

数控机床螺距误差分析与补偿

NC Machine Pitch Error Analysis and Compensation

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 袁 林 李海滨
中国电子科技集团公司第三十九研究所设备保障技术室 杨 静

[摘要] 本课题对数控机床丝杠的结构及工作原理,以及数控机床的螺距误差对生产的影响进行阐述,并对各种螺距误差情况进行了分析与补偿,较全面地总结了螺距误差的各种情况。对有效改善机床定位精度和加工精度,以及数控机床的维护和合理使用具有重要的参考意义。

关键词: 丝杠 螺距误差 误差补偿 定位精度

[ABSTRACT] The structure of NC machine, the working principle, and NC machine pitch error on production are described, a variety of pitch error compensation cases are analyzed and compensated. How to compensate the appropriate pitch is suggested, comprehensive summary of the various situations of pitch error is made. The positioning accuracy and precision machine tools are improved, it is an important practical significance for NC machine tool maintenance and rational use of reference. And an example of application is carried out.

Keywords: Screw Pitch error Error compensation Position accuracy

现今制造业中,数控机床以其自身具有的优势得到空前地发展,发挥着巨大的作用,极大地影响了国民经济。数控机床集现代精密机械、计算机、通讯、液压气动、光电等多学科技术为一体,具有高效率、高精度、高自动化和高柔性等特点,是当代机械制造业的主流装备^[1]。

按照数控机床故障频率的高低,机床的使用期可分为3个阶段,即初始运行期(早期故障期)、相对稳定运行期(偶发故障期)和衰老期(耗损故障期),故障发生规律如图1所示。

初始运行期:数控机床整机安装调试后运行一年左右的时间被称为早期故障期,这段时间机床的故障率相对较高。

相对稳定运行期:机床经过了早期故障期后进入偶发故障期,也被称为相对稳定期(一般为7~10年),此阶段机床仍然有故障发生,但故障频率相对减少。

衰老期:机床经过了偶发故障期进入衰老期,这段时间由于机床的磨损、电器元器件品质下降,数控机床

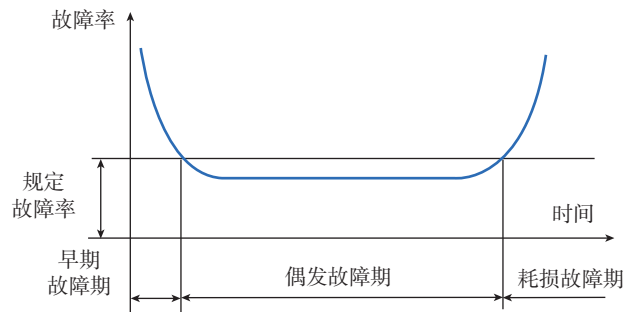


图1 故障发生规律曲线
Fig.1 Curve of fault occurring

的故障率又开始升高。

滚珠丝杠作为数控机床承载运动的部件,其故障发生的规律也大致符合该故障发生规律。

数控机床的定位精度是机床各个坐标轴在数控系统控制下达到的位置精度。根据实测的定位精度数值,可以判断机床在加工中所能达到的最好加工精度。同时数控机床各轴运动的准确程度,决定数控机床的定位精度,对数控加工质量至关重要。

国际标准化组织于1998年批准了“数控机床位置精度的评定”的有关标准(ISO230-2:1998);我国制定的“数字控制机应酬位置精度的评定方法”(GB10931-89)都对其有明确的要求^[2]。现今的数控机床在检测精度时基本上都采用激光干涉仪对数控定位精度进行测量,以此来满足现今国内机床的精度要求。在测量机床的螺距误差和进行反向间隙误差补偿时,必须要专业的人员进行操作。

1 滚珠丝杠的特点与工作原理

1.1 滚珠丝杠的特点

滚珠丝杠对性能的要求很严格,如需要传动可靠性高,摩擦损失小,传动效率高等。在机床各轴运行中,必须保证丝杠做工细腻,才能使其光滑、反应灵敏,从而实现机床的高精度(精度为 $\eta=0.92\sim0.96$)。同时在对丝杠施加预紧力后,只有确保消除轴向的间隙,才能保证小的反向误差和高定位精度的实现。

1.2 滚珠丝杠的结构及工作原理

(1)按滚珠丝杠的传动形式可分为:丝杠转动传动和螺母转动传动。

丝杠转动传动:就是丝杠转动,丝杠带动螺母并将其固定在工作台上,使工作台移动。此种传动方式大多在机床丝杠行程较短的情况下使用。这种类型安装方式是比较常见的,如普通的数控车床,铣床。

螺母转动传动:电机和螺母被做成一体,电机带动螺母在丝杠上进行运动,由此带动机床运动部件运动。这种传动方式一般用于丝杠较长的机床上,如龙门铣床,目的是为了防止丝杠因刚性不足而产生震动和变形。

(2)按滚珠丝杠螺母结构可分为:内循环和外循环。

外循环方式的滚珠丝杠螺母由丝杠、滚珠、回珠管和螺母组成。外循环方式中螺母螺旋槽的两端用回珠管连接起来,使滚珠能够从一端重新回到另一端,构成一个闭合的循环回路;内循环方式的关键是滚珠丝杠螺母在侧孔中装有圆柱凸轮式反向器,反向器上铣有S形回珠槽,可将相邻两螺纹滚道连接起来。滚珠从螺纹滚道进入反向器,借助反向器迫使滚珠越过丝杠牙顶进入相邻滚道,实现循环^[3]。

2 螺距误差与补偿分析研究

由于数控机床在起初安装的时候丝杠和螺母未能预紧到理想的状态,或者由于丝杠与螺母的相互运动,致使丝杠与螺母之间产生了间隙,使得机床运动部件在工作的时候不能达到预定的位置而产生误差,通常称此误差为螺距误差。如果机床存在螺距误差,在机床发出运动命令时,运动部件不能立刻开始运动,而是要先克服间隙的距离后才能开始运行,由此会产生机床的行程误差,而不能达到预定的位置。螺距误差的大小大致由丝杠和螺母的磨损程度和间隙决定。总结螺距误差与补偿主要有如下几种类型。

2.1 平行型螺距误差与补偿

如图2(a)所示,该轴的正向运行和反向运行的定位曲线基本平行,说明反向间隙在全行程中基本一致,如果经过多次测量较稳定,就可以对该轴的反向间隙进行消除(此补偿方法只限于反向间隙误差小的情况之下);如果反向误差比较大,应该对丝杠的机械安装结构进行预紧和校正,使正反向误差曲线趋于重合,从而消除机床反向间隙。通过螺距误差补偿的方法可以拉平误差曲线,使误差的增量大大减小。

2.2 喇叭型螺距误差与补偿

如图2(b)所示,机床的被测轴在全行程的各段误差

隙很大。这是由于该轴导轨副或丝杠副一头紧一头松造成的。在该轴的误差测量中,由于定位精度不是很理想,随着在该轴的运动距离增大,其精度随之变大,从而形成了喇叭型正反向定位曲线。这时,必须进行机械调整,如果不恰当地使用反向间隙补偿,则必然形成C型交叉型曲线。并且只有在机械调整后重新测定误差,才能进行相应的螺距和反向间隙补偿。

2.3 交叉型螺距误差与补偿

由于导轨副或者丝杠副一头紧或者一头松,而且丝杠和丝杠副的配合不是很好,所以在机床的重复运动过程中,机床的重复定位和定位精度得不到实现,经过检测得到的测量曲线如图2(c)所示为交叉型。此种情况可以对丝杠的机械安装结构进行预紧和校正,然后重新测量,按照得到的参数对机床进行误差补偿。

2.4 鼓型螺距误差

如图2(d)所示,在测量中,正向和反向的曲线不重合,但是两个端点重合的很好,这种情况往往是由于丝杠太长,而且刚性不足造成的。在两端反向间隙小,而在中间反向间隙大,这种情况可以通过适当的预紧丝

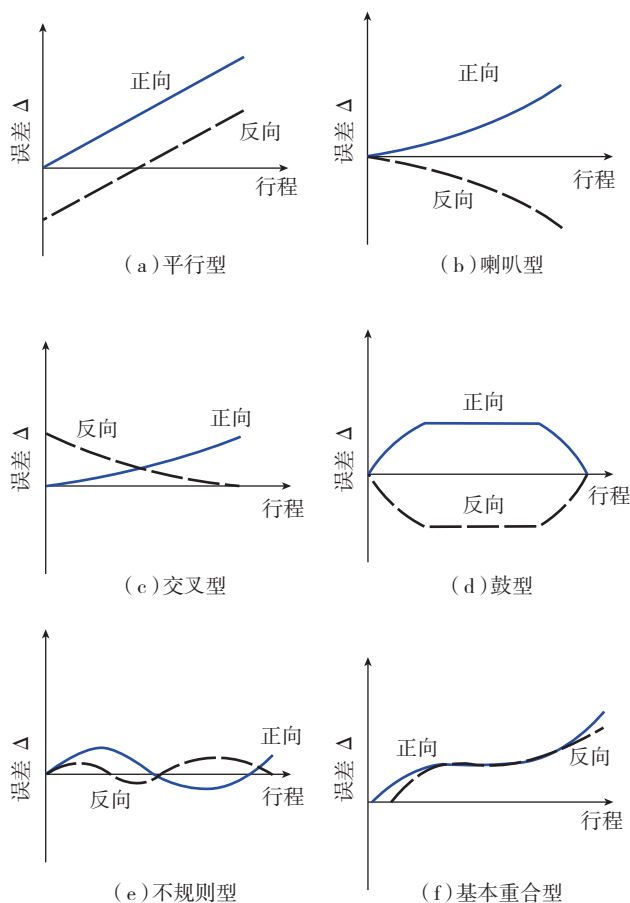


图2 机床螺距误差图

Fig.2 NC machine pitch error

杠来得到改善;或者在加工零件的时候尽量将其放在工作台中间,以此减小误差。

2.5 不规则型螺距误差与补偿

如图 2 (e) 所示,正向和反向的曲线很不规则,主要是因为驱动系统刚性太差,丝杠制造精度低所致。这种情况仅靠反向间隙补偿功能是难以奏效的,而必须对传动系统进行改进,提高其刚性和精度。如果一定要用反向间隙补偿,也只能通过计算平均反向值来进行补偿。

2.6 基本重合型螺距误差与补偿

如图 2 (f) 所示,正向和反向误差曲线基本重合,表明机床传动系统刚性和精度都很好,正向运行和反向运行的运行曲线基本吻合,不需要进行反向间隙补偿。但是由于机床的定位精度不是很好,所以需要进行螺距补偿。这时可以按照误差进行尝试性的补偿。

上述几种曲线图形是对单轴进行测量后得到情况的综合。在对轴进行螺距补偿和反向间隙补偿前,应当先尽可能消除丝杠的轴向窜动,具体做法为:在丝杠顶端的凹槽中粘住一颗铁珠,用百分表打在丝杠端部的铁珠上面,然后正反向移动坐标轴,检查是否有轴向窜动。若有窜动,首先松开一端丝杠螺母,紧固另一端丝杠螺母,然后再按丝杠预紧量进行预紧。然而多数情况下是由于丝杠顶端的轴承损坏导致了机床的轴向窜动^[4]。

2.7 双轴螺距误差补偿

对于一些高端数控机床系统,如西门子、FANUC 等公司还提供了机床丝杠的双轴螺距误差补偿功能,此功能是在机床的双轴分别设定补偿量,从而在正、反方向移动时分别进行补偿,使机床的各项精度得到提高。进行机床双轴螺距误差补偿的时候,应该注意的是:要同时进行双轴的螺距补偿。如果不进行妥善的误差预测,而盲目地运行机床,很有可能造成机床的双轴扭曲,从而造成生产事故。

3 某机床误差补偿实例

本课题采用一个工作中的实例来说明机床的螺距丝杠补偿。本例采用激光干涉仪为测量工具,干涉仪采

用 MJS5200 激光头,检测对象为某数控机床的 X 轴,机床采用的是西门子系统。

激光干涉仪技术指标:

仪器准确度:

(1) $\pm (R+0.10L)\mu\text{m}$ (真空), R 为分辨率 ($0.16\mu\text{m}$ 或 $0.02\mu\text{m}$)。

(2) $\pm 1.0 \times 10^{-6}\text{mm} \sim \pm 3.5 \times 10^{-6}\text{mm}$ (使用 MJS5460 波长补偿器)。

分辨率: $0.08\mu\text{m}$ (MJS5B 型)

最大测量速度: $300\text{mm/s}, 150\text{mm/s}$ (MJS5B 型 $0.08\mu\text{m}$)

最大测量距离: 20m

机床 X 轴距离: 500mm

空气温度: 23.96°C

材料温度: 24.24°C

空气压力: 976.27MPa

空气相对湿度: 0.57

测量步距: 25mm

测量终止点: 500mm

测量方向: 双向测量

循环方式: 线性循环

采样方式: 自动采样

评定标准: VDI-DGQ3441

由表 1 得到的数据,可以绘出误差曲线图,如图 2-f 所示,正向运行的曲线和反向运行的曲线基本相重合,此种曲线表明机床传动系统刚性和精度都很好。按照评定标准: VDI-DGQ3441 得到的评测结果如下:

轴线定位精度 (P): $51.43 (\mu\text{m})$

位置系统偏差 (Pa): $41.27 (\mu\text{m})$

最大换向误差 (U): $17.24 (\mu\text{m})$

平均换向误差 (U'): $8.03 (\mu\text{m})$

从评测结果得知:以上四种结果的数据不能满足数控机床的精度要求,所以必须对机床的反向间隙和螺距误差进行补偿。

反向间隙补偿流程:

menu select—启动—设定口令—输入西门子制造商

表1 补偿前误差数据表

位置/mm	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
正/mm	0.0	-6.5	-8.1	-10.3	-13.0	-15.5	-18.1	-20.8	-19.4	-15.6	-17.8
反/mm	-0.9	2.1	1.4	0.2	-1.6	-7.2	-9.4	-12.3	-14.4	-18.5	-22.0
位置/mm	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	
正/mm	-19	-21.6	-23.7	-24.9	-27.0	-29.7	-32.1	-34.9	-36.8	-38.2	
反/mm	-25	-29.2	-32.8	-35.8	-31.9	-45.1	-49.3	-48.6	-32.6	-39.2	

表2 补偿后误差数据表

位置(mm)	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
正(mm)	0.0	1.3	-0.3	0.4	0.3	0.6	1	1.3	1.6	2.4	2.9
反(mm)	1.4	-2.2	-3.3	-1.8	-0.9	-0.1	0.4	1.4	1.6	2.3	2.9
位置(mm)	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	
正(mm)	2.8	3.1	3.4	3.8	3.4	3.8	3.9	4.2	4.6	5.4	
反(mm)	3.8	5.0	5.2	5.2	5.3	5.2	5.1	5.2	5.2	5.8	

口令—机床数据—轴数据—修改 32450 参数来调整反向间隙—设 MD 有效—立即生效。

螺距补偿流程:

menu select—启动—设定口令—输入西门子制造商口令—机床数据—轴数据—用“轴+”或者“轴-”切换到相应的轴—修改 32700 参数为 0—执行螺补程序(或者把改好的补偿文件传到机床误差补偿数据内)—修改 32700 参数为 1—机床 NCK 复位—重新回参考点螺补生效反向间隙。参数 32700 和 32450 都有两个数值选项,其中下标为 1 的是光栅尺反馈的修正参数,下标为 0 的是电机编码器反馈的修正参数,修改的时候根据机床的实际反馈系统进行,如果是全闭环机床,则修改下标为 1 的参数,半闭环机床则修改下标为 0 的参数。

螺补数据(或者把改好的补偿文件传到机床误差补偿数据内):

```
METRIC CHANDATA(1)
$AA_ENC_COMP[1,0,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[1,1,AX1]=-0.0008
$AA_ENC_COMP[1,2,AX1]=-0.0021
$AA_ENC_COMP[1,3,AX1]=-0.0062
$AA_ENC_COMP[1,4,AX1]=-0.0097
$AA_ENC_COMP[1,5,AX1]=-0.0131
$AA_ENC_COMP[1,6,AX1]=-0.0157
$AA_ENC_COMP[1,7,AX1]=-0.0182
$AA_ENC_COMP[1,8,AX1]=-0.0203
$AA_ENC_COMP[1,9,AX1]=-0.0231
$AA_ENC_COMP[1,10,AX1]=-0.0258
$AA_ENC_COMP[1,11,AX1]=-0.0288
$AA_ENC_COMP[1,12,AX1]=-0.0313
$AA_ENC_COMP[1,13,AX1]=-0.0328
$AA_ENC_COMP[1,14,AX1]=-0.0345
$AA_ENC_COMP[1,15,AX1]=-0.0353
$AA_ENC_COMP[1,16,AX1]=-0.0369
$AA_ENC_COMP[1,17,AX1]=-0.0383
$AA_ENC_COMP[1,18,AX1]=-0.0397
$AA_ENC_COMP[1,19,AX1]=-0.0406
```

```
$AA_ENC_COMP[1,20,AX1]=-0.0402
$AA_ENC_COMP_STEP[1,AX1]=25
$AA_ENC_COMP_MIN[1,AX1]=0
$AA_ENC_COMP_MAX[1,AX1]=500
$AA_ENC_COMP_IS_MODULO[1,AX1]=0
M17
```

按照评定标准: VDI-DGQ3441 得到的评测结果如下:

轴线定位精度(P): $9.71 \mu\text{m}$
 重复定位精度最大(P_s): $1.27 \mu\text{m}$ 平均(P_s): $0.80 \mu\text{m}$
 位置系统偏差(P_a): $7.29 \mu\text{m}$
 最大换向误差(U): $3.44 \mu\text{m}$
 平均换向误差(U'): $1.13(\mu\text{m})$

补偿后的评定结果表明,机床的各项精度得到提高,各项精度指标均符合要求,证明此补偿方法很成功。

4 总结

本课题在论述丝杠工作原理的基础上,测量了数控机床的轴向误差并对所得的误差数据图进行分析研究,指出造成误差的各种因素,并且提出了相应的解决方案,同时应用实例进行阐述。本课题所分析的各种误差图形很全面地概括了日常检测和维修时所遇见的各种螺距补偿问题,对生产和维修有很大的指导意义。由于在进行螺距补偿时,很少能做到补偿一次就能达到理想的精度,因此可以按照某些规律进行多次尝试。进行操作的时候,必须由专业人士操作,虽然不同系统的机床它们的补偿方法也不一样,但其原理基本相同。

参考文献

- [1] 夏庆观. 数控机床故障诊断与维修. 高等教育出版社, 2002.
- [2] 张军, 吴则鹏. CNC 数控机床误差补偿系统及位置精度评定. 组合机床与自动化加工技术, 2006(6): 46-48.
- [3] 廖效果, 朱启述. 数字控制机床. 武汉: 华中科技大学出版社, 1991.
- [4] 李翠芝, 姜增辉. SINMERIK 840D 的定位精度补偿. 机械工程师, 2005(9): 51-53.

(责编 岭雾)