

基于时栅传感器的精密数控线切割机研发*

彭东林^{1,2}, 郑永², 杨继森¹, 万文略¹, 陈锡侯¹

(1 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054)

(2 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

摘要: 介绍了一种可用于内齿加工的高精度线切割机, 解决了三个关键技术问题: 基于时栅传感器的空心式高精度分度转台; 钼丝在加工过程中的自动检测与自动补偿; 空心转台的智能化时栅传感器、钼丝测量系统和线切割机中央控制系统三部分间的局部闭环及全系统大闭环数控。介绍了相关的理论基础、技术难点和设计思想。实践结果表明, 该系统实现了高精度、高效率、高可靠性和低成本等综合先进指标, 具有可以填补国内空白的良好市场前景。

关键词: 时栅; 传感器; 内齿; 线切割机; 数控

中图分类号: TH6 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.5099

Design of precise CNC wire-cutting machines based on time-grating sensors

Peng Donglin^{1,2}, Zheng Yong², Yang Jisen¹, Wan Wenlue¹, Chen Xihou¹

(1 Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment Ministry of Education,

Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2 School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract A new high precision line cutting machine has been presented in the paper, which resolves three key technical problems: hollow-type high-precision turntable based on time-grating sensor; molybdenum wire automatic detection and automatic compensation during processing; the local closed-loop among three parts that are hollow turntable intelligent time-grating sensors; molybdenum wire measurement systems and cutting machine central control system, and the large closed-loop of the whole numerical control system. The paper also introduces the relevant theory basis, technical difficulty points and design idea. Experiment results prove that the system realizes the following comprehensive advanced specifications such as high precision, high efficiency, high reliability and low cost and etc., and has promising prospects of filling a domestic blank.

Key words time-grating sensor; internal gear; wire-cutting machine; CNC

1 引言

在研制开发时栅位移传感器^[1-8]的过程中, 需要加工传感器定子线圈。它实际上是一个内齿环, 对齿形无要求, 但对等分性有很高的要求, 设计者希望达到优于 $\pm 5''$ 的分度精度。原采用传统的线切割机慢走丝工艺, 但即使在一台高精度的进口机床上依靠 X-Y 插补逼近加工方

法, 最后加工出的零件分度误差也达数十角秒, 且效率很低, 成本很高。为此在国产普通线切割机上, 加上自制的分度转台和钼丝测量系统, 达到了很好实用效果。

2 高精度空心转台

需要加工的传感器定子线圈如图 1 所示, 线切割机可以灵活使用, 用于加工各种零件。但它走 X、Y 直线精

度虽高, 圆分度却不是它的强项。

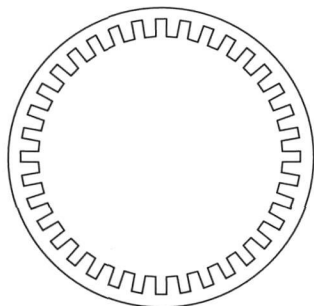


图 1 时栅传感器定子线圈基体

Fig 1 Stator coil basal body of time grating displacement sensor

线切割机通常采用 X、Y 逼近方法, 产生的角度误差推导如下:

图 2 中的 a 点是理论上的定位点, 用黑色实心圆点表示, r 为理论点半径。Δ 是机床的定位误差, X 方向和 Y 方向都有 ±Δ 的误差, 在 a 点四周还有 8 个空心的点, 这些点就是由定位误差造成的。选取如图所示的 b 点作为分析点, 由于 b 点产生的误差角度为 φ (因为 b 点产生的误差角度最大, 因此选择 b 点进行分析), b 点对应的半径为 R。c 点为辅助分析点。

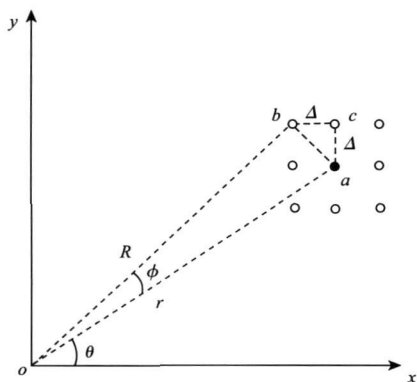


图 2 线切割机机床定位误差推导

Fig 2 Positioning error analysis of wire cut machine

由图可知, $|ac| = |bc| = \Delta$, 由于三角形 abc 为直角三角形, 因此:

$$|ab| = \sqrt{2}\Delta \quad (1)$$

a 点坐标为: $(r\cos\theta, r\sin\theta)$, 因此 b 点坐标为:

$(r\cos\theta - \Delta, r\sin\theta + \Delta)$, 所以:

$$R = \sqrt{(r\cos\theta - \Delta)^2 + (r\sin\theta + \Delta)^2} \quad (2)$$

在三角形 oab 中应用余弦定理:

$$\cos\phi = \frac{r^2 + R^2 - |ab|^2}{2rR} \quad (3)$$

将式 (1)、(2) 带入式 (3) 中, 化简得:

$$\phi = \arccos \frac{r + \Delta(\sin\theta - \cos\theta)}{\sqrt{r^2 + 2\Delta^2 + 2r\Delta(\sin\theta - \cos\theta)}} \quad (4)$$

线切割机床的定位精度一般为 $5\mu\text{m}$, 在此取 $\Delta = 3\mu\text{m}$, 利用 MATLAB 画图, 选取 $0^\circ \sim 90^\circ$, r 选取 $30 \sim 250\text{mm}$, 如 3 图所示。

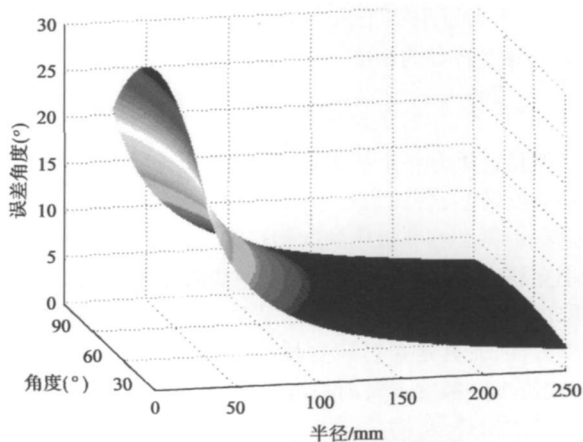


图 3 误差角度和半径与角度关系

Fig 3 Relationship of error angle vs radius and angle

由图中曲面可以看出随着半径的增加, 产生的误差角度值在降低。同样, 随着半径的减小, 误差角度会变大。为了弄清楚误差角度和角度 θ 的关系, 将图 3 向 Y、Z 平面投影, 并放大局部, 如图 4 所示。

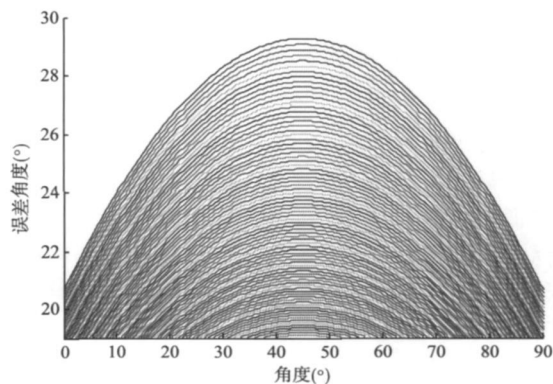


图 4 误差角度和角度关系

Fig 4 Relationship of error angle vs angle

图中每一根曲线代表在相同半径下的误差角度曲线。此图最上面那根曲线是半径为 30 mm 时对应的曲线。由此图分析可以得出: 在半径相同的前提下, 随着角度 θ 的增加, 误差角度在不断变大, 当 $\theta = 45^\circ$ 时达到最大值, 然后逐渐减小。

经过计算, 在 $\Delta = 3\mu\text{m}$ 时, 加工半径小于 350 mm (如果机床的 Δ 比较大, 这个半径还要变大) 时, 线切割机床定位产生的角度误差将大于 $2.5''$, 随着加工半径的减小, 角度误差将会变大, 在加工半径为 30 mm 时最大角度误差约为 $29''$ 。

上述分析可知: 线切割加工小半径工件时的分度误差相当大。

为了解决这个问题,专门设计增加一台高精度的圆分度转台置于机床工作台上,机床只需走 X-Y 直线坐标,加工完一个直齿后即退出。靠分度转台转动一个预定角度 α 后,再加工第 2 个齿。于是内齿环工件的分度精度取决于分度转台的精度。

$$\alpha = \frac{360^\circ}{Z} \quad (Z \text{ 为总的内齿数}) \quad (5)$$

但是这里有一个技术难题,如图 5 所示,如果采用普通的分度转台,台面是实心的,支撑工件的小立柱在转动的过程中将必然和机床的下钼丝臂发生干涉。曾采用多个小立柱支撑工件,当转动过程中快发生碰撞时,就停下来取出该立柱;当绕过下钼丝臂后又再装上。但这样做效率太低,尤其是在拆装立柱的过程中极易发生工件位移,致使工件精度丧失而报废。

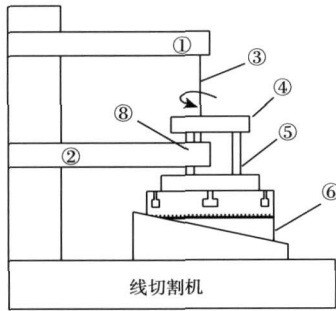


图 5 普通实心转台工作示意

Fig 5 Operating schematic diagram of common solid tumtable

采用空心转台后的加工示意如图 6 所示,此时下钼丝臂置于整个转台之下,大立柱支撑转台但不动。钼丝自上而下穿过工件和转台中心,小立柱支撑工件转动但整个加工过程不会发生与下钼丝臂的干涉现象。自行研发的空心转台采用了中空的轴系和自制时栅角位移传感器。其中时栅传感器精度达到 $\pm 1.2''$,空心转台分度精度达到 $\pm 2''$ 。

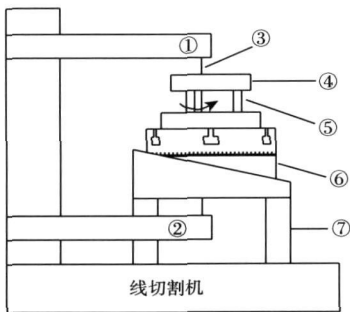


图 6 自制空心转台工作示意

Fig 6 Operating schematic diagram of selfmade hollow tumtable

在图 5、6 中: ①上钼丝臂; ②下钼丝臂; ③钼丝; ④工件; ⑤小立柱; ⑥转台; ⑦大立柱; ⑧发生干涉的位置。

3 钼丝自动检测与补偿

线切割机工作原理是将电极丝(钼丝)置于电源负极,加工工件置于电源正、负极。当极间施加电压,钼丝与工件之间的电解液将会放电,瞬时高温将使工件剥离与汽化,达到加工目的。长时间的使用将导致钼丝的磨损(变细),那么,加工最后一个齿的齿槽就会比第一个齿的齿槽小(尽管分度是精确的)。工件齿越多、工件越厚(或同时重迭加工的工件越多)、钼丝越旧,这种现象越严重。据实测,用一根旧的 $\phi 180 \text{ mm}$ 钼丝开始切齿,加工到最后一个齿只有约 $\phi 140 \text{ mm}$ 。

设计的钼丝自动测量机构如图 7 所示。它是由数显千分尺^[9]和 2 套电机执行机械所构成。在切完一个齿后的分度转位期间,步进电机 1 驱动机械装置运行到适当位置,步进电机 2 驱动千分尺测出当时钼丝的直径。采用的容栅式数显千分尺,输出为二进制串行数据,约 108 m 输出一次。

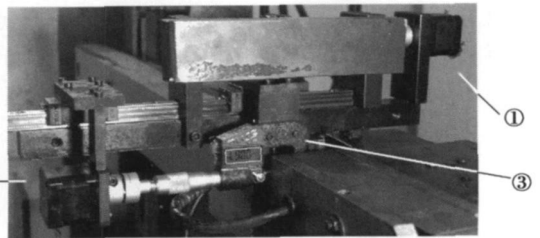


图 7 钼丝自检机构

Fig 7 Self checking mechanism of molybdenum wire

其中, ①步进电机 1; ②步进电机 2 ③数显千分尺。

自制的单片机数据处理与传输系统,经实测,误差小于 0.001 mm ,能够满足使用要求。将测试数据反馈回线切割机主机,自动对下一个齿的加工量予以补偿调整。

4 局部闭环与全系统大闭环数控

选用国产 KB-3000 线切割机床,全系统控制框图如图 8 所示。

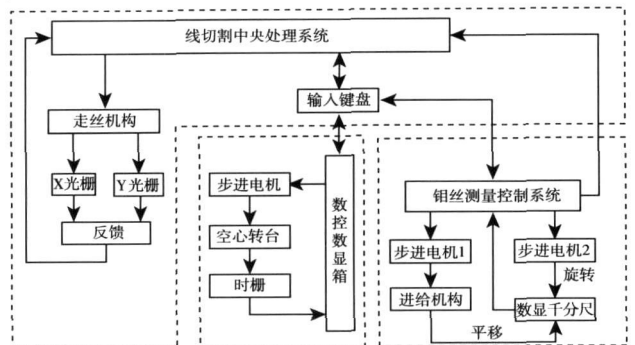


图 8 全系统闭环控制

Fig 8 Close-loop control diagram of the whole system

4.1 局部闭环

自动分度系统是整个全系统大闭环控制系统中的一个相对独立的局部控制系统,如图 5 中部的虚线框所示,主要负责整个系统加工过程中的高精度自动分度转位。该系统主要利用高性价比的两相步进电机作为驱动装置^[10-16],以嵌入到空心分度转台中并随着空心分度转台一起转动的时栅角位移传感器的测量值作为反馈数据,构成一个典型的闭环控制系统,达到系统所要求的高精度分度的目的。步进电机的步距角为 1.8° ,经过驱动器 200 倍细分之后,每个脉冲当量为 0.009° ($1.8^\circ/200$),再经过空心转台中蜗轮与蜗杆传动之后(蜗轮与蜗杆的传动比为 1:180),脉冲当量达到 $0.18''$ ($0.009^\circ/180=0.18''$),能够满足系统 $\pm 2.5''$ 的分度精度要求。

闭环控制系统根据用户输入所需加工内齿的齿数,并根据当前时栅传感器反馈的角位移测量值自动计算出各个“绝对”分度位置,以便加工过程中进行无累加误差的高精度自动分度。线切割机每切割完一个齿槽后,线切割中央处理系统向分度闭环系统发送“加工完成”状态命令,分度系统在收到该状态命令后,根据反馈的角位移测量数据采用分段步进,逐步逼近的闭环控制策略,每步进一段位移之后,再根据反馈数据确定下一段的步进位移,逐步步进到所需的分度位置。到达分度位置后向线切割中央处理系统发送“分度完成”状态命令,通知其进行该位置的线切割加工任务。

4.2 全系统大闭环数控

整个控制系统是由自动分度局部闭环控制系统、钼丝自动检测与补偿系统和线切割机控制系统构成,以自动分度闭环控制系统的分度工作状态信息作为反馈数据,构成全系统大闭环控制系统,以实现全自动高精度内齿线切割加工。线切割中央处理系统收到自动分度控制系统的“分度完成”状态命令后,根据钼丝自动检测与补偿系统所测量的钼丝直径,计算出钼丝补偿参数,再根据补偿参数确定该位置的线切割加工参数。完成该位置的线切割加工任务之后,向自动分度控制系统发送“加工完成”状态命令,通知其分度转位到下一个加工位置。

经过改造后的线切割机床如图 9 所示。上置分度转台即为自行研制的空心转台。整个加工过程实现了全自动化:按预定程序完成全部自动进丝、退丝;自动分度转位;钼丝自动补偿;……全部加工过程无需人工干预,工效比原来提高 20 多倍,分度精度基本上复现了转台的分度精度,约为 $\pm 2.5''$ (用海德汉圆光栅及细分卡对系统检定后得出的结论)。齿槽宽度的偏差则控制在 0.010 mm

以内,全面实现预定指标。

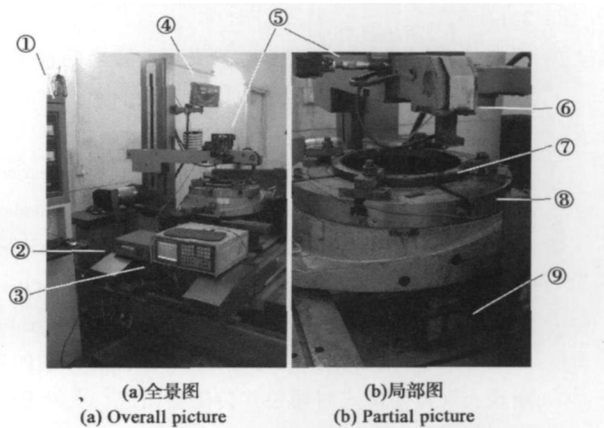


图 9 改造完毕的高精度内齿加工线切割机

Fig 9 Reformed high accuracy internal tooth processing line cutting machine

其中,①线切割中央控制机;②圆时栅电气箱;③数
控数显箱;④线切割机 X、Y 数显箱;⑤钼丝自检机构;
⑥上钼丝臂;⑦被加工工件;⑧空心转台;⑨下钼丝臂。

5 结 论

本项研究采用基于圆时栅传感器的空心转台,去实现圆时栅传感器的绕组基体加工,是一种典型的“误差遗传”工艺方式。但是当误差修正技术被引入其中之后,就可能实现“精度递增”,这将是本项目的创新性研究前景之一。

通过本项工作,还可以有几点展望:

1)空心转台适用于大型内齿加工,如风电、航母、大型矿山冶金机械等。而中空的转台机构很难采用中心安装的传统圆光栅等传感器,而图 1 所示的时栅正好派上用场。据调研,大型高精度空心转台在国内尚属空白,进口产品价格昂贵惊人,因此其市场前景极其广阔。

2)带内环精密回转分度加工功能的线切割机床尚未见报道,据称在用途广泛的雕刻机市场推广前景广阔。而钼丝自测补偿系统的采用,将使现有线切割机床加工精度上一个档次。

参考文献

- [1] 彭东林,张兴红,刘小康,等. 场式时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(3): 321-323
PENG D L, ZHANG X H, LIU X K, et al. Study on the time grating displacement sensor of the field type [J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument 2003, 24(3): 321-323
- [2] 彭东林, 张兴红, 刘小康, 等. 基于时空转换的精密位移测量新方法与传统方法的比较 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(4): 423-426
PENG D L, ZHANG X H, LIU X K, et al. Comparison between the principle of the new precision displacement measurement method based on time space coordinate transformation and traditional method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2006, 27(4): 423-426
- [3] 彭东林, 王彦刚, 万文略, 等. 时空坐标转换方法的增量式实现与增量式时栅位移传感器研究 [J]. 中国机械工程, 2007(4): 475-478
PENG D L, WANG Y G, WAN W L, et al. Incremental implementation of time space coordinate transformation and research on the incremental time grating displacement sensor [J]. China Mechanical Engineering 2007(4): 475-478
- [4] 王彦刚, 彭东林, 易文翠. 增量式时栅位移传感器原理及试验研究 [J]. 工具技术, 2006(11): 55-57.
WANG Y G, PENG D L, YI W C. Study on principle and experiment of incremental time grating displacement sensor [J]. Tool Engineering 2006(11): 55-57.
- [5] 郑方燕, 郑永. 时栅位移传感器示值误差测量不确定度分析及评定 [J]. 计量与测试技术, 2008, 35(2): 35-37.
ZHENG F Y, ZHENG Y. Analysis & evaluation of uncertainty about indication of time grating displacement sensor [J]. Metrology & Measurement Technique, 2008, 35(2): 35-37.
- [6] 郑方燕. 时栅传感器环节误差分析及检验标准的建立 [D]. 重庆: 重庆工学院, 2008 5-14
ZHENG F Y. Error analysis and establishment of test standard of time grating [D]. Chongqing Chongqing Institute of Technology, 2008 5-14
- [7] 王彦刚. 增量式时栅位移传感器原理及系统研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006 17-32
WANG Y G. Research on principle and system of incremental time grating displacement sensor [D]. Chongqing Chongqing University, 2006 17-32
- [8] 陈锡侯. 新型时栅位移传感器研究 [D]. 重庆: 重庆大学研究生院, 2007 17-40
CHEN X H. New type time grating displacement sensor [D]. Chongqing Chongqing University, 2007: 17-40
- [9] 马黎明. 电动直移式数显千分尺 [J]. 机械工程师, 2004(12): 67-68
MA L M. Electric direct moving digital micrometer [J]. Mechanical Engineer 2004(12): 67-68
- [10] 高忠华. 高精度数显时栅传感器自动测试标定系统 [D]. 重庆: 重庆工学院, 2008 8-21
GAO ZH H. Automatic testing and calibration system apply high precise digital display time grating sensor [D]. Chongqing Chongqing Institute of Technology, 2008 8-21
- [11] 徐光辉. 基于 FPGA 的嵌入式开发与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006 51-87
XU G H. FPGA-based embedded development and application [M]. Beijing Electronic Industry Press 2006 51-87.
- [12] 高忠华, 彭东林, 王先全, 等. 用于高精度数显时栅转台的全自动测控系统 [J]. 工具技术, 2008, 42(9): 95-97.
GAO ZH H, PENG D L, WANG X Q, et al. Full automatic test and control system of high precision time grating rotary table with digital display [J]. Tool Engineering 2008, 42(9): 95-97.
- [13] 胡超, 刘小康, 高忠华, 等. 基于 ARM 的高精度自动定位系统设计 [J]. 微计算机信息, 2009, 25(20): 101-103
HU CH, LIU X K, GAO ZH H, et al. Design of a high-precision automatic positioning system based on ARM [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(20): 101-103
- [14] 刘星辰, 刘东斌, 杜鹃. 步进电机控制系统的设计与实现 [J]. 微计算机信息, 2009, 25(22): 25-27.
LIU X CH, LIU D B, DU P. Design and realization of control system of stepper motor [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(22): 25-27.
- [15] 王宝忠, 王歆. 基于 FPGA 的新型步进电机驱动系统 [J]. 微计算机信息, 2009, 25(8): 213-214
WANG B ZH, WANG X. The new control in stepping motor driver system based on FPGA [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(8): 213-214
- [16] 罗福源, 周云飞, 尹涓. 基于多 FPGA 核的高速数据采集与控制系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(6): 49-53
LUO F Y, ZHOU Y F, YIN J. Design of high speed data acquisition and control system based on multiple FPGA chips [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument 2007, 21(6): 49-53

作者简介



彭东林, 1992 于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学教授、博士研究生导师, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail pd@cqut.edu.cn

Peng Donglin received Ph. D. degree from Chongqing University in 1992. He is currently a professor in Chongqing University of Technology and doctoral supervisor in Hefei University of Technology. His research interests are precision measurement technology and instrument.



郑永, 2005 年于青岛科技大学获得学士学位, 2008 年于重庆工学院 (现为重庆理工大学) 获得硕士学位, 2008 年至今在合肥工业大学攻读博士学位, 主要研究方向为传动误差测试领域和仪器仪表中的微电子设计。

E-mail sdzzy@163.com

Zheng Yong received B. Sc. from Qingdao University of Science & Technology in 2005, and M. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2008. He is pursuing Ph. D. degree in Hefei University of Technology. His research interests are transmission error test and microelectronics design in instruments and meters.