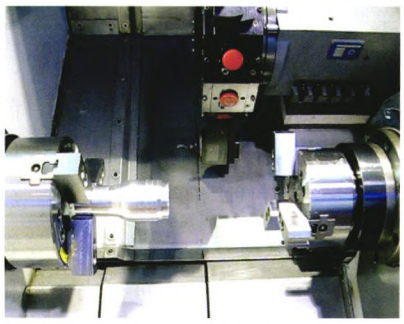
图5　LabVIEW数据分析

值，*encoder*是编码器线数），换算到角度差为$err=abs(33)\times 360.0/(2\,500\times 4)=1.188°$，即相位同步完成后在之后的同步运行中监视到的最大角度偏差时1.188°。

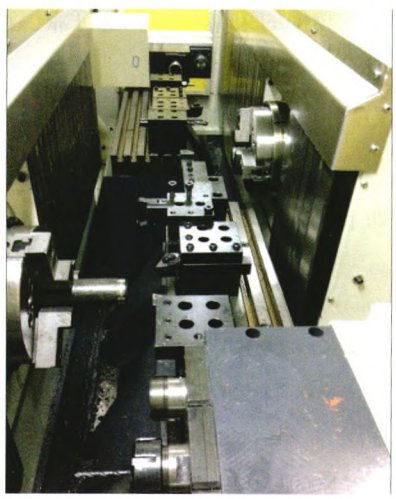
3. 机床应用

目前自主研发的支持主轴同步功能的双通道车床数控系统，已配套多个机床厂家的数控机床。在实际加工中得到应用和验证。如图6所示。

以上机床应用都是典型双通道机床布局，主控主轴与从控主轴对置，实际上根据需要也可配置在同一通道内，修改参数配置即可，这里就不一一展开，从实际效果来看，主轴电动机与主轴直连的情况下，同步效果最好，同步转速更高；若不是直连的情况，使用的编码器的线数越高，同步精度更高，调节更容易。



（a）主从主轴编码器线数9000



（b）主从主轴编码器线数1024

图6 机床应用

结语

在自主研发的双通道车床数控系统上实现主轴同步控制功能，关键的速度同步调节算法、相位同步调节算法和相位监视调节算法完全由CNC软件实现。通过LabVIEW测试分析，实验结果与设计初衷吻合；通过配套机床，实际加工应用，证明同步功能有效、可用，能够满足用户需求。

参考文献:

[1] 李耿轶，王宇融.数控机床多轴同步控制方法.制造技术与机床.2000(5):23-25

[2] 鲍二明. FANUC主轴同步控制功能在差壳内腔加工专机上的应[J].制造技术与机床.2008(3):59-63

[3] 刘浩波，钱龙宇，秦东.西门子数控系统同步动作的应用.机械与电子.2010(1):78-79

MW（收稿日期：20140621）

专家点评



本文介绍了主轴同步控制的应用，主要从速度同步调节、相位同步调节和相位监视调节的实现，来介绍主轴同步控制在双通道数控系统上实现的方法。本文还介绍了主轴同步控制的测试方法，以确保其正确性。本文所介绍的内容，对于数控机床的设计者是非常具有指导作用的，当然，对于数控机床的维修者来说也具有借鉴意义。

（上接第60页）

按下“Change ZO”按键后，会显示当前系统时间（见图2）。

3. 结语

经过上述方法处理后，操作者可以随时查看系统时间，操作方便，并且不需要设置相关权限。

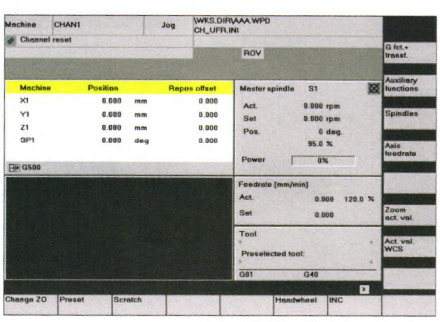


图 1

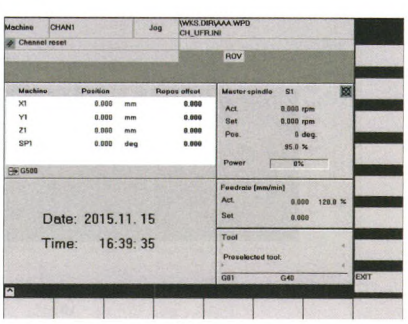


图 2

MW（收稿日期：20140601）